付加物が渦励振に与える影響の実験

正会員 千 賀 英 敬* 学生会員 山 本 祐 樹**

Experiments of the Appendage Effect on Vortex Induced Vibration

by Hidetaka Senga, *Member* Yuki Yamamoto, *Student Member*

Summary

In Ocean development, many cylindrical shape structures are in use. These structures are subjected to many external forces, such as water current, waves and reaction force from the upper structure. Especially, the lift force induced by the shedding vortices cause the vibration of the structures. This phenomenon is called Vortex Induced Vibration, VIV. It is assumed that VIV causes fatigue damages on the structure because it contains high frequency component of vibration and it increases in drag force on the structure. One of the solutions to decrease VIV, the appendage such as splitter plates or fairings is used to be attached on the structures. However, it may happen that such appendages increase the amplitude of VIV in some situations. Meanwhile, for actual use, it must be considered not only the decreasing performance but also the ease of handling. If we use Computational Fluid Dynamics, it is easy to modify the shape of the appendage and simulate its performance in different circumstances. Before that, it is needed to reveal the influence of the motion and flow field around the structure with the appendages.

In this study, a rigid circular cylinder with or without appendage was supported by coil springs in the circular tank. The motion and rotation of the cylinder were measured by tracking the markers attached on its cross section. In the same manner, those of the appendage were also measured. The flow field around the cylinder was visualized by PIV. Experimental results show that the appendage, such as splitter plate or fairing, sometimes can't decrease the amplitude of VIV. They also show that the appendage which can shorten the distance between the shedding vortices near the cylinder can decrease VIV.

1. 緒 言

海洋開発の分野において、円柱形状の構造物が数多く利用されている。比較的小さな径のものでは曳航体の曳航ケーブル、また径の大きなものでは海底掘削に用いられる管や浮体式構造物の支柱などがあげられる。これらの円形断面構造物には潮流、波、また連携する構造物からの反力など、様々な外力が作用する。それらの中でも、構造物から剥離する渦により生じる揚力は渦励振(Vortex Induced Vibration, VIV)と呼ばれる振動現象を引き起こす。渦励振には主運動と比較して高周波の振動成分が含まれており、長大弾性管の疲労破壊の原因となり得る。また主運動方向の抗力増加を引き起こすことも知られている¹⁾。

海中線状構造物、海洋構造物、曳航ケーブル²⁾などの円形断面構造物に生じる抗力や発生する渦励振を軽減させるた

め、スプリッタ板や翼形状等の付加物が利用されてきた。しかしながら、使用環境によっては意図した軽減効果が得られないことや、逆に渦励振を増大させることもある^{3),4)}。

これらの付加物は、渦励振の軽減性能だけではなく、取り付けの簡便さや実作業の妨げにならない形状であることも考慮されるべきである。数値計算を用いて、付加物の形状を容易に変更し、渦励振軽減性能の検証が可能となれば、高効率な付加物の形状設計が容易となる。しかしながら、付加物を取り付けることによって円形断面構造物の挙動や周りの流場がどのように変化するかを実験しておくことも重要であると考えられる。

本研究では、数値計算に先立ち、付加物が円形断面構造物に及ぼす影響の実験を行った。その結果を報告する。

2. 実験方法

大阪大学の小型回流水槽にて実験を行った。この回流水槽は、 $1.0\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ の観測部を持ち、発生させることが出来る最大流速は 1.0m/s である。この水槽内に剛体円柱の両端を固定またはコイルばねを用いて支持し、一様流を与えた。円柱に取り付けた付加物については後述する。円柱の断

* 大阪大学大学院工学研究科

** 三菱電機(研究当時 大阪大学大学院工学研究科)

面にマーカーを貼り、円柱の運動を計測した⁵⁾。円柱の変位だけでなく、回転も計測出来るように、マーカーは複数点に貼った。流速に水平で下流方向を+x軸、また流速に対して垂直上向き方向を+y軸とした。また可視化用レーザーを照射して円柱後方の2次元断面内を流れる粒子を可視化した。実験に使用した円柱は可視化用レーザーを通しやすいよう、透明なアクリル製である。円柱の運動と周囲の流場は、1台のハイスピード CCD カメラにより撮影した。したがって、解析において運動と流場の間に時間のずれは生じない。

円柱の水中重量はゼロに調整し、円柱両端からの巻き込み流れによる3次元影響を除くため、両端に円形のエンドプレートを取り付けた。使用した回流水槽と模型を Fig. 1 に、実験装置の配置を Fig. 2 に、円柱模型の仕様を Table 1 に示す。

Fig. 1 Circular tank (left) and cylinder model (right).

Fig. 2 Experimental set up.

Table 1 Principle particulars of circular cylinder.

Mass in air	137.4 g
Diameter	30 mm
Span	150 mm
Natural Frequency	
in horizontal direction (x)	2.93 Hz
in vertical direction (y)	3.13 Hz

今回の実験で円柱模型に与えた一様流は 0.24, 0.32, 0.39, 0.47, 0.53 m/s, レイノルズ数は約 5000~20000 である。

円柱に取り付けた付加物は、スプリッタ板と翼型を用いた。付加物の素材は、円柱と同様に透明なアクリル、または透明な塩化ビニルを用いた。付加物の断面には、黒色のテープを貼った後、運動・回転計測用のマーカーを貼った。付加物の回転 θ は、撮影断面の画像内において、反時計回りを正とした。円柱の直径を D とし、付加物単体の長さは $0.5D$, $1.0D$, $1.5D$ のものを準備した。付加物を取り付けた後の円柱断面の長さ L は、 $1.5D$, $2.0D$, $2.5D$ である。付加物の幅は円柱の幅と同じく 150 mm とした。付加物と円柱間の摩擦を軽減させ、付加物のみが自由に回転するように、付加物はテフロン製のリングを介して円柱に取り付けた。テフロンリングの幅は 10 mm である。これらの付加物の写真を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 Cross-section view of the appendages.

3. 実験結果

3.1 両端固定支持された円柱への付加物の影響

円柱の両端が固定されている場合に、付加物がおよぼす流場への影響を実験した。この支持条件では円柱の変位は生じないため、付加物の回転角の時系列から、FFTにより回転の周波数と角度を求めた。例として、Fig. 4に $0.5D$ の翼型付加物を取り付けた場合の、付加物の回転周波数を示す。

Fig. 4 Frequency of the appendage's rotation.

Fig. 4において、流速 $U = 0.24 \text{ m/s}$ の条件下での円柱の回転周波数が非常に小さい値となっている。これは、付加物が一定の角度まで回転した後には止まったためである。 $L=0.5D$ のスプリッタ板を取り付けた場合には、 $U = 0.24 \text{ m/s}$ の時に計測の途中で付加物の回転が止まった(Fig. 5)。このように付加物の回転が止まった原因は、流速が比較的小さいために剥離渦による流体力が小さいこと、また可視化用の粒子が円柱とテフロンリングとの間に挟まり、摩擦力が大きくなったためである。実際に、一度回転の止まった付加物に外力を与えて強制的に運動させた後、付加物は再び流体力による回転運動を行った。付加物の回転が止まる角度については再現性があった。したがって、付加物が止まった角度にある時に生じている流体力が、付加物の回転に対して最も安定な状態であると考えられる。

Fig. 5 Time history of the appendage's rotation angle.

付加物の回転周波数は、渦の流出周波数と直接関連していると考えられる。撮影した画像を解析することで、時間 t の関数として付加物の回転角の時系列 $\theta(t)$ を求め、付加物回転周波数と、付加物が取り付けられていない円柱からの渦の流出周波数を比較した。Fig. 6に円柱のみの場合の渦の流出周波数、 $0.5D$ のスプリッタ板と翼型付加物の回転周波数を示す。同図に示されるように、スプリッタ板を取り付けた場合、付加物の取り付けられていない円柱からの渦の流出周波数よりも大きくなっている。一方で、翼型の付加物を取り付けた場合、渦の流出周波数は小さくなっている。この周波数の変化について、PIVを用いて円柱後方近傍の流場を解析することによって考察する。

Fig. 6 Frequencies of vortex shedding and appendage rotation.

付加物の取り付けられていない円柱、また各付加物を取り付けた円柱後方近傍の流場の速度ベクトルを Figs. 7に示す。代表例として、付加物の大きさは $0.5D$ 、流速は $U = 0.47 \text{ m/s}$ である。付加物を取り付けた場合については、付加物の回転の半周期間の代表的な流場を載せている。図中の破線の円は、円柱近傍の渦の位置を示している。また円柱内の矢印は付加物の回転方向とその速度を模式的に表したものである。

付加物が取り付けられていない場合、円柱の後方近傍で上下に渦が交互に流出していることが確認できる。

Fig. 7 Flow field around the cylinder and appendage.

0.5D のスプリッタ板を取り付けた場合、スプリッタ板は一樣流速の影響と板の下側端から剥離する渦により $-\theta$ 方向に回転する(B-1)。その際に、板の上側に渦が発生する。この渦は、スプリッタ板が $-\theta$ 方向へ回転する間は剥離せずにスプリッタ板の後ろに留まる(B-2 B-3)。一樣流速の影響でスプリッタ板が $+\theta$ 方向に回転し、またスプリッタ板の上側に留まっていた渦が剥離することにより、スプリッタ板は $+\theta$ 方向にさらに回転する(B-4)。このように、スプリッタ板が回転する際、その後方に渦が生成されるため、付加物がない場合と比べて渦が生成される周期が短くなり、その結果流出周波数が大きくなったと考えられる。今回の実験結果から、渦生成の周期がどの程度変化したのかを正確に求めることができなかった。今後、数値計算手法を確立し検討したい。

一方で、翼型の付加物を取り付けられた場合、翼型付加物が一樣流速の影響と翼端下側から剥離する渦により $-\theta$ 方向に回転する際、翼型上部に強い渦は生成されていない(C-1, C-2)。翼型付加物が $+\theta$ 方向に回転する際も同様であった(C-3, C-4)。付加物がない場合と比べると、翼型付加物を取り付けられている場合は、渦の発生位置(C-3)からその渦の剥離位置 (C-4) までの距離が離れていることが確認できる。その結果、渦の流出周波数が小さくなったと考えられる。

3.2 両端ばね支持された円柱への付加物の影響

前節は、付加物が両端固定支持された円柱に与える影響の実験を行った。本節では、円柱両端の支持条件をばね支持とし、弾性的な円形断面構造物に付加物を取り付けられた場合の影響を実験する。両端ばね支持条件の実験においても、発生させた一樣流は 0.24, 0.32, 0.39, 0.47, 0.53 m/s である。また付加物の形状とその長さは、固定支持条件と同じスプリッタ板と翼型でそれぞれ 0.5D, 1.0D, 1.5D を使用した。撮影した画像を解析することで、時間 t の関数として円柱中心の変位 $x(t), y(t)$ の時系列を求めた。その時系列データから、渦の流出周波数と直接関連する円柱の y 軸方向運動の周波数を算出し、横軸を与えた一樣流速として整理した(Fig. 8)。

同図より、どの付加物であっても、 y 軸方向運動の周波数が減少し、付加物の長さが長いほど、大きく減少している。付加物の長さを変えることにより、意図的に渦励振の振動数を変化させることが可能であることがわかる。

Fig. 8 Vibration frequency of the cylinder in Y direction.

次に、付加物の有無による円柱の運動を比較するため、2次元平面内での円柱中心の運動の軌跡の一例($U = 0.47$ m/s)を Fig. 9 に示す。図中の横軸と縦軸はそれぞれ画像解析により時間 t の関数として得られた円柱中心の変位 $x(t)$ および $y(t)$ を、円柱の直径 D で除した無次元値である。

Fig. 9 Trajectory of the cylinder. ($U = 0.47$ m/s)

Fig. 9 を見ると、同じ流速下であっても円柱中心の軌跡が異なっていることがわかる。これは付加物の形状や有無によって、円柱の運動に大きく影響を与える渦の流出位置が変化しているためである。同図からは、付加物を付けたことによる渦励振の振動振幅(y 軸方向)の大きな減少は見られない。

Table 1 に示す通り、円柱の y 軸方向の固有振動周期は 3.13 Hz である。一方で 0.5D のスプリッタ板や翼型を取り付けた場合、Fig. 8 に示される通り、円柱の y 軸方向振動数は両付加物とも 2.5 Hz 以下である。付加物を取り付けたことにより、共振が起きる振動周波数でなくても、 y 軸方向の振動振幅は増大してしまっている。

主流方向である x 軸方向の振動振幅は、1.5D のスプリッタ板や翼型を取り付けられた場合では減少している。また x 軸方向の振動の中心位置は、翼型付加物を取り付けられた場合、円柱の初期位置である $(x, y) = (0, 0)$ に近づいている。これは付加物の整流作用により、主流方向の抗力が減少したためである。

付加物を取り付けたことで2次元平面内の円柱の運動振幅には大きな変化は見られなかったが、振動周波数が減少している。つまり、付加物を取り付けたことで1回の振動の周期が長くなっており、渦励振の運動は付加物を取り付けない場合よりも軽減されていると考えられる。

両端がばねで支持されている円柱の運動と付加物の影響

により、円柱周囲でどのように渦が発生するのか、PIV を用いて流場を解析した一例 ($0.5D$ の翼型付加物、一様流速 $U = 0.47\text{m/s}$) を Fig. 10 に示す。同図において、破線の円は、渦の位置を示している。また円柱や付加物中の矢印はそれぞれの運動方向と回転方向を模式的に示している。

$0.5D$ の翼型付加物に取り付けられている場合、Fig. 9 に示されるとおり、円柱中心の運動の軌跡は一様流方向に伸びた“8”字型をしている。Fig. 10 の D-1 は円柱が8字の右下にきた後、つまり円柱の右下に渦が生じ、円柱が右下に移動し終わり、ばねの反力で左上に進む時を表している。この時、円柱右下の渦により、付加物は $-\theta$ 方向に回転する。その後、円柱はばねの反力と一様流により、8字の交差する点を通り過ぎ、右上方向へ移動する(D-2)。そして、円柱右上側に発生する渦により、円柱はさらに右上へと移動する。D-3 は D-1 から8字の運動の $1/2$ 周期後の状態である。円柱右上に位置している渦により、付加物は $+\theta$ 方向に回転する。付加物の回転により、渦が円柱と付加物から剥離する位置が遠くなったため、 y 軸方向運動の周波数が減少したと考えられる。

Fig. 10 Flow field around the cylinder with $0.5D$ fairing.

次に、円柱と付加物の回転角を考察した。例として、一様流速 $U = 0.47\text{m/s}$ における付加物を取り付けていない円柱の回転角、 $0.5D \sim 1.5D$ までの翼型付加物を取り付けた場合の円柱と付加物の回転角の時系列を Figs. 11 に示す。同図より、付加物に取り付けられた円柱の回転角は、付加物に取り付けられていない円柱の回転角よりも大きくなっている。これは円柱と付加物との間の摩擦力が影響していると考えられる。付加物が長くなるほど、円柱と付加物の回転角の差は小さくなっていること、また円柱と付加物の回転角時系列の位相差も小さくなっていることから、円柱と付加物との間に働く摩擦力は、付加物が長いほど大きくなっていると考えられる。

Fig. 11 Time histories of the cylinder's and the appendage's rotation angle.

3.3 付加物が円柱に固定されている場合の影響

前節で、付加物が回転することにより、渦の剥離位置が変化し、 y 軸方向運動の周波数が減少していることがわかった。また円柱と付加物の間の摩擦は、付加物の回転に影響する。したがって、円柱と付加物間の摩擦力を変化させることによる、円柱の運動振幅や周期への影響を実験する必要があると考えられる。CFD を用いれば、円柱と付加物間の摩擦力を任意に変更することが可能であるが、実験においては困難である。本研究では円柱と付加物間の摩擦力が最大である場合のみを考え、付加物を円柱に固定し、前節までと同様の実験を行った。付加物が直接円柱に取り付けられているため、付加物のみの回転は生じない。したがって、円柱の両端はコイルバネを用いて支持した。付加物と円柱は一体となり運動を行う。流体力により、円柱両端の支持位置（円柱の中心）まわりのモーメントが働き、円柱と付加物は回転する。本実験において、この回転はコイルばね自身の振れと、ストラットに取り付けられたフック間の遊びによって許容される (Fig. 12)。この回転は弾性円形断面構造物の振れを模擬している。

Fig. 12 Allowance between the coil spring and hook.

円柱に取り付けた付加物は、スプリッタ板と翼型でそれぞれ $0.5D$, $1.0D$ を使用した. 与えた一様流速は, $0.24, 0.32, 0.39, 0.47 \text{ m/s}$ である. 前節と同様な解析方法を用いて, 渦の流出周波数と直接関連する円柱の y 軸方向運動の周波数を算出した(Fig. 13). また円柱中心の運動の軌跡を Figs. 14 に示す.

同図より, 付加物を取り付けた場合, 円柱模型の振動数が減少していること, また円柱中心の運動の軌跡が異なっていることから, 付加物を取り付けることにより, 渦の流出位置が変化していることがわかる. $0.5D$, $1.0D$ のスプリッタ板を取り付けた場合では, 付加物を取り付けていない場合より x 軸方向の運動振幅は小さくなっているが, y 軸方向の運動振幅はあまり変化していない. $0.5D$ の翼型を取り付けた場合では, 他の付加物を取り付けた場合の運動と異なり, 円運動を行っている. この場合の運動振幅は x, y 軸方向ともに減少しており, 運動振幅の面において渦励振は軽減されていると言える. 一方, $1.0D$ の翼型を取り付けた場合では, 付加物を取り付けていない場合よりも x, y 軸方向ともに運動振幅は増加しており, 渦励振を増大させている. これは, $1.0D$ の翼型を取り付けた場合の揚力中心($1/4$ 翼弦長)が円柱断面の中心(支持しているコイルばねの位置)にくるためである²⁾.

Fig. 13 Vibration frequency of the cylinder in Y direction.

Fig. 14 Comparisons of the cylinder's trajectory with different appendage under the condition of $U = 0.36$ and 0.41 m/s .

渦励振の軽減が顕著にみられた $0.5D$ の翼型について, 他の付加物とどのように異なっているのかを考察する. 円柱中心の運動の時系列を Fig. 15 に示す. 一様流速は $U = 0.47 \text{ m/s}$, x, y 軸方向の変位は円柱直径 D で除した無次元値である. 付加物に取り付けられていない円柱の場合, x, y 軸方向ともに規則的な振動を行っており, x 軸方向の運動は y 軸方向の運動の倍の周期で運動している. したがって, 円柱中心の軌跡は Fig. 14 に示されるような“8”字型を描く渦励振が生じている. 一方で, $0.5D$ の翼型を取り付けた場合, x, y 軸方向ともに振動振幅は小さく, 両者の振動周期は同じである. 結果として, 円柱中心の軌跡は円を描くことになる. y 軸方向に $0.5D$ 程度の振動が発生した場合であっても, その後すぐに振動が収まっていることがわかる. 振動振幅・振動周期の両面で渦励振が軽減されている.

Fig. 15 Comparison of the time histories of the cylinder motion.

$0.5D$ の翼型を取り付けた場合の円柱の回転角を, 全ての一様流速について時系列で Fig. 16 に示す. 付加物に取り付けられていない円柱は周期的な回転運動となっていたが(Fig. 11 の最上図), $0.5D$ の翼型が円柱に直接取り付けられている場合, いずれの流速においても, 円柱と一体となった付加物は周期的な回転を行っていない. 一様流速が 0.24 m/s の時は, $+45$ 度付近で, またそれ以外の一様流速の場合は -45 度付近で小さく回転している. 同じ流速での計測を数回ずつ行った結果, この回転角の正負は任意であった.

Fig. 16 Time histories of the cylinder's rotation angle.

円柱中心の運動の軌跡と回転角から、 $0.5D$ の翼型が取り付けられた円柱が周期的な渦励振ではなく、一定の回転角度を保ちながら円運動を行っていることがわかった。最後に、円柱周囲の流場を可視化し、渦がどのように発生しているか解析した。Figs. 17 に、付加物を取り付けていない場合と $0.5D$ の翼型を取り付けた場合の円柱周囲の流場の一例を示す。一樣流速は $U=0.41\text{m/s}$ で、流向きは同図の左から右方向である。

Figs. 17 Comparison of the flow field around the cylinder.

同図において、付加物に取り付けられていない円柱の後方流場には、カルマン渦が発生していることがわかる。一方で $0.5D$ の翼型が取り付けられた円柱の後方流場にも上下に渦の存在が確認できる。しかしながら、それらの渦の前後方向(一樣流方向)の間隔は、付加物なしの場合の渦の間隔と比べて非常に近いことがわかる。これらの渦は順次、円柱から離れて行くが、渦の前後位置が近く、上下の渦による揚力が打ち消しあい、渦励振が軽減されたと考えられる。

4. 結 言

付加物が円形断面構造物に及ぼす影響の実験を行った。回流水槽内にて、剛体円柱の両端を固定またはコイルばねで支持し、一樣流速を与え、円柱の運動と周囲の流場を計測した。付加物は、テフロンリングを介して円柱に取り付けた。また、付加物の回転は渦の流出周波数に影響を与えるため、付加物の回転に影響する、付加物と円柱間の摩擦に着目した。両者

間の摩擦を任意に変更して実験を行うことが困難であったため、付加物を円柱に直接取り付け、両者が一体となって回転する場合の付加物の形状による渦励振への影響を実験した。その結果、以下の結論を得た。

1. スプリッタ板や翼型等の付加物を単純に取り付けると、場合によっては、共振の起きる振動周波数でなくても渦励振の振動振幅を増大させることを確認した。
2. 付加物を取り付けた場合の渦の流出周波数は、取り付ける付加物の断面の長さに関係している。付加物の断面長さを調整することにより、渦励振による円柱の振動数を意図的に変化させることが可能である。
3. カルマン渦の流れ方向の間隔を変化させることが可能な付加物は、渦励振を軽減可能である。

円形断面構造物が受ける流速の方向が一定であるか、曳航ケーブルのように円形断面構造物自身にある程度の振れが許容される場合、付加物を直接構造物に取り付けて渦励振を軽減する本研究の手法は有効である。しかしながら、時々刻々と流向が変化する潮流に対しては対応することができない。今後、付加物のみが回転できる取り付け方で、付加物と円柱間の摩擦を変化させ、その影響を調べる必要があると考える。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(若手 B: 23760782)により実施した。関係者各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Blevins, R.D.: Flow-Induced Vibration 2nd edition, Krieger Publishing Company, 2001.
- 2) 中村昌彦, 小寺山亘: ケーブルフェアリングに関する実験的研究, 関西造船協会誌, 第 218 号, pp. 315-323, 1992.
- 3) 河井宏允: スプリッタ板を有する円柱の振動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989
- 4) 三原宏昭, 河井宏允: スプリッタ板付き円柱の渦励振について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990
- 5) 山本祐樹, 千賀英敬, 鈴木博善: 一樣流中における円柱の運動及び流場解析, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2010