

並列配列された弾性支持 2 円柱の流力振動の抑制と応答特性*

金 相 一^{*1}, 高井和紀^{*2}, 坂本弘志^{*3}
羽二生 博之^{*2}, 鈴木 聡一郎^{*2}Suppression and Characteristics of Flow-Induced Vibration
of Elastically Supported Two Circular Cylinders
in Side-by-Side ArrangementSangil KIM^{*4}, Kazunori TAKAI, Hiroshi SAKAMOTO,
Hiroyuki HANIU and Soichiro SUZUKI^{*4}SVBL, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

This experimental study is about suppression of flow-induced vibration with flexible sheet and characteristics of flow-induced vibration of elastically supported two circular cylinders in side-by-side arrangement. In particular, the characteristics of flow-induced vibration of the two cylinders are investigated with changing flow speed at each spacing ratio L/D (L : space between two cylinders, D : diameter of cylinder). Flow patterns around the vibrating two cylinders are also investigated by flow visualization with reproducing the state of elastically supported vibration accurately in forced vibration apparatus. It is clarified that characteristics of flow-induced vibration of two cylinders are changed with switching flow passing through the two cylinders. The method to suppress the flow-induced vibration of a single cylinder by attaching flexible sheet⁽²⁾ is also tested for two cylinders side-by-side arrangement. As a result, suppression effect by attaching the flexible sheet on the two circular cylinders in side-by-side arrangement is confirmed.

Key Words: Circular Cylinder, Suppression, Flow-Induced Vibration, Flexible Sheet, Side-by-Side Arrangement

1. まえがき

流れの中にある円柱に関しては、形状が最も基本的であるため数多くの研究が行われている。実際の円柱形構造物は熱交換器、送電線のように単独で存在する場合よりも複数で存在する場合が多いが、複数円柱に関する研究は単独円柱のように多くない。複数で存在する円柱の配列は流れ方向に対して、直列配列、くい違い配列および並列配列に分けられ、それぞれの配列はそれぞれ一つの研究テーマとして取り扱われている。本研究はこれらの配列の中で並列配列について調べたものである。

2 円柱周りの流れに関する研究として、Huseyin ら⁽¹⁾

は 2 つまたは 3 つの同径円柱を並列に配列し、円柱の間隔 L/D (L : 円柱の間隔, D : 円柱直径) を 0.25 ~ 2.0 まで変化させて、各 L/D における円柱周りの流れパターンを調べた。また Alam ら⁽²⁾ および Zhou ら⁽³⁾、岡島ら⁽⁴⁾ は同径の 2 円柱を並列配列で固定支持し、亜臨界レイノルズ数の範囲内で 2 円柱表面の圧力分布から、揚力および抗力等の流体力を調べるとともに円柱周りの流れパターンを調べた。Sun ら⁽⁵⁾ および Chen ら⁽⁶⁾ は同径 2 円柱において並列配列だけではなく、直列配列およびくい違い配列されたときの流体力や流れパターンを調べた。とくに Alam ら⁽⁸⁾ は 5.5×10^4 のレイノルズ数で並列配列された固定 2 円柱の間を通過する流れが一方の円柱の側に偏って流れ、その偏りが逆の円柱側に変わるスイッチングフローによる揚力と、抗力および流れパターンを 2 円柱の間隔比 L/D を系統的に変化させて調べた。また Lam ら⁽⁷⁾ は異なる直径の 2 円柱を用い、直径の大きい円柱を上流側に固定して直列配列、くい違い配列および並列配列の各配列におい

* 原稿受付 2007 年 9 月 5 日。

^{*1} 正員, 北見工業大学 SVBL (〒090-8507 北見市公園町 165)。^{*2} 正員, 北見工業大学機械システム工学科。^{*3} 正員, フェロー, ジェイベック(株)円山研究所 (〒064-0944 札幌市中央区丸山西町 10-4-5)。

E-mail: harry@mail.kitami-it.ac.jp

て、小さい方の円柱の流力振動特性を調べた。しかし並列配列された 2 円柱に関する研究では、固定円柱における流体力特性および流れパターンに関する研究がほとんどで、自由支持された円柱における流力振動特性に関する研究は少ないのが現状である。

また円柱の流体力の制御に関しては、円柱の前方に小平板⁽⁹⁾ および小円柱⁽¹⁰⁾ 等の物体を設置し、円柱への近寄り流れを制御する研究、円柱の後方にトリッピングロッド^{(11),(12)} および平板⁽¹³⁾ を設置し、円柱に作用する流体力および後流渦の制御を行った研究、円柱表面にトリッピングロッド⁽¹⁴⁾、O-リング⁽¹⁵⁾、半球⁽¹⁶⁾ 等を取り付けて円柱に作用する流体力および後流渦の制御を行った研究がある。しかしこれらの研究はいずれも単独円柱における流体力および後流渦の制御に関するものである。2 円柱の流体力制御に関する研究は、Alam⁽¹⁷⁾ らによるトリッピングロッドを用いた制御手法を直列配列および並列配列された 2 円柱に適用した研究等、いくつかの研究例が見られる程度である。

著者らはこれまで 2 円柱に関して、直列配列された場合の流力振動特性およびその制御^{(18),(19)} と、くい違い配列された場合の流力振動特性⁽²⁰⁾ について報告してきた。本報は並列配列された 2 円柱の流力振動特性およびその制御に関するものである。具体的には、並列配列された同径 2 円柱に関して、風洞による自由振動(弾性支持振動)実験および水路による強制振動実験を実施した。自由振動実験は 2 円柱の間隔比 L/D を系統的に変化させ、換算流速 $U_r [=U_0/(f_c \cdot D)]$ 、 U_0 : 主流の速度、 f_c : 円柱の固有振動数] の変化に対する流力振動特性を詳細に調べた。また強制振動実験では、自由振動実験で得られた 2 円柱の各間隔における、振動振幅および振動位相などの振動特性を強制振動装置で

正確に再現し、振動時における 2 円柱周りの流れパターンを調べた。そして振動特性および流れパターンに基づき、流力振動の発現メカニズムを明らかにした。さらに並列配列された 2 円柱の流力振動の抑制に関して、著者らの報告⁽²¹⁾ にあるフレキシブルシートを円柱後方に取り付けるごく簡便な制御手法を適用した場合の制御効果の検証を行った。

2. おもな記号

- a : 流れと直角方向の振動振幅(RMS 値)
- C_n : 換算減衰パラメータ $[=2m_0 \cdot \delta / (\rho \cdot D^2)]$
- D : 供試円柱の直径
- f_c : 円柱の固有振動数
- l : フレキシブルシートの長さ
- L : 2 円柱の間隔
- m_0 : 円柱の単位長さあたりの質量
- Re : レイノルズ数 $[=U_0 \cdot D / \nu]$
- U_0 : 主流の流速
- U_r : 換算流速 $[=U_0 / (f_c \cdot D)]$
- θ : フレキシブルシートの取り付け角度[deg.]
- ρ : 流体の密度
- ν : 流体の動粘度
- δ : 対数減衰率

3. 実験装置および方法

流力振動特性を調べる自由振動実験(弾性支持振動)では、断面 $0.3\text{m} \times 1.2\text{m}$ 、長さ 2.3m の測定部を有する環流型風洞を、2 円柱周りの流れパターンを調べる可視化観測実験では、幅 0.3m 、深さ 0.4m 、長さ 2m の測定部を有する回流式水路を用いた。自由振動実験に用いた 2 円柱は、直径 66mm の同径であり、出来る限り

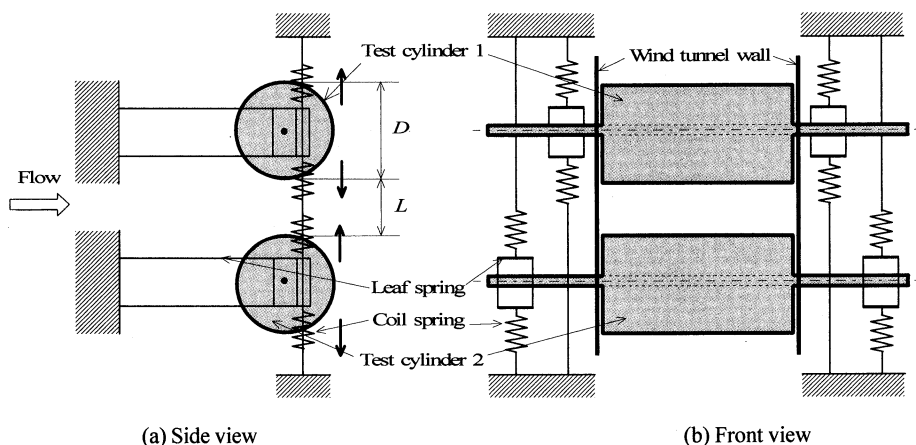


Fig.1 Experimental arrangement and definitions of symbols.

軽量化を図るために紙製の円筒とし、表面に薄いアルミ板を張り付け、内部には直径10mmのアルミ製支持シャフトを設けてある。供試2円柱は、図1に示すようにそれぞれの支持シャフトを介して、風洞測定部外側にある自由振動装置の2枚の板バネ（厚さ0.3mmの燐青銅板）に取り付けて流れに対して直角方向の振動（クロスフロー振動）のみができるようになっている。さらにその上下にコイルバネを取り付けることによって静止時における重力方向の平衡位置を設定するとともに、バネを交換することによって系の固有振動数も調整できるようにした。ただし本実験は円柱の固有振動数を一定に保って行った。供試2円柱の振動変位は、2つのレーザー変位計によってそれぞれ測定した。実験に当たっては、2円柱の換算減衰パラメータ C_n をいずれも7.24程度とし、図1の2円柱の間隔 L を円柱の直径 D で無次元化した L/D を0.1~3.2の範囲で変化させ、各 L/D における換算流速 $U_r [=U_0/(f_c \cdot D)]$ の変化による流力振動特性を調べた。本実験での U_r の変化は主流速のみを変化させることによって行った。なお本実験における Re 数は100~74000である。実験条件に低いレイノルズ数の領域も含まれるが、流力振動が発現する U_r においてはレイノルズ数は十分に大きいため、流れに対するレイノルズ数の実質的な影響はないものと思われる。流速の測定は共試円柱の上流側に設置したプロベラ式流速計で行った。使用したプ

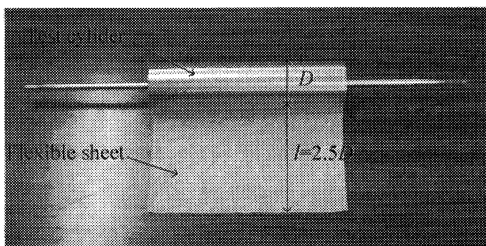


Fig.2 Picture of test cylinder attached flexible sheet and definitions of symbols.

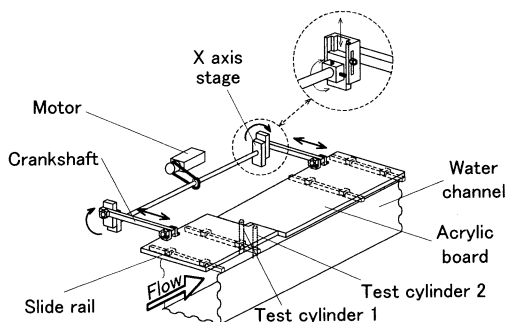
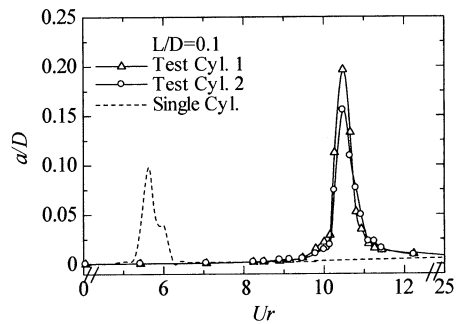
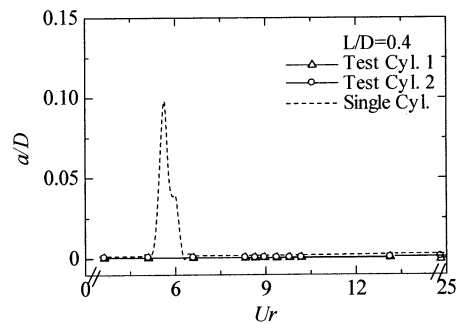


Fig.3 View of forced-vibration experimental apparatus for flow visualization.

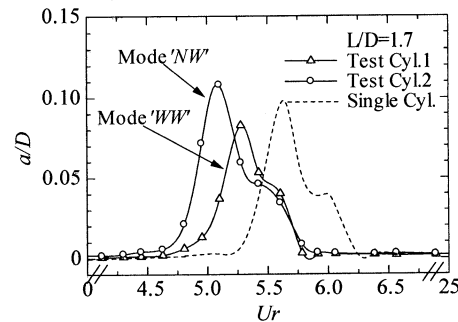
ロベラ式流速計はベッツマンメーターに対する測定誤差が1%以内であり、測定精度には問題ないとする。ま



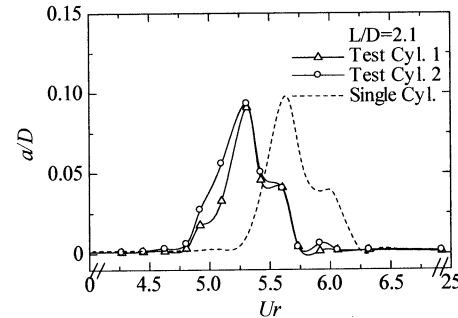
(a) Region I ($0.1 \leq L/D < 0.2$)



(b) Region II ($0.2 \leq L/D \leq 0.9$)



(c) Region III ($0.9 < L/D < 2.1$)



(d) Region IV ($2.1 \leq L/D \leq 3.2$)

Fig.4 Characteristics of flow-induced vibration of two cylinders in side by side arrangement at each flow region.

た振動時の円柱周りの流れパターンを調べ可視化観測実験は、自由振動実験から得られた 2 円柱の振動振幅、位相等の流力振動特性を正確に再現できる強制振動装置 (図 3) を用いることによって行った。実験に用いた 2 円柱の直径は 20mm とし、水素気泡法により振動円柱周りの可視化観測を行った。また 2 円柱の流力振動抑制に当たっては、既報⁽²¹⁾と同様に単独円柱における流力振動の抑制効果が最も高かった長さ $l=2.5D$ のフレキシブルシート (図 2) を並列配列された 2 円柱のよどみ点から 180° (背面側よどみ点) の位置にそれぞれ取り付けて自由振動実験を行い、フレキシブルシート設置時における 2 円柱の流力振動特性を調べた。

4. 結果および考察

4.1 変動揚力特性と流力振動特性 図 4 は並列配列された 2 円柱の間隔比 L/D を $0.1 \sim 3.2$ の範囲で変化させたときの流力振動性状の結果から特徴的な 4 つの振動パターンを示したものである。図には比較のために単独円柱の振動性状もあわせて示している。図のように並列配列された 2 円柱でのいずれにも流力の発散振動は発現せず、限定振動のみが発現している。また $L/D=0.1 \sim 3.2$ の範囲で並列配列された 2 円柱の流力振動は、4 つの振動パターンに分けられることが分かった。振動パターン I は設置条件が $0.1 \leq L/D < 0.2$ のときで、2 円柱のそれぞれが単独円柱の流力振動発現風速よりも大きな換算流速 U_c において、大きな振幅で振動するパターンである。振動パターン II は $0.2 \leq L/D \leq 0.9$ のときに 2 円柱のいずれにも流力振動が発現しないものである。振動パターン III は $0.9 < L/D < 2.1$ のときに、単独円柱の振動発現風速よりも小さい換算流速で振動が発現するものである。さらにこのパターン III の場合は、両方の円柱が振動する風速域は同じであるが、振動振幅の最大値およびそのときの換

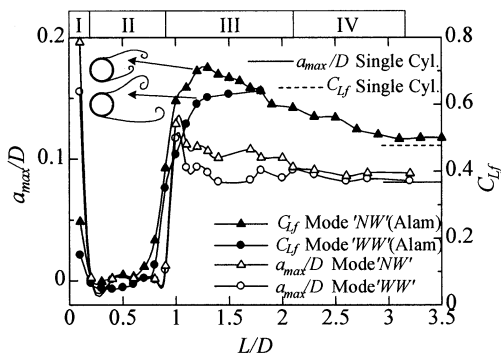


Fig.5 Classification of vibration mode of flow-induced vibration of two circular cylinders.

算流速がそれぞれの円柱で異なるものとなる。そして振動パターン IV は $2.1 \leq L/D \leq 3.2$ のときに、単独円柱より若干小さい換算流速で振動が発現し、2 円柱のいずれも単独円柱とほぼ同様な振動性状を示すものである。

図 5 は並列配列された 2 円柱に発現する流力振動の振動振幅の最大値 a_{max}/D を 2 円柱の間隔 L/D でまとめたものである。図の上部には 4 つの振動パターンが発現する L/D の領域を示している。さらに図には Alam ら⁽⁸⁾ による並列配列された 2 円柱の固定時における変動揚力係数 C_{Lf} の変化と、単独円柱における振動振幅の最大値および変動揚力係数を示している。図 5 のように 2 円柱の間隔 L/D の変化に対する振動振幅の最大値の変化は変動揚力係数の変化とよく対応していることがわかる。また Alam らは $L/D < 1.7$ において並列配列された 2 円柱の間にはスイッチングフローが発生し、いずれかの円柱の後方に流れが偏ることによって、図中に示す模式図のように、2 円柱の後方には狭いウェーク (Narrow wake: Mode 'NW') と広いウェーク (Wide wake: Mode 'WW') が間欠的に入れ替わりながら発現することを報告している。そのため 2 円柱には $0.9 \leq L/D < 1.7$ の範囲において大きく異なる 2 つの変動揚力係数 C_{Lf} が現れているが、流力振動時における振幅の最大値 a_{max}/D も同様に 2 円柱でそれぞれ異なる振幅を示している。したがって図 4(c) のように $0.9 < L/D < 2.1$ の範囲の振動領域 III において 2 円柱に振幅が異なる振動性状が発現するのは、2 円柱の間のスイッチングフローによる 2 つのモードのウェークに起因するも

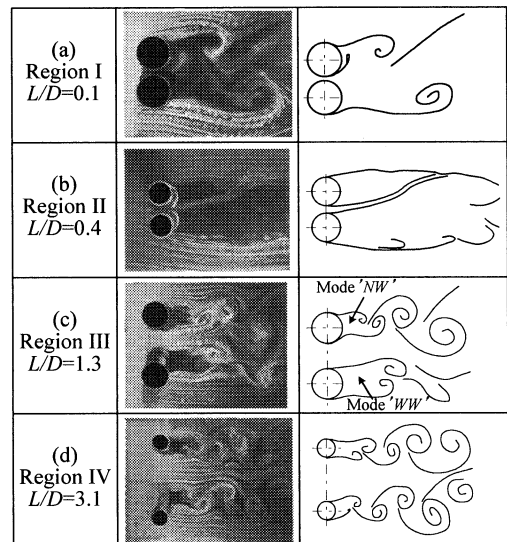


Fig.6 Visualized flow patterns and schematic diagrams around two cylinders in each vibration region.

のと考えられる。

4.2 各振動領域での流力振動特性 図6は各振動領域における2円柱周辺の流れパターンの可視化観測結果とその模式図を示したものである。また図7は各領域における変動速度のスペクトル分布をまとめて示したものである。以下は各振動領域における振動特性との関連付けから2円柱に発現する流力振動のメカニズムについて考察する。

まず振動領域Ⅰは、2円柱のいずれも単独円柱に比べて大きな換算流速 U_r で流力振動が発現し、その振動振幅も単独円柱に比べて大きい。これは図6(a)のように2円柱の間隔が非常に狭いために2円柱の間を通過する流れが少なく、2つの円柱それぞれの外側から離したせん断層が後流で大きく巻き上がり、2円柱が一体化したような流れパターンとなっているためである。このように2円柱は一体化した状態となるため、円柱からの渦放出周波数は小さくなり、流力振動の発現する換算流速は大きくなる。また図7における $L/D=0.1$ のように、振動時の円柱後流渦のスペクトル分布は他の振動領域のものとは比べてスペクトルピークがかなり大きくなっており、流力振動を誘起する流体力も大きいと考えられる。

つぎに振動領域Ⅱでは、2円柱のいずれにも流力振動が発現しない。この領域Ⅱでは図6(b)のように2円柱の間隔が若干大きくなり、2円柱の間を通過した流れがいずれかの円柱の後流に間欠的に偏るスイッチングフローが発生する流れパターンとなっている。この円柱間隔でスイッチングフローが発生した場合、円柱外側からは離したせん断層の後流における巻き込みは発生せず、2円柱のいずれの後流にも明りょうなカルマン渦列は形成されない。したがって図7における

$L/D=0.4$ のように、後流には卓越したスペクトルピークが存在せず、周期性のある流れが形成されないため、2円柱のいずれにも流力振動が発現しない。

振動領域Ⅲでは、2円柱が振動する換算流速 U_r の流速域は同じであるが、振動振幅の最大値およびそのときの換算流速が2円柱で異なるものとなる。この振動領域においても図6(c)のように、2円柱間の流れにスイッチングフローが発生し、2円柱の間を通過した流れはいずれかの円柱の側に偏る流れとなっている。しかし前述の振動領域Ⅱに比べて2円柱の間隔が広いいため、2円柱の間を通過してはく離れたせん断層は各円柱の後流でそれぞれ巻き上がり、2円柱にはそれぞれに明りょうなカルマン渦列が形成されている。ただしスイッチングフローがいずれの円柱の方に偏るかによって、2円柱の後流には狭いウェーク (Mode 'NW') と広いウェーク (Mode 'WW') が形成される。このウェークの幅の違いによって2円柱の振動振幅は異なるものとなる。狭いウェークが形成される側の円柱は図6(c)のように、後流渦が円柱後方の近いところで形成されるため、円柱の流力振動が大きく発現するものと考えられる。一方、広いウェークが形成される側の円柱後方では円柱から遠いところで後流渦が形成されるため、円柱の流力振動が小さく発現するものと考えられる。また図7における $L/D=1.0$ のように、固有振動数と同期する周波数にスペクトルピークが存在し、周期性の高い渦が形成されていることがわかる。

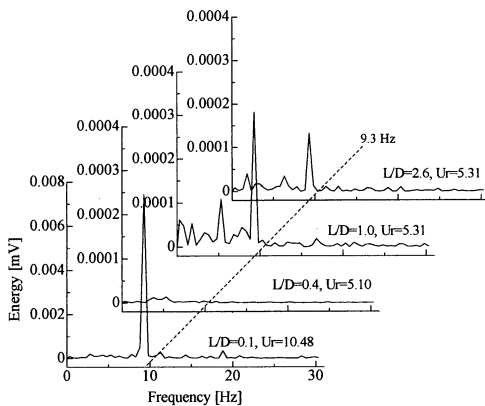


Fig.7 Spectral analysis of vortex behind vibrating cylinders at each vibration region.

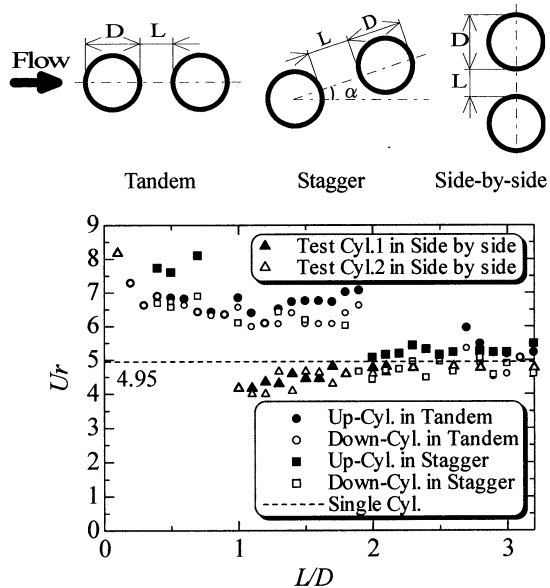


Fig.8 Reduced velocity U_r when the one and two cylinders begin the flow-induced vibration for various arrangement.

最後に振動領域IVは、単独円柱より若干小さい換算流速で振動が発現し、2 円柱のいずれも単独円柱とほぼ同様な振動性状を示す。これは図 6(d) のように 2 円柱の間隔が広いので、各円柱が互いに強い影響を及ぼすことなく、それぞれほぼ独立した円柱として後流にカルマン渦列を形成する流れとなっている。また図 7 における $L/D=2.6$ のように、円柱からの渦放出周波数は円柱の固有振動数に同期した周波数で卓越したスペクトルピークを有しており、後流には明りょうなカルマン渦列が形成されていることがわかる。しかし、2 円柱が互いに流力振動を誘起し合うため、流力振動が発現し始める換算流速 U_r は単独円柱のそれよりも小さな値となっている。

4.3 流力振動の発現開始流速 U_r 図 8 は 2 円柱が直列配列、くい違い配列 (くい違い角度 $\alpha=25^\circ$, α : 2 円柱の中心を結んだ線と主流がなす角度) および並列配列された場合の模式図と各配列において流力振動が発現し始める換算流速 U_r を 2 円柱の間隔 L/D でまとめたものである。あわせて比較のために単独円柱のそれも示している。ここで流力振動の発現の判定

は、円柱の振動振幅 (RMS 値) が円柱直径の 2 % 以上の大きさとなったときとしている。図 8 のように、2 円柱に流力振動が発現する換算流速 U_r は $L/D \geq 2.0$ において、いずれの配列の場合も単独円柱の振動発現開始風速と同程度の値となるが、 $L/D < 2.0$ においては 2 円柱の配列によって、それぞれ流力振動が発現し始める換算流速が異なっている。直列配列およびくい違い配列の場合に流力振動が発現し始める換算流速は、単独円柱の $U_r=4.95$ より大きな値であり、単独円柱よりも高風速で流力振動が発現し始める。また並列配列における振動領域 I の $L/D < 0.2$ においても単独円柱よりも高風速で流力振動が発現する。しかし並列配列における振動領域 III の $0.9 < L/D < 2.1$ の場合は単独円柱よりも小さい換算流速で流力振動が発現し始めている。したがって 2 円柱の配列のうち、 $0.9 < L/D < 2.1$ の条件で並列配列された場合は、他の条件に比べて流力振動が発現する換算流速が最も小さいことから、流力振動を互いに誘起しやすい条件であることがわかる。

4.4 フレキシブルシートによる流力振動抑制

図 9 は著者ら⁽¹⁾によって報告されたフレキシブル

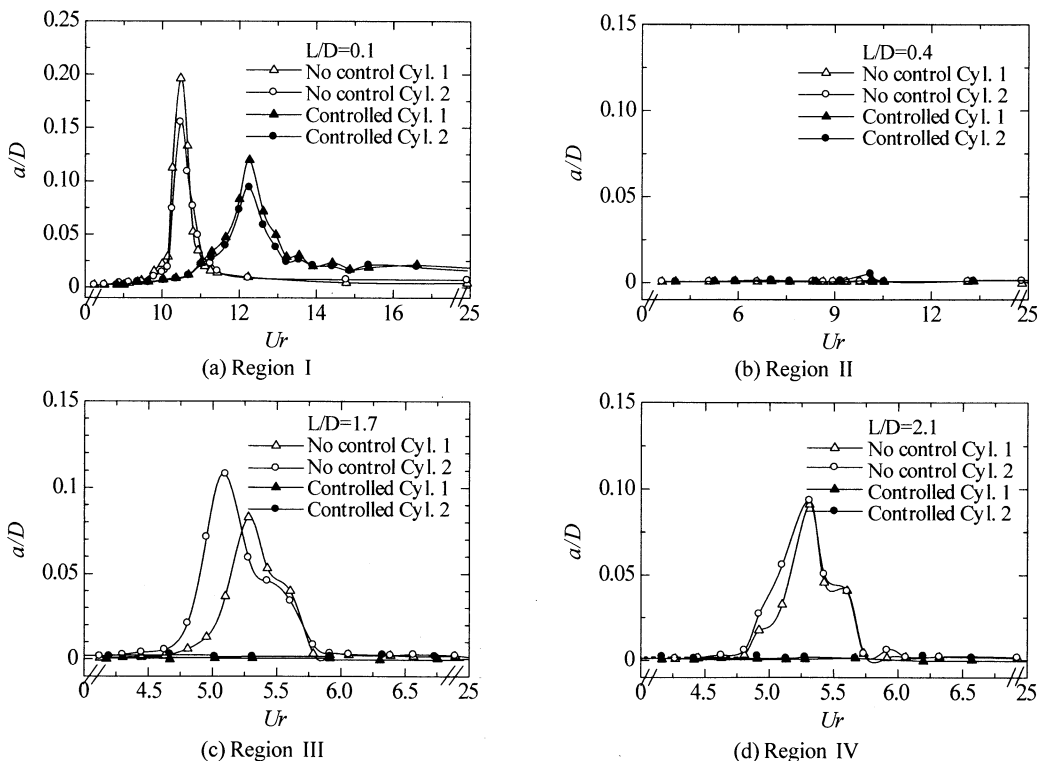


Fig.9 Characteristics of flow-induced vibration of two cylinders flexible sheets are attached in side by side arrangement at each region.

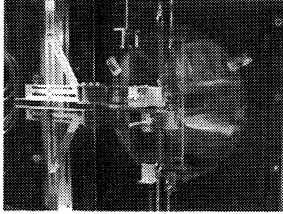
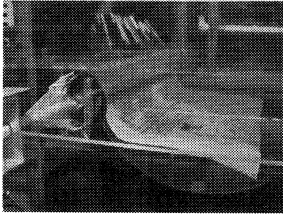

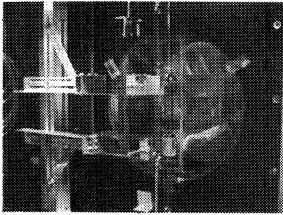
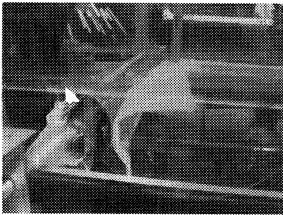

	Zoom out	Zoom in	Sketch
(a) $L/D=0.1$ $Ur=7.53$			
(b) $L/D=1.7$ $Ur=4.84$			

Fig.10 Behavior of flexible sheet when the flow-induced vibration of two cylinders is suppressed (b) or not (a).

シートによる円柱の流力振動抑制の手法を並列配列された 2 円柱に適用した場合の振動抑制効果を検証した結果を示している。2 円柱の両方に設置したフレキシブルシートの長さは図 2 のように単独円柱における流力振動の抑制効果が最も高かった $l=2.5D$ とし、円柱の最前縁から 180° の位置にそれぞれ設置した。また図 10 は 2 円柱にフレキシブルシートを取り付け、その時の円柱の流力振動がシートによって抑制されない場合(図 10 (a))と抑制される場合(図 10 (b))のフレキシブルシートの挙動を示す写真と模式図である。図 9 のようにフレキシブルシートを設置した場合における 2 円柱の流力振動は、振動領域 I ($0.1 \leq L/D < 0.2$) においては振動が始まる換算流速は大きくなったが、振動の発現は抑制できなかった。しかし、 $L/D \geq 0.9$ の振動領域 III および IV では振動の発現を完全に抑制することができた。フレキシブルシートによる流力振動抑制はシートが円柱背後で半円筒形に変形し、円柱からはく離するせん断層にシートが直接干渉すること、さらにシートの柔軟性がその干渉をより強めることによって抑制するものである。それぞれが単独円柱とほぼ同様な流れとなる振動領域 IV、およびスイッチングフローにより後流に 2 つのモードのウェークが形成される振動領域 III において、フレキシブルシートは図 10 (b) のようにそれぞれの円柱背後で半円筒形に変形し、それぞれの円柱に対して流力振動の発現を抑制している。これに対し、振動領域 I では 2 円柱の間隔が非常に狭いために 2 円柱が一体化したような状態となり、高風速で 2 円柱の外側からはく離れたせん断層が後流

で強く巻き上がる流れパターンとなるため、シートは図 10 (a) のように円柱の背後で半円筒形に変形せず、はく離せん断層に直接干渉することが弱くなり、流力振動の抑制効果は得られないものとなった。

5. 結 論

- (1) 2 円柱の間隔 $L/D=0.1 \sim 3.2$ の範囲での並列配列された弾性支持 2 円柱の流力振動は 4 つの振動パターンに分けられる。また各振動パターンの発生メカニズムを明らかにした。
- (2) 並列配列された 2 円柱に発現する流力振動は、いずれも振幅および振動発生流速範囲が限定的な限定振動である。
- (3) 並列配列された 2 円柱の間隔の変化に対する流力振動特性は固定時の 2 円柱の変動揚力の変化傾向とよく対応している。
- (4) 2 円柱の配列の中で $L/D=0.9 \sim 2.1$ の並列配列としたとき、流力振動が発現する換算流速は最も小さく、流力振動を誘起しやすい配列条件となる。
- (5) 並列配列された 2 円柱に発現する流力振動に対してフレキシブルシートを円柱後方に取り付ける抑制手法は広範囲の L/D で抑制効果が得られる。

謝 辞

本研究において、実験装置製作などに協力をいただいた北見工業大学技術部小畑芳弘氏に謝意を表する。

文 献

- (1) Huseyin, A., Atakan, A. and Cuma K., Flow Characteristics of Circular Cylinders Arranged Side-by-side in Shallow Water, *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.15 (2004), pp.187-197.
- (2) Alam, M. M., Moriya, M. and Sakamoto, H., Aerodynamic Characteristics of Two Side-by-side Circular Cylinders and Application of Wavelet Analysis on the Switching Phenomenon, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.18 (2003), pp.325-346.
- (3) Zhou, Y., Wang, Z. J., So, R. M. C., Xu, S. J. and Jin, W., Free Vibrations of Two Side-by-side Cylinders in a Cross-flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.443 (2001), pp. 197-229.
- (4) Okajima, A., Sugitani, K. and Mizota, T., Flow Around a Pair of Circular Cylinders Arranged Side by Side at High Reynolds Numbers, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.52, No.480 (1986), pp.2844-2850.
- (5) Sun, T. F., Gu, Z. F., He, D. X. and Zhang, L. L., Fluctuating Pressure on Two Circular Cylinders at High Reynolds Numbers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.41, No.44 (1992), pp. 577-588.
- (6) Chen, S. S., A Review of Flow-induced Vibration of Two Circular Cylinders in Crossflow, *Transaction of the ASME*, Vol.108 (1986), pp. 382-393.
- (7) Lam, K. M. and To, A. P., Interference Effect of an Upstream Larger Cylinder in the Lock-in Vibration of a Flexibly Mounted Circular Cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.17 (2003), pp. 1059-1078.
- (8) Alam, M. M., Sakamoto, H. and Moriya, M., Reduction of Fluid Forces Acting on a Single Circular Cylinder and Two Circular Cylinders by Using Tripping Rods, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.18 (2003), pp.347-366.
- (9) Tan, K., Sakamoto, H. and Moriya, M., Suppression of Fluid Forces of a Circular Cylinder by Passive Control of Flow, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.68-674 (2002), pp. 2772-2779.
- (10) Lee, S., Lee, S. and Park, C., Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of a Small Control Rod, *Fluid Dynamics Research*, Vol.34 (2004), pp. 233-250.
- (11) Sakamoto, H., Haniu, H. and Matubara, S., Control of Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder and Its Effectiveness (Controlled by a Fine Circular Cylinder), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.57, No.535 (1991), pp.882-890.
- (12) Dalton, C., Xu, Y. and Owen, J. C., The Suppression of Lift on a Circular Cylinder due to Vortex Shedding at Moderate Reynolds Numbers, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.15 (2001), pp.617-628.
- (13) Huseyin, A., Besir, S. and N., F. T., Suppression of Vortex Shedding of Circular Cylinder in Shallow Water by a Splitter Plate, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.16, No.4 (2005), pp.211-219.
- (14) Tan, K., Moriya, M. and Sakamoto, H., Suppression of Fluid Forces Acting on Circular Cylinder by Tripping Rods, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.69, No.679 (2003), pp.574-578.
- (15) Lim, H. and Lee, S., Flow control of a circular Cylinder with O-rings, *Fluid Dynamics Research*, Vol.35 (2004), pp.107-122.
- (16) Bearman, P. and Brankovic, M., Experimental Studies of Passive Control of Vortex-induced Vibration, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol.23 (2004), pp.9-15.
- (17) Alam, M. M., Sakamoto, H. and Moriya, M., Reduction of Fluid Forces Acting on a single Circular Cylinder and Two Circular Cylinders by Using Tripping Rods, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.18 (2003), pp.347-366.
- (18) Kim, S., Sakamoto, H., Characteristics and Suppression of Flow-Induced Vibrations of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement (1st Report, Characteristics of flow-induced vibrations in cross-flow vibration), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.714 (2006), pp.314-321.
- (19) Kim, S., Sakamoto, H., Characteristics and Suppression of Flow-Induced Vibrations of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement (2nd Report, Suppression of flow-induced vibrations in cross-flow vibration), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.721 (2006), pp.2164-2171.
- (20) Kim, S., Sakamoto, H., A study on Characteristics of Flow-Induced Vibrations of Two Circular Cylinders in Staggered Arrangement, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No.725 (2007), pp.139-146.
- (21) Kim, S., Sakamoto, H., Takai, K. and Obata, Y., Suppression for Flow-Induced Vibrations of a Circular Cylinder by Using a Flexible Sheet, *Proceedings of the 44th Hokkaido Branch Regular Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No.052-1 (2005-10), pp.52-53.