

アルゴンホールスラスタの推進性能評価

Optimization of Hall Thruster Using Argon Propellant

○山崎 純子・野中 正潤・横田 茂・嶋村 耕平(筑波大)

○Junko Yamasaki・Masahiro Nonaka・Shigeru Yokota・Kohei Shimamura(University of Tsukuba)

Abstract

Recently, alternative propellant is required because xenon price is increasing yearly. Argon which is the cheapest gas to use Hall thrusters, have not been a strong candidate because of its poor performance. Therefore, we improved Hall thruster shape to enhance argon performance. We clarified that the shorter channel length is suitable for the xenon propellant, while the longer discharge channel is suitable for the argon propellant from the view point of thruster performance.

記号の説明

λ : 平均自由行程
 n : 中性粒子数密度
 σ : 電離衝突断面積
 I_d : 放電電流
 I_b : イオンビーム電流
 I_g : ガードリング電流

質量の小ささから排気速度を早くすることができ、高比推力化が期待できるため、魅力的な推進剤である。しかし、電離電圧が高く、電離に多くのエネルギーが使われるため、原理上推進効率が低いことが分かっている⁽⁴⁾。一方で、代替推進剤の研究は、従来のキセノンに最適化されたホールスラスタに他の推進剤を流して性能を計測するにとどまっており、推進性能が低いなりにも改善がなされたことはない。そこで、本研究では、特にアルゴンの電離を促進すべく、推進剤流量をキセノンに比べて多く流した場合、アルゴンの電離能に合わせてホールスラスタ内部の形状を変更した場合について、推進性能評価を行った。

1. はじめに

近年、Boeing の 702SP などによって全電化衛星の商業利用がされており⁽¹⁾、今後、電気推進機を用いた大量物資輸送等への期待が高まっている。中でもホールスラスタは推力密度が高いため⁽²⁾、有力な候補として研究が進められている。

ホールスラスタには一般的に推進剤としてキセノンが使用されているが、埋蔵量が少ないため非常に価格が高く、ここ 10 年で価格は 4 倍に上昇している⁽³⁾。したがって、今後電気推進を使い続けるためには代替推進剤の検討が不可欠である。代替推進剤の研究については、活発に研究がされており、例えばビスマスはロシアの TsNIMASH で 25 kW のアノードレイヤー型ホールスラスタにおいて、 $I_{sp}6000$ s の作動が実証されている⁽⁴⁾。また、ヨウ素については James J. Szabo らによって 200 V で $I_{sp} 1500$ s が確認されている⁽⁵⁾。しかし、ビスマスやヨウ素は固体推進剤であるためにガス化する装置が必要になり、供給システムが複雑化することになる。推進剤として使用できるガスのうち、最も安価なのはアルゴンであり、また、アルゴンはその

2. 実験装置および条件

2.1 長チャンネル化ホールスラスタ

アルゴンの推進性能が低い原因として、排気速度が速いために十分に電離される前に中性粒子が排気されてしまっていることが挙げられる⁽⁶⁾。そこで、中性粒子を放電チャンネル内部に留めることで電離を促進できるように、チャンネル長さを延長した。長さは、平均自由行程にしたがって決定し、アルゴンの平均自由行程はキセノンの約 3 倍であるため、従来の 3 mm から 9 mm に延長した。平均自由行程は以下の式から求めた。

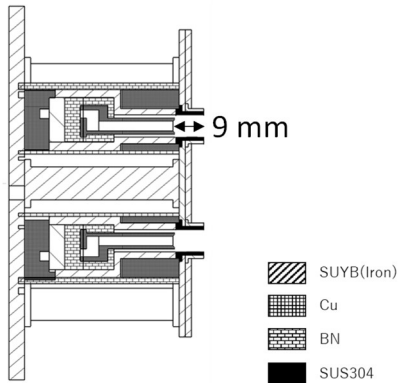


図1 設計変更後のホールスラスタ

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \quad (1)$$

設計変更後のホールスラスタの断面図を図1に示す。

2.2. 試験環境および試験条件

推進性能試験は ISAS/JAXA 宇宙科学研究所の大型チェンバー（直径 2.5 m, 長さ 5 m）を用いて行った。大型チェンバー写真を図2に示す。

実験には筑波大学で開発された、加速チャンネル中心の直径が 38 mm のアノードレイヤー型ホールスラスタを使用した。ホローカソードは Intelvac 製の I4000HC010 を使用した。

推力測定には、振り子式推力測定器を使用し、イオンビーム電流はホールスラスタの全面に 250×300 mm の銅板を 240 mm 離して置き、-20 V 印加することで計測した。

また、9 mm チャンネルを使用することで、ガードリングにイオンが衝突しやすくなることが予想されるため、ガードリング電流を計測した。

表1に実験条件を示す。推進剤はキセノンとアルゴンを使用し、推進剤流量は 2~5 A_{eq} まで変化させた。印加磁場は 10~60 mT までの間で変化させ、アノード効率率が最大になる値を印加した。ホールスラスタのチャンネルは従来の 3 mm と設計変更した 9 mm のものを使用した。



図2 宇宙科学研究所大型チェンバー

表1 実験条件

パラメータ	値
放電電圧, V	200
最大磁場, mT	10~60
推進剤	アルゴン, キセノン
体積流量, A _{eq}	2~5
チャンネル長さ, mm	3, 9

4. 実験結果

4.1 流量増加による推進性能

図3に 3 mm チャンネルでの流量を増加させた場合の、I_{sp} とアノード効率を示す。アルゴンの場合は、流量が 2 A_{eq} から 3 A_{eq} への増加で I_{sp} 489 s, アノード効率 4.5% から I_{sp} 1178 s, アノード効率 16.8% に増加した。一方、キセノンの場合は 2 A_{eq} から 3 A_{eq} に流量を増加させると、I_{sp} が 1384 s から 1323 s に低下し、アノード効率が 44.7% から 30.7% に 14% 低下した。これらの原因を明らかにするため、推進剤利用効率、エネルギー効率、加速効率を調査した。

図4に 3 mm チャンネルでの流量を増加させた場合のガードリング電流に対する推進剤利用効率を示す。アルゴンの場合は流量が 2 A_{eq} では 23.5%, ガードリング電流 0.1 A であった。3 A_{eq} では 60.7%, ガードリング電流 0.23 A と推進剤利用効率、ガードリングともに上昇した。これは電離量が増えたため、ガードリングに衝突するイオンも増加したと考えられる。キセノンの場合は 2 A_{eq} から 3 A_{eq} へ

の増加で推進剤利用効率は90.0%から92.1%とわずかな上昇であったが、ガードリング電流は0.23 Aから0.49 Aに増加した。この結果として、推進効率の低下を招いたことになる。

図5に3 mmチャンネルでの流量を増加させた場合のエネルギー効率を示す。アルゴンの場合は2 A_{eq}でエネルギー効率32.7%、ガードリング電流0.1 Aであったのが5 A_{eq}ではエネルギー効率56.2%、ガードリング電流0.38 Aと上昇がみられた。このことから、流量を増やすと電子と中性粒子の弾性衝突も増えることで拡散が増し、高エネルギーの電子が上流側に行きやすくなり、したがって放電室全体的に広がって電離が行われる。その結果、上流のポテンシャルが高い位置で電離する粒子も現れて、平均としてエネルギー効率が上昇したと考えられる。また、上流に広がることで壁面にイオンも衝突しやすくなるため、ガードリング電流も増加したと考えられる。キセノンの場合は、2 A_{eq}でエネルギー効率74.9%、ガードリング電流0.23 Aであった。3 A_{eq}ではエネルギー効率67.5%、ガードリング電流0.49 Aであった。これも、よりポテンシャルが高い上流に電離位置が広がったためガードリングへの衝突が増加してしまい、その結果エネルギー効率が低下したと考えられる。

図6には3 mmチャンネルでの流量を増加させた場合のイオンビーム電流に対する加速効率を示す。アルゴンの流量が2 A_{eq}で加速効率41.6%、ガードリング電流0.1 Aであり、3 A_{eq}では加速効率71.4%、ガードリング電流0.23 Aであった。したがって、流量が増加すると加速効率は上昇した。これは、質量流量が増加すると中性粒子密度が増加して衝突確率が増加したためにイオンが増加したためである。一方、キセノンの場合は流量が2 A_{eq}で加速効率が64.9%、ガードリング電流0.23 Aであり、3 A_{eq}に増加するにしたがって、加速効率は49.3%に低下し、ガードリング電流は0.5 Aへ増加した。流量が増加するにしたがってイオンは増加するが、上流で電離しているためガードリングへの衝突への影響のほうが大きくなったため、加速効率が低下したと考えられる。

4.2 アルゴン適用チャンネルによる推進性能

図7に3 mmチャンネルの場合と9 mmチャンネルの場合の I_{sp} とアノード効率の比較を示した。ここで、アルゴンの流量は3 A_{eq}、キセノンは2 A_{eq}を上限としているのは、それ以上の流量では放電電流が大きくなり電源装置の都合上、計測することができなかったからである。図7より、アルゴンでは9 mmチャンネルを使うことにより3 mmチャンネルを使

った場合よりも I_{sp} が約2倍上昇した。アノード効率は4.5%から5.8%に上昇した。一方、キセノンの場合は I_{sp} が1384 sから1413 sに上昇したが、アノード効率は44.7%から25.9%へ効率が低下した。これは、すでに最適化されている状態から、下流にさらに壁面が伸びるため、損失する確率が増えてしまうと考えられる。

図8に3 mmチャンネルの場合と9 mmチャンネルの場合のガードリング電流に対する推進剤利用効率を示す。図8より、設計変更後の9 mmチャンネルを用いた場合、アルゴンの流量が2 A_{eq}では推進剤利用効率が37.2%、ガードリング電流は0.85 Aとなり、どちらも3 mmチャンネルの場合の23.5%、ガードリング電流0.1 Aよりも増加した。その両方の効果のうち、電離の効果のほうがより有効となったため、効率が上昇したと考えられる。9 mmチャンネルでのキセノンの場合は推進剤利用効率96.2%となり、3 mmチャンネルの場合の91.0%よりもわずかに上昇したが、ガードリング電流は2.09 Aとなり3 mmチャンネルの場合よりも10倍に増加した。これは9 mmチャンネルではキセノンイオンが排気される前にガードリングに衝突してしまい損失になっているからであるといえる。

図9に3 mmチャンネルの場合と9 mmチャンネルの場合のガードリング電流に対するエネルギー効率を示す。図9より、9 mmチャンネルを用いた場合、アルゴンは流量が2 A_{eq}でエネルギー効率53.4%、ガードリング電流0.85 Aとなり3 mmチャンネルの場合の32.7%、ガードリング電流0.1 Aよりも上昇した。これは、長いチャンネルを使うことによってアルゴンは広い範囲で電離が起これ、その結果チャンネル内のイオンが増加してガードリング電流が増加したためである。一方、キセノンの場合は、9 mmチャンネルではエネルギー効率51.3%、ガードリング電流2.09 Aとなり、3 mmチャンネルの場合よりもエネルギー効率は減少したが、ガードリング電流は1.89 A増加した。これは、キセノンの電離位置が下流に広がり、エネルギー効率が低下したと考えられる。また、長いチャンネルを使うことで上流付近で電離しやすいキセノンが、チャンネルに衝突しやすくなり、ガードリング電流が増加したと考えられる。

図10に3 mmチャンネルの場合と9 mmチャンネルの場合のイオン電流に対する加速効率を示す。図10より、9 mmチャンネルを使用した場合、アルゴンの流量が2 A_{eq}で加速効率は37.5%であり、3 mmの場合の41.6%から低下したが、イオンビーム電流は0.47 Aから0.74 Aに上昇している。これは電離が

促進したことによるイオン電流の増加と広範囲の電離によるガードリング電流の増加によると考えられる。しかし、チャンネルが長くなったことによりイオンのガードリングへの衝突が増え、加速効率は低下した。9 mm チャンネルでのキセノンの加速効率は 52.0% となり、3 mm チャンネルの場合の 64.9% から低下した。長いチャンネルを使ったことで、上流で電離しているキセノンはイオンがチャンネルに衝突しやすくなり、損失が増加したため、加速効率が低下したと考えられる。

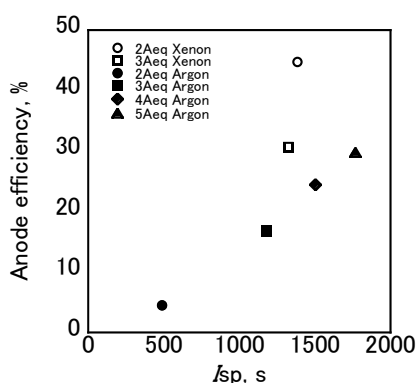


図 3 I_{sp} に対するアノード効率 (3mm チャンネル)

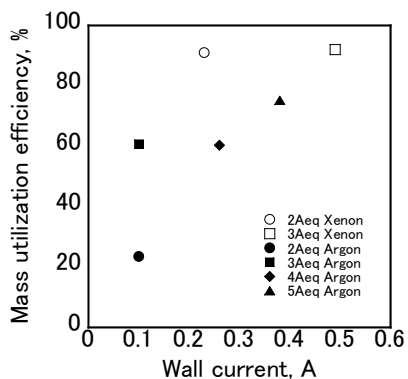


図 4 ガードリング電流に対する推進剤利用効率 (3mm チャンネル)

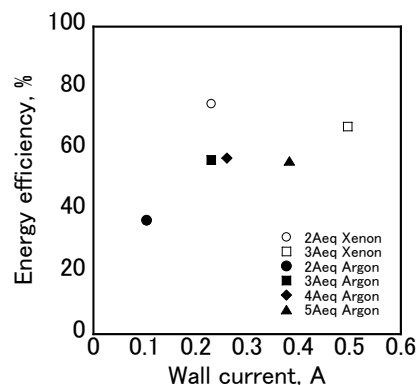


図 5 ガードリング電流に対するエネルギー効率 (3mm チャンネル)

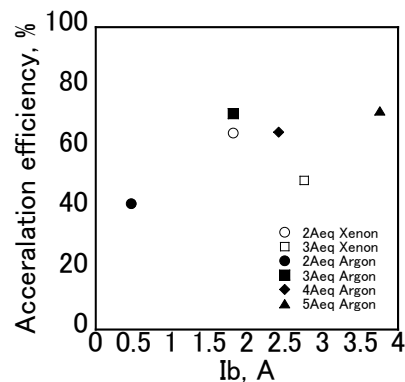


図 6 イオン電流に対する加速効率 (3mm チャンネル)

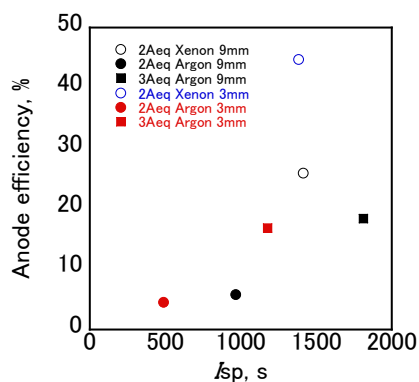


図 7 I_{sp} に対するアノード効率 (3mm 9mm チャンネル)

5. まとめ

本研究ではアルゴン推進剤の高性能化のためスラスタ内部のチャンネル形状をアルゴンの平均自由行程に合わせて設計変更し、推進性能評価を行った。その結果、アルゴンは広範囲で電離が起きることにより推進剤利用効率が1.6倍上昇した。また電離領域が下流から上流に広がることで高いポテンシャルで電離するイオンが増えたことからエネルギー効率が1.6倍上昇した。この効果により、アノード効率および I_{sp} が上昇したと考えられる。一方、チャンネルを長くすることによりガードリング電流が増大したことも確認したため、ガードリング電流を低減することでチャンネル形状を最適化しうると言える。

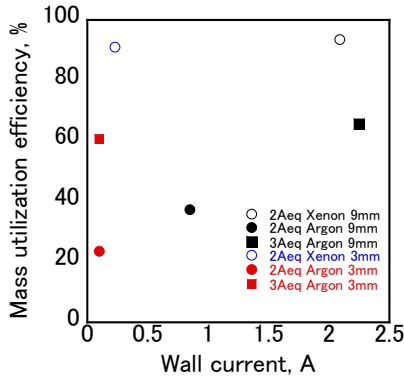


図8 ガードリング電流に対する推進剤利用効率

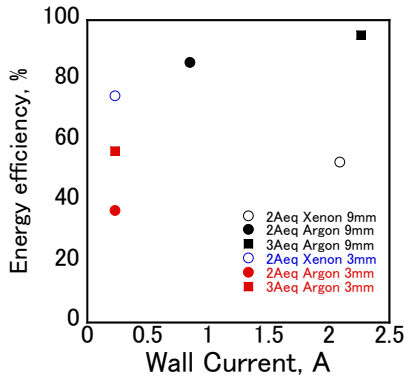


図9 ガードリング電流に対するエネルギー効率
(3mm9mm チャンネル)

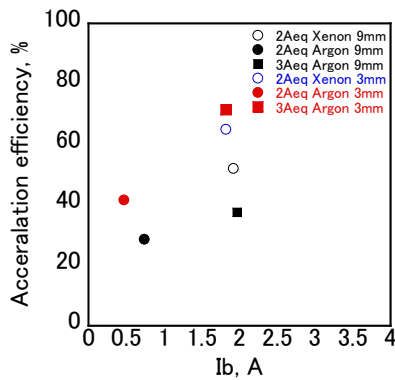


図10 イオン電流に対する加速効率(3mm9mm チャンネル)

参考文献

- (1) 杵淵紀世志, “国産ホールスラスタへ期待,” 宇宙輸送シンポジウム, 2013.
- (2) D. M. Goebel, I. Katz, Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, Jet Propulsion Laboratory, 2008.
- (3) D. A. Herman, K. G. Unfried, Xenon Acquisition Strategies for High-Power Electric Propulsion NASA Missions, 7thSpacecraft Propulsion Subcommittee (SPS), 2015.
- (4) Tverdokhlebov, S. O. T. Oleg S., A. V. Semenkin, “An Overview of the TsNIIMASH / TsE efforts under VHITAL Program,” IEPC, 2005.
- (5) J. Szabo, B. Pote, S. Paintal, M. Robin, A. Hillier, R. D. Branam, R. E. Huffmann, “Performance Evaluation of an Iodine-Vapor Hall Thruster,” *Journal of Propulsion and Energy*, 第 24 卷, 第 4, 2013.
- (6) Daiki Fujita et.al, “Operating Parameters and Oscillation Characteristics of an Anode-Layer Hall Thruster with Argon Propellant,” *Vacuum*, 第 110, p. 159-164, 2014.
- (7) E. Chal, D. B. Scharfe, M. K. Scharfe, M. A. Cappelli, “Hybrid Simulations of Hall Thrusters Operating on Various Propellants,” 29th International Electric Propulsion Conference, 2009.