

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06133

研究課題名（和文）放電モード制御によるプラズマアクチュエータの性能最大化

研究課題名（英文）Performance Maximization of Plasma Actuator by Discharge Mode Control

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） 19,000,000円

研究成果の概要（和文）：バリア放電を利用した流体制御デバイス、DBDプラズマアクチュエータの性能最大化を目標に、放電制御のコンセプトのもと、印加電圧波形のパラメトリックな最適化を行った。結果、緩急の電圧勾配を組み合わせた波形により大幅な性能向上が見られることを見出し、急電圧勾配による密なプラズマ生成と、緩電圧勾配によるプラズマの加速電場の維持が性能向上メカニズムであることを明らかにした。また、AC放電とDC放電を併用した新概念の3電極プラズマアクチュエータを提案した。体積力生成の効率が良いDC放電を、AC放電からの電子供給により強化することで高い性能が得られることを数値シミュレーションにより示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題において、プラズマアクチュエータのエネルギー効率を約50%向上させることに成功した。プラズマアクチュエータは汎用性の高い流体制御デバイスである。本課題の遂行で得た成果により適用可能な主流範囲が拡大され、航空機や車輛の空力性能改善、タービンの発電効率改善など、多岐に渡る産業分野での実用化の加速が期待できる。また、本課題の研究により、大気圧放電における電気流体力学的現象の様々なメカニズムが明らかになった。静電気工学、プラズマ工学分野における学術的価値の高い知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：For the purpose of maximizing the performance of DBD plasma actuator which is a flow control device utilizing Dielectric-Barrier-Discharge, we parametrically optimize the applied voltage waveform. The result shows that the waveform composed of steep and gradual voltage slope can provide the best performance, and it is clarified that the performance improvement mechanism is dense plasma production in the steep-voltage slope period and maintaining electric field strength for plasma acceleration in the gradual-voltage slope period. Furthermore, we propose the new concept of tri-electrode plasma actuator which combine use of AC and DC discharge. The numerical simulation shows that higher performance can be obtained in it because the DC discharge, which has high-efficient electrohydrodynamic force production, is enhanced by electron supply from the AC discharge.

研究分野：流体工学，プラズマ工学

キーワード：プラズマアクチュエータ 流体制御 大気圧放電

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

空力性能改善の要求から、流体制御デバイスとして DBD プラズマアクチュエータ (DBDPA) が近年活発に研究されている。電圧印加により生じる大気圧バリア放電 (DBD) と周囲流体との干渉により生じた体積力で表面に沿ったジェットを作るデバイスであり (図 1)、「機械的な機構が無い」、「電気信号による能動制御が

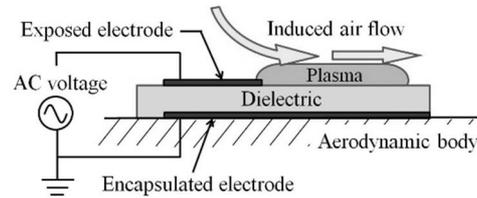


図 1: DBD プラズマアクチュエータ

容易」といった特徴から、高い汎用性を持つ。期待される一方、流れのレイノルズ数が大きくなるにつれジェット強度が不足し制御効果が減ずることが問題となり、実用化の幅が大きく制限されている。これまで、各国の研究グループがジェットの強化に取り組んだが、ブレイクスルーには至っていない。ジェットの強さが頭打ちである原因は、印加電圧を高くするとエネルギー効率が著しく下がる (0.1% 以下) ためである。研究代表者は、効率低下のメカニズムが、「印加電圧の時間勾配が閾値を超えるとコロナ型からストリーマ型へ放電モードが変化し、それにより効率が大きく低下」することを明らかにした。この知見は、印加電圧波形を適切に設計することで放電モードを制御し、性能を大きく向上できることを示唆している。3 電極構造など、その他の性能向上スキームを組み合わせれば、相乗効果によりブレイクスルーを起こせる可能性がある。

2. 研究の目的

- (1) 「放電モードを制御する」コンセプトのもと、DBDPA の性能向上が可能な印加電圧波形を設計する。
- (2) 放電制御の考えを 3 電極構造の PA に拡張し、より飛躍的な性能向上を実現可能な新しいコンセプトの PA を提案する。

3. 研究の方法

- (1) DBDPA が誘起するジェットの反力の計測 (推力計測)
- (2) 放電電流波形計測, 消費電力計測 (リサージュ法)
- (3) Particle-Image-Velocimetry (PIV) 法による誘起ジェットの流速場計測と、流速場の解析に基づいた体積力場推定
- (4) Drift-Diffusion 近似による放電プラズマの数値流体シミュレーション

4. 研究成果

(1) 印加電圧波形の設計

図 2 に示す 11 種類の印加電圧波形について、推力計測と消費電力計測により DBDPA の性能を評価し、印加電圧波形の影響を調査した。DBDPA の誘電体材料には 3 mm のアクリルを用い、印加電圧の周波数は 1 kHz、ピーク電圧は 16 kV とした。三角波、正弦波、方形波以外の波形は、急電圧勾配と緩電圧勾配の組み合わせで構成されており、これはストリーマ型放電への放電モード遷移が生じる区間を放電の 1 周期の中でコントロールする発想に基づいている。

図 3 に、基準となる三角波及び緩急勾配で構成された波形について、推力値と推力電力比を示す。図より、印加電圧の正勾配と負勾配区間のそれぞれで急 緩と電圧勾配が変化する波形 (波形 No.) において、高い推力と推力電力比が得られることが分かる。三角波と比べ、推力と推力電力比がそれぞれ 68.8%、11.7% 向上しており、正弦波と比べても 28.4%、7.5% 向上した。

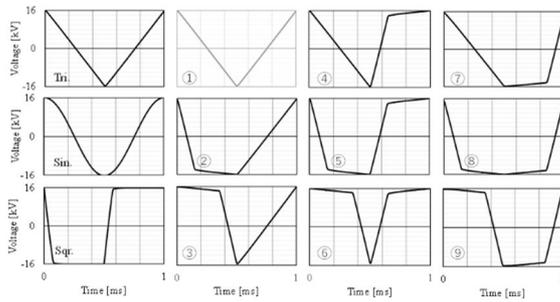


図 2：緩急勾配で構成された電圧波形

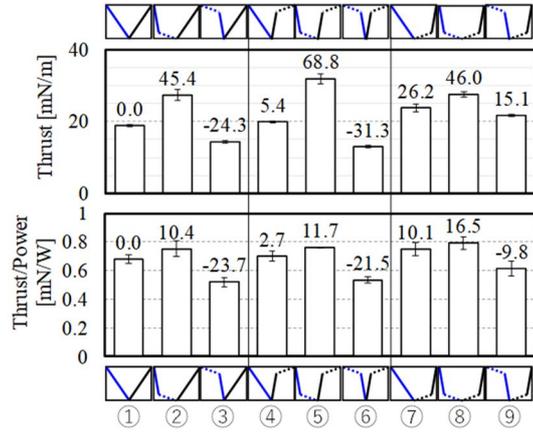


図 3：電圧波形が DBDPA の性能に与える影響

(2) 緩急勾配波の性能向上メカニズム

図 4 に、三角波と高い性能が得られた緩急勾配波 (No.) について、放電電流波形と PIV 計測結果から推定した体積力の時間変動を示す。まず放電電流波形から、三角波においては電流パルスが広範囲において生じているのに対し、緩急勾配波においては急電圧勾配区間に集中して生じていることが分かる。また、体積力の時間変動から、緩電圧勾配区間において、体積力生成が長時間にわたり持続していることが分かる。これらは、急電圧勾配区間において密にプラズマを生成し、緩電圧勾配区間においてそのプラズマを効率的に加速して体積力を生成していることを示している。急電圧勾配区間において生じるストリーマ型放電は、体積力生成においては非効率だがプラズマ生成には有効である。そして、緩やかな電圧勾配は、プラズマの加速に必要な電場強度の維持に重要な役割を果たしている。上記のメカニズムは、放電プラズマの数値シミュレーションにおいてサポートする結果が得られている。

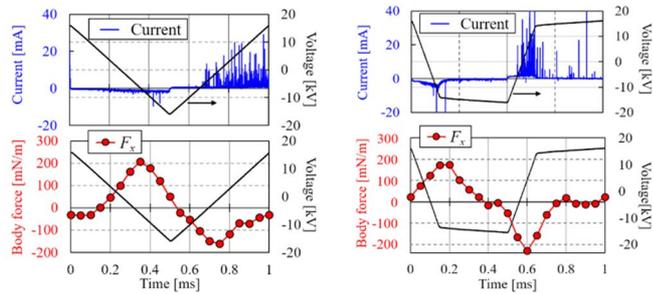


図 4: 放電電流波形 (上) と体積力の時間変動 (下)

(3) 緩急勾配波とワイヤー電極の相乗効果

一般に、平板型電極が上部の高電圧電極として用いられるが、ワイヤー型電極を用いることにより性能が向上することが報告されている。そこで、ワイヤー電極と緩急勾配波を組み合わせ、さらに正と負の電圧勾配区間の割合を変化させて波形を最適化した。結果を図 5 に示す。図の通り、ワイヤー電極に最適化された緩急勾配波を印加することで、平板型電極に正弦波を印加したケースと比べ、推力と推力電力比を 111% と 47.8% 向上させることに成功した。

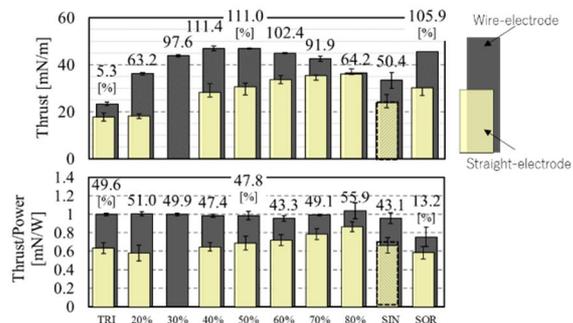


図 5: ワイヤー型電極と緩急勾配波の組み合わせ。横軸は負勾配電圧区間の割合。

(4) 新しいコンセプトに基づいた3電極プラズマアクチュエータの提案

AC 放電と DC 放電を併用した3電極型アクチュエータが Moreau らにより提案されており(図6), 推力で10倍以上の高い性能が得られることが報告されている。しかしながら, 20 kV 以上の高電圧が必要であることから, 注目を集めないでいた。研究代表者は放電プラズマの数値シミュレ

ーションにより, AC 放電からの電子供給による DC 放電の強化が性能向上のメカニズムであることを明らかにした。そして, 低い印加電圧においても高い性能を得るコンセプトとして, DC 放電を強化することに主眼を置いた AC 電圧波形の設計を提案した。そして, 数値シミュレーションによる検討から, 負の急電圧勾配を持った鋸波形の AC 電圧波形が DC 放電強化に有効であることを明らかにした。

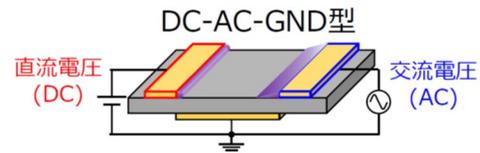


図6: 3電極型プラズマアクチュエータ

<引用文献>

野々村拓, 瀬川武彦, 深淵康二, 松野隆他: 小特集 プラズマアクチュエータの動向, プラズマ・核融合学会誌, 91 (2015), pp.657-660.

Benard, N and Moreau, E: Electrical and Mechanical Characteristics of Surface AC Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Applied to Air Flow Control, *Exp. Fluids*, 55 (2014), pp.1-43.

Moreau, E., Cazour, J. and Benard, N.: Influence of the Air-exposed Active Electrode Shape on the Electrical, Optical and Mechanical Characteristics of a Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, *J. Electros.*, 93 (2018), pp. 146-153.

Moreau, E.: Airflow control by non-thermal plasma actuators. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40 (2007), pp.605-636

T. Matsuno, M. Sugawara, H. Kawazoe and H. Nishida: Development of Serrated Multi-Electrode Plasma Actuators for Enhanced Force Production, *AIAA 2016-1691* (2016)

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 0件）

1. 著者名 NAKANO Asa、NISHIDA Hiroyuki	4. 巻 126
2. 論文標題 The effect of the voltage waveform on performance of dielectric barrier discharge plasma actuator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 173303 ~ 173303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1063/1.5116066	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 Shun、NISHIDA Hiroyuki、OSHIO Yuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Investigation on performance characteristics of dielectric discharge plasma actuator using pulsed-dc waveform	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JSFT0018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2018jfst0018	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 NISHIDA Hiroyuki、NAKAI Kumi、MATSUNO Takashi	4. 巻 55
2. 論文標題 Physical Mechanism of Tri-Electrode Plasma Actuator with Direct-Current High Voltage	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1852-1861
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J055682	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 中井久美、西田浩之、松野隆	4. 巻 41
2. 論文標題 DC放電とAC放電を利用した3電極プラズマアクチュエータの交流電圧波形による影響に関する数値的研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 194-200
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 NAKANO Asa and NISHIDA Hiroyuki	4. 巻 55
2. 論文標題 Physical Mechanism of Dual-Grounded Trialectrode Plasma Actuator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 3781-3788
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J055682	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 TAMURA Masaki, NISHIDA Hiroyuki, KOIZUMI Takuya, NAKAI Kumi	4. 巻 10
2. 論文標題 Numerical Analysis of Electrohydrodynamics Force Generation Process on Tri-Electrode Plasma Actuator Utilizing Sliding Discharge	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Journal of Plasma Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 95-101
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 OTA Kosuke, SEKIYA Tsubasa, NISHIDA Hiroyuki	4. 巻 6
2. 論文標題 Effects of flow measurement resolution on quasi-steady body force estimation in dielectric-barrier-discharge plasma actuator	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105109 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4966044	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 西田浩之	4. 巻 40
2. 論文標題 バリア放電と流体の数値解析 流体制御デバイスとしての応用 / DBDプラズマアクチュエータ	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 172-177
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29件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 NAKANO Asa, OSHIO Yuya, NISHIDA Hiroyuki
2. 発表標題 Experimental Investigation of Plasma Actuator with Voltage Waveform Including Steep and Gradual Slopes
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 Forum
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 NAKAI Kumi, HASEGAWA Daichi, HATAMOTO Asami, NISHIDA Hiroyuki
2. 発表標題 Body Force Generation Control by Modulating Applied Voltage Waveform in Tri-Electrode Plasma Actuator
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 Forum
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 NAKANO Asa, OSHIO Yuya, NISHIDA Hiroyuki
2. 発表標題 Experimental investigation for effects of dielectric material on induced flow characteristics of DBD plasma actuator
3. 学会等名 12nd European Fluid Mechanics Conference
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Nakano, M. Naka, H. Nishida
2. 発表標題 Effect of AC Voltage Waveform on Tri-Electrode Plasma Actuator Utilizing Interaction Between AC and DC Discharge
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. Nakai, A. Nakano, H. Nishida
2. 発表標題 Validation Study of Three-fluid Plasma Modeling of Dielectric Barrier Discharge for Plasma Actuator
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. Nakai, H. Nishida, T. Matsuno
2. 発表標題 Effect of AC Voltage Waveform on Tri-Electrode Plasma Actuator Utilizing Interaction Between AC and DC Discharge
3. 学会等名 International Symposium on Electrohydrodynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Nakano, H. Nishida
2. 発表標題 Study on Voltage Waveform Aiming Performance Improvement of DBD Plasma Actuator
3. 学会等名 International Symposium on Electrohydrodynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Nishida, N. Asaumi, Y. Tanaka
2. 発表標題 Effect of Aerodynamic Body Curvature on Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator
3. 学会等名 International Symposium on Electrohydrodynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Nakano, H. Nishida
2. 発表標題 Basic Study on the Voltage Characteristic of Dual-Grounded Tri-Electrode Plasma Actuator by Plasma Simulation
3. 学会等名 47th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Nakai, H. Nishida, A. Nakano
2. 発表標題 Numerical Analysis on Working Mechanism of Tri-electrode Plasma Actuator with Direct-Current High voltage
3. 学会等名 18th International Congress on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 A. Nakano, H. Nishida
2. 発表標題 Numerical Analysis on Body Force Characteristics of Dual-Grounded Tri-Electrode Plasma Actuator
3. 学会等名 18th International Congress on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 西田浩之, 太田康介, 野々村拓
2. 発表標題 Helmholtz 分解を用いたプラズマアクチュエータの体積力場推定
3. 学会等名 平成28年度 航空宇宙空力シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学 西田研究室のホームページ
<http://web.tuat.ac.jp/~nishida/>

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	松野 隆 (Matsuno Takashi)	鳥取大学・工学部機械物理系学科・講師	