

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02062

研究課題名（和文）プラズマアクチュエータ実用化のための理論基盤構築

研究課題名（英文）Development of Theoretical Basis for Practical Application of Plasma Actuators

研究代表者

西田 浩之（Nishida, Hiroyuki）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：60545945

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：プラズマアクチュエータが生成する電気流体力場と加熱場の特性を明らかにし、モデル化することを目的とした研究を行った。プラズマのシミュレーションモデルを高度化し、空気の流動とカップリングすることで、実験結果を10%程度の精度で再現することに成功した。また、BOS法により表面近傍の密度場を精度よく計測するセッティング条件を見出し、PIVによる流れ場の計測、IRカメラによる表面温度計測結果と併せて考察することで、電気流体力場と加熱場が流れに与える影響を示した。最後に、速度場と密度場の計測結果を数値シミュレーションにデータ同化することで電気流体力場をガウス分布として推定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究でプラズマアクチュエータが流れに作用するメカニズムの理解が進んだことにより、自動車や風車など、様々な流体機器へ適用していく応用研究を加速することができる。プラズマアクチュエータが実用化されれば、車両や航空機の抗力低減による燃費改善、風車の発電効率向上、放熱器のサイズ縮小など、さまざまな方面からの社会的なインパクトを期待できる。また、電気流体現象の解明は、流体制御だけでなく気液界面プラズマなど、多方面において重要な知見である。

研究成果の概要（英文）：A study was conducted to characterize and model the electrohydrodynamic force and heating fields generated by a plasma actuator. By upgrading the simulation model of plasma and coupling it with air flow, we succeeded in reproducing the experimental results with an accuracy of about 10%. The influence of the electrohydrodynamic force and the heating on the flow was also discussed by considering the results of the BOS method, the flow field by the PIV method, and the surface temperature measurement by an IR camera. Finally, we developed a method to estimate the electrohydrodynamic force field as a Gaussian distribution by assimilating the measured velocity and density fields into a numerical simulation.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

研究分野：流体工学

キーワード：電気流体現象 流体制御 大気圧放電

1. 研究開始当初の背景

プラズマアクチュエータは、放電により生じた電気流体力と加熱により流れを変化させる流体制御デバイスで、「機械的な機構が無い」、「電気信号による能動制御が容易」といった特徴から、汎用性が高く、従来のデバイスでは不可能だった様々な応用が可能である。産業界も参画した研究活動が活発化する一方、20年近い研究に関わらず期待されるほど実用化が加速していない現状がある。その大きな理由は、(1) 電気流体力の強度不足、(2) 電気流体力生成、及び電気的特性を予測可能な物理モデルが存在しない、ためと考えられる。設計パラメータと印加電圧パラメータの最適化が喫緊の課題であるが、電気流体力生成のメカニズムが完全に解明されておらず各パラメータが性能に与える影響が物理モデル化できていない。それが故に製作したアクチュエータの性能を予測可能な物理モデルも存在せず、同様に、電気的特性を統一的に再現可能な物理モデルも不完全である。

2. 研究の目的

本研究は、プラズマアクチュエータの電気流体力生成メカニズムの全容を解明し物理モデル化することで、産業的実用化の加速に必要な理論的基盤を構築することが目的である。

3. 研究の方法

実験と数値シミュレーションを協働して研究を行った。数値シミュレーションにおいては、放電(プラズマ)と大気を連成した詳細シミュレーションモデルを高度化し、電気流体力生成と加熱のメカニズムの解析を行った。実験からのアプローチにおいては、プラズマアクチュエータが誘起する流れの速度場と密度場の計測、プラズマ発光の高速撮像、表面温度分布の時間変化の計測から、電気流体力と加熱の特性、及びメカニズムを解析した。さらに、実験を数値シミュレーションにデータ同化することで、電気流体力場をガウス分布として推定する手法の構築に取り組んだ。

4. 研究成果

プラズマアクチュエータにおける大気圧放電の数値モデルを高度化し、周囲流体(空気)の運動とカップリングシミュレーションした結果と実験結果を比較することで、モデルの定量的妥当性を評価した。

放電の数値モデルは、プラズマの化学反応に特に着目し拡張した。具体的には、プラズマの詳細再結合モデルと累積電離モデルを順に組み込み(計80種の化学反応)、6化学反応のみを考慮したシンプルモデルと、電気流体力生成・ジュール発熱の観点から比較を行った。その結果、体積力生成とジュール発熱のプロセスに主要な役割を果たすのは、シンプルモデルで考慮している6化学反応であることが分かった。ただし、クラスターイオンを介した再結合は反応レートが高く、定量的な影響があることが分かった。シンプルモデルにおいても、クラスターイオンを考慮した再結合係数を設定する必要がある。6化学種のプラズマ反応を考慮した放電モデリングに、さらに電子エネルギー緩和の時間遅れを考慮したジュール発熱場解析の計算コードを開発した。印加電圧波形についてパラメータサーベイを行い、体積力場とジュール発熱場の分布に大きなずれはないこと、印加電圧の上昇とともにジュール発熱のエネルギーが卓越してくることを明らかにした。

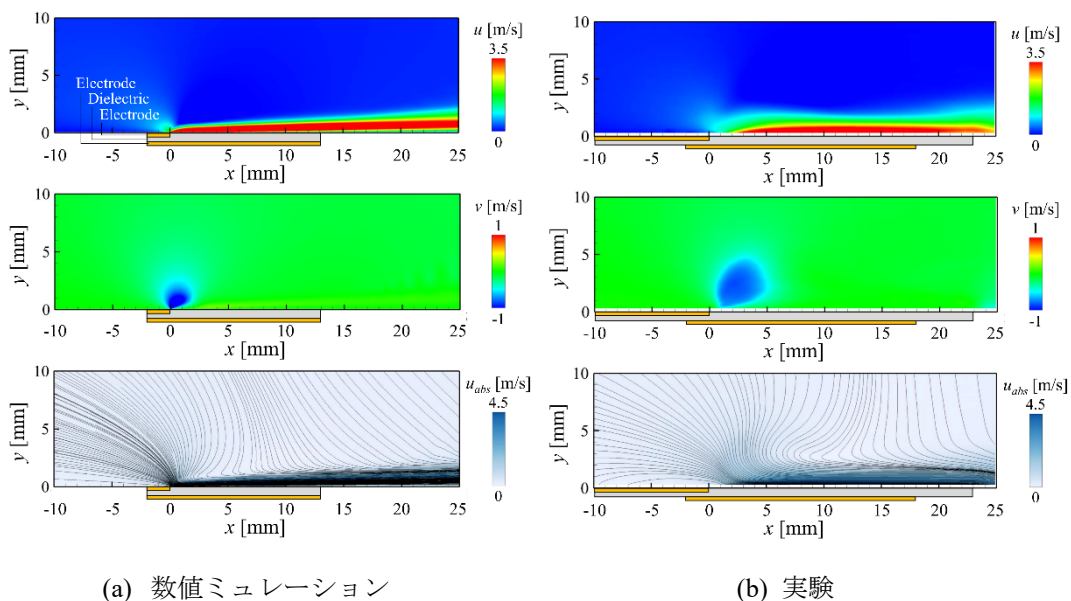


図1 数値シミュレーションと実験の比較：(上図) x 方向流速場、(中図) y 方向流速場、(下図) z 方向流速場

6 化学反応を考慮したシンプルモデルの妥当性を検証するため、空気の流動をカップリングシミュレーションし、PIV 計測（流速分布計測）、推力計測、消費電力計測結果と比較した（図 1）。その結果、推力については、10%程度の精度で実験結果と一致した。これは、実験における計測の不確かさの範囲内であり、十分な定量的精度であると言える。一方で、消費電力には 50%程度のずれがあり、また印加電圧波形特性も一部再現できないケースもあった。これは、ストリーマ型放電へのモード遷移が起こる電圧に定量的なずれがあることが一因と思われる。

実験において、PIV による流速場計測、BOS による密度場計測を実施した。まず、BOS における密度場の定量計測の信頼性を確保するため、誘電体表面の影響と背景画像の歪みの影響に特に着目した校正実験を、計測パラメータを変化させて行い、それらの影響を誤差として定量的に明らかにした。続いて、PIV 法による流速場計測と BOS 法による密度場計測の双方によりプラズマアクチュエータが形成する流体場について詳細に解析を行った。プラズマアクチュエータの放電 1 周期内における流速場と密度場の時間変動を計測した結果、流速場は AC 電圧の変化に合わせて変動するが、密度場は大きく変動しないことが明らかとなった。また、流速が最大値をとる位置に比べ密度が最小値をとる位置は下流になることが明らかとなり、これは電極近傍の放電場により加熱された空気が移流しながら膨張するためと考えられる。

プラズマアクチュエータが流れに与える熱的影響について、誘電体表面との熱伝達を含めた理解は重要である。そこで、誘電体の表面温度の時間変化を、誘電体材料と印加電圧をパラメトリックに変化させて計測した。そして、表面温度の時間変化を熱伝達と誘電体内部熱伝導の考察から統一的に整理できるパラメータを見出すことに成功した（図 2）。このことから、誘電体加熱のメカニズムは、プラズマの直接接触ではなく、気体のジュール加熱と熱伝達であることを初めて示すことができた。

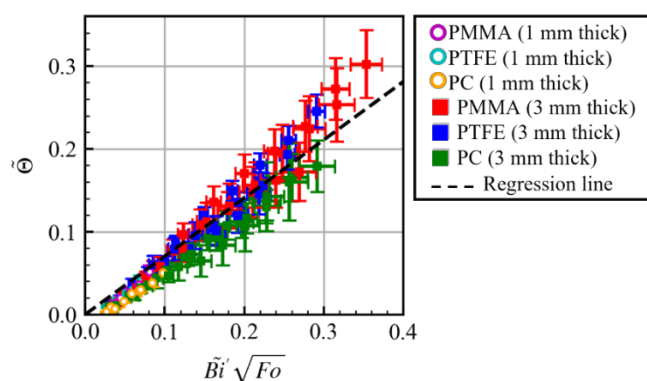


図 2 表面温度変化の無次元数による統一的整理

最後に、実験データを数値シミュレーションにデータ同化し、電気流体力場を推定する手法を提案した。具体的には、PIV 計測により取得した流速場と BOS 法により取得した密度場を、ガウス分布の電気流体力場を仮定した圧縮性流体シミュレーションに同化することで、実験結果から電気流体力場（ガウス分布の平均値）の大きさと空間的広がり（分散）を推定する。同化に数値シミュレーションデータを用いた双子実験を行い、提案手法により電気流体力場の推定が可能であることを示すことに成功した（図 3）。今後の展望として、実際に実験データを用いた電気流体力場の推定に取り組み、世界で初めて電気流体力を確かな根拠のもとに推定し、明らかにすることを旨とする。また、電気流体力場だけでなく、加熱場も含めて推定する手法も検討する。

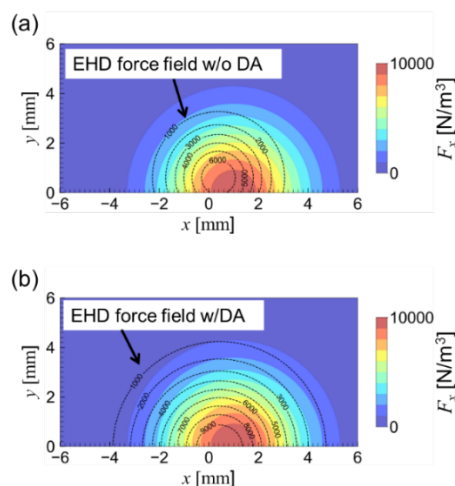


図 3 ガウス分布を仮定した電気流体力場のデータ同化結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hatamoto Asami, Emori Kenta, Nishida Hiroyuki	4. 巻 56
2. 論文標題 Surface temperature characterization of dielectric barrier discharge plasma actuator in quiescent air	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 155203 ~ 155203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/acbf64	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 Hatamoto Asami, Nakai Kumi, Nishida Hiroyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Experimental Study on the Working Characteristics of Tri-Electrode Plasma Actuator Utilizing a Combination of Corona and Barrier Discharges	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 322 ~ 322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act11110322	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 Kaneko Yutaka, Nishida Hiroyuki, Tagawa Yoshiyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Visualization of the Electrohydrodynamic and Thermal Effects of AC-DBD Plasma Actuators of Plate- and Wire-Exposed Electrodes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 38 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act11020038	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 Emori Kenta, Kaneko Yutaka, Nishida Hiroyuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Classification of flow-field patterns in burst-mode actuation of a dielectric-barrier-discharge plasma actuator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 023601 ~ 023601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0077425	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 Kaneko Yutaka, Nishida Hiroyuki, Tagawa Yoshiyuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Background-oriented schlieren measurement of near-surface density field in surface dielectric-barrier-discharge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 125402 ~ 125402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ac1ccc	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 Hatamoto Asami, Emori Kenta, Nishida Hiroyuki	4. 巻 FEDSM2021-64270
2. 論文標題 Experimental Study on Heat Transfer of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Considering Heat Conduction of Dielectric Material	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2021, Fluids Engineering Division Summer Meeting	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/FEDSM2021-64270	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 Nakai, K., Nakano, A. and Nishida, H.	4. 巻 59
2. 論文標題 Validity of Three-Fluid Plasma Modeling for Alternating-Current Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J059089	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 Shimomura, S., Sekimoto, S., Oyama, A., Fujii, K. and Nishida, H.	4. 巻 58
2. 論文標題 Closed-Loop Flow Separation Control Using the Deep Q Network over Airfoil	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J059447	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 Nakai, K., Komuro, A. and Nishida, H.	4. 巻 27
2. 論文標題 Effect of chemical reactions on electrohydrodynamic force generation process in dielectric barrier discharge	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 -
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24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Saito, T., Nishida, H., and Kaneko, Y.
2. 発表標題 Effect of Interference Between Two Facing Plasma Actuators on Discharge and Flow Field
3. 学会等名 AIAA SCITECH 2023 Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hatamoto, A. and Nishida, H.
2. 発表標題 Experimental Characterization of Surface Temperature Variation on Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator in External Flow
3. 学会等名 AIAA SCITECH 2023 Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥原大和, 馬祥, 西田浩之, 瀬川武彦
2. 発表標題 下部電極構造がプラズマアクチュエータにおけるプラズマ挙動と体積力生成に与える影響
3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会第9回シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 板垣朱莉, 西田浩之, 小室淳史
2. 発表標題 プラズマ流体シミュレーションによるバリア 放電型プラズマアクチュエータの 3次元プラズマ挙動の解析
3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会第9回シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子泰, 西田浩之
2. 発表標題 電極形状がプラズマアクチュエータの体積力場生成に与える影響
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaneko, Y. and Nishida, H.
2. 発表標題 Experimental study on density and electrohydrodynamic force fields of DBD plasma actuator
3. 学会等名 ISNTP-12 & ISEHD 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hatamoto, A. and Nishida, H.
2. 発表標題 EXPERIMENTAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA ACTUATOR
3. 学会等名 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Kaneko, Y., Nishida, H. and Tagawa, Y.
2 . 発表標題 Computational and Experimental Study on the Electrohydrodynamic and Thermal Effects of DBD Plasma Actuator
3 . 学会等名 33rd ISTS, 10th NSAT & 14th IAA LCPM (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Hatamoto, A., Emori, K. and Nishida, H.
2 . 発表標題 Effect of External Flow Velocity on the Thermal Characteristics of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator
3 . 学会等名 33rd ISTS, 10th NSAT & 14th IAA LCPM (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Kaneko, Y., Emori, K., Shimazaki, T., Tagawa, Y. and Nishida, H.
2 . 発表標題 INVESTIGATION OF DENSITY AND FLOW VELOCITY FIELD OF DBD PLASMA ACTUATOR IN QUIESCENT AIR USING BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN AND PARTICLE-IMAGE-VELOCIMETRY METHOD
3 . 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Hatamoto, A., Nakai, K. and Nishida, H.
2 . 発表標題 CHARACTERISTICS OF DISCHARGE AND JET GENERATION OF PLASMA ACTUATOR UTILIZING DC AND AC DISCHARGES
3 . 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 畑本明彩未, 江森健太, 西田浩之
2. 発表標題 DBDプラズマアクチュエータが誘起する流れの熱伝達率の推定
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shimomura, S., Sekimoto, S., Oyama, A., Fujii, K. and Nishida, H.
2. 発表標題 Mechanism of flow separation control with DBD plasma actuator obtained by Ape X Deep Q Network Control
3. 学会等名 AIAA SciTech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 畑本明彩未, 西田浩之
2. 発表標題 ジェット生成に着目した三電極プラズマアクチュエータの作動特性調査
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子泰, 嶋崎隆晃, 田川義之, 西田浩之
2. 発表標題 静止流体中における DBDプラズマアクチュエータの速度場および密度場計測
3. 学会等名 日本機械学会流体工部門 A-TS 05-24研究会「プラズマアクチュエータ研究会」第7回シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 畑本明彩未, 江森健太, 西田浩之
2. 発表標題 DBDプラズマアクチュエータの熱特性に関する実験的調査
3. 学会等名 日本機械学会流体工部門 A-TS 05-24研究会「プラズマアクチュエータ研究会」第7回シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaneko, Y., Emori, K., Nakano, A., Oshio, Y., Shimazaki, T., Tagawa, Y. and Nishida, H.
2. 発表標題 Study for Application of Background Oriented Schlieren Method to Flow Induced by DBD Plasma Actuator
3. 学会等名 AIAA SciTech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakai, K. and Nishida, H.
2. 発表標題 Effects of Numerical Plasma Modeling on Performance Characterization of Plasma Actuator
3. 学会等名 AIAA SciTech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakano, A., Osio, Y. and Nishida, H.
2. 発表標題 Investigation on Voltage Waveform Characteristics of Plasma Actuators with Different Electrode Geometry for High Performance
3. 学会等名 AIAA SciTech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakano, A., Osio, Y. and Nishida, H.
2. 発表標題 Experimental Optimization of AC Voltage Waveform for DBD Plasma Actuator with Different Dielectric Material
3. 学会等名 Joint Symposium 32nd ISTS & 9th NSAT (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nishida, H.
2. 発表標題 Numerical simulation of plasma actuator aiming for understanding of body force generation
3. 学会等名 Satellite Workshop of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) & 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakai, K. and Nishida, H.
2. 発表標題 Study on Discharge Plasma Modeling Aiming at Accurate Simulation of Electrohydrodynamic Force Generation in Dielectric Barrier Discharge
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) & 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子泰, 中野朝, 大塩裕哉, 嶋崎隆晃, 田川義之, 西田浩之
2. 発表標題 プラズマアクチュエータが誘起する流れ場のBackground Oriented Schlieren 法を用いた密度場計測において計測条件が与える影響
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子泰, 中野朝, 大塩裕哉, 西田浩之, 嶋崎隆晃, 田川義之
2. 発表標題 Background Oriented Schlieren 法を用いたプラズマアクチュエータが生成する流れ場の時間平均密度場計測の研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第50期定時社員総会及び年会講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京農工大学 西田研究室ホームページ http://web.tuat.ac.jp/~nishida/ 東京農工大学 工学研究院 先端機械システム部門 研究者紹介ページ https://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/29/0002900/profile.html</p>

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
研究協力者	金子 泰 (Kaneko Yutaka)	東京農工大学・工学府機械システム工学専攻・博士課程学生 (12605)	
研究協力者	畑本 明彩未 (Hatamoto Asami)	東京農工大学・工学府機械システム工学専攻・博士課程学生 (12605)	

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