

振動流中におかれた円柱に作用する流体力と渦の関係

池田 駿介*・中村 広昭**・山本 吉道***

1. 緒 言

振動流中におかれた円柱に働く流体力については、Keulegan & Carpenter¹⁾ の先駆的研究以来、多くの実験的研究が行われ、その特性や放出渦との関連性等についての理解が次第に深まりつつある。中でも Sarpkaya²⁾ は流体力を詳細に測定し、さらに KC 数の広い領域において揚力 (F_L) が抗力 (F_D) よりも大きくなるという工學上極めて重要な事実を明らかにしている。その後、Maull & Milliner³⁾ は揚力と放出渦の関係について論じ、揚力の発生が渦の発生と強い関連を有することを示しているが、その特性は測定者によって異なっており、放出渦と揚力の関係については未だ不明な点が多い。本論文は揚力の挙動に特に注目し、発生渦との関連について詳細に検討するものであり、次の項目順に述べていく。

- (1) 抗力及び揚力の波形について
- (2) 揚力及び渦放出の周波数について
- (3) うなりについて
- (4) 渦運動と揚力波形の再現
- (5) 結論

2. 実験方法

実験に用いた振動流装置は中央部に正方形断面 (30 cm×30 cm) のアクリル製観測部を持つU字型で、ピストンの往復運動によって正弦的な振動流を発生させるものである。

円柱に作用する流体力は図-1に示すような円形シリンダー (外径 60 mm の塩化ビニル管) の一端に片持ち

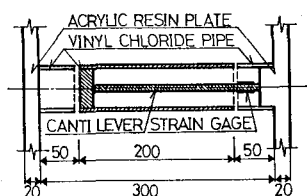


図-1

梁を取り付け、他端を水路壁に固定し、入力振幅を 0~35 cm まで、周期を 5~10 sec まで変化させてストレーン・ゲージにより測定した。その際、壁の影響を取り除くのに、流速分布の測定からシリンダー測定部を両壁より 5 cm ずつ離れた。片持ち梁の断面は抗力と揚力を同時に測定するために中空矩形型 (装置 1 と呼ぶ) と、揚力のみを詳しく測定するために板状型 (装置 2 と呼ぶ) を採用した。装置 1 は $14.6 \leq KC$ 数 ≤ 36.6 、装置 2 は $3.65 \leq KC$ 数 ≤ 36.6 の範囲で使用した。また片持ち梁形式であるため流体力により自由端に変位が生じるが、その変位量は直径の 10 分の 1 以下であったので、Blevins⁴⁾ の文献から流体力への影響は無視出来ると考えられる。

次に円形シリンダー周りの渦の可視化をポリスチレン樹脂の微細な粒子 (粒径 0.3~0.6 mm, 比重 1.045) をトレーサーとして水中に入れ、周囲を暗くして上からスリット光線をシリンダー軸に直角に当てることによって行ない、16 mm シネカメラで撮影し渦の挙動を定量化した。

3. 抗力及び揚力の波形について

装置 1 によって測定された流体力は F_D と F_L の分離が装置上完全ではなかったため、その影響を補正して得た抗力波形を図示したのが図-2である。

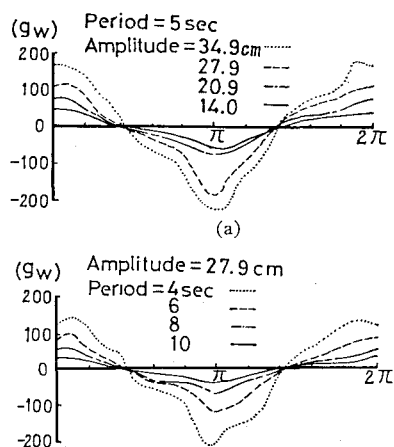
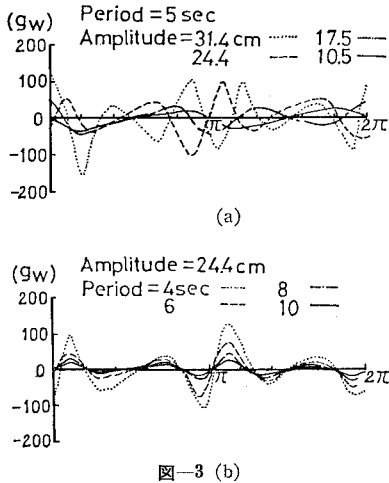


図-2 (b)

* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科
 ** 正会員 埼玉大学助手 工学部建設基礎工学科
 *** 学生会員 埼玉大学大学院工学部建設基礎工学科



この図のように、入力周波数、振幅の増加と共に抗力の振幅は増大するが、波形パターンはほとんど変化していないことがわかる。すなわち放出渦の影響をあまり受けておらず、流速の変化に大きく左右されることが知られる。

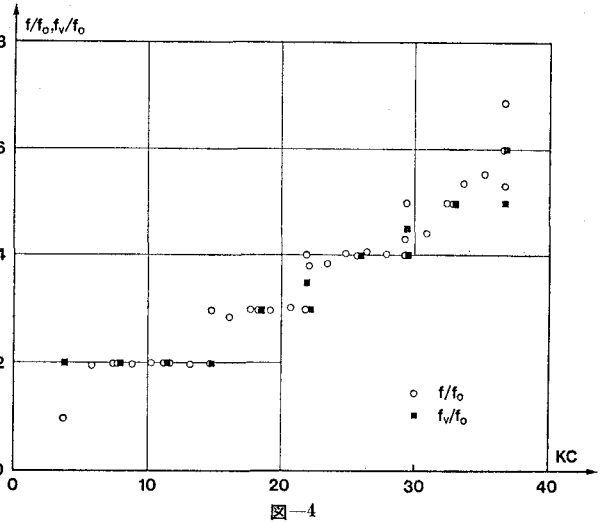
次に装置 1 及び 2 によって測定された揚力波形の一部を図-3 に示す。この図のように、揚力に関しては入力周波数、振幅の増加と共に揚力も大きくなっていく傾向は抗力の場合と同じであるが、波形パターンの方は入力周波数によってはほとんど変化しないものの(図-3 b)、入力振幅が大きくなってくと渦放出数が増え、波形パターンは増々複雑になることがわかる(図-3 a)。すなわち一振動周期内の渦放出数が揚力変動に大きな影響を与えていると考えられる。

なお流体力測定の際に、波形パターンはほぼ一定であるが、一波ごとの絶対値が一定でなく、うなり現象(うなりの波長は 5~20 波分)を生じている場合がかなり見られ、これについては 5. で詳しく述べることにする。

4. 揚力及び渦放出の周波数について

図-4 にゼロアップクロス法による揚力波形の周波数(f)及び一對渦の放出周波数(f_v)と振動流の入力周波数(f_0)との比が、 KC 数の関数として示されている。

この図で f と f_v は良く一致しており、また KC 数が 30 程度までは f_v が振動流の周波数に対して段階的に変化する LOCK-IN 現象を起こしているが、 KC 数が大きくなると渦放出数が次第に不規則になっていくことがわかる。これは振動流の一周波数内に放出される渦の数が増大するにつれて、渦の発生個数の自由度が増大するためである。

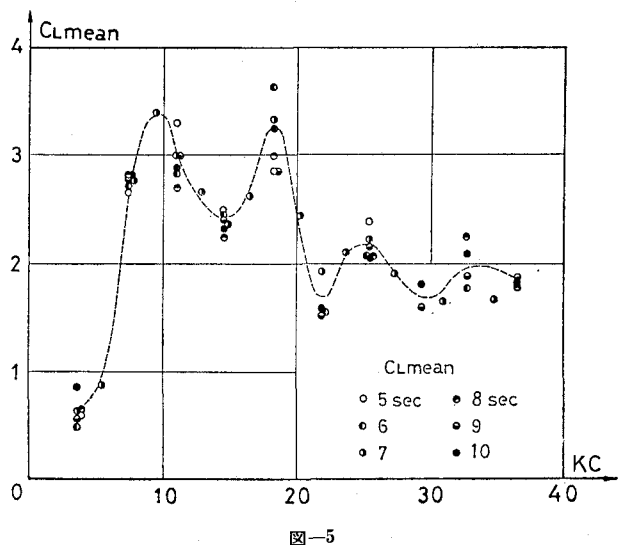


次に 図-5, 6 は次式の定義による揚力係数 (C_L) のグラフである。

$$C_L = F / 0.5 \rho U_m^2 D L \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F は揚力、 ρ は液体密度、 U_m は正弦振動流の最大流速、 D は円柱直径、 L は円柱長さである。ただし F の値は、 $C_{L\text{mean}}$ については一波内の絶対最大揚力を 40 波平均した値を、 $C_{L\text{max}}$ には各うなりごとに最大値を与える波を取り出し、その絶対最大揚力を 5 波平均した値を、 $C_{L\text{rms}}$ には $C_{L\text{max}}$ で述べた最大波を 5 波アンサンブル平均して出した代表波形の波長全体にわたる二乗平均根を用いた。(その際、一波長の分割数は、 $f/f_0 \leq 3$ に対しては 20 分割、 $f/f_0 > 3$ に対しては 40 分割とした。)

図-5, 6 において、 $C_{L\text{mean}}$ と $C_{L\text{max}}$ の差は KC 数が大きくなるほど開いて行くことが示されているが、このことから揚力のバラツキは KC 数が大きくなるほど増



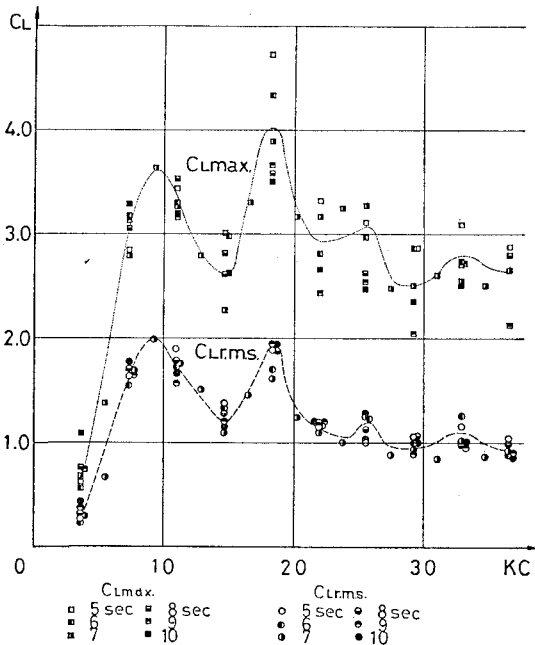


図-6

大することが知られる。また CL_{max} の値は CL_{rms} の 2~2.5 倍程度となっており、円柱に働く揚力を考える上で工学的に重要な点である。

さらに 図-5, 6 の結果を 図-4 と比較すると、揚力係数は渦放出数が安定している KC 数 (図-4 において KC 数=10, 18, 26, 32) 各々に対してピークを示し、Sarpkaya²⁾ が見出した KC 数=10, 18 における二つのピーク以外にもピークが存在することが確認されるが、そのピーク値は渦放出数の増加とともに低下することがわかる。また渦放出数が変化する KC 数の値 (KC 数=15, 22, 29) で揚力係数は低い値を示しており、渦の発生と揚力の発生が深い相関関係にあることを示している。

5. うなりについて

うなりの発生領域を調べるために、 CL_{mean} とそのケースにおける最大揚力係数との比が、9割以上の場合を白丸で、8割以上の場合を半黒丸で、それ以外の場合 (うなりが大きい) については、黒丸で表した領域図を 図-7 に示す。図中で実線は等最大流速線 (等 U_m 線) であり、A, B, C, D ラインはその線上で各々 f_v が 2, 1.5, 1, 0.5 Hz に対応している。なお装置 1 及び 2 の水中固有振動数は各々 15.8 及び 3.7 Hz であり、装置 2 の場合、C ラインより左上の領域では装置固有のうなりを発生している危険性があるので、装置 1 の結果のみを使用した。

この図より、うなりの無視出来る領域 (白丸印) が、

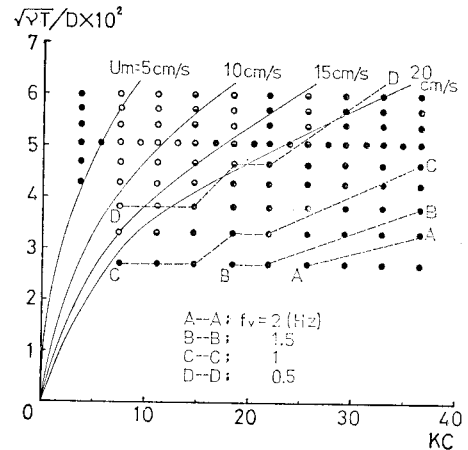


図-7

ほぼ 5~15 cm/sec の等 U_m 線の中にあり、同じ KC 数でもうなりを無視出来る場合とそうでない場合が存在することがわかる。またうなりが比較的小さい場合 (半黒丸印) も含めると 20 cm/sec の等 U_m 線以下 (この曲線はほぼ D ラインに一致する)、すなわちこの実験では f_v が 0.5 Hz 以下においてうなりが比較的小さいと考えられる。

ただしこの D ラインの右下の領域には、振幅 27.9, 20.9 cm など (それぞれ KC 数=29.2, 21.9) のようにうなりが大きくなっている場合も含まれる。そこで 図-4 と比較すると、そのうなりの大きなきの KC 数は丁度渦放出数がステップ状に増加し不安定な場合であることがわかる。この渦放出数の自由度は渦の数が増すにつれて増大するので、渦放出数の低い段階ではその自由度も低く、たとえば f_v/f_0 が 2 から 3 へは移りにくい。それゆえ KC 数=14.6 のときのように、図-4 から渦放出数が不安定に思えてもうなりが大きくなり場合も存在する。このようにうなりの発生は渦の発生パターンと大きな関連性を有することが知られる。

6. 渦運動と揚力波形の再現

渦運動と揚力変動との関係をより詳細に理解するため 16 mm シネフィルムで記録したポリスチレン粒子の流跡線長 ($\Delta t=1/30$ sec) から循環を求め、次の Sarpkaya³⁾ が導いた式の簡略式を用いて揚力を計算した。

$$F_L = \rho \sum_{k=1}^m \Gamma_k (u_{ki} - u_k) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Γ_k は k 番目の渦の循環 (時計回りを正)、 u_k 及び u_{ki} は k 番目の渦及び虚像渦の水平移動速度である。又循環の計算は次式によった。

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} v_\theta ds = \sum v_\theta \Delta S \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 v_θ は渦の回転方向速度、 ΔS は v_θ を測った位置のポリスチレン粒子の流跡線の線分長である。

その計算結果を図-8, 9に示す。良好な状態での可視化は難しく、循環を求めるにはかなりの困難を伴う為に、重要と思われるケース全てにわたって調べることが出来なかったが、計算を行ったケースについては直接測定した揚力に比較的良く一致した。

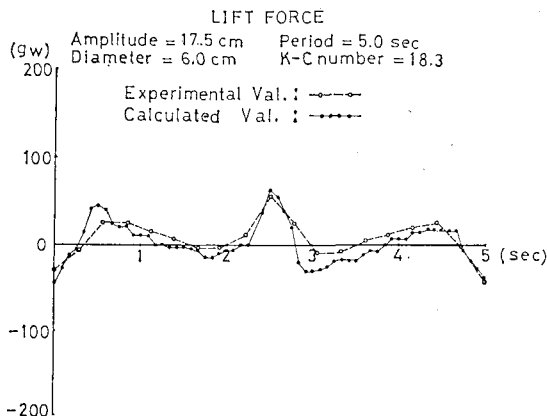


図-8

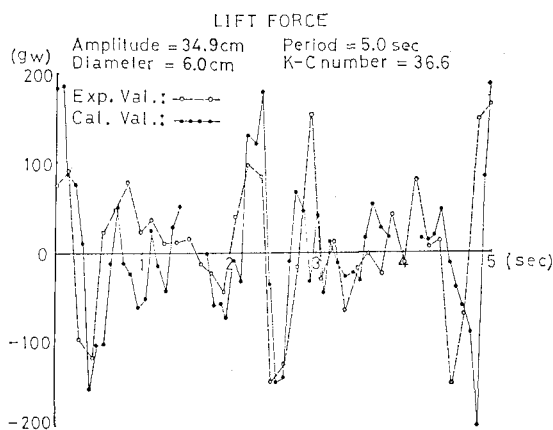


図-9

これらの詳細な可視化によれば、今回の実験範囲内ではカルマン渦列が出来ることはなく、はく離した渦は流れが逆転しても、しばらくは存在していることが判明した。又円柱からはく離した渦は直ちに円柱から離れていくことはなく、円柱に沿って移動し、円柱背後へ回り込んだ後に円柱から離れていく。このようにして円柱を離れた渦は流れが加速状態にある場合には流れに乗って主流に平行に近い経路をとり、そのときの揚力は大きく、その揚力波形は単調となる。その渦が円柱に比較的近い位置に存在しているときに、反対側から逆の循環を持つ

渦が発生すれば、揚力は低下する。そして流れが減速状態にはいると、渦の移動は鉛直方向成分が大きくなる。特に KC 数=36.6 の場合には鉛直方向の運動は複雑になっており、これに対応して揚力波形も複雑になっていることがわかる。

7. 結 論

振動流中におかれた円柱に作用する流体力と渦の関係について、以上の実験から判明したことをまとめてみる。

(1) 抗力は放出渦の影響をあまり受けず、流速に大きく左右される。

(2) 揚力の波形パターンは KC 数に大きく左右される。

(3) 揚力波形の周波数と渦放出の周波数が良く一致し、これらの周波数と振動流の周波数との比が、 KC 数の小さい間は段階的に変化する LOCK-IN 現象を示した。

(4) 揚力係数 (C_{Lmean} , C_{Lmax} , C_{Lrms}) は KC 数とともに変化するが、渦放出数が安定している KC 数に対していくつかのピークを有している。

(5) 渦放出数と渦発生安定性がうなりの原因に関係が深く、本実験では等 U_m 線が 20 cm/sec 以下で渦放出数の安定な領域ではうなりが起りにくい。

(6) ポリスチレン粒子を用いた流れの可視化により実際に渦の循環を求めることが可能であり、それを用いて揚力を計算したところ、直接測定して求めた揚力を比較的良く再現出来ることが明らかとなった。

最後に日本道路公団平山篤氏及び埼玉大学学生菅野義信氏には、実験、データ整理に際して多大の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

引 用 文 献

- 1) Keulegan, G. H. and L. H. Carpenter: Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid, J. Res. Natn. Bur. Stand., Vol. 60, No. 5, pp. 423~440, 1958.
- 2) Sarpkaya, T.: Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, J. Applied Mech., Trans. of ASME, Vol. 42, Ser. E, No. 1, pp. 32~37, 1975.
- 3) Maull, D. J. and M. G. Milliner: Sinusoidal flow past a circular cylinder, Coastal Engineering, 2, pp. 149~168, 1978.
- 4) Blevins, R. D.: Flow-induced Vibration, Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 19~21, 1977.
- 5) Sarpkaya, T.: Lift, drag, and added-mass coefficients for a circular cylinder immersed in a time-dependent flow, J. Applied Mech., Trans. of ASME, Vol. 30, pp. 13~15, 1963.