

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05797

研究課題名(和文) 放電場制御による多電極プラズマアクチュエータの性能向上に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of Multi-Electrode Plasma Actuator with Optimization of Discharge Parameters

研究代表者

松野 隆 (Matsuno, Takashi)

鳥取大学・工学研究科・講師

研究者番号：90432608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高い流体制御力を持つ多電極プラズマアクチュエータ素子を開発した。電極による電場付加により、生成されるイオンとその加速が最適となる構造や駆動手法を実験・数値計算双方から探索し、高出力生成が可能な多電極プラズマアクチュエータプラズマアクチュエータの設計・駆動条件の最適化を行った結果、従来のプラズマアクチュエータと比較して30倍以上の推力生成に成功した。また、これらの知見から得られた素子の流体制御性能を数値解析および風洞試験により実証し、剥離制御性能においても従来素子に対して優位性を持つことを実証した。

研究成果の概要(英文)：The improvement of thrust performance of multi-electrode plasma actuator was investigated. Small serration was added to the exposed electrode of the plasma actuator to weaken the non-uniform generation of the discharge. The effects of the frequency of the applied AC voltage, and the gap length between their exposed electrodes has also been analyzed. Based on the result of the experiment and numerical simulation, an optimal configurations and conditions of the multi-electrode plasma actuator was proposed. The performance of separation control of the actuator was optimized by the Efficient Global Optimization (EGO) with Multi Additional sampling (MAs). The location of the plasma actuator and its body force were explored their optimal values that results a maximum lift coefficient for NACA0012 airfoil model. The wind tunnel experiment, based on the knowledge of the numerical simulation, confirmed a decisive superiority of the multi-electrode plasma actuator for separation control.

研究分野：流体力学，流体制御，プラズマアクチュエータ

キーワード：圧縮・非圧縮流 流体制御 プラズマ プラズマアクチュエータ 最適設計

### 1. 研究開始当初の背景

プラズマアクチュエータは交流高電圧印加により放電プラズマ生成・加速を同時に行い、周囲気体に運動量を与えジェットを誘起する流体デバイスである。本デバイスは「可動部分を持たない」「物体表面に凹凸を必要としない」など多くの長所を持つことから、近年活発に研究が進められている。多くの研究により、プラズマアクチュエータの有効性は主に低速小スケールの流れ場において実証されている。一方で、産業的実用化に向けては誘起ジェットの速度・推力が小さいことが課題となっており、決定的な解決法は提案されていなかった。

従来のプラズマアクチュエータは単一の電場によって放電プラズマ生成と加速を同時に行っているが、物理的構造は単純だがプラズマの現象は複雑で、噴流生成の効率は悪い。プラズマアクチュエータ誘起噴流の強さを決定する要因には、放電プラズマの生成量と生成されたイオンの加速電場の双方が関わっていると考えられる。松野・西田らは多電極構成プラズマアクチュエータの高性能化について研究を行っており、これにより付加電場によってプラズマの生成量増加と加速の促進が可能であることを明らかにしている。従来のプラズマアクチュエータでは、誘起噴流生成に関与しないイオンが多く生成されており、放電形態の制御により、プラズマアクチュエータの噴流推力とエネルギー効率は大幅に向上しうる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、上記知見に基づき、高い流体制御力を持つアクチュエータ素子を開発することである。特に放電時のプラズマ生成・加速の物理に注目し、電場付加により、これらが最適となる構造・駆動手法を探索する。これを実現するために、まずプラズマアクチュエータ推力向上の主要因となる特性量の抽出、および数値解析による噴流生成メカニズムの解析を実施する。実験・計算双方から、プラズマ生成・加速プロセスにおいて噴流推力に影響を与える主物理特性量を推定する。これらによって得られた結果より高出力生成を可能とするプラズマアクチュエータの設計を行い、最後に、設計されたプラズマアクチュエータの流体制御性能を数値解析および風洞試験により実証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 高出力プラズマアクチュエータの設計

ここでは、三電極プラズマアクチュエータの高出力化について下記の因子について効果を評価した結果を報告する。

##### ① 露出電極放電側エッジの鋸歯化

三電極プラズマアクチュエータでは、電極に存在する微細な変形や傷が放電の起点となり、放電に非一様性が生じる。放電の非一様性は、誘起噴流の非一様性を引き起こし、DC

電極からの噴流と AC 電極からの噴流が電極間で二次元的に衝突しなくなるため、結果として安定した上方への噴流が形成できない場合が多い。ここでは、放電の非一様性を緩和するために、電極の放電側エッジを鋸歯状にすることにより、意図的に周期的な電場の不均一を導入する。これにより放電を一様に発達させ、噴流を均一化することをねらった。

##### ② 交流周波数と電極間距離の影響調査

数値解析の知見を踏まえ、三電極プラズマアクチュエータの誘起ジェットの強さに対する交流周波数と電極間距離の効果、およびそれらの相互干渉について調査した。上述したように、誘起ジェットの強さは AC 電極でのバリア放電によって生成されたイオンが対向する電極に衝突した瞬間の電場の位相により、DC 電極側に生成する対向ジェットの強さが変化すると予測されている。これに影響を与えるパラメータはイオン移動速度と電極間距離、および交流周波数である。本稿ではイオン移動速度を固定するように、印加する交流電圧を一定として、他の 2 パラメータを変化させた。

#### 実験装置

図 1 に放電を安定化させるために露出電極形状を鋸歯状とした三電極プラズマアクチュエータ素子の電極部写真を示す。本素子は露出電極端を二等辺三角形からなる鋸歯で形成した。電極には厚さ 0.0275 mm の銅テープを用い、露出電極幅は 5 mm、露出電極間距離および埋設電極幅を 40 mm とした。なお、露出電極間距離は AC 電極・DC 電極それぞれの鋸歯頂点間距離によって定義した。放電区間は 200 mm であり、誘電体には厚さ 2 mm の PTFE 樹脂を用いた。

噴流の強さを評価するためには噴流の推力測定を行った。推力測定には精密分析天秤（島津製作所 AUW320）を用いた二分力計測可能な梃子型の計測装置を利用した。また、誘起噴流の流体場解析には高繰り返し Nd:YAG レーザと高速度カメラを用いた時系列 PIV 計測システムを使用した。

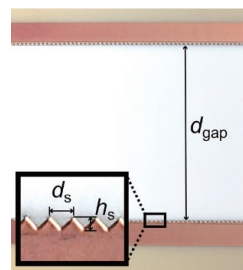


Fig. 1 Image of the trielectrode plasma actuator with sawtooth electrode

#### (2) プラズマアクチュエータの流体制御性能評価と最適化

本研究では、高出力プラズマアクチュエータの二次元翼周りの剥離制御性能の最適化を目的とし、多数追加サンプリング EGO 法を用いて、プラズマアクチュエータの剥離抑

制効果の最適化を数値計算により行い、設計条件の探索を行うとともに、設計空間の特性を調査した。また、得られた知見を元に風洞試験を行い、高出力プラズマアクチュエータの性能評価を行った。

### 最適化問題と手法

最適化試験では、NACA0012 翼型を持つ 2 次元模型を対象として、翼面上にプラズマアクチュエータを設置し、定常駆動した場合の空力制御性能を最適化した。

数値解析には JAXA 数値解析グループが開発した高速 CFD ソルバ FaSTAR を用いた。プラズマアクチュエータの数値模型は実験結果を用いた一様体積力ソースとして実装した。図 2 に、プラズマアクチュエータを模擬した体積力ソース設置の概要を示す。体積力投入領域は、設置位置から翼上面下流に向けて幅  $0.1c$ 、高さ  $0.01c$  の領域とした。これは風洞試験における、翼弦長  $300\text{ mm}$  の場合のプラズマアクチュエータの体積力生成領域と対応させている。

本試験の目的関数は揚力係数  $C_l$  であり、試験は  $C_l$  最大化問題とする。また設計変数は、上記の通りプラズマアクチュエータの設置位置  $s$  および体積力  $T$  とした。

本研究では、Efficient Global Optimization (EGO) および金崎により改良された多点追加サンプリング EGO (EGO-MAs 法) を用いて最適設計を行った。EGO 法は近似手法を取り入れた大域的探索手法であり、初期の少数のサンプル点群より逐次的に追加サンプルを取得し、近似モデルの精度を向上しつつ最適解を探索する。これに対して、多点追加サンプリング EGO 法は最適解候補に対して逐次評価を行うのではなく、近似曲面からの予測値を用いて、再び Kriging モデルをアップデートし EI 値最大点を探索する。これをサブグループとして設定し、複数の追加サンプルを探索する。複数の追加サンプルが得られた時点で、これらについて一括して並列して試験または計算を行うことで、効率的な設計点の取得が可能となる。

### 流体制御性能評価：風洞試験

本研究では時系列 PIV 計測を用いて、TED プラズマアクチュエータを NACA0012 二次元翼模型に設置・駆動した際の剥離制御性能を解析した。剥離抑制試験の対象としては、数値解析と同一の NACA0012 翼型を持つ二次元翼模型を選択した。翼模型の寸法は翼弦長  $300\text{ mm}$ 、翼幅  $300\text{ mm}$  で、材質はエポキシ樹脂製である。風洞試験には鳥取大学流体力学研究室の吸込型低速風洞を用いた。本実験では一様流速を  $U = 30\text{ m/s}$  とした。なお、本実験は時系列 PIV 計測により翼面上剥離を計測した。図 4 に概要を示す。計測領域は模型後流部を中心に  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  の範囲に設定し、1 秒あたり 2000 組の画像ペアを 0.1 秒間取得し、得られた速度場から剥離迎角の同定を行った。

最適化計算の結果より、剥離制御効果が最

大となる翼前縁直上にプラズマアクチュエータ露出電極を配置した。誘電体は厚さ  $0.18\text{ mm}$  の PTFE テープを 6 枚重ねた  $1.08\text{ mm}$  の厚みとした。電極には厚さ  $0.08\text{ mm}$  の銅箔テープを用いた。AC 電極端から DC 電極端までの距離は  $40\text{ mm}$  である。



Fig. 2 Schematic of body force installation.

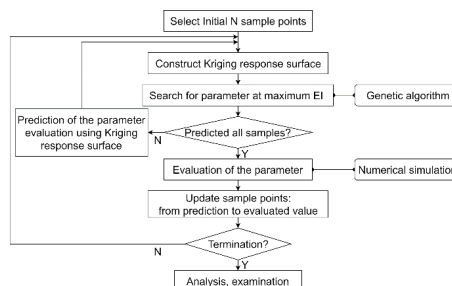


Fig. 3 Procedure of EGO with Multi Additional sampling.

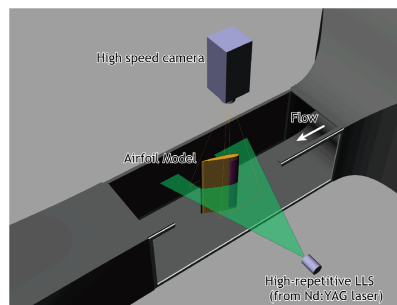


Fig. 4 Schematic configuration of the PIV system.

## 4. 研究成果

### (1) 高出力プラズマアクチュエータの設計

#### ① 鋸歯電極の効果

図 5 に示すのは、印加交流電圧  $V_{ac} = 15.6\text{ kV}_{pp}$ 、直流電圧  $V_{dc} = 23.0\text{ kV}$  における三電極プラズマアクチュエータの放電を撮影した写真を示す。図 3 の左図が直線電極の場合、右図が  $d_s = 1\text{ mm}$  の鋸歯電極の場合を示している。このとき、鋸歯形状を持つ AC 電極では均一な放電が生じ、光点も鋸歯頂点上のきわめて限られた領域のみにとどまっている。DC 電極においても同様であり、電極間での放電の非一様性は緩和されていることが確認できた。図 6 に示すのは DC 電極に正の直流電圧を印加した際の、印加直流電圧  $V_{dc}$  による誘起噴流の推力の変化である。交流電圧は図 3 と同一の  $V_{ac} = 15.6\text{ kV}_{pp}$  に設定した。直線電極・鋸歯状電極ともに、 $V_{dc}$  印加に伴い、一旦噴流の推力は減少するが、その後、推力の垂直方向成分が急増している。 $V_{dc}$  が高い ( $20.0\text{ kV}$  以上) の領域では、噴流の推力は DC 電圧を印加しない場合に比較してきわめて大きくなる。特に、鋸歯電極素子においてはこれらの特性が顕著に表れており、鋸歯間距離  $d_s = 1\text{ mm}$  の素子では、直線電極

の SDBD プラズマアクチュエータに比べ、最大で 13.2 倍の推力が生成されている。また、直線電極の三電極プラズマアクチュエータに対しても、最大値同士の比較で推力は 2.7 倍増加している。

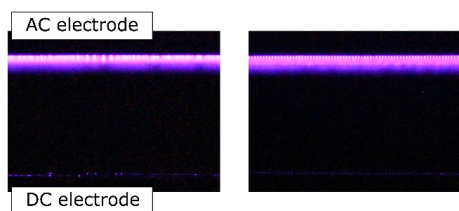


Fig. 5 Plasma generated by TED plasma actuator with (left) straight electrodes and (right) 1mm-spaced sawtooth electrodes at  $V_{dc} = 23$  kV.

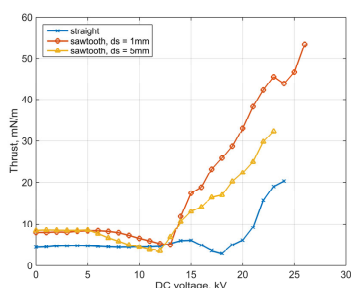
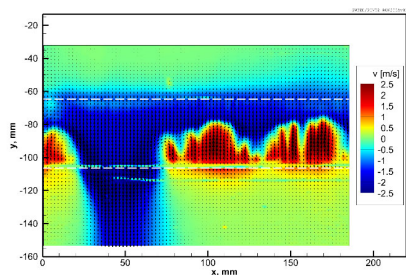
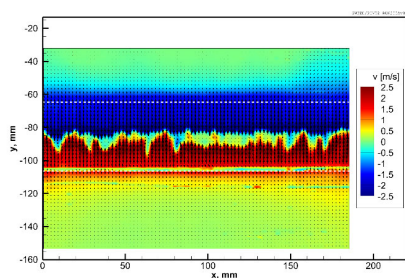


Fig. 6 Thrust of TED plasma actuator with sawtooth electrode, at  $V_{ac} = 15.6$  kV<sub>pp</sub>.



(a) Straight edge



(b) Serrated edge

Fig. 7 Time averaged velocity contours of the TED plasma actuator on their dielectric surface, at  $V_{dc} = 23$  kV.

図 7 に示すのは、PIV 計測により得られた直線電極および鋸歯 ( $d_s = 1$  mm) 電極それぞれの時間平均速度場である。速度場から鋸歯電極の噴流均一化に与える効果は明瞭に分かる。直線電極素子の場合には (図(a)), 放電の不均一によって、素子面上では、図中上側の AC 電極からは局所的に SDBD と同一の壁面噴流 (図 5 (a) 中、青い領域が下方ま

で続いている部分) が生じており、DC 電極からの逆向き噴流も不均一に生成されている。一方で、鋸歯電極の場合 (図(b)) には、双方の電極からの噴流が素子中央で均一に衝突している。これらから、放電の均一化による三電極プラズマアクチュエータの噴流強化、及び安定化効果が非常に大であることが明らかになった。

## ② 電極間距離および駆動周波数依存性

図 8 に、露出電極間距離毎の三電極プラズマアクチュエータの推力と印加直流電圧  $V_{dc}$  の関係を示す。ここでは、推力はプラズマアクチュエータの誘電体表面に対し垂直方向成分のみを示しており、グラフには交流周波数  $f_p$  ごとの特性が重ねてプロットしてある。図はそれぞれ (a) が電極間距離  $d_s = 40$  mm, (b) が  $d_s = 60$  mm, そして (c) が  $d_s = 80$  mm の場合の特性を示している。

印加直流電圧  $V_{dc}$  が閾値を越えると AC・DC 電極間での放電が始まると同時に、それぞれの電極付近から生じる誘起流の衝突によって誘起ジェットが偏向・立ち上がり、垂直方向の推力が計測される。また、 $V_{dc}$  の上昇とともに垂直方向の推力も増加する。本実験においては電極間距離および交流周波数を種々変えて推力測定を行ったが、実験を行った全ての条件で垂直方向の推力上昇が計測された。電極間距離が推力特性に与える影響については、電極間距離が短い ( $d_s = 40$  mm) 場合には垂直方向推力が急増する直流電圧  $V_{dc}$  が低く、また電圧増加により高い推力上昇を示している。 $d_s = 60$  mm では、全体に推力が急増する  $V_{dc}$  は高压側にシフトし、推力増加率も低下する。更に電極間距離の長い  $d_s = 80$  mm においては、推力が急増する  $V_{dc}$  はやや低電圧となる一方で、推力増加率は更に低下している。

次に、交流周波数が推力特性に与える影響について調べる。図 8(a) より、 $d_s = 40$  mm の場合には高い交流周波数 ( $f_p = 16\sim 18$  kHz) のときには、低い  $V_{dc}$  で急激に推力が増加したのち、 $V_{dc}$  の増加に伴い線形に大きな推力増加を示した。駆動周波数が低下すると ( $f_p = 13\sim 15$  kHz) 同様の推力特性を示すが、 $f_p = 16\sim 18$  kHz の場合に比べ、同電圧で 20% 程度の推力低下が見られる。これは立ち上がり電圧の上昇が主因である。一方で、 $f_p = 4\sim 7$  kHz の場合には推力特性は大きく異なる。立ち上がり電圧は低下しているが推力は  $V_{dc}$  とともに上昇せず、 $f_p$  に依存するが  $V_{dc} = 20\sim 25$  kV の領域では推力がほぼ変化しない。

これらの結果より、交流周波数による推力特性の変化は主に推力の急増する電圧に影響を与えていることが確認された。これは三電極プラズマアクチュエータの電極間放電現象が開始される条件と対応するため、交流周波数の変化が電極間を移動するイオンの移動時間と DC 電極へ衝突するイオンの数に影響を与えているという仮説を支持する結果と考えられる。

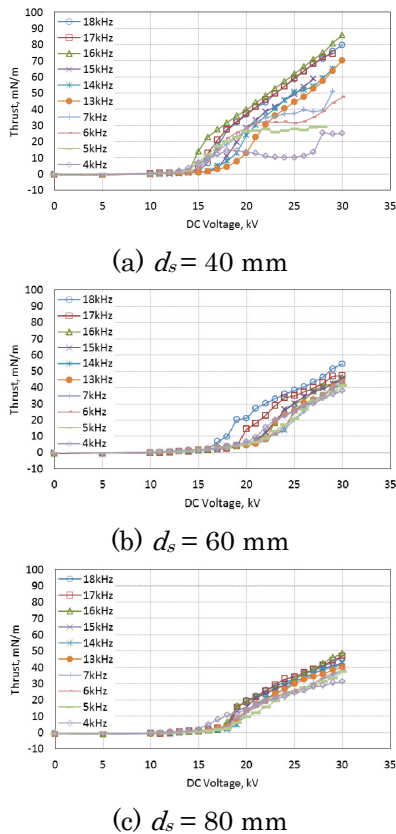


Fig. 8 Thrust versus of DC Voltage on the TED plasma actuator.

## (2) プラズマアクチュエータの流体制御性能評価と最適化

EGO-MAs法を用いて迎角 17 deg における剥離制御性能を最適化した結果について示す。サンプルの探索履歴を図 9 に示す。 $C_l$  が最大となった条件は 21 点目 (6 ループ目) の追加サンプル点で、設置位置  $s = -0.0117$ 、体積力  $T = 0.9998 \text{ N/m}$  のときに  $C_l = 1.809$  であった。これは、プラズマアクチュエータ設置位置はほぼ翼前縁であり、体積力は制約条件内で最大の場合を示している。

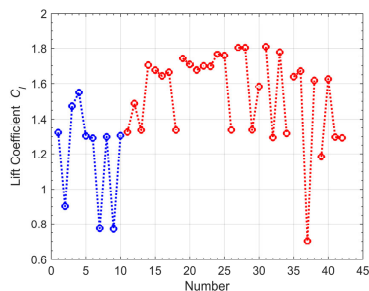


Fig. 9 History of objective function

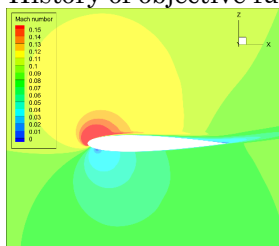


Fig. 10 Mach number distribution at the optimum condition

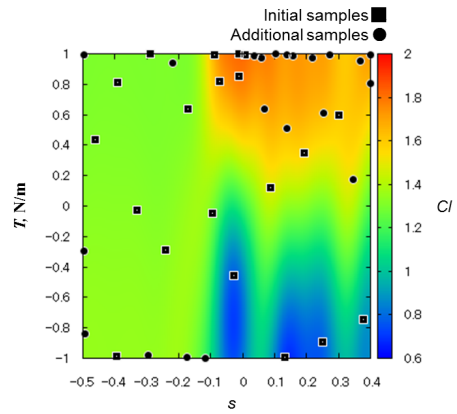


Fig. 11 Approximate response surface of  $C_l$ .

図 10 に示される同条件におけるマッハ数分布からも、翼面上剥離は良好に抑制されていることがわかる。図 11 は全サンプルにより得られた近似曲面と、曲面上に得られた 42 個のサンプルを示した  $C_l$  特性である。横軸を設置位置、縦軸を体積力とし、 $C_l$  をカラーマップで表している。図より、追加サンプル点の多くが  $T > 0$ 、 $s > -0.1$  の領域に集まっており、またこの領域では大きい  $C_l$  が得られていることが確認できる。また設計空間内ではラズマアクチュエータ設置位置が正、体積力が正となる領域において、一定以上の剥離抑制効果が得られることがわかる。

最後に、TED プラズマアクチュエータを NACA0012 二次元翼模型に設置・駆動した際の剥離制御性能評価試験の結果を示す。図 12 に示すのは、一様流流速 30m/s、迎角 22.5deg における SDBD、および TED プラズマアクチュエータ駆動時の平均流速分布である。図より、本条件では SDBD プラズマアクチュエータを駆動しても流れの付着が生じていない。これに対して、図 12(b) の TED プラズマアクチュエータを駆動した場合には流れが付着しており、これらの結果から、TED プラズマアクチュエータは SDBD プラズマアクチュエータに対して優位な剥離制御性能を持つことが実証された。一方で、TED プラズマアクチュエータにおいては、印加電圧の極性の違いによる、壁面方向に増速された噴流と上向き噴流との間では、剥離制御性能に大きな差が見られなかった。両者の流体制御のメカニズムは同一とは考えられないため、TED プラズマアクチュエータを有効に活用するためには、制御メカニズムの違いを解明する必要がある。

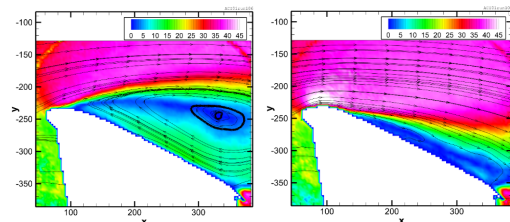


Fig. 12 Mean velocity fields: AoA = 22.5deg at U= 30 m/s: (Left) SDBD (Right) TED.

## 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 9 件)

1. Hiroyuki Nishida, Kumi Nakai, Takashi Matsuno, Physical Mechanism of Tri-Electrode Plasma Actuator with Direct-Current High Voltage, AIAA Journal, 査読有, 55, 2017, 1852-1861. 10.2514/1.J055560
2. 松野隆, 菅原正隆, 橘一輝, 川添博光, 浅海典男, 松野伸介, 山口方士, 三電極プラズマアクチュエータによるガスタービン翼流体制御に向けた小型二次元翼試験, 日本ガスタービン学会誌, 査読有, 45, 2017, 48~58.  
<http://www.gtsj.org/journal/index.html>
3. Matsuno T, Fukuda A, Kawazoe H, Nakai K, Nishida H, Parametric Optimization of Multi-Electrode Plasma Actuator with Serrated Electrode, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 査読有, 249, 2017, 012005~012005. 10.1088/1757-899X/249/1/012005
4. 中井公美, 西田浩之, 松野隆, DC 放電と AC 放電を利用した 3 電極プラズマアクチュエータの交流電圧波形による影響に関する数値的研究, 静電気学会誌, 査読有, 41, 2017, 194~200.  
<http://www.iesj.org/publications/>
5. Norio Asaumi, Shinsuke Matsuno, Takashi Matsuno, Masataka Sugahara, Hiromitsu Kawazoe, Multi-Electrode Plasma Actuator to Improve Performance of Flow Separation Control, International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, 査読有, 9, 2017, 1~8.  
<http://www.gtsj.org/english/jgpp/index.html>
6. Ariyarat Atthaphon, Kanazaki Masahiro, Multi-Fidelity Multi-Objective Efficient Global Optimization Applied to Airfoil Design Problems, Applied Sciences, 査読有, 7, 2017, 1318~1318. 10.3390/app7121318
7. Takashi MATSUNO, Masataka SUGAHARA, Jun KOYAMA, Noboru FUJITA, Gouji YAMADA, Hiromitsu KAWAZOE, Vectored Jet Control for Trielectrode Plasma Actuator with Serrated Electrode, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, 査読有, 14, 2016, Pe\_55-Pe\_61. 10.2322/tastj.14.Pe\_55
8. Kanazaki, M., Matsuno, T., Maeda, K, and Kawazoe, H., Optimum driving

condition for lift creating cylinder by plasma actuators based on wind tunnel evaluation-based design, International Journal of Automation and Logistics, 査読有, 2, 2015, 45-59. 10.1504/IJAL.2016.074913

[学会発表] (計 14 件)

1. Takashi Matsuno, Ai Fukuda, Kumi Nakai, Hiroyuki Nishida, Trielectrode Plasma Actuator for Enhanced Thrust Generation, EUROMECH Colloquium 593: Plasma-Based Actuators For Flow Control, 2018 年, Delft, Netherlands.
2. 橘一輝, 松野隆, 浅海典男, 金崎雅博, EGO/MAs 法を用いたプラズマアクチュエータ剥離抑制性能の最適化, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017 年, 埼玉県さいたま市.
3. Kumi Nakai, Hiroyuki Nishida and Takashi Matsuno, Effect of AC Voltage Waveform on Tri-Electrode Plasma Actuator Utilizing Interaction Between AC and DC Discharge, International Symposium on Electrohydrodynamics, 2017 年, Ottawa, ON CANADA.
4. 福田 愛, 松野隆, 西田浩之, 三電極プラズマアクチュエータ誘起ジェットの間極間距離および周波数依存性, 2016 年度日本機械学会年次大会, 2016 年, 福岡県福岡市.
5. Kanazaki, M., Matsuno, T., Maeda, K, and Kawazoe, H., Efficient Global Optimization Applied to Aerodynamic Drag Reduction Around Cylinder Using Plasma Actuators in Wind Tunnel Experiment, IEEE CEC 2015, 2015 年, Sendai, Japan.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松野 隆 (MATSUNO, Takashi)  
鳥取大学・工学研究科・講師  
研究者番号: 90432608

### (2) 研究分担者

西田 浩之 (NISHIDA, Hiroyuki)  
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 60545945

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: 10392838