

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2022

課題番号：18KK0406

研究課題名（和文）ホールスラストにおける異常輸送の抑制

研究課題名（英文）Suppression of anomalous transport in Hall thrusters

研究代表者

山本 直嗣 (yamamoto, naoji)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：40380711

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,900,000円

渡航期間：13ヶ月

研究成果の概要（和文）：CEAのDr. Dif Pradalier と協同し、揺動間の非線形結合の存在を明らかにした。さらに、特定の揺動と異常輸送の間には相関が強いことを確認するとともに、この特定の揺動と相関がみられる低周波揺動の存在を世界で初めて確認した。
CSUのProf. Azer. P. Yalinと協同して、レーリー散乱の高度化に取り組み、最小限界感度を半分に向上させることに成功した。さらに、Portable time-resolved Thomson scattering techniqueの実証実験を実施し、電離不安定性と同程度の20 kHzで変動するプラズマ密度及び温度の時間分解計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ホールスラストにおけるプラズマの揺らぎ（揺動）は互いに独立ではなく、相互作用していることを明らかにした。この相互作用をうまく利用することで、問題となる揺動を抑制することが可能であることが分かった。これは、ホールスラストにおける消費電力低減のためのブレークスルーにつながり、ひいては、オール電化衛星の弱点である静止軌道までの移行期間を半分に短縮でき、日本がイニシアチブを取ってオール電化衛星への転換が一気に進み、宇宙利用コストの削減に貢献できることにつながる。

研究成果の概要（英文）：The observed turbulence is coupled with other perturbation, and it has a strong relation with electron transport in Hall thruster. In addition, low frequency plasma perturbations were observed when the turbulence were suppressed.
Minimum detection limit of the neutral number density measurement by Rayleigh light scattering was twice improved. In addition, the usefulness of a portable time-resolved Thomson scattering technique was shown.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：ホールスラスト プラズマ計測 プラズマ揺動 原動機・推進 乱流

1. 研究開始当初の背景

電気推進は、従来の化学反応を利用したロケット推進と違って、太陽電池からの電気エネルギーを利用したプラズマ推進であって、静電力や電磁力を利用できる。そのため、小惑星探査機「はやぶさ」で実証されたように、従来のエンジンと比較して燃費がよく、1/10程度まで燃料が削減出来る。その反面、宇宙空間で利用できる電力に限りがあるため、推力は小さいという欠点がある。そのため、電力あたりの推力である推力電力比が重要である。

電気推進機の中でも、ホール電流を利用したホールスラスト(図1)はエネルギー変換効率が50%以上と高く、推力電力比も60 mN/kW以上とイオンエンジンの2倍以上大きい。このためJAXAのオール電化衛星の主推進機として、研究開発が進められている。ホールスラスト開発に立ちはだかる障壁が、電子の異常輸送である。ホールスラストはイオンを排出し、その反作用で推力を得る作動原理であるため、電子電流の増加は推力向上には寄与せず、消費電力を増大させるだけである。磁場を印加して電子電流を抑制しているが、中性粒子との衝突による拡散によって陽極に輸送される。この輸送において、磁場がある閾値を超えると、古典拡散モードから異常輸送モードに移り、電子電流が増えて推力電力比は2/3になる。異常輸送の原因として、周方向のプラズマの不均一性がドリフト不安定性と呼ばれる数MHzの電場の揺動(揺らぎ)を励起し、これが異常輸送を引き起こすとされている。そのため、異常輸送の抑制には揺動の抑制が必須となる。揺動の抑制には、境界条件であるホールスラストのプラズマ状態の計測が必要であるが、現有の計測技術の改善だけでは不可能である。また揺動に関しても、不明瞭な点が多く、揺動の理解が必要である。

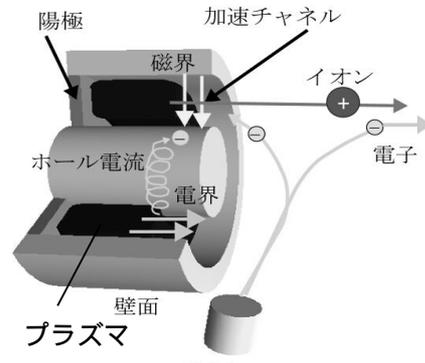


図1 ホールスラスト概念
電界と磁界によりイオンの生成・加速を制御する。

2. 研究の目的

九州大学とコロラド州立大学の独自技術を持ち寄って、単独では達成不可能な計測技術の高度化に取り組みつつ、CEAが持つ核融合プラズマの知見と九州大学が持つホールスラストに関する知見を持ち寄って物理モデルを構築し、モデルを基に革新的なホールスラストを開発し、宇宙利用の低コスト化に貢献することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

異常輸送の抑制には、異常輸送の要因として考えられているプラズマの揺動(揺らぎ)の計測と、プラズマ計測および揺動モデルの構築が必要である。そこで、九州大学とフランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)でデータや数値解析コード並びにホールスラストおよび核融合プラズマそれぞれにおける異常輸送の知見を持ち寄って、ホールスラストにおける物理モデルの構築をおこなった。また核融合プラズマからの知見として、揺動間の相互作用を考慮すべきということで、実験で得られた揺動に対してバイコヒーレンス解析を行うとともに、揺動間の非線形結合のモデル化にも取り組んだ。さらに、九州大学において、レーリー散乱法による中性粒子密度計測およびトムソン散乱計測によるプラズマ密度計測のSN比向上に関する研究および時間分解計測に取り組み、コロラド州立大学(CSU)の計測に関する独自技術を持ち寄って計測技術の高度化に取り組み、揺動の時間スケールでの時間分解トムソン散乱法を構築した。またリザバコンピューティングを用いたプラズマ状態の推定も併せて検討した。

4. 研究成果

CEAのDr. Dif Pradalierと協同し、揺動間の相互作用に関して、predator-preyモデルを構築し、揺動のエネルギーが大局的な流れのエネルギーとして費やされる可能性を検討し、十分にあり得るという結果を得た。またその周波数も数百Hzと観察された揺動と同程度が見込まれることが明らかになった。さらに、揺動間の相関を見るために、バイコヒーレンス解析を行ったところ、図2に示す通り、電離不安定性に起因する揺動と数百kHzの揺動間には相関関係があることが明らかになった。さらに揺動のモデル化を行い、モデルと実験結果は定性的に一致することを確認した。

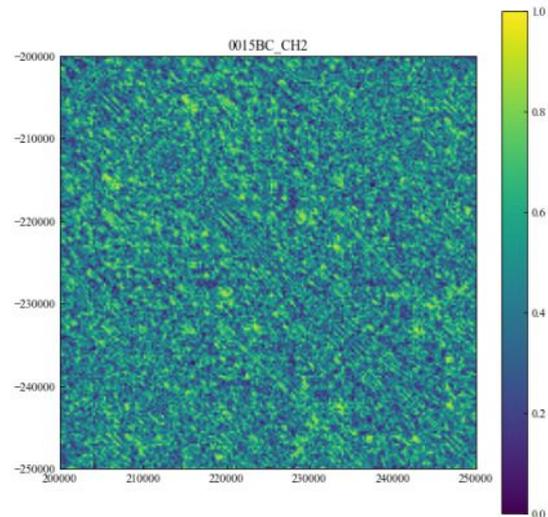


図2 Bicoherence diagrams for $I_c = 1.5A$

さらに、特定の揺動と異常輸送の間には相関が強いことを確認するとともに、この異常輸送に関連する揺動と相関がみられる低周波揺動の存在を確認した。

また、高い周波数の振動を放電電圧に印加することで、10-30 kHz の電離不安定性に起因する揺動が抑制される事が明らかになった。どの周波数が一番効果的かということに関しては、スラストの作動条件及びスラストの形状に依存することが確認している。例えば窒化ホウ素を壁面材料にしたスラストにおいては、150 kHz が最も効果的であり、また MHz 帯を印加しても 3 dB ほど減少することが確認された (表 1)。窒化ホウ素と窒化アルミの複合焼結体においては、100-1000 KHz において、それほど優位な差は見られずどれも抑制されている。しかしながら MHz まで上げると、効果はほとんど見られなくなる。また、印加の有無によりブルームの形状および色が変わることも確認している。

表 1 周波数と電離不安定性のピークの相関関係

印加周波数	放電電流 (A)	半値幅 (kHz)	ピーク値 (dB)
リファレンス	0.98	11.8	-48.5
100 kHz	0.98	15.9	-51.5
110 kHz	0.98	18.5	-53.3
120 kHz	0.98	11.8	-49.6
150 kHz	0.97	20.4	-54.2
1.1 MHz	0.98	18.5	-52.1
1.2 MHz	0.98	12.6	-50.1

放電電流振動が抑制される物理としては、変動電場を印加することにより、電子はレイノルズ応力で拡散する、これは振動方程式におけるいわゆる粘性が増える効果であり、粘性が増える事により、揺動は抑制される。実際に電離不安定性と 100-300 kHz の乱流は非線形結合しているという事実からもわかる。実際に適応するには、スイッチング電源のスイッチング周波数を 100 - 150KHz にしておき、平滑化を減らすことが最も簡便な実装方法である。必要になるのはホールスラストの寿命末期の低周波振動が大きくなる場所であることを考えると、放電電流振動が大きくなるまでは通常電源として作動させておいて、スラスト末期になったときに、トランス等で変動電場を印加するという形も考えられる。すなわち、通常はフィルタ用のインダクターとして振る舞うが、寿命末期においては、トランスの一次側に高周波アンプ (MHz) やアンプ数百 kHz の変動電場を印加することにより、印加する。また、RF カソードを電子源とすることで数 MHz の揺動を印加できる。これを利用して、RF カソードの周波数を 13.56MHz ではなく、もう少し低い数 MHz で作動させることにより、余計な機構を印加せずに振動抑制につなげることが可能となる。

また、レーラー散乱の高度化に関しても、ハイブリッド検出器とともに、4 GHz 帯域のオシロスコープを用いて時間分解能を上げ、さらに一つ一つの波形データも収集・解析することで、データ量を大幅に増やし解析したところ(図 3)、これまでの最小限界感度を半分に向上させることに成功し、結果として、 $6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の最小感度を達成した。

さらに、アメリカ合衆国コロラド州コロラド州立大学において、Prof. Azer. P. Yalin と協同して、Potable time-resolved Thomson scattering technique の実証実験を実施した。小型のプラズマ源を製作し、変調電源を用いて数十 kHz でプラズマ特性が変化することを確認した。このプラズマ源を用いてトムソン散乱計測を実施したところ、図 4 に示すようなホールスラストの電離不安定性と同程度の 20 kHz で変動するプラズマ密度及び温度の時間分解計測に成功した。

帰国後も共同研究を継続し、構築したシステムを用いてホールスラストへ適用し、計測技術の適用で浮かび上がる課題の解決に共同であたっている。また、得られた詳細な結果をもとに、ホールスラストにおける物理モデルの改築においても協働し、異常輸送の抑制を試みている。

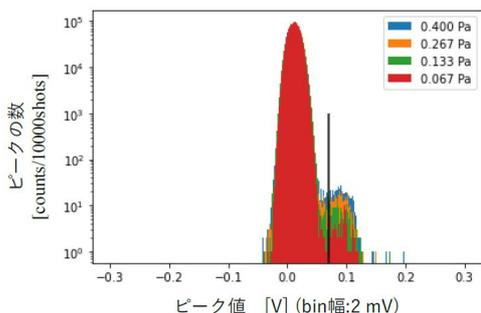


図 3 各圧力下でのピーク波高分布

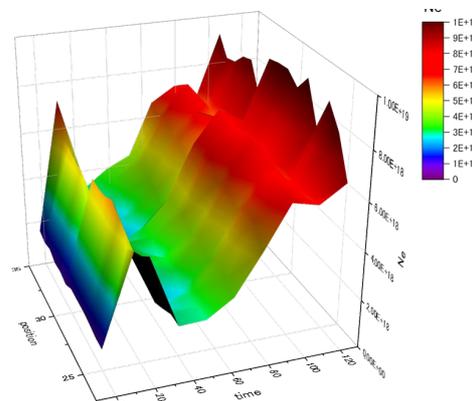


図 4 プラズマ密度の時空間構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Kinoshita Jumpei, Shiraki Ryo, Yamamoto Naoji, Nakano Masakatsu, Ohkawa Yasushi, Funaki Ikkoh	4. 巻 69
2. 論文標題 Neutralization Performance with Two Field Emission Cathodes in an Ion Engine	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 215 ~ 218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.69.215	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 KINOSHITA Jumpei, IKEDA Ryo, ADACHI Misaki, SHIRAKI Ryo, MORITA Taichi, YAMAMOTO Naoji, NAKANO Masakatsu, OHKAWA Yasushi, FUNAKI Ikkoh	4. 巻 64
2. 論文標題 Position and Attitude Tolerances of Carbon Nanotube Field Emission Cathode as a Neutralizer in an Ion Engine System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 288 ~ 291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.64.288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kouge Kouichiro, Tomita Kentaro, Hotta Junya, Pan Yiming, Tomuro Hiroaki, Morita Masayuki, Yanagida Tatsuya, Uchino Kiichiro, Yamamoto Naoji	4. 巻 60
2. 論文標題 Time-resolved spatial profiles of electron density and temperature in hydrogen plasmas induced by radiation from laser-produced tin plasmas for extreme ultraviolet lithography light sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 066002 ~ 066002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abfadc	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 CHONO Masatoshi, YAMAMOTO Naoji, TSUKIZAKI Ryudo, MORISHITA Takato, KUBOTA Kenichi, CHO Shinatra, KINEFUCHI Kiyoshi, TAKAHASHI Toru	4. 巻 64
2. 論文標題 Performance of a Miniature Hall Thruster and an In-house PPU	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 189 ~ 192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.64.189	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kawazu Masato, Fuchigami Hirota, Yamamoto Naoji, Tamida Taichiro	4. 巻 20
2. 論文標題 Neural Network Prediction of Discharge Current using Plume Shape and Operational Parameters in Hall Thrusters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 47 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.20.47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kuwabara Naoya, Chono Masatoshi, Yamamoto Naoji, Kuwahara Daisuke	4. 巻 なし
2. 論文標題 Electron Density Measurement Inside a Hall Thruster Using Microwave Interferometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B38163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KUWABARA Naoya, CHONO Masatoshi, MORITA Taichi, YAMAMOTO Naoji	4. 巻 19
2. 論文標題 Anomalous Electron Transport in Hall Thrusters: Electric Field Fluctuation Measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 81 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.19.81	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Egawa Yusuke, Yamamoto Naoji, Yamaguchi Atsushi, Morita Taichi	4. 巻 91
2. 論文標題 Erosion sensor using time-resolved cavity ring-down spectroscopy for Hall thrusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 113105 ~ 113105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5127788	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Morishita Takato, Tsukizaki Ryudo, Yamamoto Naoji, Kinefuchi Kiyoshi, Nishiyama Kazutaka	4. 巻 176
2. 論文標題 Application of a microwave cathode to a 200-W Hall thruster with comparison to a hollow cathode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 413 ~ 423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2020.06.049	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 Naoji Yamamoto, Naoya Kuwabara, Daisuke Kuwahara, Shinatora Cho, Yusuke Kosuga, Guilhem Dif Pradalier	4. 巻 0
2. 論文標題 Observation of Plasma Turbulence in a Hall Thruster Using Microwave Interferometry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 0-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B38711	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 川邊智, 山本直嗣
2. 発表標題 ライトフィールドカメラを用いた プラズマの発光の三次元分布推定
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoru KAWABE and Naoji YAMAMOTO
2. 発表標題 Three-dimensional Image Reconstruction using Light-field camera
3. 学会等名 IAPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kansei ITO, Naoji YAMAMOTO, and Kai MORINO
2. 発表標題 Prediction of Discharge Current Using Reservoir Computing in Electric Propulsion
3. 学会等名 33rd ISTS (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 寛晟, 山本 直嗣, 森野 佳生
2. 発表標題 リザバ - コンピューティングを用いたホールスラストの電流の経年変化予測
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本直嗣、 桑原 大介
2. 発表標題 ホールスラスト加速チャンネル内部のプラズマ 揺動の観察
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 電源装置および電気推進システム	発明者 民田太郎、小鹿 聡 士、山本直嗣、竹ヶ 原春貴	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、7241924	取得年 2023年	国内・外国の別 外国

〔その他〕

電気推進
<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/elec/index.html>
 ホールスラスト
http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/elec/Hall/Hall_j.html
 異常輸送の解明
<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/elec/Hall/kibanA.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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ディフプラダリア ギーエム (Dif-Pradalier Guilhem)	フランス原子力・代替エネルギー庁・IRFM・Senior Researcher	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ヤリン アザール (Yalin Azer P.)	コロラド州立大学・Department of Mechanical engineering・Professor	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

米国	Colorado state University			
フランス	CEA			