上流で低速回転する制御物体が半無限平板を過ぎる流れに及ぼす影響*

平 田 勝 哉^{*1}, 近 藤 雅 浩^{*2}
大 熊 玲^{*2}, 舟 木 治 郎^{*1}The Effect of an Upstream Control Object
in Low-Speed Rotation upon the Flow Past a Long PlateKatsuya HIRATA^{*3}, Masahiro KONDO,
Rei OKUMA and Jiro FUNAKI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University,
1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

In the present study, the authors consider a control of the flow past a semi-infinite plate with a blunt front. The flow is one of the simplest separated-and-reattaching flows, and can be a model such as heat exchangers and flow straighteners commonly seen inside power plants, chemical plants and household appliances. As a control device, a rotating object, which is a small flat plate, is placed in the upstream of the semi-infinite plate. In a wind tunnel, the authors conduct flow-velocity-fluctuation measurements using a hot-wire anemometer for various control-object positions and rotation speeds, showing (1) root-mean-squared values near the leading edge of the semi-infinite plate and (2) dominant frequencies in the downstream. The present test range of the control-object rotation speed is low; specifically, the object's tip velocity is less than the uniform main stream velocity. Referring to such results, we can classify the controlled flow into four regions. Moreover, in order to clarify the characteristics for each region, the authors carry out (1) flow visualisations with particle-image-velocimetry analyses, and (2) velocity-profile measurements concerning time-mean and turbulence-intensity values.

Key Words: External Flow, Flow Control, Flow Separation, Wind Tunnel, Oscillatory Flow

1. 前置き

一般に円柱や角柱などの鈍頭物体 (Bluff Body) は、世の中に多数存在し、工業上も重要な基本部材形状であることが多い。そのまわりの流れは、ほぼ定常性が保たれる流線形物体の場合と比較すると、力学的に不安定な流れ場が形成されやすい、すなわち、境界層が剥離し複雑な剪断層が頻繁に現れる。よって、多くの分野で、その様な流れは設計上の不確定要素をもたらしている。

鈍頭物体に作用する流体力や流れ場の制御については、様々な方法が提案されている。方法の一つとして、物体まわりに微小な制御物体を挿入し、剥離剪断

層を変化させる試みがあり、抗力軽減や混合の促進/抑制、振動騒音制御、温度制御などへの応用が期待できる。これまでに、円柱⁽¹⁾⁽¹²⁾や正方形柱^{(1), (13)(24)}、矩形断面柱^{(1), (25), (26)}のまわりに柱状の小さな制御物体を設置することによって、物体後流のカルマン渦列形成領域位置など物体まわりの流れ場を変化させることによる抗力軽減を目的とした研究がある。

鈍頭物体の中でも扁平矩形柱などのアフタボディの長い鈍頭物体では、前縁から剥離した剪断層が物体表面に再び付着し、いわゆる、剥離・再付着流れを形成するなど、アフタボディとの相互干渉のため、物体まわりの流れはさらに複雑になる。その結果、流れ場は、円柱や正方形柱の場合とかなり異なる。最も単純な剥離・再付着流れとしては、バックステップ流れのほか、半無限平板を過ぎる流れが挙げられる。半無限平板を過ぎる流れは、発電所や化学プラント、家電製品内に見られる熱交換器や制流装置のモデルとしても工

* 原稿受付 2008年6月9日。

^{*1} 正員、同志社大学理工学部(〒610-0321 京田辺市多々羅郡谷1-3)。^{*2} 同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻。

E-mail: khirata@mail.doshisha.ac.jp

業上重要であり、その制御法の提案は様々な応用の可能性を示唆する。

半無限平板の上流に微小物体を設置することによる影響は、木谷ら⁽²⁷⁾と Sasaki & Kiya⁽²⁸⁾によって調べられている。そこでは、上流の微小柱体から発生した乱れによって、(1) 半無限平板側面上の再付着長さが短くなること、(2) 剥離剪断層が薄くなること、(3) 平板表面の変動圧力振幅が小さくなることが報告されている。

木谷らと Sasaki & Kiya の研究では、上流の物体を乱流発生源と考え、主流中に含まれる乱流成分が剥離・再付着流れへ及ぼす影響を調べることが主目的であったので、上流物体は微小かつ充分上流に設置している。本研究では、円柱や正方形柱についての過去の多くの研究と同様、制御物体によって、流れを積極的に制御することを考える。すなわち、回転する平板を半無限平板の上流に制御物体として配置し、その制御物体の回転数と設置位置が半無限平板を過ぎる流れに及ぼす影響を調査する。ここで、回転数については、効果的制御の観点から、低速領域を今回の調査対象とする。制御物体の回転により、流れは非対称になる可能性があり、よって、半無限平板の両側面において異なる混合・伝熱の促進/抑制特性を与えることも期待できる。更に付記すると、上流の平板は、強制外力のない状態でも、主流によりオートローテーションと呼ばれる回転運動を起こす可能性がある^{(29),(30)}。この現象の解明もまだ充分ではないが、今回の研究と併せると、将来の応用への可能性が期待できる。

具体的に実験内容を述べると、風洞を用いて、様々な制御物体位置と回転数で熱線流速計による変動速度計測を実施し、(1) 剥離点近傍の乱れ強さと、(2) 下流での卓越周波数とを求める。それらの結果に基づき、流れの分類を試みる。さらに、分類された各流れの特徴を明らかにするため、(1) 流れの可視化と PIV 解析、(2) 熱線流速計による時間平均と乱れ強さの速度分布計測とを、実施する。

主な記号

b : 制御物体の幅 [m]
 f : 速度変動の卓越周波数 [Hz]
 H : 半無限平板の厚さ (代表長さ) [m]

l : 制御物体と半無限平板間の距離 [m]
 L : 半無限平板の長さ [m]
 n : 制御物体の回転数 [Hz]
 Re : レイノルズ数 $= U_0 H / \nu$
 St : ストローハル数 $= f H / U_0$
 U_0 : 主流速度 [m/s]
 $\bar{u}$: 時間平均速度 [m/s]
 u' : 乱れ強さ [m/s]
 W : スパン長さ [m]
 x, y : 座標 [m]
 y_{SL} : 剪断層の厚さ [m]
 α : 制御物体の迎角 [rad]
 Ω : 端部速度比 $= \pi n b / U_0$
 ν : 動粘度 [m²/s]

下添字

LE : 半無限平板前縁近くの観測点
 $(x/H = 0, y/H = 0.525)$
 MIN : 最小値
 SW : 半無限平板側表面近くの観測点
 $(y/H = 0.55)$

2. 実験方法

2・1 モデルと座標系 図1に、モデルと座標系を示す。前縁が垂直に切り立った平板 (厚さ H) を、半無限平板として使用する。半無限平板の中心軸上流に設置した小平板が制御物体であり、回転数 n で強制回転する。制御物体の位置は、半無限平板前縁から制御物体中心までの距離 l を用いて規定する。座標系は、半無限平板の前縁中心を原点として、水平方向 (= 主流方向) を x 軸、鉛直下向きを y 軸とする。

表1に、実験パラメータの値を、まとめる。半無限平板の、アスペクト比 $AR (= W/H) = 14.5$ (ここに、 W は平板のスパン方向長さ)、縦横比 $L/H = 37.5$ (ここに、 L は平板の主流方向長さ) である。制御物体は厚さ $0.1H$ 、幅 $b = 0.5H$ の平板である。 $l/H = 2.0, 3.0, 4.5, 8.0$ であり、端部速度比 $\Omega = 0.001 - 0.41$ である。今回調べた Ω の範囲は低速域であるが、先に述べた通り、実際の応用時に実用上より効率的であると考えたためである。実験は、レイノルズ数 $Re = 5000$ で行う。

2・2 実験装置 実験には、高さ 1m、幅 1m、長さ 2m の開放測定部を持つゲッチングン型風洞を用い

る。主流の乱れ強さ u' は、主流速度 $U_0 = 5\text{m/s}$ のとき、 0.5% 以下である。半無限平板はアクリル樹脂製である。その両端には、流れの二次元性確保のため、高さ $10H$ 、幅 $1H$ 、長さ $37.5H$ のエンドプレートを取り付けている。閉塞率は 0.0088 であり、閉塞効果の補正は行っていない。制御物体の材質はアルミニウムである。制御物体は電気モーターを用いて強制回転する。

流速測定は I 型熱線プローブを用いて行い、平板下方から熱線プローブの流れに垂直に挿入する。なお、計測された結果は、正確には、 x 方向と y 方向の流速成分の合成である。熱線流速計からの信号は同時に FFT 解析し、得られた卓越周波数 f はストローハル数 $St (=fH/U_0)$ として無次元化する。なお、実際の熱線流速計による測定は半無限平板下部 ($y > 0$) のみで行うが、モデルの対称性を利用して、制御物体の逆回転時を、半無限平板上部の結果とする。

流れの可視化にはスモークワイヤ法を用いる。制御物体前方に張った直径 0.2mm のニクロム線に流動パラフィン塗布し、直流電源による 50V の電圧を加え、

Fig. 1 Model and coordinate system.

Table 1 Experimental parameters.

H [m]	2.0×10^{-2}
b [m]	1.0×10^{-2}
l [m]	$4.0 \times 10^{-2}, 6.0 \times 10^{-2}, 9.0 \times 10^{-2}, 1.6 \times 10^{-1}$
L [m]	7.5×10^{-1}
W [m]	0.29
n [Hz]	0.1 – 50
U_0 [m/s]	3.5 – 3.8
b/H	0.5
l/H	2.0, 3.0, 4.5, 8.0
L/H	37.5
Ω	0.001 – 0.41
$AR (=W/H)$	14.5
Re	5000

白煙を発生させる。半無限平板下部からレーザーシート光を照射し、スパン中央面の煙を観察する。可視化された流れは、風洞測定部外部のハイスピードカメラを用いて、側方から 2000frames/s で撮影し、得られた画像をパーソナルコンピュータで PIV 解析する。

3. 結果と考察

3・1 乱れ強さ 制御物体の影響を調べる目安として、最初に、ある位置での乱れ強さに注目する。乱れ強さは、混合／拡散との関係が強く工学上有用な量であり、また、制御の影響を鋭敏に反映しやすいので、指標として適当な場合が多い。一方で、計測位置の選択には、十分な配慮を要する。本研究では木谷ら²⁷⁾と同様に、剥離・再付着流れへの影響が大きいと考えられる剥離点近傍、すなわち、半無限平板の前縁近傍点 LE ($x/H=0$, $y/H=0.525$) を測定点とする。

図2から図5に、端部速度比 Ω に対する観測点 LE での乱れ強さ u_{LE}' を示す。ここで、 u_{LE}' は主流速度 U_0 で無次元化している。図2, 3, 4, 5 は、それぞれ、 $l/H = 2.0, 3.0, 4.5, 8.0$ の結果である。半無限平板下部の LE での結果を○、上部の LE での結果を●で表す。また、 $\Omega = 0$ での u_{LE}' は、準定常値、すなわち、制御物体が非回転時の結果であり、具体的には、制御物体の迎角 $\alpha = 0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ, 90^\circ$ での6個の時間平均値の単純平均（以後、準定常平均値と呼ぶ）である。エラーバーは、時間平均値のうちの最大値と最小値に対応している。

図2から図5は、ともに類似した特徴を示している。よって、図2について、その特徴を以下に詳しく説明する。 u_{LE}'/U_0 は、 Ω の値によって以下の4つの領域に分けられる。すなわち、 $\Omega \approx 0-0.03, 0.03-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.5$ の4領域である。以後、それらを領域 I, II, III, IV と呼ぶ。

各領域で u_{LE}'/U_0 が示す特徴を表2にまとめる。詳しく述べると、領域 I では、上部と下部の u_{LE}'/U_0 は、ほぼ一致する。領域 III では、下部の u_{LE}'/U_0 は、上部より顕著に低い値を示す（最大で約30%）。その値は、準定常平均値（図中、◇印）よりも更に低い。領域 II は、I と III の間に現れる遷移域であり、 u_{LE}'/U_0 の振舞いは複雑である。領域 III よりも高い Ω に、領域 IV がある。領域 IV での u_{LE}'/U_0 の値は、領域 III での値より

も、ずっと大きく、しかも、 Ω によらずほぼ一定となる。よって領域ⅢとⅣの間には、多くの場合、 u_{LE}'/U_0 の跳躍が見られる。

図6に、図2から図5の結果をまとめる。すなわち、 $//H$ - Ω 平面上に、先に定義した領域Ⅰ-Ⅳを示す。各領域の境界は、ほぼ $//H$ 軸に平行である。すなわち、全領域は、主に Ω の値のみに依存し、 $//H$ の影響が小さいことがわかる。ただし $//H$ が小さくなるにつれて、 $//H$ の影響は次第に大きくなる。なお、領域ⅢとⅣの間には、先に述べた様に u_{LE}'/U_0 の跳躍領域が存在する。

最も Ω が低い領域Ⅰでは、 Ω が0に近づくにつれて、 u_{LE}'/U_0 の準定常平均値への漸近が期待できる。しかし、例えば図2から、その傾向を見出すことは難しい。この点を、更に考察するために図7を示す。図7では、横軸を線形スケールの代わりに対数スケールとして、領域Ⅰでの観察を容易にしている。領域Ⅰ内で、上部と下部の u_{LE}'/U_0 はほぼ一致しているが、準定常平均値(図中、◇印)には漸近していない。図には、 u_{LE}'/U_0

Fig.2 Turbulence intensity u_{LE}'/U_0 at a near-leading-edge position LE against tip-speed ratio Ω for $//H=2.0$.

Fig.3 Turbulence intensity u_{LE}'/U_0 at a near-leading-edge position LE against tip-speed ratio Ω for $//H=3.0$.

から平板回転に関連した周期変動成分を取り除いたものを、 $\triangle$ (半無限平板下部) と $\blacktriangle$ (半無限平板上部) とで、示している。 $\triangle$ と $\blacktriangle$ は、 Ω の低下につれて、ともに準定常平均値に漸近している。従って、領域Ⅰは、ほぼ u_{LE}'/U_0 の準定常状態への漸近過程にあるとみなせる。つまり、 u_{LE}'/U_0 の値は、平板回転に伴う速度変動成分を含んでおり、その成分を取り除けば $\Omega=0$ での結果との整合性がとれる。なお、その成分は、 $//H$ が大きい程、小さくなる。例えば、図5ではその成分は数%程度である。

次に、最も Ω が高い領域Ⅳの結果を考える。領域Ⅳでは、 u_{LE}'/U_0 の値は Ω によらず一定値をとる。図8に、その一定値を、 $//H$ を横軸にまとめる。比較の為、 $\Omega=0$ での u_{LE}'/U_0 、すなわち、準定常平均値を図中◇印で示す。まず、準定常平均値は、 $//H$ の増加につれて $//H < 4.5$ まで単調増加し、 $//H > 4.5$ で一定値に漸近する。次に、 $\Omega > 0.3$ での u_{LE}'/U_0 、すなわち、領域Ⅳでの結果を、 $//H$ の増加につれて見ていく。 $//H < 3.0$ ま

Fig.4 Turbulence intensity u_{LE}'/U_0 at a near-leading-edge position LE against tip-speed ratio Ω for $//H=4.5$.

Fig.5 Turbulence intensity u_{LE}'/U_0 at a near-leading-edge position LE against tip-speed ratio Ω for $//H=8.0$.

では、半無限平板上部(図中、●印)よりも下部(図中、○印)の値が小さい。 $l/H \approx 3.0$ で、両者はほぼ等しい値となる。そして、 $l/H > 4.5$ で、両者とも、一定値へ漸近していく。この漸近値は、準定常平均値と、ほぼ等しい。

なお、図8には、領域IIIで現れる u_{LE}'/U_0 の最小値(半無限平板下部)も、示している。領域IIIでの最小値は、準定常状態の各 α での時間平均の最小値にほぼ一致することが分かる。

3・2 速度変動の卓越周波数 速度変動の時系列波形をフーリエ解析すると、それぞれ顕著な卓越周波数 f が現れる。 f は、上流部での観測では不安定なので、ある程度下流部($x/H=10$)の $y/H=0.55-2.55$ の範囲内で、最も明瞭かつ安定なピークを示す位置にて観測する。なお、この観測点付近より下流でも、 f の値はほぼ同様であった。以後、本論では、 f を、ストローハル数 St として無次元化して示す。

図9には、結果の一例として、 $l/H=4.5$ での Ω に対する St を示す。図(a)、(b)は、それぞれ、下部と上部で

Table 2 Definitions of regions I–IV.

Region	Description
I	u_{LE}'/U_0 on the lower side is almost the same as that on the upper side.
II	Transition region between the regions I and III.
III	u_{LE}'/U_0 on the lower side is distinctly smaller than that on the upper side.
IV	u_{LE}'/U_0 is much larger than that in the region III on each side, showing the following features. (1) There is a jump of u_{LE}'/U_0 between regions III and IV. (2) u_{LE}'/U_0 keeps an almost constant value, being independent of Ω

Fig.6 Boundary chart of regions I–IV.

の結果である。なお、図には、 $\Omega=0$ での St も示しているが、それは、前節と同様、準定常状態の値である。

St の値は、(1)図中の3直線($St=nH/U_0$, $St=2nH/U_0$, $St=4nH/U_0$)のどれかに近いのか、或いは、(2)卓越周波数が現れないので観測不能か($St=0$ として示す)の、いずれかの状態をとる。前者(1)は $\Omega < 0.23$ で、後者(2)は $\Omega \geq 0.23$ で見られる。前者では、下部で $St=4nH/U_0$ が上部で $St=nH/U_0$ が時々現れるが、 $St=2nH/U_0$ が最も頻繁に現れる。 $St=2nH/U_0$ 、すなわち、 $f=2n$ の関係は、1回転中の2個の渦放出に対応すると考えられる(後に可視化を示す)。

図10は、卓越周波数 f が観測できる領域と観測できない領域($St=0$)との境界を表している。半無限平板下部での結果を○、上部での結果を●で表したが、両者はほぼ一致している。境界は、 $\Omega \approx 0.2$ であり、ほぼ

Fig.7 Turbulence intensity u_{LE}'/U_0 at a near-leading-edge position LE against tip-speed ratio Ω for $l/H=3.0$ (logarithmic scale). Δ , $\blacktriangle$ denote u_{LE}'/U_0 without the control-object-rotation component.

Fig.8 The constant value of u_{LE}'/U_0 in the region IV against l/H , together with the minimum value $(u_{LE}'/U_0)_{MIN}$ of u_{LE}'/U_0 in the region III.

l/H 軸に平行である。よって乱れ強さと同様に、 l/H の影響が小さく、 Ω の影響が大きい。

図には、比較のため、剥離点近傍の乱れ強さ u_{LE}'/U_0 に基づく分類も破線で示している。 St に基づく境界は、領域 III と IV との境界近くに、存在することがわかる。すなわち、領域 I, II, III での流れは、制御物体の回転に伴う渦放出に特徴付けられる。一方、領域 IV での流れは、流れ場全体の明瞭な周期変動を伴わない。

図 11 に l/H に対する St を示す。図中の○と●は、それぞれ、半無限平板下部と上部の値を表す。図には準定常状態の値も示しているが、強制回転時の St の上限は、上部も下部ともに、準定常状態での時間平均の下限とほぼ等しいことがわかる。すなわち、卓越周波数の出現は、対応する準定常状態に、強く影響を受けている。今回の測定範囲外ではあるが、もし準定常状態での St の上限を $2nH/U_0$ が超えるほど回転数を上げることができれば、再び $2nH/U_0$ の無次元卓越周波数成分を観測できる可能性があると思われる。

3・3 流れの可視化と PIV 解析 乱れ強さ u_{LE}'/U_0 に基づいて分類した各領域における流れ場を詳細に観察するため、可視化実験と PIV 画像解析を行う。図 12, 13, 14 に、それぞれ、領域 II, III, IV の結果を示す。図では、渦度 ω を $\omega H/U_0$ として無次元化しており、その値は各図右側の凡例に対応する。

領域 II では、図 12 の様な静止画からは難しいが一連の動画観測からは、半無限平板上部と下部に大規模な渦組織構造を確認することができる。ここで、各渦構造は、回転と同期して半回転ごとに放出され、流下することも、動画より観察できる。上下の渦構造は交互配列と対称配列の間であるが、渦構造の規模は上下で同程度である。よって、時間平均流れ場を考えると、ほぼ上下対称と予想される(後述)。この点は、領域 I ほどではないが、領域 III と比べると半無限平板上下の u_{LE}'/U_0 の値がほぼ等しいこともよく対応している。

領域 III (図 13) では、半無限平板上部と下部に、図 12 よりも小さな渦構造を確認することができる。これらの各渦構造も、半回転ごとに放出され流下することが、同様に、動画より観察できる。更に、図 12 と同様、上下の渦構造の配列は、交互でも対称でもなく、流下位置の影響を受ける。しかし、図 12 と異なり、渦構造

Fig.9 Strouhal number St against tip-speed ratio Ω for $l/H=4.5$. $\diamond$ denotes the quasi-steady result.

Fig.10 Boundary between the flows with and without dominant frequencies.

Fig.11 The range of Strouhal number St against l/H .

の規模は、上部のものが下部よりも明らかに大きい。よって、時間平均流れ場は、上下非対称となることが予想される（後述）。この点も、領域 III において半無限平板下部の u_{LE}/U_0 が上部よりも小さいことと、よく対応している。

領域 IV（図 14）では、明瞭な渦構造を確認することが難しい。更に、動画観察においても、明らかな周

期性は認められない。この点は、領域 IV で速度変動の卓越周波数が確認できないことと、対応している。

なお、時間平均流れ場を考えると、上下はほぼ対称になると予想される（後述）。この点も、領域 IV において、 $l/H \geq 3$ で（図 8 を参照）半無限平板上下の u_{LE}/U_0 の値がほぼ等しいことと、よく一致している。

3・4 半無限平板側面上の速度分布 図 15, 16, 17 には、それぞれ、領域 I, III, IV での時間平均速度分布と乱れ強さ分布を示す。図中、○は時間平均速度、●は乱れ強さを表している。剪断層外縁と剪断層中心（定義は文献⁽³¹⁾にならう）を、それぞれ、実線と破線で表す。また、制御物体を配置しないときの剪断層外縁と剪断層中心を、それぞれ、一点鎖線と二点鎖線で表す。なお、図(a)は半無限平板下部の、図(b)は上部の結果である。

領域 I（図 15）では、半無限平板上部と下部とで分布はほぼ等しく、よって時間平均流れ場はほぼ対称であることが分かる。なお、剪断層外縁は制御物体を配置しない場合とほぼ等しいが、乱れ強さはかなり異なっている。

Fig. 12 Flow visualisation in region II ($\Omega=0.08$, $l/H=4.5$).

Fig. 13 Flow visualisation in region III ($\Omega=0.20$, $l/H=4.5$).

Fig. 14 Flow visualisation in region IV ($\Omega=0.41$, $l/H=4.5$).

領域Ⅲ(図16)では、半無限平板下部(図(a))で、剪断層外縁厚さも剪断層中心厚さも、ともに制御物体を配置しない場合よりも、小さい。一方、半無限平板上部(図(b))では、剪断層外縁厚さが制御物体を配置しない場合より大きく、剪断層中心厚さは若干小さい。

領域Ⅳ(図17)では、再び、半無限平板上部と下部とで分布はほぼ等しく、よって時間平均流れ場はほぼ対称である。一方、上部も下部もともに、剪断層外縁厚さが、制御物体を配置しない場合よりも、小さい。

なお、剪断層中心は定義できない。

図18に、各領域での剪断層外縁厚さ y_{SL} をまとめる。詳しく述べると、 $l/H=2.0$ での、 Ω に対する y_{SL}/H (ただし、 $x/H=4.0$)を示している。図中、○は半無限平板下部を、●は上部を、一点鎖線は制御物体を配置しない場合の結果である。なお、この結果は、他の $x/H=2.0, 8.0$ などでも($x/H \approx 0$ を除く)同様であった。

以下に、各領域における、すなわち異なる Ω での、半無限平板上部と下部の y_{SL}/H を比較する。領域Ⅰでは、下部と上部の y_{SL}/H は、ほぼ等しい値をとる。領域Ⅲでは、半無限平板下部の y_{SL}/H が上部よりも小さくなる。更に、領域Ⅳでは、 y_{SL}/H は、再び上下ほぼ同じ

Fig.16 Velocity profiles in region III ($\Omega=0.17, l/H=2.0$).

Fig.17 Velocity profiles in region IV ($\Omega=0.41, l/H=2.0$).

Fig.15 Velocity profiles in region I ($\Omega=0.02, l/H=2.0$).

値となる。よって、半無限平板まわり時間平均流れ場の上下非対称性は、領域Ⅲで最も顕著である。一方、 y_{SL}/H の値自体は、領域Ⅳにおいて、制御物体を配置しないときと比べて、明らかに小さい。なお、領域Ⅰでの y_{SL}/H は、制御物体の無い時より若干小さく、木谷ら⁽²⁷⁾と Sasaki & Kiya⁽²⁸⁾の結果と整合する。

伝熱や混合を考える際には、壁面近くの乱れ強さが大きな影響を及ぼす。図19には、図15-17における壁面近く ($y/H=0.55$) での乱れ強さ u'_{sw} をまとめる。 $x/H=0$ を除くと、各領域における u'_{sw}/U_0 は、ほぼ等しい。つまり、時間平均流れ場で上下非対称性が強い領域Ⅲにおいてさえ、 $x/H \approx 0$ を除くと u'_{sw}/U_0 に非対称性は現れない。なお、 $x/H \geq 4.0$ では、どの領域の u'_{sw}/U_0 も、制御物体を配置しない場合の値とほぼ等しいが、非回転時の値より大きい。(後者については、木谷ら⁽²⁷⁾と Sasaki & Kiya⁽²⁸⁾の結果と整合している。)ただし、前縁近くでは、ほとんどの領域の u'_{sw} は、制御物体の

無い時や、非回転時よりも著しく大きい。例外は、領域Ⅲの下部であり、 u'_{sw} は非回転時と同程度に小さい。

4. 結び

半無限平板を過ぎる流れへの制御を考えて、上流に回転平板を制御物体として設置し、低回転数範囲内で Ω と l/H の影響を調べた。すなわち、(1) 熱線流速計を用いた流速測定と(2) 流れの可視化と PIV 画像解析を実施した。以下に、結果をまとめる。

(1) 半無限平板下部と上部での u_{LE}/U_0 に基づき、流れを Ω の値により、低いものから順に、領域Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳに分類した。なお、 l/H による影響は Ω によるものよりもはるかに小さい。

(2) 領域Ⅰでは、下部と上部で u_{LE}/U_0 の値が等しい。領域Ⅱは、領域ⅠとⅢの間の遷移領域である。領域Ⅲでは、下部の u_{LE}/U_0 が上部よりも小さい。領域Ⅳでは、下部、上部ともに u_{LE}/U_0 が、領域Ⅲより明らかに大きく、かつ、 Ω によらず一定となる。

(3) u_{LE}/U_0 は、平板回転周期成分を取り除くことで準定常の平均値に漸近し、 $\Omega=0$ での結果と整合する。

(4) 半無限平板下流 ($x/H=10$) での速度変動には、領域Ⅰ-Ⅲで卓越周波数 f が現れることが多い。一方、領域Ⅳでは f を確認できない。無次元化した f すなわち St は、 nH/U_0 , $2nH/U_0$, $4nH/U_0$ のいずれかの値をとる。更に、 St は常に静止状態で測定できる St の最低値よりも低い値のみをとる。 f は、回転に同期して放出された渦構造の流下に関係している。

(5) 領域Ⅲでは、下部と上部で流れの非対称性が顕著に見られる。他の領域では時間平均流れは、ほぼ上下対称である。なお、領域Ⅳでは、流れは上下対称だが、明確な渦構造は確認できない。

(6) 半無限平板側面での剪断層外縁厚さ y_{SL} は、制御物体の無い時とほぼ同じか若干薄い、領域Ⅳの下部と上部、及び領域Ⅲの下部で、制御物体の無い時と比べて、明らかに薄くなる。 y_{SL} は、領域Ⅲにおいて最も下部と上部の差が大きい。

(7) 壁面近くの乱れ強さ u'_{sw} は、半無限平板前縁近くを除くと、ほぼ上下対称であり、かつ、制御物体の無い時の値に近い。ここで、制御物体の無い時の値は、非回転時の値よりも大きい。前縁近くでは、領域Ⅲ

Fig.18 Non-dimensional shear-layer thickness y_{SL}/H at $x/H=4.0$ against tip-speed ratio Ω ($l/H=2.0$).

Fig.19 Leeward distribution of turbulence intensity u'_{sw}/U_0 near the side wall (at $y/H=0.55$) against x/H for $l/H=2.0$.

の下部を除き、 u'_{sw} は、制御物体の無い時や、非回転時よりも著しく大きい。

今回の結果は、様々な応用を示唆している。流れの上下非対称制御には、領域Ⅲが有効である。領域Ⅳは対称であるが、卓越周波数が現れず、広範囲かつ安全な混合促進に有効である。

参考文献

- (1) F. Lesage and I.S. Gartshore, A method of reducing drag and fluctuating side force on bluff bodies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 25 (1987) pp.229-245.
- (2) T. Igarashi and T. Tsutsui, Flow control around a circular cylinder by a new method (1st report, forced reattachment of the separated shear layer), *Trans. JSME B (in Japanese)* 55 (511) (1989) pp.701-707.
- (3) T. Igarashi and T. Tsutsui, Flow control around a circular cylinder by a new method (2nd report, fluid forces acting on the cylinder), *Trans. JSME B (in Japanese)* 55 (511) (1989) pp.708-713.
- (4) P.J. Strykowski and K.R. Sreenivasan, On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.* 218 (1990) pp.71-107.
- (5) T. Igarashi and T. Tsutsui, Flow control around a circular cylinder by a new method (3rd report, properties of the reattachment jet), *Trans. JSME B (in Japanese)* 57 (533) (1991) pp.8-13.
- (6) T. Igarashi, T. Tsutsui and H. Kanbe, Drag reduction of a circular cylinder (1st report, flow control using a small rod), *Trans. JSME B (in Japanese)* 60 (573) (1994) pp.1554-1560.
- (7) H. Sakamoto and H. Haniu, Optimum suppression of fluid forces acting on a circular cylinder, *Trans. ASME J. Fluids Eng.* 116 (1994) pp.221-227.
- (8) T. Tsutsui and T. Igarashi, Drag reduction of a circular cylinder (2nd report, effect of Reynolds number), *Trans. JSME B (in Japanese)* 61 (586) (1995) pp.2069-2075.
- (9) T. Tsutsui and T. Igarashi, Enhancement of heat transfer and reduction of drag of a circular cylinder (flow control using a small rod), *Trans. JSME B (in Japanese)* 62 (597) (1996) pp.1802-1809.
- (10) A. Prasad and C.H.K. Williamson, A method for the reduction of bluff body drag, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 69-71 (1997) pp.155-167.
- (11) K. Tan, H. Sakamoto and M. Moriya, Suppression of fluid forces of a circular cylinder by passive control of flow, *Trans. JSME B (in Japanese)* 68 (674) (2002) pp.2772-2779.
- (12) S.J. Lee, S.I. Lee and C.W. Park, Reduction the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod, *Fluid Dynamics Research* 34 (2004) pp.233-250.
- (13) H. Sakamoto, H. Haniu and Y. Obata, An optimum suppression of fluid forces by controlling the separated shear layer (control of one-sided shear layer separated from square prism), *Trans. JSME B (in Japanese)* 55 (520) (1989) pp.3622-3629.
- (14) H. Sakamoto, K. Tan, H. Haniu and Y. Obata, Optimum suppression of fluid forces by controlling the separated shear layer (control of shear layers on two sides of a square prism), *Trans. JSME B (in Japanese)* 57 (534) (1991) pp.434-440.
- (15) H. Sakamoto, K. Tan and H. Haniu, An optimum suppression of fluid forces by controlling a shear layer separated from a square prism, *Trans. ASME J. Fluids Eng.* 113 (1991) pp.183-189.
- (16) T. Igarashi and S. Ito, Drag reduction of a square prism (1st report, flow control around a square prism using a small vortex shedder), *Trans. JSME B (in Japanese)* 59, (568) (1993) pp.3701-3707.
- (17) H. Sakamoto, H. Haniu, Y. Obata and M. Kase, Suppression of fluid forces of square prism by controlling separated shear layer (controlled by a fine flat plate), *Trans. JSME B (in Japanese)* 60 (573) (1994) pp.1575-1582.
- (18) T. Igarashi, Drag reduction of a square prism (2nd report, Strouhal number and flow pattern), *Trans. JSME B (in Japanese)* 60 (573) (1994) pp.1561-1567.
- (19) H. Sakamoto, H. Haniu, N. Takeuchi and Y. Obata, Suppression of fluid forces of rectangular cylinders by passive control of flow (1st report, in the case of square prism), *Trans. JSME B (in Japanese)* 61 (588) (1995) pp.2938-2946.
- (20) H. Sakamoto, K. Tan, N. Takeuchi and H. Haniu, Suppression of fluid forces acting on a square prism by passive control, *Trans. ASME J. Fluids Eng.* 119 (1997) pp.506-511.
- (21) T. Igarashi, Drag reduction of square prism by flow control using a small rod, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 69-71 (1997) pp.141-153.
- (22) T. Igarashi, Drag reduction of a square prism (3rd report, aerodynamic mechanism of reduction of drag), *Trans. JSME B (in Japanese)* 64 (625) (1998) pp.2928-2934.
- (23) Y. Iwata and E. Morishita, Numerical study of passive flow control around a rectangular cylinder, *Trans. JSME B (in Japanese)* 68 (673) (2002) pp.2504-2510.
- (24) L. Zhou, M. Cheng and K.C. Hung, Suppression of fluid force on a square cylinder by flow control, *Journal of Fluids Structures* 21 (2005) pp.151-167.
- (25) T. Igarashi and N. Terachi, Drag reduction of flat plate normal to airstream, *Trans. JSME B (in Japanese)* 61 (589) (1995) pp.3114-3121.
- (26) K. Tan, H. Sakamoto, K. Takai and H. Haniu, Suppression of fluid forces of rectangular cylinders by passive control of flow (2nd report, on rectangular cylinder with fully separated flow), *Trans. JSME B (in Japanese)* 64 (622) (1998) pp.1772-1780.
- (27) M. Kiya, K. Sasaki and M. Arie, Effect on free-stream turbulence on a separation bubble, *Trans. JSME B (in Japanese)* 50 (452) (1984) pp.967-973.
- (28) K. Sasaki and M. Kiya, Effect of free-stream turbulence on turbulent properties of a separation-reattachment flow, *Bulletin of JSME* 28 (238) (1985) pp.610-616.
- (29) H.J. Lugt, Autorotation, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15 (1983), pp.123-147.
- (30) T. Yoshinaga and A. Tate, Autorotation of slender bodies, *Transactions of Japanese Society for Aeronautical and Space Sciences*, 33 (1985), pp.367-373.
- (31) M. Kiya and K. Sasaki, Structure of a turbulent separation bubble, *J. Fluid Mech.* 137 (1983) pp.83-113.