

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560210

研究課題名(和文)省電力型マイクロプラズマアクチュエータによるはく離の制御

研究課題名(英文)Separation Control by Micro Plasma Actuator

研究代表者

石川 仁 (Ishikawa, Hitoshi)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：90311521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、消費電力の少ないマイクロプラズマアクチュエータを開発し、流れのはく離を減少させることを目的とした。マイクロプラズマアクチュエータから誘起される噴流の特性を静止流体中で可視化し、0.3m/s程度のジェットを噴出できることを確かめた。次に、直線状のマイクロプラズマアクチュエータを平板翼上に設置し、後流速度分布を測定した。さらに縦渦を誘起できる正弦波状のマイクロプラズマアクチュエータを考案し、NACA翼上に設置してはく離抑制の効果を調べた。またマイクロプラズマアクチュエータの消費電力をV-Qリサージュ法で測定し、同サイズのプラズマアクチュエータよりも省電力型であることを確かめた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a micro plasma actuator as a new saving energy device for flow separation control. The size of the micro plasma actuator in which electrode is the order of under millimeter size is smaller than that of conventional type plasma actuator. First, the characteristics of the a micro plasma actuator was researched by flow visualization. The jet velocity was about 0.3 m/s in quiescent air. Wind tunnel measurement was performed to investigate the wake structure behind flat plate wing with straight type macro plasma actuator. Then we developed sine curved type micro plasma actuator which is possible to induce streamwise vortex by jet collision. The sine curve type macro plasma actuator was installed on the surface of NACA 0012 wing. It was confirmed that the energy consumption of the micro plasma actuator was lower than that of normal plasma actuator by using V-Q Lissajous method.

研究分野：流体力学

キーワード：流体制御 アクチュエータ プラズマ はく離 翼

1. 研究開始当初の背景

流れのはく離は、抗力増加や騒音増加、および流体機器の効率低下の原因となっている。よってこれまで、ジェットの出出しやボルテックスジェネレータの誘起渦による運動量注入など、様々なはく離制御法が開発されてきた。最近、特に注目を集めているのははく離制御デバイスに、プラズマアクチュエータがある。プラズマアクチュエータの原理は、誘電体を挟んだ2枚の電極に交流高電圧を印加するとプラズマが発生し、それが周囲の流体をイオン化して噴流状の流れが誘起される現象を利用するものである。中でも誘電体バリア放電を利用したDBDプラズマアクチュエータは、①構造がシンプル、②複雑な可動機構を必要としない、③入力電圧の周波数を変えることにより、様々な噴流が形成できる、④比較的大きな運動量が生成可能、などの利点があることから、国内外の各研究機関で活発に研究が行われている。研究代表者らのグループは、このDBDプラズマアクチュエータを応用して、円柱のはく離制御の研究を、いち早く行ってきた。

2. 研究の目的

しかしプラズマアクチュエータは交流高電圧を要することで消費電力が大きいという問題点がある。また、制御対象の流体機械の小型化が進んでいることから、プラズマアクチュエータのさらなる小型化が必要であると考へた。そこで研究代表者らは、電極幅がミリメートル単位以下のマイクロサイズのプラズマアクチュエータの開発を目的とした。このマイクロプラズマアクチュエータは様々な形状の物体に設置ができ、従来型プラズマアクチュエータより少ない消費電力で流体制御できるデバイスとして開発を行った。

本研究では、消費電力の少ない、省電力型の新しいマイクロプラズマアクチュエータを開発すること、それを翼の表面に設置して、はく離の抑制、およびはく離領域の減少を試みることを、目的とした。

3. 研究の方法

本研究で開発したマイクロプラズマアクチュエータ((株)FISA製)の概略を図1に示す。電極形状は梯子状になっていて、従来のプラズマアクチュエータと同様に誘電体薄膜の両面に金属製の上部電極と下部電極をエッチングした構造となっている。本研究では、この直線状のマイクロプラズマアクチュエータと、後述する正弦波状のマイクロプラズマアクチュエータを使用して実験を行った。以下には直線状のアクチュエータについて述べる。

アクチュエータの寸法は上部、下部それぞれの電極の長さを $L_1=103\text{mm}$ とし、拡大図のよ

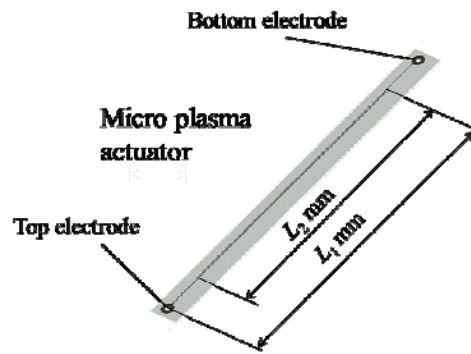


図1 直線状マイクロプラズマアクチュエータ

うに電極同士が誘電体越しに隣り合う部分の長さを $L_2=85\text{mm}$ とした。アクチュエータの駆動電源には簡易型高周波電源からの高周波高電圧を印加し、ジェットを連続的に吹き出すことができる。

実験は概ね以下のように行った。まずマイクロプラズマアクチュエータによって誘起されるジェット様子や速度を調べるため、静止流体中においてトレーサ法による可視化実験をおこなった。次に実際にマイクロプラズマアクチュエータを翼面上に設置して、後流の速度分布やはく離の状態を調べた。翼の実験に関しては、アクチュエータの設置位置や翼の迎角を種々変化させて行った。以下にそれぞれの実験結果を述べる。

4. 研究成果

(1) 直線型マイクロプラズマアクチュエータの基礎特性

図2に、静止流体中における、マイクロプラズマアクチュエータから噴出するジェットの可視化画像を示す。可視化手法にはトレーサ粒子法を採用した。トレーサには線香を用い、撮影には高速度カメラを使用し、フレームレートを $1,000\text{fps}$ 、撮影時間を 2.0s とした。光源にはグリーンレーザーを使用した。マイクロプラズマアクチュエータに印加する電圧 $V=3, 4$ および 5kVPP (駆動周波数 $f=12\text{kHz}$ 一定) と変化させた場合と駆動周波数 $f=6, 9, 12$ および 15kHz (電圧 $V=3\text{kVPP}$ 一定) と変化させた場合において撮影をおこない、ジェットの発生位置およびジェット流速を撮影した画像より調べた。この画像より、上部電極の先端から下部電極に向かってジェットを誘起していることが確認された。とくに上部電極の梯子状となっている部分の先端からジェットが誘起されることが確認された。通常のプラズマアクチュエータでは、電極の全面からジェットが誘起されることに対して、マイクロプラズマアクチュエータでは梯子状電極の先端からジェットが誘起されること、それがスパン方向に並ぶことによって、誘起ジェットのスパン方向の一様性を良好にしていることがわかった。

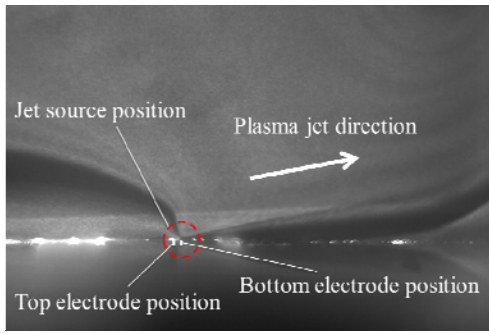


図2 ジェット誘起の様子

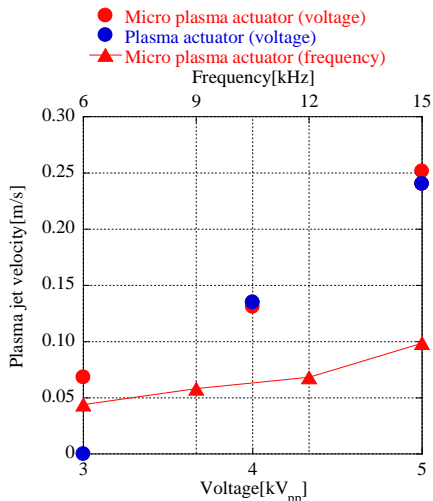


図3 電圧, 駆動周波数とジェット流速の関係

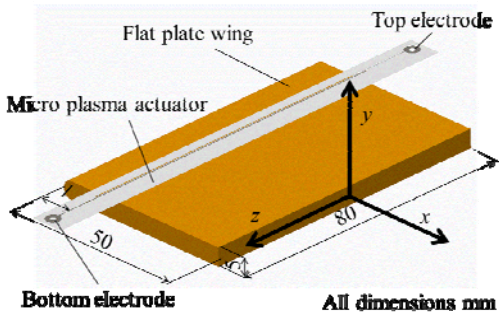
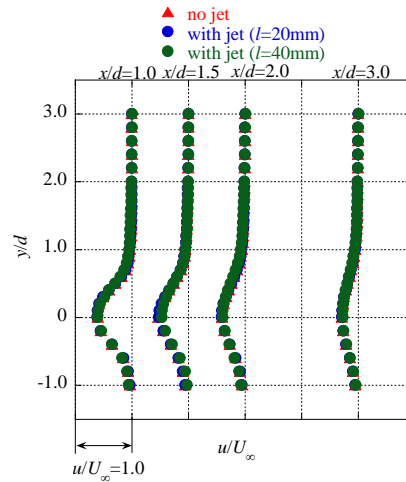
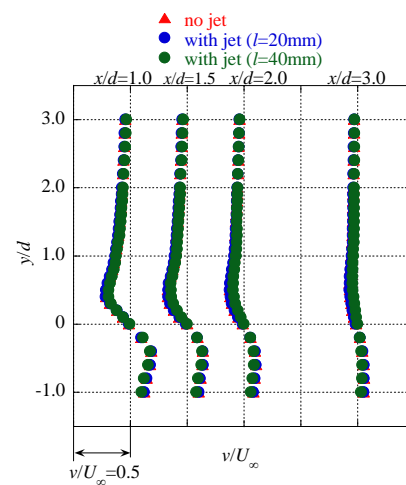


図4 直線状マイクロプラズマアクチュエータを設置した平板翼

図3にマイクロプラズマアクチュエータと比較のため従来型のプラズマアクチュエータにおける, 電圧, 駆動周波数とジェット流速の関係を示す. ここでジェットが発生する電極部分のサイズは同一とした. 図より, 駆動周波数を大きくすることでジェットの速度が大きくなることがわかった. また電圧 $V=4, 5\text{kV}_{pp}$ に対してはどちらのアクチュエータもジェットが誘起された. しかし電圧の低い $V=3\text{kV}_{pp}$ では, マイクロプラズマアクチュエータのジェットは誘起されたが, 従来型のプラズマアクチュエータのジェットは誘起



(a) 主流方向速度 u の分布



(b) 高さ方向速度 v の分布

図5 直線状マイクロプラズマアクチュエータを設置した平板翼後流の速度分布

されなかった. このことから, より低い電圧でもマイクロプラズマアクチュエータではジェットの誘起が可能であることが確認され, マイクロプラズマアクチュエータの省電力性能の一つが確かめられた. その要因としては, 一般にプラズマアクチュエータのエネルギー変換効率は電極幅を微小化し, 誘電体を薄くすることで高くなることが知られており, 本研究のマイクロプラズマアクチュエータのサイズが十分に小さいため, その条件を満たしたと予想される.

(2) 直線状マイクロプラズマアクチュエータを設置した平板翼後流の計測

以下に, 直線状のマイクロプラズマアクチュエータを平板翼に設置して, その後流とはく離抑制効果を確認した結果について述べる. 平板翼は図4に示すように翼厚 $t=5\text{mm}$, 翼弦長 $c=50\text{mm}$, さらに流れのよけ性を保つため, 翼の両側に直径 100mm の円形端板を付加したものをを使用した. マイクロプラズマアク

チュエータは、平板翼の先端から $l=20\text{mm}$, および 40mm の位置に設置した. 測定には出口寸法 $100\times 100\text{mm}^2$ の吹出し型風洞を使用した. 設定流速は $U_\infty=4.5\text{m/s}$, 翼厚 d に基づくレイノルズ数は $Re=1,500$ である. 速度分布計測には自作の X 型熱線プローブを用いた. サンプリング周波数は $5,000\text{Hz}$, サンプリング点数は $8,192\times 10$ 点, 測定位置は翼後流の主流方向 $x/d=1.0, 1.5, 2.0$ および 3.0 , 高さ方向に $y/d=1.0\sim 3.0$ とした. アクチュエータの駆動条件は電圧 $V=3kV_{pp}$, 駆動周波数 $f=10\text{kHz}$ を印加し, これも連続的にジェットを吹き出させるようにした. 測定を行うにあたっては高周波電源によるノイズを除去するためにローパスフィルタを使用した.

ジェット無し (No jet) とアクチュエータ設置位置が平板翼の先端から $l=20, 40\text{mm}$ の位置におけるジェット有 (with jet ($l=20\text{mm}$), with jet ($l=40\text{mm}$)) の測定結果についてそれぞれ図 5(a) に主流方向速度 u , 図 5(b) に高さ方向速度 v の分布を示す. ジェットの有無による速度分布の差はみられない. この結果より本実験における測定領域ではマイクロプラズマアクチュエータが誘起したジェットの影響はみられなかった.

(3) 正弦波状マイクロプラズマアクチュエータの開発と基礎特性

以上までの結果からわかるように, 直線状のマイクロプラズマアクチュエータでは, 平板翼のはく離抑制に対して, 大きな効果が得られなかったため, 電極形状を正弦波状に変化させた新たなマイクロプラズマアクチュエータを開発した. 電極を正弦波状に変化させた理由は, 隣り合う電極から噴出するジェットが衝突することによって巻き上がり, 縦渦を形成し, それが主流の運動量をはく離領

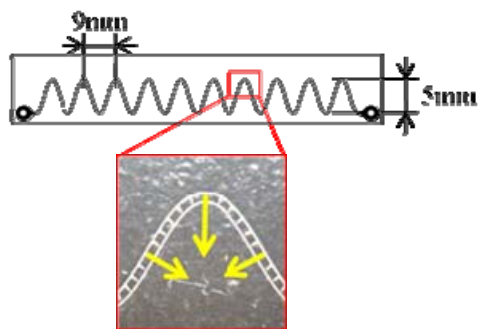


図 6 正弦波状マイクロプラズマアクチュエータ

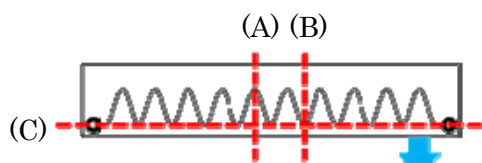
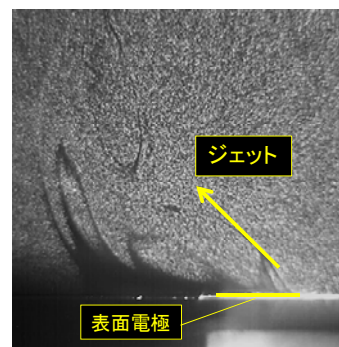


図 7 ジェットの可視化断面位置

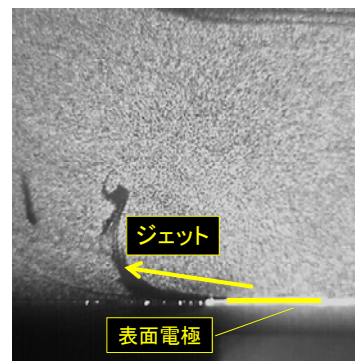
域に導入することによって, はく離抑制の効果を期待するものである. この知見は, 申請者がこれまで円柱や平板翼の表面に設置した対抗型のプラズマアクチュエータが, 導入する縦渦により大きなはく離抑制の効果を得られることから着想を得ている.

正弦波状マイクロプラズマアクチュエータの電極は, 図 6 のような形状となっている. 電極の形を波状にすることで, 波の山部分からのジェットが衝突して, 縦渦が巻き上がる. 波部分の波長は, 円板や平板に対抗型プラズマアクチュエータを設置した実験を行い, 子運動量の減衰がなく効果的に噴流が衝突する波長を決定した.

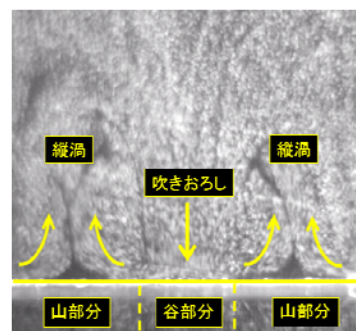
速度分布測定の実験は, 同じ吹出し型風洞を使用し, 測定には自作の X 型熱線流速計を用いた. また, 制御対象を平板翼から



(a) 山の部分



(b) 谷の部分



(c) 下流方向

図 8 正弦波状マイクロプラズマアクチュエータのジェットの可視化

NACA0012 翼 に変更した. このことは, マイクロプラズマアクチュエータからのジェットが圧力勾配のある翼面上の境界層により干渉しやすくなることを期待したことと, より実用的な応用を期待したこと, 等による.

まず静止流体中において, 正弦波状マイクロプラズマアクチュエータから噴出するジェットの可視化をトレーサ粒子法によって行った. アクチュエータの駆動条件は電圧 4.5~5kVPP, 電圧周波数 12kHz を印加した. 撮影した可視化断面を図 7 に示す. また, 図 7(A)における位置の動画からジェット流速を算出した..

誘起されたジェットの可視化画像を図 8 に示す. 図 8(a), (b), (c)は図 7 中の(A), (B), (C)の可視化断面に対応している. 画像は電極に電圧 4kVPP, 電圧周波数 12kHz を印加したときのものである. 図 8(a)から, マイクロプラズマアクチュエータの波の山部分において縦渦が発生していることがわかる. 波の山部分の位置では, 電極同士が向かい合っている. よって電極から発生したジェットは互いに衝突し巻き上がっており, 期待したような縦渦が発生することを確認した. また, 図 8(c)からもジェットが巻き上がっていることが確認できた. 一方図 8(b)からは, マイクロプラズマアクチュエータの波の谷部分において, ジェットはマイクロマイクロプラズマアクチュエータの壁面に沿った流れになっていることがわかる. 波の谷部分の位置では, 電極から発生したジェットは互いに衝突しないため, 壁面に沿った流れとなった.

次に, 本研究の目的の一つであるマイクロプラズマアクチュエータの省電力性を確かめるため, スパン方向寸法が同じ直線型マイクロプラズマアクチュエータとプラズマアクチュエータを用意し, 消費電力を測定した. 誘電体には同じ厚さ 100 μ m のマイカを用いた. 電極の長さは $L_1=103$ mm とし, 上部と下部で電極が重なっている部分を $L_2=85$ mm とした.

プラズマアクチュエータに入力するような高周波高電圧の電流は, 通常の積分法ではノイズが大きく正確な消費電力の測定ができないので, Pons らの研究⁽¹⁾を参考にし V-Q リサーチ法によって行った. プラズマアクチュエータとコンデンサを直列につなぎ, コンデンサの電荷 Q [C]とプラズマアクチュエータの電圧 V_{PA} [V]を測定した. 式(1)より Q-V_{PA} グラフの面積に電圧周波数 f をかけることで, 消費電力 P が求められることが明らかにされている. 電源には高周波高電圧装置を用いて, 電圧 4~5.5kVPP, 電圧周波数 6kHz を印加した.

$$V = f \int V_{PA} \times dQ \quad (1)$$

従来型プラズマアクチュエータとマイクロプラズマアクチュエータの各印加電圧に

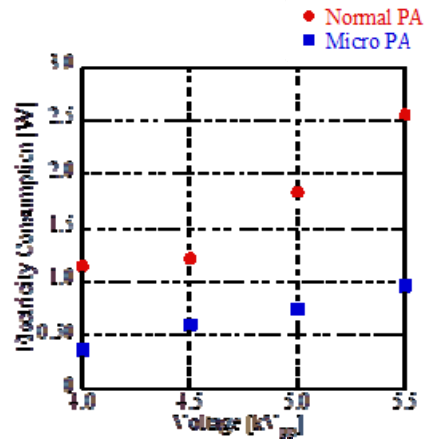


図 9 V-Q リサーチ法によるマイクロプラズマアクチュエータと通常のプラズマアクチュエータの消費電力比較

における消費電力測定結果のグラフを図 9 に示す. この結果から, マイクロプラズマアクチュエータは従来型と比べ, 消費電力が小さくなった. プラズマアクチュエータから発生する体積力の分布幅は電極幅に比例する. マイクロプラズマアクチュエータは従来型より電極幅が小さいため, 体積力が小さくなり, 消費電力が抑えられたと考えられる.

(4) 正弦波状マイクロプラズマアクチュエータを設置した NACA0012 翼後流の計測, およびはく離抑制の効果

正弦波状マイクロプラズマアクチュエータを設置した NACA0012 翼後流の速度分布計測, およびはく離抑制の効果を調べた, 速度分布測定の実験は, 吹出し型風洞を使用し, 測定には自作の X 型熱線流速計を用いた. 図 9 に正弦波状マイクロプラズマアクチュエータの開発を設置した NACA 翼および座標系を示す. 翼型は, NACA0012(翼弦長 $c=50$ mm, 最大翼厚 $D=6$ mm), 主流方向を x 軸, NACA 翼高さ方向を y 軸, NACA 翼スパン方向を z 軸とした. 主流流速 $U_\infty=4.5$ m/s, 翼弦長 c に基づくレイノルズ数 $Re=1.5 \times 10^4$ と設定した. マイクロプラズマアクチュエータの取付け位置は, NACA 翼前縁から $l=5$ mm とし, 翼の迎角 $\alpha=5$ deg とした. マイクロプラズマアクチュエータの電極には電圧 4kV_{pp}, 電圧周波数 12kHz を印加した. 測定領域は, 波型電極の山部分である $z=0$ mm において, 原点から $x/c=0.1, 0.2, \text{ および } 0.3$ 位置とした. 図 10, 図 11 に NACA 翼後流の主流方向および高さ方向の速度分布を示す. 主流方向速度および高さ方向速度とも, ジェットを発生させたにも関わらず, 速度分布に変化はなく, マイクロプラズマアクチュエータの効果は確認できなかった. マイクロプラズマアクチュエータの体積力の分布幅は, 電極幅が狭いため小さい. よって, 電極から発生したジェットの流速が小さくなるため, 発生した縦渦が主流によって打ち消されたと考えられる.

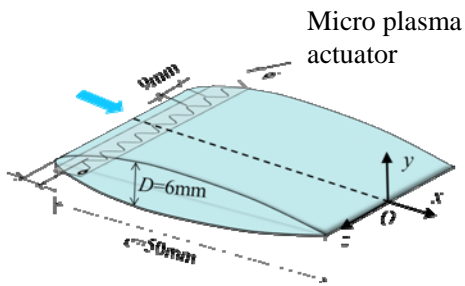


図 10 正弦波状マイクロプラズマアクチュエータを設置した NACA0012 翼

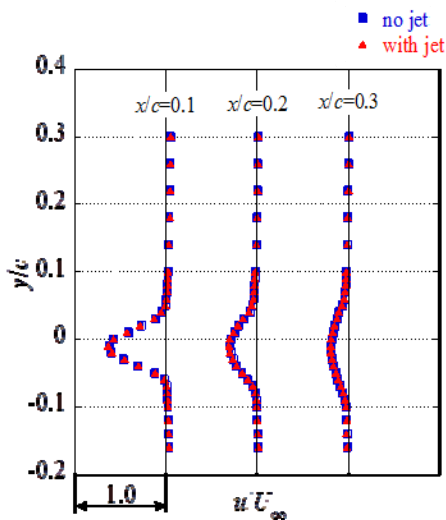


図 11 正弦波状マイクロプラズマアクチュエータを設置した NACA0012 翼後流の主流方向速度分布

4. 研究のまとめ

本研究では、消費電力の少ない省電力型のマイクロプラズマアクチュエータを開発した。静止流体中でその特性を調べ、誘起されるジェットの流速や、電極形状を正弦波状に変化させることで、流体中で縦渦を形成できることを確かめた。それを平板翼および NACA 翼の表面に設置して、はく離の抑制、およびはく離領域の減少を試みた。マイクロプラズマアクチュエータの翼面上の設置位置や迎角を変えて、速度分布計測を行った結果、大きなはく離抑制の効果は本研究の範囲では得られなかった。このことは実験を行った主流速度に対して、マイクロプラズマアクチュエータが誘起するジェットの速度が小さかったこと、今回試した設置位置が適切ではなかったことが考えられる。

本研究の今ひとつの目的である、プラズマアクチュエータの省電力化については、V-Q リサージ法による消費電力測定により、その効果が確かめられ、達成されたといえる。

本研究の成果として、開発した正弦波状のマイクロプラズマアクチュエータを主流方向に多段に並べたものを開発している。また正弦波の山と谷の位置を同じくしたものと

千鳥状にずらせたものを考案した。この多段式マイクロプラズマアクチュエータにより、ジェット流速の不足が補えると期待する。今後は、この多段式マイクロプラズマアクチュエータを翼のみでなく、境界層のはく離やチャンネル内流れの縦渦構造の制御に応用する予定である。

<引用文献>

① Pons, J. et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 38(2005), pp. 3635-3642

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 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

① T. Yoshioka, T. Sakai, H. Ishikawa and S. Honami: "Curved Type Plasma Actuator for Flow Separation", The 5th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, (ICJWSF2015), KTH Campus, Stockholm, Sweden (June 16- 18, 2015)

② T. Yoshioka, T. Sakai, H. Ishikawa and S. Honami: "Separation Control using Micro Plasma Actuator", ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (AJK2015), COEX, Seoul, Korea (July 26-31, 2015)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 仁 (ISHIKAWA, Hitoshi)
東京理科大学・工学部・教授
研究者番号: 9 0 3 1 1 5 2 1

(2) 研究分担者

本阿弥 眞治 (HONAMI, Shinji)
東京理科大学・工学部・教授
研究者番号: 3 0 0 8 9 3 1 2

(3) 連携研究者

瀬戸 章文 (SETO, Takafumi)
金沢大学・自然システム学系・教授
研究者番号: 4 0 3 4 4 1 5 5