

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14070

研究課題名（和文）プラズマアクチュエータの実用化に資するフィードバック放電場制御則の構築

研究課題名（英文）Consideration of Discharge Control Law for Practical Application of Plasma Actuator

研究代表者

中井 公美（Nakai, Kumi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究員

研究者番号：20897813

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：大気圧バリア放電を利用した流体制御デバイスであるプラズマアクチュエータの性能向上を目標に、放電プラズマのダイナミクスに立脚した設計パラメタ最適化フレームワークを実現するための基盤構築に取り組んだ。放電場の状態を低い計算負荷で予測可能な放電プラズマの低次元モデル開発に向け、放電場のモード分解法の検討を行い、主要モードの特性について明らかにした。さらに、低次元モデルによる放電場予測の計算負荷低減に向けた解析点位置最適化手法の開発に取り組み、従来手法よりも高性能な解析点位置を得られる手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題において提案した解析点位置最適化手法は、放電プラズマ現象のみならず、流体場、地震波動場、気象場など種々な大規模データの観測や解析に応用可能な基盤的技術である。また、本研究で得られた大気圧放電プラズマに関するモード分解法を用いたモデル開発の知見は、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ものであり、各種プラズマ技術の効率的な解析や技術の高性能化に繋がると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research project is to provide foundations to realise a framework for optimising design parameters based on the dynamics of discharge plasma, aiming to improve the performance of plasma actuators using atmospheric pressure barrier discharge. Towards the development of a low-dimensional model of the discharge plasma that can predict the discharge field with a low computational cost, a mode decomposition method for the discharge field was investigated and the characteristics of the dominant modes were clarified. Furthermore, the processing point optimisation method was developed to reduce the computational cost of predicting the discharge field using a low-dimensional model, and the proposed method was clarified to obtain processing points that are more efficient than those obtained by conventional methods.

研究分野：流体工学，プラズマ工学

キーワード：大気圧プラズマ バリア放電 プラズマアクチュエータ 流体制御 データ駆動科学

### 1. 研究開始当初の背景

自動車、航空機、風車、タービンなどの流体機器の性能改善の要求から、空気の流れを制御する流体制御デバイスが考案されてきた。中でも、プラズマアクチュエータが近年活発に研究されている。プラズマアクチュエータは、誘電体バリア放電（Dielectric Barrier Discharge : DBD）による誘起流の流れの制御に利用するアクチュエータである。誘電体を挟んだ二枚の電極間に交流高電圧を印加することで気体をプラズマ化し、放電プラズマと周囲流体との干渉により、表面に沿ったジェットが誘起される（図 1）。プラズマアクチュエータは、機械的可動部が無く、電気信号に対して高速応答が可能という特徴から、高い汎用性を持つ。実用化が期待される一方、現状では流体制御力の強度不足により、実用化の幅が大きく制限されている。各国の研究グループが流体制御力の向上に取り組んできたが、ブレイクスルーには至っていない。その主な要因は、印加電圧を上げるとエネルギー効率が低下し、流体制御力が頭打ちになるためである。プラズマアクチュエータの実用化を加速するには、大きな流体制御力を高効率に生成するための技術革新が必要不可欠である。

プラズマアクチュエータの流体制御メカニズムの一つは、放電プラズマによる電気流体力生成である。電気流体力生成を決定づける設計パラメタの一つが印加電圧条件であり、これまで国内外の研究グループにより印加電圧条件を最適化する研究が実験および数値的アプローチから行われてきたが、最適化できているとは言い難い。これは、印加電圧をパラメトリックに変化させ、巨視的な流体計測値に基づき最適条件を探す試行錯誤的なアプローチが主流であるためである。

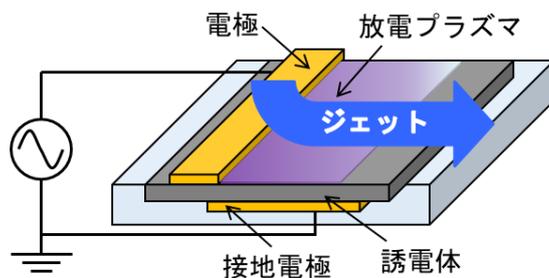


図 1 DBD プラズマアクチュエータ模式図

### 2. 研究の目的

上述の研究開始当初の背景の中で、本研究では放電プラズマのダイナミクスに立脚し、電気流体力の生成効率を最大化する放電場を実現するよう、印加電圧パラメタを最適化するフレームワークの構築を目指す。放電場の状態を低い計算負荷で予測可能な (1) 放電プラズマの低次元モデルの開発、および、少数の解析点の情報を用いて低コストかつ高精度に放電場を予測するための (2) 解析点位置最適化手法の開発に取り組み、放電場を制御する観点で印加電圧パラメタを最適化するフレームワークを実現するための研究基盤の構築に取り組んだ。

### 3. 研究の方法

本研究では (1) 放電プラズマの低次元モデルの開発、および (2) 解析点位置最適化手法の開発を並行して進める。

(1)では、放電プラズマの種々の状態量に関する時系列データが不可欠である。そこで、実験では計測困難な物理量の取得や、実験計測に比べてより高空間解像度・高時間解像度でのデータ取得が可能な数値シミュレーションによる解析データを基に研究を進めた。数値シミュレーションには、研究代表者が開発してきた放電プラズマの流体モデルに基づく数値シミュレーションを用いた。低次元モデル開発には、流体解析などで用いられるデータ駆動型のモード分解/低次元化法を用いた。近年、流体場のような大規模自由度を有する場に対し、背後にある潜在変数が少数であることを利用したデータ駆動型の低次元モデル構築に関する研究が国内外で活発に行われている。そこで、放電プラズマの数値シミュレーションを用いて構築したデータベースに対し、流体力学分野で発展してきたデータ駆動型のモード分解法を適用することで、低次元モデルの構築に取り組んだ。低次元モデルを用いた放電場の解析結果を流体モデルに基づく数値シミュレーション結果と比較することで、低次元モデルによる放電場の予測性能を評価する。

(2)では、流体力学分野で提案されているデータ駆動型の観測点位置最適化手法を発展させた。この観測点位置最適化手法では、最適実験計画法に基づく Fisher 情報行列の特徴量最小化を目的関数とする最適化問題を解くことで、観測点を選択する。特に、Fisher 情報行列の特徴量の評価に最適実験計画法の D-optimality を用い、最適化アルゴリズムには貪欲法を用いる手法がよく用いられる。そこで、従来手法を基盤とし、放電場など種々の大規模データへの適用を見据えた、より高度な観測点位置最適化アルゴリズムの開発を行った。開発したアルゴリズムのコード実

装およびベンチマークへの適用により性能を評価する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 放電プラズマの低次元モデルの開発

プラズマアクチュエータにおける放電場を低い計算負荷で解析する低次元モデルを開発するため、まず、申請者らが開発してきた放電プラズマの流体モデルに基づく高精度数値シミュレーションをパラメトリックに実施することで、放電場の大規模データベースの構築を進めた。プラズマアクチュエータが周囲流体を制御するメカニズムは電気流体力生成であり、研究代表者らのこれまでの研究に基づくと、印加電圧パラメタが電気流体力生成を高効率化するために重要な設計パラメタの一つである。そこで、印加電圧パラメタに応じて変化する放電場に着目したデータ収集を行った。そして、数値シミュレーションにより得られた放電場データベースに対し、流体解析などで用いられるモード分解法の一つである特異値分解を適用することで、放電場の主要モード抽出を検討した（図 2）。その結果、放電形態の遷移が生じる場合に、主要モードの特性が大きく変化することが分かった。プラズマアクチュエータでは、印加電圧パラメタに応じて、コロナ型放電からストリーマ型放電への放電形態の遷移が発生する。印加電圧パラメタに応じた主要モードの変化は、放電形態遷移の前後で放電プラズマの様相（電場の強度や空間構造、放電プラズマ粒子密度）が大きく異なることが要因と考えられる。

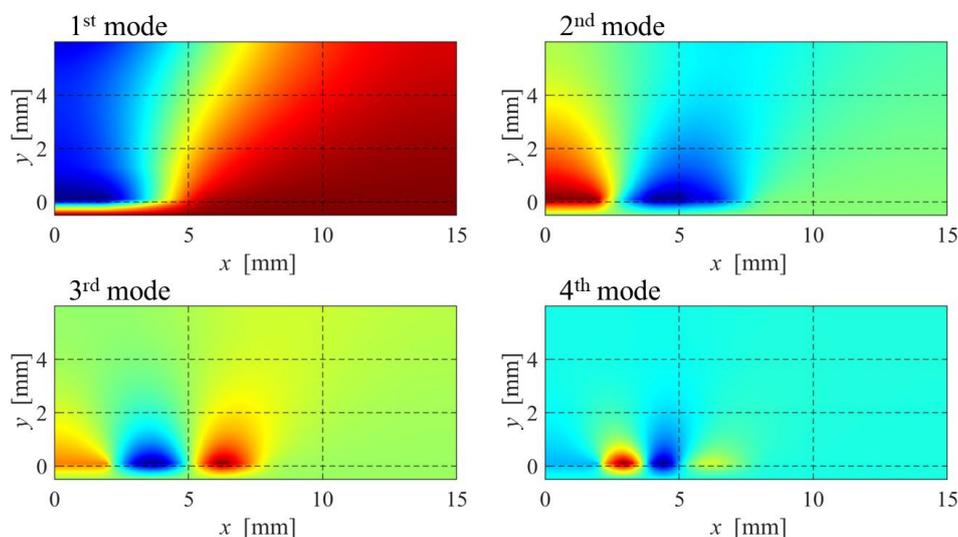


図 2 放電場の主要モード抽出

##### (2) 解析点位置最適化手法の開発

低次元モデルによる放電場予測の計算負荷低減および高精度化に向けて、流体場を対象として開発されてきた観測点位置最適化アルゴリズムを拡張する。従来の観測点位置最適化アルゴリズムは、単一の最適指標に基づく Fisher 情報行列の特徴量を考慮した目的関数を用いる貪欲法である。一方、本研究では複数の最適指標に基づく目的関数を同時に考慮する多目的最適化問題の非劣解を求める貪欲法アルゴリズムを提案した。まず、提案手法について、従来手法に対する性能向上を理論的に示し、ランダムデータセットを用いたベンチマーク問題に適用した。目的関数は、最適実験計画法の D-optimality に加えて A-および E-optimality を考慮した。その結果、単一の最適指標を考慮する従来の貪欲法に比べ、調査した範囲内ではほぼ全ての計算条件において評価関数の性能を向上できることを明らかにした（図 3）。特に、目的関数に劣モジュラ性が無い場合に、その最適化結果を大幅に改善できる。これは、貪欲法では目的関数に劣モジュラ性がある場合に性能の下限が保証されるが、提案手法では、劣モジュラ性の無い目的関数についても、劣モジュラ性がある他の目的関数との相関を利用することでその性能を向上できるためである。さらに、提案手法は多目的最適化問題のパレート解に相当する複数の解析点位置候補を獲得できる（図 4）ため、問題に応じて最適な解を選択できる利点も有する。本提案手法は、気象場や地震波動場などの大規模データ観測の分野において、センサの設置にかかるコストを同時に考慮したセンサ位置最適化問題にも適用できる可能性がある。この結果は国際学会誌に掲載されている。

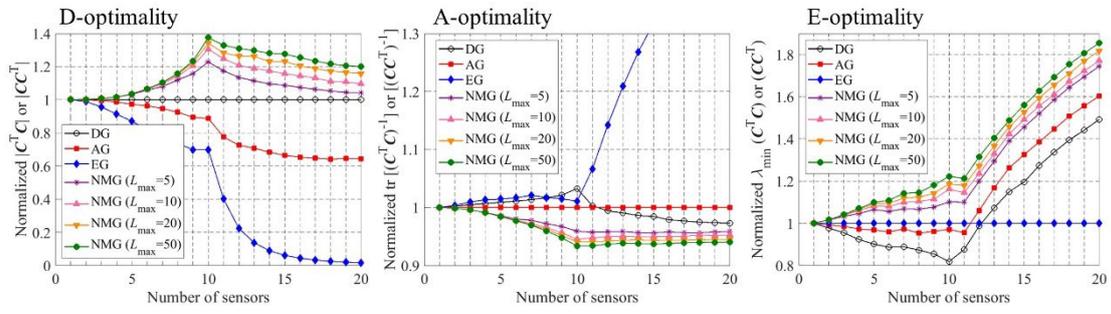


図3 提案手法および従来手法を用いた解析点位置最適化における目的関数の比較

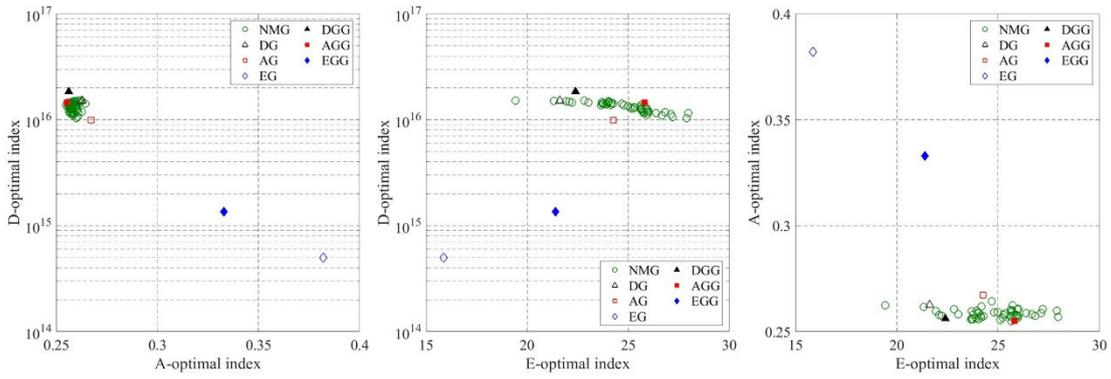


図4 目的関数空間における最適化結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Nakai Kumi, Sasaki Yasuo, Nagata Takayuki, Yamada Keigo, Saito Yuji, Nonomura Taku	4. 巻 70
2. 論文標題 Nondominated-Solution-Based Multi-Objective Greedy Sensor Selection for Optimal Design of Experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 5694 ~ 5707
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TSP.2022.3224643	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 Iwasaki Yuto, Nagata Takayuki, Sasaki Yasuo, Nakai Kumi, Inubushi Masanobu, Nonomura Taku	4. 巻 13
2. 論文標題 Reservoir computing reduced-order model based on particle image velocimetry data of post-stall flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 65312
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0150947	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10件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kumi Nakai
2. 発表標題 Introduction of Research Topics and Experiences on Discharge Plasma
3. 学会等名 International Young Electrostatic Scholar Symposium for Convergence Technology 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井公美
2. 発表標題 プラズマアクチュエータの実用化に向けた電気流体力生成機構の解明とスパース再構成技術の紹介
3. 学会等名 令和3年度第2回静電気・高電圧・放電・プラズマ若手研究委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井公美
2. 発表標題 気流制御への応用を目指した電気流体力生成機構の解明
3. 学会等名 2022年度第一回静電気学会研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部千隼, 神田直樹, 金子紗弓, 中井公美, 野々村拓
2. 発表標題 スパースプロセッシングPIVを用いた流速場リアルタイム計測における空間解像度の向上 -第 2 報- 異なる相関窓データへの射影
3. 学会等名 第55回流体力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chihaya Abe, Naoki Kanda, Sayumi Kaneko, Kumi Nakai, Taku Nonomura
2. 発表標題 Improvement of Robustness on Real-time Flow Field Measurement using Sparse Processing PIV
3. 学会等名 The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安齋佳希, 後藤真太郎, 中井公美, 小室淳史, 野々村拓
2. 発表標題 プラズマアクチュエータ駆動が圧力センサを用いた流れ場推定に与える影響の調査
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 岩崎有登, 永田貴之, 中井公美, 野々村拓, 浅井圭介, 犬伏正信
2. 発表標題 リザパーコンピューティングを用いた翼面上非定常圧力データに基づく翼周り時系列速度場の推定手法の開発
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiki Anzai, Shintaro Goto, Yasuo Sasaki, Kumi Nakai, Atsushi Komuro, Taku Nonomura
2. 発表標題 Time-Series Velocity Field Reconstruction Based on Unsteady Pressure Sensors for Feedback Control of Separated Flow around an Airfoil
3. 学会等名 75 th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中井公美, 永田貴之, 山田圭吾, 齋藤勇士, 野々村拓, 加納将行, 伊藤伸一, 長尾大道
2. 発表標題 プロセス駆動型地震波動場再構成に向けた物理モデルパラメタ推定のための観測点選択手法の提案
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中井公美, 永田貴之, 山田圭吾, 齋藤勇士, 野々村拓, 加納将行, 伊藤伸一, 長尾大道
2. 発表標題 プロセス駆動型地震波動場再構成に向けた物理モデルパラメタ感度に基づく観測点選択手法の開発
3. 学会等名 日本地震学会2022 年度秋季大会
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
---------	---------