

東京工業大学 福岡捷二
沖繩開発庁 佐藤郁太郎
大阪ガスKK 堀 康次郎

1. まえかき

著者らの1人は¹⁾既に層流中で回転せずに静止している球に働く抗力と揚力に及ぼす境界(水面と底面)と流速分布の影響を明らかにした。本研究は 前報¹⁾に更に発展させ 層流中を回転運動・非回転運動しながら移動する球のまわりの流況を明らかにし 相対運動する球に働く揚力のみつもとりに可能にした。

2. 実験装置と実験方法

水路は 長さ 400 cm, 巾 25 cm, 高さ 20 cm のアクリル製開水路で 測定は流路床勾配を $1/1000 \sim 1/2000$ に変化させ、境界層が水面に達した等流区間で行った。使用流体は グリセリン溶液である。用いた球は、直径 $d = 1.4$ cm, 2.1 cm, 2.8 cm の釣用の玉うきである。非回転球は 球の中により下に重しを置くことにより、回転球は 球内部に種々の比重のグリセリン溶液をつめ密封することにより異なった重さの球を製作した。等流状態の層流中を運動する球は 壁から一定高さを保ちながら流下する。この状態では、揚力は、グリセリン中重量と釣り合っているの この時の球のグリセリン中重量を測定して揚力を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 定常運動する球のまわりの流況の可視化

流況の中に水素気泡をブロック状に連続的に放出しておき、その中で球が移動していく時の水素気泡の変形過程を球と共に移動させた cine camera で撮影し、流線と流取った。非回転球の周りの流況を写真-1に 流線図を図-1に示す。

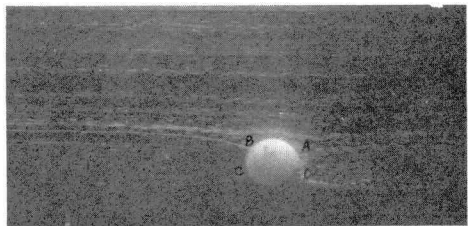


写真-1. 運動する球の周りの流況

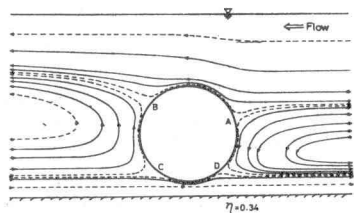


図-1 非回転球の周りの流況

破線は 可視化からは明確にはできなかった領域の想像流線である。図中、A、Cは濃み点、B、Dは剥離点である。定常運動する球のまわりの流況が静止球のそれと明確に異なる点は、静止球では下流側にのみ wake が生じるが 移動球では上流側と下流側に生じることである。これは、図-2に示すように球の運動に相対的にみると球の上半部と下半部で流況の方向が異なるためである。

可視化から次のことが明らかとなった。wakeの大きさは、相対速度 ΔU で表わした Re 数 $(=1000d/\nu)$ に支配される。 $\eta (=y/h)$ が増すにつれて wakeの大きさは 小さくなる。いずれの η に関しても、上・下流側に形成される wake は、ほぼ対称で静止球の抗力・揚力に比してかなり小さくなる。

一方、流況の流速分布のために回転しながら移動する球の周りの流況を図-3に示す。球の回転は それぞれの wake zone に流体を効果的に送りこむために、非回転球の場合に比し球のまわりの圧力が一様化の方向に進み、wake zone が狭くなっている。

3.2 定常運動する球に作用する揚力

相対速度 ΔU 球中心における流体の速度と球の速度の差を相対速度 ΔU と定義する。図-4は、 ΔU の実験値で η が大きくなるほど値は

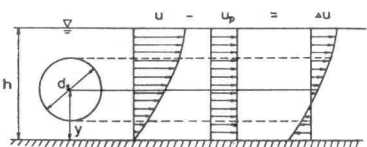


図-2 流体と球の相対速度

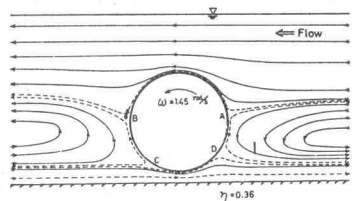


図-3 回転球のまわりの流況

小さくなる。本実験の範囲では、 $\frac{\Delta U}{U}$ は $\frac{d}{h}$ に無関係で、 η のみの関数となり次式で近似的に表わすことができる。

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{20} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (1)$$

非回転球と回転球の $\frac{\Delta U}{U}$ を比較すると η が大きいところでは違いはみられないが、 η が小さくなると回転球の $\frac{\Delta U}{U}$ の方が小さくなる。この事は可視化からも明らかであった様に回転球では上・下流の wake zone が狭まり、非回転球に比して抗力が小さくなる。その為 ΔU が小さくなる。 η が大きいところでは、速度勾配が小さい為、球の回転数が小さく、両者の間に差は現われない。

揚力係数 C_L ΔU を用いて揚力係数を次の様に定義する：

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho (\Delta U)^2 \frac{\pi}{4} d^2} \quad (2)$$

次元解析より揚力係数は次式で与えられる。

$$C_L = f_1 \left(\eta, \frac{\Delta U}{U}, Re_d, \frac{d}{h} \right) \quad (3)$$

開水路層流の流速分布形は (4) 式となる。

$$\frac{u}{u_{max}} = 2\eta - \eta^2 \quad (4)$$

(3) 式は (4) 式を用い変形し、(5) 式で表現できる。

$$C_L = f_2 \left(\frac{du}{dy} \frac{d}{\Delta U}, \frac{\Delta U}{U}, Re_d, \frac{d}{h} \right) \quad (5)$$

図-5 は、揚力の実験値で同一条件のもとでは、非回転球のほうが回転球よりも揚力大きいこと（可視化からも明らかである）、静止球よりも揚力が 1 オーダー小さいこと、静止球のように夏の揚力が生じないことがわかる。非回転球の揚力と相対速度の実験値を用い最小 2 乗法を適用すると、次式が得られる。

$$C_L = 10 \left(\frac{du}{dy} \frac{d}{\Delta U} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{Re_d} \quad (6)$$

(1) 式より求めた C_L と (6) 式の比較を図-6 に示す。回転球の揚力は非回転球に比し小さいが $\frac{\Delta U}{U}$ の値はそれほど差がないので、回転球の C_L は (6) 式の curve より小さくなる。

非回転球の揚力の算定式 (1), (4), (6) 式の関係と (2) 式に代入すると、非回転球に対する揚力の算定式を得る。

$$\frac{L}{\mu d u_{max} \left(\frac{d}{h} \right)^{\frac{1}{2}}} = \left\{ (1-\eta)^2 (2-\eta) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

(7) 式と実験値の対応を図-7 に示す。(7) 式は平均的には実験値をよく説明するといえる。

抗力の算定 流体中を定常運動する球の抗力 F を直接測定することは不可能に近い。しかし間接的には算定可能である。即ち流路速度勾配を η とすると定常運動する球の抗力と揚力の関係は $F = L \eta$ となる。従って球の抗力は揚力に勾配を乗じたものとなり、その大きさはきわめて小さい。

参考文献 1) 福岡、石田、鮎目、土木学会論文報告集、No. 271、1978. 3.

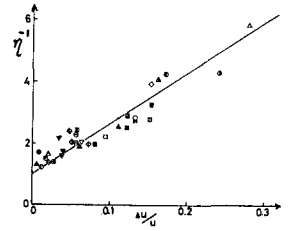


図-4 相対速度の実験値

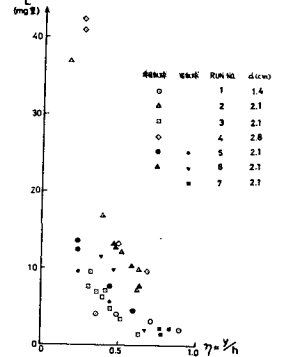


図-5 揚力の分布

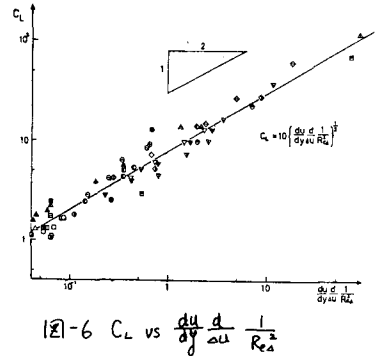


図-6 C_L vs $\frac{du}{dy} \frac{d}{\Delta U} \frac{1}{Re_d}$

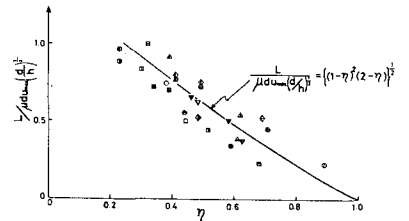


図-7 (7) 式と基準元揚力分布