プラズマシンセティックジェットアクチュエータの湿度依存性*

小河原 加久治^{*1}, 中 川 貴 裕^{*2}
樋 口 丈 浩^{*1}, 大 石 正 明^{*2}

Humidity Characteristics of Plasma Synthetic Jet Actuator

Kakuji OGAWARA^{*3}, Takahiro NAKAGAWA,
Takehiro HIGUCHI and Masaaki OHISHI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

This paper describes humidity characteristics of Plasma Synthetic Jet Actuator (PSJA). PSJA is flow control device using the Electro Hydro Dynamic (EHD) effect of the glow-discharge. PSJA can be downsized, controlled easily, and has quick control response. Though the flow control around an airfoil with PSJA is mainly studied, its characteristics have not been clarified. So, it is necessary to investigate humidity characteristics of induced flow by PSJA. In this paper, the induced flow from PSJA was measured in the different relative humidity. The experimental results show that the effect of induce flow by PSJA had decreased with increase relative humidity. Therefore, when PSJA was used, relative humidity becomes an important parameter.

Key Words: Flow Control, Plasma Synthetic Jet Actuator, Humidity, Plasma, Actuator

1. 結 論

近年, 流体制御が盛んに行われるようになってきている。流体制御には, 外部からのエネルギー供給の必要がない受動制御と, 外部からのエネルギー供給によって流体を制御する能動制御の2つに分けることができる。受動制御装置としてはポルテックスジェネレータ等の固定性装置が上げられる。能動制御装置には, 抵抗低減効果を得ることができるアクチュエータとして, シンセティックジェットアクチュエータ(SJA)が提案されている。これは, 吸い込みと噴出しを交互に繰り返し, 平均として質量流量をゼロとするにもかかわらず, 正の運動量を持つ噴流を誘起できるアクチュエータである。

SJA と同様な噴流誘起装置であるプラズマアクチュエータの流れ制御に適用する研究が行われている。プラズマアクチュエータは電極間にグロー放電を発生させ EHD 効果により噴流を誘起する電気的なデバイスである。SJA などの流れ制御用アクチュエータの多くは機械的なデバイスであるため, 劣化などの問題が生

じる可能性がある。しかし, プラズマアクチュエータは可動部がないために, SJA に比べ劣化などの問題が生じる可能性は低いと考えられる。また, 制御が容易であり作動レスポンスの良いアクチュエータである。さらにはアクチュエータの構造により小型軽量化も可能なアクチュエータである。そのために, プラズマアクチュエータの流れ制御への適用が期待されている。

現在, プラズマアクチュエータの研究は, Roth らのプラズマアクチュエータを平板上に取り付け, 表面摩擦抗力の低減を目的とした研究⁽¹⁾や, Coke らが翼周りの流れ制御に適するプラズマアクチュエータの電極形状を提案し, 翼を用いての剥離制御に関する研究⁽²⁾などがある。また, Anderson らの研究では, 飛行状況でのプラズマアクチュエータの性能と湿度の影響について報告している⁽³⁾。この報告によれば, アクチュエータを使用する環境の相対湿度によって, 効果が異なることを示している。しかし, この報告ではプラズマアクチュエータ自体の誘起流の変化は示されていない。そのために, 異なる相対湿度でアクチュエータ自体の誘起流特性を調査する必要がある。

本研究では, 交流電源を用いたプラズマアクチュエータを SJA の噴流誘起装置としてプラズマアクチュ

* 原稿受付 2007 年 2 月 26 日。

^{*1} 正員, 山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)。^{*2} 山口大学大学院理工学研究科機械工学専攻。

E-mail: ogawara@yamaguchi-u.ac.jp

エータ(PSJA)^⑧と呼び、Strip-Strip型電極のPSJAを用いて相対湿度の異なる環境下で誘起流を計測することにより、PSJAの誘起特性の湿度依存性について調査する。

2 プラズマシセンスティックジェットアクチュエータ

PSJAとは、交流グロー放電による質量流量ゼロの噴流誘起装置である。陽極(Anode)と陰極(Cathode)の二つの電極があり、両電極間に比較的高い電圧を印加し、放電により発生したプラズマを利用する。式(1)に示される誘電力 F_b [N/m³]がプラズマ化した気体分子に作用し、陽極から陰極に向かう周囲流体の吸い込みを間欠的に行うことにより流れを誘起する^⑧。吸い込み、吐き出しを周期的に繰り返して作られた噴流をシセンスティックジェット(SJA)と呼び、PSJAはマックスウェル応力^⑨による電氣的誘電力を利用するSJAである。真空の誘電率を ϵ_0 [F/m]、電場を E [V/m]、 C は気体性状に依存する係数とする。

$$F_b = C \text{grad} \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 |E|^2 \right) \quad (1)$$

本研究に用いるPSJAの電極部分の概略を図1に示す。このような電極形状を用いたのは、不等電界を形成させるためである^⑩。まず式(1)より、平等電界では流れを誘起する誘電力は働かない。例えば、同じ形状の二つの電極を平行に設置して平等電界を形成させた場合、噴流は誘起されない。また、式(1)では同じ電圧下においては電極間距離の小さい方が大きな流体力を発生できることになるが、実際は単に電極間距離を小さくしただけでは強い噴流を誘起することはできない。図1に示すPSJAはStrip(金属の薄片)状の同じ形状の電極対を用いたStrip-Strip(S-S)型を用いており、ポリイミドフィルムにより絶縁されている。電極には50[μm]の厚みを有する銅テープを用い、絶縁体には50[μm]厚のポリイミドフィルムテープ(Kapton[®]テープ)を用いた。PSJAを駆動する為の構成回路を図2に示す。本アクチュエータは、信号発生器(HEWLETT PACKARD 製 3312A FUNCTION GENERATOR)により矩形波を入力し、電力増幅器(SONY INTEGRATED STEREO AMPLIFIER TA-V7000)、昇圧トランス(ユニオン電機製 巻数比 625)により電圧を増幅し駆動する。入力矩形波の周波数(駆動周波数 f)は、500[Hz]及び800[Hz]とし、陽極と(Anode)陰

Fig.1 Schematic view of PSJA(S-S type)

極(Cathode)の間に印加する電圧 $V=11$ [kV_{pp}]及び13 [kV_{pp}]とした。ここで、 $f=500$ [Hz]、 $V=11$ [kV_{pp}]でのPSJAの両端の電圧電流を図3に示す。図3より、アクチュエータに流れる電流は平均すると数[mA]であった。大

Fig.2 Schematic view of Circuit

気圧下でのグロー放電は、数十[mA]以下が普通である

Fig.3 Voltage and current

ので、この放電形態はグロー放電であることになる。また、放電が始まると、陽極(Anode)と陰極(Cathode)の最接近部において青紫色の放電が観察できる。しかし、この発光は暗間でわずかに観察できる程度の微弱光であるが、この発光に伴い、アクチュエ

一タから図 1 に示すような噴流が誘起される⁽¹⁾。この誘起流は壁面から垂直に噴出するものではなく、むしろ吸い込み効果が大きいものと考えている。

マシンセティックジェットアクチュエータの取り付け位置は流路入り口から 4[mm]のところに PSJA の陽極と陰極の最接近部が来るように設置した。測定部は

Fig. 4 Schematic view of experimental device

3. 流路を用いた実験方法

本研究では、相対湿度に対する PSJA の誘起流の特性を調査するために、図 4 に示すような開口比 0.25 のオリフィスを用いた全長 150[mm]の流路を用いた。この流路は Abe らの研究⁽²⁾で使用された流路を参考に製作されており、この流路を用いることで PSJA を駆動させた時に、PSJA からの誘起流によるオリフィス前後の差圧を測定することができる。測定方法としては、流路入り口から PSJA による誘起流を流入し、1/5 に縮流された後に、オリフィスの設置された流路幅 10[mm]の区間でオリフィス前後の差圧を測定する。そうすることで、PSJA からの誘起流の流量を測定することができる。

実験装置の構成は、差圧計と流路からなっており、流路はアクリル製、差圧計は testo 社製デジタルマノメータ testo512 (計測範囲 0~0.2[kPa]) となっている。流路高さは 2[mm]、流路幅については流路入り口は幅 50[mm]となっており、縮流後は 10[mm]とした。プラズ

Fig. 5 Relations of differential pressure and volumetric flow in experimental device

図 4 に示すように、流路入り口から 50[mm]からの 50[mm]間とし、中心部にオリフィスが取り付けられている。差圧計により PSJA 後流のオリフィス前後の圧力差を測定する。ここで流路内における流入流量と圧力差の校正結果を図 5 に示す。図 5 より図 4 の流路においてオリフィス前後の圧力差と流入流量は比例関係になっている事が分かる。よって圧力差を測定することで PSJA から誘起される流量が分かる。相対湿度に対する PSJA による誘起流の特性計測実験は、相対

湿度を加湿器及び除湿機を用いて 40-80%に調節し実験を行う。相対湿度は(株)テスト-Hygrometer test608-HI を用いて計測した。PSJA の駆動周波数 $f=500$ [Hz] 及び 800 [Hz] とし、印加電圧 $V=11$ [kV_{pp}] 及び 13 [kV_{pp}] とした。

Fig.6 (a)-(b) Profile of differential pressure and relative humidity at $f=500$ [Hz]

4. 結果および考察

相対湿度の違いによる PSJA 後流でのオリフィス前後の差圧の調査を図 4 のオリフィスによる差圧計測用流路を用いて行った。駆動周波数 $f=500$ [Hz] 及び 800 [Hz]、印加電圧は 11, 13 [kV_{pp}] とし、PSJA 後流でのオリフィス前後の差圧を相対湿度 40-80%として実験を行った。実験では 1 セットごとに相対湿度を高湿から低湿へ変化させ計測を行った。

4.1 駆動周波数 $f=500$ [Hz] での計測結果 計測結果を縦軸に PSJA 後流でのオリフィス前後の差圧 ΔP [Pa]、横軸を相対湿度(Relative humidity) [%] として計測値の散布図を図 6(a)-(b)に示した。図 6(a)では印加電圧 $V=11$ [kV_{pp}]、図 6(b)では印加電圧 $V=13$ [kV_{pp}] の散布図を

示している。図より印加電圧 $V=13$ [kV_{pp}] のオリフィス前後の差圧が印加電圧 $V=11$ [kV_{pp}] よりも全体的に大きいことが分かる。ここで、相対湿度 60 ± 2.5 [%] 間の差圧を $\Delta P_{60\%}$ [Pa] として、 $\Delta P_{60\%}$ の平均値を用いて全ての値を無次元化した。そして、相対湿度 40-49, 50-59,

Fig.7 (a)-(b) Profile of average $\Delta P/\Delta P_{60\%}$ and relative humidity at $f=500$ [Hz]

60-69, 70-79 [%] の 4 つの区間に分け、10%ごとの $\Delta P/\Delta P_{60\%}$ の平均値を縦軸とし、横軸を相対湿度(Relative humidity) [%] として図 7(a)-(b)に示した。なお、棒グラフの横軸位置は相対湿度の計測値平均である。

図 7(a)では印加電圧 11 [kV_{pp}] の $\Delta P/\Delta P_{60\%}$ の平均値を示している。図より相対湿度 40-59 [%] の区間では相対湿度の増加に伴い $\Delta P/\Delta P_{60\%}$ が減少していくが、相対湿度 60-69 [%] の区間では増加し、相対湿度 70-79 [%] の区間では減少し、 $\Delta P/\Delta P_{60\%}$ が最小になっていることが分かる。また、相対湿度 40-49 [%] の区間で $\Delta P/\Delta P_{60\%}$ が最大となっていることが分かる。

図 7(b)では印加電圧 13 [kV_{pp}] の $\Delta P/\Delta P_{60\%}$ の平均値を示している。図より、相対湿度 40-79 [%] の全ての区間において相対湿度の増加により $\Delta P/\Delta P_{60\%}$ が減少していることが分かる。そして、相対湿度 70-79 [%] の区間

で $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ の値が最小になっていることが分かる。
また、相対湿度 40-49% の区間で $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ が最大となることが分かる。

電圧 $V=13[\text{kV}_{\text{pp}}]$ のオリフィス前後の差圧 ΔP が印加電圧 $V=11[\text{kV}_{\text{pp}}]$ よりも全体的に大きいことが分かる。

ここで、相対湿度 $60 \pm 2.5\%$ 間の差圧を $\Delta P_{\text{avg}} [\text{Pa}]$ と

(a) $V=11[\text{kV}_{\text{pp}}]$

(b) $V=13[\text{kV}_{\text{pp}}]$

Fig.8 (a)-(b) Profile of differential pressure and relative humidity at $f=800[\text{Hz}]$

駆動周波数 $f=500[\text{Hz}]$ で 2 種類の印加電圧で計測を行ったところ、相対湿度の増加に伴い、相対湿度 40-69% の区間では $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ が減少することもあれば増加することもあるが、相対湿度 70-79% の区間では印加電圧 $V=11, 13[\text{kV}_{\text{pp}}]$ 共に $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ が最小となることが分かった。また、相対湿度に対する $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ の変化を全体的に見れば、相対湿度が増加すると $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ が減少する傾向を示していることが分かる。これは、PSJA の誘起流が相対湿度が増加することによって減少することも示している。

4・2 駆動周波数 $f=800[\text{Hz}]$ での計測結果 次に駆動周波数 $f=800[\text{Hz}]$ での計測結果を縦軸に PSJA 後流でのオリフィス前後の差圧 $\Delta P [\text{Pa}]$ 、横軸を相対湿度 (Relative humidity) [%] として計測値の散布図を図 9(a)-(b) に示した。図 9(a) では印加電圧 $V=11[\text{kV}_{\text{pp}}]$ 、図 9(b) では印加電圧 $V=13[\text{kV}_{\text{pp}}]$ の散布図を示している。図より印加

(a) $V=11[\text{kV}_{\text{pp}}]$

(b) $V=13[\text{kV}_{\text{pp}}]$

Fig.9 (a)-(b) Profile of average $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ and relative humidity at $f=800[\text{Hz}]$

して、 ΔP_{avg} の平均値を用いて全ての値を無次元化した。そして、相対湿度を 40-49, 50-59, 60-69, 70-79% の 4 つの区間に分け、10% ごとの $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ の平均値を縦軸にとり、横軸を相対湿度 (Relative humidity) [%] として図 9(a)-(b) に示した。

図 9(a) では印加電圧 $V=11[\text{kV}_{\text{pp}}]$ の $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ の平均値を示している。図より、相対湿度 40-79% の全ての区間において相対湿度の増加により $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ が減少していることが分かる。そして、相対湿度 70-79% の区間で $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ の値が最小になっていることが分かる。また、相対湿度 40-49% の区間で $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ が最大となることが分かる。

図 9 (b) では印加電圧 $V=13[\text{kV}_{\text{pp}}]$ の $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ の平均値を示している。図より、相対湿度 40-59% の区間では相対湿度の増加に伴い $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ が増加するが、相対湿度 60-79% の以上の区間では $\Delta P / \Delta P_{\text{avg}}$ が減少し、相

対湿度 70-79% の区間で $\angle P / \angle P_{60\%}$ が最小になっていることが分かる。また、相対湿度 50-59% の区間で $\angle P / \angle P_{60\%}$ が最大となっていることが分かる。

駆動周波数 $f=800[\text{Hz}]$ で 2 種類の印加電圧で計測を行ったところ、相対湿度の増加に伴い、相対湿度 40-69% の区間では $\angle P / \angle P_{60\%}$ が減少することもあれば増加することもあったが、相対湿度 70-79% の区間では印加電圧 $V=11, 13[\text{kV}_{\text{pp}}]$ 共に $\angle P / \angle P_{60\%}$ が最小となることが分かった。また、相対湿度に対する $\angle P / \angle P_{60\%}$ の変化を全体的に見れば、相対湿度が増加すると $\angle P / \angle P_{60\%}$ が減少する傾向を示していることが分かる。以上により、相対湿度が増加すると、相対湿度 70-79% の区間では、全ての場合において $\angle P / \angle P_{60\%}$ が最小となり、PSJA による誘起流も最小値をとることが分かる。また、相対湿度に対する $\angle P / \angle P_{60\%}$ の変化を全体的に見れば、相対湿度が増加すると $\angle P / \angle P_{60\%}$ が減少する傾向を示していることが分かる。よって、相対湿度が高い環境では PSJA の誘起流発生効率が悪くなることが分かった。

5. 結 言

相対湿度を変化させオリフィス前後での差圧 $\angle P[\text{Pa}]$ を用いて PSJA の誘起特性を計測した。その結果は全ての駆動周波数及び印加電圧において、相対湿度が増加することによりオリフィス前後の差圧 $\angle P$ は減少する傾向があることが分かった。そのため、相対湿度が増加することで PSJA による誘起流が弱くなることが分かった。相対湿度が増加することによって $\angle P$ が減少する原因としては、PSJA が誘起流を発生させる原因となっている電極間での放電が空気中で行われているため、相対湿度が増加することによって、大気中の水分により電流が流れやすくなるため、供給されるエネルギーの一部が無駄に消費された為と考えられる。

これまでの研究で PSJA の幾何学的形状により流れ誘起特性が変化することが明らかとなっているが⁽⁹⁾、本研究により PSJA の湿度依存性を示すことができた。

PSJA に加えられた電力の一部は音（放電による音）、光（グロー光）及び PSJA 自体の発熱エネルギーとして消費されることが経験的に知られている。今後、これら噴流誘起以外に消費される無駄なエネルギーの定量的な評価を行うことが、PSJA の噴流アクチュエータとしてのエネルギー効率改善のためには必要である。

参考文献

- (1) J.R.Roth, et al., Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma, *ALAA paper*, 98-0328 (1998).
- (2) J.R.Roth, et al., Flow Re-attachment and Acceleration by Piezoelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic (EHD) effects, *ALAA paper*, 2003-531 (2003).
- (3) T.C.Corke, et al., Application of weakly ionized plasmas as wing flow-control devices, *ALAA paper*, 2002-0350 (2002).
- (4) T.C.Corke, et al., Separation Control on high angle of attack airfoil using plasma actuator, *ALAA paper*, 2003-1024 (2003).
- (5) T.C.Corke, et al., Separation Control using plasma actuator stationary and oscillating airfoils, *ALAA paper*, 2004-0841 (2004).
- (6) R.Anderson, et al., Preliminary Experiments of Barrier Discharge Plasma Actuators using Dry and Humid Air, *ALAA Paper*, 2006-369 (2006).
- (7) Ogawara, K., et al., Flow Control for Airfoil Wake with Plasma Synthetic Jet Actuator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.69, No.686 (2003), pp.2237 - 2242.
- (8) Ueda, T., Ogawara, K., Numerical 3-D Simulation for Control of Flow around on Airfoil using Plasma Synthetic Jet Actuator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.696 (2004), pp.1943 - 1948.
- (9) Nagata, K., *Electrostatics*, Baihukan, (1987)
- (10) Hayashi, I., *High voltage plasma engineering* (in Japanese), (1996), pp.34 - 35, Maruzen Co. Ltd.
- (11) Ueda, T., Ogawara, K., Numerical Simulation of Flow Induced by Plasma Synthetic Jet Actuator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.700 (2004), pp.3074 - 3081.
- (12) Abe, T., et al., A Parametric Experimental Study for Momentum Transfer by Plasma Actuator, *ALAA Paper*, 2007-187 (2007).
- (13) Ogawara, K., Nakagawa, T., Flow Control Characteristics of Plasma Synthetic Jet Actuator in Channel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineer, Series B*, Vol.72, No.717 (2006), pp.1214 - 1219.