柔軟な弾性表面を持つ円筒に働く流体力と周りの流れ場*

中 田 雅 子*¹, 大 場 謙 吉*²

Drag and Flow Field around Elasto-Flexible Cylinder in Uniform Flow

Masako NAKATA and Kenkichi OHBA

The purpose of this experiment is to clarify the mechanism of drag reduction in the natural swimming of fish, whales and dolphins. It is well known that the change in their shape and the local deformation of their skin contribute to drag reduction, especially in the case of dolphins. Therefore, in order to understand the interaction between a deformable surface and the local flow pattern, RFFRC (rigid front flexible rear cylinder) models of a simplified marine animal were studied in a water tunnel. The laser light sheet method was used to visualize the flow field around the models. The vortex pair shedding period from the models, the deformation of the models' cross-sectional form and models' drag were measured simultaneously. The following results were obtained. For some types of RFFRC which could be deformed easily in response to a change in the local flow pattern with vortex shedding, the increase in flow velocity in the wake was observed. In the case the St number was about 20% higher than that of a rigid cylinder. Although, the drag that some types of RFFRC had was higher than that of the rigid one. However, the other types of RFFRC which could not quickly deform show no difference in St number, whereas the mean drag of this type was about 20% lower and the time variation of the drag became smaller than that of the rigid cylinder.

Key Words: Vortex, Separation, Flow Visualization, Bio-Fluid Mechanics, Flexible Surface, Hydrodynamical Drag

1. 緒 言

動物は、それぞれの生活様式にあった都合のよい身体形状と運動方法をもっている。これらの形状と運動方法は既存の人工構造物と比べると大変優れた面がある。流体力学的な観点から見ると、とりわけ水中に生活基盤をおく動物達(特に、魚・イルカ・鯨類など)は陸上の動物と比べ形状は流線形で、運動効率もよい⁽¹⁾。それゆえ、これらの形状および運動機構を理解することは工学の発展において極めて有意義なことと思われ、それらを解明するための研究がいろいろな分野にわたって行われてきた⁽²⁾。しかし、生体特有のさまざまな要因が絡み合っているために、機構すべての解明には至っておらず、現段階では生体の機能のある部分に着目した研究にとどまっている。

本研究では、特に魚鯨類の形状が流れに応じて変形し得ること、また特にイルカにおいては、皮膚の一部が局所的に変形することが抵抗軽減に寄与していると言われていることから⁽³⁾⁽⁴⁾、その因果関係を流体力学的な観点から解明するために、流れ場に応じて容易に

変形する、柔軟な弾性表面をもつモデルを用い、表面が変形することと物体自身の受ける流体力および周りの流れ場との関係について調べた。本報では、柔軟な弾性膜を持つ円筒モデルと剛体円筒モデルとの間に、はく離点の位置、はく離渦の大きさや放出周期、後流のようす、抗力においてどのような違いが見られたかについて報告する。

記 号

x, y : 主流, 鉛直方向の座標 m

U_{∞} : 主流速度 m/s

$\bar{U}_{(y)}$: 後流中の流速の時間平均値 m/s

d : モデル直径 m

f : はく離渦対の放出周波数 Hz

Re : モデル直径に関するレイノルズ数($=U_{\infty}d/\nu$)

St : はく離渦対の放出周波数に関するストローハル数($=fd/U_{\infty}$)

D_{ML} : 後流の運動量損失より求めた抗力値 N

$\bar{D}$: 抗力の時間平均値 N

$\bar{D}_{RC}$: 基準剛体円筒の抗力の時間平均値 N

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置 本実験で用いた実験装置の概略

* 原稿受付 1996年7月12日。

*¹ 准員, 関西大学大学院(〒564 吹田市山手町3-3-35)。*² 正員, 関西大学工学部。

を図1に示す。回流水槽は長さ約2.5 m, 高さ約1.0 m, 幅約0.5 mの大きさであり, 幅200×高さ200×長さ700 mmの亚克力製測定部をもち, 上面のふたによって密閉水路となる。水流は回流水槽下部に設置してあるインペラで発生させ, 約0.3 tの水を最大流速3.0 m/sで流すことができる。測定区間では整流板を経てほぼ一様な流れが実現しており, 今回実験に使用した流速域では Re 数に対するフローパターンの変化はない。また, モデルは測定部に流れに垂直になるようにして水平に設置した。本実験での主流速度は, モデル直径を基準としたレイノルズ数 $Re(=U_\infty d/\nu)$ 域が約 $3.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$ になるように約0.1~0.6 m/sの範囲で変化させた。

2.2 供試モデル 供試モデルを図2に示す。図2(a)には3タイプの基本形状モデルを示した。基本形状は主にモデルのもつ剛体部分の角度 θ に関して, $0^\circ, 360^\circ, 0 < \theta < 360^\circ$ と三つに分けたモデルであり, $\theta = 360^\circ$ は従来の理論と比較するために用いた剛体円筒(以下RC), $\theta = 0^\circ$ は断面がすべて柔軟弾性膜面のみで形成されている柔軟弾性円筒(WFC), $0 < \theta < 360^\circ$ は, 水中の動物が水流の全圧を受ける頭部は硬く, 静圧を受ける後部は柔らかい身体の構造を持っていることを模擬するため作成した, 流れに対して前面が剛体, 後面が弾性膜からなる複合円筒(RFFRC)である。さらに柔軟な弾性壁面をもつモデルの流れ場に対する応答性を変えるパラメータとして, 膜厚 $t(t=0.03 \text{ mm} : \text{Latex Rubber (ヤング率 } E=2.0 \times 10^6 \sim 4.0 \times 10^6 \text{ Pa)}, t=1.0 \text{ mm} : \text{Natural Rubber})$, モデルの状態(流れ場とモデル内部の液体が入り出りできる開放形: O, 流れ場とモデル内部の液体の入りが無い密閉形: C), RFFRCモデルについては図2(b)に示す前面剛体部の角度 $\theta(\theta=90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 270^\circ)$ また, 密閉形のモデルについては, 容積率 V' (ゴム円筒がちょ

うど張力零の状態での円形に膨らんだときの断面積に円筒長さをかけたものを基準体積 V_0 とし, それに対する実際の円筒容積 V の比を容積率 V' と定義したとき, $V'=0.9, 1.0, 1.1$), 加えて図2(c)に示すように, 密閉時にモデル後部の変形振動によって誘起される内部液体の振動を抑えるため, メッシュ状の紙を円筒状に巻き, モデル中心に固定したディフューザ D (あり, なし)を考えた。実験に際しては, 得たい情報にあわせて基本モデルに各パラメータを組合せて使用した。

2.3 流れの可視化 モデル付近の流れ場のようすの観察には, 流れ場にトレーサとして混入してある平均粒径約290 μm のポリエチレン粒子に4 Wのアルゴンレーザをシート状に広げ, 測定部下方より流れに対して平行に照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用いた。流れ場のようすはトレーサ粒子からの反射光を用いて側方より毎秒250 駒の録画・再生能力のある高速ビデオカメラで撮影され, 得られた可視化画像より, 後流へのはく離渦の放出パターンに加え, モデルの表面の運動, モデル断面の変形の解析を行った。また, 広範囲の流れ場の計測には1000 Wのハロゲンランプ光を5 mmのスリットに通した光を利用し, スチールカメラでも撮影を行った。さらに, はく離点近傍の流れの観察にはコンデンスミルク法を用いた。

Fig. 1 Outline of experimental apparatus

Fig. 2 Models

Fig. 3 Schematic diagram of drag measurement system

2.4 流体力の測定 柔軟な弾性壁を持つモデルと固体壁のモデルの受ける流体力を比較するため、図3の計測装置を用いて直接測定を行った。流体力の測定には、抗力、揚力、ピッチングモーメントを測定できるストレインゲージ式の3分力検出器を用い、高速ペンレコーダおよびコンピュータを通して揚力、抗力、モーメントについて記録し、時間平均値と時間変動波形を得た。本報では特に抗力について結果を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 柔軟な弾性表面が流れ場に及ぼす影響 周長に占める柔軟な弾性膜面の割合による流れ場の相違をみるために、基本形状モデルを用いて流れ場を可視化し、粒子追跡法によって後流における流速の時間平均値の分布を求めた。その結果を図4に示す。膜面の影響をより見やすくするために、応答性のよい開放形モデルで実験を行った。RFFRCモデルについては $\theta = 135^\circ$ を使用した。また図中のa-a, b-b, c-c面はそれぞれモデルの中心位置を原点として、 $x = 2d, 4d, 6d$ の位置である。図4より、 $\theta = 0^\circ$ のFC-Oは流れに対する前面が流れの全圧によってつぶされ、前面がフラットな半円状断面となり、流れは平坦な前面の端ではく離しており、しかもモデル全体がたわんだ状態で振動していたため、後流の運動量損失もRCに比べてはるかに大きくなっていた。この状態においては、モデル表面の膜面には、かなりの張力がかかっていると考えられ、膜面の柔軟性は失われていると考えられる。

それに対して $\theta = 135^\circ$ のRFFRC-Cは流れの全圧によって前面がつぶされることがないため、断面後部の柔軟な弾性壁面ははく離渦の放出に伴って変形し振動した。後流の幅もRCに比べて狭くなっており、放出されたはく離渦の大きさも小さく、後流の流速も早くなっていた。これらのことから、柔軟な弾性壁面をもつモデルのうちで、前面が硬くて流れのはく離が起

(a) Visualization of the flow pattern

(b) Velocity distribution in the wake

Fig. 4 Flow pattern in the wake of basic models

こりにくい形状を保っており、はく離点付近の壁面が流れ場の変動に応じて容易に変形できるようなモデルが、流れ場との間で相互作用を引き起こすことができ、抵抗減少につながるのではないかと推察される。

3.2 各パラメータがストローハル数や断面形状に及ぼす影響 本節ではRFFRCモデルについて各パラメータを変化させた場合のはく離渦対の放出に関するストローハル数とはく離渦放出時の断面形状を調べることによって考察を行う。

図5に各パラメータを変化させたときのレイノルズ数に対するストローハル数 $St (=fd/U_\infty)$ の値を示す。

図中の実線は渦対の放出周波数に対するTaylorの実験式

$$f = 0.198 \frac{U_\infty}{d} \left(1 - \frac{19.7}{Re} \right)$$

より求めたストローハル数である。ここでは主に $t=0.03\text{ mm}$ のモデルについて示し、 $t=1.0\text{ mm}$ のモデルについてはパラメータを変えてもほとんど変化が見られなかったため、RFFRC-Oモデルについてのみ結果を示した。

図5の(a)～(d)は、各モデルの Re 数に対するストローハル数が4種類の傾向を示したので、その傾向別にそれぞれ Pattern a, Pattern b, Pattern c, Pattern d に分けたものである。また、図6に断面形状の可視化写真とはく離渦放出時のスケッチを示したが、図5で分類した各パターンのモデルははく離渦の放出時の断面形状についても同じような特徴を持っていたため、同様に分類した。各パターンのストローハル数と断面形状に関する特徴・属するモデルは以下に示す。

Pattern a: このパターンに分類されるモデルは、レイノルズ数を変化させても、RCモデルと比較してストローハル数や断面形状にほとんど違いが見られなかった。ここに属するモデルは $t=0.03\text{ mm}$ の RFFRC-O-180 (複合円筒モデル・開放形・剛体部 180° 、以下同様)、O-270, $t=1\text{ mm}$ の O-90 である。この原因としては、 $t=0.03\text{ mm}$ のモデルでは、 $\theta=180^\circ$ を超えたため柔軟な弾性膜面の可動域が制限さ

れたことに加え、はく離点付近の壁面が固体壁であること、また $t=1\text{ mm}$ のモデルでは柔軟な弾性膜面の可動域は大きい膜の肉厚が厚いことにより、流れ場の変化に対して鈍くなったと推測される。

このパターンでは、柔軟な弾性壁面をもちながらも、流れ場およびモデル自身にほとんど壁面の柔軟性の影響が見られないため、RCモデルと同等に扱うこととし、以後考察からは省くことにする。

Pattern b: このパターンに分類されるモデルは、ストローハル数がレイノルズ数約 1.0×10^4 辺りから急に上昇し、断面形状がこのレイノルズ数辺りからはく離渦の放出に伴って図6(b)に見られるような局所的な変形を行った。ここに属するモデルは O-90, O-135, C-90-0.9 (密閉形・剛体部 90° ・容積率 0.9, 以下同様) である。

この局所的な変形の要因としては、これらのモデルにおいてははく離点近傍の壁面が柔軟な壁面であり、さらに他のモデルに比べて膜面の束縛力が小さいため、はく離渦の放出に伴う流れ場の圧力変化により変形が生じると考えられる。

さらにこのパターンの変形を行うと、はく離渦の放出時に流れ場から供給されるエネルギーが一部モデルの壁面を膨らませるのに使われ、渦が RC に比べて小

Fig. 5 St -number versus Re -number

Fig. 6 Cross sectional form and sketch of vortex shedding patterns

さい状態で放出される。これによって図4に見られたような流れ場になったと考えられる。そのメカニズムとしては、生成された渦による圧力低下に伴って膜面が渦中心に向かって膨らみ、図6(b)に見られるように断面の反対側の膜面の凹みという弾性変形を生みだし、この凹み動作時に周囲の流れを吸込み、新しい渦を誘起していたことから、この渦放出メカニズム⁽⁵⁾がRCはく離渦生成のメカニズムに加わることで、ストローハル数を増加させたと考えられる。

Pattern c: このパターンに分類されるモデルは、ストローハル数の上昇はPattern bよりも速い段階で見られるが、あまり高い値は示さなかった。また、断面の変形もほとんど見られなかった。ここに属するのは、密閉形モデルの中でも容積率 V' が1.0を超えるC-90-1.0とC-90-1.1のモデルである。

これらのモデルは柔軟な弾性壁面が内圧の影響を強く受けるため、断面形状は円形を保っているが、モデル全体的には弾性体であるためレイノルズ数が 6×10^3 を超えるあたりから、モデル自体の上下振動が見られた。この上下振動が起り始める辺りからストローハル数が上昇している。この振動周期は渦の放出周期と一致していたが、同じ渦対形状をしているRCに比べると周期が短い。また、渦対の放出位置がモデルに近づいていたことから、このパターンでは内部液体の慣性による振動が渦の発生に強い影響を与えていたと考えられる。

Pattern d: このパターンに属するモデルは内部にディフューザをもつCD-90-0.9(密閉形・ディフューザあり・剛体部 90° ・容積率0.9, 以下同様)CD-90-1.0, CD-90-1.1である。ストローハル数に関してはPattern aと同じくRCとあまり違いが見られないが、柔軟な弾性壁面には図6(d)に示すような、 $d/10 \sim$

$d/20$ の波高を持ったはく離渦の発生とは同期していない進行波が観察された。この進行波はディフューザがあるため渦の放出に伴う流れ場の変動に内部液体が応答できず遅れが生じたため、柔軟弾性膜面のみが変形することができたために発生したと推測される。

以上のことから、流れ場やはく離渦の放出に影響を与える重要な要因は、はく離点付近の壁面の流れ場に対する応答性と考えられる。応答性が極めてよいと、受動的な変形であるにも関わらず、流れ場に対するモデル自体の影響を減少させられる、すなわち抵抗減少につながる事が明らかになった。

3.3 モデルの受ける流体力 3.1, 3.2 節において、RFFRCモデルのうち応答性を高めたモデルは、後流の運動量損失が減少することを示したが、後流中の運動量損失の減少は剛な物体については、モデルの受ける抗力 D_{ML} がピトー・トラバース法により、

$$D_{ML} = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho U_{(y)} (U_{\infty} - U_{(y)}) dy$$

のように運動量損失を用いて表されることから、モデルの受ける抗力の減少を意味することになる。そこで実際に測定した流体力、とくに抗力について時間平均値、および時間変動波形について考察し、モデルの壁面の応答性との関係について考察する。

図7に各モデルの抗力の時間平均値 $\bar{D}$ をRCモデルの抗力値 $\bar{D}_{RC}$ との差で表した値と後流の $x=4d$ における運動量損失より求めたおのおのの計算値 $D_{ML} - D_{RC}$ を示す。この結果より、柔軟な弾性表面をもつ各モデルも抗力値は後流の運動量損失より求める値とは必ずしも一致しないということが明らかになった。さらに3.2節で分類したPattern bにおいては、変形の傾向は同じでも抗力の傾向は、一方は減少、一方は増加の傾向を示し、一致しなかった。しかし、こ

Fig. 7 The mean value of drag and drag calculated by momentum loss

の Pattern b の RFFRC-O モデルはモデルと流れ場の間に流体の出入りがあるため、他のモデルや RC の抵抗値と直接比較を行えないため抵抗値が減少しているとは言いがたい。一方、RFFRC-C-90-0.9 の抗力値は Pattern c と同じ傾向を示していた。また、流れ場の変化がほとんど見られなかった Pattern d のモデルは、ディフューザの効果が薄れる Re 数 1.6×10^4 を超えるまで RC よりも抗力は低かった。

これらのことから、モデルの受ける抗力の時間平均値の傾向は、流れ場の大きな変化や断面形状の大変形には必ずしも依存していないと考えられる。

この原因を考えるために、抗力の増加したモデルと減少したモデルについて抗力の時間変動波形の比較を行った。図 8(a) には基本波形として、RC モデルと流れ場の影響が減少していた RFFRC-O モデルの抗力の時間変動波形を、図 8(b) には図 7 で見られた抗力の時間平均値が増加傾向をとったモデルと減少傾向をとったモデルに対するそれぞれの時間変動波形を示した。この図より、ディフューザのあるモデルは開放形の波形に近く、ほとんど振動が見られないのに対して、ディフューザのないモデルは RC よりもはるかに大きな渦の放出周期と一致した周期を持つ幅の広い振動波形が現れていた。

このことから、抗力の増加の原因としてモデル内部の液体の慣性力の成分が抗力に付加されたことが考えられる。

さらに Pattern d の表面の微小変形自体が抗力軽減に関係していると考えられることから、イルカの遊泳中に観察される抵抗軽減のための微小進行波との関連性も推測され、今後さらなる解析を行う必要があると考えられる。

(a) Basic time variation patterns of drag

(b) Two time variation patterns

Fig. 8 Time variations of drag

4. 結 言

柔軟な弾性表面をもつ円筒に働く流体力とその周りの流れ場について可視化実験と抗力の測定を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 前面が剛で後部が柔の円筒モデルのはく離点近傍の壁面が非常に柔軟で周囲の圧力変化に応じてかなり自由に変形できる場合、はく離渦の放出に伴う壁面の变形により渦対の放出周波数が高まり、ストローハル数が剛円柱の場合より 20~30% 高くなった。

(2) この前剛後柔円筒モデルでは、剛円柱にくらべて流れのはく離点が $10 \sim 20^\circ$ 後流へ下り、したがって後流の幅が小さくなった。しかし、この後流幅の縮小は抗力減少に結びつく場合とそうでない場合とがあった。

(3) 密閉形前剛後柔円筒モデルの内部流体の流動を円筒内部のディフューザにより妨げると、円筒表面に微小な進行波が発生し、このとき抗力の減少が見られた。

終わりに、本実験に協力して頂いた、当時の本学 4 年生の田地川 勉、浜野洋次、大谷敏雄、香山和久、藤田浩史の諸氏に謝意を表する。

文 献

- (1) Lighthill, J., *Mathematical Biofluidynamics*, (1975), 3, SIAM publications.
- (2) 谷一郎, 科学, **34**-9(1964), 471-476.
- (3) Kramer, M. O., *J. Am. Soc. Naval. Engrs.*, **74**(1960), 341-348.
- (4) Carpenter, P. W. and Garrad, A. D., *J. Fluid. Mech.*, **155** (1985), 465-510.
- (5) Nakata, M. and Ohba, K., *J. Phys. Soc. Japan*, **65**-9(1996), 3080-3081.