132 柔軟な弾性表面を持つ円筒周りの流れ場の可視化 —渦対の放出と後流の速度場および抗力の関係—

関西大院 中田 雅子[○]、関西大工 大場 謙吉

Visualization of Flow Field around Elasto-Flexible Cylinder

*—Relationship between Emission of Vortex Pair,
Velocity Field in Wake and Drag Force—*

Masako NAKATA^{*} and Kenkichi OHBA^{**}

The purpose of this study is to clarify the mechanism of decreasing the drag in natural swimming of fish, whale and dolphin. A cylinder which has Elasto-flexible surface simplified marine creature was placed in a water tunnel, and using Laser Light Sheet method to visualize flow field around the model, vortex pair shedding period from the model, deformation of its cross-sectional form and hydrodynamical drag of the model were simultaneously measured. As a result, the following were found: the rigid front flexible rear cylinder model has showed about 20% higher St number than rigid cylinder model. The local deformation of the surface changed local flow pattern and wake due to some interaction between flexible surface and vortex. Time variation of the drag of the Rigid Front Flexible Rear Cylinder (RFFRC) became smaller than rigid one.

1. はじめに

魚鯨類の遊泳中における抵抗がかなり小さいことはよく知られているが、その抵抗軽減の機構は生体特有の様々な要因が複雑に絡み合っているため、解明されているとは言い難い¹⁾。しかし、この機構を解明することは、流体工学の分野で非常に有意義なことと考えられる。そこで本研究では魚鯨類、特にイルカは弾性表皮の微小振動によって抵抗を軽減させていること²⁾に着目し、形状を簡略化した柔軟な弾性表面を持つ円筒周りの流れ場をレーザーライトシート法により可視化することによって渦の放出や後流の様子についての観察と計測を行い、抗力についても測定を行った。

2. 実験装置および方法

本実験に用いた実験装置の概略をFig.1に示す。実験には、小型回流水槽を用い、密閉水路にして一様な流れ場を発生させ、測定管路内に流れに対して垂直に円筒モデルを設置した。測定管路下部よりアルゴンレーザーによるレーザーライトシート光を入射することによって流れ場を可視化した。混入したトレーサはアルミナ被膜を施した平均粒径約290 μ mのポリエチレン粒子である。また流れ場の様子の記録は測定部側方の高速ビデオカメラによって行い、得られたビデオ画像より渦対の放出周期を測定し、弾性壁を持つものに関しては表面の挙動と流れ場の様子について観測を行った。抗力の測定には3分力検

^{*} Graduate School of Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita, Osaka

^{**} Faculty of Engineering, Kansai University

Fig.1 Outline of experimental apparatus

Fig.2 Models

出器を用いた。Fig.2にモデルとして使用した円筒を示す。モデルとしては剛体円筒 (Rigid Cylinder)、柔軟弾性円筒 (Flexible Cylinder)、前剛後柔の複合円筒 (Rigid Front Flexible Rear Cylinder; 以下RFFRC)、剛体半円筒 (Half-Round Rigid Cylinder) を用いた。

3. 実験結果および考察

3-1 壁面の柔軟性が渦の放出に及ぼす影響 Fig.3に断面形状や壁面の柔軟性が渦対の放出周波数に及ぼす影響を示した。壁面が柔軟なモデルのうち、柔軟弾性円筒は流れによってたわみ、Fig.4に示すように断面形状が半円に近くなるため剥離点もエッジ付近に移動し、渦の放出周波数も剛体半円筒の測定結果に近い値が得られた。しかし、さらに流速が速くなると渦励振し始め、ばらつきの多い結果となった。一方、RFFRCは流れによってたわむことがないため断面形状が著しく変わることはなく、それによって後面のゴム膜の振動が顕著に現れ、渦の放出とともに局所的に変形し、結果的にFig.3中に見られるように放出周波数が20%程度上昇した。これは、RFFRCのモデル全てに見られる傾向ではなく、角度を変えたモデルの中では剥離点近傍の壁面が柔軟に動きうるモデルである $\theta = 90^\circ, 135^\circ$ だけであり、また、容積率を変えた実験では、容積率90%のモデルが放出周波数を高める傾向にあった。以上のことから、剥離点近傍の壁面が柔軟に流れ場に対応できることが渦の放出を早めることに大きく関与していると考えられる。

Fig.3 Effect of flexibility for vortices shedding

Fig.4 Cross section of the flexible models

Fig.5 Mechanism of vortex shedding

3-2 柔軟な壁面と渦の放出メカニズム 剥離点近傍や円筒後面の変形が渦の放出メカニズムにどのような影響を与えているのかについて、可視化画像をもとに観察し、スケッチした結果をFig.5に示す。Fig.5は渦の放出周波数がきわめて特徴的に変化したRFFRC-90°（開放型）モデルの放出メカニズムを示している。

(a)では、背圧の低下に伴って渦の発生方向の後面が引き付けられふくらむのに伴い、ゴムの弾性変形によって反対側にはへこみが生じる。そのへこみ動作につられて流れが吸い込まれ、新しい渦を誘起する。そして、(b)吸い込みによって生じた渦が普通の剥離により生じる巻き込みによって成長する。(c)→(d)は(a)→(b)の過程の渦発生場所が反対の場合であり、以上(a)～(d)のくり返しによって渦が発生していた。この“吸い込み”が加わることで渦の発生が剛体円筒のそれに比べ早くなっていると考えられ、これが渦対の放出周波数を高めた原因と考えられる。

3-3 柔軟な壁面が下流領域に及ぼす影響 Fig.6に剛体円筒とRFFRC-90の後流の可視化写真と、可視化画像より測定した後流の流速分布を示す。図に見られるように、RFFRCの後流は剛体円筒のものに比べて幅が狭く、また渦の大きさも小さいことが観測された。ここで、各モデルの渦の形成領域長さについて測定した結果をFig.7に示す。Fig.7より、RFFRC（-90、-135）の測定結果は他のモデルの結果がほぼ一定値をとっているのに対し、流速が速くなるにつれて渦形成長さが減少する傾向が見られた。このことは渦が早い段階で渦度の供給を断たれていることを示し、また、それによって渦の大きさも小さいまま放出されると推測される。また、Fig.6の流速分布からは、RFFRCの後流の流速は距離の短い段階で主流速度に近づくことが明らかになった。これは、渦の大きさが小さいため後流に及ぼす影響も小さくなったと考えられる。以上のことより、剥離点近傍の壁面が柔軟に動きうことは、周囲の流体に及ぼす影響を縮小していることが推測される。

3-4 抗力と渦の放出の関係 後流の流速分布から運動量損失を求めることで剛体円筒と同じようにRFFRCも抗力を計算することが可能なら、Fig.6より明らかにRFFRCは抗力を減少させるモデルであると考えられる。そこで、実際に抗力を3分力検出器を用いて測定した。Fig.8にその測定結果を示す。図より、抗力の平均値そのものについてはほとんど違いは見られないが、抗力の渦の放出に伴う時間変動の幅はかなり小さくなった。このことから、モデル後面の振動が渦の放出による影響を吸収していると推測される。

4. まとめ

柔軟な弾性面をもつ円筒周りの流れ場について実験を行った結果以下の特徴が見られた。

- (1) 渦の放出には剥離点近傍の壁面の柔軟性が大きく関与している。
- (2) RFFRCモデル(-90、-135)の剥離渦は、後面の柔軟な変形により放出が早められ、放出周波数は約20%高くなった。また、大きさも小さくなった。
- (3) 渦の大きさが小さくなることによって後流の幅が狭まり、また流速も距離も短い段階で主流速度に近づいた。
- (4) RFFRCの後面の柔軟な変形によって剥離渦による振動が吸収され、抗力の平均値に減少は見られないが、時間変動幅は小さくなった。

5. 参考文献

- 1) J. Lighthill; Mathematical Biofluidynamics, SIAM
- 2) 谷一郎; 科学; Vol.34 No.9, p.471-476, 1964

Fig.6 Visualized and measured wake velocity

Fig.7 Distance of vortex shedding

Fig.8 Time varying of the drag