

# 孔列のある二次元物体を過ぎる流れと抵抗

谷 嶋 良 夫\* 佐 野 理\*

## Flow and Drag of Two-Dimensional Bodies with Rows of Holes

Yoshio YAJIMA and Osamu SANŌ

*Department of Applied Physics, Tokyo University of Agriculture and Technology*

### ABSTRACT

Measurements of the velocity field around and the drag force on cylindrical bodies in water flows were made by means of a laser Doppler velocimeter and strain gauges, respectively. A circular cylinder and an airfoil with different types of surface roughness as well as those with single or double rows of holes were tested. In particular a cylinder with double rows of holes placed across its diameter shows a drag reduction for fairly wide range of attack angle. It amounts to as much as 38% in comparison to a smooth surfaced cylinder in the Reynolds number range of  $5\text{-}9 \times 10^3$ .

Key Words : drag reduction, cylinder with holes, roughness

### 1. はじめに

形状による抵抗の減少は自然界においても、また工学的な応用においても重要な問題である。例えば、イルカの高速泳法には体形や皮膚の構造が、また急激な方向転換には皮膚表面のしわの移動が影響していると言われている<sup>1, 2)</sup>。これらの流体力学的な解明は、イルカの生態や進化の問題とも関係するだけでなく、より効率の良い物体形状や泳法の可能性とも関連する。実際、競泳用の水着にはさまざまな抵抗減少の試みがなされている。水着の素材表面の凹凸を減らし摩擦抵抗を5~12%軽減させることができるという報告や、表面のフラット化に加えて細い溝を縦に走らせた特殊シリコンコート<sup>3)</sup>の装着により、より抵抗減少の効果を上げることが可能であるとの報告がなされている。

表面加工の抵抗への影響を調べた基礎研究は非常に古い歴史を持っているが、そのうち近年になって着目されているものの1つはリブレットである。リブレットは縦溝を持つ壁面形状であり、溝の形状もV字型やU字型など様々である。これらを航空機の表面に用いた実験による

と2~3%の抵抗減少が、また軸対称物体では最大で7~8%の効果が得られている<sup>3)</sup>。もう1つは一様流中に置かれた円柱にスリットを施したものであり、スリットの無い円柱と比較して明らかに低い抵抗係数が得られている。その軽減度は亜臨界レイノルズ数の領域で38%にも達し、また一様流の方向とスリットとの角度を迎角 $\alpha$ とすると $\alpha \pm 60^\circ$ までの広い範囲で抵抗減少の効果が得られることが報告されている<sup>4)</sup>。

これらを踏まえ、本研究では一様流中に置かれた二次元物体の抵抗及び流れ場に対する表面形状、とくに孔列の効果について報告する。

### 2. 実験装置および方法

実験に用いた回流水槽の概略を図1に示す。使用した流体は水である。まずレーザー流速計により水槽内の流速測定を行なった。得られた速度分布から、測定部の中央付近では一様流に近い流れが得られていることが確認された。

流体から受ける抵抗の測定にあたっては、物体を支持

\* 東京農工大学工学部

する測定板に取り付けたストレインゲージの歪みを利用する。まず弾性をもつ支持板を用いて物体を水槽側の固定部とつなぐ。支持板上部にストレインゲージを貼り付け、物体に働く力によるストレインゲージの歪みを電気抵抗変化として検出する。この電気抵抗変化の測定には、精度を上げるため2ゲージ法を用いた<sup>5)</sup>。ストレインゲージの電気抵抗変化と力の較正曲線をあらかじめ実験的に求めておき、物体に働く抵抗を求める。

本実験では一様流中に物体を置き、流速と物体に働く抵抗を同時に測定した。流速測定は20 [s] 間の時間平均値を用いた。電気抵抗は抵抗測定装置により周波数20 [Hz] でサンプリングし、20 [s] 間の合計400個の時間平均値を用いた。また物体の周りの流れを水素気泡法<sup>6)</sup>を用いてビデオカメラで撮影し、その様子を観察した。

## 2.1 物体の種類と配置

試験物体には円柱と翼型の2種類を用いた(図2参照)。これらは流れの方向と垂直に置かれほぼ2次元物体と見なせる。

### (1) 円柱

- (a) 円柱：直径32 [mm] のビニールパイプ製
- (b) 片孔円柱：上記の円柱に直径3 [mm] の孔を中心間隔6 [mm] で円柱の母線方向に開けた円柱。孔列と流れ方向とのなす角を迎角 $\alpha$ とし、下向きを正とした。 $\alpha=0^\circ, 40^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ のそれぞれの場合について測定。
- (c) 両孔円柱：円柱の母線方向に孔列を2列開けたもの。

の。孔列は円柱の直径の両端に配置される。 $\alpha=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ の場合を測定。

### (2) 翼型

翼型は幅89 [mm]、厚み29 [mm]。表面形状の違いにより以下の7種類に分類する。

- (a) 滑面：翼型模型の表面にOHPフィルムを貼ったもの。
- (b) 突起 (A~G)：滑面に、三角柱を取り付けたもの。取り付ける位置によってA~Gに分類。
- (c) 縦溝：流れの方向と平行になるように縦溝をつけたOHPフィルムを貼り付けたもの。
- (d) 横溝：流れの方向と垂直になるように横溝をつけたもの。
- (e) デンプル：滑面に、孔(径3mm)の開いた板を上下両面に貼り付けたもの。
- (f) 一様粗さ：翼型模型に紙やすり(40番)を貼り付けたもの。
- (g) 孔あき：翼型模型の片面の前縁付近と後縁付近に孔(径3mm)を母線方向に中心間隔6mmで開けたもの。迎角 $\alpha=0^\circ, 20^\circ$ について測定した。模型を傾けた場合も同様に測定した。

## 2.2 レイノルズ数と抵抗係数

一般に速度と抵抗は無次元量のレイノルズ数 $Re$ と抵抗係数 $C_D$ で表わされる。本実験においても、流速測定から得られる平均流速 $U$ と抵抗測定から得られる抵抗 $F$ を用いてレイノルズ数と抵抗係数を求め、両者の関係を調べる。

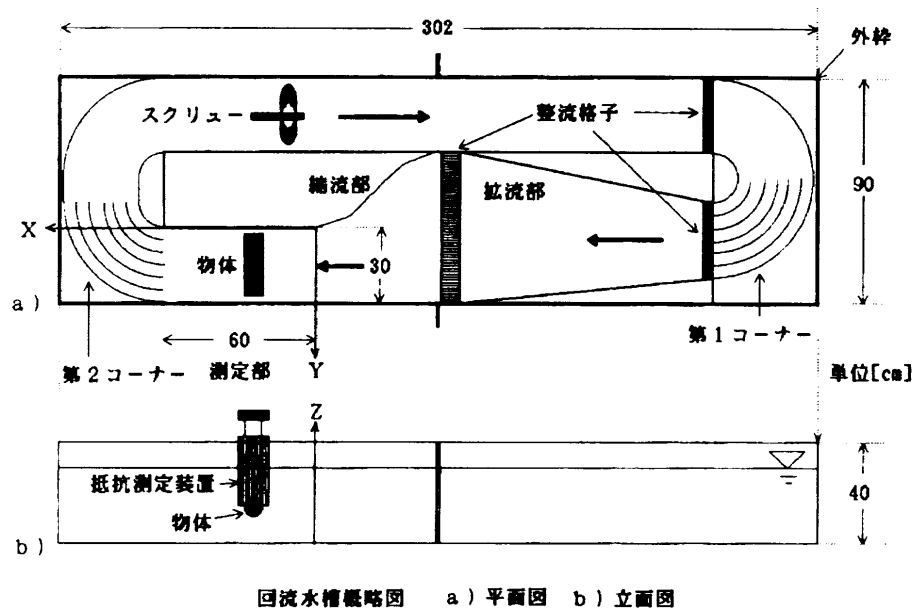


図1 実験装置概略

ただしレイノルズ数は $Re=DU/\nu$ 、抵抗係数は $C_D=F/(1/2)\rho U^2 A$ で定義される。ここで、 $D$ は流れに垂直な方向の厚さ、 $\nu$ は水の動粘性率、 $\rho$ は水の密度、 $A$ は物体の流れに垂直な断面積である。

### 3. 結果と考察

電気抵抗測定の実験波形から物体が振動しているのが確認された。この振動の原因として考えられるものに支持板の弾性による固有振動、カルマン渦の放出による振動、流れの脈動などが挙げられる。*LDV*の流速測定から流速変動が約3%以下であることが分かっているので流れの脈動はあまり影響していないとみなせる。水素気泡法による可視化から、物体の伴流に渦が発生しているのが観測された。渦の発生周期 $T$ からストローハル数 $St=D/UT$ を求めると $St\sim 0.21$ となる。これは一般的によく知られているカルマン渦の発生による数とほぼ同じである。したがって、伴流内にはカルマン渦が発生していると考えてよい。

#### 3.1 円柱のレイノルズ数と抵抗係数の関係

##### (1) 孔なし円柱

孔なし円柱のレイノルズ数と抵抗係数の関係を求めた。 $Re$ が約 $6\times 10^3$ では $C_D$ が約1.45~1.50であり、 $Re$ が約 $8\times 10^3$ では $C_D$ が1.6~1.8になっている。円柱の一般的な $C_D$ の実験値は、 $10^3 < Re < 2\times 10^5$ の範囲で1~1.2のほぼ一定値を示すことが知られているので、本実験の測定値はいくらか大きな値となっている。この原因として水路の壁からの影響（流路壁の拘束効果）や支持板に働く抵抗の付加、等が挙げられる。支持板は物体と比べて断面積をかなり小さくしてある（面積比0.4%）ので、影響は小さいと考えられる。これに対して本実験装置における拘束比（物体の断面積と流路の断面積の比）は1割程度である。このことを考慮するとほぼ4割程度の抵抗係数の増加が見込まれ、既存の実験値とほぼ一致する。

##### (2) 片孔円柱

片孔円柱の迎角 $\alpha$ を変化させたときのレイノルズ数と抵抗係数の関係を図3に示す。比較のために孔なし円柱のデータも載せてある。図から $\alpha=0^\circ$ のときに円柱や他の迎角と比べて $C_D$ が低いことが見られる。

##### (3) 両孔円柱

両孔円柱の迎角を変化させたときのレイノルズ数と抵抗係数の関係を図4に示す。図から $\alpha=0^\circ\sim 90^\circ$ のすべての範囲で抵抗の減少が見られる。特に $\alpha=20^\circ\sim 60^\circ$ のとき、 $C_D$ がほぼ一定で約1の値になっている。この値は孔なし円柱と比べてかなり低く、抵抗の軽減度 $(C_{D0}-C_D)/C_{D0}$ （ここで $C_{D0}$ は孔なし円柱での抵抗係数とする）は31~38%

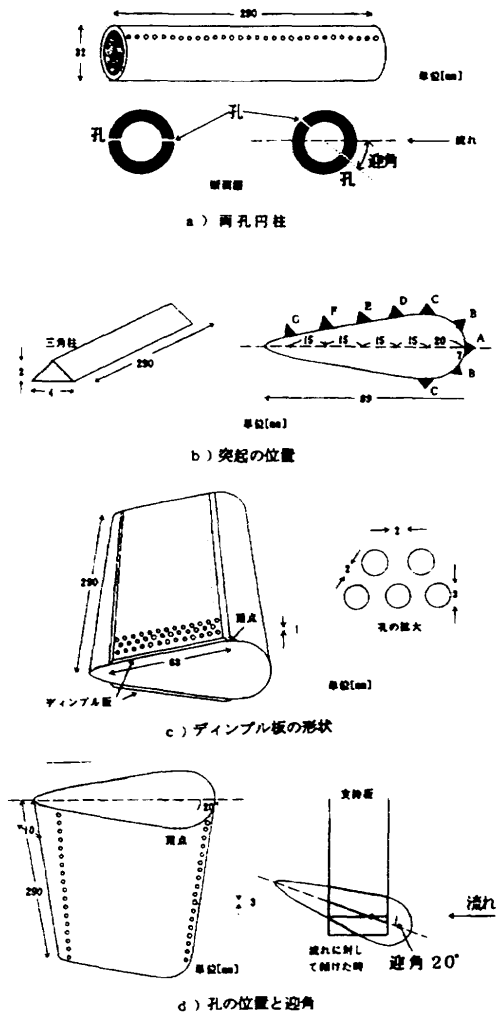


図2 測定物体の形状

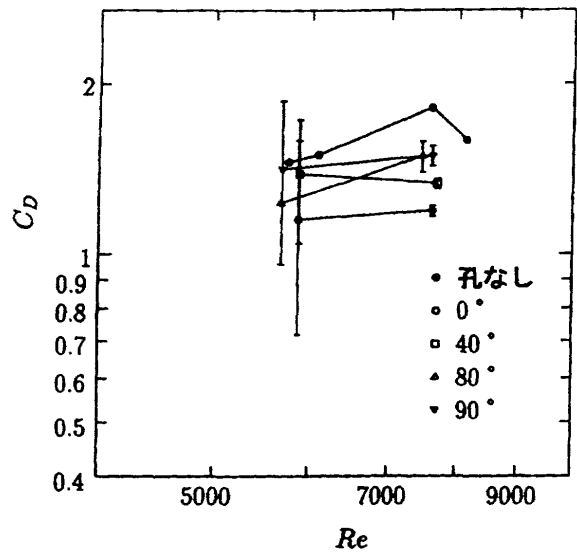


図3 片孔円柱の抵抗係数 — 迎角依存性

に達する。同様の結果はスリットのある円柱でも観測されているが、スリットに比べて小さな面積しか持たない孔列でも同程度の減少が見られたことは注目に値する。

両孔円柱での抵抗減少の原因として圧力抵抗の減少や渦の発生の抑制などが考えられる。円柱のような鈍い物体では圧力抵抗の割合が摩擦抵抗と比べて大きい。低い抵抗係数の値が得られた迎角 $\alpha=20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ のとき、上流側にある孔の位置は剥離点よりも前方に、下流側にある孔の位置は伴流の中にあり、両方の孔の間には流体が満たされている。前面にある孔に流体から圧力が働くと、その圧力は円柱の内部の流体を通じて下流側の孔へと伝えられる。その結果、前面に働く圧力が下がり、下流側では圧力が増加するので、円柱の前後の表面で圧力差が減少し物体に働く圧力抵抗が減少すると考えられる。また、両孔円柱の内部にインクを注入した可視化実験より、迎角 $\alpha=20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ のとき、前面の孔で吸い込みが起こり、下流側の孔で噴出が起こっていることが観測された。前面の孔での吸い込みによって前面の孔のある側の境界層の厚みが減少し、その結果剥離点が下がる。他方、下流側の伴流内部にある孔の近傍では流体の噴出により渦の発生が抑制される。これらの効果により伴流領域が狭められ抵抗も減少すると考えられる。これに対して迎角 $\alpha=80^\circ, 90^\circ$ のときの可視化実験では、内部のインクは上下の孔からそれぞれ交互に噴出するのが見られた。これは、2列の孔のいずれもが剥離点よりも後方にあるため、両者間の圧力差が小さく、通常のカルマン渦の放出と同様の流れが形成されていることによると思われる。

### 3. 2 翼型の形状と抵抗係数の関係

#### (1) 滑面

表面が滑らかな翼型のレイノルズ数と抵抗係数の関係を図5に示す。図から円柱に比べて明らかに $C_D$ が低いことがわかる。

#### (2) 突起

滑面に三角柱を取り付けた翼型の、取付位置によるレイノルズ数と抵抗係数の関係も図5に示す。図からB点に取り付けたものが最も低い $C_D$ 値を与えることがわかる。しかし、滑面と比べて $C_D$ 値は高く、 $Re$ が増加するとその差は顕著となる。C点に取り付けたものが最も高い $C_D$ 値を示すが、これは流れに対して垂直平板が置かれたように振る舞うためであると思われる。D~G点のものはほぼ同じ値を示した。これは下流側の伴流内にあるので差が見られなかったためであると思われる。

#### (3) 表面粗さ

翼型に表面加工したもののレイノルズ数と抵抗係数の関係を図6に示す。翼型に縦溝や横溝をつけたものは滑面と比べて大きな違いが見られなかった。ディンプル板を

取り付けたものは、 $Re$ が小さいときは円柱の抵抗係数と同程度の値をとるが、 $Re$ が増加すると滑面の場合よりも急勾配で低くなっていることが見られる。一樣粗さを取り付けたものは $C_D$ 値が1を越えており、 $Re$ の増加に伴って $C_D$ も増加する傾向が見られた。

#### (4) 孔あき

翼型に孔をあけたものを流れに対して迎角 $\alpha=0^\circ, 20^\circ$ に傾けたときのレイノルズ数と抵抗係数の関係を図7に示す。 $\alpha=0^\circ$ のとき孔あき翼は滑面翼と $C_D$ 値がほぼ同じ値をとった。これに対して $\alpha=20^\circ$ のときは $Re$ が増加すると $C_D$ 値が滑面翼と比べて低くなっているのが見られた。

本実験において翼型に表面形状を変化させたものを用いたが、抵抗の減少は見られなかった。しかし、抵抗係数のレイノルズ数依存性は、滑面とは違った傾向を示すものがあつた。また、孔あき翼では、流れに対して傾けたときに抵抗係数の減少が見られたが、これは円柱の場合と同じ効果が働いたためと思われる。

## 4. 結論および議論

一樣流中に置かれた物体に働く抵抗をレイノルズ数 $5 \times 10^3 \sim 9 \times 10^3$ の範囲で測定した結果以下のことがわかった。

- 1) 両孔円柱では、孔をあけていない円柱と比較して迎角が $0^\circ \sim 60^\circ$ のときに特に大きな抵抗の減少が見られ、抵抗の軽減度は最大で38%であった。スリットに比べて小さな面積しか持たない孔列でも同程度の減少が見られたことは注目に値する。
- 2) 片孔円柱では、迎角が $0^\circ$ のとき最も大きな抵抗の減少が見られた。
- 3) 表面形状を変化させた翼型では、滑らかな表面を持つ翼型と比較して抵抗の減少が見られなかった。しかし、抵抗係数のレイノルズ数依存性の傾向の変化が見られた。

本実験の結果によると、円柱に孔列をあけることにより大きな抵抗減少が見られたが、これは迎角が $0^\circ \sim 60^\circ$ と広範囲にわたって効果があるので、流れの方向が変動するような場合でも有効である。また、孔の占める面積の割合はスリット等に比べても非常に小さいので強度的に問題が少ないと思われる。

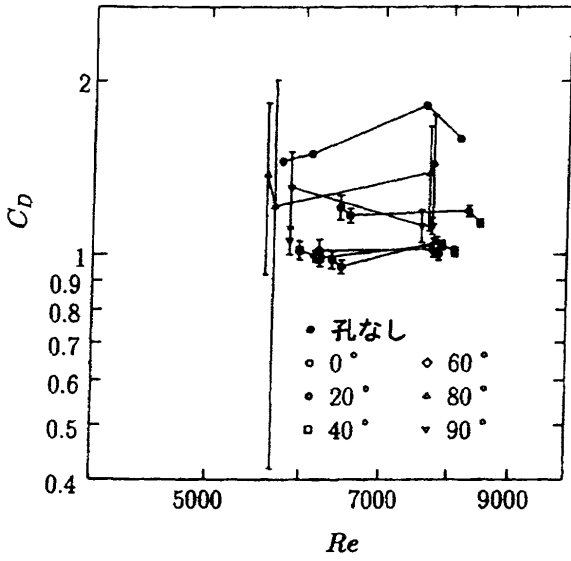


図4 両孔円柱 (図2a) の抵抗係数 —— 迎角依存性

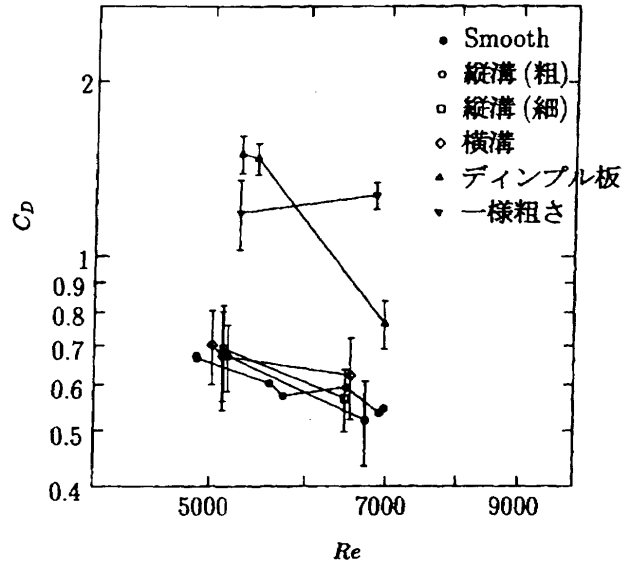


図6 翼型の抵抗係数 —— 表面粗さ依存性 (図2c)

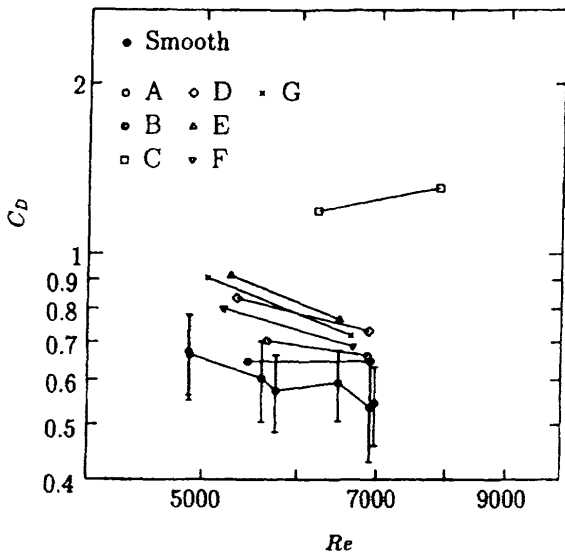


図5 翼型の抵抗係数 —— 三角柱の取り付け位置依存性 (図2b)

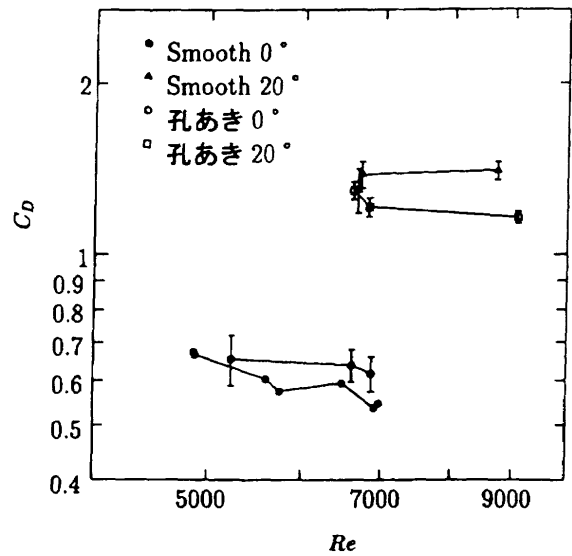


図7 翼型の抵抗係数 —— 孔列の影響 (図2d)

参考文献

- 1) 大村秀雄 : 鯨の生態, (共立出版, 1974).
- 2) H. ヘルテル 著 土屋喜一 訳 : バイオエンジニアリング, (朝倉書店, 1985).
- 3) 中尾晨一 : リプレット技術の実用化への課題, ながれ13 (1994) 271-277
- 4) 井筒直樹 : スリットを持つ円柱に働く流体力の測

- 定, ながれ12 (1993) 293-301.
- 5) 横山直隆 : パソコン機械制御と制作実習入門 (技術評論者, 1990).
- 6) 浅沼強 編 : 流れの可視化ハンドブック (朝倉書店, 1977).
- 7) 日本流体力学会 編 : 流体力学ハンドブック (丸善株式会社, 1987).