

正弦振動流中に置かれた球に作用する流体力

中村 廣 昭*・池田 駿 介***・高 柳 聡***

1. 序

近年、エネルギー開発あるいは本四連絡橋に見られるように多くの大型海洋構造物が建設される現状にあり、海洋開発に関連する研究は重要な課題となっている。このような事実から往復流中に置かれた物体に働く流体力に関する研究の重要性が指摘され、その必要性は極めて高まりつつある。振動流中に置かれた円柱に働く流体力に関する研究は Keulegan・Carpenter³⁾ の先駆的研究以来、筆者等^{1),2)}も含め多くの研究が重ねられ、その特性や放出渦と流体力の関連性等の理解は深まりつつある。しかし、振動流中に置かれた球状の物体に作用する流体力、あるいは乱れ等については 1975 年、Sarpkaya⁴⁾ が正弦振動流中に置かれた球に働く流れ方向の流体力から、抗力係数、慣性係数と KC 数の相互関係を求めた研究が見られる程度で、他に、球に働く流体力の研究は見当らず、未解明の研究分野である。

本研究では正弦振動流発生装置を用いて実験を行ない、振動流中で球が受ける抗力及び揚力から、抗力係数、慣性係数、揚力係数をそれぞれ KC 数に対して求め、更に従来から存在するといわれている揚力のウナリ現象を調べたのでここに報告するものである。

2. 次元解析と係数の定義

振動流中に置かれた球に働く流体力を支配しているパラメータとして、次の変量が挙げられる。即ち、球の直径 D 、正弦振動流速の片振幅 U_m 、振動流の周期 T 、流体の密度 ρ 、粘性係数 μ 、および流体力測定のために球が弾性的に取り付けられた場合にはその水中固有振動数 f_{nw} であり、その一般的表現は

$$F = \Psi(D, U_m, \rho, \mu, T, f_{nw}) \dots\dots\dots (1)$$

である。ここに Ψ は関数関係を表す。これらの変量に対する独立な組み合わせは

$$\frac{F}{\rho U_m^2 D^2} = \phi_1 \left(\frac{U_m T}{D}, \frac{\sqrt{\nu} T}{D}, f_{nw} T \right) \dots\dots\dots (2)$$

又は

$$\frac{F}{\rho D^3 (U_m/T)} = \phi_2 \left(\frac{U_m T}{D}, \frac{\sqrt{\nu} T}{D}, f_{nw} T \right) \dots\dots (3)$$

である。これらのパラメータの内、 $U_m T/D$ は KC 数³⁾として知られている無次元量で、水粒子の振幅と球の直径の比に比例する量で、渦の放出量と渦の移動の程度を支配すると考えられる。 $\sqrt{\nu} T/D$ は放出された渦の減衰の程度を支配すると考えられる。更に $f_{nw} T$ は球の水中固有振動数が振動流の入力周波数に較べて十分に大きければ共振や、球の大きな変位をおこさないので無視できる。

Morison 等⁵⁾によれば流れ方向の流体力 F_x は次のように表現できる。

$$F_x = F_D + F_M \\ = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi D^2}{4} U |U| + \rho C_M \frac{\pi}{6} D^3 \frac{dU}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

ここに C_D = 抗力係数、 C_M = 慣性係数である。Sarpkaya⁴⁾ は円柱の場合の Keulegan-Carpenter 等の定義にならい、Fourier 級数を用いて (3) 式を展開し係数を次のように定めた。

$$\left. \begin{aligned} C_D &= \frac{3}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{F_x \cos \theta}{\rho U_m^2 D^2} \cdot d\theta \\ C_M &= -\frac{3 U_m T}{\pi^3 D} \int_0^{2\pi} \frac{F_x \sin \theta}{\rho U_m^2 D^2} \cdot d\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

本実験では球をサポートする機構上積分区間を $\pi/2$ から $3\pi/2$ までとしなければならないため、 C_D 、 C_M は以下のように変換される。

$$\left. \begin{aligned} C_D &= \frac{6}{\pi} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \frac{F_x \cos \theta}{\rho U_m^2 D^2} \cdot d\theta \\ C_M &= -\frac{6}{\pi^3} \frac{U_m T}{D} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \frac{F_x \sin \theta}{\rho U_m^2 D^2} \cdot d\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

ここで $U = U_m \cos \theta$ 、 $\theta = 2\pi t/T$ 、 U_m は振動流 1 周期中の最大流速、 T は振動流の周期である。

本研究においては式 (6) の定義を用いて C_D 、 C_M を求めるものとする。

揚力即ち流れに垂直な方向の力は一般に次式で表わされる^{1),2),4)}。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A U_m^2 \dots\dots\dots (7)$$

* 正会員 埼玉大学助手 工学部建設基礎工学科
** 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科
*** 日本国土開発 (株)

$$\therefore C_L = \frac{F_L}{(1/2)\rho U_m^2 A} \dots\dots\dots (8)$$

ここに F_L =振動流 1 周期中の最大揚力, C_L =揚力係数, A =物体の投影面積である. 式 (4) において $(\pi/8)U \cdot |U|$ を U_m^2 , $(\pi/6)dU/dt$ を U_m/T に置きかえれば式 (2) (3) の定義と一致し, 式 (8) において $(1/2)A$ を D^2 に置きかえれば式 (2) の定義と一致する. 従ってこれらの係数は以上の考察により, KC 数, $\sqrt{\nu T}/D$ の関数となることが予想される.

3. 実験装置と手順

実験は 30×30 cm の正方形断面を有する長さ 14 m の U 字型振動流水路を用いて行なわれた. 流体はピストンによって駆動され, 振動流の最大片振幅は 35 cm, 周期は 1 秒から 20 秒の間で連続的に変化させることが可能である.

表-1 測定用球の諸元

使用球	直径 (cm)	厚さ (mm)	重量 (gr)	水中固有振動数 (Hz)	梁の断面 (mm)
抗力測定用	9.0	2	73.5	56.4	$73 \times 10 \times 1$
揚力測定用	9.0	2	80.0	42.3	$73 \times 10 \times 1$

流体力の測定には 表-1 に示す 2 種類の球が用いられ, これらの球の中心に板バネを取り付け両端固定, 中央集中荷重方式の梁形式で, この板バネに水中用ストレーンゲージを取り付け, 球内弾性梁の歪から流体力を測定するようにした球を, 抗力用, 揚力用の 2 種類作り, それぞれ水路中心部に支柱を用いて取り付けられている (図-1).

ストレーンゲージは梁の表・裏にはり付けられているため温度補償がなされている. さらに右側と左側の区別をつけたため, 右側と左側の測定結果は別々に求めた. この出力はミニコンピュータにオンライン入力させ処理

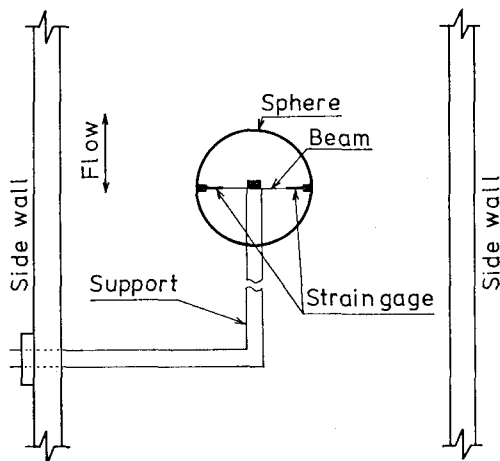


図-1 測定用球の取り付け (抗力用)

した。

実験に際して, 渦と球が共振するのを防ぐ為に球の水中固有振動数が, 渦の発生振動数の 10 倍以上となる条件を付した. 抗力測定, 揚力測定とも振動流装置の振幅を変えて行なった. この時, 振動流の入力周期はほぼ一定状態で行なった. 測定は振動流 50 周期に対して連続測定を行なった.

球の近傍の流れは中央粒径が 0.45 mm であるポリスチレン粒子 (比重 1.04) を混入させ, 水路の両側方からスリット光線をあてて可視化した. 流れの様子はモータードライブ付 35 mm カメラで秒間 2.5 コマの割合で記録した.

4. 諸係数の測定結果

式 (5) で定義された抗力係数, 慣性係数を振動流 50 周期について算術平均した値, $\bar{C}_D$, $\bar{C}_M$ を 図-2, 3 に示す. これらはいずれも KC 数 5 から 25 に対してプロットされた $\bar{C}_D$, $\bar{C}_M$ である.

抗力係数の変化は 図-2 に示すように全体的に KC 数の増加と共に減少の傾向を示しているがバラツキが多く有意な傾向を示していない.

慣性係数の変化は 図-3 に示すように全体的に減少の傾向を示しその値は最小で 1.1 から最大で 1.7 ま

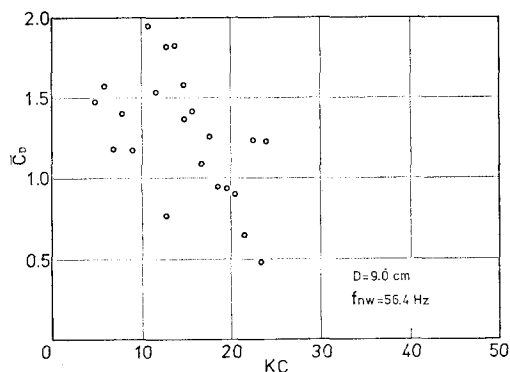


図-2 抗力係数

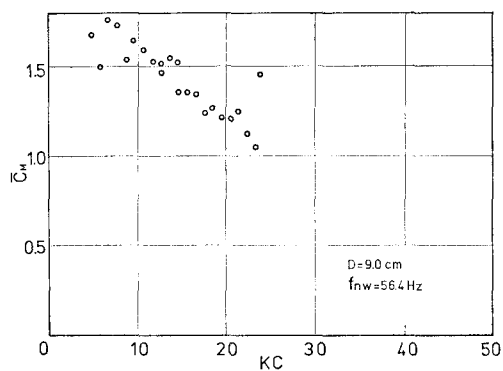


図-3 慣性係数

での範囲を示した。KC 数が小さい領域ではポテンシャル理論から得られる値、 $C_M=1.5$ 、とほぼ一致しており、測定がほぼ妥当であることを示している。

この抗力係数と慣性係数の傾向を、1975年に Sarpkaya⁴⁾ が KC 数 40 程度まで行なった結果と比較すると、抗力係数の場合 KC 数の増加に対して本実験と逆の傾向を示しており、係数の値は本実験の方が大きく出ている。慣性係数の傾向は本実験とほぼ同じ傾向を示しており値もまた同程度を示した。

図-4 は、式 (8) で定義された揚力係数を KC 数に対してプロットした図である。ここで $\bar{C}_L$ は次のようにし

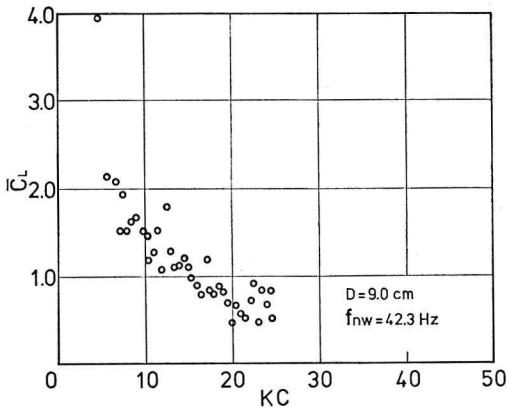


図-4 揚力係数

て求めた。振動流の 1 周期にわたる流れに垂直な方向の力 F_L の中で絶対最大値を求め、それを式 (8) の F_L に代入して求めた C_L を 50 波にわたって算術平均したものを $\bar{C}_L$ とした。図-4 より揚力係数の変化は KC 数の増加とともに減少する傾向を示し、その値は $5 \leq KC \leq 25$ の範囲で 2.2 から 0.5 までの範囲を示した。

筆者等の知る限り球の場合については、揚力係数と KC 数の関係は本研究以外に明らかになっていない。

抗力と揚力の比較をすると、測定範囲 ($5 \leq KC \leq 25$) においては抗力が揚力に比べ、約 2 倍の大きさを示した。

図-5 には、ゼロアップクロス法によって求められた

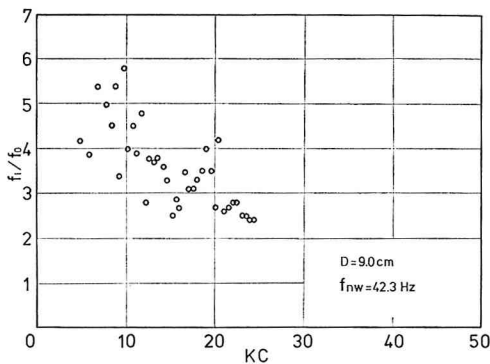


図-5 周波数比

揚力波形の周波数 (f_L) と、振動流の入力周波数 (f_0) との比が KC 数に対して示されている。その結果 f_L/f_0 はバラツキがあり、有意な傾向を示していない。円柱の場合同様の整理を行なっている。この場合 KC 数が 30 程度までは f_L が振動流の周波数に対して段階的に変化する LOCK-IN 現象を起こし、KC 数が大きくなると渦放出数が次第に不規則になり、又 KC 数の増加と共に大きくなる傾向を示したが¹⁾、球の場合むしろ減少傾向を示している。現段階ではこの理由について結論づけるには無理であろうと思われる。

図-6 にはウナリの程度を示す $C_{L\max}/\bar{C}_L$ が示されて

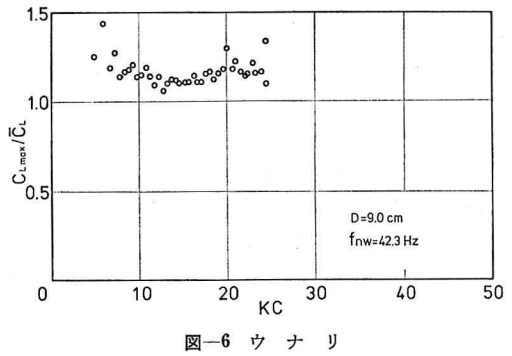


図-6 ウナリ

いる。 $C_{L\max}$ は振動流の 1 周期にわたる揚力 F_L について、10 波の中で絶対最大値を求め、それを式 (8) に代入して求めた C_L を大きい方から 5 波にわたって算術平均したものである。図-6 を見ると KC 数が約 6 及び 20 前後でウナリの程度が 1.3~1.4 を示す点が見られるが、全体的には $1.0 \leq C_{L\max}/\bar{C}_L \leq 1.2$ の範囲におさまリ、ウナリの程度は小さいと判断される。

5. 流れの可視化

球の背後にできる渦の発生パターンや、渦の放出周波数が揚力の波形の周波数と、振動流の入力周波数の比 f_L/f_0 と KC 数との関係、あるいはウナリ現象に対してどのように寄与するかを知る目的で流れの可視化を行なっ

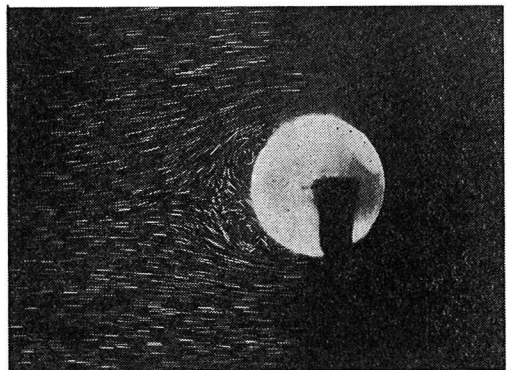
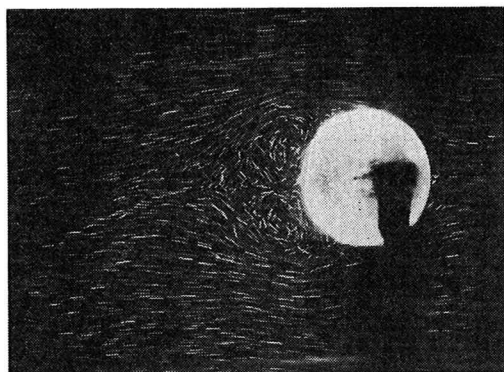


写真-1 位相 $3\pi/4$ における流線 ($KC=1.85$, $T=5.1\text{ sec}$)



写真—2 位相 $5\pi/4$ における流線 ($KC=23.4$, $T=5.2\text{ sec}$)

た。(可視化断面は球の中心線上である) 写真—1, 2 は夫々その1例であるが、これを見ると、球の背後にできた渦は、いずれの場合も球の両側から対となって発生し、円柱の場合^{1), 2)}に見られるような交互に渦が発生するパターンは示さなかった。その結果渦の発生パターンや放出周波数についての前述の理由付けが現状では困難である。球の周りに出来る渦は三次元的であるので、可視化断面を種々変化させて、渦の発生パターンを調べる事が必要であると思われる。

6. 結 語

以上の実験と考察により現状で結論付けられることをまとめれば以下の通りまとめられる。

(1) 抗力係数と慣性係数の KC 数に対する傾向は Sarpkaya の行なった実験結果と比べた場合、抗力係数は

反対の傾向を示し、揚力係数はその傾向が一致する。

(2) 揚力係数と KC 数の相互関係は、 KC 数が増加すると揚力係数は減少傾向を示す。

(3) 球の場合、揚力波形の周波数と振動流の入力周波数の比は KC 数に対して、円柱の場合に見られた段階的な変化をみせず、有意な傾向を示さない。

(4) 揚力のウナリ現象に関しては (3), (5) から推論出来るが、ウナリの程度は小さい。

(5) 可視化により球の背後にできる渦を見ると、円柱の場合に見られた交互な渦は見られず対称な渦を作った。

本研究に際して草野晋輔氏(埼玉大学工学部技官)には実験を手伝って頂いた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Ikeda, S. and Y. Yamamoto: Lift force on cylinders in oscillating flows, Tech. Rept. of Foundation Engng., Saitama Univ., Vol. 10, 1981.
- 2) Ikeda, S. and Y. Yamamoto: Oscillatory flow forces on cylinders near boundary, Tech. Rept. of Foundation Engng., Saitama Univ., Vol. 11, 1981.
- 3) Keulegan, G. H. and L. H. Carpenter: Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid, Jour. of Res., NBS, Vol. 60, 1958.
- 4) Sarpkaya, T.: Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, Jour. of Appl. Mech., ASME, Vol. 42, 1975.
- 5) Morison, J. R., et al.: The forces exerted by surface waves on piles, Petroleum Trans., Amer. Inst. on Mining Eng., Vol. 189, 1950.