

正弦振動流中に置かれた球に作用する流体力（続報）

中村 廣 昭*・池田 駿 介**・大八木 崇***

1. 序

近年，多くの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．このような現状から往復流中あるいは波動場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，その必要性はますます高まりつつある．筆者らの研究^{1),2)}も含め，振動流中に置かれた円柱に作用する流体力に関しては現在まで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が次第に深まりつつある．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および近傍の流れの構造等については，昨年度筆者らの発表した研究³⁾のほかに，1975 年，Sarpkaya の研究⁴⁾が見られる程度で，データの集積は未だ十分ではなく，流体力の大きさ，渦の発生や剝離と流体力の関係，あるいは流体加速度と流体力の関係等，未解明の点が多く残されている分野である．

本研究は，昨年に引き続き正弦振動流中に球を設置し，球に働く流れ方向の流体力と，流れに垂直な方向の流体力を求め，測定した流体力から抗力係数，慣性係数，揚力係数を求めそれぞれ KC 数に対し整理し，さらに球の近傍の流れの構造を見るためポリスチレン粒子をトレーサーに用い可視化を行なって，揚力の発生と変動に寄与すると考えられる渦輪の三次元的構造について検討した．

2. 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 字型振動流閉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

表-1 測定球の諸元

使用球	直径 (mm)	厚さ (mm)	水中重量 (g.w.)	水中固有 振動数 (Hz)	梁の形状 (mm)
抗力測定用	90	2	15.0	13.9	66×15×0.6
揚力測定用	90	2	15.0	11.5	66×15×0.6

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．

流体力の測定には表-1 に示す 2 種類の球を用いた．こ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イ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．球は抗力用，揚力用の 2 種類を作り，それぞれ水路中心部に支柱を用いて取り付けた（図-1）．球の

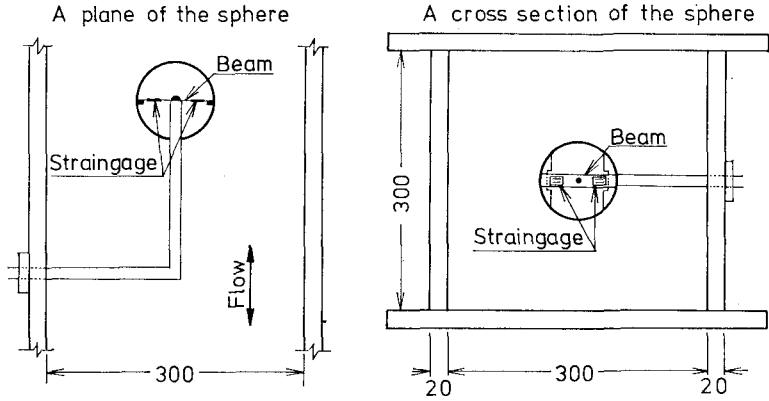


図-1 測定用球の取り付け（抗力用）

材質はアクリル樹脂，梁の材質はリン青銅である．

ストレインゲージは，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，板バネの右側と左側にも取り付けられたため，右側と左側は別々に流体力を求められるが，ここでは両者の平均値を採用した．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解析した．

実験に際して，渦と球が共振するのを防ぐため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．

* 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
 *** 鉄建建設（株）

球の近傍の流れは、粒径 0.15~0.45 mm のポリスチレン粒子(比重 1.04)を混入させ、水路上下方向からスリット光線をあてて可視化した。二次元的な渦の軌跡はモータードライブ付 35 mm カメラで秒間 4~5 コマの割合で記録し、渦輪の三次元的構造は写真撮影が不可能であったので目視によりそのパターンを把握した。

実験条件として本年は特に同一 KC 数^{3),5)}(KC 数 = $U_m T/D$, U_m は振動流速の片振幅, T は振動流の周期, D は球の直径)に対して振動流周期を種々変化させてより一般的な測定を行ない、振動流の周期は 3~15 秒, KC 数は $3.9 \leq KC < 25$ の範囲で実験を行なった。

なお、使用した流体力や各係数の定義は前報と同じであり省略したので、定義については参考文献 3) を参照されたい。

3. 抗力, 慣性および揚力係数の測定

流れ方向の流体力 F_x ^{3),6)} より抗力係数 C_D , 慣性係数 C_M を求め振動流周期 10 周期分について算術平均した値, $\bar{C}_D$, $\bar{C}_M$ をそれぞれ KC 数に対してプロットした値を図-3, 4 に示す。

図中の記号は、与えられた振動流周期を示すもので、その説明は図-2 に示される通りであり、以後の各図に共通である。

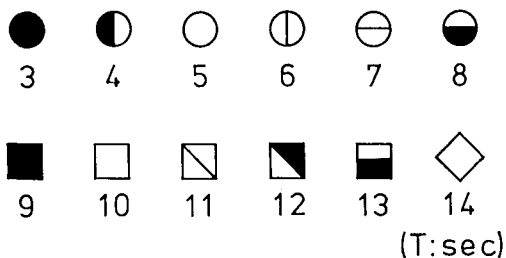


図-2 周期変化に対応する記号図

抗力係数 $\bar{C}_D$ の変化は図-3 に示すようにその大部分が 0.5 から 0.8 までの範囲に収まっており、 $10 < KC$ 数 < 25 の範囲は各周期ごとにほぼ一定と言えるが、周期そのものは有意なパラメーターとはなっていないことが知られる。KC 数の小さい範囲で抗力係数にバラツキ

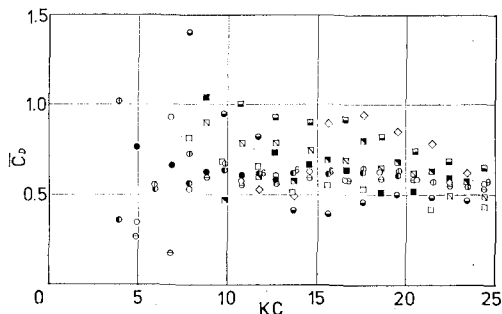


図-3 抗力係数

が見られるのは、流れ方向の流体力 F_x の絶対値が小さく、測定器機の精度に起因する測定誤差が大きく影響したものと考えられる。

慣性係数 $\bar{C}_M$ の変化は図-4 に示すように全体的に減少傾向を示している。

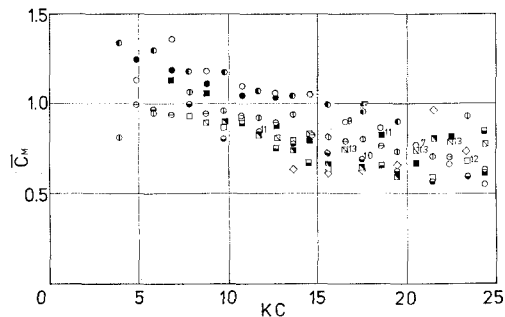


図-4 慣性係数

この抗力係数と慣性係数について Sarpkaya⁴⁾ が KC 数 40 程度まで行なった実験結果と比較すると、抗力係数の場合 KC 数の小さい範囲ではあまり良い一致を示さないが、KC 数が 20 以上になると Sarpkaya の場合抗力係数の値が 0.7~0.8 でほぼ一定値を示しており、本実験でも KC 数の大きい範囲では平均的に見た場合一定値を示す傾向を示し、その値も Sarpkaya とほぼ同じであると言える。

慣性係数の示す両者の比較では、KC 数の増加とともに慣性係数は減少の傾向を示し、両者ほぼ同様の傾向を示している。また、両者とも KC 数の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の妥当性を示しているものと考えられる。

図-5 に揚力係数 $\bar{C}_L$ を KC 数に対してプロットした図を示す。ここで $\bar{C}_L$ は次のようにして求めた。振動流の 1 周期中の流れに垂直な方向の力 F_L の中で絶対値の最大値を求め、この値を用いて揚力係数 C_L ³⁾ を求め、求めた C_L を 50 波分について算術平均したものを $\bar{C}_L$ とした。図-5 において揚力係数の変化は KC 数の増加とともに減少し、KC 数が 10 以上では 0.35 前後でほぼ一定値を示す傾向にある。

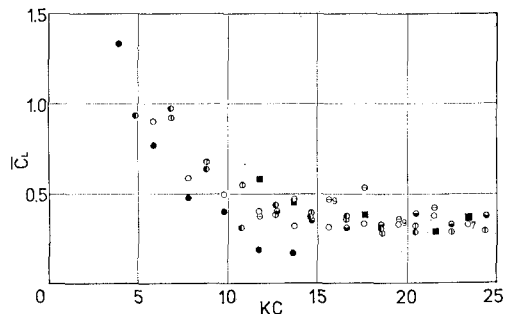


図-5 揚力係数

以上三種の各係数について昨年度の筆者らの行なった結果と比較すると、昨年度の実験は KC 数全般にわたって振動流周期がほぼ一定（約 4.5 秒）の条件で行なわれた関係上、図に示された測定点が少なく、傾向を論ずるには若干無理な点もあった。しかし本年度の結果と比較した場合、各係数の値に多少のずれはあるものの、傾向としては各係数ともほぼ同じ傾向を示したと認められる。特に揚力係数の比較では KC 数の小さい方で本年度の結果が少し小さめにしているが傾向は良く一致している。

図-6 には流れ方向の最大力 $F_{x \max}$ と最大揚力 $F_{L \max}$ との比を KC 数に対してプロットした図を示す。ここで $F_{x \max}$ は振動流 1 周期の中で流れ方向の力 F_x のうち最大値を求め、その最大値を 10 波について算術

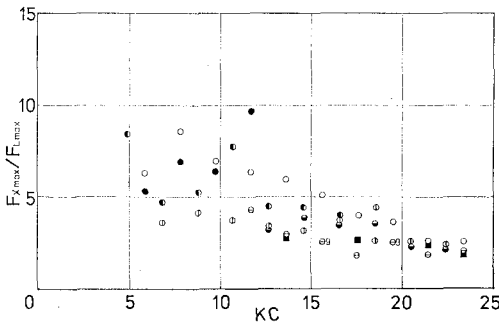


図-6 流れ方向の力と揚力の比

平均したものであり、 $F_{L \max}$ は振動流 1 周期中で流れに垂直な方向の力 F_L の絶対値の最大を求め、その値を 50 波について算術平均したものである。 $F_{x \max}$ と $F_{L \max}$ の比は 図-6 に見るように KC 数が増加すると減少する傾向を持っている。しかし、 $20 < KC < 25$ の間では 2 ～ 3 でほぼ一定値を示し、昨年度の結果でも KC 数の大きな場合はほぼ同様の傾向であった。

図-7 に揚力の時間変化の電磁オシログラフによる記録例を示す。図を見るとその波形は比較的安定した変動

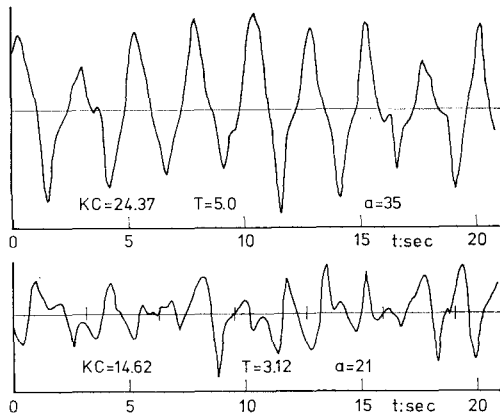


図-7 揚力波形

波形を示し、変動の周波数は KC 数に支配されず、振動流の入力周波数に支配されている。

揚力変化の変動パターンは物体の背後にできる渦の発生パターンに左右されると思われ、円柱の場合には揚力が長周期に変動するいわゆるウナリ現象が顕著に見られ、特に KC 数が 30 程度までは揚力波形の周波数 f_L と、振動流の入力周波数 f_0 の比 (f_L/f_0) が段階的に変化する 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、その値 (f_L/f_0) も大きくなる傾向を示したが、球の場合はこのような顕著な傾向は現われず、また、ウナリの程度も比較的小さかった。後で可視化の所で述べるが球の背後にできる渦は二次元的に見た場合、KC 数の全般にわたって球の両側から対となって渦が発生し、円柱の場合に見るような上下交互に渦が発生するパターンは見られなかった。また、揚力波形の周波数 f_L も KC 数に対して有意な傾向を示さなかった。以上のようなことから球の場合はウナリがほとんど現れなかったと考えられる。

4. 流れの可視化

球の背後に発生する渦は二次元的に見た場合にはいずれの場合も球の両側から対となって発生しているが、照明を工夫して良く観察したところ、渦輪が振動流 1 周期に 2 つ発生した。この渦輪は立体的に見た場合回転対称ではなく、三次元的でありその形状は 図-8, 9 に示すよ

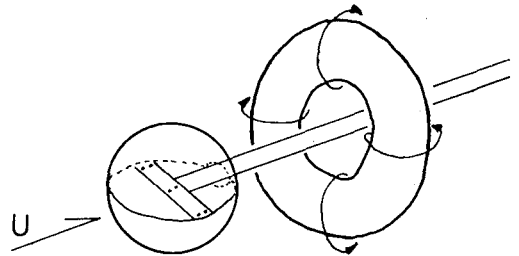


図-8 球から剝離した渦輪の概念図

うにうねっており、また、球から渦輪が剝離する点もうねっていた。この渦輪が三次元的なうねりをもっていることが、球に揚力の変動を与える大きな要因になっていと考えられる。二次元的に記録した写真から、渦輪が球から剝離する位相を揚力波形と対応させると、渦輪が球から剝離

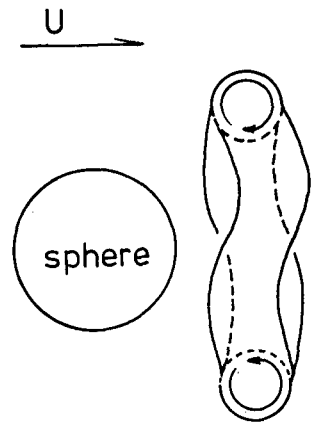


図-9 渦輪を横から見た図

した時点で揚力が最大となることがわかった。

ここで 図-10 に渦の発生および移動のパターンを番号順に示し、図-11 に流速の半周期中における 図-10 の番号を対応させ、表-2 に各番号に対する説明をまとめて示してある。

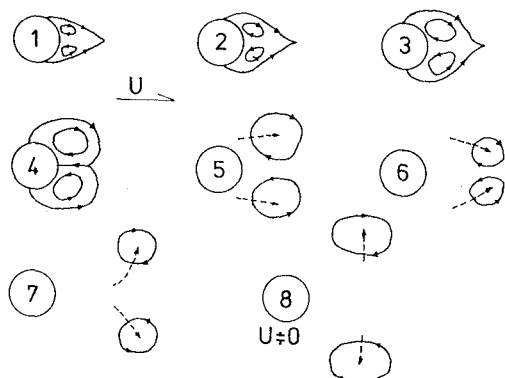


図-10 渦の発生および移動

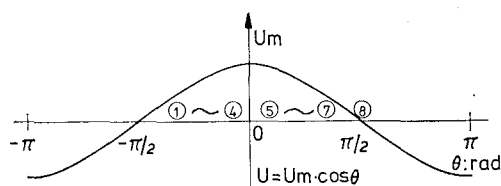


図-11 流速と図-10の対応

表-2 図-10の説明

No.	図-10 中の各番号に対応する説明
①	後流ができその中に渦が発生する
② ③	渦の成長につれ流線がふくらむ
④	流線が内側に入りこみ渦が剝離する
⑤	渦が外側に広がりながら移動する
⑥	外側に行った渦が内側に向う
⑦	流速の減少につれ渦がふたたび外側に広がる
⑧	流速が零に近づくとき渦が大きくなり外側に広がって行く

5. 結 語

本実験で得られた結果を要約すれば以下のようにまとめられる。

1) 抗力係数は本実験で与えられた KC 数の範囲では

0.5~0.8 の間で各周期ごとにほぼ一定値を示す。

2) 慣性係数は減少傾向を示し Sarpkaya⁴⁾ の求めた実験結果と同様の傾向を示した。

3) 揚力係数も減少傾向を示し KC 数の増大とともに 0.35 前後で一定値を示す傾向にある。

4) 流れ方向の力と揚力の比は減少傾向を示し KC 数が大きくなると、その比は 2~3 とほぼ一定値に近づく。

5) 球から発生する渦は三次元的な渦輪となり、ある程度成長し、大きくなると球から剝離する。

6) 渦輪が三次元的に球から剝離する事から、揚力が発生すると考えられ、さらに揚力の最大値は渦輪が球から剝離したとき起こる。

7) 大きな揚力変動をともなう渦輪の発生は振動流 1 周期につき 2 つ発生し、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見せず有意な傾向を示さない。

8) 本実験の範囲では揚力変動のウナリの程度は小さい。

球に関する流体力の研究は着手してから日も浅く、対象とする現象が複雑であり、実験ならびに測定方法等も的確な方法が確立されておらず、測定精度等にも問題が残されている。特に渦輪に関する結果は定性的な評価であり、今後定量的に評価できる手段を検討しなければならないと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 池田駿介・山本吉道: 振動流中の円柱に作用する揚力とその発生機構, 日本流体力学会誌, 第2巻, 第1号, pp. 43~52, 1983.
- 2) Ikeda, S. and Y. Yamamoto: Oscillatory flow forces on cylinders near boundary, Tech. Rept. of Foundation Engrg., Saitama Univ., Vol. 11, pp. 35~53, 1981.
- 3) 中村廣昭・池田駿介・高柳 聡: 正弦振動流中に置かれた球に作用する流体力, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 443~446, 1982.
- 4) Sarpkaya, T.: Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, Jour. of Appl. Mech., ASME, Vol. 42, pp. 32~37, 1975.
- 5) Keulegan, G. H. and L. H. Carpenter: Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid, Jour. of Res., NBS, Vol. 60, pp. 423~440, 1958.
- 6) Morison, J. R., et al.: The forces exerted by surface waves on piles, Petroleum Trans., Amer. Inst. Mining Eng., Vol. 189, pp. 149~157, 1950.