

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820415

研究課題名(和文)ヘリコン波プラズマの宇宙用電子源への適用研究

研究課題名(英文)Feasibility Study on Helicon Wave Plasma Cathode for Space Applications

## 研究代表者

渡邊 裕樹(Watanabe, Hiroki)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：30648390

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：イオンエンジンやホールスラストの従来の電子源であるホローカソードの代替となる宇宙用電子源を目指して、電子生成に高周波放電を用いた電子源を製作し、外部磁場による電子放出性能への影響を評価した。実験結果より、高周波電力が100 W以下の作動範囲では、外部磁場が放出電子電流に与える影響は小さく、ヘリコン波によるプラズマ生成、それに伴う電子電流の増加は確認されなかった。また、製作した電子源をホールスラストと組み合わせ作動させた結果、ホローカソードと同程度の放電電流および推力が出力可能であることを確認した。一方で、0.3 kWを超えるホールスラストへの適用にはさらなる省電力化が必要であることが判明した。

研究成果の概要(英文)：A radio frequency (RF) plasma cathode with an external magnetic field have been researched as an electron source to remove the drawbacks with dispenser hollow cathodes from ion and Hall thrusters. We evaluate the electron-emission performance of the RF plasma cathode and the operating characteristics of the combination of a 1-kW class Hall thruster and the RF plasma cathode. The effect of the external magnetic field on the emission electron current is small. Based on this result, the high density plasma produced by helicon waves was not confirmed in the operating range of RF power from 20 W to 100 W. The anode efficiency of the RF plasma cathode is comparable to that of a hollow cathode. However, because of the high RF power consumption, the total efficiency of the RF plasma cathode is lower than that of the hollow cathode at higher anode mass flow rate. This result indicated that for space-related applications, it is important to reduce the power consumption of RF plasma cathode.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：電子源 高周波放電 電気推進 ホールスラスト イオンエンジン

1. 研究開始当初の背景

(1) イオンエンジンやホールスラスタといった静電加速型の電気推進機は、推進機内部で推進剤を電離、生成したプラズマからイオンを静電気力により加速、排気し、推力を得る。このため、静電加速型の電気推進機には、加速するイオンの生成および宇宙機の電気的中性を保つためのイオンの中和に必要な電子を供給する機器（電子源）が必要となる。これらの推進機は低推力ではあるが、低い推進剤消費率を達成することができる。近年、有人宇宙探査や月面基地建設の機運が高まり、大量の物資を効率良く輸送するために電気推進機の大推力化が進み、大電流を出力可能な電子源が求められている（引用文献①）。

(2) 現在、この電子源にはホローカソード（Hollow Cathode: H/C）が用いられており、大推力の電気推進機に必要な 10~100 A の電流を出力可能な宇宙用電子源はこれ以外に存在しない。H/C は内部に挿入された熱電子放出源からの電子を利用し、低消費電力・消費ガスで大電流を出力可能である。一方、挿入された熱電子放出源の劣化を防ぐため、H/C は製造から運用終了まで厳重な管理が必要となる。また、使用可能な推進剤の種類に制限があり、高純度の推進剤が求められる。加えて、酸素や二酸化炭素などが少量でも存在する環境での使用は不可能である。このため、運用コスト・作動環境の面から、H/C の使用が忌避もしくは使用不可能な宇宙ミッションにおいては、H/C の代替となる宇宙用電子源が求められている。

2. 研究の目的

H/C の代替となる宇宙用電子源を目指して、電子生成に高周波プラズマを用いた電子源を設計・製作し、外部磁場による電子放出性能の変化を評価することにより、ヘリコン波誘起による大電子電流出力の可能性について明らかにする。また、製作電子源をホールスラスタに組み合わせて作動させ、H/C を用いた場合との比較を実施し、製作電子源の宇宙用電子源への適用性について評価する。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に示すように高周波プラズマ電子源（Radio Frequency Plasma Cathode: RF/C）に外部磁場を形成するためのコイルを取り付けた電子源を製作し、電子源の評価で一般的な二極管試験構成を用いて、引き出し電圧に対する電子電流について評価を実施した。製作電子源は、アルミナ製の放電室、黒鉛製のイオン捕集電極、電子放出のためのオリフィスプレート、プラズマと高周波電力を誘導結合させるための銅製のインダクションコイル、外部磁場を形成するための外部コイルから構成されている。また、プラズマ生成には 13.56 MHz の高周波を使用し、作動ガスにはイオンエンジンおよびホールスラスタの推進剤として一般的なキセノンを用いた。

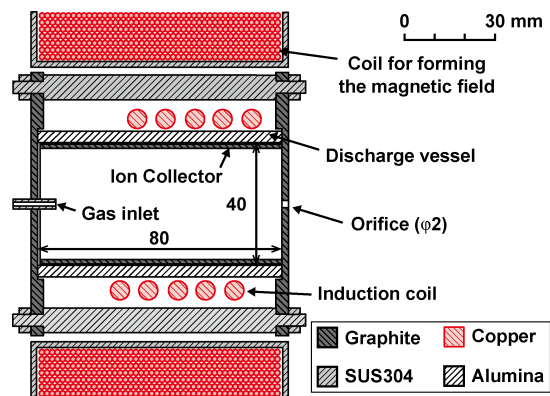


図 1 外部磁場印加型の高周波プラズマ電子源概要。

(2) 製作した RF/C の宇宙用電子源への適用性を評価するために、1 kW 級のアノードレイヤ型ホールスラスタとの組み合わせ作動を実施した。推進性能の比較評価を実施するために、製作電子源とは別に Ion Tech 社製の HCN-252 ホローカソードを用いた組み合わせ作動も実施した。どちらの作動実験とも、推進剤にはキセノンを使用した。また、単体作動時と同様に RF/C のプラズマ生成には 13.56 MHz の高周波を使用した。推進性能を評価するためにホールスラスタの推力は振り子式スラストスタンドを使用し、各部に流れる電流はホール素子を用いた電流センサを用いて計測した。

4. 研究成果

(1) 製作電子源の単体作動時の性能評価結果を図 1 および図 2 に示す。図 1 は電子源の外部に巻かれたコイルに流した電流（放電室内に形成される磁場の強さに影響）に対する電子源から引き出された最大の電子電流を示す。一方、図 2 は最大の電子電流を引き出すために電子源下流に設置された陽極電極に印加した直流電圧を縦軸に示したものである。図 1、図 2 のどちらの場合でも、プロットの各色は電子源に投入した高周波電力を示す。図 1 より、電子源から引き出される最大の電子電流は投入された高周波電力に比例して増加するが、放電室内に形成した磁場の影響はほぼ存在しない。一方、図 2 より、引き出しに要する直流電圧はコイル電流 0.3 A 付近に最下点が存在し、高周波プラズマ電子源の電子放出性能に対して最適な磁場強度が存在することが明らかとなった。本研究の意図であるヘリコン波誘起による電子数密度の上昇、それに伴う放出電子電流の増加は、高周波電力 100 W までの作動範囲では確認できなかった。この様に、外部磁場による電子源内部プラズマの変化は起こらなかった一方で、図 2 に示すように引き出しに要する電圧は磁場印加により減少しており、電子源外部に形成されるプラズマブリッジ部分でのプラズマ生成が磁場印加により効率的に行われたことにより、プラズマインピーダ

ンスが低下し、引き出しに要する電圧が低下、性能改善に寄与したと考えられる。今後は、電子源の各部をより高温に耐えられるよう改修を施し、100 W 以上のより大電力下でのヘリコン波誘起によるプラズマ生成を試みる必要がある。

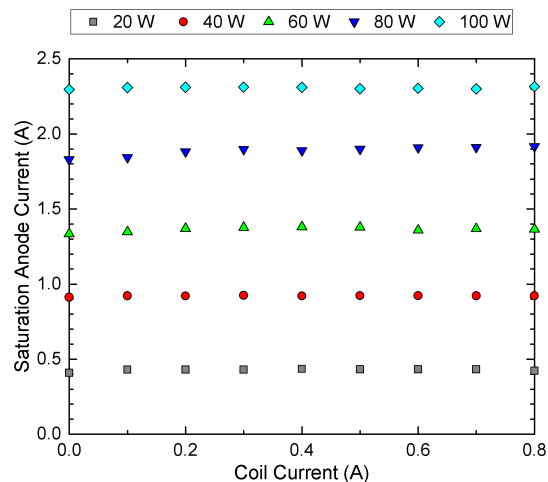


図 2 外部磁場形成用コイル電流に対する電子源から引き出せる最大電子電流. なお、投入キセノンガス流量は 0.12 mg/s.

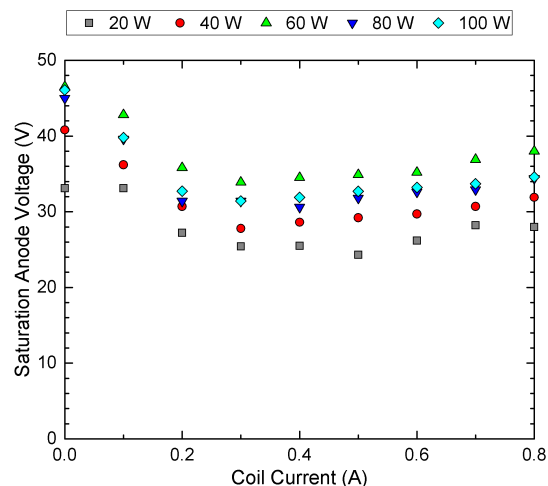


図 3 外部磁場形成用コイル電流に対する最大電子電流を電子源から引き出すために必要な引き出し電圧. なお、投入キセノンガス流量は 0.12 mg/s.

(2) 製作電子源をホールスラストに組み合わせ、作動させた際の推進性能を図 4 から図 7 に示す. 各図とも横軸は陽極と電子源の間に印加した直流電圧 (放電電圧) を示し、縦軸は図 4 では陽極に流れた直流電流 (放電電流)、図 5 は推力、図 6 は接地電位と電子源電位との電位差、図 7 は推進効率を示す. また、比較のために H/C を用いた場合の各値も各図にプロットしている. 図 4 の RF/C と H/C の比較より、放電電流に対する電子源の種類の影響はほぼ存在しない. また、図 5 の推力の比較から、陽極流量が 1.0 mg/s の場合には、RF/C を用いた場合には推力が 0.5 mN 程度大きく、2.0 mg/s の場合には同程度、2.9

mg/s の場合には 1.0 mN 程度低下することが明らかとなった. 加えて、図 6 より、H/C を用いた場合には陽極に流すキセノンガス流量による電子源電位の変動が小さいのに対して、RF/C の場合にはその変動が大きい. 特に、2.9 mg/s 作動時には、H/C が -21~-24 V に対して、RF/C は -31~-43 V まで負に沈み込んでいる. この電子源電位の沈み込みにより、イオンの加速に用いられる電位差が減少し、電子源の種類により推力に若干の差が生ずることが判明した. 以上の結果より、若干推力評価に誤差が生じるが、製作した電子源がホールスラストの地上試験用の電子源として適用可能であることが確認された. 一方、スラストと電子源に投入した電力およびガス流量をどれだけ推進方向の運動エネルギーに変換できたかを示す推進効率における電子源の差を比較すると、図 7 より、1.0 mg/s

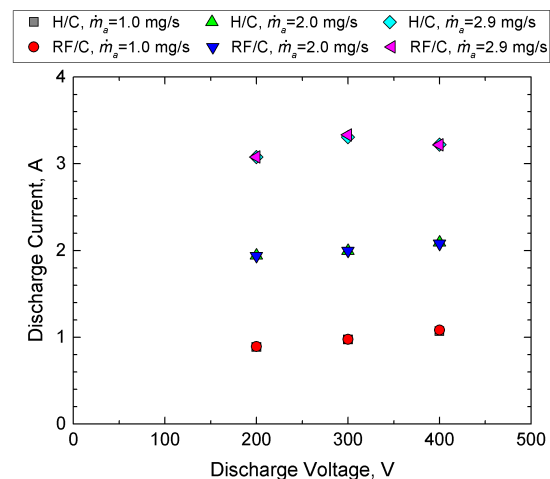


図 4 ホールスラスト作動時の放電電流に対する電子源種類の影響. なお、どちらの電子源を使用した場合でも、電子源に流すキセノンガス流量は陽極に流したキセノンガス流量の 10% に設定.

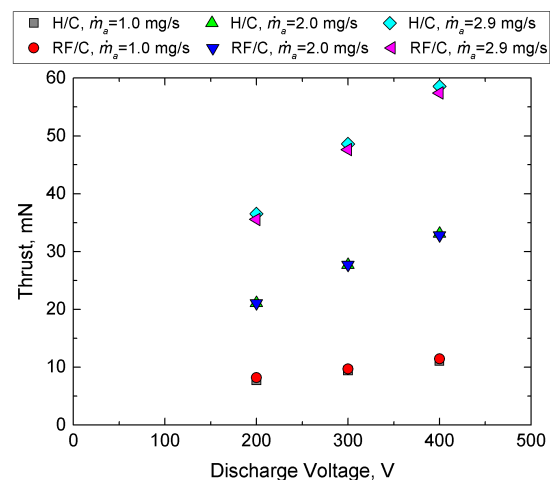


図 5 ホールスラスト作動時の推力に対する電子源種類の影響. なお、どちらの電子源を使用した場合でも、電子源に流すキセノンガス流量は陽極に流したキセノンガス流量の 10% に設定.

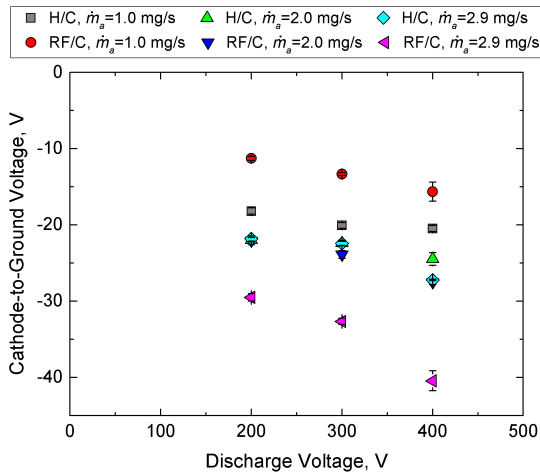


図 6 ホールスラスタ作動時の電子源電位-接地電位間の電位差に対する電子源種類の影響. なお, どちらの電子源を使用した場合でも, 電子源に流すキセノンガス流量は陽極に流したキセノンガス流量の 10% に設定.

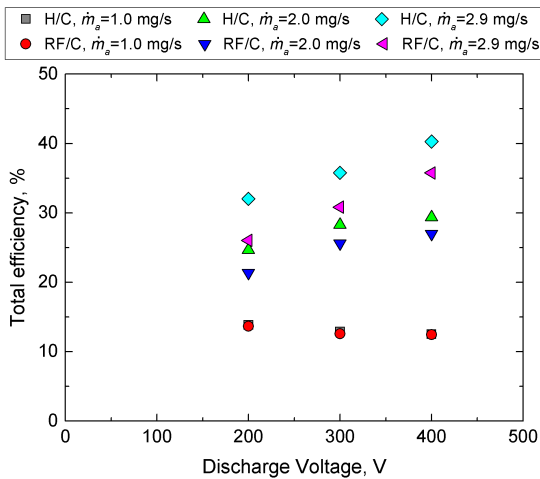


図 7 ホールスラスタ作動時の推進効率に対する電子源種類の影響. なお, どちらの電子源を使用した場合でも, 電子源に流すキセノンガス流量は陽極に流したキセノンガス流量の 10% に設定.

の作動点であれば H/C と RF/C は同程度の性能を示すが, 2.0 mg/s 以上では陽極に流すキセノン流量が増大するほど, H/C に比べて RF/C の推進効率は低下することが判明した. この結果より, 現状の製作電子源の性能では, 0.3 kW 級のホールスラスタであれば宇宙での実用に耐えられる消費電力・消費ガス流量であるが, それ以上の大電力のホールスラスタへの適用のためには, より省電力化が必要となることが浮き彫りとなった.

#### <引用文献>

- ① Dan M. Goebel and Ronald M. Watkins, "Compact lanthanum hexaboride hollow cathode," *Review of Scientific Instruments*, vol. 81, 083504, 2010.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 渡邊裕樹, 市村正範, 竹ヶ原春貴, "高周波プラズマ電子源を用いたホールスラスタの作動特性," *日本航空宇宙学会論文集*, 査読有, Vol. 64, No.3, pp.171-181, 2016.
- ② 青柳潤一郎, 太田知里, 鳥井夏実, 笠上聡志, 渡邊裕樹, 竹ヶ原春貴, "外部磁場を印加した誘導結合プラズマ電子源の性能評価," *プラズマ応用科学*, 査読有, Vol. 21, No. 1, pp. 3-8, 2013.

[学会発表] (計 7 件)

- ① Hiroki Watanabe and Haruki Takegahara, "Electron Emission Characteristics and Plasma Parameters in a Radio Frequency Plasma Cathode," 9th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Bangkok (Thailand), Mar. 11-14, 2016.
- ② 渡邊裕樹, 竹ヶ原春貴, 宮坂武志, 山本直嗣, 船木一幸, "長寿命・高効率ホールスラスタシステムの開発," 平成 27 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県相模原市), 2016 年 2 月 23 日-24 日.
- ③ Hiroki Watanabe, Yuki Miura, Masanori Ichimura, Takanori Deguchi, Shuka Takeda, Chisato Ota, and Haruki Takegahara, "Performance Evaluation of TAL-type Hall Thruster with RF Plasma Cathode," 34th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2015-217, Kobe Convention Center (Kobe, Hyogo), Jul. 4-10, 2015.
- ④ Hiroki Watanabe, Takanori Deguchi, Chisato Ota, Jun Sato, Shuka Takeda, Yuki Miura, Yuki Sato, Masanori Ichimura, and Haruki Takegahara, "Performance Evaluation of Radio Frequency Plasma Cathode for Hall Effect Thruster," 34th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2015-194, Kobe Convention Center (Kobe, Hyogo), Jul. 4-10, 2015.
- ⑤ Hiroki Watanabe, Natsumi Torii, Satoshi Kasagami, Haruki Takegahara, "Radio Frequency Plasma Cathode for High-power Ion and Hall Thruster," Plasma Conference 2014, S2-4, Toki Messe (Niigata, Niigata), Nov. 18-21, 2014.
- ⑥ 鳥井夏実, 渡邊裕樹, 笠上聡志, 太田知里, "100A 級 RF カソードの作動特性," 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2013-012, 宇宙科学研究所 (神奈川県相模原市), 2014 年 1 月 16 日-17 日.

- ⑦ Hiroki Watanabe, Natsumi Torii, Satoshi Kasagami, Junichiro Aoyagi, Haruki Takegahara, “High Current Inductively Coupled Plasma Cathode for High Power Hall Thruster,” 29th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS-2013-b-36, Nagoya Congress Center (Nagoya, Aichi), Jun. 2-9, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 裕樹 (WATANABE, Hiroki)

首都大学東京・システムデザイン研究科・  
助教

研究者番号：30648390

(2) 研究分担者 無

(3) 連携研究者 無