

振動流中の円柱に作用する流体力 Forces on Cylinders in a Sinusoidally Oscillating Fluid

山口大学工学部 学生員 本 憲一郎
九州大学工学部 正 員 羽田野 袈婆義
山口大学工学部 正 員 齋 藤 隆

1. はじめに

振動流中の物体に作用する流体力については、波動場に設置される海洋構造物に作用する波力の機構などを解明することを目的にして数多くの研究がなされてきているが、現象の複雑さのため最も単純な円柱に対してさえ確な値が与えられていない。振動流中に置かれた円柱に作用する流体力には、流れの進行方向の力と、これに直交方向の力（揚力）とがある。初期の研究においては、主として流れの進行方向の流体力（直方向力）に着目し、いわゆる Morison 式における抗力係数（Coefficient of Drag）並びに慣性係数（Coefficient of Inertia）の算定を目的として行なわれ、Keulegan Carpenter の優れた研究がある。定常流中の円柱と同様に、波動場に置かれた円柱にも流れと直交方向の力（揚力）が進行方向の力の6割程度のものが後流渦によって生ずることが Bidde⁽¹⁾によって報告され、揚力の出現条件と円柱後流渦パターンならびに後流渦による揚力の算定方法について検討した榎木・中村⁽²⁾の研究に引継ぎ、岩垣・石田⁽³⁾、石田・桑山⁽⁴⁾、沢本・柏井⁽⁵⁾、池田⁽⁶⁾らの研究によって後流渦と揚力の関係を中心にして現象の解明がなされてきている。しかしながら、後流渦の強さなどの定量的な把握は測定方法ならびにその精度の面から未だ十分とは言えない。このように、後流渦は主として揚力との関係でとらえられてきているが、流れが振動している場においては、放出された渦は逆転した流れの方向に移動するので、円柱上流側の流れの状態は一定方向に流動している流れ場に置かれたものとは異なり、流れ方向の流体力に放出渦が影響することが予想される。この点について、野田・松見⁽⁷⁾は抗力係数および慣性係数の散乱について、実験装置・方法ならびに解析方法などを吟味して、抗力と慣性力に与える後流渦の影響を検討している。また、林・竹内⁽⁸⁾は抗力係数、質量係数の時間的な変化ならびに円柱周辺の流速変動より流況の把握を試み、さらに、沢本・柏井⁽⁵⁾、池田・中村・山本⁽⁶⁾、林・竹内⁽⁹⁾は揚力の長周期変動、いわゆる「うなり」現象のあることを見出し、池田らはその発生条件について検討している。このように現象が極めて複雑なことや、放出渦についての測定方法ならびに精度についての困難さを伴うので、未だ一番単純な円柱に対する流体力に対してさえ適確な値が与えられているとはいえない。

本研究は、揚力が円柱後方における渦パターンと密接な関係があると同時に、円柱後方で放出された渦が反転流によって円柱に近寄り、円柱周辺の流況に大きな影響を与えるものと考え、流れの反転時における渦の挙動とそれによって誘起される流れの状況を把握するため、流速変動、直方向力ならびに揚力の変動の同時測定と併せて、振動流中に発泡スチロール球あるいはアルミ粉を投入することによって流れを可視化して16mmカメラならびにモータードライブカメラによって撮影を行ない、揚力の周波数特性、直方向力の位相関係などについて検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験は図-1に示す、幅が56cm、長さ100cmで間隔を10mmにした平行板間に重錘により振動流を起す装置を用いて行なった。実験部分の底面はベンキ塗布上をコンパウンドとワックスで磨いた9mm鉄板で、上面は流れを可視化するために10mmのガラス板張りにしてある。実験円柱は直径が5cmで厚さが9.8mmのアクリル円板である。この円板は長さ4cm、直径5mmの真鍮棒によって実験部分の中央に固定されている。

円柱に作用する流体力の測定は、図-1の下部に拡大図で示してあるように、円柱を固定している真鍮棒

に流れ方向とそれに直交方向とに4枚のゲージを張り、両方向の円柱に作用する流体力を同時に測定出来るようにした。力の較正は実験装置に取付ける前に、真鍮棒が水平になるように固定し、円板部の1/2厚さ点に直接重りを下げる方法で行なった。較正結果、直交方向の変形に対する影響は実験を行なった範囲内では7%以内であった。

なお、この流体力測定系の水中固有振動数は54 Hzである。

振動流れの流速変化は、強制振動用の重錘が入っていない方の直径30 cmの円筒水槽内の水位変化を測定する方法で行なった。なお、この方法の検定のため、実験部分の側壁より5 cmはなれたところに設置した直径1 mmのステンレス管9本を重ねて作った動圧管と、その先端から流れと直交する方向に1 cmずらして埋設した静圧管との差圧より求めた振動流の最大流速時の流速分布の測定結果を図-2に示してある。図で $Z/H=1.0$ がガラス面で、 $Z/H=0$ が鉄板面である。

円柱周辺の流況、とくに流れの反転時における円柱後方の放出渦による流況を調べるため、トレーサーとして0.1~0.4 mmの発泡スチロール球ならびに、アルミ粉を混入し、16 mmカメラで毎秒20コマ撮影し、トレーサーの軌跡を調べるためモータードライブカメラの前方で、露出時間内に4回露光をささげる回転円板を廻しながら毎秒3~4コマで撮影した。

なお、実験条件は、主流の振動周期3.3~6.7秒、振動流最大流速が9.4~39 cm/Sで、Keulegan - Carpenter数が6~38である。

3. 実験結果とその検討

図-3に揚力 F_y と直方向 F_x の変動波形と揚力の周波数成分の分布の代表的な例を示す。揚力の変動と直方向力の変動(或いは振動流変動)と比較した場合、次の様な相違点がある。KC数が10~15の範囲では、 $KC=12.8$ の図でみられるように流れの振動周期ごとの変動は比較的安定しているが、振動流れの周期の1/20程度(約3 Hz)の高周波変動がみられる。この原因については不明であるが、円柱上・下端の周辺に沿って出来る襟巻型の渦と円柱表面との間に、Michael⁽¹⁾がスケッチしているものと同一かは判らないが、小さな渦が並んでできているのが観察され、この渦と何らかの関係があるのかもしれない。KC数が小さくて流体力の

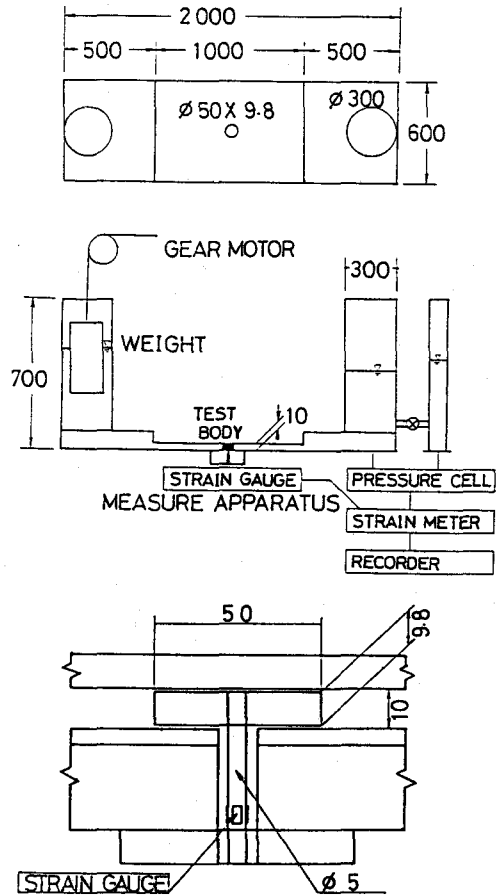


図-1 実験装置と流体力測定装置

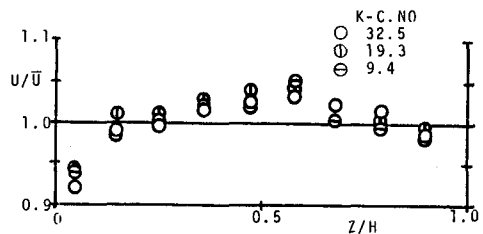


図-2 流速の鉛直方向分布

絶対値が小さい場合には、この円柱周辺に沿って出来る襟巻型渦の内側に出来る渦が端面壁の効果であるかは平行板内の間隔を変えた実験によって確認する必要がある。

KC数が20～25では、 $KC=21.1$ の図に見られるように、揚力のうなりが顕著に発生して、揚力の絶対値ならびに変動パターンが極端に変化している。KC数が15以下において揚力の卓越周波数は主流の4倍周波数までの整数倍周波数であるが、このようなうなりが発生している場合にはKC数=21.1の周波数分布にみられるように主流の4倍周波数の付近に広く分布している。

KC数が30を越えると、 $KC=34.1$ の図で見られるように、揚力の変動は極めて安定してきて、円柱後流渦の放出並びにそのパターンが安定していることがうかがわれる。この場合の揚力の卓越周波数は主流の10倍周波数である。

池田¹²⁾らは直径60mmの円柱による実験で、うねりの無視出来る条件はKC数でなく主流の流速が5～15cm/secであることを指摘している。本実験の場合も、極めて限定された条件での実験ではあるが、ほぼ主流最大流速が15cm/secを越えると「うなり」現象が見られる。さらに主流最大流速が大きくなり $U_m > 30\text{ cm/s}$ を越えるようになると揚力変動は安定してきて「うなり」現象は見られなくなる。

揚力の周波数特性

揚力の卓越周波数を主流流れの周波数で除した値をKC数に対して描点したものが図-4である。図において白丸描点はパワースペクトルが最大の周波数で、黒丸点はパワースペクトルが次位の周波数のものである。

KC数が18以下の場合には、主流の2倍周期のものが卓越し、第1卓越周波数のパワースペクトルは第2卓越周波数のそれに較べて明確に大きい。KC数が20～30の範囲においては第1卓越周波数と第2卓越周波数のパワースペクトルの大きさはあまり違わなくて、測定時刻によってその値は逆になる。このことは円柱周辺の流況が複雑かつ不安定な状態で「うなり」現象の発現と密接な関係をもっていると考えられる。

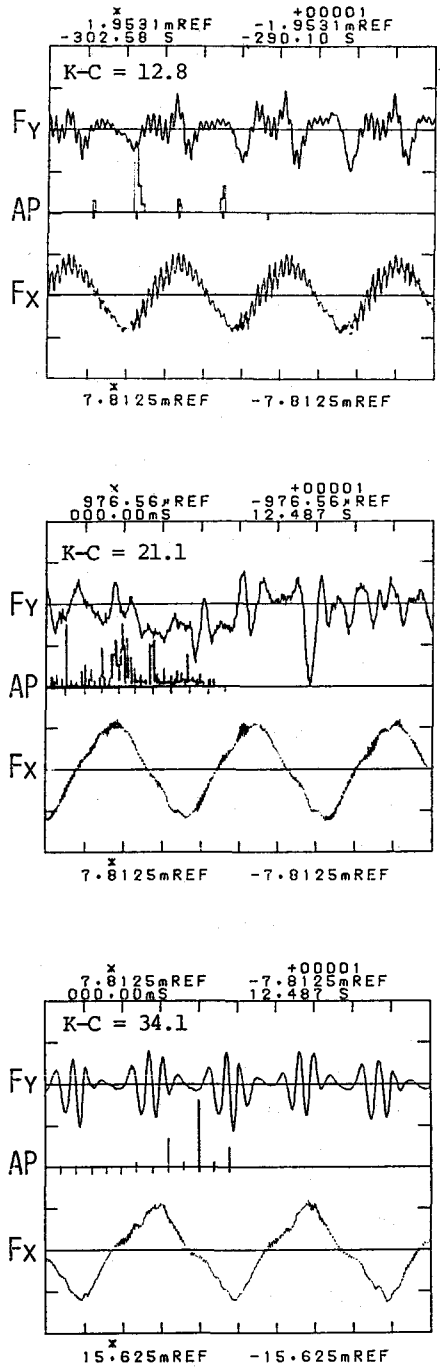


図-3 揚力，直方向力の変動と揚力のスペクトル密度

池田らがゼロアップクロス法による揚力波形の周波数と一對渦の放出周波数とを比較してよく一致していることから、揚力の卓越周波数を用いた Strouhal 数 $St = Df_y / U_m$ を KC に対して描点したものが図-5 である。同図中の点線は定常流中の渦掃き出し周波数を与える Roshko の式の値である。

直方向力の位相関係

図-6 は円筒水槽水位変化より求めた流速と直方向力の変動波形を示したものである。いずれの場合にも流速変動に較べて直方向力の変動は位相が進んでいて KC 数の小さいほど位相が大きくなっている。一方 F_x の波形は KC 数が大きい程歪みが大きくなっている。同図中に示した流速ならびに直方向力が零となる時の位相差 ε_1 と両者が最大位を示す時の位相差 ε_2 を求めて、KC に対して描点したものが、図-7 である。図中の黒丸描点が ε_1 で白丸描点が ε_2 である。

なお、同図中の破線は直方向力に Morison の波力式において、抗力係数と慣性係数の比が一定であるとして求めた位相関係である。また、同図中の実線は、Sarpkaya⁽⁶⁾ が U 字管振動流において求めた抗力係数ならびに慣性係数の Fourier 平均値を Morison の波力式に代入して得られた位相角である。図の白丸で示した直方向力が最大値のときの位相 ε_1 と直方向力が零であるときの位相とを比較してみると、KC 数が 15 以下においては両者の差は殆んどないものとみてよいが KC 数が 20 以上の場合には、最大直方向力時の位相の方が直方向力が零のときの位相が約 20° 程度大きくなっている。すなわち、流れの反転時における位相が直方向が最大値のときの位相よりも進んでいる。

CM/CD の値を与えて Morison 式より求めた位相関係と実験結果とを較べてみ

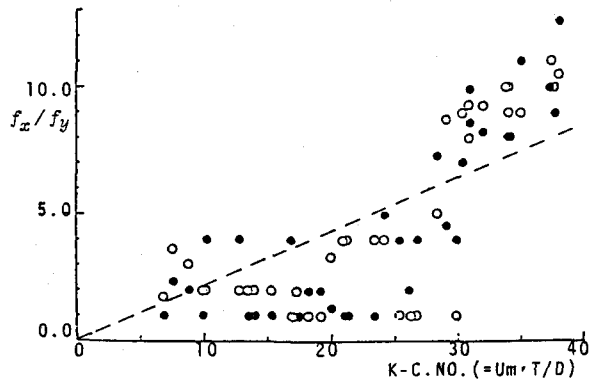


図-4 揚力の卓越周波数

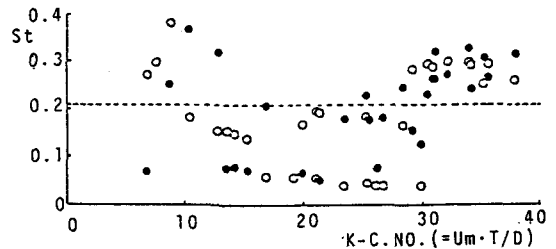


図-5 揚力卓越周波数による
Strouhal 数と KC 数の関係

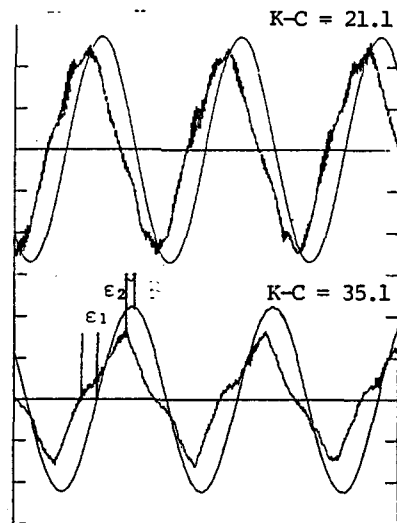


図-6 流速と直方向力の変動波形

ると、本実験における CM/CD の値は KC 数が 5 で 1 程度の値から KC 数が大きくなるに伴ない大きくなっていき、 KC 数が 35 になると CM/CD は 4 程度の値にならなくてはならない。本実験で得られた CM/CD の値を KC 数に対して描点したものが図-8 である。同図中には Sarpkaya の CM, CD の実験値の平均値から求めた CM/CD の値を実線で記入してある。 KC 数が 10 以下を除くとほぼ一致しているとみてよい。この結果と図-7 から推測される CM/CD 値の間には大幅な違いがある。すなわち、図-7 の CM/CD の関係と Morison の直方向力の式とから予測される位相関係は、 KC 数が 10 以上のところでは図-8 の実線と実験描点とがほぼ一致してよいはずである。この違いについての理解を得る手掛りとして、流れが反転する前後における円柱周囲の流況を知る為、トレーサーとして発泡スチロール球を投入してモータードライブカメラで露出時間を 4 ～ 5 回分断して撮影した画像より、発泡スチロール球の軌跡をトレースした。その結果を図-9 に示す。図は KC 数が比較的大きい場合のものであるが、減速時円柱後方にある対称あるいは非対称に存在する一対の渦は流れの反転直前にその大きさを増しながら流れを直交する方向にお互いに離れていく。渦の大きさが大きくなりだすと同時に、両渦の間に強い流れが生じる。この流れの速さは主流の最大流速にほぼ匹敵するほどのものである。その後、流れが反転すると、この一対の渦は円柱側方に急速に遠ざかっていき、この一対の渦によって誘起されている流れは急速に弱っていく。この事と直方向力が最大である時の位相の進みより反転時における直方向力の位相の進みが大きい事とから直方向力の位相の進みは慣性力による寄与分よりも、流れが反転する直前に存在する円柱後方の一対の渦によって誘起される流れによる影響が大きいものと考えるのが自然ではないかと考えられる。

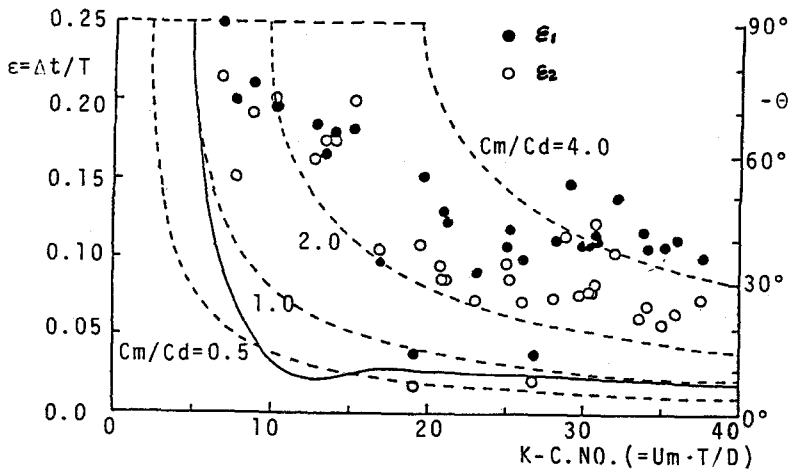


図-7 直方向力の位相関係

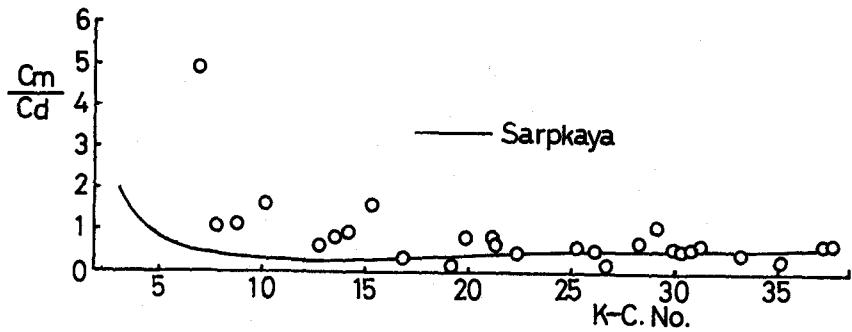


図-8 CM/CD と KC 数との関係

なお、円柱後方の一対の渦が非対称である場合には、これらの渦が円柱後方に遠ざかると同時に、円柱周囲の流れは一様流れと円柱周りの循環を合成したような状況を呈し、反転した主流は反転前に掃き出された渦によって蛇行しながら円柱に衝突する。

4. 結 語

振動流におかれた円柱に作用する流体力の特性について検討し、Ⅰ主流最大流速が $15 \sim 30 \text{ cm/sec}$ の範囲において「うなり」現象がみられ、この場合揚力卓越周波数による Strouhal 数は小さく、渦の掃き出しの自由度が拘束されていること、Ⅱ直方向力の位相には反転直前の円柱後方における一対の渦によって誘起される流れが重要な役割をもつこと、また、Ⅲこの一対の渦の挙動によって反転後の流れの状況が影響されることが明らかとなった。なお、これらの結果は定性的な評価であって、今後、種々の手段による定量的な評価を要する。

本研究の遂行にあたり、実験ならびに資料整理に協力していただいた山崎耕嗣（4年生）に厚く謝意を表すしだいである。

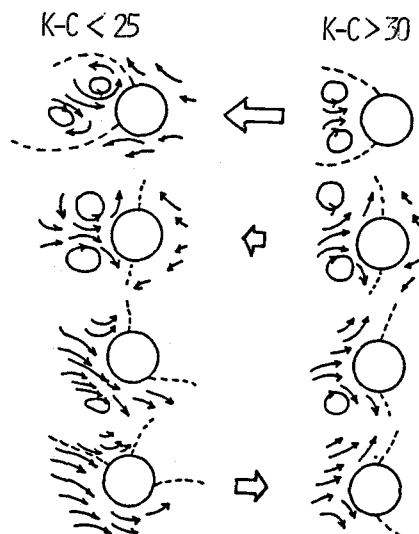


図-9 流れの反転時前後における円柱周囲の流れ

参考文献

- 1) Bidde D. D.; Laboratory Study of Lift Forces on Circular Piles, Proc. ASCE, WW4, pp. 595 ~ 614, 1971.
- 2) 榎木 亨, 中村孝幸, 喜田 浩; 円柱に作用する規速波による揚力について, 第22回海岸工学講演論文集, pp. 525 ~ 550, 1975.
- 3) 岩垣雄一, 石田 啓; 小口径円柱まわりの波圧分布と後流渦について, 第22回海岸工学講演論文集, pp. 531 ~ 537, 1975.
- 4) 石田 啓, 桑山勝則; 円柱および角柱背後の後流渦に関する実験的研究, 第26回海岸工学講演論文集, pp. 421 ~ 424, 1979.
- 5) 沢本正樹, 柏井条介; 振動流におかれた円柱に作用する揚力, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 378 ~ 382, 1980.
- 6) 池田駿介, 中村広昭, 山本吉道; 振動流におかれた円柱に作用する流体力と渦の関係, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 383 ~ 386, 1980.
- 7) 野田英明, 松見吉晴; 円柱に作用する波力の実験的再検討, 第26回海岸工学講演論文集, pp. 411 ~ 415, 1979.
- 8) 林建二郎, 竹内俊雄; 波動場における抗力係数, 質量係数の時間的变化について, 第25回海岸工学講演論文集, pp. 362 ~ 366, 1978.
- 9) 林建二郎, 竹内俊雄; 小口径円柱周辺の流況特性に関する基礎的研究, 第26回海岸工学講演論文集, pp. 406 ~ 410.
- 10) Sarqkaya K; Forces on Cylinders and Sphere in Sinusoidally Oscillating Fluid, Journal of App. Mech. ASME, pp. 32 ~ 37, 1975.