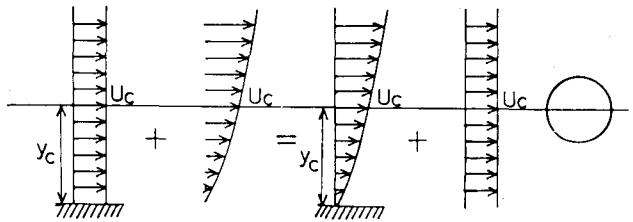


東京工業大学大学院 学生員 中村徹立
東京工業大学 正会員 福岡捷二

1. はじめに 福岡ら^{1),2)}は、層流中に吊された球及び運動する球に作用する抗力と揚力を実測したが、それらの測定値には壁面及び速度勾配の影響が重なっており、流体力に及ぼすそれぞれの寄与分は明確にとれなかった。本研究では静止球に作用する抗力に及ぼす壁面及び速度勾配の影響の寄与分を更積することも目的としている。Re数が小さくN-S方程式が線型化できる場合には 図1に示すように壁面のみの影響による付加的抵抗と速度勾配のみの影響による付加的抵抗を加えたものは壁面及び速度勾配の影響が重畳している時の付加的抵抗に等しいと考え、壁と速度勾配の影響を評価する。

2. 実験装置と実験方法 水路は長さ4m、中0.25m、高さ0.2mのアクリル製循環水路であり、使用液体はグリセリン溶液である。用いた球は直径1.5cm及び2.1cmの市販の釣用玉うちで球内部に四鉛化亜鉛水溶液をつめ密封することにより、重量の異なる球を製作した。図2の実験1は一樣流中の球に作用する流体力を測定する方法であり、境界層が発達している水路入口附近の一樣流速分布をもつ領域で実験を行った。実験2では一樣流中に径の等しい2つの球を鉛直軸が一致するように並べる。この時、その対称面を通過する流れはなく対称面を壁面であるとみなすことができ壁のみの影響による流体力を測定することが可能となる。これを鏡像原理を用いた方法と呼ぶ。実験3は Poiseuille Flow 中で壁面及び速度勾配の両方の影響を受けている時の流体力を測定する実験である。それぞれの実験で球の中心に作用する流速 U_c と等しくすると、前述の条件が満たされる場合には実験2と実験1の流体力の差は壁のみの影響によるものと考えられる。さらに実験2と実験3で壁から球の中心までの距離 Y_c と等しくすると、実験3と実験2の流体力の差は速度勾配のみの影響によるものと考えられる。抗力及び揚力は図3に示すように支点のまわりの力のモーメントの釣合式より求める。



(a)壁の影響 (b)速度勾配の影響 (c)壁と速度勾配の影響 (d)一樣流の影響
図1 抗力分離の考えかた

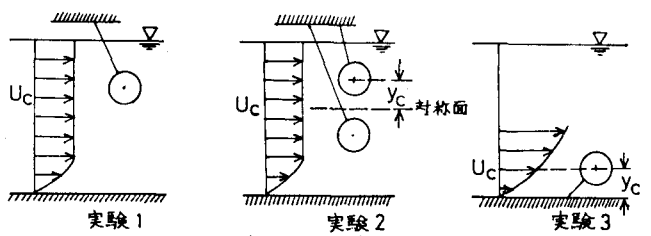


図2 実験の種類

それぞれの実験で球の中心に作用する流速 U_c と等しくすると、前述の条件が満たされる場合には実験2と実験1の流体力の差は壁のみの影響によるものと考えられる。さらに実験2と実験3で壁から球の中心までの距離 Y_c と等しくすると、実験3と実験2の流体力の差は速度勾配のみの影響によるものと考えられる。抗力及び揚力は図3に示すように支点のまわりの力のモーメントの釣合式より求める。

$$F \cdot Y_c + \int_0^{Y_c - a} g_c(y) \cdot y \, dy - (L - w_c) x_c = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに F : 抗力, L : 揚力, Y_c : 壁から球の中心までの高さ, x_c : 糸の支点より水平方向の距離, w_c : 球のグリセリン中重量, a : 球の半径, g_c : 糸に分布する単位長さ当たりの抗力である。用いた糸は0.2号の釣糸(直径0.074mm)であり、糸に作用する抗力は一樣流中の円柱の抗力係数を用いて

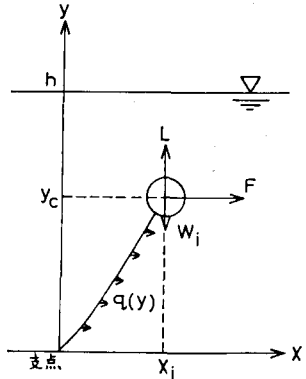


図3 測定法

$$g_c(v) = C_D \frac{1}{2} \rho U(v)^2 d$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \left[\epsilon + O(Re \epsilon) \right], \quad \epsilon = 1 / \left[\frac{1}{2} - \ln \frac{e^{\gamma} Re}{P} \right]$$

とする。実験1及び実験2では球を上から平すことにより糸が一樣流速分布の領域にあるようにした。実験3では糸の抗力の影響を小さくするため下から球を支持した。層流の場合にはグリセリン中重量のみが異なる同一径の球を同じ高さに支持した時、球に作用する抗力及び揚力は両者で等しくなり、(1)式と同様の釣合式が成立つ。これら一連の (Y_c, W_c, X_c) を測定し(1)式より f, λ を求めることができる。粘性摩擦係数及び球の重心の偏りが小さいため、球を平す糸は球面にほぼ直交し球の中心のまわりの回転モーメントは無視できる。

3. 実験結果 揚力は抗力に比べて小さいため十分な精度で測定値が得られなかったため本研究では抗力のみについて検討した。球の抗力は物体の流線方向の投影面積及び物体に作用する運動量にはほぼ比例する。一樣流及び Poiseuille Flow で球の中心に作用する流速を等しくすると、球に作用する運動量もほぼ等しくなる。このため U_c を等しくして実験1, 2, 3の抗力を比較することにより壁及び速度勾配の寄与分を求めることができる。図4は $U_c = 3 \text{ cm/sec}$, $Re_c = 3$ の時の抗力と壁から球の中心までの距離の関係を示す。実験3の Poiseuille Flow での抗力に着目すると、球が壁に近づき速度勾配が増すと抗力は増加している。壁から球の中心までの距離を等しくすると、実験3と実験2の抗力の差は速度勾配の寄与分を示し、実験2と実験1の抗力の差は壁の寄与分を示す。このことから抗力に対する速度勾配及び壁の寄与分が顕著に表われていることがわかる。 Re 数が3程度のとこには抗力に及ぼす壁の影響と速度勾配の影響は同程度の大きさを持つといえる。図6は $U_c = 11.3 \text{ cm/sec}$, $Re_c = 11$ の時の実験値であり実験2及び3での抗力には差が明確に認められず速度勾配の影響は顕著ではない。 Re 数が大きくなると速度勾配の影響は壁の影響に比べ相対的に小さくなるといえる。これは Re 数が大きくなるにつれて壁の存在による縮流の影響が相対的に重要になるためであると思われる。以上の結果を Re 数と抵抗係数の関係として図6に示す。この図には Stokes の抵抗係数及び適合性が高いと言われている一樣流中の球の抵抗係数の実験式を示しており、プロットした点の添字は速度勾配を示す。以上のことから結論として次の2点が言える。

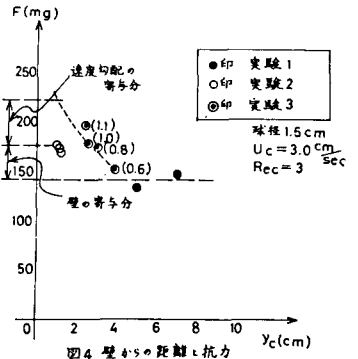
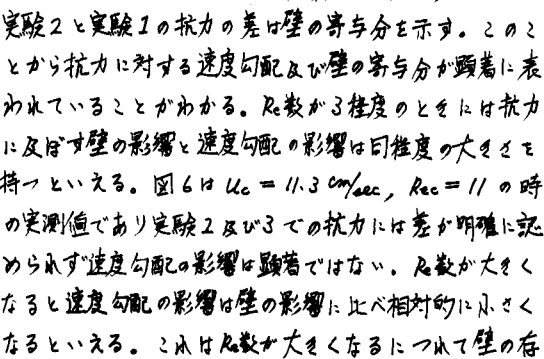


図4 壁からの距離と抗力

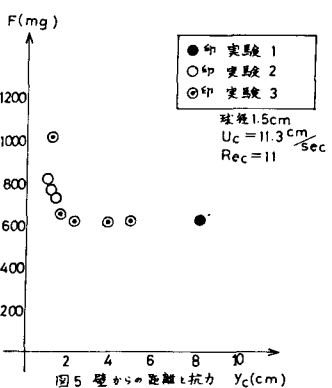


図5 壁からの距離と抗力

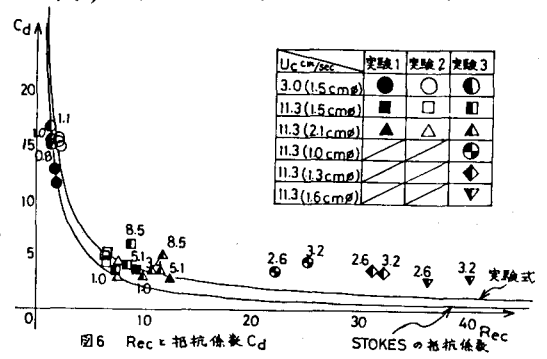


図6 Re_c と抵抗係数 C_D

以上の結果を Re 数と抵抗係数の関係として図6に示す。この図には Stokes の抵抗係数及び適合性が高いと言われている一樣流中の球の抵抗係数の実験式を示しており、プロットした点の添字は速度勾配を示す。以上のことから結論として次の2点が言える。

1. 層流中の球の抵抗係数は速度勾配が増すに従い増加する。
2. 層流中の球の抗力に及ぼす速度勾配と壁の影響は Re_c 数が3程度では同程度の大きさであり、一方、 Re_c 数が10程度では速度勾配の影響よりも壁の影響が卓越する。この点に関しては、さらなる測定数を増やし、より一般的な結論を得る必要がある。

1) 福岡ら: 自由表面をもつ層流剪断流中の球に働く抗力と揚力, 土木学会論文報告集, No. 271, 1978.
 2) 福岡ら: 層流中で運動する球に働く揚力と抗力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 295, 1980.
 3) Lamb, H.: Hydrodynamics, 6th ed. Cambridge Univ. Press, p. 616, 1932.