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*

(第二報：後流構造の流れの可視化)

山田俊輔^{*1}, 石川仁^{*2}, 瀬川武彦^{*3}

Study of a Circular Cylinder Flow Using Plasma Actuators (2ed Report: Flow Visualization of Wake Structure)

Shunsuke YAMADA^{*1}, Hitoshi ISHIKAWA and Takehiko SEGAWA

^{*1} National Defense Academy, Dept. of Mechanical Engineering
1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa, 239-8686 Japan

The aim of this study is to investigate on the flow behavior in the wake behind a circular cylinder by induced jet using dielectric barrier discharge (DBD) plasma. The plasma was created using a wave form with bipolar voltage of 4 kV_{pp} and frequency of 10 kHz, and the plasma actuators were mounted on the circular cylinder. The forward and backward jets for the main flow direction were induced by electrode arrangements of the plasma actuators. The flow field was visualized using a high-speed video camera, and the streamwise and vertical velocities were calculated by dynamics PIV method at Reynolds number of 1.0×10^3 . We discussed that the vortex motion around the cylinder, Reynolds stress profiles and the half width of wakes by the forward and backward jets. Also, the characteristic frequency of vortex shedding was confirmed from the continuous photographs.

Key Words : Circular Cylinder, Wake, Plasma Actuator, Flow Control, Flow Visualization

1. 緒 言

一般に、低レイノルズ数域の物体周りの流れは、はく離が起りやすいことが知られている。近年の技術革新により小型流体機械の開発が進み、流れ場は低レイノルズ数となり、流れを制御することは工学的に重要な課題と考えられる。機器の小型化に伴い、制御デバイスの小型化が必要となることから、構造が複雑で機械的な駆動部を有するデバイスよりも、簡易的であることが望まれる。そこで、プラズマアクチュエータが注目されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。プラズマアクチュエータは誘電体フィルムの上、及び下面に互い違いに配置した電極で構成され、電極に高周波・高電圧を入力すると電極付近で誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge)により非平衡プラズマが発生する。このプラズマに起因し、壁近傍にジェットが誘起される。プラズマアクチュエータはフィルム状のデバイスであることから、曲面への設置が容易など、多くの利点が挙げられる。

円柱流れにおけるプラズマアクチュエータに関する研究として、Thomas ら⁽⁴⁾は、円柱のはく離点付近、そしてはく離点より下流部にプラズマアクチュエータを設置し、プラズマアクチュエータを異なる駆動方法で制御した。1) 円柱に設置した上部、及び下部の電極から同時に定常に吹き出す Steady jet, 2) パルス変調制御により周期的に上部、及び下部の電極から同時に吹き出す Symmetric unsteady, 3) パルス変調制御により周期的に吹き出す上部、及び下部の電極からの吹き出し位相差を π で制御した Asymmetric unsteady によるジェットの3通りで行った。Symmetric unsteady, Asymmetric unsteady のジェットでは同様な効果があり、Unsteady な駆動方法により、乱れ強さはジェット無しに対し、66%減少することがわかった。また、Steady の場合、乱れ強さを 80%減少させた。

* 原稿受付 2011 年 8 月 31 日

^{*1} 正員, 防衛大学校システム工学群機械工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)^{*2} 正員, 東京理科大学 工学部^{*3} 正員, (独)産業技術総合研究所

E-mail: yamadas@nda.ac.jp

そして、Steady の場合、空力騒音の制御に有効である可能性を示した。Rizzetta らは⁽⁵⁾、低圧タービンの翼表面に、順流、及び逆流に周期的にジェットを誘起するプラズマアクチュエータを設置し、翼周りの流れの数値計算を行った。その結果、逆流に周期的に吹き出した場合、翼壁面近傍に小規模な渦が周期的に形成されるものの、翼後流で形成される大規模渦が抑制され、ジェット無しに対し全圧損失係数を 50% 改善させた。これは周期的に壁面近傍に誘起される小規模な渦による混合促進効果と考えられる。

本研究では、圧損が生じ、はく離を伴う物体のモデルとして円柱を採用した。これまでの流れ方向に吹き出すプラズマアクチュエータでは、高周波・高電圧電源が必要となる。そこで、従来よりも入力電圧・周波数を抑え、誘起されるジェットを工夫したプラズマアクチュエータを検討し、誘起されたジェットが円柱後流に与える効果を解析する。Rizzetta らの報告のように、後流の混合促進効果が期待できる逆流で吹き出すプラズマアクチュエータに着目した。前報において、円柱表面にプラズマアクチュエータを設置し、熱線流速計を用いて、円柱後流の流れの挙動を解析した⁽⁶⁾。その結果、流れ方向へ吹き出す Forward jet では、後流幅を狭める効果があり、また主流と逆向きに吹き出す Backward jet では、後流幅を広げる効果があることがわかった。そこで本論文では、Forward jet、及び Backward jet により変化した後流構造を流れの可視化から解析し、後流幅の増減の流れのメカニズムを説明することを目的とする。

2. おもな記号

$b_{1/2}$	:	円柱後流の半値半幅 [mm]
d	:	円柱直径 [mm]
F	:	Wavelet 解析より得られる疑似周波数 [Hz]
Re	:	円柱直径、及び主流速度を代表値としたレイノルズ数
S	:	流れの可視化の流跡線から見られる鞍部点の位置
t	:	任意の位置で巻き上がる、または通過する渦を原点時刻とした経過時間 [sec]
t_1	:	Wavelet 解析による時間 [sec]
t_2	:	Wavelet 解析による円柱直径、主流速度を代表値とした無次元時間 $t_2 = (t_1 \times U_\infty)/d$
t_3	:	Wavelet 解析による後流の半値半幅、速度を代表値とした無次元時間 $t_3 = (t_1 \times U_b)/b_{1/2}$
u	:	流れ方向の速度 [m/s]
U_∞	:	主流速度 [m/s]
U_b	:	後流の半値半幅をとる位置における速度 [m/s]
$-\overline{u'v'}$	:	時間平均レイノルズ応力 [m^2/s^2]
v	:	高さ方向の速度 [m/s]
x	:	流れ方向の座標 [mm]
y	:	高さ方向の座標 [mm]
z	:	スパン方向の座標 [mm]

3. 実験装置及び方法

3・1 実験装置

図 1 に使用した風洞を示す。実験には三次元縮流洞を持ち出口寸法が $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の吹き出し型風洞を使用した。円柱中心を座標原点とし、主流方向を x 軸、高さ方向を y 軸、円柱スパン方向を z 軸とした。

図 2 に、実験に用いた円柱、及び表面に設置した電極の概略図を示す。円柱直径 d が 10 mm、スパン方向長さが 100 mm のアクリル円筒を使用し、縮流洞出口より 25 mm 下流に設置した。外部の周囲流体からの流入や二次元性を確保するために端板を設置した。プラズマを発生させる電極は、厚さ 75 μm の誘電体(ポリミドフィルム)の両側を厚さ 70 μm の銅箔で挟んだ構造である。電極の配置を変えることにより、主流方向に吹き出すジェットを Forward jet、主流に対して逆向きに吹き出すジェットを Backward jet と呼ぶ。また、電極には 4 kVpp の Bipolar 電圧、10 kHz の周波数の疑似矩形波を入力し⁽⁶⁾、DBD プラズマを発生させ、壁面近傍に連続的なジェットを誘起

した．誘起されるジェットが円柱表面を通過する流速はおよそ 0.6 m/s である⁽⁶⁾．主流流速 1.5 m/s を，円柱直径を代表値としたレイノルズ数 $Re=1.0 \times 10^3$ で実験を行った．

3・2 円柱後流の流れの可視化

円柱後流の可視化には，レーザ光を円柱下部から照射し(図 1 参照)，霧状のトレーサを使用した．そして，ハイスピードカメラ(カトウ光研社製, HAS-500)を使用し， xy 断面における円柱後流の撮影を行った．カメラの設定は，フレームレート 1000 fps ，露光時間 1 msec で， 2 sec 間撮影した．また円柱背後のはく離領域では，熱線流速計による計測精度が十分でないことから，連続光レーザ及びハイスピードカメラ(nac 社製, MEMRECAM GX-1)による撮影画像からダイナミック PIV 解析を行った．カメラの設定は，フレームレート 4000 fps ，露光時間 $50 \mu\text{sec}$ で， 4 sec 間撮影した．

3・3 Wavelet 解析及び PIV 解析

前報で計測した時系列速度データから時間と共に変化する周期的な挙動を調査するために 1 次元連続 Wavelet 解析を行った．解析ソフトには，Matlab を使用した．Wavelet 解析に用いた窓関数は，山田ら⁽⁷⁾が後方ステップ流

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Schematic diagram of plasma actuators

れの周期的な挙動の調査に用いた Morlet 関数とした. Wavelet 解析から得られるスケールファクターを Sine 波に換算した疑似周波数として算出した.

ダイナミック PIV 解析では, 648×1024 ピクセルの画像を撮影し, 円柱表面のはく離点近傍から逆流域の挙動を解析した. そして, 16×16 ピクセルの検査領域を取り, 検査領域と格子間隔は, 50 % オーバーラップするように設定した. 画像から流れ方向, 及び高さ方向の速度ベクトルの算出には, 直接相互相関法を用いた. 算出した流れ方向, 及び高さ方向速度から時間平均速度, レイノルズ応力, 後流の半値半幅を算出した.

4. 実験結果及び考察

4・1 流れの可視化

図 3 から図 5 にジェット無し(Without jet), Forward jet そして Backward jet の撮影画像を示す. 各図の(a)には, $x/d=0-2.0$ における円柱上部で渦が巻き上がり始める時刻を原点とし, 0.01 sec 毎の渦の挙動を示す. また, 各図の(b)には, $x/d=0-1.0$ のはく離点近傍の流れの挙動を示す. ジェット無しの図 3(a)の場合, $x/d=2.0$ 付近では円柱の

(a) Continuous photographs in the x/d range of 0.0 to 3.0

(b) Instantaneous photograph in the x/d range of 0 to 1.0

Fig. 3 Flow visualization without jet

上部から、 $x/d=3.0$ では下部に渦を確認できる。時間と共にそれぞれの渦が交互に形成され、下流へ進行する様子がわかる。これはカルマン渦列と考えられる。そして、図 3(b)では、円柱の前方よみ点から半時計周りに、およそ 90° 付近で流れははく離することがわかる。Forward jet の図 4(a)の $t=0.00$ sec では、 $x/d=1.5$ 付近から円柱の上部で渦が巻き上がり、 $t=0.01$ sec 後では、円柱上部から巻き上がる渦が成長していくことがわかる。また、 $t=0.02$ sec 後からは、円柱の下部で渦の巻き上がり、その後の成長が確認できる。ジェット無しと比較し、渦の巻き上がりの位置は Forward jet の方が上流側で巻き上がることがわかる。そして、渦が成長していく際の渦スケールは小さくなっていることから、放出される渦放出周波数の増加及び後流幅の減少が考えられる。 $x/d=0.0-1.0$ における図 4(b)では、およそ 120° 付近で流れははく離し、ジェット無しの図 3(b)のはく離点の位置と比較すると、はく離点の角度は円柱後方へと移動する。これは Forward jet により円柱壁面近傍の流れの運動量が増加し、はく離が遅らされたものと考えられる⁽⁸⁾。Backward jet の図 5(a)では、 $x/d=1.0$ 付近に円柱背後に回り込む大規模な渦が観察でき、そして図 5(b)では、はく離点付近から小規模な渦放出が確認できる。はく離点は上流の前方よみ点側へ移動することから、Backward jet によりはく離が促進され、逆向きのプラズマジェットによりはく離点近傍のせん断が

 (a) Continuous photographs in the x/d range of 0.0 to 3.0

 (b) Instantaneous photograph in the x/d range of 0 to 1.0

Fig. 4 Flow visualization with forward jet

強くなり、小規模な渦が形成されたと考えられる。

図 3(a)から図 5(a)に、連続画像におけるトレーサ粒子の流跡線から定性的に判断可能な円柱上部、及び下部で形成される鞍部点 S を示す。図 3(a)のジェット無しでは、カルマン渦列により $x/d=2.5$ 付近において $t=0.00$ sec では円柱の上部、 $t=0.02$ sec 後では、円柱の下部に S が現れる。その高さ方向のスケールは、およそ $y/d=\pm 0.7$ 付近となる。図 4(a)の Forward jet の $t=0.00, 0.01$ sec では、 $x/d=2.0$ 付近、 $y/d=\pm 0.5$ 付近に S が現れる。図 5(a)の Backward jet の $t=0.00$ sec から 0.03 sec 間では、最も上流側に移動した場合は $x/d=1.5$ 付近に、円柱外縁方向では $y/d=\pm 0.8$ 付近に S が現れる。

図 6、及び図 7 に Backward jet における $x/d=1.0, 0.1$ を通過する渦の時刻を原点とし、時間と共に移動する渦の挙動を示す。図 6、及び図 7 では、渦が $x/d=1.0, 0.1$ を通過してから、次の渦が通過するまでの通過時間を算出し、20 個の渦が通過した通過平均時間を算出した。図 6 の $t=0.014$ sec 後では、円柱下部から形成された大規模な渦が下流へ移動し、 $t=0.028$ sec で新たに円柱近傍から渦が形成される。そして、新たに形成された渦は下流へ進行すると共に成長し、 $t=0.042$ sec で $x/d=1.0$ を通過する。 $x/d=1.0$ を通過するまでの渦の通過平均時間は 0.040 sec であ

(a) Continuous photographs in the x/d range of 0.0 to 3.0

(b) Instantaneous photograph in the x/d range of 0 to 1.0

Fig. 5 Flow visualization with backward jet

り、この逆数から周波数に換算するとおよそ 25 Hz となる。はく離点近傍を拡大した図 7 の $t=0.000$ sec では、はく離点から小規模な渦が放出され、下流へ向かいその渦が大きく成長し円柱背後へ巻き込むことがわかる。Backward jet により連続的にジェットを吹き出しているが、大規模な渦に成長していく過程で、交番型の渦挙動へと変化する。また、はく離点近傍から放出される小規模な渦の通過平均時間はおおよそ 0.0053 sec であり、周波数に換算するとおよそ 188 Hz となる。前報より、熱線流速計により得られた時系列速度データから FFT 解析を行った結果、卓越周波数は 25 Hz⁽⁶⁾ となり、図 6 で示した大規模な渦による速度変動と推測できる。よって、円柱壁面のはく離点近傍から放出される小規模な渦による下流への影響は小さいと考えられる。

4・2 Wavelet 解析

図 8 から図 10 に $x/d=3.0$, $y/d=0.7$ における時間軸、疑似周波数に対する Wavelet 係数のコンター図を示す。赤色、青色は Wavelet 係数の正、及び負の値を表す。図 8 の横軸は、任意の時刻を原点とした経過時間 t_1 とし、図 9 及び図 10 では前報⁽⁶⁾より算出した半値半幅 $b_{1/2}$ における速度 U_b を用いた、無次元時間 $t_2=(t_1 \times U_\infty)/d$, 及び $t_3=(t_1 \times U_b)/b_{1/2}$ を時間軸とした結果を示す。また、(a)ジェット無し、(b) Forward jet, (c) Backward jet を示す。図 8 から図 10 では、各周波数帯に赤色及び青色の Wavelet 係数が並び、これは Wavelet 係数の極値となる。図 8(a)では、カルマン渦と考えられる正と負の Wavelet 係数を一対とした極値が 33 Hz 付近に現れ、0.1 sec 間で、3.5 個の渦が通過している。また、図 8(b), 及び図 8(c)では、0.1 sec で、47 Hz の渦が 4 個、25 Hz の渦が 2.5 個通過していることがわかる。それぞれの時間軸を無次元化した図 9, 及び図 10 を比較すると、図 9 では、無次元化した一定時間内でそれぞれ渦の通過個数は異なるが、図 10 の渦の通過個数はジェット無し, Forward jet, Backward jet で同程度となることがわかる。このことから、渦の通過個数から無次元化した時間軸に着目すると、 $b_{1/2}$, U_b を代表値とする時間スケールの場合、ジェットの有無に関わらず渦が通過する間隔がほぼ等しく、また渦スケールは形成される円柱の後流幅に影響していると考えられる。よって、前報で述べた円柱から放出される渦列の空間スケールに対して、渦の通過間隔の時間スケールは、ジェット無し, Backward jet, Forward jet とほぼ同程度であると考えられる。後流幅を代表値としたストローハル数⁽⁶⁾が同程度になったことは、渦スケール列の相似性に起因した普遍ストローハル数に関連していると推測される⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾。

Fig.6 Continuous photographs in the x/d range of 0.0 to 3.0

Fig.7 Continuous photographs near the separation point on the surface of the cylinder

 Fig. 8 Time history t_1 of wavelet coefficient

 Fig. 9 Non-dimensional time history t_2 of wavelet coefficient

 Fig. 10 Non-dimensional time history t_3 of wavelet coefficient

4・3 PIV 解析

図 11 に円柱後流のはく離領域における平均速度分布を示す。ベクトルは流れ方向、及び高さ方向の速度を示し、コンター図は、各速度の二乗平均を示す。図 11(a)のジェット無しでは、円柱表面から流れがはく離し、円柱背後に逆流域を形成していることがわかる。図 11(b)の Forward jet では、円柱背後の逆流域は大きく縮小し、後流幅が減少していることがわかる。これは、流れ方向に吹き出すジェットにより流れは加速し、円柱表面に沿ってジェットが流れることから、円柱中心方向へ運動量が輸送され後流幅が減少したと考えられる。また、図 11(c)では、ジェットによりはく離点近傍から渦が放出され、はく離点から流れは大きく円柱外縁方向へと広がり、後流幅を広げていることがわかる。これは、図 6、及び図 7 で示すようなはく離点近傍から放出される小規模な渦が、下流へ進行すると共に大規模な渦へと成長することに起因する。

図 12 にダイナミック PIV により得られる時系列流れ方向、及び高さ方向速度から算出した時間平均レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ を示す。図 12(a)のジェット無しでは、円柱表面では流れのはく離によりせん断層が形成され、

Fig. 11 Velocity profiles

Fig. 12 Reynolds stress profiles

このせん断層では $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ が増加する．図 12(b)の Forward jet では，プラズマアクチュエータにより円柱壁面近傍に運動量が輸送され， $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ は高く，せん断層における $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ の符号は，図 12(a)の $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ とは逆転し，後流中心方向へ運動量を輸送していると考えられる．また，円柱背後のはく離領域では，際立った $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ の変化は観察できない．二次元の Forward jet では， $x/d=1.0$ より下流域で運動量輸送が促進されることが報告されている⁽¹¹⁾．図 12(c)の Backward jet ではせん断層の $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ は高く，はく離点近傍から放出される小規模な渦により円柱中心方向への運動量が輸送されるものと考えられる．しかし，円柱背後における $y/d=0.0\pm0.5$ ， $x/d=0.5-1.0$ のはく離領域では後流幅を広げる方向に運動量が輸送される．これは，はく離点近傍から放出される小規模渦から成長する大規模な渦によるものと考えられる．そして，Backward jet による $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ の増加は，ジェット無し，Forward jet に対し鞍部点 S の流れ方向の位置が上流側に移動したことによるものと考えられる．Forward jet でも鞍部点の位置が $x/d=2.0$ 付近で現れることから，さらに下流域を調査すれば $-\overline{u'v'}/U_\infty^2$ の変化を確認できると考えられる．

Fig. 13 Half width behind the circular cylinder

4・4 半値半幅

図 13 に前報の熱線流速計により算出した半値半幅⁽⁶⁾に、本論文で行ったダイナミック PIV 解析より得られた $x/d=1.0$ における半値半幅 $b_{1/2}/d$ を合わせて示す。また、図中には、物体後流の後流幅の理論式⁽¹²⁾から得られる $b_{1/2} \propto x^{0.5}$ の直線を示す。図 13 のジェット無しの $x/d=3.0$ より下流では、 $b_{1/2}$ の増加は $x^{0.5}$ に比例する。 $x/d=3.0$ より上流では、熱線流速計とダイナミック PIV 計測から算出した $b_{1/2}$ の傾向に大きな違いはない。また、 $x/d=1.0-3.0$ の Forward jet では、ジェット無しに対して $b_{1/2}$ は減少し、ジェット無しと同様に $b_{1/2}$ の増加は $x^{0.5}$ に比例する。最後に Backward jet の $x/d=1.0-2.0$ の領域では、下流へ進行すると共に $b_{1/2}$ は増加し、やがて $b_{1/2}/d=0.8$ に収束する。これは、 $x/d=1.0-2.0$ の領域で、円柱後流で形成される大規模な渦により後流幅は増加することに対応する。

流れの可視化の図 3(a)から図 5(a)における流れの流跡線から現れるそれぞれの鞍部点の位置は、定量的に算出した後流の半値半幅の変化にほぼ対応する。そして、Forward jet の $x/d=3.0$ より上流では、ジェットによる後流中心方向への運動量輸送により後流幅を減少させ、Backward jet では、円柱後流の大規模な渦の形成により後流幅を増加させた。しかし、Rizzetta らの報告⁽⁵⁾によれば、連続的に逆流方向へ吹き出すプラズマアクチュエータでも効果があった。これははく離せん断層における流れの混合・非定常性を誘起し、翼表面に局所的なはく離、再付着を促進し、時間平均的なはく離領域を減少させた。本研究の円柱に設置した Backward jet では、Jet 流速が高く、円柱表面の流れの再付着を促進できなかったことが原因と考えられる。従って、Backward jet の場合、Jet 流速の低減、周期的な吹き出しにより、円柱の後流幅を減少させ、プラズマアクチュエータのさらなる低消費電力化が期待できる。

5. 結 言

円柱の表面に Forward jet, 及び Backward jet を吹き出すプラズマアクチュエータを用いて、円柱後流の流れの可視化、及びダイナミック PIV 計測を行い、以下のような知見が得られた。

- 1) 円柱表面にプラズマアクチュエータを設置し、Forward jet, 及び Backward jet により後流で形成される渦の挙動を可視化した。
- 2) Forward jet では、円柱表面における流れのはく離点の角度は下流へ後退し、Backward jet では上流へ前進した。
- 3) Forward jet では、 $x/d=3.0$ より上流域で、ジェット無しに対し後流幅を減少させることがわかった。Backward jet では、円柱背後で大規模な渦を形成し、後流幅を広げる方向に運動量が輸送されることがわかった。

- 4) 流れの可視化から観察されるプラズマアクチュエータによる円柱後流の鞍部点の位置の変化は、定量的に計測した後流の半値半幅の変化に対応することがわかった。

文 献

- (1) 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:日本流体力学会誌*, Vol. 29, No. 4 (2010), pp. 243-250.
- (2) Moreau, E., "Airflow control by non-thermal plasma actuators", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40 (2007), pp. 605-636.
- (3) 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.
- (4) Thomas, F. O., Kozlov, A., and Corke, C., "Plasma Actuators for cylinder flow Control and Noise Reduction", *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 8 (2008), pp. 1921-1931.
- (5) Rizzetta, P. D., and Visbal, R. M., "Numerical Investigation of Plasma-Based Flow Control for Transitional Highly Loaded Low-Pressure Turbine", *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 10 (2007), DOI:10.2514/1.29602
- (6) 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)", *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 76, No. 772 (2010), pp. 2011-2017.
- (7) 山田俊輔, 松本達也, 岡本圭太, 本阿弥眞治, 元祐昌廣, "低レイノルズ数流れにおける後方ステップ流れ(はく離再付着過程における周期的挙動)", *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 73, No. 736 (2007), pp. 2498-2504
- (8) Okita, Y., Jukes, N. T., Choi, K-S., and Nakamura, K., "Flow Reattachment over Airfoil using Surface Plasma Actuator", *4th AIAA Flow Control Conference* (2008), AIAA 2008-4203.
- (9) Roshko, A., "ON THE DRAG AND SHEDDING FREQUENCY OF TWO-DIMENSIONAL BLUFF BODIES", *NATIONAL ADVISORY FOR AERONAUTICS, TECHNICAL NOTE* 3169 (1953).
- (10) 安達勤, 尾崎哲雄, 山本毅, 江口美彦, 松内一雄, 河合達雄, "円柱後流渦列の普遍ストローハル数に関する研究", *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 61, No. 583 (1995), pp. 793-799.
- (11) 井上薫, 中吉嗣, 深淵康二, 小尾晋之介, "プラズマアクチュエータによる三次元攪乱を用いた円柱周りの流れの制御", *日本流体力学会年会 2009, 講演論文集*, Paper 35024 (2009), p. 3.
- (12) Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, 6th edit. (1968), Chapter XXIV, McGRAW-HILL.