

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13923

研究課題名（和文）高速気流中でのプラズマフィラメント挙動の解明と極超音速放電空力制御への応用

研究課題名（英文）Investigation of Plasma Filament Behavior in High-speed Flow for Plasma-assisted Aerodynamic Control at Hypersonic Speeds

研究代表者

渡邊 保真（Watanabe, Yasumasa）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：60736461

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：将来型高速輸送機での安全性向上のため、従来の機械駆動式とは異なる高速空力制御技術が必要である。姿勢制御高速化のため直流放電の一種であるQ-DCプラズマフィラメントを用いた電氣的な気流制御に着目しその気流制御メカニズムと特性を明らかにした。電極列により生成されるフィラメントは高速気流と強く干渉し300 μ 秒以内に空気力制御が可能であり、制御される空気力はプラズマでの消費電力に対して線形関係を示した。この気流制御現象の数値解析モデルを提案し、解析結果は実験結果と良好一致を示した。本研究で扱う放電プラズマ現象とその解析手法はその高速特性から将来型超音速エンジンの保炎技術などへの応用も期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Q-DCプラズマフィラメントと高速気流の干渉現象を利用した高速気流制御現象という電磁気と航空流体の複合分野に於いて、プラズマ挙動と高速気流への干渉メカニズムの解明、空気力制御量のプラズマ電力への線形依存性の発見と制御効率の特定、そしてこれらの解析モデル構築により、プラズマフィラメントと高速気流の干渉現象を明らかにしたことが学術的意義である。本研究での放電プラズマを用いた高速気流制御現象とその解析手法により、同様のプラズマを利用したエンジンの着火・保炎などのプラズマ産業分野への波及効果が期待でき、更には将来型航空機における高速空力制御の信頼性を向上させ安全安心な航行に資する点が社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：Rapid flow control is a key technique to realize reliable supersonic/hypersonic transports and aerodynamic control. Quasi-Direct Current (Q-DC) plasma filaments were employed to rapidly control high-speed flows and the flow control effects were characterized by experiments. Filaments generated at an electrode array strongly interfered with supersonic flows and exhibited quick change in surface pressure within 300 μ s, quick enough for supersonic/hypersonic airplanes. Amount of pressure change was found to be a linear function of plasma power. Numerical simulation model was proposed and its result showed a good agreement with findings in wind tunnel tests. Q-DC plasma and the simulation model proposed/investigated in this work can also be applied to other industrial fields such as flame-holding in supersonic engines.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：航空宇宙工学 放電プラズマ 空力制御 プラズマフィラメント 極超音速風洞 極超音速機 数値流体力学 Q-DCプラズマ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機・スペースシャトルなどといった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。亜音速分野においては、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によって発生できるようになり、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スクラムジェットエンジンの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とそれによる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気流制御・空力制御の利点は、(1)応答時間が極めて短いこと、(2)可動部分を持たないため故障しにくいことである。これらの利点は、飛行速度が特にマッハ数5以上と大きく、高レベルの安全性が要求される将来型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電氣的に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。現状では将来型超音速機・極超音速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それによる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大いに資すると期待される。

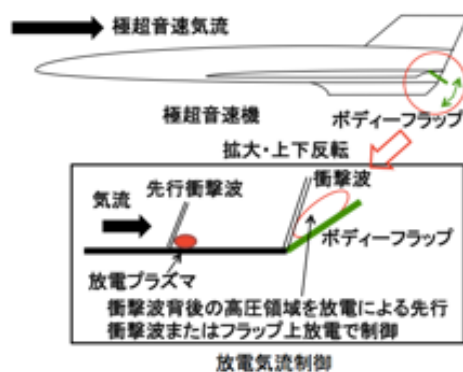


図1 本研究で提案する放電気流制御の概要

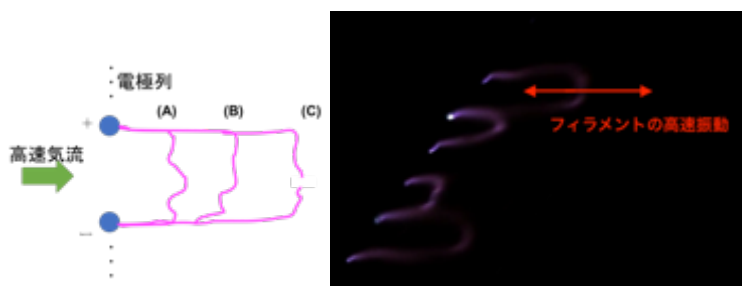


図2 プラズマフィラメントの非定常挙動：A. 絶縁破壊、B. 移流、C. フィラメント消失

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・気流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 において実験を実施し、また並行して解析モデルの構築と数値解析を行うことによりプラズマフィラメント・気流干渉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。

2. 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。以下の研究方法に示す実験的、解析的アプローチの両面から気流制御メカニズムの解明、制御応答速度と制御効率の特定、気流マッハ数の影響等の解明も目指す。

3. 研究の方法

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、マッハ数）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、実験実施設備である米国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準定常 Q-DC 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。実験におけ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らが過去に開発した、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。

なお、本研究では日本学術振興会海外特別研究員制度を利用した米国ノートルダム大学への滞在中に、同大学流体研究所の実験設備を用いて研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 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)。

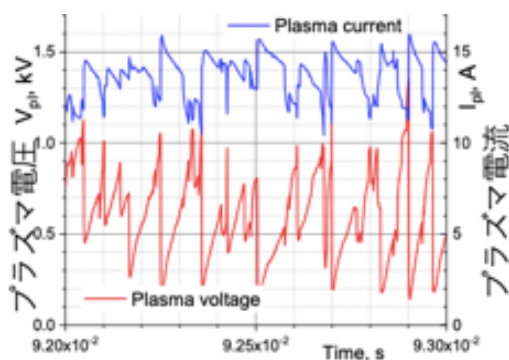


図 3 フィラメントの振動によるプラズマ電圧の変化

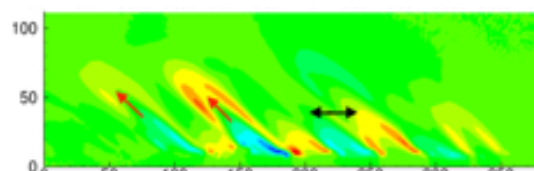


図 4 動的モード解析により特定されたフィラメントの振動モード 17kHz

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

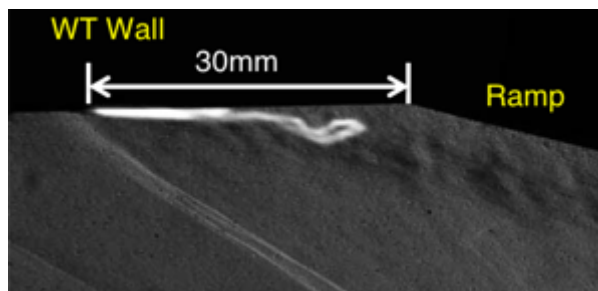


図5 フィラメントと気流の相互干渉
[ref. Watanabe et al. J Phys D 2019]

(2) 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)

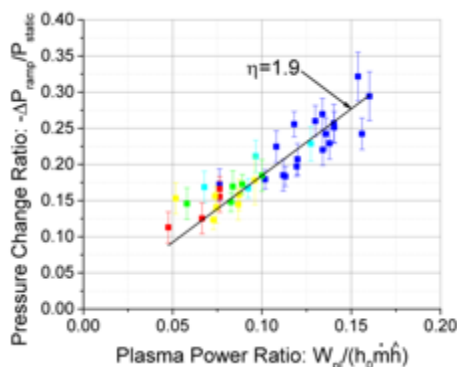


図6 気流制御効率の例 (Mach2) [ref. Watanabe et al. J Phys D 2019]

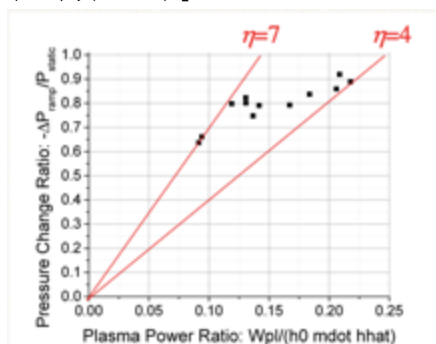


図7 気流制御効率の例 (Mach4)

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

(3) 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が消失するまでには300マイクロ秒とやや長く空気が変動を維持できることが判明した。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。

(4) 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]

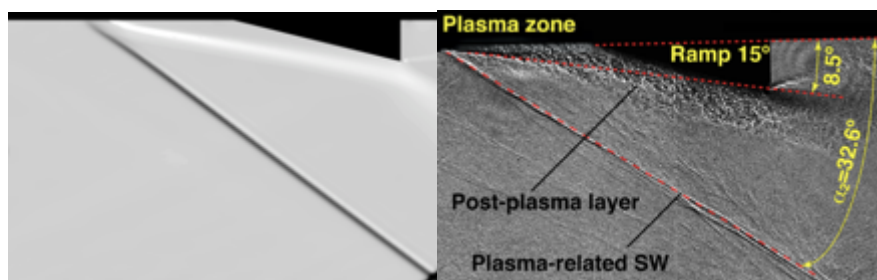


図8 解析された流れ場と実際の流れ場 [ref. Watanabe et al. J Phys D 2019]

本研究では、研究計画当初に予定していたU字型のプラズマフィラメントによる高速気流制御に加え、より広範な範囲を制御でき自由度の高い空力制御の実現を目指して気流方向に長い糸状プラズマフィラメントによるフラップ全面を制御領域とした空力制御実験も追加で実施した。その結果、広範囲においてU字型フィラメントと同等の気流制御効果を示すといった新たな知見も得られた。

得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究はプラズマの航空流体分野への応用研究における世界的な最先端研究機関である米国ノートルダム大学流体研究所において実施し、本分野の世界的なワークショップ Plasma AeroDynamics Group Meeting においてその有用性を紹介されるなど、現時点において世界的に見ても放電プラズマによる高速気流制御の最先端研究という位置付けである。同様のプラズマフィラメントは最先端の超音速エンジンであるスクラムジェットエンジンにおける燃料着火・保炎技術にも応用が期待されているため、このようなエンジン分野をはじめとしたプラズマ産業分野への波及効果と大きなインパクトが期待でき、更には将来型航空機における高速空力制御の信頼性を向上させ安全安心な航行に資する点において学術的・社会的な意義がある。

本研究により高速空力制御技術の基礎が確立された。今後は実機への応用を見据えた高度な空力制御手法の開発を進めることで将来型航空機の信頼性・安全性向上を目指す。

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。

成果に関する参考文献 (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>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Watanabe, Y.; Houpt, A.; Leonov, S.B.	4. 巻 6
2. 論文標題 Plasma-Assisted Control of Supersonic Flow over a Compression Ramp	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Aerospace	6. 最初と最後の頁 35-
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3390/aerospace6030035	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 該当する

1. 著者名 森直紀, 渡邊保真, 鈴木宏二郎	4. 巻 JAXA-SP-18-005
2. 論文標題 模型表面内側に設けた放電室による極超音速境界層流れ制御の基礎実験, Preliminary Experiment on Hypersonic Boundary Layer Flow Control using Discharge Chamber under Body Surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JAXA Special Publication: 宇宙航空研究開発機構特別資料	6. 最初と最後の頁 103-106
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 Watanabe Yasumasa, Elliott Skye, Firsov Alexander, Houpt Alec, Leonov Sergey	4. 巻 52
2. 論文標題 Rapid control of force/momentum on a model ramp by quasi-DC plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 444003 - 444003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab352f	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 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe
2. 発表標題 Flow Control over Aerodynamic Flap by Plasma Array
3. 学会等名 The 3rd Japan-US Science Forum (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe, Sergey B. Leonov, Alec Houpt, Brock E. Hedlund, Skye Elliott
2. 発表標題 PLASMA-ASSISTED CONTROL OF MACH-2 FLOWFIELD OVER RAMP GEOMETRY
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics, APS DFD2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe, Alec Houpt, Sergey B. Leonov
2. 発表標題 Plasma-based Control of Mach-2 Supersonic Flow over Compression Ramp
3. 学会等名 AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2019, AIAA SciTech 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森直紀, 渡邊保真, 鈴木宏二郎
2. 発表標題 模型表面内側に設けた放電室による極超音速境界層流れ制御の基礎実験
3. 学会等名 第50回流体力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe, Skye Elliott, Sergey B. Leonov
2. 発表標題 Control of Flowfield upfront of Compression Ramp by Q-DC Electric Discharge
3. 学会等名 15th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe, Sergey B. Leonov
2. 発表標題 Experimental and Numerical Study of a Control Effect of Plasma Array on Flow Structure over Compression Ramp
3. 学会等名 AIAA AVIATION Forum 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sergey B. Leonov, Skye Elliott, Alec W. Houpt, Yasumasa Watanabe
2. 発表標題 Plasma-assisted control of supersonic airflow
3. 学会等名 The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 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 Yasumasa Watanabe
2. 発表標題 Plasma-assisted rapid control of supersonic flow over contoured surface
3. 学会等名 The 4th Japan-US Science Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe, Skye Elliott, Alec Houpt and Sergey B. Leonov
2. 発表標題 Transient flow control effect of Quasi-DC filamentary plasma in Mach 2 and Mach 4 supersonic flows
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics, APS DFD2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe, Skye Elliott, Alec Houpt, Sergey B. Leonov
2. 発表標題 Q-DC Plasma Actuation for Mach-4 Supersonic Flow Control over Compression Ramp
3. 学会等名 AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2020, AIAA SciTech 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学先端エネルギー工学専攻鈴木研究室 http://daedalus.k.u-tokyo.ac.jp/ Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame https://ame.nd.edu/</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	Leonov Sergey B. (Leonov Sergey B)	University of Notre Dame・ Institute for Flow Physics and Control, Department of Aerospace and Mechanical Engineering・Research Professor	