

流れのパッシブ制御による直列2角柱の流体力の抑制*

森谷 優^{*1}, Md. Mahbub Alam^{*2}
高井 和紀^{*1}, 坂本 弘志^{*1}Suppression of Fluid Forces Acting on Two Square Prisms
in Tandem Arrangement by Passive ControlMasaru MORIYA^{*3}, Md. Mahbub Alam,
Kazunori TAKAI and Hiroshi SAKAMOTO^{*3} Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami, Hokkaido, 090-8507, Japan

The aim of the present study is to suppress the fluid forces acting on two square prisms in tandem arrangement, which is found in many cases in structures on land and in the ocean, by exerting passive control on an approaching flow using a small flat plate. The position of the control plate and spacing between two prisms are systematically varied, and then the reduction of the time-averaged and fluctuating fluid forces acting on two square prisms is determined. In addition, the mechanism of the flow control, the structure of the controlled wake, and the behavior of the controlled surroundings flow are discussed in detail based on the surface pressure distributions, the fluid forces and the visualized surface flow patterns.

Key Words: Passive Control, Two Rectangular Prisms, Tandem Arrangement, Fluctuating Fluid Forces, Vortex Shedding, Critical Spacing

1. ま え が き

流れの中にある円柱や角柱のようなはく離を伴う近接した二つの柱状物体の流力特性は、相互干渉によって単独のものと比較して著しく異なる。最近、複数物体の空力不安定現象に関連して、その要因となる変動流体力に注目した研究が行われ、貴重な報告がなされている。対象を円柱形状物体に限定しても種々の相対位置にある2円柱の時間平均流体力、変動流体力およびストローハル数に関していくつかの研究がなされている^{(1)~(4)}。さらに、阪田ら⁽⁵⁾および著者ら⁽⁶⁾は、変動流体力の挙動を把握するうえで重要な2円柱に作用する変動流体力の位相関係をも明らかにしている。一方、矩形断面を有する2角柱に関する研究は、地上に建てられた構造要素の代表の一つであるが、2円柱に比べて少ない。実際には、角柱が単独で存在するよりもむしろ複数で存在する場合が多い。直列2角柱についても、その近接の度合によって、単独角柱からは予期できない流体力の発生が予想される。この分野での

研究の重要性が認識される中で、坂本ら⁽⁷⁾は、最も基本的な同一形状の正方形断面を有する直列2角柱に作用する変動流体力の特性に関する研究を行っている。その研究では、ストローハル数の基本特性を調べ、変動圧力および変動流体力の位相平均(同期加算平均)を求め、これらに基づいて2角柱に作用する変動流体力の挙動などについてある程度明らかにしている。また、鈍い物体の変動流体力の制御は、各種構造物の空力不安定振動現象の発現を抑制するうえで極めて重要であるが、それらに関する研究は少ない。その中で、著者ら⁽⁸⁾は、単独矩形柱の前方に小平板を設置し、近寄り流れをパッシブ制御することによって、はく離せん断層を間接的に制御し、変動流体力の軽減に関する多くの知見を得ている。しかし、複数物体の変動流体力の制御に関する研究は、著者らの知見の限りではまったく見当たらない。

本研究は、かかる観点に立脚して直列2角柱の流体力、特に変動流体力の制御に関して実験的研究を行ったものである。具体的にはこれまでの著者らの研究で制御物体として極めて有用であると考えられる小平板を2角柱の中心線上の前方に設置し、その位置を系統的に変化させ、2角柱に作用する定常ならびに非定常流体力の抑制を詳細に調べ、最も流体力が軽減される

* 原稿受付 2000年1月31日。

^{*1} 正員, 北見工業大学 (〒090-8507 北見市公園町165)。^{*2} 学生員, 北見工業大学大学院。

E-mail: MORIYA-Masaru/me@king.cc.kitami-it.ac.jp

小平板の最適位置を明らかにしたものである。併せて2角柱表面のフローパターンを観測し、制御されたはく離せん断層ならびに2角柱の流体力学的相互干渉を検討するとともに、2角柱周辺の流れを制御するための基礎資料を得ようとしたものである。

2. おもな記号

- C_D : 角柱の時間平均抗力係数 $= D / (0.5\rho U_0^2 W)$
- C_{Df}, C_{Lf} : 角柱の変動抗力および揚力係数(rms値)
 $= \sqrt{D_f^2}, \sqrt{L_f^2} / (0.5\rho U_0^2 W)$
- C_p : 角柱表面の時間平均圧力係数
 $= \Delta p / (0.5\rho U_0^2)$
- C_{pf} : 角柱表面の変動圧力係数(rms値)
 $= \sqrt{p_f^2} / (0.5\rho U_0^2)$
- D : 角柱の時間平均抗力
- D_f, L_f : 角柱の変動抗力および揚力
- h : 制御平均の幅
- l : 流体力測定部の軸方向長さ(=1.07W)
- L : 2角柱間距離
- p_0, U_0 : 主流の静圧および速度
- S : 制御平板と上流側角柱との距離
- W : 角柱の一辺の幅
- X_s, Y_s : 角柱表面の圧力孔の位置

3. 実験装置および方法

実験に当たっては、断面0.6×0.4m、長さ4mの測定部を有する環流形風洞を用いた。角柱は一辺の幅Wが42mmの正方形柱で、軸長は測定部の幅と同一の400mmである。角柱表面上の時間平均ならびに変動圧力は、その内部に取付けた半導体圧力変換器によって測定した。また、時間平均抗力ならびに変動揚抗力の測定に用いた角柱は、アクティブ部ならびにダミー部によって構成され、その内部には流体力を検出するためのロードセルをそれぞれ内蔵している(基本的な構造と性能は既報に詳しく記述してある⁽⁷⁾)。近寄り流れの制御は、2角柱前方の中心線上(Y=0)に小平板(以下制御平板とする)を設置することによって

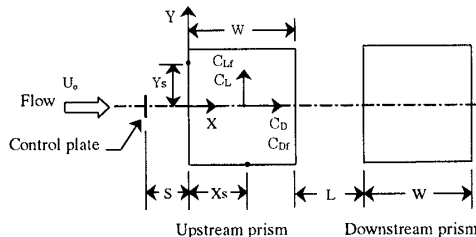


Fig. 1 Coordinate system and definition of symbols

行った。制御平板はステンレス製であり、その寸法はこれまでの研究で最適とされている角柱の大きさの1/10程度の厚さ0.2mmで、幅5mmのものを用いた。また、制御平板は風洞測定部両側面に取付けた設定装置(既報に詳しく記述してある⁽⁹⁾)に十分な張力を与えて固定した。図1に本実験で用いた座標系ならびに記号を示してある。

実験は主流の速度 U_0 を 20 m/s と一定にし、制御平板の位置を図1に示すように上流側角柱前方の中心線上に設定し、間隔を $S/W=0.5\sim 2.25$ (X方向)の範囲で変化させた。また、2角柱の間隔は $L/W=0.5\sim 10$ の範囲で変化させた。2角柱表面上の流れは、油膜法を用いて観測した。なお、本実験におけるレイノルズ数 ($Re=U_0W/\nu$) は約 5.52×10^4 であり、主流の乱れ度は約0.19%であった。また、測定部断面に対する角柱の閉そく比は、約7%であるが、本実験では流れの閉そくに対する補正は行っていない。

4. 結果および考察

4.1 時間平均流体力の制御 図2, 3は、制御平板によって2角柱周辺の流れが、大幅に変化する場合の時間平均圧力分布を示したものである。上流および下流側角柱の時間平均圧力ならびに変動圧力分布(後述)は、2角柱とも中心線(Y=0)に対し上下対称であったため、角柱の前面および背面は、上半分の分布を示す。図2は、上流側角柱表面の時間平均圧力分布で、無制御時の単独角柱のものも併せて示してある。上流側角柱の前面の圧力は、制御平板の位置が $S/W=0.5, 1.75$ と小さい場合、かなり減少するが、下流側角柱との間隔 L/W の影響は、ほとんど受けていない。しかし、 $S/W=0.5$ で側面の圧力は、 L/W によって大きく変化している。また、図2には $S/W=1.75$ のものも示してあるが、このときの C_p の分布は、 L/W に依存

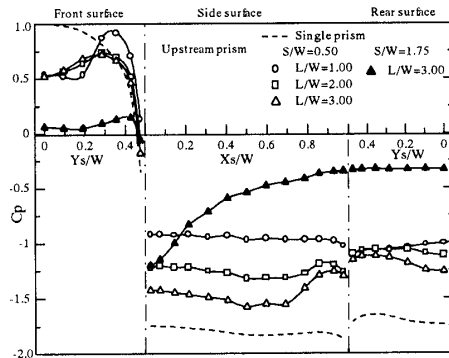


Fig. 2 Time-averaged pressure distribution along the surface of upstream prism

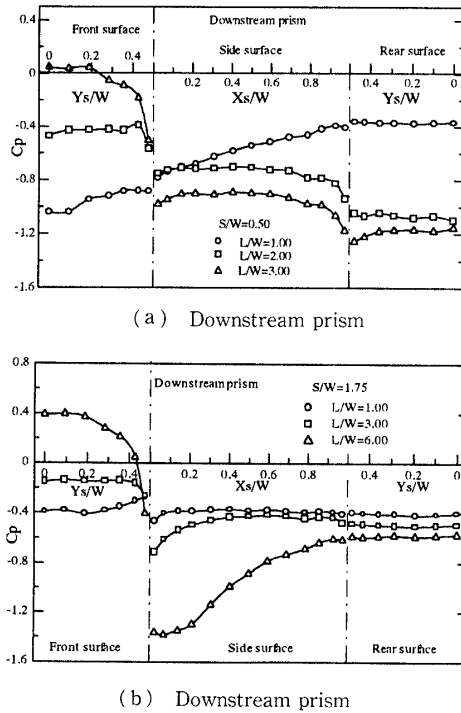


Fig. 3 Time-averaged pressure distribution along the surface of downstream prism

することなくほとんど同一であったため、代表して $L/W=3.0$ の分布を示す。特に、このときの側面での C_p 分布の傾向は、他のものと大きく異なっている。近接した2角柱周辺の流れは、上流側角柱からのはずれせん断層が下流側角柱上に再付着する場合(再付着流れ)、このせん断層が下流側角柱の前方でカルマン渦列となって巻き上がる場合(跳躍流れ)とあることが知られている。これらの二つの流れは、2角柱の臨界間隔を境に急に切換わることが報告されている⁽⁷⁾。図3は $S/W=0.5, 1.75$ の下流側角柱表面の時間平均圧力分布を示したものである。下流側角柱の前面の圧力分布は、 $L/W=1.0$ では凹の分布に対して、 $L/W \geq 3.0$ では凸の分布となっている。これは、制御平板を有する2角柱周辺の流れにおいても、再付着流れから跳躍流れに切換わっていることを示唆している。このように、下流側角柱の圧力分布は、 L/W に強く依存している。

図4(a)は、上流側角柱に作用する時間平均抗力係数 C_D を示したものである。 C_D は各 S/W に対して L/W の変化に基づいて示したものである。比較のため無制御時の坂本ら⁽⁷⁾の結果を併せて示してある。上流側角柱の抗力係数は、制御平板によって大幅に減少し、特に $S/W=1.75$ の場合が最もその減少が顕著で最大で約84%軽減された。

図4(b)は、下流側角柱の時間平均抗力係数を示し

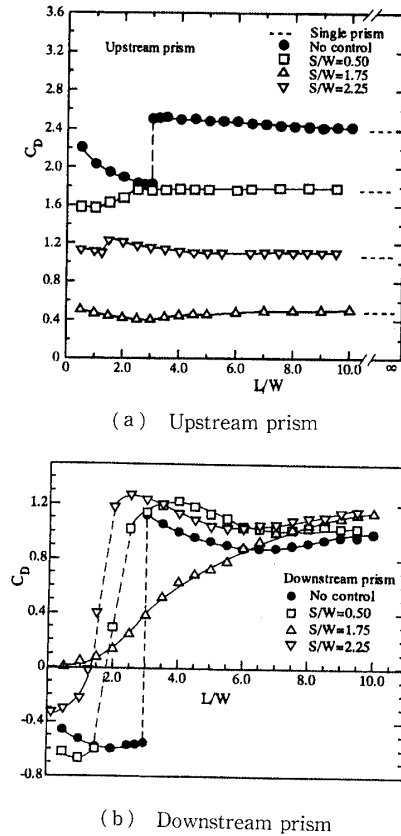


Fig. 4 Variation of time-averaged drag coefficient C_D with spacing ratio L/W

たもので、無制御時のものも併せて示してある。無制御時の2角柱周辺の流れでは、再付着流れから跳躍流れに切換わる臨界間隔は、 $L/W \approx 3.0$ である。この領域では比較的長い時間安定な流れを保持した後、他の流れに切換わる双安定流れを示す。しかし、2角柱前方に制御平板を設置することによって、臨界間隔が小さくなる($S/W=0.5, 2.25$)。これらの臨界間隔での流れは、再付着流れと跳躍流れが極めて短時間で切換わっていることが、 C_D の波形からも確認された。またこのことは、この領域での抗力係数が、再付着流れ時の C_D と跳躍流れ時のものとのほぼ中間値を示していることから容易に理解できる。特に注目されるものとして、制御平板を $S/W=1.75$ に設置したとき、2角柱周辺の流れが急激に変化する臨界間隔が認められず、 C_D 値は L/W の増加とともに徐々に大きくなっている。したがって、制御平板を $S/W=1.75$ 近傍に設置することにより、上流側角柱の抗力係数が最小となり、下流側角柱の C_D が L/W によって跳躍的に変化することのない、いわゆる制御平板の最適位置が存在することがわかる。

4.2 変動流体力の制御 図5は、 $S/W=0.5, 1.75$ の上流側角柱表面の変動圧力係数 C_{Pf} および無制御

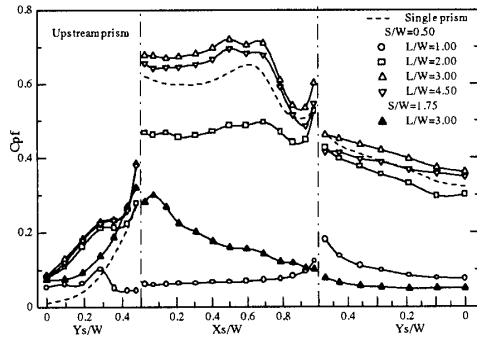
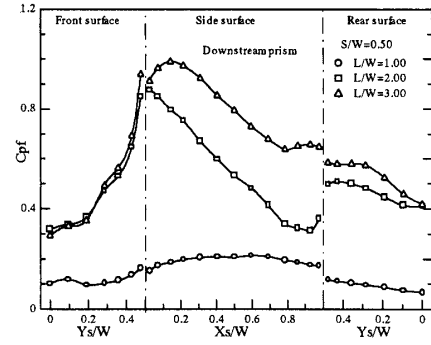


Fig. 5 rms pressure coefficient C_{Pf} along the surface of upstream prism

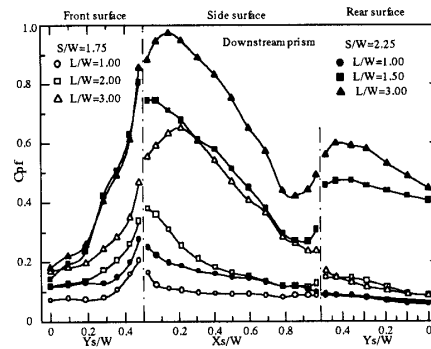
時の単独角柱のものを併せて示したものである。 $S/W=1.75$ の場合、本実験範囲 ($L/W=0.5\sim 10$) での C_{Pf} はほとんど同一の値となっていたことから、 $L/W=3.0$ のものを代表して示す。まず、 L/W の臨界距離までの上流側角柱の変動圧力係数 C_{Pf} は、いずれの面においても小さく、面に沿ってほぼ一定の値となっている。このことから、2角柱間に形成される渦領域は、ほぼ定常的であるため、上流側角柱周辺の流れは、あまり変動することなく、安定した流動状態になっているものと推察される。一方、2角柱周辺の流れが跳躍流れに移行した領域 ($S/W=0.5$, $L/W=3.0$) の上流側角柱の側面および背面での変動圧力は、無制御時の単独角柱のものにほぼ復帰している。また、 $S/W=1.75$ での上流側角柱近傍の流れは、その前面からはく離したせん断層が、上流側角柱側面中央部付近に再附着していることが、油膜法(後述)から確認されている。このような流動状態の場合、時間平均圧力分布の場合と同様に上流側角柱に作用する変動圧力分布が、 L/W に依存しないことは大変興味深いことである。

図6は、下流側角柱表面の変動圧力係数を示したものである。いずれの S/W においても、2角柱周辺の流れが臨界間隔以下での C_{Pf} は、極めて小さい値となっている。臨界間隔以下の流れは、上流側角柱からはく離せん断層が下流側角柱後方で巻き上がり、比較的周期性を有する渦となる。この場合の変動圧力は、渦放出による流れの揺動に起因するものと考えられるが、跳躍流れの場合に比べてかなり小さな値となっている。また無制御時に比べても小さく、2角柱前方に制御平板を設置することによって、このような渦放出も抑制されるものと推察される。

一方、2角柱間の流れが跳躍流れに移行すると、下流側角柱表面の変動圧力はかなり大きなものとなる。特に注目されるのは、 $S/W=0.5$, $L/W=3.0$ の側面での C_{Pf} が極めて大きなものになっている。また、



(a) Downstream prism

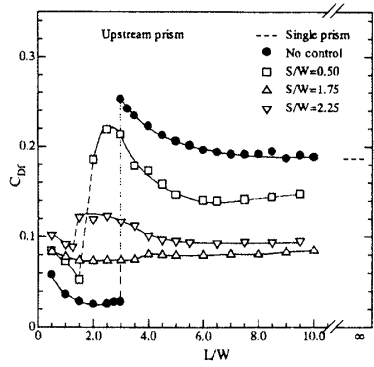


(b) Downstream prism

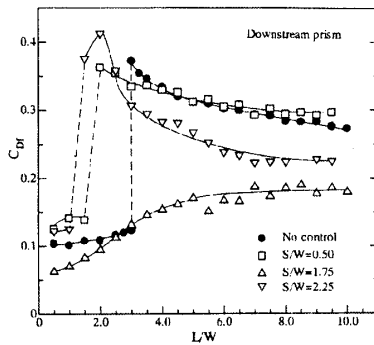
Fig. 6 rms pressure coefficient C_{Pf} along the surface of downstream prism

$S/W=0.5$, $L/W\geq 3.0$ の下流側角柱表面に作用する変動圧力が大きくなっていることから、大きな変動揚力が発生することがわかる。さらに $S/W=2.25$, $L/W=3.0$ の側面の C_{Pf} 値が非常に大きなものになっている。したがって、 $L/W=3.0$ 近傍に下流側角柱が存在することによって、2角柱周辺の流れの揺動が増幅されているものと考えられる。

図7は、上流および下流側角柱に作用する変動抗力係数 C_{Df} の rms 値を L/W に対して示してある。図7には比較のため、無制御時の上流側および下流側角柱の C_{Df} を併せて示してある。制御平板を2角柱前方に設置することによって、 L/W に対して時間平均抗力係数と同様に C_{Df} の大きさならびにその分布形状が大きく変化している。 $S/W=0.5$ および 2.25 近傍に制御平板を有する2角柱の変動抗力においても、ある臨界域を境に急変している。ただ、制御平板を有する場合の臨界間隔は、無制御時のものと比較して小さい。特に、上流側角柱に作用する C_{Df} の変化の割合は、無制御時のものと比べて小さくなっている。ここでも注目されることは、2角柱前方の $S/W=1.75$ 近傍に制御平板を設置することによって、上流側角柱の C_{Df} は、 L/W に依存することなくほぼ一定となるが、下流側角柱の C_{Df} は、上流側角柱のウエーク領域から

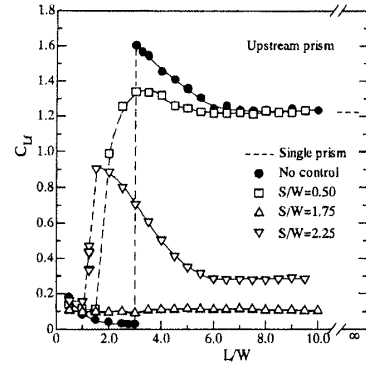


(a) Upstream prism

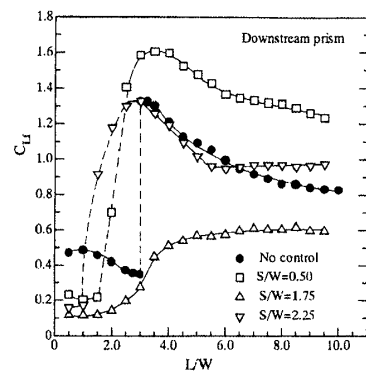


(b) Downstream prism

Fig. 7 variation of time-averaged drag coefficient C_{Dt} with spacing ratio L/W



(a) Upstream prism



(b) Downstream prism

Fig. 8 Variation of rms lift coefficient C_{Lr} with spacing ratio L/W

徐々に離脱するために、なだらかに増加している。

図8は、上流および下流側角柱の変動揚力係数 C_{Lr} の rms 値を L/W に対して示してある。図8にも比較のため、無制御時の2角柱の C_{Lr} を併せて示してある。まず、本実験において最も特徴的な流体力特性を示した、 $S/W=1.75$ に制御平板が設置された場合のものからフローパターンを含めて考察を行う。上流側角柱の C_{Lr} は、無制御時のものと比べて極めて小さく、 L/W に依存することなく、ほぼ一定値となり、最大で94%程度軽減された。つまり、上流側角柱の変動揚力分布にも臨界間隔を示唆する領域が認められない。また、下流側角柱の C_{Lr} は、極めて小さく、 L/W の増加とともに増大しているが、その傾向は他のものと大きく異なっている。 $S/W=1.75$ の上流側および下流側角柱に作用する変動揚力波形をスペクトル解析した結果、明りょうなスペクトルピークが認められなかった。変動揚力は、物体後方に形成されるカルマン渦に起因するものであるから、制御平板を $S/W=1.75$ 近傍に設置することによって2角柱からの規則的な渦形成はほぼ抑制されていることになる。本研究では、油膜法を用いた可視化により角柱表面近傍の流れを観察した。可視化観測に当たってのレイノルズ数は、流体力測定の場合と同一にしてある。その結果の

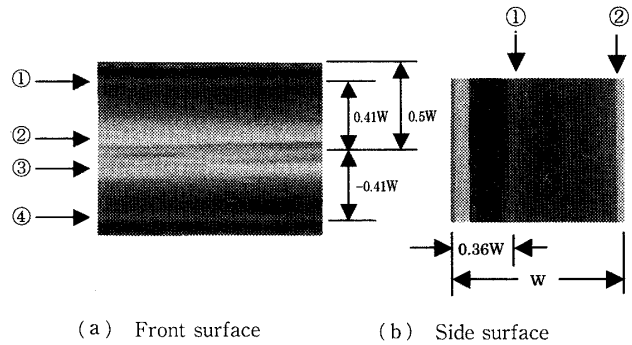


Fig. 9 Photograph of surface flow over upstream prism for $S/W=1.75$ (1, 4) Reattachment line, (2, 3) Separation line

一例を図9に示す。図9(a)は、 $S/W=1.75$ の上流側角柱前面の油膜模様である。制御平板からのはく離せん断層が上流側角柱の前面の $Y_s = \pm 0.41W$ 近傍に再附着し、流体の一部が角柱中心線に向かって流れ、よどみ点近傍ではく離している。他の部分は角柱前縁に向かって流れ、その先端付近からはく離することが確認される。また、この油膜パターンから、時間平均流れは角柱中心 ($Y=0$) に対して極めて良好な対称性を有していることがわかる。図9(b)は、上流側角柱側面の油膜模様である。角柱前面の先端からはく離し

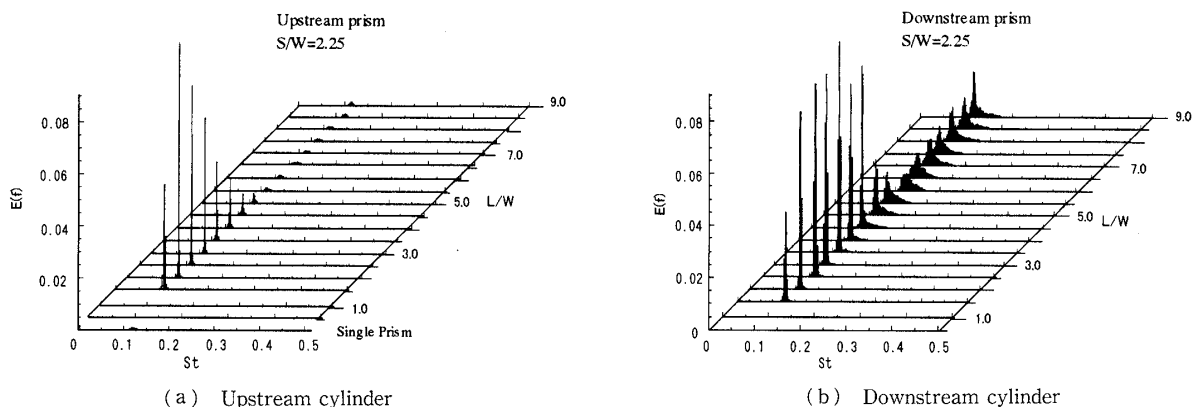


Fig. 10 Power spectrum of fluctuation lift force

たせん断層は、側面の $X_s=0.36W$ 近傍に再付着する。再付着流れを表す再付着線は、良好な二次元性を有している。再付着した流体の一部は、側面前方に向かって流れ、前縁近傍ではく離し、他の部分は側面に沿って後方に向かって流れ、角柱後縁近傍ではく離している様子が明確に観測できる。つまり、上流側角柱からのはく離せん断層が、その側面に再付着することによって、上流側角柱からの渦放出が抑制される。これに伴って下流側角柱からの渦放出も抑制され、2角柱の流体力特性および周辺のフローパターンが他のものと比べて著しく異なるものと推察される。

次に制御平板が $S/W=2.25$ 近傍に位置する場合、上流側角柱の C_{L_f} は、 C_{D_f} と同様に制御平板の影響を受け、無制御時のものと比べて極めて小さな値となっている。この臨界域 ($L/W \approx 1.25$) での上流側角柱の C_{L_f} 値は、臨界間隔前後のものほぼ中間値となっている。また、このときの変動揚力信号からも2種類の流れが極めて短時間で交互に切り替わる臨界域であることが確認された。本実験範囲内において、上流側角柱の C_{L_f} が、 $L/W > 6.0$ でほぼ一定となり、下流側角柱の影響はもはや受けていない。一方、2角柱間の流れが跳躍流れに移行直後の C_{L_f} が、下流側角柱の影響を顕著に受け、 $L/W > 6.0$ 領域でほぼ一定となった C_{L_f} 値の約3倍以上と大きなものになっていることは、大変興味深いことである。下流側角柱の変動揚力波形からも臨界域が確認され、2種類の波形は振幅が大きく異なるが、周期は同一のものであった。2角柱間の流れが跳躍流れに移行した後の下流側角柱の C_{L_f} は、無制御時のものと同程度になっている。図10は、 $S/W=2.25$ での上流側および下流側角柱の変動揚力信号のパワースペクトル分布を示したものである。ここで上流側の single prism は、単独角柱を制御した場合のパワースペクトル分布である。このときの角柱からは

明確な渦放出が行われていない。また、 $L/W=0.5 \sim 1.0$ での上流側角柱においてはスペクトルピークが認められず、これに呼応するかのように、下流側角柱においてもピーク値が見られない。一方、2角柱間の無次元距離 $2.0 \leq L/W \leq 5.0$ の範囲での上流側および下流側角柱の変動揚力スペクトルは、極めて良好な周期的渦放出を示唆する分布となっている。 $S/W=2.25$ に制御平板を有する単独角柱は、明確な渦放出が抑制されているのに対し、下流側に角柱が存在することによって、2角柱から明確な渦放出が行われる。これは、下流側角柱からの渦放出による流れの揺動が上流側角柱からの周期的渦放出を誘起していることも考えられるため、下流側角柱の後方に角柱幅の10倍の長さのスプリッタープレートを設置して調べてみた。上流側角柱のパワースペクトルは、スプリッタープレートがある場合とない場合で大きな変化がなかった。つまり、 $S/W=2.25$ の場合、 $2.0 \leq L/W \leq 5.0$ の範囲内に下流側角柱が存在することから、上流側角柱からはく離せん断層の巻き込む位置が、前方に移動することによって、2角柱から明確な渦放出が行われるものと推察される。下流側角柱が上流側角柱の渦領域から離脱してくる ($L/W > 5$) と上流側角柱のスペクトルは single prism のそれと同程度となり、離脱した下流側角柱自身のスペクトルも、 $2.0 \leq L/W \leq 5.0$ でのものとは異なったもののように見える。

$S/W=0.5$ の場合も 2.25 のときと同様に、無制御時のものと比べて臨界間隔は小さくなっている。また、2角柱間の流れが跳躍流れに移行した後の下流側角柱の C_{L_f} は、無制御時のものより約1.3倍も大きい。 $S/W=0.5$ 、 $L/W \geq 3.0$ の2角柱側面の大きな変動圧力からも推測されるように、上流側角柱の後流に下流側角柱が存在することによって、2角柱周囲の流れの揺動が増幅されていると推察される。このときの

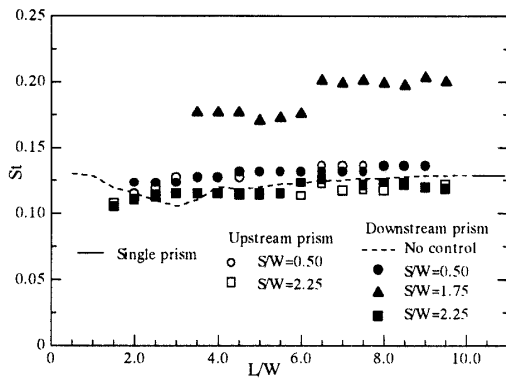


Fig. 11 Variation of Strouhal number St with spacing ratio L/W

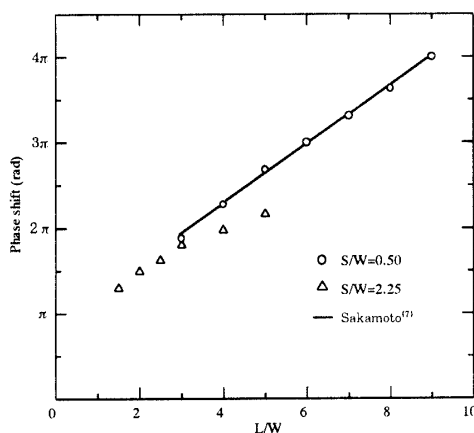


Fig. 12 Phase shift of fluctuating lift force between upstream and downstream prisms

上流側および下流側角柱の変動揚力をスペクトル解析したところ、他の場合と比べてピーク値が大きく、極めて narrow バンド (狭帯域) の分布になっていることが確認された。

4・3 2角柱からの渦放出の制御 2角柱からの渦放出周波数は、角柱に作用する変動揚力波形のパワースペクトルのピーク値とした。図11には、制御平板位置が $S/W=0.5, 1.75, 2.25$ の場合のストローハル数 St を L/W に対して示してある。無制御時の2角柱側面中心での変動圧力波形から算出した坂本らの結果⁽⁷⁾(同一レイノルズ数)も破線で併せて示してある。

坂本らの結果と同様、上流側角柱の St と下流側角柱のそれは、ほとんど同一となっている。本研究においては、 $0.5 \leq L/W \leq 3.0$ の範囲で $L/W=0.5$ 間隔で測定を行ってある。ストローハル数分布にデータがプロットされていない位置では、パワースペクトルに明りょうなピークをもっていないことを意味している。つまり、この位置の角柱からは規則性のある渦放出が行われていない。 $S/W=1.75, L/W \geq 3.5$ では下流側

角柱のみにスペクトルピークが認められ、その値は全体的に大きい。このときパワースペクトルは、wide バンド (広帯域) に分布し、そのピーク値のレベルは極めて低い。 $S/W=1.75$ の場合スペクトル解析の結果からも、上流側角柱からの渦放出が抑止され、下流側角柱からのそれも抑制されていることがわかる。2角柱からの渦放出周波数に対しては、制御平板の効果は、少ないようである。

また、図12は、2角柱に周期的な変動揚力が作用する場合の位相差を L/W について示したものである。位相差は、上流および下流側角柱に作用する変動揚力の相互相関係数から求めた。 $S/W=0.5$ の場合は、無制御時の坂本らの結果⁽⁷⁾と同一となっている。 $S/W=2.25$ で $L/W > 5$ の範囲では、ほとんど相関がない。

5. 結 論

2角柱前方に制御平板を設置して、近寄り流れを制御することによって流体力の軽減を図ったものであり、その結果を要約すれば以下のとおりである。

- (1) 2角柱前方の $S/W=1.75$ に制御平板を設置することによって、時間平均抗力は最大で84%、変動流体力は、最大で94%程度軽減された。
- (2) 制御平板による流体力の軽減の割合は、下流側角柱より上流側角柱のほうが大きい。
- (3) 2角柱の流体力を大きく軽減する制御平板の最適位置の存在が判明した。また、そのときの流体力抑制のメカニズムが明らかとなった。
- (4) 制御平板によって流体力が急変する臨界間隔を制御でき、特に制御平板が $S/W=1.75$ に位置する場合、臨界領域は完全に抑制できる。
- (5) 2角柱が近接する場合、上流側角柱からの渦放出が下流側角柱の渦放出に大きく寄与する。

文 献

- (1) 岡島厚, 機論, 44-384, B(1978), 2663-2671.
- (2) 五十嵐保, 機論, 46-406, B(1978), 1026-1035.
- (3) Arie, M., Kiya, M., Moriya, M. and Mori, H., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 105-2(1983), 161-167.
- (4) Moriya, M. and Sakamoto, H., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 108-2(1986), 180-184.
- (5) 阪田一郎・木谷勝, 機論, 49-477, B(1983), 2618-2623.
- (6) 森谷優・坂本弘志, 機論, 51-469, B(1985), 3017-3021.
- (7) 坂本弘志・羽二生博之・小畑芳弘, 機論, 52-475, B(1986), 1175-1183.
- (8) 坂本弘志・羽二生博之・竹内伸行・小畑芳弘, 機論, 61-588, B(1995), 2938-2946.
- (9) 坂本弘志・羽二生博之・小畑芳弘・加藤正憲, 機論, 60-573, B(1994), 1575-1582.