

一様水流中の柔軟弾性表面を持つ円柱表面に発生する進行波と周りの流れ場

Transient Wave Traveling on the Surface of Elasto-Flexible Cylinder in Uniform Water Flow and the Flow Field around it

○田地川 勉 (関大工), 大場 謙吉, 岩津 雅, 柳 健太郎

Tsutomu TAJIKAWA, Kenkichi OHBA, Masashi IWATSU and Kentaro Yanagi

Dept. of Mech. and Systems Eng., Kansai University, Osaka 564-8680, Japan

It is important to bio-fluidmechanics to study the interaction among deformable surface, its surrounding flow field and hydrodynamical forces. In order to clarify this interaction, we have been using various cylinder models having an elasto-flexible surface in uniform water flow. The laser light sheet method was used to visualize the deformation of the surface and flow field around it. The experimental result showed that there were three different kinds of traveling waves generated on the surface. In the case of the periodical and continuous waves, the frequencies of the waves were 6 to 9 times higher than that of the Karman vortex pair shedding from the rigid cylinder. It was indicated that generation of the wave was not caused by large pressure variation from the vortex shedding. The visualization results suggest that local pressure decrease by flow separation from the surface and by the generation and movement of the small vortex were responsible for the appearance and the propagation the transient wave. Moreover the wave velocities were nearly 75% of the main flow velocities. As a consequence, it is considered that the thrust was not caused by the wave. However, in the case of the continuous wave, the time-averaged hydrodynamical drag was about 20% lower than that of rigid cylinder.

1. はじめに

生物(生体)に関する流れの問題を扱う生物(生体)流体力学(Bio-fluidmechanics)では、生物特有の容易に変形可能な表面をもつ流路や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。ここで生物周りの流れに関して、遊泳中の魚鯨類の運動効率が良いらしいことが“グレイのパラドックス¹⁾”としてよく知られており²⁾、これはこの相互作用の効果ではないかと考えられている³⁾。

本研究では、この流れと変形可能な表面との間の相互作用を解明するため、生物の表皮を模擬・簡略化した弾性表面を持つ円柱モデルを用い、これまでにモデル表面に発生する3種類の進行波を観察した⁴⁾。今回は、この進行波の特性を調べ、波が発生・伝播の様子を観察し、その発生と伝播のメカニズムについて考察する。

2. 実験装置および方法

本実験では、小型回流水槽を用い一様な流れ場を発生させ、測定流路内に流れに対し垂直になるようモデルを設置した。Ar⁺レーザを光源とするレーザライトシート光を観測部に入射することによって、モデルの断面形状とその周りの流れ場を2次元平面に可視化し、観測部側方に設置した高速ビデオカメラによって撮影を行った。

Fig.1に使用したモデルを示す。実験には、2つのモデルを使用した。まず、従来の理論や実験との比較を行うための剛体円柱モデルRC。次に、流れに対し前面部90°が剛体、残り後部が柔軟な弾性表面から構成されており、またイルカの皮膚構造が大きく分けて皮膚・皮脂・筋肉の3層で構成されていることに着目し、この構造に近づけるため、内部中心に内部円柱($d_{ic}=0.7d_{rc}$)を挿入・固定し、液体を封入した複合円柱モデル(以下CC)を使用した。なお、弾性表面として厚さ約0.05mmのラテックスゴム(Young率 $E=2.0\text{MPa}$)をもちいた。複合円柱モデルは、断面積比 A' 、と封入する液体(水“W” [$\nu=1.0\text{cSt}$, $s=1.0$])とシリコン油“S” [$\nu=19.2\text{cSt}$, $s=1.00$])を変化させることで、モデル表面の特性に多様性を持たせた⁴⁾。また、モデル直径 $d_{rc}(=33, 35, 43, 49\text{mm})$ も変化させ実験を行った。

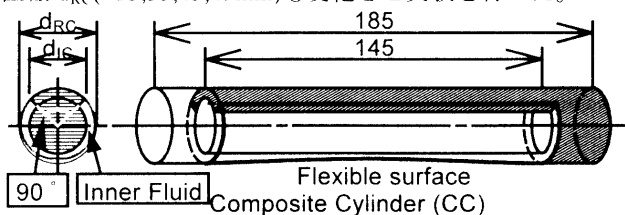


Fig.1 Experimental Model.

3. 結果および考察

3.1 進行波の発生とその特性

本実験モデルが持つ弾性表面に、大きく分けて3種類の発生様式を持つ進行波が発生する⁴⁾。これらの中で、絶えず発生する波と周期的に発生する波の周波数と伝播速度を計測した結果を Fig.2、Fig.3 にしめす。なお今回は、 $d_{rc}=35\text{mm}$ の結果のみを示す。

これらの結果から、進行波の周波数は円柱から放出される渦対放出周波数の約6~9倍であった。一般的には、流れの中にあるシートや柔らかい物体の変形と運動は、流れ場の大いなる圧力変動に支配されると考えられる。しかし進行波の周波数は、カルマン渦対の放出周波数よりもかなり高かったことから、この進行波の発生は、流れの剥離にともなう小さな渦と何らかの関わりがあると考えられる。進行波の伝播速度は主流速度よりも遅く、主流速度の約75%程度であった。これは、流れの影響によってこの波が発生しているためと考えられる。また、波高を除く各パラメータにこれら2種類の波の違いは見られなかったことから、この2種類の波は同じメカニズムで発生していると考えられる。

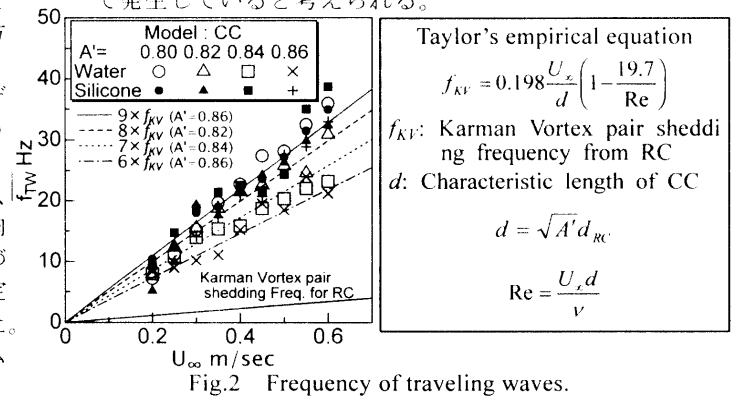


Fig.2 Frequency of traveling waves.

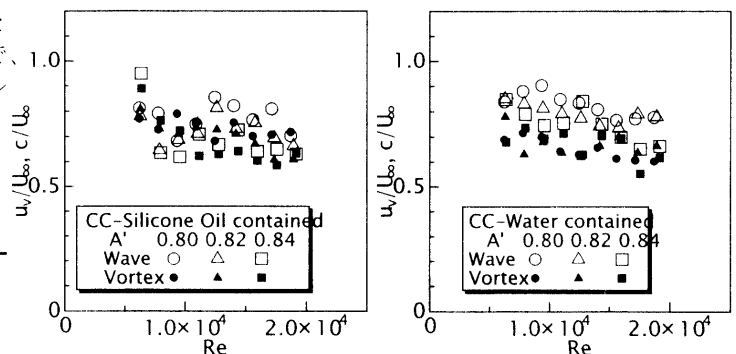


Fig.3 Traveling velocities of transient wave and small vortices.

これらのことから、進行波の発生は、大規模渦の放出によるモデル表面上の圧力変動が主な要因ではないことが示唆できた。そこで、波が発生・伝播する様子を観察し、その発生と伝播のメカニズムについて考察する。

3.2 進行波の発生と伝播のメカニズム

Fig.4 に、絶えず発生する進行波が、発生・伝播していく様子を捉えた可視化写真とそのスケッチをしめす。

進行波が発生する時、 $\theta = 75^\circ$ 前後の位置に表面に膨らみが生じており、その膨らみが下流側に移動しながら突っ立ちをおこしたようになり、波として下流側へ伝播していく様子を観察することができた。

この膨らみが生じる前、モデル表面の圧力分布の影響によって $\theta = 60^\circ$ 付近に凹みが生じており、流れはその上流側で剥離していた。弾性表面から剥離した流れは、表面が凹んだ部分に小さな渦を形成しており、この渦の中心に向かって付近の表面が膨らみ、渦が下流方向へ移動するのに伴って、波として伝播する様子を観察することができた。この小さな渦の流れ方向への移流速度を測定した結果を Fig.3 に示す。渦の移流速度と進行波の伝播速度は、ほぼ同じであった。また、モデル前面の剛体表面が占める割合が大きくなると進行波は発生しにくくなることから、剥離点付近におけるモデル表面の変形能が、進行波の発生に大きく影響していると考えられる。

これらのことから、流れが剥離する場所の物体表面が容易に変形することができる表面で構成されていることによって、円柱周りの圧力分布の影響でモデル表面に凹みが形成され、流れの剥離と渦形成によって境界層内の圧力が低下したため、凹みから膨らみが生じたと考えられる。そして、剥離した流れが表面の凹み部分小さな渦を形成し、この渦が放出され、下流側に移動するのに伴って、弾性表面が渦中心に吸い込まれ、波として伝播したと考えられる。

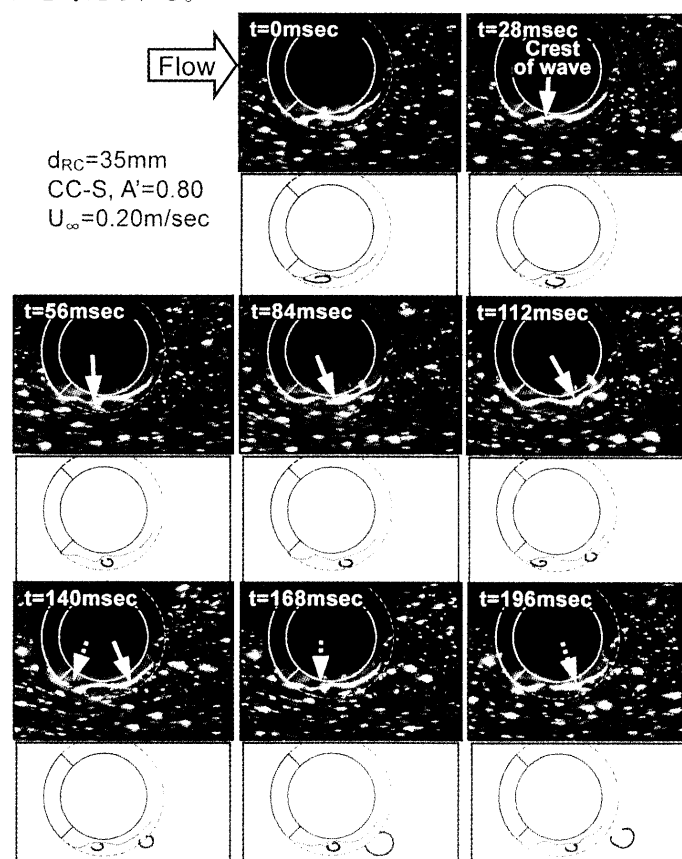


Fig.4 Occurring and propagating mechanism of traveling wave on the elasto-flexible surface.

3.3 進行波の発生と流体力

ここでは、弾性表面の変形が流体力に与える影響について考える。Fig.5 に、流体力の測定結果から得られた各モデルの抗力係数とレイノルズ数の関係を示す。この結果、絶えず発生する進行波が観察できた条件においてのみ、CC モデルの抗力係数が RC モデルよりも最大 25% 小さくなった。このときモデル背後の流れの逆流領域は、剛体モデルの場合よりも明らかに狭くなっており、流れ場の変動周期も遅くなっていた。しかしこれらの波が発生した場合、モデル断面はほとんど振動しなかったことから、進行波が発生し抗力係数が小さくなったからと言って、弾性表面を持つ円柱モデルで抗力低減が実現したとは言いがたい。そこで揚力の時間変動波形を周波数解析し、周波数スペクトルのピーク周波数の比較を行った。

Fig.6 に各条件においてパワースペクトルが最大をとった周波数と流速の関係を示す。この図から、抗力が減少したモデルで、剛体円柱の渦対放出周波数よりも約 45%低い値をとることが分かった。これは、進行波の発生に大きく関与していると考えられる小さな渦の持つエネルギーが、進行波の発生と伝播に使われるため、その小さな渦が集まりモデル背後で形成する大規模渦が成長し、円柱から離脱するまでに必要とする時間が長くなったため、渦対放出周波数が低くなったと推測される。

また渦対放出周波数が低くなったことで、単位時間に渦によって持ち去られる循環が小さくなり、同時に渦に誘起される円柱背後への逆流が弱くなるなり、圧力降下を抑えることによって、抗力が減少したと予想される。

4. 結論

柔軟な弾性表面を持つ前剛後柔複合円柱に発生する進行波の特性と抗力に与える影響を調べたところ、

- ①連続的に発生する波と周期的に発生する波の周波数は、剛体円柱から放出されるカルマン渦対の放出周波数よりも 6~9 倍高い値を示した。
- ②弾性表面に発生する進行波が、カルマン渦の放出に伴う大きな圧力の時間変動によって発生しているのではないことが確認できた。
- ③進行波の伝播速度は、モデル表面の流れの剥離によって発生する小さな渦の移流速度とほぼ同じであった。
- ④連続的に発生する波が観察できたとき、抗力係数は最大 45%減少し、渦放出周波数は約 45%低い値をとった。

5. 参考文献

- 1) J. Gray, J. Exp. Biol., **13** (1936), 192.
- 2) M. O. Kramer, J. Am. Soc. Naval. Engrs., **74** (1960), pp314-348.
- 3) P. W. Carpenter, et al, J. Fluid Mech., **155** (1985), pp465-510.
- 4) 田地川他、可視化情報, Vol.19, Suppl. No2, (1999), pp237-240.
- 5) 田地川、大場、岩津、機論集、投稿中

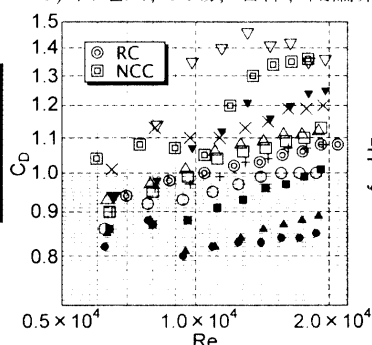


Fig.5 Comparison with drag coefficients of models.

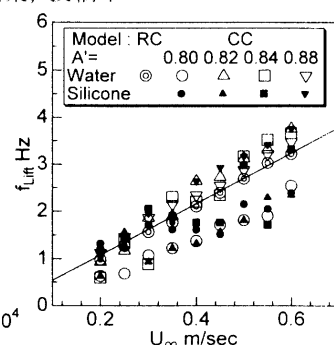


Fig.6 Primary Frequency of time variations of lift.