

II-266 開水路層流中に吊された球に働く流体力

協和コンサルタンツ 辻目英正

東京工業大学

村田和夫

東京工業大学

福岡慶二

まなび セン断流中で流体と球が相対運動している時の球に作用する流体力を知ることは、粒子浮遊流の力学特性を理解する上で、重要である。本研究は、その第一歩として、開水路層流中に吊されと静止している球に作用する抗力と揚力とを測定し、固定境界(底面)、変形境界(水面)、流速分布の流体力に及ぼす影響を明らかにした。

実験装置と実験方法 境界の存在と流速分布の流体力に如何なる影響を及ぼすかを調べるには、乱流変動の影響を取り除くことが望ましい。そこで、グリセリン溶液を用いた層流で実験を行った。水路は、長さ2m、巾0.15m、深さ0.1mのアクリル製循環水路である。用いた球は、市販の玉うすで、表-1に示すものを用いた。球内に、油、グリセリン溶液、水、鉛玉と重心が偏らないようにつめ、それぞれ此の径の球に対し4~10個の重量の異なる球と製作し、3種類の流量について流体力と測定した。等流区間で、図-1のように球と下から支持した時、支点Oのまわりのモーメントの釣り合いより次式を得る。

$$F \times y_c + \int_0^{y-a} q_i(y) \cdot y \, dy - (L + W_i) \cdot x_i = 0 \quad (1)$$

グリセリン重量のみが異なる同一径の球と同一高さで支持し、

一連の (y_c, W_i, x_i) の測定より、系の分布荷重 $q_i(y)$ を知り、

(1)式からFとLを求めることができる。しかし、球が水面に近づくにつれて、系の抗力の影響が大きくなる。この場合、球を上方より支持し、(1)式と類似の関係式を用いてFとLを求めた。

分布荷重 $q_i(y)$ は次のようにして求めた。用いた糸は、AZ号釣糸で、0.06mmと細く、糸に加わる力が高々数十mg重で、球に作用する抗力より十分に小さい。従って、糸の抗力は、一様流中の円柱に作用する抗力として求めることができる。非常に小さいRe数に対する一様流中の円柱の抗力は $\text{Lamb}^{11)}$ によって、次式で与えられている。

$$q_i(y) = 4\pi\mu u(y) / (1/2 - \ln(1.781 \cdot \text{Re}/\delta)) \quad (2)$$

(1)式と(2)式から、FとLを求めた。実測した球の抗力、揚力と水深の関係と、球径とパラメータとして、図-2に示す。点は球の中心位置、実線は下から支持し、点線は上から支持した場合である。

境界のある層流セン断流中の抗力 一様流中の球の抗力係数、定義に倣い、セン断流中の抗力係数を球の中心にある流速 U を用いて次のように表示する。

$$C_{DC} = F / \frac{1}{2} \rho U^2 \pi a^2 \quad (3)$$

図-3は、セン断流中の球の抗力係数 C_{DC} から、これと同じRe数を持つ一様流の抗力係数 C_{DO} と差引いたもの、すなわち、壁と速度勾配のみに起因する抗力係数 $(C_{DC} - C_{DO})$ と縦軸に、球径と壁の影響を考慮入れたセン断流の特性量からなる無次元量を横軸にとりて整理している。横軸の値が 10^3 以下で若干傾向が異なるのは、球が水

球	直径(cm)
A	0.74
B	0.86
C	1.00
D	1.14
E	1.32
G ₁	1.59
G ₂	1.61
I'	1.89
I	2.10
J	2.49

表-1 球の種類

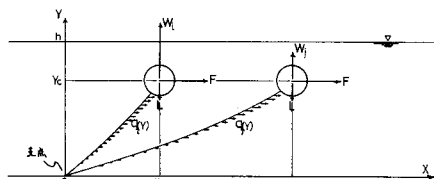


図-1 球の支持方式

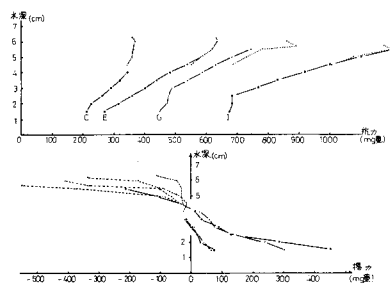


図-2 抗力と揚力の実測値
(流量Ⅱ)

面に近づく逆流抵抗が加わるためである。著者らの測定値は、近似的に、次式で表わすことができる。

$$(C_{0c} - C_{0o}) \propto \left\{ \left(\frac{du}{dy} \right) \left(\frac{ds}{uc} \right) / Rec^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

比較のため、Eichhorn ら²⁾による内管内層流中の回転自由な球の抗力係数と同図上に示す。Sphere NO.3 ($D/d_s = 6.8$) と Sphere NO.4 ($D/d_s = 6.9$) は、ほぼ (4) 式の関係と満足している。一方、Sphere NO.1 ($D/d_s = 3.3$) と Sphere NO.2 ($D/d_s = 4.5$) は、(4) 式の関係よりも小さい値を示す。これは、Sphere NO.1 では、管径と粒径の比 D/d_s が他に比べて小さく、管壁の影響が入っているためである。Sphere NO.2 も管径の影響が入る。しかも $Rec \sim 220$ で、著者らや Spheres NO.3, 4 の Rec よりも小さいためと考えられる。

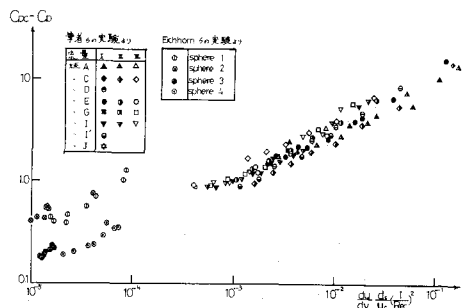


図-3

($C_{0c} - C_{0o}$) と $\frac{du}{dy} \frac{ds}{uc} \frac{1}{Rec^2}$ の関係

境界のある層流セン断流中の揚力 揚力の実測値を示す図-2に示れば、 $yc = 3.5^{cm}$ 付近で揚力の符号が変化している。この位置は、球による水面の変形が始まる位置とほぼ一致し、変形が大きくなると、負の揚力も大きくなる。負の揚力には、水面の変形が不可欠である。揚力係数と次式で定義する。

$$C_L = L / \frac{1}{2} \rho u_c^2 \pi a^2 \quad (5)$$

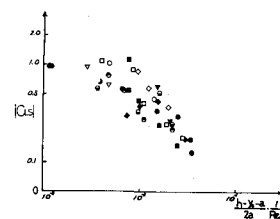


図-4 負の揚力

図-4は負の揚力係数 $-C_L$ と底から球の上面までの距離と球が流体中に存在しない時の乱されている水深から差引いたものと粒径で除し、それに、 Rec と乗じた無次元量の関係を示す。球が水面に近づくにつれ、流れの慣性力が入るために、球による水面の変形も大きくなり、測定値が散らばる傾向がある。しかし、負の揚力が水面の変形と関係しているのは確かである。図-5は、正の揚力に関する揚力係数 C_{LB} と壁の影響と粒径を考慮に入れてセン断流の無次元量 $\frac{du}{dy} \frac{ds}{uc} \frac{1}{Rec}$ の関係を示す。図中に、Eichhorn らの実験値も再整理して、プロットしてある。回転のない正の揚力に関する著者らの実験値によれば、 C_{LB} は $\frac{du}{dy} \frac{ds}{uc} \frac{1}{Rec}$ によって一義的に決定される。Eichhorn らの実験値によれば、回転の遅い球の C_{LB} ($\frac{du}{dy} \frac{ds}{uc} \frac{1}{Rec}$ の小さい側) は、著者らの実験値とほぼ一致する関係を示し、回転数が増えるにつれ ($\frac{du}{dy} \frac{ds}{uc} \frac{1}{Rec}$ の大きい側)、回転による揚力増加のために C_{LB} もやや大きくなることを示している。従って、回転のない球の揚力係数は、次式で与えられる。

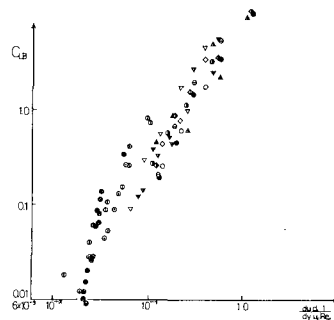


図-5 C_{LB} と $\frac{du}{dy} \frac{ds}{uc} \frac{1}{Rec}$ の関係

$$C_{LB} = L_B / \frac{1}{2} \rho u_c^2 \pi a^2 \propto \left(\frac{du}{dy} \frac{ds}{uc} \frac{1}{Rec} \right)^2 \quad (6)$$

層流セン断流中の揚力と抗力の関係 揚力が正の領域では、速度勾配と壁の存在が抗力と揚力に及ぼす役割りは、同様であり、式(4)と式(6)から、次の関係が得られる。式(7)と実験値の関係と図-6に示す。

$$C_{LB} / (C_{0c} - C_{0o}) \propto \left(\frac{du}{dy} \frac{ds}{uc} \right)^{3/2} / Rec \quad (7)$$

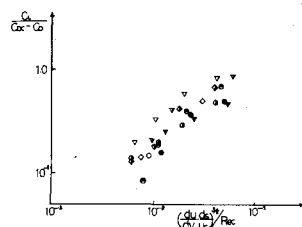


図-6 抗力と揚力の関係

式(7)は、層流セン断流中の揚力と抗力の関係について、かえりの良い説明を与えている。

1) Lamb, H., Hydrodynamics, 6th ed. 1932, 2) Eichhorn, R. and Small, S., J.F.M. vol. 20, 1964.