

## 海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成30年度

受付番号 201860102

氏名 渡邊 保真

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：ノートルダム大学（国名：米国）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。  
極超音速機の放電空力制御に向けた高速気流中でのプラズマフィラメント挙動の解明
3. 派遣期間：平成 30年 4月 1日 ~ 令和 2年 3月 31日
4. 受入機関名及び部局名  
Institute for Flow Physics and Control, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意（A4判相当3ページ以上、英語で記入も可）**  
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)  
(注)「6. 研究発表」以降については様式10-別紙1~4に記入の上、併せて提出すること。

## 5. 所期の目的の遂行状況及び成果

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

### 研究の背景

航空機・スペースシャトルなど従来の高速輸送機は、主にフラップ等の舵面操作で発生する空気力により姿勢制御・空力制御を行う。しかし、近年空気力によらない、プラズマ（即ち電磁力）を利用した空力制御が注目されている。亜音速においては、従来のフラップで実現不可能だった大揚力をプラズマアクチュエータが発生可能とし、また、マッハ数が2~3程度と小さな超音速域では衝撃波発生位置をプラズマで制御しエンジン効率を改善する技術やエンジン内部での流れ制御と燃料点火・保炎技術がそれぞれ研究されている。これらの電磁気的な空力制御の利点は、(1)応答時間が短いこと、(2)可動部分を持たないため故障しにくいことである。この利点は、飛行速度がマッハ数5以上と大きく高レベルの安全性が要求される極超音速機において特に重要となる。

本研究ではアーク放電の一種であり自己収縮によりフィラメント状の様相を呈する Quasi-Direct Current (Q-DC) プラズマを局所的な高速加熱源として利用した気流制御の実現を目指すものである。具体的には図1に示すような超音速・極超音速輸送機を想定し、その機体表面やフラップ近傍で Q-DC プラズマを生成することにより機体に作用する空気力を制御するものである。これにより従来型の機械駆動式空力制御では実現が難しい高速気流制御の実現を目指す。現状では将来型高速輸送機の巡航速度はおおよそ毎秒1キロメートル以上で設計される場合が多いため、プラズマフィラメントの挙動と気流制御効果を解明することは高速輸送機の姿勢制御遅れを低減し輸送機運用上の安全性向上に資すると期待される。

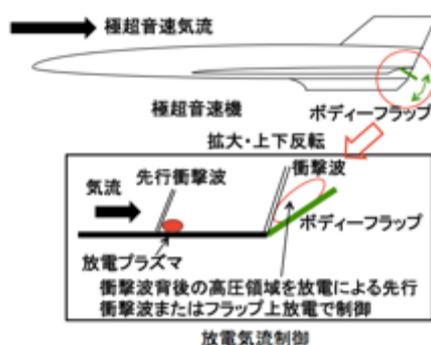


図1 本研究で提案する放電気流制御の概要

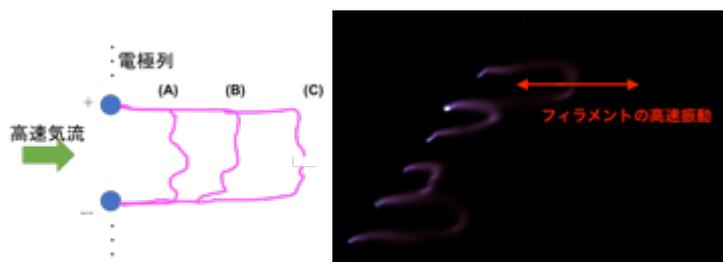


図2 プラズマフィラメントの非正常挙動：A. 絶縁破壊、B. 移流、C. フィラメント消失

研究提案当初は非定常なプラズマの高速気流中での挙動やそのプラズマパラメータとの関係、そしてこれらのパラメータ・現象と実際の気流制御効率との相関関係が未解明であった。そこで、航空分野での流体制御研究で有名な米国インディアナ州ノートルダム大学所有の超音速・極超音速風洞 SBR-50 において実験的に、また並行して数値解析を行うことにより本現象と気流制御効率を明らかにする事を目指し、本研究を提案した。

### 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究の目的は放電空力制御におけるプラズマフィラメントによる気流加熱現象の特性解明、及びその解析モデルの提案である。

実験的なアプローチ：放電気流制御特性については電極列&フラップ複合の空力制御装置を用いた実験により気流条件（よどみ点温度・圧力、レイノルズ数）とプラズマ電力、ボディーフラップ表面での圧力変動の関係を明らかにする。実際には、派遣希望先であるノートルダム大学超

音速・極超音速風洞 SBR-50 において、10～20 度のフラップ前方で定常放電を行いそのときのプラズマ電力あたりのフラップ圧力減少量との関係を各種気流条件ごとに整理し、その関係を求める。気流条件は風洞が動作可能なマッハ数 2, 4 とし、より高速域での特性を解明するため東京大学柏極超音速風洞にてマッハ数 7 での補助実験も行う。

解析的なアプローチ：Q-DC プラズマのフィラメントは図 2 に示すような U 字型の放電経路を形成する。最初に電極列近傍で形成された放電経路は高速気流によって下流へと移流し、ある地点で消失する、といったサイクルを繰り返す。最初の絶縁破壊経路の形成については申請者が過去に開発した、電磁流体の支配方程式（Drift-diffusion 方程式および電場の方程式）に対する系の全体線形安定性解析により絶縁破壊電圧および放電経路を推定する手法 (Plasma Sources Science and Technology, 24, 055014) を超音速境界層内の電極近傍流れに適用することで解析を行う。また、フラップに働く空気力の解析的推算を行うにあたっては Navier-Stokes 方程式をベースにフィラメントからの加熱エネルギーを加味した方程式系の解析を行い気流パラメータ・プラズマ電力・制御効率の解析結果を実験と比較することで制御特性の傾向を明らかにする。

以下に研究成果のハイライトを記載する。詳細な成果については本研究の研究成果リストに記載の発表論文および講演会論文を参照していただきたい。

### プラズマフィラメント挙動の解明

プラズマフィラメントは超音速気流中で U 字型の非定常振動を行うことが実験により明らかとなった。振動時のプラズマ電圧と電流の推移を図 3 に示す。グラフの線形増減部分はフィラメントの移流による電圧の変化を表しており、フィラメント単位長さあたりの電圧変化がほぼ一定であることの証左である。気流条件やプラズマ電源電圧等を様々に変化させた上でプラズマの分光解析による電子温度の測定を行なった。その結果、プラズマの電子温度は  $T_e=1.4\text{eV}$  でほぼ一定であることが判明した。また、フィラメントを高速カメラ (60000frames/sec) にて撮影しその周波数特性を特定するため動的モード解析 (Dynamic mode decomposition) を適用した (図 4)。その結果気流条件にこそ依存するがフィラメントの気流方向振動は 15-20kHz 前後に主要な振動モードがあり、この周波数はプラズマ電圧・電流に対して FFT 解析を行って得られた特性周波数と一致した。さらに、この周波数はフィラメント生成位置からフラップ配置箇所までの距離と、超音速気流の流速から推算される電極-フラップ間の移流によって起こされると推定される周波数に近く、フィラメントが壁面境界層、その近傍の剥離・加熱領域、超音速流との境界領域に存在し気流と強く相互干渉していることが判明した (図 5)。

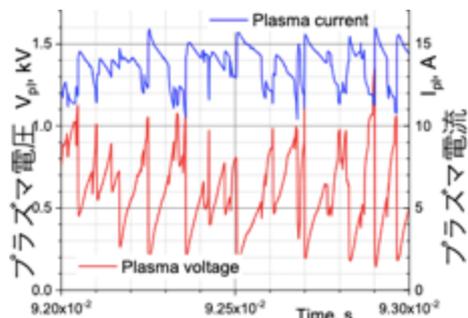


図 3 フィラメントの振動によるプラズマ電圧の変化

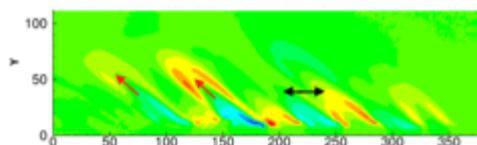


図 4 動的モード解析により特定されたフィラメントの振動モード 17kHz

[ref. Watanabe et al. J Phys D 2019]

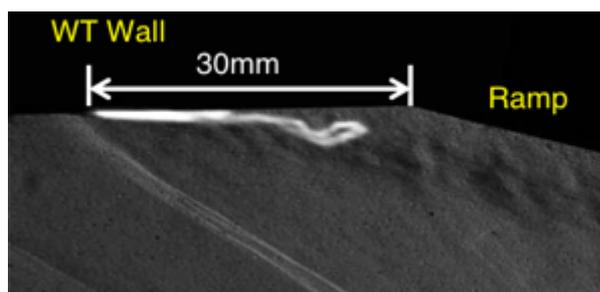


図 5 フィラメントと気流の相互干渉  
[ref. Watanabe et al. J Phys D 2019]

### 気流制御効果とその制御効率の解明

プラズマで消費された平均電力とフラップでの圧力変動の間に強い線形関係があることが明らかになった。これはマッハ数2マッハ数4等実験したいずれの流速域においても確認された。この線形関係は実際の航空機制御則を組む上で非常に特性が良く、高速空力制御に適した現象であることが確認された。また、横軸に無次元プラズマ電力、縦軸に相対圧力変動を取ることにより制御効率が特定された。効率は気流密度の低い高速域の方が高く、より高高度を飛行する超音速機・極超音速機に適していることが示唆された。(図6、7)

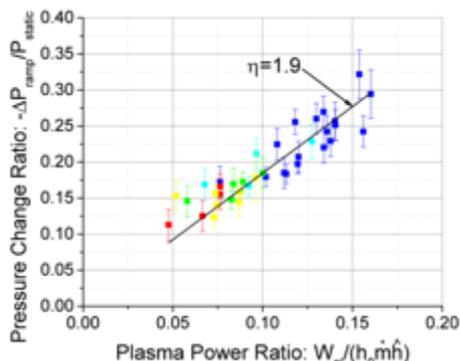


図6 気流制御効率の例 (Mach2) [ref. Watanabe et al. J Phys D 2019]

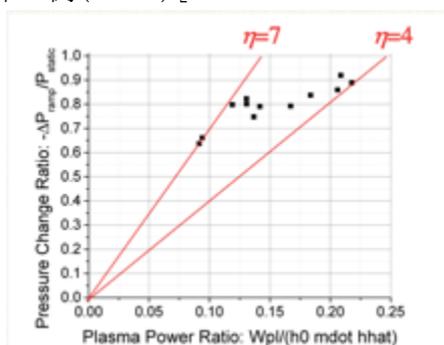


図7 気流制御効率の例 (Mach4)

[ref. Watanabe et al. AIAA Paper AIAA2020-1889, 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-1889>]

### パルス放電による気流制御と省エネルギー制御の可能性

様々に周波数を変えたパルス放電により気流制御効果とその制御速度を特定した。プラズマを生成してからフラップでの空気力が変動し始めるまでにはおよそ200マイクロ秒かかるのに対し、プラズマをオフにしてから制御された空気力が消失するまでには300マイクロ秒と長くかかることが判明した。これは圧力変動をプラズマ後方の高温剥離領域が担っており、これが吹き流される時に要する時間が生成に要する時間よりも長いためである。これにより適切な周波数とデューティ比を選択することで同じ効果を得つつも消費電力を低減できる可能性が示唆された。

### 気流制御に関する数値解析

系の安定性解析に基づく放電路解析により2つの円柱形電極からの放電は気流中においてU字型の放電路を初期に生成することが確認された。また、Navier Stokes方程式に基づく支配方程式の解析を実施し、風洞実験では実現できない気流・プラズマパラメータを含めて気流制御効果を推算した。図8に解析された流れ場と実際の流れ場を示す。プラズマ電力が一定値に達するまでは制御効率は高効率のまま一定であり空気力制御量は線形に変化するが、プラズマ生成領域での空気密度に対する投入電力が一定値に達すると、制御効率が低下し空気力制御量も一定値に漸近することが示唆された。[Watanabe et al. AIAA2019-2996 2019, AIAA2020-1889 2020]

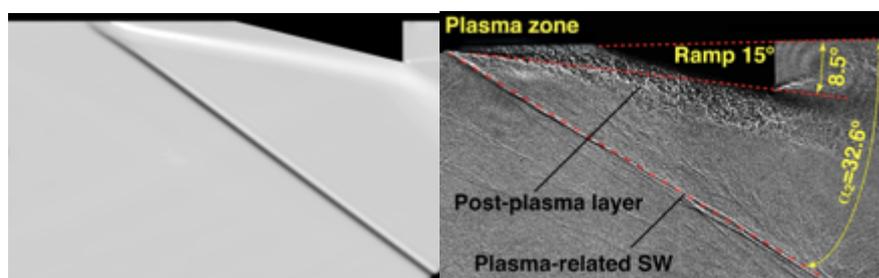


図8 解析された流れ場と実際の流れ場 [ref. Watanabe et al. J Phys D 2019]

以上が本研究成果の要点である。詳細については以下のリストに示す、本研究期間に発表した主な論文（抜粋）を参照していただきたい。また、成果全体については別紙の研究成果リストに記載の発表論文および講演会論文を参照していただきたい。

成果に関する論文（抜粋）

Watanabe, Y.; Houpt, A.; Leonov, S.B. “Plasma-Assisted Control of Supersonic Flow over a Compression Ramp” *Aerospace*, 6(3), 35, 2019.

<https://doi.org/10.3390/aerospace6030035>

Yasumasa Watanabe, Alec Houpt, Sergey B. Leonov, “Plasma-based Control of Mach-2 Supersonic Flow over Compression Ramp”, *AIAA Paper*, AIAA2019-1348, 2019.

<https://doi.org/10.2514/6.2019-1348>

Yasumasa Watanabe, Skye Elliott, Alexander Firsov, Alec Houpt, Sergey B. Leonov, “Rapid control of force/momentum on a model ramp by Quasi-DC plasma”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52, 444003, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab352f>

Yasumasa Watanabe, Sergey B. Leonov, “Experimental and Numerical Study of a Control Effect of Plasma Array on Flow Structure over Compression Ramp”, *AIAA Paper*, AIAA2019-2996, 2019. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2996>

Yasumasa Watanabe, Skye Elliott, Alec Houpt, Sergey B. Leonov, “Q-DC Plasma Actuation for Mach-4 Supersonic Flow Control over Compression Ramp”, *AIAA Paper*, AIAA2020-1889, 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-1889>