

補助事業番号 2024M-397

補助事業名 2024年度 流れの摩擦力の飛躍的低減を実現するプラズマアクチュエータアレイの作動特性解明と制御の研究 補助事業

補助事業者名 東京農工大学 工学部 機械システム工学科 西田浩之

1 研究の概要

プラズマアクチュエータアレイ(PAアレイ)は、機械的な可動部を必要とせず放電により空気の流れを制御するアクチュエータである。本事業では、航空機の抗力低減やガス輸送パイプラインの輸送抵抗低減など、モビリティと流体機械の性能革新を目指し、流れの摩擦抵抗の飛躍的低減に必要なPAアレイ技術を確立するための研究を行う。国際的な協力を行いつつ、PAアレイが流れを制御する原理である電気流体力(流れを加速する力)の生成メカニズムと特性を解明し、摩擦抵抗低減に必要な電気流体力とイオン風の緻密な制御を実現する。

2 研究の目的と背景

航空機の抗力低減やガス輸送パイプラインの輸送抵抗低減など、物体表面における空気の流れの摩擦抵抗の低減は流体力学の重要課題である。近年、ノートルダム大のDuangらは、多数のプラズマアクチュエータ(PA)を壁面上に敷き詰めて積層配置し(PAアレイ)、主流と垂直方向に表面に沿った流れ(イオン風)を誘起させることで、約70%の極めて大きな摩擦抵抗低減と消費電力を上回るエネルギー利得が得られたことを報告した。PAは、大気圧下の放電で生じたプラズマの運動が作り出す電気流体力(空気を加速する力)でイオン風を誘起する機械的可動部を持たない先進流体制御アクチュエータである。彼らの報告以降、PAアレイの開発が世界的に加速した。しかしながら、70%低減を再現する条件を他の研究チームは作り出せていない。これは、PAアレイの作動特性への理解が不足していることが大きな原因と考えられる。ポワチエ大(仏)のBenard准教授は、アレイ化によって近接するPAが電磁氣的に干渉し、電極間距離(積層配置したPA間の距離)と放電電圧に応じてイオン風の風向が反転する大きな変化が生じることを報告している。最大の摩擦抵抗低減効果を得るには、電気流体力の空間分布や強度などの特性を明らかにし、抵抗低減効果との関係を整理したうえで、的確に制御する必要があるが、電気流体力の直接計測は不可能であり、その詳細は未解明である。そこで本事業では、まず数値シミュレーションにより、PAアレイの電気流体力とイオン風挙動の特性を明らかにする。次に、イオン風流速分布、表面電位分布の計測実験を行い、シミュレーション結果と合わせて考察する。そして以上の知見をもとに、イオン風の挙動を制御する手法を提案する。

3 研究内容

(1)数値シミュレーションによるPAアレイの解析

PAアレイが誘起するイオン風の挙動は、電極や誘電体の形状パラメータと印加電圧などの駆動パラメータによって大きく変化し、特に顕著な例として、風向が反転する現象が生じる。

そこでPAアレイの電極間距離，電極厚さ，電極形状の対称性（2次元・軸対称）について，プラズマとイオン風の数値シミュレーションによりパラメトリックに調査した結果，電極間距離と電極形状の対称性がイオン風挙動（風向反転）に大きく影響することを明らかにした（図1）．電極間距離が小さく，電極形状が軸対称である場合に，イオン風の流速方向は反転する（図2）．

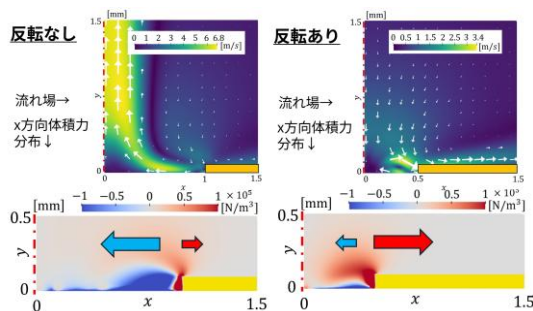


図1:シミュレーション結果例

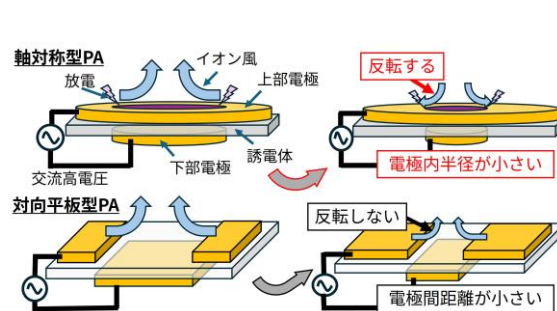


図2:イオン風の風向反転(模式図)

(2)実験によるPAアレイの解析とシミュレーションとの比較検証

(<https://web.tuat.ac.jp/~nishida/research.html>)

イオン風流速，放電発光領域サイズ，表面電位分布の関係を実験結果から明らかにし（図3），さらにシミュレーション結果との比較を行った．比較の結果，シミュレーション結果は定性的にイオン風挙動の実験結果を再現できることが示され，PAアレイの物理，特性を解析する上で数値シミュレーションが有効であることを確認できた．一方で，表面電位分布の観点からは，実験結果を説明しきれることができなかった．今後，シミュレーションと実験の双方で条件や仮定，データ処理方法を見直す必要があると考えられる．

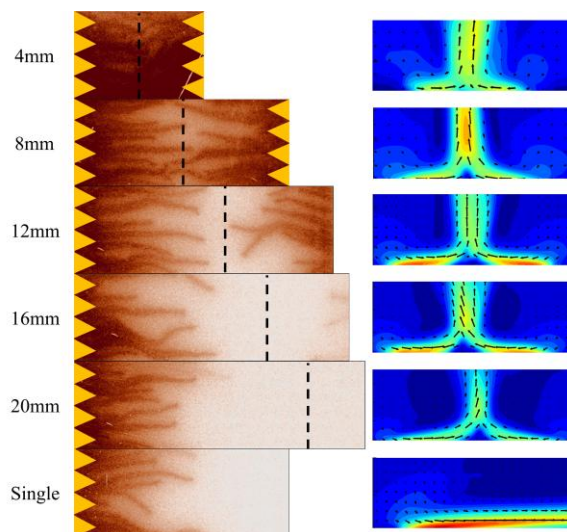


図 3：実験結果（左）ポッケルス計測法による表面電位分布，（右）PIV法によるイオン風流速分布

(3)イオン風挙動の制御

シミュレーション結果を解析し，そこから得た物的知見に基づく考察から，イオン風の風向反転の有無を特徴づける無次元の構造パラメータを提案することに成功した．このパラメータを用いて整理することで，軸対称電極型のPAアレイが2次元電極型と比べ，イオン風反転をはるかに生じさせやすいことを定量的に示せた．これにより，イオン風制御に向けたPAアレイの設計指針を得ることができた．

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究により、イオン風挙動を制御可能なPAアレイ設計の道筋を立てることができた。プラズマアクチュエータアレイによる流れの摩擦抵抗低減技術は、航空機や鉄道車両の燃費・電費改善、パイプラインのガス輸送効率改善など、将来的に様々な流体機械の効率改善への貢献が期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

PAアレイにおけるイオン風の特異な挙動(風向の反転)は、実験的観測され知られていたものの、どのような条件で発生するのかが不明であったため、PAアレイを制御できなかった。本研究は、イオン風反転が生じる条件を明確に示すことに成功した。これは、PAアレイを制御し、ひいては境界層流れを制御する上で、重要な進展であると考えている。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- Fukumori, I., Otomo, S. and Nishida, H., “Numerical study on physical mechanism of ionic wind direction inversion in Annular-type PA,” The 34th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-34), November 10–14, 2024, Taoyuan, Taiwan.
- Ishii, Y., Kaneko, Y., Komuro, A., Ōtomo, S. and Nishida, H., “Pockels Measurement-based Investigation of Surface Potential and Its Effect on Mechanical Characteristics of Vortex-Generator-Type Plasma Actuator,” The 34th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-34), November 10–14, 2024, Taoyuan, Taiwan.
- 石井悠貴、金子泰、小室淳史、上村拓真、西田浩之、“誘電体表面の電位分布が対向型プラズマアクチュエータの作動特性に与える影響の実験的研究”、日本機械学会 2024 年度年次大会、愛媛、2024年 9 月。
- 石井悠貴、小室淳史、金子泰、大友衆示、西田浩之、“対向型プラズマアクチュエータの電位分布が作動特性に及ぼす影響の実験的研究”、第 26 回 静電気学会春季講演会、東京、2025 年 3 月
- Nishizawa, A., Hatamoto, A., Ōtomo, S. and Nishida, H., “Experimental Evaluation of Cooling Effect in Forced Convection Heat Transfer with Plasma Actuator,” The 34th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-34), November 10–14, 2024, Taoyuan, Taiwan.

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

該当なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 東京農工大学工学部(トウキョウノウコウダイガクコウガクブ)

住 所: 〒184-8588

東京都小金井市中町2-24-16

担 当 者: 教授・西田浩之(ニシダ ヒロユキ)

担 当 部 署: 機械システム工学科(キカイシステムコウガツカ)

E - m a i l: hnishida@cc.tuat.ac.jp

U R L: <https://web.tuat.ac.jp/~nishida/index.html>

<https://web.tuat.ac.jp/~nishida/research.html>