

フレキシブルシートによる円柱の流力振動制御*

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 of Flow-Induced Vibration of a Circular Cylinder
by means of a Flexible SheetSangil KIM^{*4}, Kazunori TAKAI, Hiroshi SAKAMOTO,
Hiroyuki HANIU and Soichiro SUZUKI^{**}SVBL, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

In this study, suppression of flow-induced vibration of elastically supported circular cylinder by attaching a flexible sheet was investigated experimentally. In particular, dependence on the flow velocity of flow-induced vibration characteristics of the circular cylinder attached with a flexible sheet was investigated in detail. The flexible sheet of different length (l) were attached on the cylinder surface at different angles (θ measured from back side stagnation point). The angle θ was set at five different angles, 90° , 45° , 0° , -45° and -90° . The length l of the flexible sheet was varied from 0.5 to 3.0 times of the cylinder's diameter at the interval of 0.5. The width T of the flexible sheet along the span of the cylinder was also varied from $1.0L$ to $0.4L$ (L is the length of the cylinder) to find out the minimum width of the sheet to suppress the flow-induced vibration of the cylinder effectively. Furthermore, the flexible sheet of the minimum width was split into 2 to 5 pieces and attached on the cylinder, and changes in the flow-induced vibration characteristics were investigated. Also the vibration characteristics were investigated for a flexible sheet in shape of an isosceles triangle. As a result, the optimal length l of the flexible sheet was found to be 2 to 2.5 times of the cylinder's diameter, and the minimum width T of the flexible sheet to suppress the flow-induced vibration of cylinder was found to be $0.7L$. Most importantly, it was found that the use of the flexible sheet suppress the vibration not only in one flow direction but also in various flow directions.

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

1. まえがき

流れの中に存在する円柱形構造物は煙突、橋脚、熱交換機などの基本的形状であり、それだけ多く存在する構造物である。そのため流れの中にある円柱に関する研究は工学的に重要で、多くの研究が行われている。流れの中にある円柱に関する研究は、円柱に作用する流体力に関する研究、円柱の後方に形成される渦に関する研究、円柱の流力振動特性に関する研究、およびそれらの制御に関する研究に大別される。この中で制

御に関する研究は実際の円柱形構造物の寿命の延長、建造コストの削減、並びに事故の防止のため、工学的に極めて重要であるが、それらに関する研究は比較的少ない。またこの円柱の制御に関する研究の多くは円柱表面又は近傍に物体を設置して流れを制御するパッシブ制御に関するものが主である。このパッシブ制御に関する研究を区分すると、円柱表面に粗さを与えてはく離せん断層を制御する研究と、円柱の前方に物体を設置することで円柱の近寄り流れを変化させて流体力等を制御する研究、さらには円柱後方に制御物体を設置して円柱後方の後流渦の形成を抑制する研究に大別される。円柱表面に粗さを与えて円柱表面のはく離せん断層を制御する研究としては、円柱表面にVベルトのプリーのような溝を設けて抗力および流れパターンの変化を調べた研究⁽¹⁾、円柱のスパン方向にOリングを付けて、その直径と設置間隔の違いによる抗力

* 原稿受付 2007年6月25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 札幌市中央区円山西町10-4-5)。

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

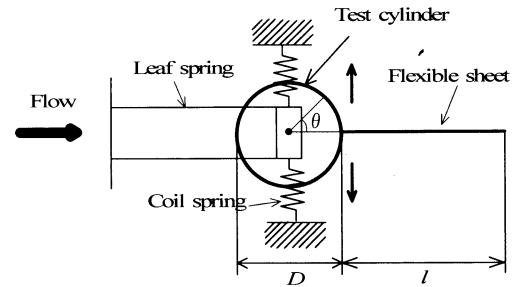
制御効果および流れパターンの変化を調べた研究⁽²⁾, 半球を螺旋状の配列に取り付けて, 円柱の流力振動の制御効果と流れパターンの関係を調べた研究⁽³⁾, 抗力の制御効果と流れパターンを調べた研究⁽⁴⁾がある. さらには, トリップングロッドを円柱のよどみ点から測った種々の角度に取り付けた時の流体力制御効果と流れパターンの関係を明らかにした研究^{(5),(6)}, 円柱に3本の細いワイヤを螺旋状に巻き, ワイヤの直径および螺旋ピッチの違いによる円柱表面からの離せん断層の変化を調べた研究⁽⁷⁾, 3枚のリボンを円柱に120°間隔で均等に取り付けて, そのリボンの長さおよびリボンと主流とのなす迎角の変化による抗力制御と流れパターンの関係を調べた研究⁽⁸⁾. 一方円柱周辺に制御物体を設置して流体力および後流渦を制御した研究としては, 円柱の前方にトリッピングロッド^{(9),(10)}および小平板⁽¹¹⁾を設置し, それらと円柱との間隔の変化による抗力の制御効果と流れパターンの変化を明らかにした研究がある. また円柱の後方に制御物体を設置した研究としてはトリッピングロッド^{(12),(13)}および横平板^{(14),(15)}を用いて流体力の制御効果と後流渦の変化を調べた研究がある. これまでのパッシブ制御に関する研究の大部分は一方の流れに対応する制御方法であり, 制御物体の設置位置の自由度や製造コストなどが制御効果に比べて良いとはいえない. また時間平均流体力および後流渦の制御を目的とした研究が主であり, 流力振動の制御を目的とした研究は少なく, 広範囲の流れ方向に対応できる制御方法に関する研究はほとんど行われていないのが現状である.

本研究はこのような現状を踏まえ, ごく簡便なフレキシブルシートを用いて流力振動の制御を行ったものである. 本実験で使用したフレキシブルシートの重さおよび柔軟性は, 供試物体の円柱に比べて無視できる非常に軽くて柔軟性を持つものである. 実験は, 円柱を弾性支持する自由振動装置に取り付けて, フレキシブルシートの長さ l を円柱直径 D の0.5~3.0倍まで6通りに, またフレキシブルシートの取り付け角度 θ (θ : 円柱の背面側よどみ点から測った角度)を $-90^\circ \sim 90^\circ$ まで5通りに変化させて, 流力振動特性を調べ, 流力振動の抑制に最適な長さ l および取り付け角度 θ を調べた. また円柱の幅 L (スパン方向の長さ)に対して最適なフレキシブルシートの幅 T についても調べた. さらに最適幅のフレキシブルシートを均等に分割したストリップ形シートを取り付けた時の流力振動特性も調べた. あわせてフレキシブルシートによって円柱の流力振動が最も抑制された時のフレキシブルシートの形状を剛性のある物体で再現し, フレキシブルシートの

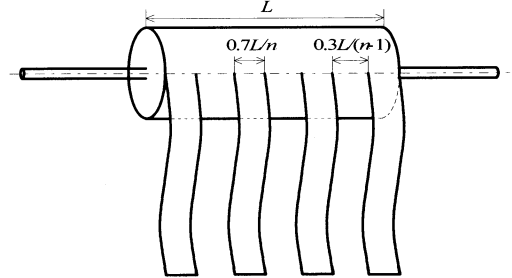
形状と柔軟性による流力振動の制御メカニズムを明らかにしたものである.

2. おもな記号

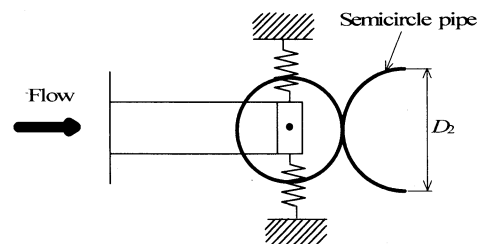
- a : 流れと直角方向の振動振幅 (RMS 値)
- D : 供試円柱の直径
- f_c : 円柱の固有振動数
- L : 円柱のスパン方向の長さ
- l : フレキシブルシートの長さ
- n : フレキシブルシートの等分割数
- Re : レイノルズ数 $[=U_0 \cdot D/\nu]$
- T : フレキシブルシートの幅
- U_0 : 主流の流速
- U_r : 換算流速 $[=U_0/(f_c \cdot D)]$
- θ : フレキシブルシートの取り付け角度
- ρ : 流体の密度
- ν : 流体の動粘度



(a) Attachment of flexible sheet



(b) Attachment of split flexible sheet



(c) Attachment of semicircle pipe

Fig.1 Experimental arrangement and definitions of symbols.

3. 実験装置および方法

円柱の流力振動特性を調べる自由振動実験は、測定部断面が $0.3\text{m} \times 1.2\text{m}$ 、長さ 2.3m の測定部を有する環流型風洞を用いて行った。実験に用いた円柱は直径 66mm であり、内部に直径 10mm のアルミ製支持シャフトを有している。円柱は十分な軽量化を図るために紙製の円筒にし、その表面には薄いアルミ板を張り付けた。円筒端面には薄いプラスチック製の円盤をはめ込んで支持シャフトと接続した。支持シャフトを含む円柱の質量は 241g である。供試円柱は、図1に示すように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厚さ 0.3mm の2枚の板バネ(磷青銅板)に取り付けた。またこの板バネを上下からコイルバネによって支持し、円柱が上下方向のみに振動(クロスフロー振動)出来るようにした。供試円柱の振動変位は、レーザー変位計によって測定した。また主流の速度は、測定部入口に設置したプロペラ式流速計を用いて測定した。実験に当たっては、 10Hz の固有振動数を有する供試円柱の換算減衰パラメータ $C_n = [2m_0 \cdot \delta / (\rho \cdot D^2)]$ 、 m_0 : 単位長さ当たりの円柱の質量、 δ : 対数減衰率)を 6.23 と一定とした。フレキシブルシートは厚さ約 0.02mm 、重さ $1.32\text{g}(l=2.5D)$ の場合での接合テープの重さを含む)のポリエチレン製であり、図1に示すようにフレキシブルシートの長さ l は $0.5D \sim 3.0D$ の範囲において $0.5D$ 間隔で6通りに、取り付け角度 θ を -90° 、 -45° 、 0° 、 45° および 90° の5通りに変化させて、

流速の変化に対する流力振動特性を調べた。共試円柱にフレキシブルシートを取り付ける際、その接合部分はフレキシブルシートの端 3mm 程度を 90° に折り、円柱表面に対して直角になるように両面テープで固定することによって接合部分がフレキシブルシートの挙動に影響を与えないようにした。測定時の換算流速 U_r 、 $[=U_0/(f_c \cdot D)]$ は $1.5 \sim 26$ の範囲で変化させた。なお換算流速 U_r の変化は、主流の流速 U_0 を変えること($1 \sim 17\text{m/s}$ の範囲)によって行った。この時のレイノルズ数 Re の範囲は $4365 \sim 74200$ であり、亜臨界レイノルズ数の範囲である。またフレキシブルシートの幅 T は $0.4L \sim 1.0L$ の範囲において $0.1L$ 間隔で7通りに変化させ、円柱の流力振動が抑制できる最小の幅を調べた。さらにその最小幅を持つフレキシブルシートを図1(b)に示すように2, 3, 4および5等分割したストリップ形のものや三角形のフレキシブルシートを取り付けた時の流力振動を調べた。またフレキシブルシートによる円柱の流力振動抑制メカニズムを調べるため、制御時のフレキシブルシートの形状が円柱背面で半円筒形になることに着目し、柔軟性のない剛性のある半円筒形パイプを円柱背面に設置した場合の流力振動および後流渦による速度変動の強さを調べた。なお半円筒形パイプ設置時における固有振動数および換算減衰パラメータはパイプの質量が円柱の $1/10$ 程度(26.8g)であるため、パイプ非設置時の円柱と同程度のものであった。

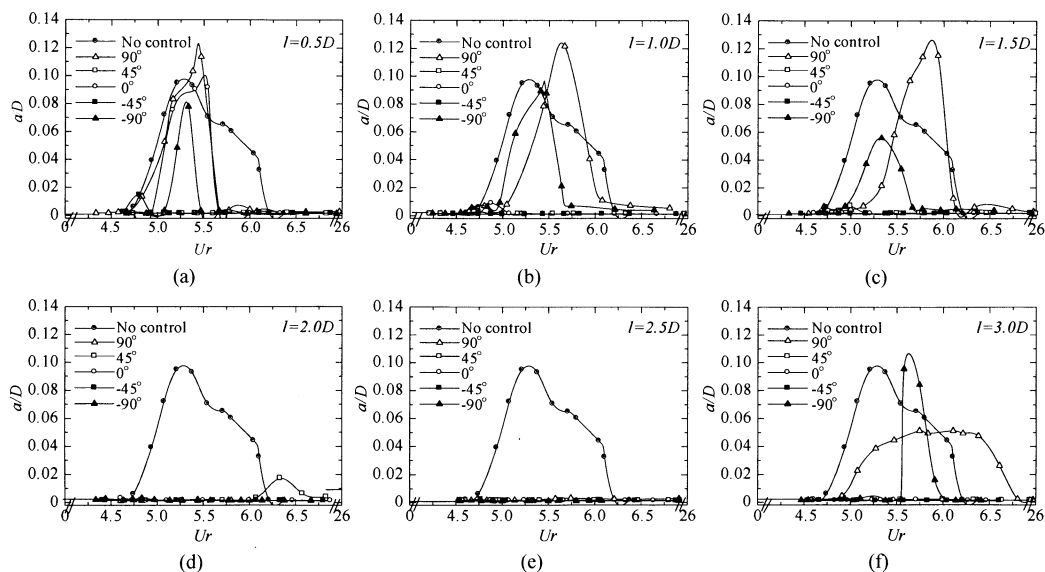


Fig.2 Vibration characteristics of cylinder attached with flexible sheet in various length and installation angle.

4. 結果および考察

4.1 フレキシブルシートによる流力振動制御

図2はフレキシブルシートの長さ l および取り付け角度 θ の相違による円柱の流力振動特性を示したものである。この時のフレキシブルシートの幅 T は供試円柱の長さ $L(287\text{mm})$ と同一である。また、比較のために無制御時の円柱の流力振動特性も示してある。横軸には換算流速 U_r を、縦軸には振動振幅 $a(\text{RMS})$ を円柱の直径 D で無次元化した a/D を示している。図から分かるようにフレキシブルシートの長さおよび取り付け角度 θ の相違によって円柱の流力振動の制御効果は大幅に異なるものとなる。

まず、図2(a)のようにフレキシブルシートの長さ l が $0.5D$ の時はシートが短いため、円柱の流力振動を抑制できる取り付け角度は -45° と 45° のみである。他の取り付け角度では無制御時の流力振動とほぼ同様な流力振動が発現する。また図2(b), (c)のようにフレキシブルシートの長さ l を $1.0D$ および $1.5D$ と長くした場合、流力振動を抑制できる取り付け角度は $\theta = \pm 45^\circ$ と 0° である。図2(d), (e)のようにフレキシブルシートの長さ l を $2.0D$ および $2.5D$ にすると、 $\theta = -90^\circ \sim 90^\circ$ のすべての取り付け角度において円柱の流力振動が抑制される。しかし図2(f)のようにフレキシブルシートの長さ l が $3.0D$ になると、流力振動の制御効果が減少する。

4.2 最適フレキシブルシート長さおよび取り付け角度

図2に示したフレキシブルシートの長さ l および取り付け角度 θ の相違による円柱の流力振動の抑制効果をまとめたものが図3である。図中の●印が付けられた条件が円柱の流力振動の発現を抑制できたフレキシブルシートの長さおよび取り付け角度を示している。なお抑制できたかどうかの判定は振動振幅が無制御時の20%以下まで減少した場合を抑制効果あ

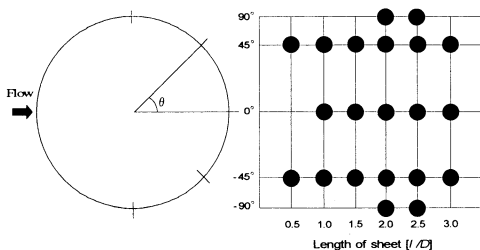


Fig.3 Summarized results of suppression results for various length and installation angle of flexible sheet.

りとした。図3に示すように流力振動が抑制できるフレキシブルシートの取り付け角度はフレキシブルシートのいずれの長さにおいても上下対称である。また円柱の流力振動を抑制する最適なフレキシブルシートの長さは円柱直径の2~2.5倍であることが分かる。しかし、 $l=2.0D \sim 2.5D$ の長さの範囲よりも短い場合あるいは長い場合には4.3節で詳しく述べるが、円柱からはく離するせん断層の抑制効果が減少し、流力振動の発現を抑制することが出来ない。また注目されることはフレキシブルシートの長さが $2.0D$ および $2.5D$ の時は円柱背面のどの位置に取り付けても流力振動を抑制することが出来ることである。すなわち、フレキシブルシートを円柱の背面に取り付けることによって1つの流れ方向に限って流力振動を制御するのではなく、円柱背面のよどみ点を中心として上下 180° の範囲のすべての流れ方向に対して流力振動の抑制効果がある。これはこれまでの制御方法が一方向の流れに対してのみ制御効果を有しているものが大部分であったことに比べて注目すべきことである。

4.3 フレキシブルシートによる流力振動制御メカニズム

図4は換算流速 $U_r=4.9 \sim 11.1$ において、フレキシブルシートの長さ $l=2.5D$ のものを取り付けることによって円柱の流力振動が抑制された時のフレキシブルシート形状の写真(a)とその模式図(b)である。この換算流速 U_r の範囲では円柱の背面に取り付けたフレキシブルシートは実験を繰り返すごとに若干の違いはみられるものの、概ね二次元的に変形し、図4のように半円筒形状になる。またこの範囲には図2に示したように無制御時の円柱に流力振動が発現する U_r の範囲が含まれている。また、この $U_r=4.9 \sim 11.1$ の範囲では、フレキシブルシートは円柱の後方で円柱の直径より若干大きい半円筒形状になる。このような現象は長さ $l=2.0D \sim 2.5D$ のフレキシブルシートを円柱背面のいずれの角度 θ に取り付けた場合でも同じ形状になる。一方フレキシブルシートの長さが $3.0D$ とさらに長くな

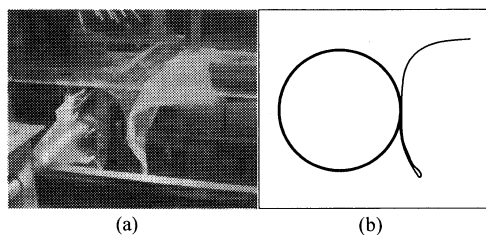


Fig.4 (a) Posture photograph of flexible sheet and (b) its sketch in the vibration region $U_r=4.9 \sim 11.1$, $\theta=0^\circ$

ると、シートが長すぎるために円柱背後で半円筒形が維持されず、形状が不安定となって流力振動の抑制効果が減少する。

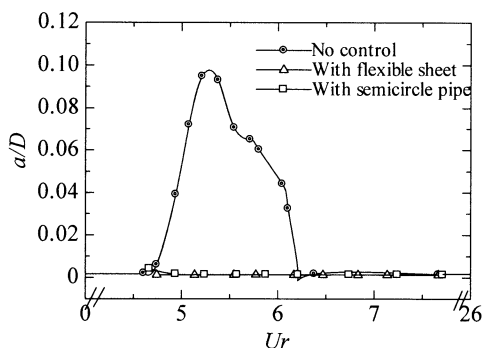
つぎにフレキシブルシートによる流力振動抑制のメカニズムを明らかにするために、図1(b)のような、流力振動制御時のフレキシブルシートの変形形状を半円筒形パイプによって再現して流力振動特性を調べた。その時の流力振動特性および後流における変動速度のスペクトル分布を示したものが図5である。あわせて比較のために無制御時の振動特性も示している。図5(a)のように半円筒形パイプを取り付けた場合は、フレキシブルシートを取り付けた場合と同様に流力振動の発現は抑制される。一方、無制御時と制御時における後流変動速度のスペクトル分布を比較すると、いずれも同じ周波数(10Hz)にスペクトルピークが存在するが、制御時のエネルギーレベルはかなり小さくなり、後流渦はかなり弱くなっている。また、フレキシブルシートによる制御時の方が半円筒形パイプの場

合よりもスペクトルピークは小さい。このようにフレキシブルシートは流力振動が発現する流速域において、円柱の後方で半円筒形状になり、円柱からはく離するせん断層と干渉してはく離せん断層の巻き込みが弱められることによって、円柱の流力振動の発現が抑制されるものと考えられる。さらにフレキシブルシートがフレキシビリティを有することは、剛体よりも円柱からはく離するせん断層に入り込み、せん断層との干渉によってはく離せん断層の構造が大きく変化し、後流における変動速度を減少させる効果がより強まると考えられる。これは円柱からはく離せん断層の位置が渦放出の不規則性により渦放出ごとに変動するが、はく離せん断層での混合による流れの連行によってフレキシブルシートの上下の端がはく離せん断層の位置変動に追従するためと思われる。

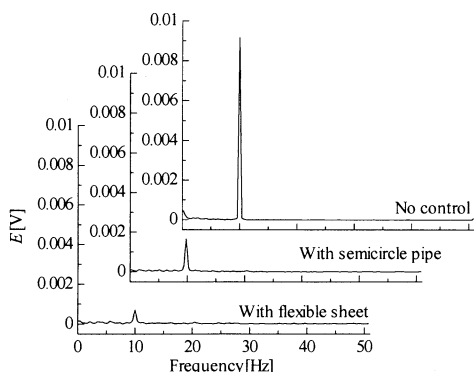
4.4 フレキシブルシートによって流力振動が制御される最小幅 T とその応用

図6は供試円柱のスパン方向長さ L に対してフレキシブルシートの幅 T を $0.4L \sim 0.9L$ の範囲で 0.1 間隔の 6 通りに変化させた時の流力振動特性の結果から特徴的な 4 通りの流力振動特性を示している。この時のフレキシブルシートの長さは $l=2.5D$ 、取り付け角度は $\theta=0^\circ$ であり、シートの中央と円柱スパン中央を合わせて取り付けた。また比較のために無制御時の円柱の流力振動特性も示している。フレキシブルシートの幅が $0.6L$ 以下になると、流力振動の制御効果は小さくなるが、フレキシブルシートの幅を $0.7L$ とした場合は流力振動が抑制され、 $1.0L$ の場合とほぼ同様の制御効果が得られているのが分かる。

図7は図6より得られたフレキシブルシートの最小幅 $T=0.7L$ を図1(b)のように均等に $2, 3, 4$ および 5 等分割して等間隔に円柱に取り付けた時 ($\theta=0^\circ$) の流力



(a)



(b)

Fig.5 (a) Suppression characteristics and (b) Power spectra of fluctuating velocity behind the cylinder when a flexible sheet is attached ($l=2.5D$, $\theta=0^\circ$), semicircle ($D_2=80\text{mm}$) is installed and no control is made.

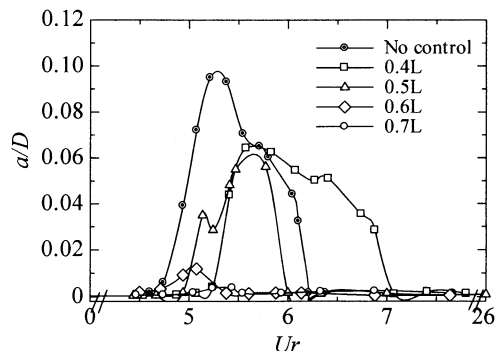


Fig.6 Vibration characteristics at various width of flexible sheet and in comparison with no controlled cylinder. ($l=2.5D$, $\theta=0^\circ$)

振動特性と、無制御時の流力振動特性を示している。これは幅広いシートを円柱に取り付けるよりも分割して取り付ける方法が容易であり、実用性が高いと考えられるためである。またフレキシブルシートを取り付けて繰り返し実験を行った際、フレキシブルシートのスパン方向の端部に磨耗が見られたため、その端部を取り除いた形状として幅 $1.0L$ 、長さ $2.5D$ の二等辺三角形とした場合の流力振動特性も調べた。図8は、 $U_r = 4.9 \sim 11.1$ での後流における変動速度のスペクトル分布を示している。図7から最小幅を持つフレキシブルシートを均等に2, 3等分割して円柱に取り付けた場合も円柱の流力振動を抑制することができることが分かる。また図8に示すように、フレキシブルシートの分割数が4以上になるほど後流における変動速度のスペクトルピークが急に高くなっている。したがって、フレキシブルシートを2, 3等分割した場合に後流における速度変動は最小幅のフレキシブルシートと同程度に減少して流力振動が抑制されるが、分割数が大きすぎると後流における速度変動はあまり抑制されず、フレキシブルシートによる制御効果は弱まる。

5. 結論

- (1) 円柱の背面にフレキシブルシートを取り付けると、シートは流力振動発現風速域において円柱背面で半円筒形状に変形し、円柱からはく離するせん断層が直接制御されることによって流力振動が抑制される。最適なフレキシブルシートの長さは円柱直径 D の2.0~2.5倍であり、シートの最小幅は円柱幅 L の0.7倍である。
- (2) フレキシブルシートによる流力振動制御は広範囲の流れ方向の変化に柔軟に対応出来る長所を有する。
- (3) 流力振動が制御できる最小幅 $T=0.7L$ のフレキシブ

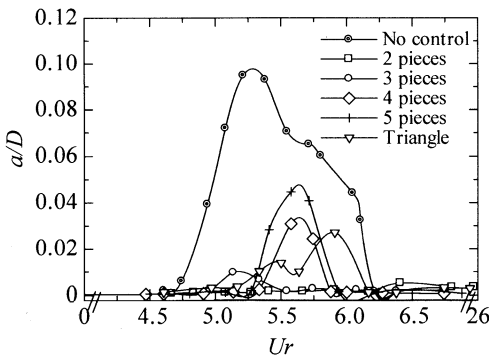


Fig.7 Vibration characteristics at various number of flexible sheet splitting and in comparison with no controlled cylinder. ($T=0.7L$, $\theta=0^\circ$)

ルシートを均等に4つ以上に分割すると、シートの総面積は同一でも流力振動の抑制効果は弱まる。

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。

参考文献

- (1) Lee, S. J., Lim, H. C., Han, M. and Lee, S. S., Flow Control of Circular Cylinder with a V-Grooved Micro-Riblet Film, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 37, No. 4(2005), pp. 246~266.
- (2) Lim, H. C. and Lee, S. J., Flow Control of a Circular Cylinder with O-Rings, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 35(2004), pp. 107~122.
- (3) Bearman, P. and Brankovic, M., Experimental Studies of Passive Control of Vortex-Induced Vibration, *European Journal of Mechanical B/Fluids*, Vol. 23(2004), pp. 9~15.
- (4) Owen, J. C., Bearman, P. W. and Szweczyk, A. A., Passive Control of VIV with Drag Reduction, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 15(2001), pp. 597~605.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Lee, S. J. and Kim, H. B., The Effect of Surface Protrusions on the Near Wake of a Circular Cylinder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69-71(1997), pp. 351~361.

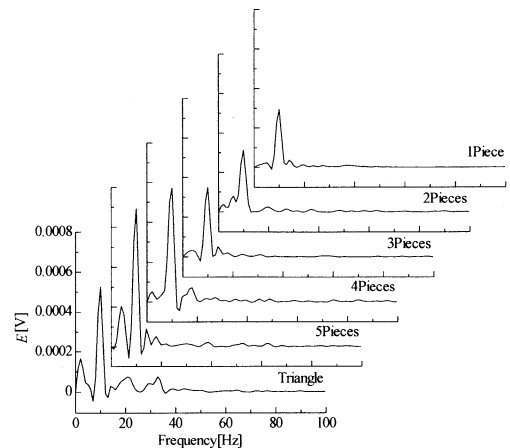


Fig.8 Power spectra of velocity fluctuation behind the cylinder at various number of flexible sheet splitting and for a triangle shaped sheet. ($\theta=0^\circ$)

- (8) Kwon, S. H., Cho, J. W., Park, J. S. and Choi, H. S., The Effects of Drag Reduction by Ribbons Attached to Cylindrical Pipes, *Ocean Engineers*, Vol. 29(2002), pp. 1945~1958.
- (9) Lee, S. J., Lee, S. I. and Park, C. W., Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of a Small Control Rod, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 34(2004), pp. 233~250.
- (10) Bouak, F. and Lemay, J., Passive Control of the Aerodynamic Forces Acting on a Circular Cylinder, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 16(1998), pp. 112~121.
- (11) 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, No. 674(2002), pp. 2772~2779.
- (12) Dalton, C. and Xu, Y., 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) Sakamoto, H., Haniu, H. and Matubara, S., Control of Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder and Its Effectiveness, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 57, No. 535(1991), pp. 882~890.
- (14) Akilli, H., Sahin, B. and Tumen, F., 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.
- (15) Ozono, S., Vortex Suppression of the Cylinder Wake by Deflectors, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91(2003), pp. 91~99.