

日本下水道事業団 正会員 石田 貴
日本住宅公団 正会員 田平茂立
東京工業大学 正会員 福岡捷二

まえがき セン断流中の固体粒子に働く抗力、揚力の測定は 流体または固体のいずれか一方が静止している場合について行われてきた。同一液相流では 固体と液体の慣性の違いのため両者は相対速度差をもつ。本研究は、液体と固体が相対速度差をもちながら運動している時の固体に働く力を求め、固体が静止している場合との比較検討を行い、流体力のみもりに対する相対運動の重要性を明らかにした。

実験方法と実験結果 抗力、揚力に及ぼす相対運動と速度勾配の影響を明確に知るために 濃度80% 比重 1.208 のグリセリン溶液を用いた層流で実験を行なった。用いた球は $d_s = 1.31 \text{ cm}$ で滑らかな表面をもつ。球の回転効果をも調べるために重心の位置を操作して回転しながら進む球と回転せずにすべて進む球の2種類を製作した。水路は 巾15 cm, 深さ10 cm, 長さ2 m のアクリル製開水路である。

一様流中の静止球の抗力係数 C_D と揚力係数 C_L はそれぞれ (1), (2) 式で定義されるが、セン断流中で相対運動がある場合には (3), (4) 式で定義するのが合理的である。

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho U_m^2 \cdot \frac{\pi}{4} d_s^2} \quad (1) \quad C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |u(\theta) - u_s| (u(\theta) - u_s) \frac{d\theta}{2} \cos^2 \theta \cdot d\theta} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_m^2 \cdot \frac{\pi}{4} d_s^2} \quad (2) \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |u(\theta) - u_s| (u(\theta) - u_s) \frac{d\theta}{2} \cos^2 \theta \cdot d\theta} \quad (4)$$

すなわち、セン断流中では 球と流体の速度差が球の各部分で異なるため球を微小円板にわけ 面積を重みとして各微小円板の受ける力を計算し、それぞれの和が球に働く力とした。

(i) 静止球に働く抗力と揚力 グリセリン溶液に比重の近い軽い球と重い球を 図-1 のように同じ高さに吊り、鉛直線とのなす角 θ と、溶液中重量 W を測定し、次式から抗力と揚力を求めた。

$$L = W - F / \tan \theta \quad (5)$$

水素気泡法より測定した流速分布を用い、(3), (4) 式より求めた C_D , C_L と Re 数の関係を 図-2 に示す。(3), (4) 式による値と (1), (2) 式による値には、この場合ほとんど差がみられなかった。比較のため 一様流中の $C_D \sim Re$ の関係を示す。図-2 では 速度勾配の役割が不明確なため、図-3 に C_D と速度勾配の無次元表示 $(d/d_y) \cdot (d/d_m)$ の関係を示す。ここに u_m は球の中心に作用する流速である。図より $C_D \propto \left(\frac{d}{d_y}\right) \cdot \left(\frac{d}{d_m}\right)$ の関係が成立つといえる。図-4 は $C_L \propto \left(\frac{d}{d_y}\right) \cdot \left(\frac{d}{d_m}\right)$ の関係を示し、 $C_L \propto \left(\frac{d}{d_y}\right) \cdot \left(\frac{d}{d_m}\right)$ が成立つようにみえる。

(ii) 底をすべて動く球の抗力 すべり摩擦係数を μ_f とすると F は

$$F = \mu_f (W - L) \quad (6)$$

である。球の μ_f は 実測より 0.23 ~ 0.28 の範囲にあった。強いセン断流のため 流速は球の上部で球の速度より大きく 球に働く力は下流方向である。球の下部では逆に 球の移動速度が大きいので力は上流方向に働く。

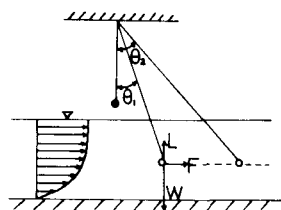


図-1 静止球の抗力と揚力の測定法

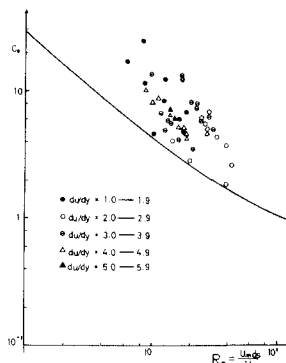


図-2 C_D と Re の関係

このことは 球の表面に接着した糸の挙動を示す写真(図-5)から明らかである。(3)式による $(\frac{du}{dy}) \cdot (\frac{ds}{du})$ と C_L の関係を図-6に示す。ここで、 u_r は球と流体の相対速度の平均値である。両者の関係を論ずるには、更にデータを加える必要がある。

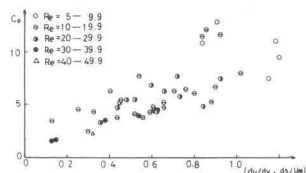


図-3 C_D と $(\frac{du}{dy}) \cdot (\frac{ds}{du})$ の関係

(iii) 底を回転しながら動く球の抗力 ころがり摩擦係数を μ_r 、流線の曲がりによる揚力 L_1 、回転による揚力 L_2 とすると 抗力 F は

$$F = \mu_r (W - L_1 - L_2) \quad (7)$$

となる。 μ_r は 傾き α をもつ板の上に球をころがして ある距離 l を通過するのに要する時間を測定して求めた。 L_1 は 回転せずに浮遊する球の実験から F に比して十分に小さいことが見出された。 L_2 は 球を微小円板にわけ 各円板のまわりの循環による揚力の和で表わすものとする。

$$L_2 = \rho u_m \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 2\pi \left(\frac{ds}{d\theta} \cos \theta\right)^2 \omega \frac{ds}{d\theta} \cos \theta d\theta = \frac{\pi}{2} \rho u_m \omega ds^3 \quad (8)$$

ω は 球の回転角速度である。(8)式は Eichhorn の実験結果に比較的近い値を与える。この場合の 抗力係数も図-6に示す。回転球の C_D は すべる球のそれより1オーダー小さいことが見出される。

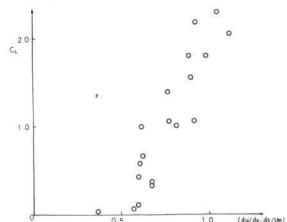
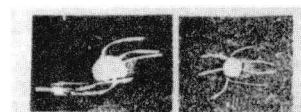


図-4 C_L と $(\frac{du}{dy}) \cdot (\frac{ds}{du})$ の関係

(iv) 浮遊して進む球に作用する揚力 グリセリン溶液の比重より少し比重の大きい球は 浮遊したまま進む。この時 その位置の揚力は球の溶液中重量に等しい。球の移動速度と高さをストロボ写真で読み取り、(4)式から C_L を求めた。 C_L と $(\frac{du}{dy}) \cdot (\frac{ds}{du})$ の関係を実験(1)とともに図-7に示す。回転球の実験値が小さいのは 沈まずに回転する球の製作が困難なためである。



正面図 平面図
図-5 粒子のまわりの流況 (相対運動)

(v) 球の浮遊限界 これは 球が底面を移動している時の揚力を見積るための実験である。比重が僅かずつ異なる球を水路底に置いた状態から静かに離し、浮遊する限界の球の重量を求める。この重量が揚力に等しい。測定精度は比重にして0.003である。球の上端流速が20cm/sのセリ断流中では、溶液の比重1.208に対し 回転球では 比重1.216で浮き、1.222で沈んだ。一方、すべる球では 1.216で浮き、1.220で沈んだ。この事実は 揚力が流線の曲がりと球の回転とから生ずることを明確に示している。

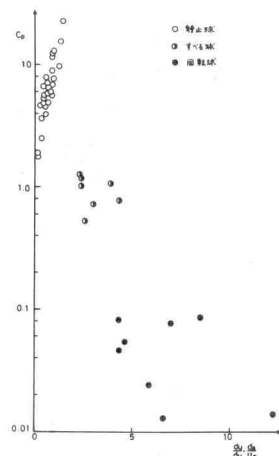


図-6 C_D と $(\frac{du}{dy}) \cdot (\frac{ds}{du})$ の関係

実験結果の考察 図-6、図-7に示すように 抗力係数 C_D と揚力係数 C_L は 流体と球の相対運動の様式と速度勾配の大きさによって著しく異なる。力の一方向に作用する静止球の場合 セリ断流の C_D は一様流のそれより大きい。流体と球が共に動き 力の方向が球の上部と下部で反対になる時には 上下方向の圧力差を解消するような流体の運動が誘起され 球の前後に働らく圧力を一様化するために抗力係数は 静止球のそれより1オーダー小さくなる。球が回転している時には この働らくが促進されるために抗力係数は一層小さくなると考えられる。一方、揚力係数についていえば 静止球の C_L は 同一の $(\frac{du}{dy}) \cdot (\frac{ds}{du})$ に対し、浮遊球の C_L より十分に大きい。球と流体が相対運動している時には、回転球の C_L と回転せずにすべっている球の C_L は ほぼ同一のオーダーとなる。これは 球の回転により圧力の一様化が進むため、回転の効果が相殺されるためと思われる。

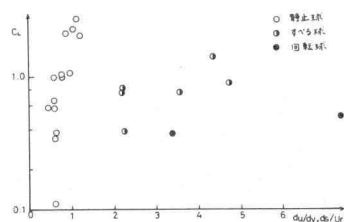


図-7 C_L と $(\frac{du}{dy}) \cdot (\frac{ds}{du})$ の関係