

令和元年6月7日現在

機関番号：33910

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17843

研究課題名(和文)超音速ガスパフによる完全無電極ヘリコンプラズマスラスタの高性能化

研究課題名(英文)Improvement of completely electrodeless helicon plasma thruster using supersonic gas puffing

研究代表者

桑原 大介 (KUWAHARA, Daisuke)

中部大学・工学部・講師

研究者番号：60645688

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)：宇宙用推進機であるヘリコンプラズマスラスタの推進性能を制限しているプラズマ中心の中性粒子枯渇の問題を解決するため、枯渇部に中性粒子を選択的に供給する超音速ガスパフ法と内部供給法を提案し、これらの評価を行った。超音速ガスパフ法については集束ビームが得られることを実験で実証できたが、中性粒子供給量を従来法と同等に抑えることが困難であることが判明した。一方、プラズマ中心に直接ガスパイプを挿入し供給を行う本提案の原理実験を行ったところ、従来のガス供給と比較して推力が1.5倍に向上することが判明した。プラズマ中の中性粒子挙動は不明な点が多い現象だが、本研究はこの挙動の解明に繋がる成果と言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヘリコンプラズマスラスタの放電部における燃料ガス枯渇現象は推進性能を制限している可能性があり、本研究はこれの改善による推進性能向上を狙ったものである。高密度な集束ガスビームを生成することで中性粒子が枯渇するプラズマ中心軸に選択的に中性粒子を供給する超音速ガスパフ法を考案し、この評価を行ったが、推進機に適用するにはガス供給量が多すぎる問題が明らかになった。一方、プラズマ中心にアルミナパイプで直接中性粒子を供給する内部供給法を考案し、この実験から推力が1.5倍程度に増加することが確かめられた。プラズマ中の中性粒子の挙動は不明な点が多いが、本研究はこの現象の解明の一助になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：For a neutral particle depletion problem in a helicon plasma thruster, a supersonic gas puffing method and internal gas feeding method has been proposed. The proposed methods supply gas into the inner region of plasma directly. The main objective of these methods are to reduce the depletion of neutral particles in plasma. This phenomenon is considered to limit the increase of electron density. Therefore, the thrust increase, which is proportional to the electron density, is also limited. To address this issue, the proposed methods attempts to supply the neutral particles directly to the generation area of the plasma.

In the case of the supersonic gas puffing method, a focusing gas beam can be generated. However, the amount of gas is too large compared to conventional thruster. The other hand, it's revealed that 51% increased reaction force has been obtained at a radio-frequency power of 3 kW and a gas feeding rate of 100 sccm (Ar) using the internal feeding method.

研究分野：プラズマ工学、電気推進工学

キーワード：ヘリコンプラズマ 高周波放電 電気推進機 中性粒子 ラバールノズル プラズマ計測

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

1. 研究開始当初の背景

深宇宙探査機用電気推進機は長寿命・高推力・高比推力 [比推力：推力/(推進剤流量×重力加速度)で表される燃費の指標] であることが求められており、応募者のグループはこの要求に対し、従来の電気推進機において長寿命・高推力化を妨げる要因であるプラズマと直接接触し損耗を受ける接触電極を廃した完全無電極ヘリコンプラズマスラスタを提案し、開発を進めている。

図1に示すこのスラスタは非接触アンテナからの高周波電力、印加磁場および0.1Pa程度の燃料ガス下において生成可能な高密度ヘリコンプラズマを非接触電極による電磁加速等を用いて高速排気する事で推力を得るものであり、推力・比推力の増強には高い電子密度および燃料ガスの効率的なプラズマ化が必要である。ヘリコンプラズマスラスタは国内外に多くの研究拠点がおり、国内では数kWクラスの小型スラスタ、国外では超電導磁石や大電力高周波加熱を使用した大型スラスタVASIMR等の開発が行われている。

ヘリコンプラズマの有用性は1970年に見出されて以来、その生成機構の解明から応用まで広く研究が行われてきた。ヘリコンプラズマは磁力線方向に分布する直線プラズマであり、一般的には軸中心で電子密度がピークをとり、中性粒子圧はホローとなる。この現象に対し軸中心への局所的中性粒子供給を行えば(1)中心電子密度の増加、(2)電離せず排気される推進に貢献しない周辺部中性粒子の減少が狙えると着想した。また、本申請で採用する超音速ガスパフは磁場閉じ込め核融合プラズマへの連続ガス供給法として開発されたものから着想を得た。磁場閉じ込め核融合ではプラズマ中心部への集中的なガス供給法の開発が課題となっており、連続動作が難しい固体ペレット法に代わる侵入長が長い連続ガス供給として、ラバールノズルから高圧ガスを噴射する事で得られる超音速収束ガス流によるガス供給、すなわち超音速ガスパフ法が提案された。図2にこれらを基に発案した超音速ガスパフを適用したヘリコンプラズマスラスタの概念図を示す。本応募課題において超音速ガスパフを適用する場合、高い局所的中性粒子供給能により前述(1)、(2)の解決が期待できる。

2. 研究の目的

提案するヘリコンプラズマ中心部への積極的な中性粒子ガス供給法とこれによる推進性能の変化について、下記の3項目を重点的に調査することを目的とした。

(1) 放電管内における超音速ガスパフによる中性粒子圧空間分布

放電管内のような比較的内径の細い管内において局所的な中性粒子圧分布を計測する技術は確立されていないので、比較的高い圧力領域 (<100 Pa) まで計測可能な小型シュルツ型電離真空計の開発を行う。実際に製作したノズルによる超音速ガスパフを行い、中性粒子圧時空間分布の実測を行い、ノズル形状等の把握など、局所的中性粒子供給技術の開発を行う。

(2) 超音速ガスパフを用いた際のヘリコンプラズマ諸特性

製作したノズルを用いた局所的中性粒子供給によるヘリコンプラズマの諸特性を調査する。特に、推力・比推力において重要なパラメータとなる電子密度、イオン・中性粒子流速および密度の観測に重点を置く。これら計測は空間分布計測とし、超音速クラスタービームによる中性粒子圧力分布に対して上記プラズマパラメータの比較が行えるように実験を進める。

(3) 超音速ガスパフを用いた際のスラスタ性能

(2)で得られた知見を基にスラスタ性能の評価を行う。印加電力、印加磁場強度や燃料供給量による推力、比推力および電力効率の傾向を把握し最適化を行う。

3. 研究の方法

ラバールノズルによる超音速中性粒子ビーム生成について実証するべくラバールノズルおよび高圧ガス供給系の開発を行う。また、中性粒子ビームの集束度を計測するために5mm程度の

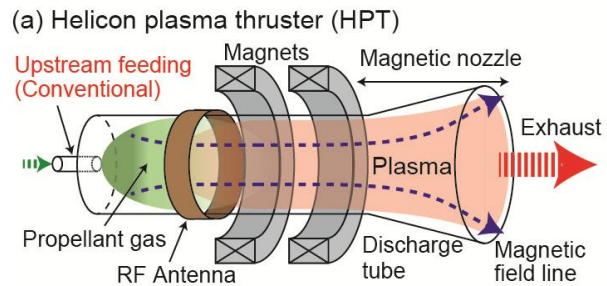


図1 ヘリコンプラズマスラスタ概念図

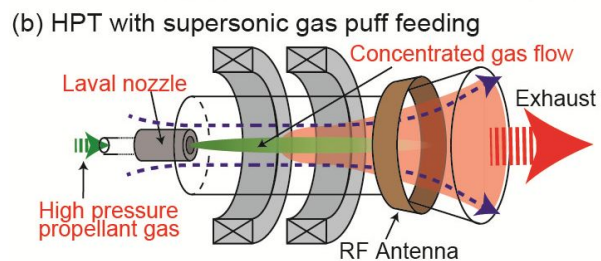


図2 ラバールノズルによる中心ガス供給

高空間分解能、0.01 ~ 100 Pa 程度の感度、および高時間分解能を持つ真空計が必要となるため、専用の電離真空計やピラニゲージの開発を行う。

中性粒子ビームによるガス供給と従来ガス供給による推進特性の比較のため、中性粒子ビーム供給系を備えたヘリコンプラズマ装置を開発する。ターゲット型スラストスタンドによる推力特性計測のほか、静電プローブによる電子密度空間分布などを用いてプラズマ諸特性から本ガス供給方式が推進性能に及ぼす影響を考察する。

4. 研究成果

(1) 小型ピラニゲージの開発

図3に開発した高時間分解能ピラニゲージを示す。既成品のピラニゲージは金属円筒に格納されており、ガスビームの空間分解能計測においては空間分解能の低さやビームの流れを阻害することが懸念されるため、これらの問題を解決できる小型ピラニゲージの開発を行った。フィラメントは直径 0.02 mm のプラチナ細線で、厚さ 0.6 mm の両面銅張ガラスエポキシ基板による筐体兼電極板にワイヤボンディングで接合している。なお、プラチナ細線は単層コンデンサを介して基板に接合されており、フィラメント-基板間の熱抵抗を高めている。なお、時間分解能向上の為に通常のピラニゲージで利用される定電流フィードバック方式は採用せず、高精度定電圧電源による一定電圧供給を行い、高速高精度デジタルマルチメータによる微小電流変化から真空圧を計測する方式を採用した。

図4はピラニゲージを真空容器に設置し、アルゴンガスを供給して真空容器圧力を変化させて取得したピラニゲージの真空圧特性である。なお、真空圧は既成品のピラニゲージとミニチュアゲージを使用して計測した。0.1 Pa 以下では計測値の誤差が激しくなるが、概ね 0.02 Pa 程度まで計測が可能であることが確かめられた。

(2) ラバールノズルによる中性粒子ガスビーム生成

図5に製作したラバールノズルの一例を示す。本ノズルは高精度光造形 3D プリントを用いて製作されており、ノズル内部の滑らかな曲線が再現されている。スロート径はガス供給量と加工精度を考慮して直径 0.1 mm、0.4 mm とし、開口直径は 13 mm、長さは 100 mm としている。なお、ガス供給は 6 MPa 程度の高圧ガスを高速ソレノイドバルブを用いて間欠的に供給している。今回の製作したノズルの最小スロート径 0.1 mm でも、ガス供給量は高周波電力数 kW のヘリコンプラズマスラストにおいては過大であるため、数 ms 程度のバルブ開時間としている。

図6はスロート径 0.1 mm ノズルを使用し、ガス供給圧 6 MPa、ノズル開時間 1 ms の条件においてノズル開から 10 ms 後のガス圧分布をピラニゲージで計測した例である。なお、ノズルの開口部は $z = 0$, $x = 0$ mm にあり、 z 軸正の方向に噴射している。 $z = 50$ mm 程度のノズル近辺ではガス圧は 1 Pa を超えており、非常に細い 10 mm 程度の太さのビームが見られ、それより下流では圧力が徐々に下がるものの 200 mm 程度まで細いビームを維持している。なお、ピラニゲージの時間分解能や誤差によって TOF による流速計測はできておらず、超音速流になっているかは厳密には判断できていないが極めて細い集束ビームが得られていることから本ノズルによって

本課題が提案するプラズマ中心軸への選択的ガス供給の可能性が見えてきたが、このサイズのヘリコンプラズマスラストの典型的なガス供給量である数十 sccm に対して、ラバールノズルによるパルスガス供給では瞬間的に数百 sccm 相当の供給となっており、実際の運用においては間欠供給による影響なども考慮視する必要があることが分かった。

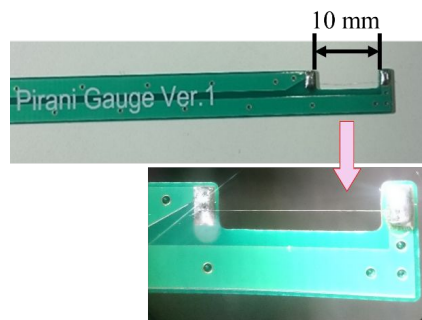


図3 小型ピラニゲージ

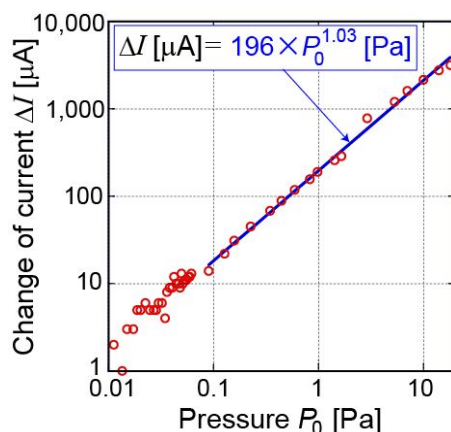


図4 真空圧感度校正



図5 試作ラバールノズル

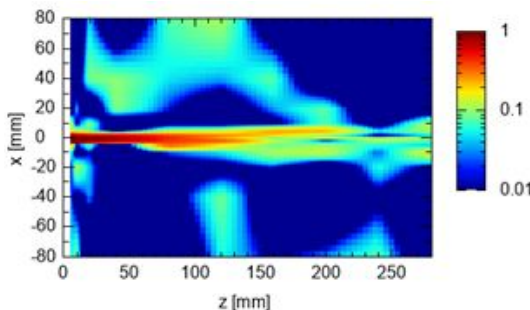


図6 ラバールノズルによるガス分布

(3) 内部供給法による推進性能向上実験

ラバールノズルによるビーム計測実験により、集束ビームが得られるもののガス供給量が極めて大きくなるためヘリコンプラズマスタへの適用および評価が難しいことが判明した。一方、本テーマが掲げるヘリコンプラズマ中心軸へのガス供給はプラズマ中心に直接ガス供給パイプを挿入してガス供給することで、ガス管へのプラズマ衝突・損失を無視すれば評価可能である。このため、アルミパイプを用いてプラズマ中心にガス供給を行う方法を内部供給法として図7に示す実験装置を構築し、放電試験を行った。

実験結果を図8に示す。実験は従来の放電管上流壁からの供給である $z = 1,000$ mm、内部供給法によるガスパイプ軸方向位置 $z = -130, -205, -275$ mm の3ケースについて行った。供給高周波電力が 1 kW 程度では各供給法において変化があまり見られないが、3 kW まで増加させると供給位置が下流になるに連れて推力が向上することが判明した。

この結果は中心軸供給法について否定するものではないが、本方式が謳う中性粒子枯渇の改善や径方向拡散の抑制による壁損失の低減については効果の有無が明らかとなっていない。今後はレーザー誘起蛍光法による中性粒子とイオンの径・軸方向流速の空間分布の計測を行うなどして放電領域の中性粒子、イオンの挙動を把握し、今回見られた推力向上の機構を明らかにすることが必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- [1] T. Furukawa, K. Shimura, D. Kuwahara and S. Shinohara, "Verification of azimuthal current generation employing a rotating magnetic field plasma acceleration method in an open magnetic field configuration", *Phys. Plasmas*, 査読有 **26**, 2019, 033505. <https://doi.org/10.1063/1.5064392>
- [2] S. Shinohara, D. Kuwahara, T. Furukawa, S. Nishimura, T. Yamase, Y. Ishigami, H. Horita, A. Igarashi and S. Nishimoto, "Development of featured high-density helicon sources and their application to electrodeless plasma thruster", *Plasma Phys. Control. Fusion*, 査読有, **61**, 2018, 014017. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aadd67>
- [3] T. Furukawa, K. Takizawa, K. Yano, D. Kuwahara, and S. Shinohara, "Spatial measurement in rotating magnetic field plasma acceleration method by using two-dimensional instrument and thrust stand", *Rev. Sci. Instrum.*, 査読有, **89**, 2018, 043505. <https://doi.org/10.1063/1.5013214>
- [4] S. Shinohara, D. Kuwahara, T. Ishii, H. Iwaya, S. Nishimura, T. Yamase, D. Arai, H. Horita, "Development of High-Density Radio Frequency Plasma Sources With Very Small Diameter for Propulsion", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 査読有, **46**, 2017, 252. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2776110>
- [5] T. Furukawa, K. Takizawa, D. Kuwahara, S. Shinohara, "Electrodeless plasma acceleration system using rotating magnetic field method", *AIP Advances*, 査読有, **7**, 2017, 115204. <https://doi.org/10.1063/1.4998248>
- [6] T. Furukawa, K. Takizawa, D. Kuwahara, and S. Shinohara, "Study on electromagnetic plasma propulsion using rotating magnetic field acceleration scheme", *Phys. Plasmas*,

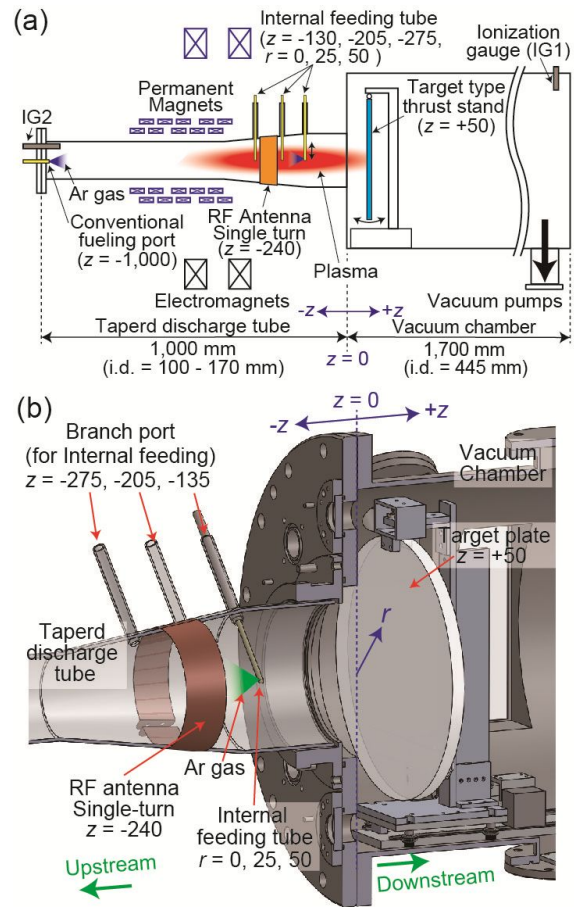


図7 ラバールノズルによるガス分布

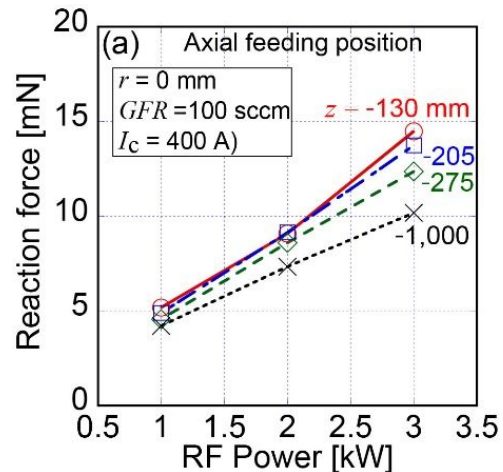


図8 内部供給による推力向上

査読有, 24, 2017, 043505.

<https://doi.org/10.1063/1.4979677>

- [7] D. Kuwahara, S. Shinohara, K. Yano, “Thrust Characteristics of High-Density Helicon Plasma using Argon and Xenon Gas”, J. Propul. Power, 査読有, 33, 2017, 420-424
<https://doi.org/10.2514/1.B36199>
- [8] S. Shinohara, D. Kuwahara, K. Yano, A. Fruchtman, “Suppression of diamagnetism by neutrals pressure in partially ionized, high-beta plasma”, Phys. Plasmas, 査読有, 23, 2016, 122108-1-7.
<https://doi.org/10.1063/1.4968849>

〔学会発表〕(計6件)

- [1] D. Kuwahara, T. Furukawa, Y. Ishigami, J. Miyazawa, T. Mutoh, and S. Shinohara, “Study of Helicon Plasma Thruster using Internal Gas Feeding Method”, AAPS DPP 2018 (2018), (招待講演).
- [2] D. Kuwahara, K. Amma, Y. Ishigami, A. Igarashi, S. Nishimoto, S. Shinohara, and J. Miyazawa, “Improvement of Thrust Characteristics of Helicon Plasma Thruster using Local Gas Fueling Method” (NP11.00145), 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (2017).
- [3] D. Kuwahara, S. Nishimura, T. Furukawa, T. Yamase, D. Arai, K. Amma, Y. Ishigami, H. Horita, S. Shinohara, S. Shinohara, and J. Miyazawa, “Experimental Study of Helicon Plasma Thruster using Advanced Acceleration Method” (IEPC-2017-200), International Electric Propulsion Conference 2017 (IEPC2017) (2017).
- [4] D. Kuwahara, Shuichi Nishimura, Takeru Furukawa, Tomoya Yamase, Daisuke Arai, Kosuke Amma, Yuichi Ishigami, Hiroataka Horita, Shunjiro Shinohara, “Characteristics of Helicon Plasma Thruster using Advanced Acceleration Methods”, Joint Conference: 31st ISTS, 26th ISSFD & 8th NSAT (2017).
- [5] 桑原大介, 石上雄一, 篠原俊二郎, 宮澤順一, “超音速ガスパフを用いたヘリコンプラズマへの燃料供給の研究”, 第33回プラズマ核融合学会年会, 29aP14 (2016).
- [6] 桑原大介, 矢野和輝, Amnon Fruchtman, 篠原俊二郎, “高密度ヘリコン源を用いた高ベータプラズマ特性”, H27年度宇宙科学に関する室内シンポジウム, 29 (2016).

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 篠原 俊二郎

ローマ字氏名: (SHINOHARA, shunjiro)

研究協力者氏名: 古川 武留

ローマ字氏名: (FURUKAWA, takeru)

研究協力者氏名: 石上 雄一

ローマ字氏名: (ISHIGAMI, yuichi)

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。