柔軟な弾性表面を持つ円柱表面に発生する進行波による抗力低減*

田地川 勉^{*1}, 大場 謙吉^{*2}, 岩津 雅^{*3}Drag Reduction Caused by Traveling Wave Occurring on
the Surface of Elasto-Flexible CylinderTsutomu TAJIKAWA^{*4}, Kenkichi OHBA and Masashi IWATSU^{**} Department of Mechanical and Systems Engineering, Kansai University,
3-3-35 Yamate-cho, Suita, Osaka, 564-8680 Japan

It is important to fluid mechanics and bio-fluid mechanics to understand an interaction among deformable surface, its surface, its surrounding flow field and hydrodynamical forces. In order to clarify this interaction by experiments, we have been using several cylinder models having an elasto-flexible surface in uniform water flow. The hydrodynamic forces were measured by a three-component force balance. The deformation of the surface and the flow field around it were visualized using a laser light sheet method simultaneously. The experimental results showed that the time-averaged hydrodynamical drag was approximately 20% lower than that of the rigid cylinder when the continuously occurring wave appeared on the surface. In the case of the drag reduction occurrence, the power spectra of the lift fluctuation were broadened and had several peaks. In particular, the prominent frequency of power spectrum was about 45% lower than the frequency in the cases of the rigid cylinder and of no drag reduction occurring. The visualization results suggested that the strength of the Karman vortex shed from the cylinder was decreased compared with that from the rigid cylinder and this decrease was responsible for the above mentioned drag reduction.

Key Words: Drag Reduction, Traveling Wave, Flexible Surface, Flow Separation, Vortex, Shear Flow Instability

1. 結 言

生物に関する流れの問題を扱う生物流体力学(Bio-Fluid Mechanics)では、生物特有の容易に変形可能な表面をもつ身体(物体)と流れの間の相互作用を考えることは非常に重要である。

たとえば、遊泳中の魚やイルカの運動効率が良いらしいことが知られており⁽¹⁾、これは遊泳中に流れの影響によって彼らの皮膚が変形・振動し、流れに影響をあたえるためではないかと考えられている⁽²⁾。

筆者らは、変形可能な弾性表面と流れの間の相互作用を解明するため、水棲動物、特にグレイのパラドックス⁽³⁾としてその運動効率の良さが知られているイルカの皮膚構造に着目し、彼らの変形しやすい表皮を模擬・簡略化した柔軟な弾性表面を持つ円柱モデルを作成し、弾性表面の変形がその周りの流れ場や流体力に及ぼす影響について、実験的研究を行ってきた。

前報⁽⁴⁾では、円柱モデルの弾性表面が流れの影響により受動的に変形することで、その表面に高速遊泳時のイルカの腹部に見られるような進行波⁽²⁾が発生することを確認した。この進行波には、3種類の発生様式があり、その中でも“絶え間なく発生する波”と“発生・停止を周期的に繰り返す波”の特性を明らかにし、抗力低減の可能性について述べた。また、流れ場の観察を行うことで、弾性表面に発生する進行波の発生と伝播のメカニズムについて考察を行った。

本報では、弾性表面に進行波が発生したときに、モデルに働く抗力が、剛体円柱と比べ減少する場合があったことから、モデル周りの流れ場の可視化を行い、また揚力の時間変動波形を周波数解析することで、モデルの弾性表面の変形が、流体力におよぼす影響を明らかにし、抗力低減のメカニズムについて考察したので報告する。

記 号

x, y, z : 主流、流れに垂直、円柱軸方向の座標 m
 U_{∞} : 主流速度 m/s
 d_{RC} : 剛体円柱の直径 m
 f_{KV} : はく離(カルマン)渦対の放出周波数 Hz

* 原稿受付 2000年10月18日。

^{*1} 正員、関西大学大学院(☎ 564-8680 吹田市山手町 3-3-35)。^{*2} 正員、関西大学工学部。^{*3} 准員、三菱重工業(株)(☎ 729-0393 三原市糸崎町 5007)。

E-mail: ga9d601@ipcku.kansai-u.ac.jp

f_{LH}	: 揚力の時間変動波形の卓越周波数	Hz
Re	: モデル直径に関するレイノルズ数($=U_{\infty}d/\nu$)	
$\bar{D}$	: 抗力の時間平均値	N
$\bar{D}_{RC}$	: 剛体円柱に働く抗力の時間平均値	N
$\bar{C}_D$	: 抗力の時間平均値から求めた抗力係数	

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置 本研究でもちいた実験装置の概略図を図1に示す。本実験では、小型回流水槽（株）西日本流体技研）をもちい一様な流れ場を発生させた。

円柱モデルは、流れに対して垂直になるように観測部の流路中心に3分力検出器を介して水槽に設置した。本実験での主流速度は、モデル直径を代表長さとしたレイノルズ数($Re=U_{\infty}d/\nu$)域が約 $5.0 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^4$ になるよう、 $0.2 \sim 0.6 \text{ m/sec}$ の範囲で変化させた。また座標軸は、モデル中心に原点をとり、流れ方向にx軸、円柱軸方向にz軸、右手系に従いy軸を設定した。

2・2 実験モデル 図2に、実験モデルを示す。本報では、以下の3つのモデルを使用した。まず、本研究を従来の実験や理論との比較を行うための直径35mmの剛体円柱（以下RC）モデル、つぎに水棲生物の体が水流の全圧を受ける頭部が硬く、静圧を受ける後部が柔らかい構造であることを模擬するため、流れに対し前面部90°が剛体表面、のこり後面が柔軟な弾性表面からなり、内部に流体を封入した複合円柱（以下CC）モデル、最後にCCモデルがもつ弾性表面の効果を確認するため、CCモデルから弾性表面を取り除

いたモデル（以下NCC）を使用した。

また、実際のイルカの皮膚構造が、"皮膚（表皮）"、"皮脂（皮質）"、"筋肉"の3層で構成されていること⁽⁹⁾に着目し、この構造を模擬するため、複合円柱モデル内部中心に、内部小円柱を挿入、固定した。

弾性表面としては、直径約33mm、厚さ約50 μm のラテックスゴム製コンドーム（オカモト（株）製、ヤング率 $E \approx 2.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ ）を使用し、z軸方向に張力が掛からないよう、モデル両端で固定した。なお、静止流体中でCCモデルを水平方向および垂直方向に設置し、ラテックスゴムの受ける浮力の影響を確認したが、モデル断面の形状に違いはなかったため、浮力の影響は無視した。

さらに、円柱モデルが持つ弾性表面の流れ場に対する変形と運動の応答を変化させるため、CCモデル内部の内部円柱と弾性表面の間の空間（図2下側、水平ハッチング部）に封入する液体（以下、封入流体）の動粘度 ν_i （ $\nu_i = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$: 水、 $\nu_i = 19.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$: シリコンオイル〔信越シリコン、KF-99、比重 $s \approx 1.0$ 〕）と断面積比 A' （複合円柱モデルの弾性表面形状

Fig.1 Outline of Experimental apparatus.

Fig.2 Experimental models and coordinate system.

が z 軸方向に一樣であると仮定し、 x - y 平面における複合円柱モデルの断面積 A と剛体円柱モデルの断面積 A_{RC} ($=\pi d_{RC}^2/4$)の比 (A/A_{RC}) を断面積比 A' と定義： $A=0.80\sim0.88$ [0.02 刻み]) を変化させ、各パラメータを組み合わせる実験を行った。

各複合円柱モデルの代表長さ d は、複合円柱モデルの断面が円形であると仮定し ($A=\pi d^2/4$)、断面積比の定義から、次式のように与えた。

$$d=\sqrt{A'}d_{RC}$$

2・3 流体力の測定と流れの可視化 円柱モデルに働く流体力の測定には、歪みゲージ式3分力検出器 (日章電機 (株)、LCM-3531-2) をもちい直接測定を行った。3分力検出器からの各方向成分 (抗力・揚力・ピッチングモーメント) の電気信号は、直流増幅器で増幅したのちに、デジタルメモリレコーダで記録した。記録された各時系列データは、コンピュータ上で、フィルタリング、FFT 処理をおこない、時間平均値およびパワースペクトルを得た。

また、流体力測定と同時に、モデル近傍や後流の流れ場の可視化を行った。可視化には、水槽内に二酸化チタン表面処理を施した、平均粒径 $165\mu\text{m}$ 、比重 $s=0.99$ のポリエチレン粒子をトレーサとしてあらかじめ混入し、最大出力 6W のアルゴンイオンレーザを光ファイバとシリンドリカルレンズを使用することによってシート状光源とし、円柱モデルの x - y 平面に入射することで流れ場を可視化するレーザライトシート法をもちいた。トレーサ粒子による散乱光やシート光によって高輝度化された弾性表面の形状は、観測部下方に設置したステンレスミラーを介して、毎秒 500 コマの録画能力のあるハイスピードビデオカメラ (株) ナック、MEMORECAM_Q) によって撮影を行った。

また PIV (日本カノマックス (株)、Current PIV/PTV) を用い、流れ場の流速ベクトルと渦度分布を得た。

3. 実験結果および考察

3・1 モデルの受ける流体力 まず、それぞれのモデルが受ける抗力の時間平均値を比較するため、モデル内部に水とシリコンオイルを封入し、断面積比と主流速度を変化させ、実験を行った。

図3に、各モデルの抗力の時間平均値 $\bar{D}$ とRCモデルの抗力の時間平均値 $\bar{D}_{RC}$ の比で表したものをしめす。

この図から、CCモデルの受けた抗力は、RCモデルより最大約28%小さいことが分かった。また、粘度の高いシリコンオイルを封入した方が、断面積比の増加に対する抗力値の増加が抑制されていた。

前報⁴⁾の結果から、封入流体が水の場合 (以下 CC-W)

$A'=0.80$ 、シリコンオイルの場合 (以下 CC-S) $A'=0.80$ 、 0.82 、 0.84 において、弾性表面に“絶え間なく発生する進行波”が、また封入流体が水の場合 $A'=0.82$ 、 0.84 、 0.86 、シリコンオイルの場合 $A'=0.86$ において、“発生・停止を周期的に繰り返す進行波”が観察されており、これらの波が発生した条件においてのみ、RCモデルより抗力が低減することが分かった。また、NCCモデルはRCモデルより抗力が小さくなったが、 $U_\infty=0.40\text{m/sec}$ 以上で急激に抗力値が増加し、RCモデルとほぼ同じ値になることが分かった。

しかし CC モデルは、断面積比を変化させ実験を行っているため、それぞれのモデルの投影面積が同じではない。そこで、図4に各モデルの抗力の時間平均値から計算した抗力係数とレイノルズ数の関係をしめす。なお、抗力係数は以下の式より求めた。

$$\bar{C}_D = \frac{\bar{D}}{A_{PA} \frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$$

$$A_{PA} = l_{RS} d + (l - l_{RS}) d_{RC}$$

A_{PA} : 各円柱モデルの投影面積

l : 円柱モデルの z 軸長さ

l_{RS} : CCモデルの弾性表面部の z 軸長さ

なお、CCモデル両端にある剛体円柱と弾性表面の接続部の影響は、投影面積の中で考慮した。

この図から、投影面積の違いを考慮に入れ抗力係数を計算しても、CCモデルの抗力係数は、RCモデルより最大約22%減少することが分かった。また、抗力値は“絶え間なく発生する進行波”、“発生・停止を周期的に繰り返す進行波”が観察できた条件 (CC-W、CC-Sとも $A'=0.80\sim0.86$) において、RCモデルより小さくなったが、抗力係数は封入流体に関係なく“絶え間なく発生する進行波”が観察できた条件 (CC-W $A'=0.80$ 、CC-S $A'=0.80\sim0.84$) においてのみ、RCモデルの抗力係数より小さな値をとることが分かった。

また、NCCモデルが受けた抗力の時間平均値は、RCモデルより小さくなったが、投影面積がRCモデルの投影面積の約70%であるため、抗力係数はかなり大きな値を示しており、流れに対して良い形状ではないことが分かった。

CCモデルは、NCCモデルに弾性表面を張り、弾性表面とNCCモデルの内部小円柱との間の隙間に、液体を封入したモデルであることから、少なくともNCCモデルに対しては、変形可能な表面を持たせることによって、流体力学的特性が向上することが分かった。

次に、抗力および抗力係数を大きく関係しているモデル断面の形状と運動を観察した。

Fig. 3 Ratio of drag on CC model to it on RC model.

3・2 モデル断面の変形と流体力の関係 RC モデルの抗力とくらべ、それぞれのモデルが受けた抗力が増減する原因を調べるため、まずモデル断面形状を観察した。代表的な可視化写真を図6に示す。

図5(a)は、CCモデル表面に“絶え間なく発生する進行波”が発生している場合に、モデル断面の片側が運動する様子であり、また、可視化写真上に示した破線は、RCモデルの外径を表している。可視化写真からも分かるように、この種の波が発生しているときは、カルマン渦の放出に関係なく、モデル断面は大きく振動していなかったことから、モデルの投影面積は、RCモデルよりも小さくなっており、単純に抗力や、抗力値がRCモデルより小さくなったからと言って、抗力低減が実現できたとは言えない。

次に図5(b)は、“不規則な周期で発生する不安定な波”が発生している場合に、モデル断面の片側が運動する様子である。ここでは基本的に、“発生・停止を周期的に繰り返す進行波”や高い断面積比において進行波が観察できなかった場合も、モデル断面は同じような運動をしていたため、その一例を示してある。図3や図4に示したように、モデルに働く抗力が大きくなったモデルでは、モデル断面がカルマン渦の放出に同期して、y軸方向に大きく変形・振動しており、RCモデルよりもモデルの投影面積は大きくなっていった。また、断面の振動にともなって、モデルから放出される渦は、RCモデルと比べ大きな渦を放出していた。

これらのことから、“絶え間なく発生する進行波”が発生する条件以外では、カルマン渦の放出に伴ってモデル断面が大きく変形・振動し、また、それにともなう、大きく強い渦対が放出されるため、抗力値や抗

Fig. 4 Relationship between drag coefficient and Re.

力係数がRCモデルよりも大きくなったと考えられる。

次に、CCモデルでの抗力低減の原因を探るために、RCモデルと弾性表面に進行波が起きているモデル近傍の流れ場や後流をPIVによって解析した。

3・3 モデル近傍の流れ場 流れに置かれた物体が受ける力が変わるとことは、物体周りの流れ場も大きく変わっていると考えられる。そこで、まず円柱モデル表面から剥離する流れに注目した。

図6は、パネモデル法⁶⁾による中密度PIVにより、モデル近傍の流れ場を解析し、その結果から求めた渦度分布を等高線で示している。

なお測定精度を高めるため、各結果はハイスピードカメラにより毎秒500コマで撮影された画像から、任意のフレームを起点とした連続した6コマを抽出し、5コマ間の平均を各瞬間の渦度分布として示している。なお、モデル表面に“発生・停止を周期的に繰り返す進行波”が伝播している間は、“絶え間なく発生する進行波”が発生しているときのモデル断面の形状や進行波が伝播する様子に、大きな違いがなかった⁴⁾ため、“発生・停止を周期的に繰り返す進行波”の場合のみを示している。

また図7に、相互相関法によるPIVをもちい、円柱モデル背後に形成された後流の時間平均速度分布を求めた結果を示す。

これらの結果から、RCモデルにおいて、円柱表面での流れが剥離することで生じた剥離せん断層が、下流側に長く伸びており、せん断層が不安定を起こすことによって発生・成長する小さな渦群が確認できる。また、この渦が下流に移動するのにともなう、渦同士が合体していく様子も観察できた。

CC-Silicone Oil Contained, $A'=0.80$, $U_{\infty}=0.50\text{m/sec}$. ($Re=15590$)

(a) Continuously wave occurring.

CC-Water Contained, $A'=0.88$, $U_{\infty}=0.50\text{m/sec}$. ($Re=16350$)

(b) Oscillation of cross section.

Fig. 5 Time series of visualized cross section of composite cylinder.

RC, $U_{\infty}=0.35\text{m/sec}$. ($Re=12200$) CC-Water Contained, $A'=0.82$, $U_{\infty}=0.35\text{m/sec}$. ($Re=11050$, Periodically Wave Occurring)

← : Position of the small vortex generated by shear flow instability == Counter of vorticity ($d\zeta = 15 \text{ sec}^{-1}$)

Fig. 6 Time series of vorticity distribution around the cylinder model.

しかし、モデル表面に進行波が発生した CC モデルでは、RC モデルのように、せん断層は下流側に長く伸びておらず、また y 軸方向にも広がっていなかった。また図 8 に示すように、この剥離せん断層の広がり、

後流の幅となってあらわれており、特に“絶え間なく発生する進行波”が発生した CC- $SA'=0.80$ では、後流の幅が最も狭くなっており、速度欠損の回復も早いことが分かった。

Fig. 7 Profile of wake behind cylinder model.

Fig. 8 Comparison with power spectra of lift fluctuation.

これは、モデル表面に進行波が発生する時に、モデル表面に凹みが生じ⁽⁴⁾、主流の流体がその凹み部分で渦を巻くことによって、せん断層が、十分発達して Kelvin-Helmholtz の不安定⁽⁷⁾によって渦が巻き上がる前に引きちぎられるためと考えられる。

また、波が伝播することで、波近傍の流体が波に連行され、主流が円柱背後に取り込まれることで、流れのよどみ（再循環）領域が狭くなり、境界層が y 軸方向に広がりになると考えられる。

さらに、この小渦は下流への移動にともなって不鮮明になり、 $x=d_{RC}$ 付近では確認しにくくなっており、モデル背後の流れ場の変動周期も遅くなっていた。

このことから、弾性表面で観察できる進行波の発生に大きく関わっていると考えられる⁽⁴⁾この小さな渦のエネルギーが、進行波の発生と伝播に使われるため、下流に行くにしたがって、小渦が確認しにくくなると考えられる。

球や円柱の抵抗低減手法の1つとして、それらの表面に凹凸をつけ、境界層の層流から乱流への遷移を促

Fig. 9 Prominent frequency of lift fluctuation.

進させることによって、流れの剥離点をより後方に移動させ、抗力を低減させることができるが、弾性表面に進行波が発生した場合、剥離点が大きく後退するようなことはなかった。また、図2の下図に示すような $\theta=60^\circ$ 付近に凹部をもつ固い円柱モデルに働く抗力を測定したところ、主流速度に関係なく RC モデルの 90% 程度であったが、“絶え間なく発生する進行波”が発生した複合円柱の場合は、剛体円柱の約 75% とさらに低くなっていた。

以上のことから、弾性表面に存在する凹凸の影響はあまりなく、進行波が伝播することで、せん断層の不安定によって巻き上がる渦が弱まり、それらの渦が集まり形成するカルマン渦自体に影響を及ぼすため、抗力が低減すると考えられる。

さらに、CC モデルにおける抗力低減の理由を探るため、円柱から放出される渦対の影響によって時間的に大きく変動する揚力の時間変動波形に注目した。

3・4 揚力の時間変動成分 RC モデルと CC モデルでモデル背後の流れの周期変動に違いが見られた

ことから、揚力の時間変動波形を周波数解析し、パワースペクトルとそのピーク周波数の比較をおこなった。

図8にRCモデルと各パターンの進行波がモデル表面上に発生した条件において、揚力の時間変動波形から得た周波数のパワースペクトルの一例をしめす。

これらの図から、抗力が小さくなった時にスペクトルに広がりが見られた。RCモデルでは、そのピーク値に対応する周波数が、カルマン渦対の放出周波数を示しているが、RCモデルより抗力が小さくなったモデルでは、RCモデルのカルマン渦対の放出周波数より低い周波数でピークを持っており、複数のピークを持つ場合もあった。また、シリコンオイルを封入した方が、より周波数の広がりが見られた。

ここで、各実験条件においてパワースペクトルが最大値をとった周波数と主流速度の関係を図9にしめす。なお、図中の実線は、渦対の放出周波数に対するTaylorの経験式

$$f_{KV} = 0.198 \frac{U_{\infty}}{d_{RC}} \left(1 - \frac{19.7}{Re} \right) \approx 0.2 \frac{U_{\infty}}{d_{RC}}$$

から求めた、剛体円柱からの渦対放出周波数である。

その結果、抗力低減が確認できたモデルでのみ、剛体円柱の渦対放出周波数よりも40~50%低い周波数をとることが分かった。これらのモデルは、断面積比が1.0未満であり、モデルの代表長さは、剛体円柱の直径よりも10%程度小さくなっている。しかし、モデルの代表長さが小さくなると、Taylorの経験式では、渦対放出周波数は大きくなることから、モデルの大きさが渦対放出周波数に影響したとは考えにくい。むしろ、剥離せん断層の不安定によって巻き上がる小さな渦が、下流への移動にともなって弱くなることで、この小渦が集まり、モデル背後で形成される大規模な渦が十分に成長し、円柱からカルマン渦として放出されるまでに必要とする時間が長くなるため、渦対放出周波数が低くなると推測される。

また、カルマン渦が弱くなり、その放出周波数が低くなることで、モデル背後の流れ場の逆流が弱くなり、円柱背後での圧力降下を抑えることができるため、抗力が減少したと予想される。

4. 結 言

柔軟な弾性表面を持つ円柱の表面に進行波が発生した場合に円柱モデルに働く流体力を測定し、モデル周りの流れ場とモデル弾性表面の可視化を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 流れに対して前面が硬く、後面が柔らかく変形しやすい表面を持つ円柱の表面に進行波が発生した場

合、剛体円柱とくらべ、抗力が減少する場合があった。

(2) 特に、“絶え間なく発生する進行波”が発生した時にのみ、抗力および抗力係数の両方が、剛体円柱よりも小さくなった。また、複合円柱モデルから弾性表面を取り除いたモデルよりも、弾性表面を持つ複合円柱の抗力および抗力係数が小さくなったことから、円柱モデルに弾性表面を持たせることで流体力学的特性が向上することが分かった。

(3) 揚力の時間変動波形を周波数解析したところ、剛体円柱より抗力が減った場合、周波数スペクトルに広がりが見られ、複数のピークを持つことが分かった。

(4) また、抗力低減が見られた場合、スペクトルの卓越周波数は、剛体円柱の渦対放出周波数より約45%低い周波数をとった。

(5) 剛体円柱モデルとくらべ、複合円柱モデル表面に進行波が発生した場合、剥離流れに伴う剥離せん断層が、モデル表面が波状に変形することで引きちぎられており、せん断層が不安定を起こすことで生じる小さな渦群は、下流への移動にともなって弱くなった。

(6) 複合円柱表面に進行波が発生し、抗力低減が見られたモデルでは、後流の幅が狭くなり、後流での速度欠損の回復もはやかった。

謝 辞

本研究において、柔軟な弾性表面として使用したラテックスゴム・コンドームを作成・提供していただいた、オカモト(株)と同社茨城工場の石渡氏、田中氏に謝意を表す。また、PIVシステムを提供していただいた、新日本製鐵(株)津田 宜久氏に謝意を表す。最後に、本実験に協力して頂いた、当時の本学4年生、柳 健太郎、小杉 崇、西岡 均の諸氏に感謝する。

文 献

- (1) Lighthill, J., *Mathematical Biofluidynamics*, (1975), 3, SIAM publications.
- (2) Carpenter, P. W. and Garrad, A. D., *J. Fluid Mech.*, **155** (1985), pp465-510.
- (3) Gray J., *J. Exp. Biol.*, **13** (1936), 192.
- (4) 田地川, 大場, 日本機械学会論文集B編, **67-653** (2001), pp67-74
- (5) Kramer, M. O., *J. Am. Soc. Naval. Engrs.*, **74** (1960), pp314-348.
- (6) K. Okamoto, Y. A. Hassan, W. D. Schmidl, *Experimental in Fluids*, Vol. 19, No. 5(1995), pp342-347
- (7) Chia-Shun Yih, 流体力学 理論への入門 1988年版, (1995), p516-518, アイピーシー