

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14947

研究課題名（和文）超音速旅客機実現に向けた高揚力・低ブーム化流体制御デバイスの確立

研究課題名（英文）Establishment of Flow Control Device for Achieving Low-boom and High-lift Supersonic Aircraft

研究代表者

高橋 聖幸（Masayuki, Takahashi）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00794067

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）：遠隔エネルギー伝送を用い、航空宇宙デバイス周りにプラズマ及び衝撃波を駆動して流体場に作用させ、飛翔体の性能を改善するシステム確立を目指し、ビーム誘起放電メカニズムの調査、電磁波伝搬過程の実験による計測、高強度ビームによる放電実験を実施した。数値シミュレーションによりビーム誘起放電メカニズムを調査した結果、輻射と熱電離が重要な役割を果たしている事が新たに示された。またビーム伝送実験と放電実験の結果、遠隔エネルギー伝送により飛翔デバイスの揚力が改善可能である事が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ビーム誘起放電のメカニズムが本研究により示されたが、これによりビーム誘起プラズマを用いた流体デバイスの性能が改善可能である。その結果、遠隔エネルギー伝送により駆動される新しい飛行機やロケットなどが確立されれば、航空宇宙機による輸送コストが大幅に削減可能である。

研究成果の概要（英文）：A flight performance of an aerospace vehicle can be improved using a remote energy transfer because beam-induced shock wave and plasma changes a flow field around the vehicle. A numerical simulation was conducted to understand a discharge physics, which implied that a radiation transfer and a thermal ionization process played an important role on the plasma-front propagation. Moreover, the beam irradiation and discharge experiments indicated that a lift performance of the aerospace vehicle can be improved.

研究分野：ビーム放電

キーワード：ビーム プラズマ 衝撃波 輻射 飛翔体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

繰り返しパルスビームを大気中にて集光すると大気絶縁破壊を生じ、一旦生成された種電子が雪崩的に衝突反応を繰り返す事で高速で伝搬するプラズマ及び衝撃波を駆動出来る。このプラズマと衝撃波を航空宇宙デバイス周りに発生する流れ場に作用させる事によって、流れ場を変化させ、推力や揚力を付与して当該デバイスの性能を改善する事が出来ると考えられる。航空宇宙デバイス用プラズマアクチュエータなど他の放電装置と比較すると、ビームを介して遠隔でエネルギーを付与する事から、地上にビーム伝送装置を設置すれば機体に電源系などを搭載する必要がなくなり、且つプラズマが電極や誘電体等に接触しない事から、耐久性に優れた流体場制御デバイスを構築する事が可能となる。一方でビーム誘起放電時のプラズマ生成メカニズムに不明瞭な点が多く、特に航空宇宙デバイスへの適用に適したビームエネルギー領域では、従来型の電子衝突電離モデルでは放電が維持される理由を説明出来ない。このプラズマ生成メカニズムを明らかにし、効果的なエネルギー付与の条件を模索した上で、遠隔エネルギー伝送による性能改善の効果を最大限に享受出来る機体設計等を行っていく必要がある。

2. 研究の目的

本研究では数値シミュレーションを用い、ビーム誘起放電時のプラズマ生成メカニズムを明確化した上で、それを応用して遠隔エネルギー伝送による流体制御デバイスを確立する事を目的とする。

3. 研究の方法

電磁波伝搬、プラズマ反応拡散、中性流体挙動、輻射輸送を組み込んだ数値シミュレーションコードを開発し、ビーム誘起放電を数値的に記述する。更にビーム照射用航空宇宙飛行デバイスを実際に作製し、まずは低強度ビーム照射を行って、機体周りの電磁波伝搬特性を調査する。続いて高強度のビーム照射を行なって大気絶縁破壊を引き起こし、流体場と飛行性能に与える影響を調査する。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーション

ビーム照射時のプラズマ及び衝撃波伝搬を数値シミュレーションにより再現し、電離メカニズムを調査した。比較的ビーム強度が高い場合、電場により電子が急激に加熱され、電子衝突電離周波数が電子付着周波数を上回る事で電子数密度が徐々に増加する事が示された。カットオフ密度にまで電子数密度が増加すると入射ビームが反射されて定在波が形成され、この定在波の腹における強電場で瞬時に電子衝突電離が引き起こされ、プラズマフロントがビーム源に向かって伝搬した。一方でビーム強度を下げた場合、プラズマフロント伝搬速度が遅くなった。伝搬速度低下の結果、重粒子が十分に加熱されて温度が増大し、輻射が強まる事が示された。この輻射によりプラズマフロントよりも前方に弱电離領域のプリカーサが形成され、プリカーサ領域とプラズマフロントにおいて重粒子が加熱されて膨張し、中性粒子密度が低下する事で換算電場が増大する。換算電場が電離閾値電場を超えると電子衝突電離反応が卓越し、プラズマ生成が維持される事が新たに示された。更にビームエネルギー強度を下げていくと電子衝突電離ではなく、重粒子温度がより一層増大して熱電離過程が支配的となり、電子生成が維持されてプラズマフロントが伝搬する事が世界で初めて示された。

(2) 電磁波伝送実験

数値シミュレーションで得られた衝撃波強度とプラズマフロント伝搬速度に基づいて、飛翔デバイスのサイズを決定して実際に模型を製作し、電磁ビームを飛翔体周りに集光可能かどうか調べるべく、電磁波伝送実験を行った。電磁波集光特性を調べる際は2W程度の低強度のビームを用い、ビーム集光特性の評価は二通りの方法で行った。定性的なビーム集光特性を調べる為に、集光点付近にビーム吸収帯を設置し、その表面温度を赤外線カメラを用いて調査した。集光点での表面温度が上昇し、設計通りの集光分布を得られている事が示された。また定量的な集光特性を調べる為、集光点付近にプローブを設置して走査した所、機体サイズによって集光点での電場強度が変化する事が示された。即ち、機体サイズとビーム波長との比が大きいほど、ビームの集光性能がより良くなる事が示された。

(3) 繰り返しパルスビーム照射による流体場制御実験

8 J, 50 Hz の繰り返しパルスビームを用いて飛翔デバイスにエネルギーを付与し、プラズマと衝撃波を駆動した。ビーム誘起衝撃波が飛翔デバイス周りの流体場を変化させ、飛翔デバイスに対して揚力を付与し、飛行性能が改善可能である事が示された。また、機体サイズが大きくなり、集光性能に優れている程強い衝撃波を誘起出来、結果として獲得出来る揚力が大きくなる

事が示された.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 A. Wada, C. Kato, M. Takahashi, and N. Ohnishi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Two-dimensional Full Particle-in-Cell Simulation of Magnetic Sails in Formation Flight	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Space Propulsion 2020+1	6. 最初と最後の頁 108
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 無
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 N. Tsunozawa, M. Takahashi, and N. Ohnishi	4. 巻 1
2. 論文標題 Study of the Micro-turbulence Plasma Structure on a Hall-effect Thruster Using 2D Kinetic Simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 33rd ISTS	6. 最初と最後の頁 2022-b-09
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 無
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 S. Suzuki, M. Takahashi, and N. Ohnishi	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical Simulation of Millimeter-wave Discharge under Subcritical Beam Intensity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 33rd ISTS	6. 最初と最後の頁 2022-b-50
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 無
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 M. Takahashi, K. Ashikawa, K. Mori, and N. Ohnishi	4. 巻 1
2. 論文標題 Beam-riding Characteristic Evaluation on Multi-parabola Thruster Using Pendulum-type Measurement System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 33rd ISTS	6. 最初と最後の頁 2022-b-57p
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 無
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 S. Suzuki, C. Kato, M. Takahashi, and N. Ohnishi	4. 巻 2207
2. 論文標題 Plasma Propagation via Radiation Transfer in Millimeter-wave Discharge under Subcritical Condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2207/1/012046	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 M. Takahashi	4. 巻 2207
2. 論文標題 Coupling Simulation on Two-dimensional Axisymmetric Beaming Propulsion System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2207/1/012047	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 H. S. Kumar, M. Takahashi, C. Kato, Y. Oshio, and N. Ohnishi	4. 巻 130
2. 論文標題 Kinetic Theory of Double Layers Driven by Temperature Anisotropy in a Non-homogeneous Magnetic Field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 163303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0065665	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20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 A. Wada, C. Kato, M. Takahashi, and N. Ohnishi
2. 発表標題 Two-dimensional Full Particle-in-Cell Simulation of Magnetic Sails in Formation Flight
3. 学会等名 Space Propulsion 2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Takahashi and J. P. Boeuf
2. 発表標題 Numerical Simulation of Rotating Spokes on a Partially Magnetized ExB Magnetron Sputtering Device
3. 学会等名 62nd Annual Meeting of the APD Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Takahashi, K. Ashikawa, T. Kogushi, C. Kato, K. Mori, and N. Ohnishi
2. 発表標題 Multi-parabola Configuration for Improving Beam Riding Performance of Laser Propulsion Vehicle
3. 学会等名 International High Power Laser Ablation 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Takahashi
2. 発表標題 Proposal and Simulation of Microwave-Driven In-Tube Accelerator (MITA)
3. 学会等名 International High Power Laser Ablation 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 颯一郎, 加藤 ちなみ, 高橋 聖幸, 大西 直文
2. 発表標題 輻射輸送によるマイクロ波放電過程の構造遷移
3. 学会等名 令和2年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田 朱音, 加藤ちなみ, 高橋聖幸, 大西直文
2. 発表標題 電磁プラズマ粒子シミュレーションによる 磁気セルの編隊飛行における推力特性評価
3. 学会等名 令和2年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Kumar, M. Takahashi, C. Kato, and N. Ohnishi
2. 発表標題 Interaction between a soliton and a double layer in a traveling magnetic field system
3. 学会等名 62nd Annual Meeting of the APD Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sato, C. Kato, M. Takahashi, and N. Ohnishi
2. 発表標題 Molecular Dynamics Analysis for Laser Ablation Propulsion Using Graphite
3. 学会等名 International High Power Laser Ablation 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Tsunozawa, M. Takahashi, and N. Ohnishi
2. 発表標題 Study of the Micro-turbulence Plasma Structure on a Hall-effect Thruster Using 2D Kinetic Simulation
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Suzuki, M. Takahashi, and N. Ohnishi
2 . 発表標題 Numerical Simulation of Millimeter-wave Discharge under Subcritical Beam Intensity
3 . 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Takahashi, K. Ashikawa, K. Mori, and N. Ohnishi
2 . 発表標題 Beam-riding Characteristic Evaluation on Multi-parabola Thruster Using Pendulum-type Measurement System
3 . 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Suzuki, C. Kato, M. Takahashi, and N. Ohnishi
2 . 発表標題 Plasma Propagation via Radiation Transfer in Millimeter-wave Discharge under Subcritical Condition
3 . 学会等名 Conference on Computational Physics 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Takahashi
2 . 発表標題 Coupling Simulation on Two-dimensional Axisymmetric Beaming Propulsion System
3 . 学会等名 Conference on Computational Physics 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋聖幸, 蘆川健一郎, 森浩一, 加藤ちなみ, 大西直文
2. 発表標題 振り子式力積測定装置を用いたマルチパラボナスラスタのビームライディング性能評価
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 経沢尚輝, 高橋聖幸, 大西直文
2. 発表標題 ホールスラスタ内の微細乱流構造に関するプラズマ粒子シミュレーション
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木颯一郎, 加藤ちなみ, 高橋聖幸, 大西直文
2. 発表標題 亜臨界ミリ波放電過程における輻射輸送を介した電離波面伝搬
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤星貴, 高橋 聖幸, 大西直文
2. 発表標題 大気吸い込み型電気推進の実現に向けた粒子加速過程の Particle-in-Cell シミュレーション
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2022年講演
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 経沢尚輝, 高橋聖幸, 大西直文
2. 発表標題 ホールスラストにおける電子サイクロトロン不安定性による電子輸送に関する数値的研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2022年講演
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田峻大, 高橋聖幸, 嶋村耕平, 大西直文
2. 発表標題 Microwave-driven in-tube accelerator における電磁波伝搬特性評価と振り子式推力測定装置の開発
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2022年講演
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 速館佑弥, 高橋聖幸, 大西直文
2. 発表標題 複数放物面レーザー推進機のフリーフライト試験に向けた 6 自由度運動解析と実験装置の開発
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2022年講演
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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
---------	---------