

アルゴン推進剤を用いたホールスラスタの最適化

Optimization of Hall Thruster Using Argon Propellant

○山崎 純子・横田 茂・野中 正潤・村山 侑太郎・丸山 映美
伊藤 裕紀・嶋村 耕平(筑波大)

○Junko Yamasaki・Shigeru Yokota・Masahiro Nonaka・Yutaro Maruyama・Emi Maruyama
Yuki Ito・Kohei Shimamura (University of Tsukuba)

Abstract

Recently, an alternative propellant is required because xenon price is increasing yearly. Argon which is the cheapest gas to use for Hall thrusters, has not been a strong candidate because of its poor performance. Therefore we improved the 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 viewpoint 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_a : 放電電流
 I_b : イオンビーム電流
 I_g : ガードリング電流

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、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、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 [1]。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 [2]。また、ヨウ素については James J. Szabo らによって 200V で $I_{sp} 1500$ s が確認されている [3]。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るが、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、性能が出ないことが分かっている [4]。しかし、アルゴンはその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。また、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らず、推進性能が低い傾向にある。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 [5]。そこで、本研究グループでは、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。その結果、9 mm のチャンネルを使用することで、体積流量が 2 Aeq の場合アルゴンの推進剤効率が 23 % から 37 % に上昇した。一方で、ガードリング電流が 0.1 A から 0.85 A まで上昇した。これは、チャンネル長を延長することで電離は促進されたが、広範囲で電離が行われたことでガードリングへの衝突が増加し、損失になっていると考えられる。そこで、本研究では、アルゴン推進剤に対して、電離促進とイオンのガードリングへの衝突による損失のバランスが最適なチャンネル形状を模索することを目的とした。

3. 実験装置および条件

アルゴンに最適なチャンネル長を模索する方法として、1 章で述べたように、3 mm から 9 mm の間で、電離の促進とイオンのガードリングへの衝突による損失のバランスの取れる長さの閾値を調べる必要がある。そこで、

新たに 3 mm, 5 mm, 7 mm のチャンネルを設計し, 推進性能評価を行った。

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 2.5m, 長さ 5m) 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トを使用した。ホローカソードは Intrvac 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 13.9~69.5 sccm まで変化させた。印加磁場は 10~60mT までの間で変化させ, アノード効率が最大になる値を印加した。



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	250
最大磁場, mT	10~60
推進剤	アルゴン, キセノン
体積流量, sccm	1~5Aeq
チャンネル長さ, mm	3, 5, 7

4. 実験結果

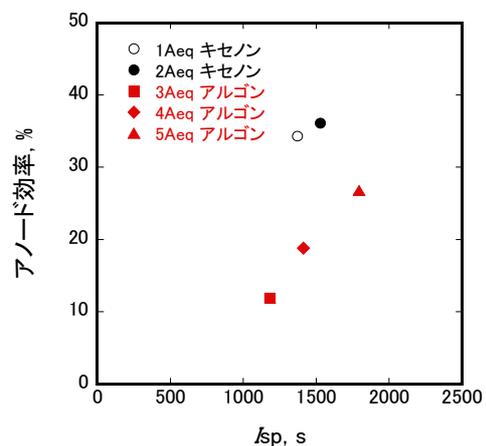
図 3 の (a)~(c) に 3 mm, 5 mm, 7 mm チャンネルの I_{sp} とアノード効率を示す。アルゴンとキセノンの流量がチャンネルによって異なるのは, それ以上の流量では放電電流が大きくなり電源装置の都合上, 計測することができなかったからである。すべてのチャンネルにおいてアルゴンは推進剤流量が増えるにしたがってアノード効率, I_{sp} ともに増加したが, キセノンは推進剤流量が増えることで, アノード効率, I_{sp} ともに減少した。3 mm チャンネルと 5 mm チャンネルの結果を比較すると, アルゴンは 4 Aeq において 18.8 % から 27 % までアノード効率が上昇しているが, キセノンは, 1 Aeq, 2 Aeq ともにアノード効率が低下した。5 mm チャンネルと 7 mm チャンネルの結果を比

較すると, アルゴン 3 Aeq においてアノード効率, 比推力ともに増減は見られなかった。それぞれの原因を明らかにするため, ガードリング電流を調査した。

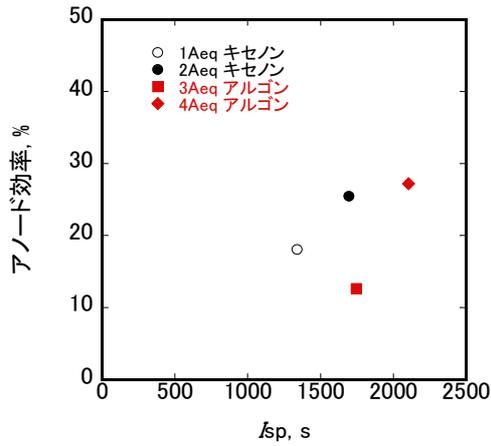
図 4 の (a)~(c) に 3 mm, 5 mm, 7 mm チャンネルの体積流量に対するガードリング電流を示す。すべてのチャンネルにおいて, アルゴン, キセノンともに流量が増加するにしたがってガードリング電流が上昇した。これは電離量が増えたため, ガードリングに衝突するイオンも増加したと考えられる。

図 4(b)より, アルゴン 4 Aeq で 3 mm チャンネルの場合には 0.3A であったが, 5 mm チャンネルを用いた場合のガードリング電流は, 1.2 A となり, 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。一方キセノン 1 Aeq でのガードリング電流は 0.1 A から 0.35 A まで上昇がみられた。これは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。

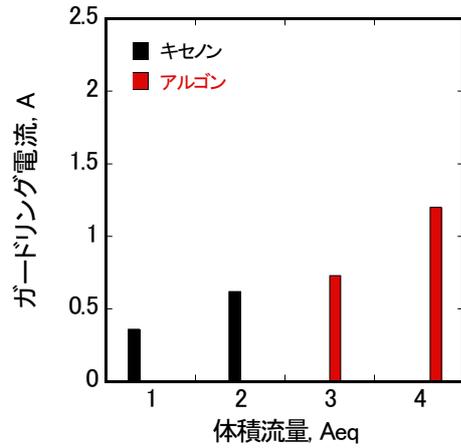
図 4(c)より, 7 mm チャンネルを用いた場合のガードリング電流は, アルゴン 3 Aeq で 1.6 A となり, 5 mm チャンネルの 2 倍に増加した。しかし, 図 3(b)(c)より, アノード効率, 比推力ともに変化は見られなかった。これは, チャンネルを長くしたことにより, 電離量に対してイオンの壁面衝突による損失量が増加するためである。したがって, チャンネルの長さ 5 mm が電離による効果が最大となる閾値である可能性が高いといえる。また, キセノンは, 5 mm チャンネルから 7 mm チャンネルを使うことによりガードリング電流が大きく増加した。これよりキセノンは, チャンネルの上流付近で電離しており, 壁面衝突がしやすいと考えられる。



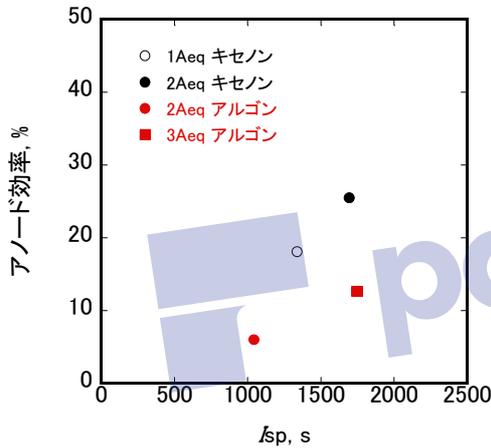
(a) 3mm チャンネル



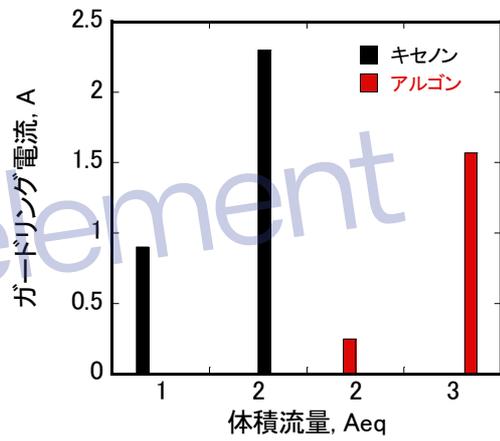
(b) 5mm チャンネル



(b) 5mm チャンネル



(c) 7mm チャンネル



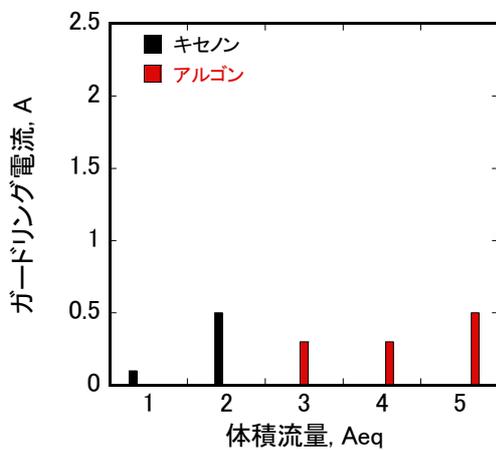
(c) 7mm チャンネル

図3 I_{sp} に対するアノード効率

図4 体積流量に対するガードリング電流

5. まとめ

アルゴン推進剤に対して、電離促進とイオンのガードリングへの衝突による損失のバランスが最適なチャンネル形状を模索することを目的とし、3 mm, 5 mm, 7mm のチャンネルを用いて推進性能評価およびガードリング電流の計測を行った。その結果、5mm チャンネルで電離の促進の効果がイオンの壁面への衝突による損失よりも大きくなる閾値をとることがわかった。今後は、イオンのエネルギー測定とプローブによる診断を行い、内部のプラズマを明らかにする。



(a) 3mm チャンネル

参考文献

- [1] D. A. Herman , K. G. Unfried, Xenon Acquisition Strategies for High-Power Electric Propulsion NASA Missions, 7thSpacecraft Propulsion Subcommittee (SPS), 2015.
- [2] Tverdokhlebov, S. O. T. Oleg S. , A. V. Semenkin, “An Overview of the TsNIIMASH / TsE efforts under VHITAL Program,” IEPC, 2005.
- [3] 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 卷 24, 第 4, 2013.
- [4] Daiki Fujita et.al, “Operating Parameters and Oscillation Characteristics of an Anode-Layer Hall Thruster with Argon Propellant,” *Vacuum*, 第 卷 110, p. 159-164, 2014.
- [5] 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.