

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14873

研究課題名（和文）乱れの付加によるホールスラストの放電安定化

研究課題名（英文）Hall Thruster Discharge Stabilization by Artificial Disturbances

研究代表者

川嶋 嶺 (Kawashima, Rei)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：80794429

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ホールスラストと呼ばれる高密度なプラズマを生成するイオン推進機において、周方向に現れる不均一なプラズマ特性分布が、磁化された電子の流れに影響を及ぼしている可能性がある。本研究では、あえて周方向不均一に推進剤ガスを供給して推進機を作動させ、この時形成されるプラズマ特性分布および電子の挙動を、高解像度プローブ計測実験とプラズマ流れシミュレーションによって明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ホールスラストなどの磁場閉じ込めを用いるイオン源において、磁力線を横切る方向の電子の挙動は未解明の物理現象であった。本研究で得られた周方向プラズマ特性分布の形成と電子の挙動に関する知見は、この未解明物理の理解に貢献するものである。特に、周方向プラズマ特性はこれまで取得が困難とされていたものであり、本研究で得られた実験データの学術的意義は大きい。磁化された電子流れに関する物理解明は、マグネトロンスパッタ装置など他のイオン源の性能向上にもつながるものであり、社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Hall thruster is one of the electric propulsion systems that generate a high-density plasma. It has been hypothesized that the azimuthally inhomogeneous plasma property distribution affects the magnetized electron flow. In this research, a Hall thruster was operated with an azimuthally nonuniform propellant supply, and the plasma property distribution was measured with a high-resolution probe measurement experiment. In addition, a plasma flow simulation revealed the electron flow characteristics under the azimuthal inhomogeneity.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：ホールスラスト 電気推進 プラズマ 放電制御 電子異常輸送 数値流体力学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、有人火星探査や太陽発電衛星などの次世代宇宙ミッションを実現するためのキーテクノロジーとして、宇宙プラズマ推進技術が注目されている。応募者が研究を行うホールスラストは、コンパクトながら高密度なプラズマを生成し大きな推進力を生む、というイオン推進機の一つであり、大質量の輸送を伴うミッションにおいて活躍が期待されている。

ホールスラストは軸対称な構造を持つため、内部プラズマ流れも軸対称であると考えられてきた。しかし最近の研究によって、自励的なプラズマ振動現象が周方向に現れ、その結果生じる周方向に不均一なプラズマ分布が磁化された電子の動きに大きく影響している可能性が指摘されていた。同様の仮説はマグネトロンスパッタ装置など他の磁場を利用するプラズマ源の研究でも検討されており、磁化された電子の動きに関する物理解明へ向けた一連の研究は、「電子異常輸送」をキーワードとして幅広い分野にまたがって行われていた。

上記の周方向に現れる自励的なプラズマ振動は、MHz オーダーの非常に速い現象であるため、プラズマ分布にどのような不均一性が現れ、その不均一性が電子の動きにどのような影響を及ぼすか、実験的に計測することが困難であった。ゆえにプラズマ流れに関するコンピュータシミュレーションによって現象解明が試みられてきたが、周方向のプラズマ物理に関連する実験データが乏しいため、シミュレーション結果が実際の物理現象を正しく反映しているか判断することができない、という状況にあった。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は以下の3点である。

- (1) 人工的に周方向非一様性を付加してホールスラストを作動させ、その時形成される周方向不均一なプラズマ特性分布を計測する。
- (2) 周方向プラズマ特性と軸方向に磁場を横切って流れる電子の特性との関連を明らかにする。
- (3) 自励的な周方向プラズマ振動の発達に関するコンピュータシミュレーションを行う。

自励的なプラズマ振動によって形成されたプラズマ特性分布は高周波で振動しているため計測が困難である。ゆえに、定常な周方向プラズマ特性分布を人工的作り出すことを考えた。またこの方法では自励的なプラズマ振動の発達過程に関する情報は得られない。このため、プラズマ流れに関するコンピュータシミュレーションによるプラズマ振動の解析を試みた。

尚、研究開始当初の目的は、人工的な乱れの付加によるホールスラストの放電安定化であった。しかし、近年応募者が参画するプロジェクトにおいて開発された、5 kW 程度の電力で作動するホールスラストにおいて、放電振動は顕著とはならなかった。このため、放電振動は比較的大型の推進機においては問題とはならない、と考えられたため、本研究の目的を磁化された電子の挙動に関する理解向上へと変更した。

3. 研究の方法

- (1) 周方向不均一に推進剤を供給するホールスラストの作動

人工的に周方向非一様性を付加する方法として、本研究では主に推進剤ガスの流量を周方向位置に応じて変化させる方法を用いた (図1)。

- (2) 周方向プラズマ特性分布を取得するプローブ計測実験

エミッシブプローブと呼ばれるプラズマ計測機器を、ある周方向位置において軸方向に高速移動させ、その軌道上でのプラズマ特性を連続的に取得する計測システムを構築した (図2)。この方法により、軸方向-周方向2次元のプラズマ特性分布を高解像度で取得することができる。

- (3) 軸方向-周方向二次元プラズマ流れシミュレーション

イオンを粒子の集まりとして記述し、電子を流体として表したハイブリッドモデルを用いて、ホールスラスト内部プラズマ流れの軸方向-周方向2次元解析コードを構築した。開発したコードの特徴は、電子流体の計算手法として航空宇宙分野での流体解析によく用いられる双曲型方程式系を用いたアプローチを採用している点であり、安定かつ正確に磁化された電子流れの解析を行うことができる。

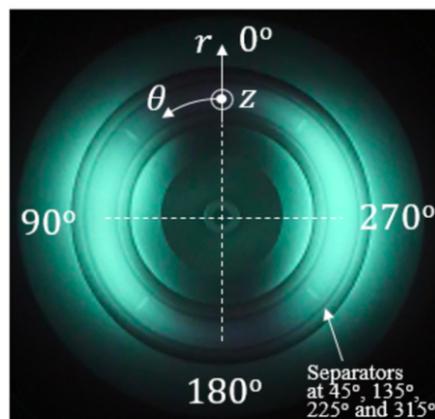


図1 周方向不均一に推進剤を供給した際のホールスラストからのプラズマ発光。90°、270°で高流量、0°、180°で低流量の推進剤ガスが供給されている。

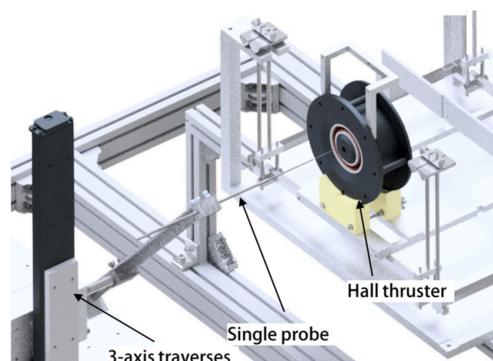


図2 ホールスラストのプローブ計測実験概要図。プローブのプラズマ内滞在時間を短くするため、プローブを軸方向に高速移動させる。

4. 研究成果

(1) 周方向不均一に推進剤を供給したホールスラスタのプラズマ特性分布計測

周方向不均一に推進剤ガスを供給して推進機を作動させたときの、軸方向-周方向二次元のプラズマ特性分布をプローブ計測システムによって取得することに成功した。このプラズマ特性分布は磁化された電子の流れに大きく影響し、軸方向の電子の流れを促進させる働きがあることが分かった。

(2) 周方向不均一に推進剤を供給したホールスラスタの電流特性計測

ホールスラスタ内部プラズマにおける電流は、イオンによる電流、電子による電流、壁面に失われるプラズマによる電流、の3つに分けることができる。周方向不均一に推進剤ガスを供給して推進機を作動させた際に、その不均一度合いに応じて電流特性がどのように変化するか計測した。その結果、推進機作動には3つの状態が存在し、それぞれの状態間ではイオン電流と電子電流が非連続的に変化することが分かった。

(3) 周方向不均一に推進剤を供給したホールスラスタのプラズマシミュレーション

軸方向-周方向二次元プラズマ流れシミュレーションコードを用いて、周方向不均一に推進剤ガスを供給した際のプラズマ分布形成と、その電子流れの影響に関し数値解析を行った。その結果、図3に示される様に、プラズマ密度や空間電位といったプラズマ特性に、凹凸を伴う周方向非一様性が生じることが分かった。またこれらの分布の間には周方向に位相差が生じており、この位相差に起因して、軸方向の電子の流れが促進されていることが明らかになった。

(4) 回転スポーク現象のコンピュータシミュレーション

軸方向-周方向二次元プラズマ流れシミュレーションコードを用いて、ホールスラスタにおいて周方向に伝播する自励的振動である回転スポーク現象の数値解析が行われた。回転スポークの自励振動が飽和するのに十分な長時間計算を初めて行い、回転スポークの定常伝播を捉えることに成功した。周方向プラズマ振動の発生源となるのはドリフト不安定性という現象であるが、この振動が増幅する過程には電離現象が大きく関わっていることを明らかにした。

(5) 自励的な周方向プラズマ振動と電子の流れの解析

軸方向-周方向のプラズマシミュレーションコードを用いて、回転スポーク現象より高周波で短波長の周方向プラズマ振動現象の解析を行った。この高周波のプラズマ振動は、周方向均一に推進剤を流した際に自励的に発達するもので、磁化された電子の流れに特に影響すると考えられている現象である。シミュレーションの結果、図4に表されるように、周方向に細かい振動現象が現れ、軸方向（磁場を横切る方向）の電子の流れに強く影響している様子が観測された。さらにシミュレーションで得られた空間電位の分布は、プローブ計測実験の結果とよく一致することが分かった。空間電位の分布は、電子がどこで磁場によって流れにくくなっているか、という情報を反映している。前述のような一致は、従来のシミュレーションでは、磁場にとらわれた電子の挙動に関する経験式を用いなければ得られないものであった。本研究で開発されたプラズマシミュレーションコードは、周方向のプラズマ振動現象と、その振動が及ぼす磁化された電子の流れへの影響を適切に再現することができると考えられる。

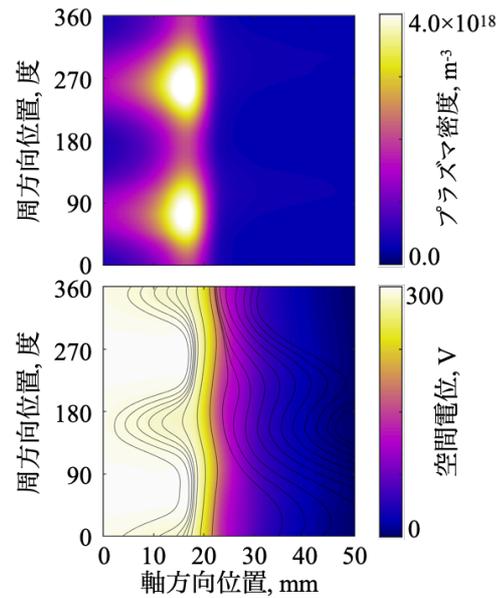


図3 軸方向-周方向2次元計算によって得られた、周方向不均一に推進剤を供給したホールスラスタ内部のプラズマ密度と空間電位の分布。

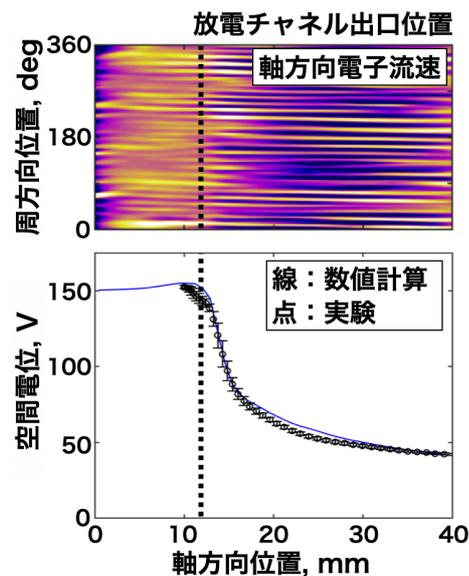


図4 軸方向-周方向2次元計算において観測された、電子流速に表れた周方向プラズマ振動（上）、および空間電位分布に関するシミュレーションと実験結果の比較（下）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 J. Bak, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi	4. 巻 26
2. 論文標題 Plasma formation and cross-field electron transport induced by azimuthal neutral inhomogeneity in an anode layer Hall thruster	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 73505
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5090931	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 G. Ito, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi	4. 巻 160
2. 論文標題 Inflow angular dependence of the capture coefficient in cryopumps	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 102-108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.vacuum.2018.11.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Kawashima, Y. Hamada, J. Bak, K. Komurasaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Hybrid PIC Simulation of a Thruster with Anode Layer with Self-Consistent Electron Transport Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Applied Plasma Science	6. 最初と最後の頁 9-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chamarthi Amareshwara Sainadh, Komurasaki Kimiya, Kawashima Rei	4. 巻 374
2. 論文標題 High-order upwind and non-oscillatory approach for steady state diffusion, advection?diffusion and application to magnetized electrons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 1120-1151
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcp.2018.08.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Rei Kawashima, Junhwi Bak, Kimiya Komurasaki, Hiroyuki Koizumi	4. 巻 11
2. 論文標題 Two-dimensional Modeling of the Hall Thruster Discharge with Non-uniform Propellant Supply in Azimuth	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology	6. 最初と最後の頁 7-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Kawashima, K. Hara, K. Komurasaki	4. 巻 27
2. 論文標題 Numerical analysis of azimuthal rotating spokes in a crossed-field discharge plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 35010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/aab39c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 朴俊輝, 川嶋嶺, 水川将暢, 小紫公也, 小泉宏之	4. 巻 25
2. 論文標題 推進剤が不様に供給されたホールスラスト内のプラズマ諸量	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 プラズマ応用科学	6. 最初と最後の頁 9-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Y. Hamada, J. Bak, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi
2. 発表標題 Ionization zone shifting downstream at high propellant flow density in RAIJIN66
3. 学会等名 12th International Symposium on Applied Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

1 . 発表者名 J. Chen, R. Kawashima, K. Komurasaki
2 . 発表標題 Study on the Sputtering Mechanism of Keeper Electrodes in Hall Thruster
3 . 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年 ~ 2020年

1 . 発表者名 G. Ito, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi
2 . 発表標題 Study of Xenon Wall Accommodation Model and Background Flow during Hall Thruster Ground Test
3 . 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年 ~ 2020年

1 . 発表者名 J. Bak, B. Van Loo, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi
2 . 発表標題 Electron cross-field transport mechanism observed under the azimuthally inhomogeneous neutral supply in a Hall thruster
3 . 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年 ~ 2020年

1 . 発表者名 R. Kawashima, J. Bak, Y. Hamada, B. Van Loo, H. Koizumi, K. Komurasaki
2 . 発表標題 Coupled Simulation of Two-Dimensional Hybrid Hall Thruster Models
3 . 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年 ~ 2020年

1 . 発表者名 J. Bak, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi
2 . 発表標題 Study on electron cross-field drift by an azimuthal electric-field in Hall thrusters: from plasma density and potential structures
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (国際学会)
4 . 発表年 2019年 ~ 2020年

1 . 発表者名 Y. Hamada, J. Bak, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi
2 . 発表標題 Plasma Diagnosis of RAIJIN66 Thruster
3 . 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2019年 ~ 2020年

1 . 発表者名 R. Kawashima, Y. Hamada, J. Bak, B. Van Loo, K. Komurasaki, H. Koizumi
2 . 発表標題 Two-Dimensional Hybrid Models of the Plasma Discharge in an Anode-Layer Hall Thruster
3 . 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2019年 ~ 2020年

1 . 発表者名 J. Bak, R. Kawashima, B. Van Loo, K. Komurasaki, H. Koizumi
2 . 発表標題 Investigation of Electron Cross-field Transport in Hall Thrusters with Inhomogeneity of Plasma Density and Potential in Azimuth
3 . 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Bak, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi
2. 発表標題 Effect of Density Inhomogeneity in Azimuth on Discharge Oscillation Suppression and Electron Diffusion in Hall Thrusters
3. 学会等名 2018 Joint Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川嶋嶺, 朴俊輝, 濱田悠嗣, Bastiaan Van Loo, 小紫公也
2. 発表標題 アノードレイヤ型ホールスラストUT-58作動特性の数値解析
3. 学会等名 第59回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川嶋嶺, 小紫公也
2. 発表標題 双曲型解法による磁化電子流体の高精度流束計算
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川嶋嶺, 小紫公也
2. 発表標題 ホールスラストにおける周方向電場の発生と電子輸送促進の数値解析
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Z. Wang, S. Chamarthi, R. Kawashima, K. Komurasaki, H. Koizumi
2 . 発表標題 A One-dimensional Hybrid Particle-Fluid Simulation with Electron Inertia in a Hall Effect Thruster
3 . 学会等名 Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 R. Kawashima, J. Bak, K. Komurasaki, H. Koizumi
2 . 発表標題 Two-dimensional Hybrid Model of a Hall Thruster with Non-uniform Propellant Supply
3 . 学会等名 Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 R. Kawashima, Z. Wang, S. Chamarthi, H. Koizumi, K. Komurasaki
2 . 発表標題 Hyperbolic System Approach for Magnetized Electron Fluids in ExB Discharge Plasmas
3 . 学会等名 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Chamarthi, Z. Wang, R. Kawashima, K. Komurasaki
2 . 発表標題 Weighted Nonlinear Schemes for Magnetized Electron Fluid in Quasi-neutral Plasma
3 . 学会等名 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hara, R. Kawashima
2. 発表標題 Low-frequency ionization oscillations due to azimuthally rotating spokes in cross-field configurations
3. 学会等名 70th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Kawashima, J. Bak, K. Komurasaki, H. Koizumi, K. Hara
2. 発表標題 Effects of Azimuthal Non-uniformity on the Hall Thruster Discharge
3. 学会等名 35th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Kawashima, K. Hara
2. 発表標題 Numerical Modelling of Rotating Spokes in Hall Thruster Discharge Plasma
3. 学会等名 44th International Conference on Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川嶋嶺, 朴俊輝, 小紫公也, 小泉宏之
2. 発表標題 ホールスラストにおける回転スポーク現象の数値解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第48期年会講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

小紫・小泉研究室
<http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp>
川嶋嶺個人ページ
http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/members/kawashima/home_ja.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----