

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月6日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14874

研究課題名(和文) 能動的な電位勾配形成による無電極静電加速プラズマスラストの研究

研究課題名(英文) Study of electrodeless electrostatic accelerated plasma thruster by the active potential gradient

研究代表者

大塩 裕哉 (Oshio, Yuya)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任助教

研究者番号：80711233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ホローカソードの電位分布計測を種々の動作条件で実施した。非常に低い空間電位を持ち陽極近傍において電子シースが生じる動作モードが存在することが示された。これは、高い流量によりプラズマ不安定性が抑制されたからであると考えられる。進行波磁場印可装置の更なる改良を実施し、高い加速効率が期待できるシステムを構築した。RF放電で形成したプラズマに進行磁場を印可した結果、最大30%を超えるのプラズマ加速が確認され、進行磁場によるプラズマ加速が示された。一方で、進行磁場による電子温度と電子数密度の増加も同時に確認され、電位勾配によるプラズマ加速と圧力増加によるプラズマ加速の割合は今後の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究でのホローカソードプルームの計測により、プラズマ中の電位勾配が流量や電流により大きく変化することが示され、電位が低く電位勾配が生じない新しい動作モードを発見した。これは、ホローカソードの長寿命化につながる発見である。進行磁場を用いた無電極のプラズマ加速手法が本研究で初めて実証された。この加速手法は、既存の無電極加速手法に比べ高い加速効率が理論的に期待されており、今後の研究により高い効率を実証することにより、既存の電気推進機より遥かに長寿命な推進機の実用化が期待できる。これは、衛星の長寿命化や更なる高度な宇宙ミッションの実現へつながる成果である。

研究成果の概要(英文)：The potential measurement of the hollow cathode was conducted in various operation conditions. The low potential and the electron sheath near the anode was observed. This is caused by suppression of the plasma instability by high mass flow rate. The 40% plasma acceleration by the traveling magnetic field. From this result, the demonstration of the plasma acceleration by the traveling magnetic field was succeeded. The increment of the electron temperature and the electron number density was also measured, and the separation between the acceleration by the potential gradient and the acceleration by the pressure increase is a future issue.

研究分野：宇宙工学

キーワード：電気推進 RFプラズマ 無電極スラスト 進行磁場

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

プラズマスラスタは、高い燃費性能を持ち実用化が進められているが、プラズマ加速・生成用電極や電子源の損耗により寿命が制限されてしまう課題がある。そこで、無電極でプラズマ生成・加速するプラズマスラスタが提案研究されている。プラズマ生成については、高周波放電の研究によりヘリコン放電など高効率な生成が達成されてきている。一方、無電極のプラズマ加速については大電力条件において高い効率が報告されているものの、数 kW 級のスラスタにおいては低いという問題がある。高いプラズマ加速効率を示すことができれば既存のプラズマスラスタに比べ遥かに長寿命なスラスタを実現可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、能動的にプラズマ中に無電極で電位勾配を生成することでプラズマを加速させることを目指す。まず、ホローカソードにおいてブルーム中の動作条件と電位構造との関係を明らかにし、どのようにプラズマ中に電位構造が生じるかを明らかにする。加えて、複数コイルを用いた進行磁場システムを構築しプラズマに印可することで、進行磁場によるプラズマ加速を実証することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1)ホローカソード実験

ホローカソード実験においては、 $\text{LaB}_6$  という低仕事材料を用いたホローカソードを利用し、カソード下流 20 mm 位置に円筒型の陽極を設置し放電を行った。円筒陽極下流からシングルプローブを挿入し、ホローカソードブルーム中のプラズマ・電位計測を実施した。計測は、プローブに  $\pm 35\text{V}$  の三角波を印可し電流-電圧特性を取得することで、電子温度・電子数密度・空間電位を取得する。また、バイアス電圧を固定した状態でイオン飽和電流の時間変動計測も実施した。

#### (2)進行磁場プラズマ加速実験

7つのコイルにそれぞれ  $90^\circ$  の位相差を印可することで、任意の位相速度の進行磁場を生成可能な進行磁場発生装置を構築した。高周波電源を  $180^\circ$  ならびに  $90^\circ$  の位相差をつけた上で分割するハイブリッドカップラーを2段に取り付けることで達成している。この装置を RF 放電の放電管外部に設置することで、RF 放電によって生成したプラズマに進行磁場を印可する実験を行った。本研究では、放電管内にマッハプローブを挿入し、進行磁場の有無の条件で電子数密度・電子温度・イオンマッハ数の計測を行った。

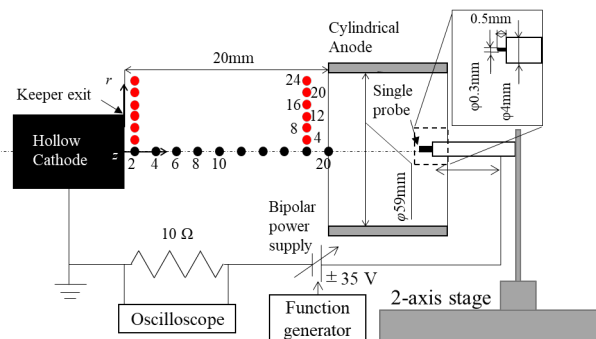


図1 ホローカソードの実験の実験セッティング。

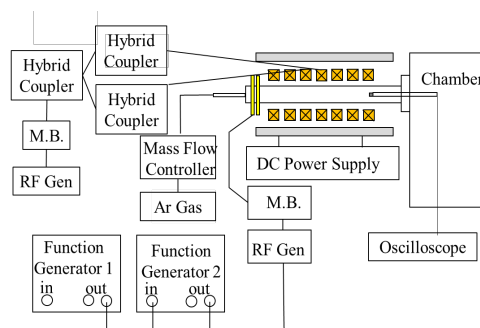


図2 進行磁場加速実験装置概略図。

### 4. 研究成果

#### (1)ホローカソードブルームの電位分布

ホローカソードには Plume モードと Spot モードという大きく2つのモードが存在する。Spot モードでは比較的安定した放電が生じ空間電位は低いが、Plume モードではイオン音波不安定性などの不安定性が生じ空間電位が高いと報告されてきた。図3は本研究で得られたホローカソードブルームの空間電位分布である。20,30sccm が Plume モード、40sccm が Spot モードである。本研究において、図3に見られるように Plume モードの方が低い電位を持つ動作モードが発見された。この動作モードの空間電位は放電電圧より低いため陽極近傍において電子シースが生じていることが示唆される。図4には、Plume モードにおけるイオン飽和電流の時間変動の周波数特性を示す。イオン音波不安定性などは  $>100\text{ kHz}$  で顕著になることが知られているが、この動作モードにおいては電離不安定性に起因すると考えられる  $<50\text{ kHz}$  の振動が支配的であった。このことから、イオン音波不安定性などのプラズマ不安定性が生じていないことがこの動作モードの要因であると考えられる。本研究により、空間電位が低い Plume モードが新しく発見された。この動作モードはホローカソードの損耗の低減や接触電圧低下による消費電力低減へつながる可能性を持つ。一方で、プラズマ不安定性を積極的に活用するために、更なる発生条件の解明への調査が必要である。

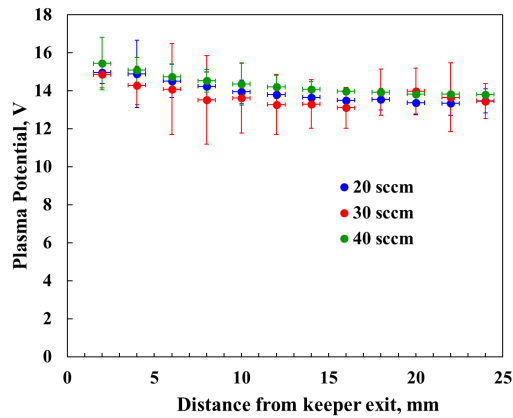


図3 ホローカソードプルームの空間電位分布.

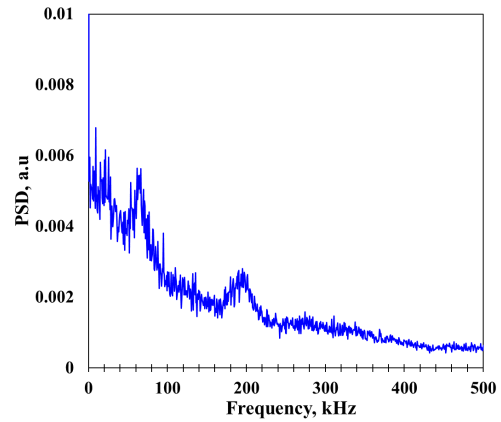


図4 イオン飽和電流の時間変動の周波数特性.

## (2) 進行磁場発生装置の構築

本研究では、まず進行磁場による電子へのプラズマ吸収量と拡散によるプラズマエネルギー損失により決まる投入エネルギーのプラズマへの吸収効率を求める式を導出した。この式を用いて10kW級の実機を想定したスケールにおいて50%以上の推進効率が期待できることを示した。しかし、このような規模のスラスタには大規模な真空槽や電源系などが必要となるため、小型装置において加速の実証実験を行うこととした。最大1.5kWの電力を印可できる図2に示すような進行磁場発生装置を構築した。磁気プローブを用いて進行磁場発生装置の軸方向の位相差を計測し、設計値とほぼ一致していることから進行磁場の生成に成功した。

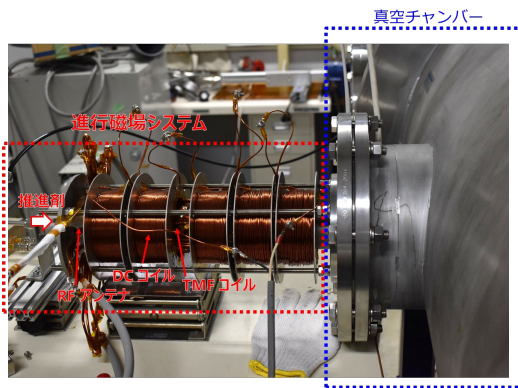


図5 進行磁場発生装置とRF放電システム.

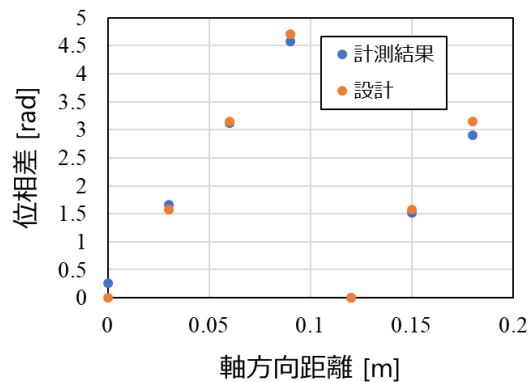


図6 進行磁場の各位置での位相差.

## (3) 進行磁場のプラズマへの印可と加速実験

次に、RF放電を行う放電管に進行磁場発生装置を取り付け、プラズマへの進行磁場印可実験を行った。プラズマには反磁性の特性があり磁場がプラズマ中に浸透しない条件が存在する。本研究ではプラズマ中に磁気プローブを挿入し、プラズマ中の進行磁場強度を計測した。図7に示す通り、プラズマの有無による進行磁場強度の差はなくほぼ100%の浸透率を達成した。次に、マッハプローブを放電管内に挿入しイオンマッハ数の計測を行った。進行磁場を印可しない場合はマッハ数0.35であったものが進行磁場を印可することで最大0.53まで上昇した。この結果より、初めて進行磁場による完全無電極でのプラズマ加速を実証することができた。しかしながら、進行磁場によりプラズマ圧力の上昇も確認しており、計算上の圧力上昇分よりも大きなプラズマ加速は得られているものの、能動的な電位勾配によるプラズマ加速の割合を求めるには更なる調査が必要である。

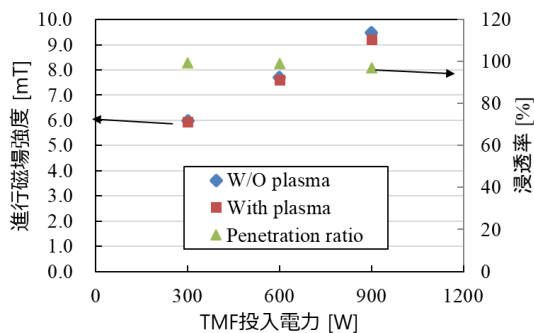


図7 進行磁場の浸透率.

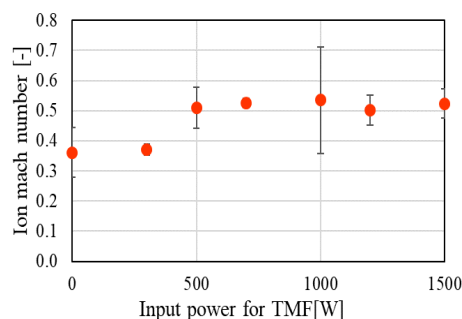


図8 進行磁場印可時のイオンマッハ数.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

1. Oshio, Y., Kubota, K., Watanabe, H., Cho, S., Ohkawa, Y. and Funaki, I., "Experimental Investigation of LaB6 Hollow Cathode with Radiative Heater." *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES*, Vol.17, No.2, pp. 203-203, 2019. 査読有
2. Oshio, Y., Shimada, T. and Hishida, H., Experimental investigation of optimal positional relation between RF antenna and magnetic cusp for thrust performance of RF plasma thruster, *Int. J. of Space Science and Engineering*, Vol.5, No.1, pp.43 - 60, 2018. 査読有

〔学会発表〕(計 11件)

1. 小笠原 世亜, 大塩 裕哉, 西田 浩之, 無電極 RF スラスターの進行磁場によるプラズマ加速効果の実験的調査, 平成 30 年度 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2018-028, 2019.
2. 志村 開智, 大塩 裕哉, 西田 浩之, カスプ磁場型無電極 RF プラズマスラスタにおける推進性能の動作パラメータ依存, 平成 30 年度 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2018-027, 2019.
3. 鳥井 健笑, 大塩 裕哉, 窪田 健一, 船木 一幸, 奥野 喜裕, ホローカソードにおける放電モード及びプラズマ特性の実験的, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 1E18, 2018.
4. 志村 開智, 島田 智広, 大塩 裕哉, 西田 浩之, カスプ磁場構造を用いた RF プラズマスラスタの推力特性, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 3N05, 2018.
5. Oshio, Y., Shimada, T., and Nishida, H., Effects of Antenna Position and Magnetic Configuration on Thrust Performance of RF Plasma Thruster with Non Uniform Magnetic Field, *Proceedings of 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, AIAA Propulsion and Energy Forum, AIAA 2018-4731, 2018.
6. 小笠原 世亜, 大塩 裕哉, 西田 浩之, 進行波磁場加速を用いた無電極 RF プラズマスラスタの実験的研究, 第 49 期 定時社員総会および年会講演会, 1C04, 2018.
7. Oshio, Y., Shimada, T., Nishida, H., "RF Antenna Position Effect on Thrust Performance of RF Plasma Thruster with Nonuniform Magnetic Field, *Proceedings of Second International Conference on Micropropulsion and CubeSats*, MPCS-2018-Th01, 2018.
8. Oshio, Y., Shimada, T., Nishida, H., Experimental Investigation of Thrust Performance on Position Relationship between RF Antenna and Magnetic Cusp of RF Plasma Thruster, *Proceedings of The 34th International Electric Propulsion Conference*, IEPC-2017-344, 2017.
9. Oshio, Y., Kubota, K., Yamakawa, H., Cho, S., Ohkawa, Y. and Funaki, I. Experimental Investigation of LaB Hollow Cathode with Radiative Heater, *Proceedings of 31st International Symposium on Space Technology and Science*, Ehime, 2017-b-08, 2017.
10. 島田 智広, 西田 浩之, 大塩 裕哉, 性能改善に向けたカスプ磁場型 RF プラズマスラスタの推進特性調査, 平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2017-063, 2017.
11. 松島 和孝, 大塩 裕哉, 島田 智広, 西田 浩之, カスプ磁場型 RF プラズマスラスタにおける排気プラズマ流の二次元分布特性調査, 平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2017-087, 2017.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://web.tuat.ac.jp/~nishida/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究協力者

研究協力者氏名：西田 浩之

ローマ字氏名：Nishida Hiroyuki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。