

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760771

研究課題名（和文） 新しい放電形態を用いた高出力プラズマアクチュエータの開発

研究課題名（英文） Development of High Power Plasma Actuator with a Novel Approach of Discharge Formation

研究代表者

松野 隆（MATSUNO TAKASHI）

鳥取大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90432608

研究成果の概要（和文）：

本研究は新しい放電機構を適用することによってプラズマアクチュエータの大幅な性能向上を行い、その流体制御性能の優位性を実証することを目標とした。研究の結果、スライディング放電を用いた三電極（TED）のプラズマアクチュエータは既存構成の素子と比較し2倍以上の推力を生成可能であり、また噴流偏向が制御可能であることを実証した。流体制御に適用した場合、既存構成素子と比較して大きな空力性能改善が得られることが確認された。

研究成果の概要（英文）：

A high power plasma actuator with a novel approach of discharge formation was developed and evaluated as an aerodynamic control device. Trialectrode (TED) plasma actuator which utilizes sliding discharge was designed and analyzed. The researches show that the thrust generated by the TED actuator is greatly improved from SDBD actuator mode than twice. By applying high DC voltage, the induced flow can be vectored to vertical jet. The superiority of the TED actuator in the aerodynamic control was also confirmed by the wind tunnel test.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体力学・環境適合技術・プラズマアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

現在、放電により生成されるプラズマを利用した流体制御技術（プラズマアクチュエータ）が大きな注目を集めている。現在最も盛んに研究が行われているプラズマアクチュエータは、誘電体バリア放電（DBD）により生成される大気圧非平衡プラズマを利用するタイプのものである。

プラズマアクチュエータは以下の点において流体制御デバイスとして優れている。

- 可動部分を持たない。また物体形状に影響を与えない
- 利用電力が低い
- 駆動が非常に高速、高応答

航空機を代表とする輸送機器に対しては、プラズマアクチュエータを物体表面における剥離制御や境界層制御に利用することによって、流体抵抗を低減することが可能である。

このようにプラズマアクチュエータは大きなアドバンテージと広い応用可能性を持っており、近年非常に盛んに研究が行われている。国際的には、2004年頃から米国を中心に研究活動が活発化しており、この時期より先駆的な研究成果が報告されている。2009年にはアメリカ航空宇宙学会（AIAA）によって「航空宇宙分野におけるトップ10新興技術」の一つに選定され、その可能性は流

体・空力分野以外からも注目されている。日本流体力学会誌においても 2010 年 8 月には特集記事が企画されるなど、国内でも研究は活発になっている。

これらの研究により、DBD プラズマアクチュエータの性能評価や基礎的な流体問題への適用可能性実証が行われ、プラズマアクチュエータの流体制御デバイスとしての基礎的な評価は既に確立されている。これらについては米国ノートルダム大学の Corke 教授を中心とするチームが研究をリードしており、実用を念頭に置いた研究を活発に進めている。また、プラズマアクチュエータ上での交流放電に関わる非対称なプラズマ生成の特性解析やそのモデル化の研究も盛んであり、応用的な駆動形態を採用したプラズマアクチュエータの提案も行われてきている。

この中で、研究代表者はプラズマアクチュエータ研究の初期にノートルダム大学のチームの一員として研究に参画しており、活発に研究活動を進めている。本研究課題に関連して、2006 年度に若手研究 (スタートアップ)、2007-2008 年度には若手研究 (A) を研究代表者として実施し、以降も共同研究を含め研究を継続している。応用研究では、低速域での円柱に加わる空力抵抗を劇的に低減 (80%以上) するなどの実績を示している。プラズマアクチュエータ単体の性能調査および向上についても、アクチュエータ素子の構成や印加電圧の条件による性能の変化について調査を行い、高い流体制御力の得られるアクチュエータの開発を行っている。

一方で、これらの研究によってプラズマアクチュエータを航空機・輸送機器に対し適用し実用化するために解決しなければならない課題も明らかになってきた。一番の問題は、実用化上必須の高速・大スケール流への適用が現時点では難しい点である。現在一般的に用いられている誘電体フィルムを用いた素子から、例えば航空機の空力舵置換に必要なレベルの流体制御力を得るのは不可能であり、実用的な性能を得るためには、生成されるジェットをの推力を 1~2 オーダー向上させる必要がある。また、最適化によってプラズマアクチュエータの有効性を 100% 生かした適用を行うことも重要である。

2. 研究の目的

本研究ではプラズマアクチュエータ素子の高性能化・最適化にフォーカスし研究を推進する。具体的には「プラズマアクチュエータに新しい放電機構を適用し、性能向上 (既存構成に対し 10 倍程度) を実証し、その性能解析を行う」ことを最低限の目標とし、

「DBD および新しい放電機構についての、プラズマアクチュエータの電場・推力の最適設計手法の提案」を最大の目標とする。

本研究ではスライディング放電の優れた特性に主眼を置き、その特性を明らかにするとともに最適化を行うことにより、新しい放電機構を用いたプラズマアクチュエータに最適な構成・駆動方法を提案し、その性能を実験によって実証する。

3. 研究の方法

(1) 新規放電機構によるプラズマアクチュエータの流体制御特性解析

スライディング放電をベースとした複数電極構成のプラズマアクチュエータを設計・製作し、形状・材質・駆動電圧等のパラメータ毎にジェット推力等の調査を行いその性能を評価する。実験は静止流体中で行う。ジェット推力は分析天秤をセンサとして利用した直接計測法により測定し、誘起ジェットにより形成される流れ場は高速度シュリーレン法により可視化する。

(2) アクチュエータ最適設計手法の開発

スライディング放電等の放電に対する性能予測モデルによりアクチュエータの最適設計を行う。本研究ではプラズマアクチュエータの構成と駆動方法を流体問題に対し同時に最適化するための基盤構築を行い、最適なプラズマアクチュエータ構成決定にこれが有用であることを実証する。最適化部分はサロゲートモデルと GA を用いた Efficient Global Optimization 法を用いる。

(3) 新規放電機構によるプラズマアクチュエータの流体制御特性実証

風洞試験に新規放電機構によるプラズマアクチュエータを適用し、その有効性を検証する。風洞試験には鳥取大学の低速風洞を実施し、DBD アクチュエータによる流体制御研究の実績のある超音速機半裁模型を対象とする。模型にプラズマアクチュエータを設置し、駆動時の流体抵抗の低減効果を評価することによって、高速流れにおけるアクチュエータの有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 新規放電機構によるプラズマアクチュエータの流体制御特性解析

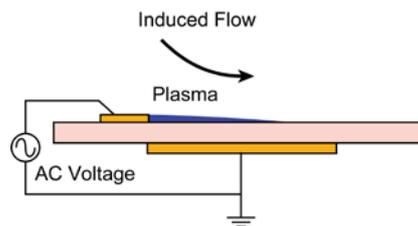
図 1 に示すのは本研究で用いたプラズマアクチュエータの構成概要である。図 1(a) はよく用いられる SDBD プラズマアクチュエータである。これは二枚の電極とその間に挟まれた誘電体から構成されている。誘電体上面に設置された電極は周囲気体にさらされており、下面の電極は埋設されてい

る。露出電極に高電圧の交流電圧 V_{ac} を印加することによって、露出電極と誘電体の間で放電が起こり、これが周囲気体の流れを誘起する。誘起された噴流は流体場に対して図中右方向への体積力を与え、反作用としてアクチュエータ素子に対して図左方向への推力を生じる。本研究ではアクチュエータの流体への力の総和であるアクチュエータにはたらく推力を流体制御性能の指標として選択した。

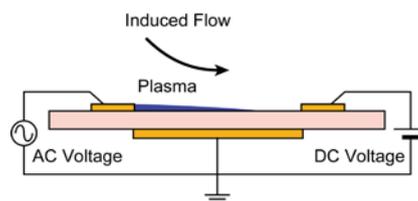
これに対し、図 1 (b), (c) に示されるのは三電極構造を持つプラズマアクチュエータの概要である。本研究で用いる TED プラズマアクチュエータは基本形状である SDBD プラズマアクチュエータに対し、既存の露出電極と対向するように第三の電極を付加した構造とした。なお、以下では区別のため既存の露出電極を AC 電極、第三の電極を DC 電極と呼ぶ。駆動時には DC 電極に直流高電圧 (V_{dc}) を印加することで放電の特性を変え、誘起される流れの特性の変化を促す。DC 電極に正の電圧を印加、つまり $V_{dc} > 0$ の場合（本研究では本ケースを TED-DBD プラズマアクチュエータと呼ぶ）、放電は目視では SDBD プラズマアクチュエータと同一の現象が観察される。一方で、 $V_{dc} < 0$ となる電圧を印加した場合、スライディング放電と呼ばれる放電が生じる。誘電体上面の二電極間全体がプラズマに覆われる。このように $V_{dc} < 0$ の直流電圧を印加した構成を TED-SD プラズマアクチュエータと呼ぶ。

本研究において用いたプラズマアクチュエータは誘電体に 2mm 厚の PTFE 樹脂を用い、2 露出電極間距離は 30mm~50mm の範囲で設定した。なお電極の長さ（放電幅）は 200mm とした。プラズマアクチュエータに印加される交流電圧は信号発生器により出力された原波形を電力増幅器および高圧トランスにより増幅し生成された。直流電圧は高電圧電源より直接供給した。なお、交流電圧の周波数は 16.0kHz に設定し、電圧 V_{ac} , V_{dc} を種々変更して試験を行った。本報告書では V_{ac} を 15.6kVpp に固定し、 V_{dc} を種々変更した際の結果について示す。

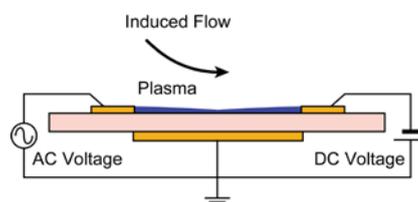
本研究では、誘起噴流の反作用であるアクチュエータ素子にはたらく推力を直接測定し解析を行った。推力測定は精密分析天秤（島津製作所 AUW320）を用いた梃子型の計測装置を利用した。誘起噴流の可視化実験は、JAXA 宇宙科学研究所においてシュリーレン可視化装置を用いて実施した。プラズマアクチュエータは放電により雰囲気気体を電離する際、ガス温度も上昇する。このため放電領域を通過した気体の密度変化を利用して生成される噴流を可視化した。



(a) SDBD configuration



(b) TED-DBD configuration



(c) TED-SD configuration

図1 プラズマアクチュエータの構成概要

①TED-SD プラズマアクチュエータの推力特性

図 2 に、DC 電極に負の直流電圧を印加した TED-SD プラズマアクチュエータに関する印加直流電圧 V_{dc} による推力 T の変化を示す。ここでは代表的な条件である交流電圧 $V_{ac} = 15.6\text{kV}$ における特性を示す。図中の垂直・水平はそれぞれプラズマアクチュエータの設置されている壁面に対して水平方向・垂直の推力成分を示している。ここでは、水平方向の推力は SDBD プラズマアクチュエータの生成推力と同一方向を正とし、垂直方向は壁面下向きを正とした。なお、 $V_{dc} = 0$ のとき直流電圧は印加されていない場合の値 ($T = 6.63 \text{ mN/m}$) を示している。

プラズマアクチュエータによって生成される推力は V_{dc} により変化する。 V_{dc} が低い場合 ($V_{dc} < 10\text{kV}$)、生成される推力は SDBD の場合と比較し漸増するものの、変化は大きくない。 V_{dc} が 17kV を超えると水平方向に SDBD と逆方向の推力とともに、大きな垂直方向推力が生じる。 $V_{dc} = 20\text{kV}$ で推力は 16.46 mN/m となり、同電圧での SDBD と比較して 148% の推力増加が確認された。このときの直流電圧印加の効果は、電極

近傍に生成される電磁場の変化と放電機構事態の変化の2要因が影響していると考えられる。原理的には低い直流電圧 ($V_{dc} < 10\text{kV}$) では前者の影響のみが生じており、 V_{dc} が高い領域において後者の影響が生じているのではないかと考えられる。

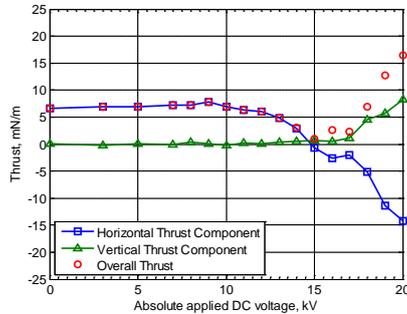


図2 TED-SD プラズマアクチュエータの推力特性：印加直流電圧に対する依存性

②誘起噴流の偏向特性

TED-SD プラズマアクチュエータの誘起噴流の方向と第三電極への印加直流電圧の関係について、代表的な例を図3に示す。図3には、図2と同条件である $V_{ac} = 15.6\text{kV}_{pp}$ で実施した可視化画像、およびその瞬間の素子電極間の放電状況を併せて示してある。なお画像中における電極位置は図3(a)に示すとおりであり、すべての画像において同一位置である。

まず図3(a)に示される $V_{dc} = 0\text{kV}$ の条件においてはSDBDのみが生じている。このとき、誘起流はAC電極から、埋設電極方向 (AC・DC電極の間全域に埋設) へ、壁面に沿ったジェットが生成されている。これは図3において、水平方向の推力成分のみが観察されている点と一致する。次に図3(b)に示す印加直流電圧が $V_{dc} > -10\text{kV}$ の低い領域では誘起噴流の方向は変化せず、図3(a)とほとんど流れ場は変化していない。噴流の下流方向の濃淡の大きい部分がやや右側へ拡大しており噴流がわずかに強くなったことを示唆しているが、これが低 V_{dc} 領域での推力の漸増傾向と対応するものと思われる。

一方で、高 V_{dc} 領域においては、誘起噴流はSDBDの状況とは大きく変化する。図3(c)の $V_{dc} = -15.5\text{kV}$ の条件において、DC電極の電流値 I_{dc} が非零となる。本条件では写真に示されるように電極間には局所的にDC電極からAC電極へ放電路が形成されはじめ、電極間でスライディング放電がはじまっている。このときの誘起噴流は図3(a), (b)とは異なり、SDBD型の壁面に沿う噴流に加え、DC電極近傍で明確な指向性

を持たない湧き出し状の噴流が生成されはじめている。このときは電極間の大半ではSDBD型の噴流が生成されているのに対し、スライディング放電が生じている領域では独立して湧き出し状の流れが生成され、画像にはこれらが重ね合った形で示されているものと考えられる。

V_{dc} を上昇させると、ある点においてDC側誘起流れは急激に収束し、AC電極側のSDBD型噴流と対向した強い噴流を生成する。これらが干渉することにより、プラズマアクチュエータから誘起される流れは上向きの強い噴流を形成する。図3(d)は $V_{dc} = 17.0\text{kV}$ において生じる、壁面から垂直方向に強い速度成分を持つ噴流を示している。これは本条件での特性である逆向き・上方への強い推力生成と対応する。図3に示される $V_{dc} \sim -17.0\text{kV}$ での急激な特性の変化は、噴流の方向がこの条件において急激に偏向し上方を向くことと対応する。

これらの結果より、スライディング放電を用いた三電極 (TED) プラズマアクチュエータは第三電極に印加する直流電圧を変化することによって、推力の生成方向を偏向させることができ、SDBDと比較し2倍以上の推力を生成可能であることがわかった。また、TED-SD プラズマアクチュエータは高い直流電圧を印加した場合に誘起噴流の急激な偏向が生じることが確認された。これはアクチュエータが生成する推力の特性と一致する。

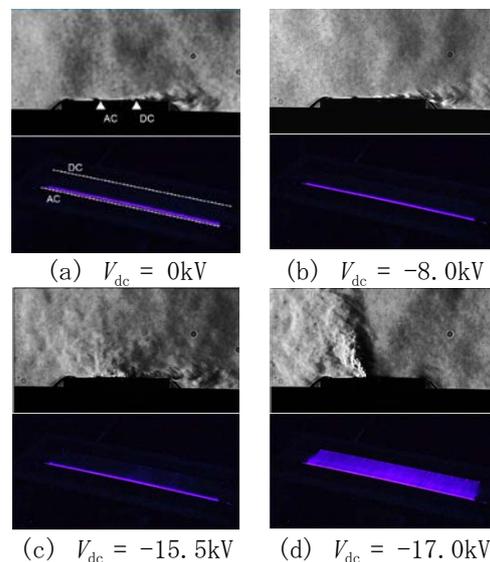


図3 TED-SD プラズマアクチュエータの誘起噴流偏向特性：印加直流電圧の効果 ($V_{ac} = 15.6\text{kV}$)

(2)アクチュエータ最適設計手法の開発
プラズマアクチュエータを用いた流体制

御においては、プラズマアクチュエータ素子の特性・電気的パラメータ・流体の状態など、多数のパラメータが相互に関わっており、最適な設置・駆動条件の単純探索には数多くの試験回数を行う必要があり、場合によってはほとんど困難である。そこで本研究では、Kriging法と領域分割型GAを組み合わせた Efficient Global Optimization (EGO) 法を利用し、プラズマアクチュエータの駆動条件・構成最適化システムの開発を行った。ここでは構築した最適化システムをプラズマアクチュエータによるブラフボディの空力制御問題に適用し、実際に空力抵抗低減性能を最適化できることを実証しその有用性を確かめた。

空力制御効果の最適化試験は風洞試験と数値解析をインラインで組み合わせて行った。風洞試験は鳥取大学の回流式低速風洞（測定部寸法は高さ 700mm、幅 1000mm）において実施された。空力制御対象となる風試模型は二次元半円柱模型（直径 400mm、アクリル樹脂製）であり、模型表面にプラズマアクチュエータを設置した。ここでは、空力制御について数多い駆動に関わる変数のうち、PWM 駆動に関わるパラメータであるモジュレーション周波数 f_{mod} [Hz]、および、プラズマアクチュエータがオンとなる時間の割合（デューティ比, DC [%]) の 2 変数を設計変数とし、半円柱模型の空力抵抗を低減する最適条件を探索した。

最適化手法により得られた、最終サンプルを含めた Kriging モデルの応答曲面等値図を図 4 に示す。本試験においては 10 点の初期サンプルより開始し、最終サンプルに至るまでに 12 点のサンプルが追加された。等値図には初期サンプル・追加サンプルの位置も重ねて示してある。図より、本研究で対象とした二次元ブラフボディの空力制御においては、2 つの駆動パラメータ（デューティ比、モジュレーション周波数）について複雑な相互関係があることがわかる。また、EGO を用いた最適化により、追加サンプルは試行が増えるにつれて C_D が小さい領域に集まっていくことが分かる。得られた結果より、本研究において構築した EGO を用いた最適化手法が正しく機能していることが確認できた。最適化システムを使用することにより、今回は全 22 回の風洞試験のみにより、最適なプラズマアクチュエータの駆動条件を発見することができた。一方、取りうるすべての駆動条件を探索した場合、合計 1170 回の風洞試験が必要となるため、本手法のアドバンテージは明らかである。

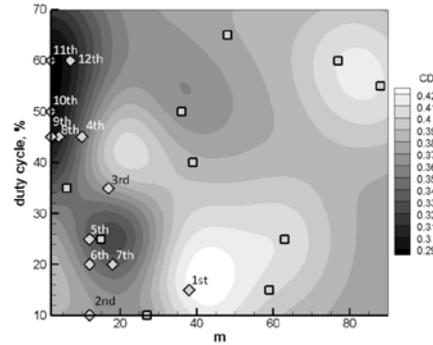


図4 プラズマアクチュエータ駆動条件に対する空力抵抗の近似応答曲面

(3) 新規放電機構によるプラズマアクチュエータの流体制御特性実証

新規放電機構を用いたプラズマアクチュエータの有効性確認のため、超音速機半裁模型の空力特性改善問題にこれを適用し風洞試験により SDBD アクチュエータとの性能比較を行った。使用した翼模型は図 5 に示す形状をしており、翼前縁正面に TED プラズマアクチュエータを設置した。設置位置は図に示す通り、翼前縁に交流電極を、翼上面に直流電極を設置し、付加電場により翼上面を加速する噴流の生成を意図した。なおここでは直流電極には正の電圧を印加した際の結果を代表として示す。

図 6 はプラズマアクチュエータ非駆動時、SDBD アクチュエータ駆動時、および TED アクチュエータ駆動時の超音速機半裁模型の揚抗比特性を示している。図より分かるように付加電場印加により、揚抗比は改善していることが分かり、TED プラズマアクチュエータの流体制御における有効性が確認された。このとき、主にアクチュエータは抗力低減に寄与しており、アクチュエータが生成するジェットの誘起流が推力方向の力に寄与している可能性がある。また、翼上面の剥離流に対しては本試験では大きな変化を生じなかったが、これは (2) で開発したプラズマアクチュエータの最適設計システムを適用することにより有効な適用手法が探索できると考えている。

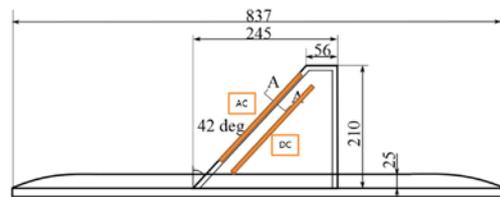


図5 TEDプラズマアクチュエータ設置超音速機半裁模型の概要

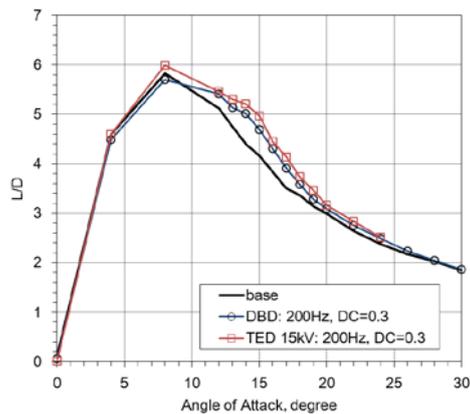


図6 TEDプラズマアクチュエータの超音速機半裁模型揚抗比改善性能

本手法を用いたプラズマアクチュエータの開発は国内ではほとんど行われておらず、また国外を見ても限られた研究者グループしか研究を実施できていない。このため、本研究で得られた知見・データは今後のプラズマを用いた流体制御において有用と考えている。特に、印加電圧により噴流方向を偏向可能である点は興味深く、これは特定の流体問題においては非常に有用な特性である。

一方で、現状ではレイノルズ数が 10^5 オーダーであっても制御性能は限定的となっており、輸送機器の外部流制御に十分な空力制御性能は得られていない。本研究により基本コンセプトの有用性が確認できたため、今後は、本手法を応用したより高効率・高出力のプラズマアクチュエータの設計・最適化を行うことによって、目標とする生成ジェット推力の大幅 (1~2 オーダー) な向上を目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) Matsuno, T., Kawaguchi, M., Fujita, N., Yamada, G., Kawazoe, H. “Jet Vectoring and Enhancement of Flow Control Performance of Trielectrode Plasma Actuator Utilizing Sliding Discharge,” AIAA paper 2012-3238, 2012. 査読無
- (2) Matsuno, T., Kawaguchi, M., Yamada, G., Kawazoe, H., “Flow Control Characteristics of Trielectrode Plasma Actuators,” Proceedings of the 28th ISTS, No. 2011-e-28, 2011. 査読無
- (3) Matsuno, T., Kawaguchi, M., Yamada,

G., Kawazoe, H., “Development of Trielectrode Plasma Actuator and Its Application to Delta Wing Vortex Control,” AIAA paper 2011-3514, 2011. 査読無

[学会発表] (計 7 件)

- ① 岡宗 悠紀, “プラズマアクチュエータを用いた剥離流制御による SST 空力性能の改善,” 第 50 回飛行機シンポジウム, 2012 年 11 月 5 日~2012 年 11 月 7 日, 新潟コンベンションセンター.
- ② 藤田 上, “三電極プラズマ流体アクチュエータの放電形態と誘起流特性,” 日本流体力学会年会 2012, 2012 年 9 月 16 日~2012 年 9 月 18 日, 高知大学.
- ③ 松野 隆, “間欠駆動するプラズマアクチュエータの誘起噴流特性,” 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 9 日~2012 年 9 月 12 日, 金沢大学.
- ④ 松野 隆, “三電極プラズマアクチュエータの生成する誘起噴流の偏向特性,” 第 44 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2012, 2012 年 7 月 5 日~2012 年 7 月 6 日, 富山国際会議場.
- ⑤ 松野 隆, “三電極プラズマ流体アクチュエータの噴流偏向特性,” 平成 23 年度航空宇宙空力班シンポジウム, 2012 年 1 月 28 日, 東北大学.
- ⑥ 松野 隆, “プラズマアクチュエータを用いた SST 離着陸時空力性能改善の試み,” 第 49 回飛行機シンポジウム, 2011 年 10 月 28 日, 金沢歌劇座.
- ⑦ 松野 隆, “プラズマアクチュエータを用いた流体抵抗低減法におけるスケール・動圧依存性解析,” 日本航空宇宙学会 第 42 期年会講演会, 2011 年 4 月 14 日, 東京大学.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
松野 隆 (MATSUNO TAKASHI)
鳥取大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 9 0 4 3 2 6 0 8
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし
- (3) 研究協力者
金崎 雅博 (KANAZAKI MASAHIRO)
首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授
研究者番号: 1 0 3 9 2 8 3 8