プラズマアクチュエータによる後向きステップ流れの損失低減*

佐野正利^{*1}, 須藤輝美^{*2}, 遠藤慶亮^{*3}, 杉山勇気^{*3}, 鈴木 進^{*4}

Reduction of Pressure Loss in Backward-Facing Step Flow with Plasma Actuator

Masatoshi SANO^{*1}, Terumi SUDO, Kyosuke ENDO,
Yuki SUGIYAMA and Susumu SUZUKI

^{*1} Chiba Institute of Technology, Department of Mechanical Science and Engineering
2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba, 275-0016 Japan

An experimental study is performed for channel flow over a backward-facing step with the dielectric barrier discharge plasma actuator (DBD-PA). The plasma actuator consists of two metallic electrodes mounted on both sides of a dielectric plate. The actuator is installed on the corner edge of the step. The Reynolds number based on the mean velocity at the inlet and the step height ranges from 860 to 3240. The wall static pressure is measured, and the pressure loss coefficient is evaluated. The velocity profiles and turbulent intensities are measured by a PIV system at the Reynolds number of 1080, 1520 and 2170. The results show that the pressure drop at the step decreases by the effect of induced flow with the plasma actuator and the reattachment length is shorter compared with that of the steady flow condition. When the wave form with voltage of 6 kV and frequency of 2 kHz is applied to the electrode, the maximum pressure loss reduction rate of 31% is confirmed in the laminar flow region.

Key Words : Channel Flow, Plasma Actuator, Backward-Facing Step, Pressure Drop, Loss Reduction, PIV

1. 結 言

流体機器や熱交換機などの内部流れでは、はく離と再付着が現れることが多い。はく離の発生は圧力損失の増大や振動・騒音の発生要因となることからその制御が望まれる。はく離・再付着を伴う流れの代表的な例として後向きステップ流れがある。後向きステップ流れは、流路の形状は単純ではあるが、はく離、再循環、再付着などの様々な形態の流れが共存するため流れ場の解明とともに、かかる流れ場を制御するためにこれまで多くの研究がなされている。例えば、能動的制御としてステップ角部後方に設けたスピーカからの擾乱⁽¹⁾、周期的な吹き出し・吸込み⁽²⁾、ステップ下端からの吸込み⁽³⁾などの方法が提案されている。さらに、機器の小型化に伴い低レイノルズ数領域の流れに対して Synthetic jet を適用した場合の結果についても報告されている⁽⁴⁾。受動的制御の例としては、ステップ近傍に円柱を挿入する⁽⁵⁾、ステップと対向する面にスラットを設置する⁽⁶⁾、ステップに傾斜を設ける⁽⁷⁾などの方法が提案されている。

近年、流体制御用のデバイスとして誘電体バリア放電による大気圧非平衡プラズマを用いたプラズマアクチュエータ (DBD-PA) が注目を集めている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。このアクチュエータを用いることにより、壁面近傍に流れを誘起できる⁽¹⁰⁾。また、このアクチュエータの特徴として、構造が簡単、小型化が容易、機械的駆動部を持たない、など

* 原稿受付 2011 年 11 月 18 日

^{*1} 正員, 千葉工業大学工学部 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

^{*2} 正員, 高砂熱学工業(株) (〒101-8321 東京都千代田区神田駿河台 4-2-5)

^{*3} 学生員, 千葉工業大学大学院工学研究科

^{*4} 千葉工業大学工学部

E-mail: sano.masatoshi@it-chiba.ac.jp

があげられる．小方ら⁽¹¹⁾は印加電圧の特性がプラズマアクチュエータの誘起流方向に与える影響を明らかにし，山田ら⁽¹²⁾は円柱表面にプラズマアクチュエータを取り付け，主流に対して順方向と逆方向のジェットを用いた場合の円柱から放出される渦の挙動について検討している．長谷部ら⁽¹³⁾はプラズマアクチュエータを設置した翼周りの流れを数値シミュレーションと風洞実験とから調査し，その効果を検証している．樋口ら⁽¹⁴⁾は壁面せん断応力センサを用い，乱流境界層内の壁面せん断応力に及ぼす影響について報告している．松田ら⁽¹⁵⁾は，主流速度が30～50m/s と比較的速い流速のもとで後向きステップ流れにプラズマアクチュエータを使用し，このアクチュエータが高レイノルズ数領域においても再付着長さの短縮に有効となることを示している．しかしながら，松田らの研究では圧力損失の低減効果については報告されていない．

本論文では，最初に実験で使用するプラズマアクチュエータの誘起流特性や消費電力の測定結果について述べる．ついで，このアクチュエータを後向きステップのあるチャネル流れに適用し，拡大部で発生する圧力損失の低減効果を調査した結果について報告する．また，代表的なレイノルズ数については，粒子画像流速測定法 (PIV) を用いて速度場を測定し，アクチュエータの駆動による流れ場の変化と損失低減との関係について検討する．

2. 実験装置および方法

本実験で使用するプラズマアクチュエータの構造を図1に示す．このアクチュエータは，互いに位置をずらした電極で誘電体を挟むという非常に簡単な構造をしている．この電極間に高電圧を印加することにより誘電体バリア放電が生じ，高電圧電極から接地電極へ外力が生じて流れが誘起される．Roth ら⁽¹⁶⁾は，誘起速度が電極幅や誘電体の厚さに依存することを確認しているが，本研究では既報の実験結果⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾をもとに，誘電体としては幅250mm，長さ20mm，厚さ1mmの石英ガラス，電極としては長さ10mm，厚さ0.09mmの銅テープを用いている．なお，電極はアクチュエータ近傍への放電を防ぐために石英端から10mm離し，下側の電極（接地電極）は厚さ0.06mmのポリミドテープにより被覆されている．入力波形に関しては正弦波，矩形波，三角波について検討したが，ここでは本装置において最も大きな誘起速度が得られた正弦波としている．

図2は計測装置の概要を示している．プラズマアクチュエータは信号発生器 (IWATSU 製：SG-4150)を用いて印加電圧，周波数，波形を設定し，電力増幅器 (松定プレジジョン製：HEOPT-20B10) によって電圧を増幅し，この高電圧を電極間に印加することによって駆動される．なお，本実験では，アクチュエータへの印加電圧はオシロスコープ (Tektronix 製：TDS2000B) と高電圧プローブ (Tektronix 製：P6015A) を用いて測定し，電流は接地電極と接地部との間に抵抗を接続することによって測定している．消費電力の測定には V-Q リサーチ法を用いる⁽¹⁰⁾⁽¹⁹⁾．V-Q リサーチ法では，図3に示すように横軸に印加電圧 V ，縦軸に電荷量 Q をとり，1周期における電圧と電荷によりできる面積を求め，その面積に周波数 f を乗ずることにより消費電力を求めることができる．なお，図中の V_e は印加電圧の実効値 (rms 値)を示している．

図4に誘起速度の測定方法を示す．誘起流に関しては，静止大気中で絶縁性の高いポリミドの管 (古河電工製：外径0.72mm，内径0.6mm) を用いて製作したピトー管を誘電体先端から5mm下流の位置に誘電体と平行に設置し，垂直方向 (y 方向) に移動して速度分布を測定する．また，誘電体表面より0.6mm上方位置 ($y=0.6\text{mm}$) においてピトー管をスパン方向に移動し，誘起流の二次性について調査する．

Fig.1 Schematic view of dielectric barrier discharge device

Fig.2 Schematic diagram of instrument system

Fig.3 Typical voltage-charge V-Q characteristics

Fig.4 Experimental setup for induced flow velocity

図5に本研究で制御対象とする後向きステップ流れの概要とプラズマアクチュエータの設置位置を示す。アクチュエータはステップ角部に設置される。流路はアクリル板からなりステップ上流の流路高さは6mm、ステップ高さ H も同じく6mmであり、流路拡大比は2.0である。座標はステップからの流れ方向距離を X 、ステップ下端からの垂直方向距離を Y とする。なお、流路入口からステップ部までの長さは3000mm、ステップ後方の長さは1000mmであり、ステップに至る流れは十分に発達している。また、流路幅は250mmとなっているためにステップ高さに比較して流路幅は十分大きく、流れ場は二次元とみなすことができる。実験は式(1)で定義される Re を860～3240の範囲で変化させて行われる。

$$Re = U_b H / \nu \quad (U_b: \text{ステップ上流での断面平均速度}, \nu: \text{動粘度}) \quad (1)$$

壁面静圧は流路のスパン方向中央位置に直径0.5mmの静圧孔を流路下側壁面（ステップ側壁面）、流路上側壁面（ステップと対向する壁面）にステップ近傍には3mm間隔で設け、微差圧力計(GE Druck製：LP9481)を用いて測定する。なお、壁面静圧は式(2)で定義される壁面静圧係数 C_p により整理している。

$$C_p = \frac{p - p_0}{\rho U_b^2 / 2} \quad (2)$$

ここで、 p は壁面静圧、 p_0 は基準静圧であり $X = -400\text{mm}$ の位置における壁面静圧、 ρ は密度である。なお、 $X = -1100, -700, 60, 700\text{mm}$ の位置にはスパン方向の左右50mm離れた位置に静圧孔を配置し、壁面静圧分布に良好な二次元性が確保されていることを確認している。

流路拡大部における圧力損失係数 ζ は、損失がないとして求められる圧力回復と、図6に示すように実験により得られる圧力回復係数 ΔC_p との差を取ることで求められている。すなわち、 ζ は次式から計算される。

$$\zeta = \frac{\Delta p_l}{\rho U_b^2 / 2} = \left[1 - \left(\frac{H}{2H} \right)^2 \right] - \Delta C_p \quad (3)$$

Fig.5 Schematic diagram of test section

Fig.6 Evaluation method of pressure loss coefficient

ここで、 Δp_i は拡大部での圧力損失を示している。また、式(3)における右辺の第1項は損失がない場合の圧力回復を、第2項は実験的に得られる圧力回復を示している。

ステップ近傍の速度場の計測には PIV (TSI 社製) システムを用いる。PIV による測定にあたっては、光源として 120mJ/Pulse の出力を持つダブルパルス Nd : YAG レーザ (New Wave 製 : DPIV-N120) を使用し、流れに混入するトレーサ粒子は、煙発生装置 (KANOMAX 製 : MODEL 8304) により生成する。可視化画像は瞬間画像を 1000 フレーム取得し、FFT 相互相関法によって解析する。なお、本研究で用いた PIV の計測手法の詳細は既報⁽²⁰⁾に述べられている。

3. 実験結果および考察

3・1 プラズマアクチュエータの特性

図7にプラズマアクチュエータの電極に交流電圧を印加した際の電圧と電流の波形の一例を示す。電圧は入力した波形(正弦波)と同一の波形を示しているが、電流は従来の結果^{(21) (22)}と同様に電圧波形から 45°位相がずれた正弦波とバリア放電によるパルス状の放電電流が周期的に発生していることが確認できる。

図8に実効電圧 V_e を 5, 6, 7kV、周波数 f を 1, 2kHz と変化させ、誘電体の先端から 5mm 下流位置において測定された誘起流の速度分布を示す。実効電圧および周波数が高くなるにつれて誘起流速は速くなる。しかしながら、誘起速度が最も大きくなる位置は、実効電圧、周波数の相違にかかわらず誘電体表面よりわずかに上側 ($y=0.6\text{mm}$) であって、この位置には変化が見られない。そこで、 $y=0.6\text{mm}$ において得られる速度を最大誘起速度 $U_{\max}$ として、 $U_{\max}$ を周波数に対して整理した結果を図9に示す。 V_e は 4, 5, 6kV と3種類変化させているが、いずれの実効電圧に対しても最大誘起速度は周波数のほぼ 0.5 乗に比例して増加している。図10にはピトー管の垂直方向位置は $y=0.6\text{mm}$ に固定し、誘電体のスパン方向の中心位置を $z=0$ として、ピトー管をスパン方向に移動して測定された速度分布を示す。本測定範囲 ($-100\text{mm} \leq z \leq 100\text{mm}$) では、誘起流の二次元性は良好となっていることが確認できる。

Fig.7 Typical discharge current and voltage waveforms versus time

Fig.8 Induced velocity profile

Fig.9 Maximum induced velocity

図 11 に V-Q リサーチ法を用いて得られた電極幅 1m あたりの消費電力 P の測定結果を示す。この測定では、実効電圧が $V_e=4, 5, 6\text{kV}$ のもとで、周波数を $f=0.3\text{kHz}\sim 3\text{kHz}$ の範囲で変化させている。消費電力は実効電圧が高くなるにつれて増加する。また、実効電圧が一定の場合には周波数にほぼ比例して増加する。この傾向は Forte ら⁽²³⁾によって得られた結果と一致する。なお、本実験で使用している電極幅は 230mm であるため、実際の消費電力は $V_e=6\text{kV}$, $f=2\text{kHz}$ の条件では 10.5W となる。

Fig.10 Induced velocity profile

Fig.11 Electrical power consumption

3・2 後向きステップ流れの圧力特性

図 12 にアクチュエータを駆動していない場合とアクチュエータを $V_e=6\text{kV}$, $f=2\text{kHz}$ の条件で駆動した場合において得られた流路下側（ステップ側壁面）、および流路上側（ステップと対向する壁面）の壁面静圧係数 C_p の流れ方向分布を $Re=1080, 1520, 2170$ の場合を代表例として示す。なお、ステップ上流における流路の水力直径を代表寸法としたレイノルズ数は、 $Re=1080$ では 2110, $Re=1520$ では 2960, $Re=2170$ では 4230 となる。したがって、ステップに至る流れは $Re=1080$ では層流域, $Re=1520$ では遷移域, $Re=2170$ では乱流域にあるとみなすことができる。

$Re=1080$ の結果では、アクチュエータを駆動していない場合の下側壁面での C_p は $X/H=12$ 程度まで一定値に近く、その下流で急激な増加が認められる。上側壁面では、下側壁面に比較して圧力増加の現れる位置が上流側に移動するが、 $X/H=15$ 付近からは下側壁面での C_p 分布とほぼ一致する。一方、アクチュエータを駆動した場合には、 C_p 分布に増加が現れ始める位置がステップ側に移動する。また、下側壁面と上側壁面とで C_p 分布に顕著な差が見られ、下側壁面の C_p 分布には $X/H=6$ 付近に極大値が、 $X/H=8$ 付近に極小値が現れている。アクチュエータを駆動することによりステップ近傍の流れが大きく変化していることが示唆される。また、ステップ後方の C_p が直線的に降下している領域での C_p の値は、アクチュエータを駆動していない場合に比較して大きくなっており、アクチュエータの駆動により高い圧力回復が得られていることがわかる。 $Re=1520$ の結果では、アクチュエータを駆動していない場合の下側壁面で C_p が急激に増加を開始する位置は $X/H=7$ 付近にあるが、アクチュエータを駆動することにより $X/H=4$ 程度まで上流側に移動し、かつ $Re=1080$ ほど顕著ではものの C_p 分布にわずかな極大と極小の存在を認めることができる。 $Re=2170$ の結果では、アクチュエータを駆動しても下側壁面と上側壁面と

Fig.12 Wall static pressure coefficient

の分布形状の相違はあまり見られず、 $X/H=7$ 付近から流路下側と流路上側の C_p 分布は一致する．一般的傾向として、 Re が高くなるにつれて下側壁面と上側壁面とで測定された C_p 分布の差は小さくなり、かつアクチュエータ駆動の有無による分布形状の変化も小さくなる．しかしながら、いずれの Re においてもステップから離れた領域での C_p 値は、アクチュエータを駆動していない場合に比較して高くなっており、このアクチュエータが流路の拡大に伴う圧力損失の低減に有効となることを示している．

図 13 にアクチュエータを駆動していない場合と駆動した場合の流路拡大部における圧力損失係数 ζ を Re に対してプロットした結果を示す．アクチュエータの駆動の有無にかかわらず Re が増加するにつれて圧力損失係数は増加するが、その増加傾向は Re の低い領域では急激で、高い領域では緩やかとなる． $V_e=5\text{kV}$, $f=2\text{kHz}$ の条件では、低 Re 領域でわずかな圧力損失係数の減少しか認められない．しかしながら、 $V_e=6\text{kV}$, $f=2\text{kHz}$ の条件では明らかな圧力損失係数の減少を確認できる．図 14 には、圧力損失の低減効果を定量的に評価するため、式(4)で定義される圧力損失係数の低減率 DR を Re に対してプロットした結果を示す．

$$DR = \frac{\zeta_{off} - \zeta_{on}}{\zeta_{off}} \times 100 \quad (\zeta_{off} : \text{アクチュエータ駆動なし}, \zeta_{on} : \text{アクチュエータ駆動あり}) \quad (4)$$

図 14 より Re の低い層流域において圧力損失係数の低減率は大きくなり、流路の拡大に伴う圧力損失を大幅に低減できることがわかる．特に $V_e=6\text{kV}$, $f=2\text{kHz}$ の条件では、最大で 31% の圧力損失の低減が可能となる．また、本実験で最も Re が大きい $Re=3240$ においても 9% の低減が得られる．本研究で用いたアクチュエータは、ステップに至る流れが乱流の場合であっても圧力損失の低減に有効となる．

そこで、次節においてアクチュエータを $V_e=6\text{kV}$, $f=2\text{kHz}$ の条件のもとで駆動した場合の速度場の測定結果について述べる．

Fig.13 Pressure loss coefficient

Fig.14 Pressure loss reduction rate

3・3 後向きステップ流れの流動特性

図 15 に $Re=1080$ のもとで測定された流れ方向速度 U と垂直方向速度 V を U_b で無次元化して等値線として示す．なお、(a)は流れ方向速度、(b)は垂直方向速度の測定結果である．アクチュエータを駆動していない場合の再付着点位置は $X/H=13$ 付近にあり、その位置より上流側には広い範囲にわたる再循環領域が存在している．一方、アクチュエータを駆動した場合には、流路の上壁面側に $X/H=6$ 付近を中心とした逆流域があるが、下壁面側にはステップ角部付近からステップ壁面に向かう高速な下向きの流れが存在している．これは、アクチュエータの駆動によって発生した誘起流によりコアンダ効果が生じたものと考えられる．この効果により、再付着点位置は $X/H=3$ 程度まで上流側に移動し、ステップ側の再循環領域は非常に狭い範囲に縮小される．再循環領域の縮小は、後向きステップにおいて発生する急拡大損失の低減に寄与しているものと考えられる．また、図 12 に示した流路下側壁面の C_p 分布には、 $X/H=6$ 付近に極大値が、 $X/H=8$ 付近に極小値が見られたが、極大値はステップ角部付近からの高速流体が下側壁面に到達する位置付近に、極小値は正の垂直方向速度が大きく、流路のステップ壁面側から中心側に向かう流体運動が顕著となる位置付近に現れている．

図 16 には $Re=1520$ の条件で得られた測定結果を示す．この条件では、アクチュエータを駆動していない場合の再付着点位置は $X/H=8$ 付近にあるが、アクチュエータを駆動した場合の再付着点位置は $X/H=4$ 付近まで減少す

る. また, $Re=1080$ で観察されたほど顕著ではないが, ステップ上流の高速流が湾曲しながら流路下壁面側に向かって流れている様子を見ることができる. また, ステップ後方には $X/H=2$, $Y/H=0.3$ 付近を中心とする流路の中央に向かう流れが存在する.

Fig.15 Contours of streamwise and wall-normal velocities for $Re=1080$

Fig.16 Contours of streamwise and wall-normal velocities for $Re=1520$

図 17 に示した $Re=2170$ の測定結果では、ステップに至る流れが乱流となるためにステップ上流部での速度分布は平坦なものとなり、 U_b で無次元化したステップ上流の流路中央部での等値線の値は他の Re に比較して小さくなる。アクチュエータを駆動していない場合の再付着点位置は $X/H=7$ 付近であり、アクチュエータを駆動した場合の再付着点位置は $X/H=5.5$ 程度である。 $Re=1080, 1520$ に比較するとその効果は小さいが、流れが乱流になった場合においてもこのアクチュエータが再循環領域の縮小に寄与していることがわかる。

図 18 に代表的な位置における流れ方向速度 U 、ならびに垂直方向速度 V を U_b で無次元化した速度分布を示す。なお、図中の実線はアクチュエータを駆動していない場合の結果である。 $Re=1080$ における流れ方向の速度分布からは、アクチュエータの駆動より電極付近の壁面近傍の流れが加速されている様子を見ることができる。 $X/H=1$ より下流の位置では、 U の分布に最大値が現れる位置がステップ壁面側に移動している。垂直方向の速度に関しては、 $X/H=-2$ の位置においてアクチュエータの駆動による吸込み流の存在⁽²⁴⁾によって負の値となる。ステップの下流では下側壁面に向かう流れが見られ、特に $X/H=2, 3$ の位置には非常に強い下向きの流れが認められる。 $Re=1520$ における流れ方向の速度分布からは、アクチュエータを駆動させることにより、ステップ近傍の $Y/H=1$ 付近での流れ方向速度の増速が見られる。垂直方向速度に関しては、 $X/H=4$ での負の値が大きいが、この位置ははく離した流れが再付着する位置にほぼ対応している。また、アクチュエータを駆動していない場合には、 $X/H=9$ の位置における負の値が最も大きい。アクチュエータを駆動した場合にはこの位置での垂直方向速度成分はほぼ零となる。 $Re=2170$ の流れ方向の速度分布においては、ステップ上流ではアクチュエータを駆動させても、 $Re=1080, 1520$ で見られたほどの変化は確認できない。しかし、ステップ近傍の $X/H=1, 2$ の位置では、はく離せん断層が流路下側へ移動している様子が確認できる。なお、垂直方向の速度分布に関しては、ステップ上流では流れ方向速度の場合と同様にアクチュエータ駆動による変化はほとんど観察されない。また、 $X/H=2, 4$ の位置で、わずかに負の値が大きくなる程度である。また、 $Re=1080, 1520$ の結果に比較して垂直方向速度がかなり小さく、 $X/H=8$ の位置においては、アクチュエータの駆動の有無による差はほとんど認められなくなる。

Fig.17 Contours of streamwise and wall-normal velocities for $Re=2170$

図 19 にステップに至る流れが乱流となっている $Re=2170$ での代表的な位置における流れ方向の乱れの実効値 u_{rms} , ならびに垂直方向の乱れの実効値 v_{rms} を U_b で無次元化した乱流強度分布を示す. なお, 図中の実線はアクチュエータを駆動していない場合の結果である. (a)に示した流れ方向乱流強度分布からは, アクチュエータの駆動により $X/H=0, 1, 4$ の位置での極大値の現れる位置が流路の下壁面側に移動していることが確認できる. これは, 速度分布に見られた せん断層の流路下側への移動に対応している. また, 流れ方向, 垂直方向ともに $X/H=1, 2$ の位置におけるステップ側の乱流強度は, アクチュエータを駆動していない場合に比較して大きくなっている. 乱れの増大は, 流路中心側の大きな運動量をもつ流体と再循環領域の流体の混合を促進することになり⁽²⁵⁾, このことがアクチュエータの駆動により再付着点位置が上流側に移動することに関係していると考えられる.

Fig.18 Velocity profiles

 Fig.19 Turbulence intensity profiles for $Re=2170$

4. 結 言

本論文では最初に、使用したプラズマアクチュエータの基本特性を明らかにした後、このアクチュエータを後向きステップ流れに適用した場合の有効性について検証した。ついで、代表的な Re については、PIV を使用して流動特性を調査した。本研究によって得られた主要な結論を要約して以下に示す。

- (1) 誘起速度に最大値が現れる位置は、アクチュエータの駆動条件の相違にかかわらず誘電体表面よりわずかに上側となる。また、いずれの実効電圧においても最大誘起速度は周波数のほぼ 0.5 乗に比例して増加し、消費電力は周波数にほぼ比例して増加する。
- (2) アクチュエータの駆動により、ステップに至る流れが層流、乱流の場合ともに流路の拡大にともなう圧力損失を低減できる。 Re の低い領域では、最大で 31% の圧力損失の低減効果が得られる。
- (3) アクチュエータの駆動により再付着長さを短くできる。特に、層流域の流れに対しては、ステップ角部付近からの高速流体が壁面方向に向かう流れが強くなり、再付着点位置はステップ側に移動する。
- (4) アクチュエータを乱流域の流れに適用した場合には、ステップ直後におけるステップ側の乱流強度が増加する。このことは、再付着長さの縮小に寄与する。

文 献

- (1) Chun, S., Lee, I. and Sung, H. J., "Effect of spanwise-varying local forcing on turbulent separated flow over a backward-facing step flow", *Experiments in Fluids*, Vol. 26 (1999), pp.437-440.
- (2) Yoshioka, S., Obi, S. and Masuda, S., "Organized vortex motion in periodically perturbed turbulent separated flow over a backward-facing step flow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 22 (2001), pp.301-307.
- (3) 佐野正利, 鈴木一平, 櫻庭健一郎, "吸込みによる後向きステップを有するチャネル乱流の制御", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol. 74, No. 744 (2008), pp.1762-1769.
- (4) 山田俊輔, 本阿弥眞二, 岡本圭太, 新田貴志, 元祐昌廣, 石川仁, "低レイノルズ数域における後方ステップ流れの制御に関する研究(安定性解析を利用した Synthetic jet による再付着流れの制御)", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol. 77, No. 775 (2011), pp.680-688.
- (5) 鈴木 洋, 鈴木健二郎, 喜多茂雄, 中前隆行, "後向きステップ流の熱伝達不領域における伝熱促進(上端角近傍に円柱を挿入した場合)", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol.57, No.536 (1991), pp.1410-1415.
- (6) 親川兼勇, 齊藤武史, 照屋 功, 馬淵幾夫, "スラットを用いた後向きステップ下流の再付着領域の熱伝達促進", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol. 61, No.592 (1995), pp.4426-4431.
- (7) 佐野正利, 鈴木一平, "傾斜した後向きステップを有するチャネル乱流に関する研究", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol. 75, No.755 (2009), pp.1395-1401.
- (8) Corke, T. C., Enloe, C. L. and Wilkinson, S. P., "Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42 (2010), pp.505-529.
- (9) 深淵康二, 山田俊輔, 石川 仁, "プラズマアクチュエータの基礎と研究動向", *ながれ*, Vol. 29 (2010), pp.243-250.
- (10) Moreau, E., "Airflow control by non-thermal plasma actuators", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40 (2007), pp.605-636.
- (11) 小方 聡, 射越 悠, 瀬川武彦, "プラズマアクチュエータによる誘起流制御に関する研究(印加電圧特性が誘起流方向に及ぼす影響)", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol.77, No.775 (2011), pp.672-679.
- (12) 山田俊輔, 柴田浩意, 石川 仁, 瀬川武彦, "プラズマアクチュエータによる円柱流れの制御に関する研究(第1報, 後流における時間平均特性)", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol. 76, No. 772 (2010), pp.2011-2017.
- (13) 長谷部仁美, 中 吉嗣, 深淵康二, "プラズマアクチュエータを用いた翼端渦抑制の試み", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol. 77, No. 775 (2011), pp.659-671.
- (14) 樋口丈浩, 小河原加久治, 望月信介, "プラズマシンセティックジェットアクチュエータの平面せん断層における壁面せん断応力の直接計測", 日本機械学会論文編集 B 編, Vol. 77, No. 777 (2011), pp.1239-1248.
- (15) 松田 寿, 田中元史, 五嶋祥平, 大久保辰郎, 跡部 隆, 小林 宙, "プラズマアクチュエータを用いた後向きステップ流れの制御に関する実験的研究", *ながれ*, Vol. 29 (2010), pp.411-416.

- (16) Roth, J. R. and Dai, X., "Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device", *AIAA* 2006-1203 (2006), pp.1-28.
 - (17) 佐野正利, 須藤輝美, 鈴木 進, "プラズマアクチュエータによるチャネル流れの抵抗低減", 日本機械学会講演論文集, No. 098-3 (2009), pp.63-64.
 - (18) 遠藤慶亮, 須藤輝美, 鈴木 進, 佐野正利, "プラズマアクチュエータの基本特性とチャネル流れへの応用", 日本機械学会講演論文集, No.100-3 (2010), pp.38-39.
 - (19) 日本学術振興会プラズマ材料科学第 153 委員会編, "大気圧プラズマ 基礎と応用", (2009), pp.126-127, オーム社.
 - (20) 櫻庭健一郎, 遠藤大樹, 佐野正利, "後向きステップを有するチャネル乱流の受動的制御 (流動特性)", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 70, No. 699 (2004), pp.2805-2812.
 - (21) Moreau, E., Louste, C. and Touchard, G., "Electric wind induced by sliding discharge in air at atmospheric pressure", *Journal of Electrostatics*, Vol. 66 (2008), pp.107-114.
 - (22) 伊藤 悟, 大河内翔平, 鈴木雄二, 笠木伸英, "流体制御に用いるマイクロ・プラズマアクチュエータの変換効率に関する研究", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 768 (2010), pp.1914-1916.
 - (23) Forte, M., Jolibois, J., Pons, J., Moreau, E., Touchard, G. and Cazalens, M., "Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity : application to airflow control", *Experimental Fluids*, Vol. 43 (2007), pp. 917-928.
 - (24) 大河内翔平, 笠木伸英, 鈴木雄二, "マイクロ・プラズマアクチュエータの特性", *ながれ*, Vol. 29 (2010), pp.271-276.
 - (25) 瓜田 明, 田中周治, "周期変動噴流を用いた後方ステップ流れの能動的制御 (第 1 報, 噴流条件の影響とはく離流れ場の構造)", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 75, No. 749 (2009), pp.19-27.
-