A213 柔軟弾性膜面を持つ円筒表面に発生する過渡的進行波と 周りの流れ場の可視化

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

○田地川 勉 (関西大院) 大場 謙吉 (関西大工) 岩津 雅 (関西大院)

Tsutomu TAJIKAWA¹, Kenkichi OHBA² and Masashi IWATSU¹

¹:Graduate school of Kansai Univ., 3-3-35 Yamate-cho, Suita 2:Dept. of Mech. and Systems Eng., Kansai Univ.,

Abstract: The purpose of this study is to clarify the influence of interaction between deformable surface and flow field. Generally speaking, Dolphin could swim fast because of oscillated stomach skin. Cylinder models having an elasto-flexible surface were used to simulate the skin of marine animal. These cylinders were placed in water tunnel, and using laser light sheet method to visualize deformation of its cross sectional form, pattern of vortex shedding from the model, flow separation point. Vorticity and hydrodynamical forces were measured. As a result, three different patterns of travelling wave generation on the surface of elasto-flexible cylinder were observed. Separation points moved to downward more compared with the rigid one. And streak line in the vicinity of the wave is broken by new generated wave and small vortexes shed simultaneously from the surface. Distribution of vorticity around the cylinder was clearly different from that of the rigid one. The cylinder, on which travelling waves appear on the surface, has shown about 10% smaller hydrodynamical drag than the rigid cylinder.

Keyword: Visualization, Bio-fluidmechanics, Elasto-Flexible Surface, Vortex, Travelling wave, Vorticity, Hydrodynamical drag

1.はじめに

魚鯨類の遊泳中における抵抗はかなり小さいといわれている¹⁾が、その抵抗軽減機構については様々な要因が絡み合っているため、そのすべてを解明するには至っていないのが現状である。そこで、本研究では魚鯨類、特にイルカが弾性表皮の微小振動によって抗力を軽減させていること²⁾に着目し、形状および表皮を模擬・簡略化した柔軟な弾性膜面を持つ円筒を用い、膜面形状をレーザーライトシート法により可視化したところ、膜面に微小な進行波が発生していることを観察した³⁾。そこで、この進行波がどのような条件下において発生しているのか、この進行波が発生することによって円筒近傍の流れ場や渦対の放出にどのような影響を及ぼすのかについて可視化による観察を行い、流体力も計測することでモデル膜面に発生する進行波が流体力に及ぼす影響についても考察した。

2.実験装置および実験方法

実験に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。測定流路下方からアルゴンイオンレーザを光源とするレーザーライトシート光を入射し、トレーサ法およびコンデンスミルク法によってモデルの膜面形状およびモデル周りの流れ場を可視化した。なお膜面形状およびモデル近傍の流れ場の撮影には高速ビデオカメラを、モデル後流の撮影にはビデオカメラを用いた。トレーサには、2種類のポリエチレン粒子 (平均粒径 $200\mu\text{m}$ 比重 $\rho \approx 1.0$ 、平均粒径 $300\mu\text{m}$ 、比重 $\rho \approx 0.96$) を用いた。

Fig.1 に使用したモデルを示す。実験には従来の実験や理論との比較検討をおこなうための剛体円筒 (以下 RC)、流れに対して前面部 90° が剛体、残り 270° が柔軟な弾性膜面からなり、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、内部中心に直径 25mm の内部円筒を挿入・固定した前後柔軟複合円筒モデル (以下 Type-4) の2種類のモデルを使用した。なお柔軟弾性膜面として厚さ 0.03mm のラテックスゴム (ヤン

グ率 $E \approx 2 \times 10^9 \text{Pa}$) をもちいた。また、複合円筒モデルは断面積比 A' (剛体円筒の断面積 A_0 に対する液体が封入された複合円筒の膜面部分における断面積の平均値 A との比 A/A_0 を断面積比 A' と定義する。) を変化させることによりモデル膜面の特性に多様性を持たせた。また流体力の測定には歪みゲージ式3分力検出器を用い時間変動波形として出力した。

Fig.2 Models

3.実験結果および考察

3-1 膜面に発生する進行波

本研究では、すでに Type-4 $A' = 0.88$ においてモデル膜面に進行波が発生していることを確認した³⁾。そこでこの進行波がどのような条件下で発生しているかを調べるために、断面積比を 0.82 から 0.98 まで 0.02 刻みで、主流速度を 0.2m/sec から 0.6m/sec まで 0.05m/sec 刻みで変化させモデルの断面形状を可視化した。その結果進行波発生が大きく分けて3つあることが分かった。

Pattern 1: $A' = 0.82$ において膜面に絶えず進行波が発生していることが観察できた。これは断面積比が非常に小さいために初期状態で膜面にシワができおり、また封入された液体の量が少ないうえに膜面全体の大きな運動が困難なためシワが流れ場の流体に押し流され波が伝播しているように見えたと考えられる。

Pattern 2: 代表的な可視化写真の例を Fig.2a にしめす。 $A' \approx 0.84 \sim 0.90$ においては Pattern 1 とは異なり、間欠的・周期的に発生する進行波を観察することができた。このときカルマン渦対の形成・放出に伴い、膜面全体が上下に大きく周期的に振動しており、この周期と間欠的な進行波の発生周期はほぼ同じであった。また渦放出により片側に大きく偏って膜面が存在し、次のカルマン渦の成長過程において、封入された液体が反対側に向かって流れ膜面が大きく変形し始めるとき、膜面が内部円筒にわずかであるが接触しており、この接触点と剛体部分との境界点の間（よどみ点から $\pm 50 \sim 60^\circ$ の位置³⁾）で進行波が発生していた。これらのことから膜面が内部円筒に接触することで、この2点間に存在する膜面の局所的な自由度が増し、流れ場と封入された液体の影響により膜面に波が発生し流れ場の流体の影響によって流れ方向に伝播したと考えられる。

Pattern 3: 代表的な可視化写真の例を Fig.2b にしめす。 $A' \approx 0.92 \sim 0.96$ において、低流速領域では進行波を観察することができなかったが、高流速域において発生する進行波を観察できた。しかし Pattern 2 とは異なり、間欠的に発生するものの、非常に非定常で不安定な発生周期で波長・波高ともに大きかった。このとき、進行波は膜面全体の上下振動の振幅が最大になった直後に発生していた。また、定常流中では進行波を観察することができなかった条件においても、主流速度が加減速度を持った場合において一時的に進行波を観察することができたモデルもあった。これらのことから、初期状態での膜面の柔軟性が十分に存在しない状態であっても高レイノルズ数領域においては、流れ場とモデルに封入された液体の間の不安定性によって膜面に進行波が発生したのではないかと考えられる。

3-2 進行波発生による流れのはく離と渦形成への影響

Fig.2 Visualized travelling wave form of each its occurrence pattern

Fig.3 Travelling wave and streak line around it

Fig.4 Vorticity profile around the models

Fig.5 The time mean value of hydrodynamical drag

進行波が、円筒周りの流れ場の影響により発生していると考えられることは、3-1 で述べたが、この受動的に発生する進行波により流れ場もまた影響を受けていると考えられる。

そこで進行波近傍の流れをコンデンスミルク法により可視化しモデル表面からはく離する流れや渦形成の様子を観察した。Fig.4 に進行波が発生した Type-4 $A' \approx 0.88$ の可視化写真を示す。

これらの結果から、進行波が発生した際、最も上流側にある波の頂ではく離した流れ ($t=0\text{msec}$) は、その波が伝播し頂が移動するにも関わらず、同じ波の頂ではく離している ($t=12\text{msec}$) ことが分かる。しかし、上流側に新たな波が発生することによって、それまでモデル表面に沿っていた流れが局所的で急激な曲率の変化に追従することができずに流脈線が引きちぎられている様子 ($t=24\text{msec}$) が観察できた。また、渦形成過程で剛体円筒の場合よりも小さな渦が膜面近傍で形成されていることや流れのはく離が遅れていることが分かった。

また、Fig.4 に $U_\infty = 0.2\text{m/sec}$ において PIV で測定したモデル周りの流れ場の時間平均流速分布から求めた渦度分布をしめす。

この結果から、剛体円筒では、局所的に渦度の高い部分が集中しているのに対し、進行波が発生したモデルでは渦度の高い部分が円筒表面の広範囲にそしてやや後流側に存在している。また円筒背後において剛体円筒と比べ進行波が発生していた場合は流れに対し垂直方向への分布が狭く、流れ方向に広がって分布しており全体的に渦度が高くなっていることが分かった。

これらのことから、流れ場の影響により膜面に受動的な進行波が発生することによっても円筒近傍の流れ場に影響を及ぼすことが分かった。これは進行波が発生することにより剛体円筒とは明らかに異なった渦対の放出過程をしているため流れのはく離が遅れたり、小さな渦群を形成したためと考えられる。

3-3 円筒に働く流体力と後流

進行波が円筒の膜面に発生することにより渦の形成・放出過程に違いが見られることはすでに述べた。そこで実際にモデルに働く流体力を測定した。Fig.5 に抗力の時間平均値を示す。

この結果から進行波が発生した場合、剛体円筒に比べて 10% 程度抗力が減少していた。このことから流れ場の影響によって発生した受動的な進行波によって、わずかであるが抗力が減少することが分かった。これはカルマン渦対の形成・放出の過程が剛体円筒のそれとは明らかに異なっているためと考えられる。

4. まとめ

流れに対し前面部が剛で後部が柔な円筒内部に内部円筒を挿入・固定し、膜面に発生する進行波とその周りの流れ場を可視化し、実際に流体力の測定を行った結果以下のことが分かった。

- (1) 断面積比の違いにより膜面に発生する進行波の発生様式が大きく分けて 3 つあることが分かった。これは初期状態における膜面の柔軟性と大変形にともなう局所的な柔軟性の変化によるものと考えられる。
- (2) 進行波が発生時に、波の伝播により流脈線が引きちぎられ小さな渦群を形成している様子を観察することができた。
- (3) 流れ場の影響により膜面に受動的な進行波が発生した場合、わずかであるが抗力の減少が見られた。これは、進行波が発生することにより、剛体円筒とは異なった渦対の形成・放出過程であるためと考えられる。

参考文献

- 1) J. Lighthill, *Mathematical Biofluidynamics*, (1975), 3, SIAM Philadelphia
- 2) M. O. Kramer, *J. Am. Soc. Naval Engrs.*, **74** (1960), 314-348
- 3) 田地川, 大場, 日本機械学会第 10 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No97-72, (1997), 3, pp646-647