

低KC数振動流中の円柱に作用する流体力

齋藤 隆*・平田 幸靖**・浦川 和久***
河元 信幸*

Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder Immersed in a Sinusoidally Oscillating Flow at a Low Keulegan-Carpenter Number

Takasi SAITOU, Yukiyasu HIRATA, Kazuhisa URAKAWA,
and Nobuyuki KAWAMOTO

Abstract

It is the purpose of this paper to make clear the cause for the considerable dispersion of inertia and drag coefficients of a circular cylinder in a sinusoidally oscillating flow at low values of Keulegan-Carpenter's number. Drag and lift forces are measured by cantilever beam system with four PN semi-conductor gages simultaneously. The flow around a circular cylinder are visualised by electrolysis.

The following properties became evident after examining the experimental results. In the case of the process from production to shedding of eddy is symmetric with respect to a line of mainflow passes through a cylinder axis, the drag and resultant force coefficients shows a value about 2 times as much of asymmetric formation of eddy at same K-C number. Asymmetric formation of eddy plays an important role to change the direction and magnitude of approaching velocity. As a result of these, it induce strong lift and decrease of drag and resultant forces.

1. 緒 言

振動流あるいは波動場におかれた円柱に作用する流体力に関する研究は、1950年 Morisonら¹⁾によって提案されたMorison式に端を発し、Keulegan & Carpenterの先駆的研究²⁾、SurpkayaのU字管による系統的実験³⁾など数多くの実験的研究が行なわれ有用な知見が得られている。その後Bide⁴⁾によって波動場における揚力が抗力の6割に達することが報告され、円柱後流渦パター

ンと揚力との関連について検討した樫木・中村^{5,6)}の研究に引き続いて、岩垣・石田⁷⁾、石田・桑山⁸⁾、沢本・柏井⁹⁾、池田ら¹⁰⁾によって後流渦と揚力との関係を中心としての現象の検討がなされている。また野田・松見¹¹⁾は渦を考慮した抗力係数と質量係数を、林・竹内¹²⁾は抗力係数と質量係数の時間的変化を、河野¹³⁾は合成流体力についての検討を行い、流体力と放出渦との関連についての有益な知見が得られているが、放出渦による反転流の歪などの関連による現象の複雑さのため、とくに揚力の効果が顕著であるKC数が小さい場合における流体力は測定者によって異なるなど未だ不明な点が多く残されている。

本研究は、渦の生成から放出過程に注目して、揚力の影響が顕著で、傾向も明かでないKC数が20以下での

*社会建設工学科

**建設技術研究所

***日本水工設計

流体力の特徴を明らかにすることを目的に、抗力と揚力との同時測定を行なった結果を用いて、抗力と揚力の卓越周波数、Morison式の抗力係数および質量係数、流れ場の特定位相における流体力係数、極値流体力の生起位相、合成流体力とその作用方向の時間的変化について検討し、さらに電解沈澱法で渦の生成から放出される過程とそれに伴う反転流の挙動を調べる可視化実験を行なったものである。

2. 実験装置と実験方法

実験に用いた振動流発生水槽は測定部である幅60cm×厚さ10cmの矩形断面で長さが100cmの矩形管路とその両端に取り付けられた直立円筒水槽部とで構成されている(図-1)。測定部の上壁は10mmガラス板、側壁は10mm透明樹脂板、床面は6mm厚の鉄板である。

実験円柱の外径は40mmである。流体力測定部の長さは59.8mmで、その重心で後述する流体力測定角柱の頂部に固定されている。上下の壁面には境界層の影響を除くために長さ20mmのダミー円柱が設置されている。ダミー円柱の寸法は円柱設置前における流速分布の測定によって決められた。

抗力、揚力はダミー円柱と床面とによって固定された7mm×7mmで長さが25mmの真鍮角柱の4面に張り付けられたPN半導体ゲージの出力をデジタルレコーダーに記録することで同時に測定された(図-2)。

試験断面の平均流速は釣合錘と結ばれた直径200mmで厚さ10mmの発泡スチロール製の浮子が掛けられた摩擦抵抗が極めて小さい可変抵抗器に取り付けられた直径200mmで厚さ5mmの亚克力樹脂製プーリーの回転角の変化を電圧に変換したものから決められた。

流れの可視化に用いた円柱の寸法は流体力測定用のものと同じである。流体力測定部に対応する円柱の中央の円周に幅10mmに伝導性樹脂(藤倉化成製、商品名DOTITE)を塗り、これの電気分解(10v~30vの直流電圧)で生じる白色固体微粒子(径が約 10μ)の雲をトレーサとする方法で可視化を行なった。

3. 実験結果とその検討

3.1 抗力、揚力の卓越周波数

抗力ならびに揚力の変動波形をスペクトル解析し、卓越周波数を振動流周波数で除した値とKC数との関係を示したのが図-3、4である。両図の下部には第二卓越周波数のパワースペクトルを第一卓越周波数で値で除した値を棒グラフで示してある。

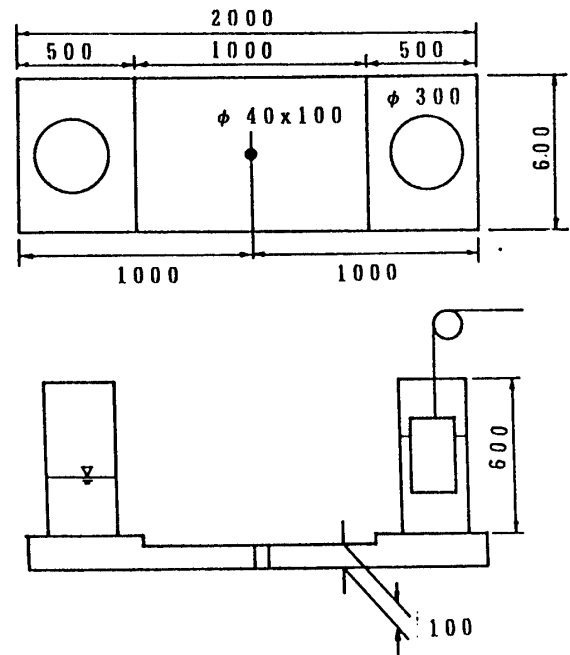


Fig-1 Diagram of experimental apparatus

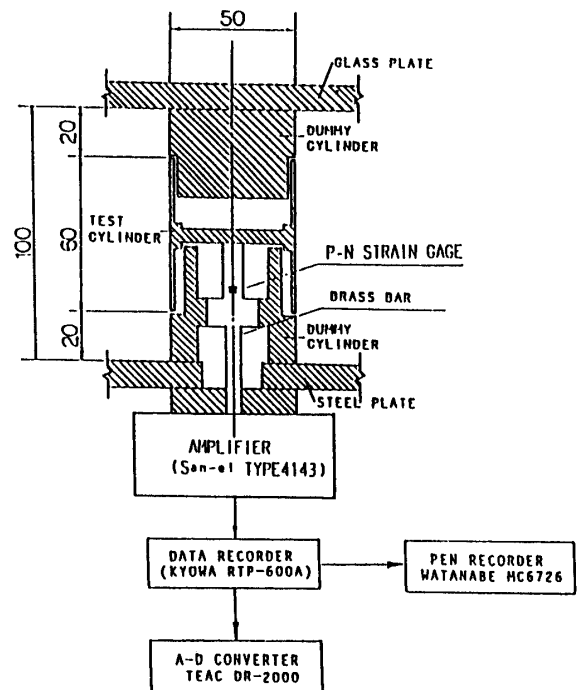


Fig-2 Measurement apparatus of fluid forces

抗力の変動波形において、 $KC < 8$ ならびに $KC > 14$ では振動流周波数と一致した周波数のみであるが、 $8 < KC < 14$ においては振動流周波数のパワースペクトルよりも高い2倍ならびに3倍の周波数の変動が混在し、この範囲での抗力が不安定であることが推定される。

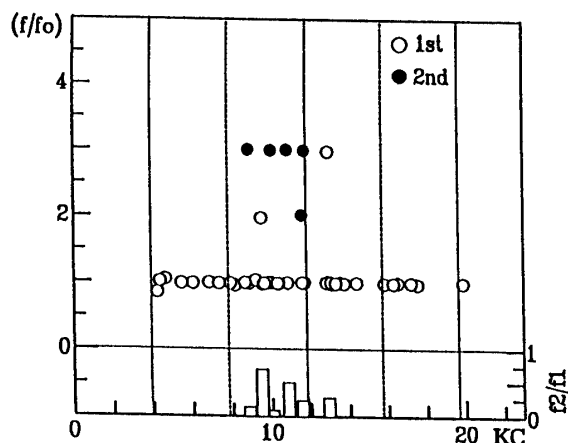


Fig-3 Predominant frequency on fluctuatiom of in-line force

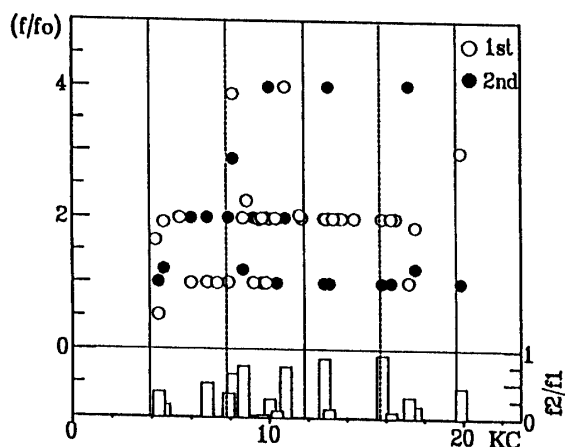


Fig-4 Predominant frequensy on flactuation of lift force

揚力における卓越周波数を見ると次の5つの領域に分かれる。すなわち、 $4 < KC < 6$ の場合では振動流周波数の2倍のものが卓越し、1倍のパワースペクトルは卓越周波数での1/2以下である。 $6 < KC < 8$ の場合では、振動流周波数が卓越し、2倍の周波数のパワースペクトルは1倍周波数での約1/2である。 $8 < KC < 12$ の場合では、振動流の1, 2, 4倍周波数の卓越周波数が混在し、第2卓越周波数のパワースペクトルが第1のものに対して0.7程度と大きい値となっているのがあって、この範囲での揚力が不安定であることが推定される。 $12 < KC < 17$ の場合では、第1と第2卓越周波数でのパワースペクトルがほぼ同程度である場合もあるが、振動流の2倍の周波数のみが卓越し、揚力の変動が比較的単純とみられる。 $KC > 17$ での実験個数が少ないが、振動流の整数倍の周波数が卓越している。

St数を渦の放出周期の間で流体粒子が移動する距離

に対する円柱径の値と仮定して、振動流の半周期で放出される渦の個数NとKC数の関係は次式で求まる。

$$KC = 7.85N$$

$N = 0.5n$ ($n = 1, 2, \dots$) と与えた値を図に縦線で記入してある。上述した複数の卓越周波数が混在するのは半周期間での渦の放出個数が1以上で2以下の範囲で、渦の生成から放出過程が安定した状態でないために複数の卓越周波数が混在することになる。

3.2 抗力係数, 質量係数ならびに揚力係数

Morison式を用いて振動流流速が最大となる位相での抗力 F_D ならびに最大加速時における抗力 F_D とFourier平均とで求めた抗力係数ならびに質量係数とKC数との関係を示したのが図-5, 6である。両図中にはSarpkayaの実験結果が曲線で記入してある。○描点で示したFourier平均で求めた抗力, 質量の両係数とも実験範囲全体にわたって散乱が大きい。

流速が最大となる位相での抗力から求めた抗力係数は $KC > 7$ 以上で平均的にはSarpkayaの実験値とほぼ一致する描点群とそれらの約1/2程度の値である描点群とに分かれていて、 $KC > 15$ では両者はKC数の増大に伴い一定値に漸近する傾向にある。

流速の最大加速時の位相における揚力から求めた質量係数は、 $KC > 8$ では平均的にはSarpkayaの実験値とほぼ一致するとみえるが、抗力係数と同様に2群に分かれていて、両群の値の比は抗力係数と同様にほぼ2であり、KC数の増大に伴い一定値に漸近する傾向にある。両係数が同じKC数に対して2つの値を取ることは非常に興味深い結果で、後述する可視化の結果ならびに合成流体力の検討によって明らかにされる低KC数における流体力と渦の生成から放出までの過程と密接に関連している。

100波の順流ならびに逆転流時に生じる最大の抗力平均から求めた抗力係数をKC数に対して描点したのが図-7である。図の抗力係数の描点をみると大雑束に3本の曲線にのついていると見ることが出来る。すなわち、 $KC = 4$ で $C_D = 2$ の値からKC数の増大に伴い $KC = 12$ で $C_D = 0.8$ 程度の最小値をとり、 $C_D = 1$ に漸近する一連の描点群と、 $KC = 7, 13$ で $C_D = 3.5$ からKC数の増大に伴い値が急減してSarpkayaの実験曲線に沿って $C_D = 1$ に漸近する描点群とに分かれている。 $KC < 17$ では同じKC数に対して2つの抗力係数の値があることが特異な現象として注目される。

揚力は振動流周波数の2倍のものが主として含まれていることから流速が正と負であるそれぞれにおける正と負の最大揚力の平均値から求めた揚力係数とKC数

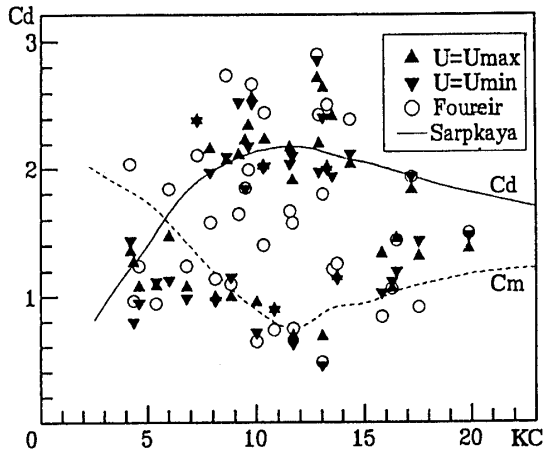


Fig-5 Drag coefficient at maximum velocity versus period parameter

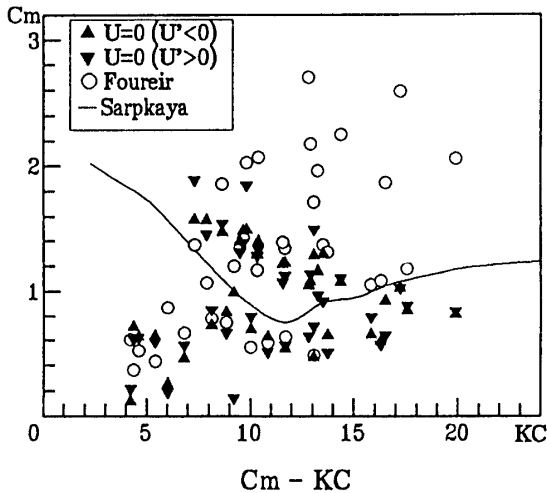


Fig-6 Inertia coefficient at maximum velocity versus period parameter

との関係を示したのが図-8である。流速が正で揚力が正の場合を△、揚力が負の場合を▽、流速が負で揚力が正の場合を▲、揚力が負の場合を▼描点で区別してある。図において描点は2つの曲線に分けて見ることができる。すなわち、KC数によって $C_L=0.5$ から 0.7 程度の値に漸増する描点群と $KC=9$ で $C_L=2$ の最大値をとり、 $KC=14$ で上記描点群と一致する描点群とに分かれているとみなせる。後者の描点群における揚力係数のKC数による変化の傾向は、振動流によるSurpkaya³⁾、池田ら¹⁰⁾の実験結果、波動場における榎木・中村⁹⁾の実験結果と一致するが、著者らの実験値はいずれの実験値よりも大幅に小さい。

各実験者の値の比較をしてみる。Biddeは揚力係数の

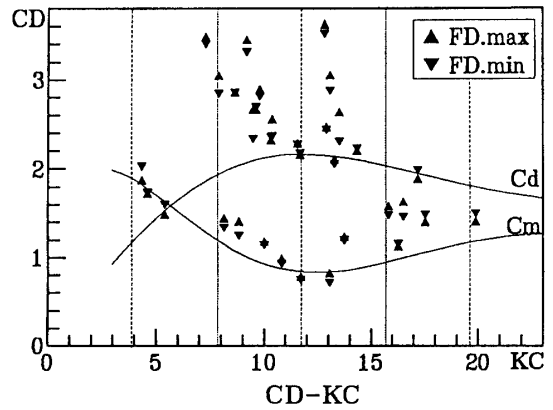


Fig-7 Averaged maximum drag coefficient versus period parameter

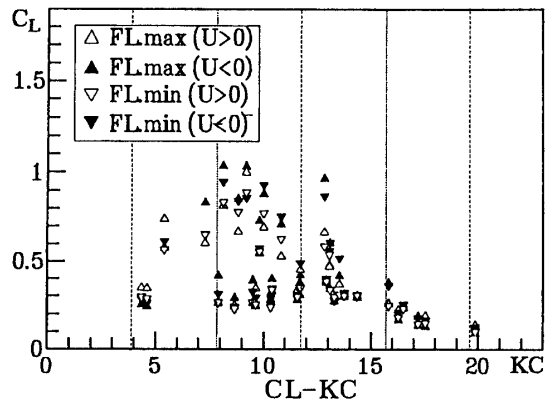


Fig-8 Averaged maximum lift coefficient versus period parameter

値は示していないが、揚力は抗力の6割であることから、抗力係数の最大値を $C_D=2.5$ とすれば、揚力係数の最大値は $C_L=1.5$ となり、上述の実験者による値 2.5 から 3.5 に較べてかなり小さい値である。榎木らの実験値はSurpkayaの値とほぼ一致していて、榎木らの揚力係数の定義を用いれば、流れ場の違いによる大きな差はないものと考えることが出来る。榎木らの値は $1/10$ 有義極大揚力の値から求められていて池田らの $C_{L,max}$ の値に相当すると考えられるが、池田らの値は榎木らの値の約 1.5 倍となっている。また、池田らの実験値は同じ振動流場でのSurpkayaの約 1.5 倍の値となっているが、測定断面積に対する円柱断面積の比が 0.2 と大きいことから、Blockage効果による過大な値が得られていると推測される。いずれにしても、本実験での揚力係数は小さいので今後検討を行なう。

極値の揚力係数が最大値をとるのは前述した振動流の半周期間に渦の放出個数が1である時とほぼ一致し

ていることが注目される。

半周期内で抗力が最大となる振動流の位相を調べたのが図-9である。FD_{min}は逆流時における位相で、その生起位相の値から0.5を差し引いている。KC数が小さい場合には、円柱表面で生成された渦が円柱表面近くに存在するか、放出されても円柱の極く近くに存在していて、円柱の両側面で生成された渦の非対称性の度合による反転流の方向と流速の変化が異なるため描点の散乱は極めて大きい。KC数の増大に伴い描点の散乱は小さくなっていく。

図は省略したが、Re_c数に対しても同じ傾向で、Re_c数の増大に伴って描点の散乱幅は小さくなっていき、Re_c>1.5×10⁴では最大流速の位相とほぼ一致している。

3.3 合成流体力

同時に測定した抗力と揚力、ならびに両者を合成し

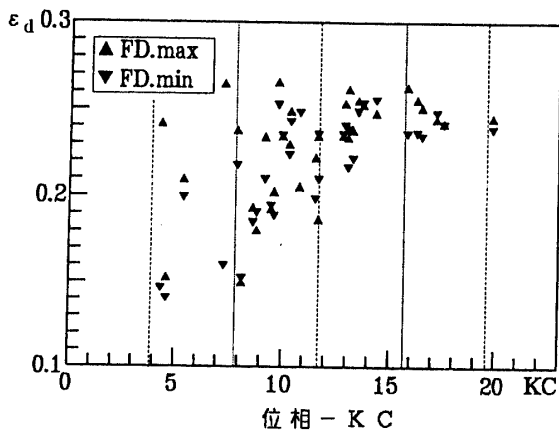


Fig-9 Phase lag between maximum drag force and maximum velocity

た合力と主流に対する作用方向の時間変化の代表的な例が図-10である。下部の図は合力の大きさと作用方向の時間変化を視覚的に示したものである。横軸に揚力を、縦軸に抗力をとり、3周期間における合力の最大値を基準にして示している。左側の図は右側に示した3周期間の各位相における平均を連ねたものである。1周期間における平均的な合力の大きさと作用方向がU字形と横8字形に変化する2通りに大別することが出来る。U字形に変化するには各周期ごとの抗力の変化はさほどでもないが、揚力の波形は各周期で大きく変化している。この結果として、各周期での合力の軌跡が散乱している。この場合、最大合力における揚力は抗力と同程度である。横8字形に変化するには、揚力、抗力とも各周期における変動波形が安定していて、各周期での変化と平均した変化とがほぼ一致している場合と、取り出す周期によって揚力の方向が切り替わり、3周期間における平均揚力はほぼ零となる場合とがある。

百波の順流、逆転流ごとの最大合力とその作用方向の平均値を、上述した合力とその作用方向の違いによって描点の種類を変えて示したのがFig-11, 12である。両図の描点を見ると、合力係数が他の場合に比べて小さい●描点では、KC数が5以上では合力の作用方向が20°~40°と非常に大きい。これ以外の場合には、6°~10°程度からKC数の増大によって漸減する傾向にあり、KC数が大きい場合には揚力の役割は小さいことが明かである。

前述した一様流中の円柱からの渦放出と同様であるとの仮定を用いて、半周期間における流体素子の移動距離から算出した渦放出の数が1~2であるKC=8~16前後の領域では、抗力係数の場合と同様に、合力

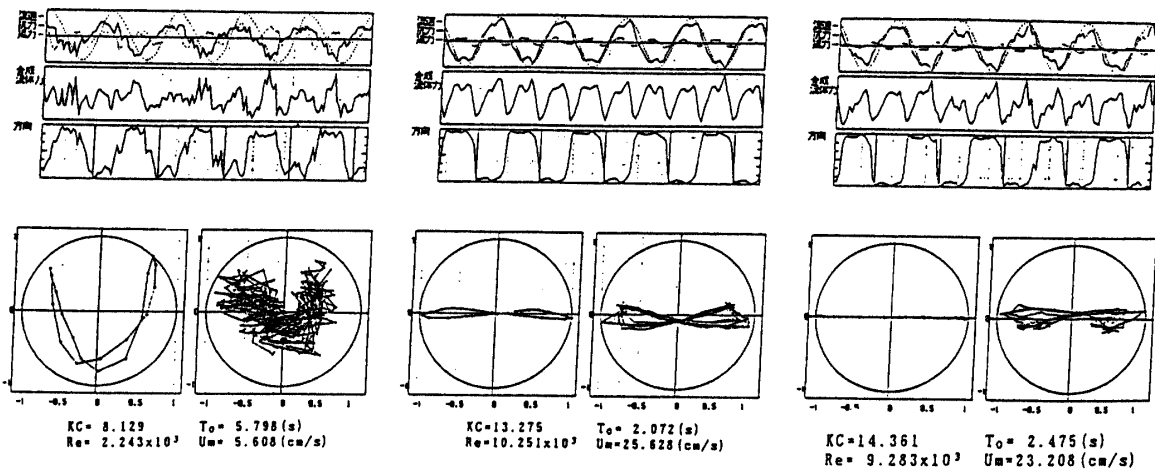


Fig-10 Sample of fluctuation on drag, lift and resultant force and locus of resultant force vector

係数は2つの値をとり、両者での抗力に対する揚力の強さが大きく異なることが原因となっている。

3.4 渦の生成, 成長, 放出過程

渦の生成から放出過程を電解沈澱法で可視化し、ビデオ撮影した画面をハードコピーしたのがPhoto-1, 2である。渦の生成から放出過程が円柱軸を通る主流方向線に対して対称である場合がPhoto-1で、非対称である場合がPhoto-2である。静止画面と移動画面とでは画面の解釈が違っているので、各ビデオ画面における色素、浮遊粒子の移動状態を参考にして、渦の生成から放出過程を描いたのがFig-13である。図は左からの主

流れの流速が最大である位相から減速し、静止状態から反転した流れが加速され、最大流速を経て減速状態の各位相を左から右への順に並べている。

流れが対称である場合 (a)

主流流れの流速が最大である位相では、逆方向流れ時に形成されて円柱の側方を流下してきた同じ回転方向をもつ渦が円柱の後方と斜め後方に存在し、円柱後方面に一对の渦が形成されている。減速時に円柱斜め後方の渦は流れと直交方向に移動し、この渦が円柱から遠ざかることで円柱後面の渦の規模が急速に大きくなっていく。円柱表面上での境界条件を満足するため

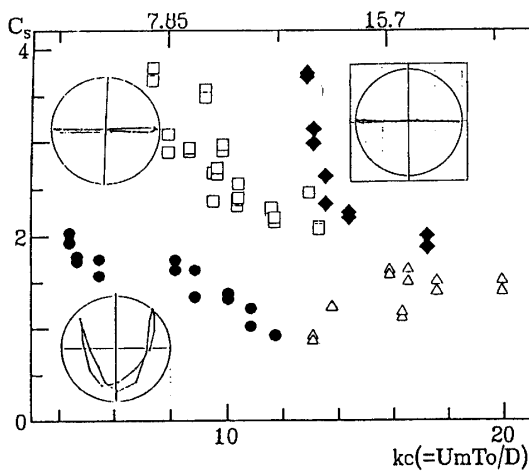


Fig-11 Averaged resultant force coefficient versus period parameter

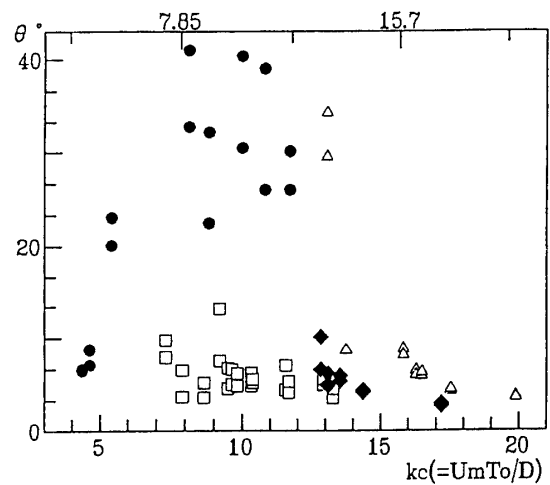


Fig-12 Angles of maximum resultant force versus period parameter

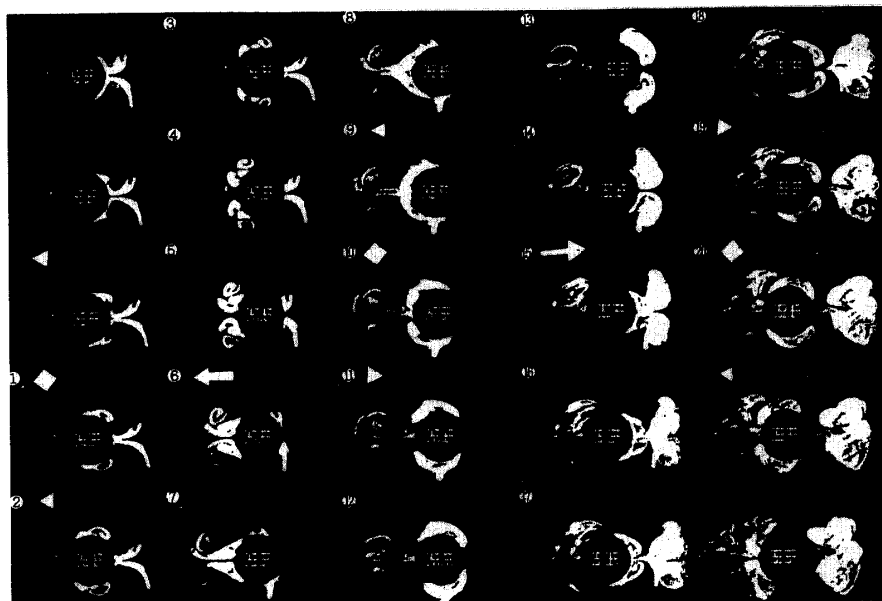


Photo-1 Visualized photograph of flow around circular cylinder
 KC=3.96 Re=1100 T=5.75sec Um=2.76cm/s

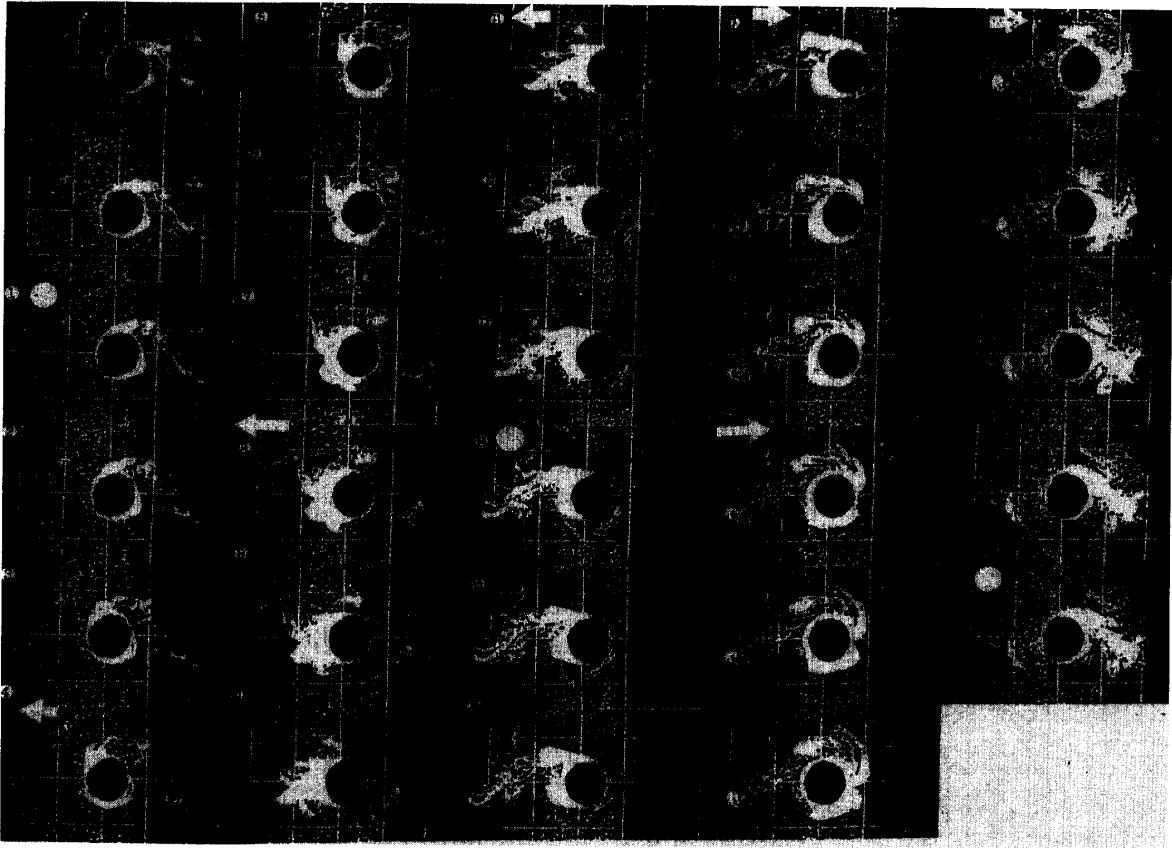


Photo-2 Visualized photograph of flow around circular cylinder
 $KC=7.40$ $Re=3000$ $T=3.93\text{sec}$ $Um=7.53\text{cm/s}$

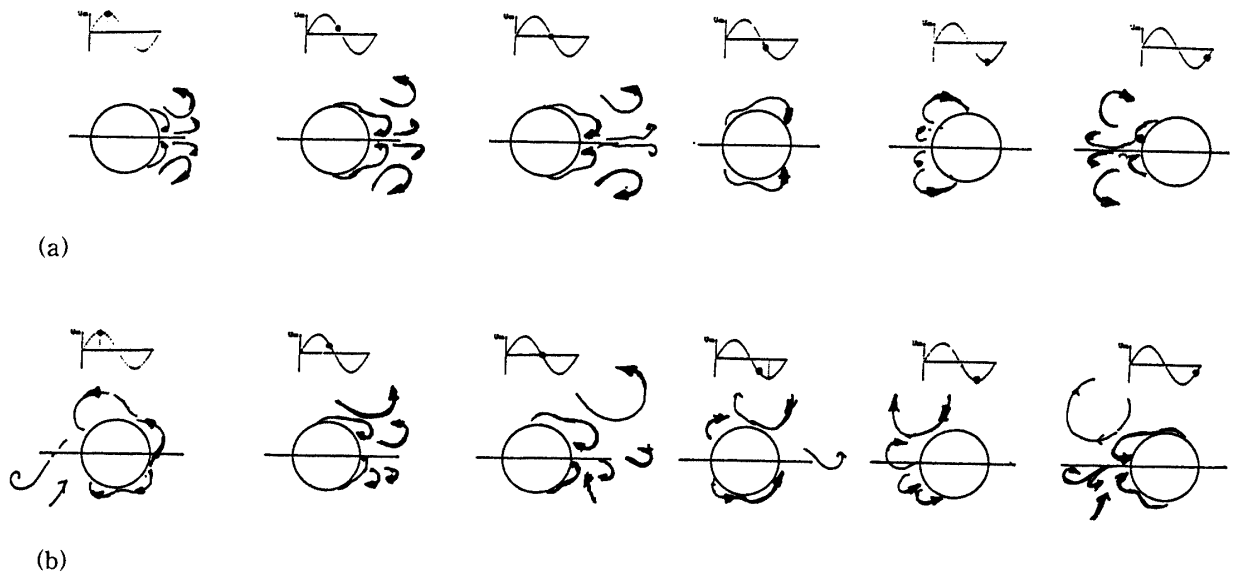


Fig-13 Schematic diagram of process from vortex formation to shedding

に各渦と対となる鏡像の渦が存在する。壁面からの距離に逆比例した速度でこの一对の渦は壁面に沿って移動することは周知の事実である。渦の循環が強くなる

ことで、主流流れが静止する直前から円柱後面の渦は円柱表面を流れに逆らって移動する。この渦の移動に伴う流れが原因と考えられるが、この渦の移動する前

方に回転方向が同じである小さな渦が生成される。ビデオの動画面ではこの2つの渦の間の壁面上に逆回転の渦が生成されている様に見えることもある。流速がほぼ最大となる位相で、両側面を移動してきた回転方向が同じである2つの渦は円柱後面で衝突し、円柱から放出されると同時に新たに一對の渦が円柱表面に生成される。

以上の様に、KC数が小さい場合には、渦が生成される位置とその渦が放出される位置とは異なり、放出される時の渦の回転は一樣流での渦放出時での渦の回転方向と逆である。さらに、回転方向が同じである2つの渦が同時に放出されている。

流れが非対称の場合 (b)

図の左から右への流速がほぼ最大となる位相で、右から左への流れが減速されている間に生成され、発達した渦が円柱表面を移動すると同時に移動渦の前方に回転方向が同じである渦が生成されている。この過程は流れが対称である場合と同じであるが、円柱の両側面で形成されている渦の規模が大きく違っている。流れが減速されてくると、移動している後の渦が急激にその規模を大きくしながら円柱から離れていく。この渦によって誘起される流れが原因とみられるのであるが、円柱表面からの流れの剥離がかなり上流側で起こると同時に円柱後面で生成された渦が急速に成長していく。両側面での放出渦の規模が大きく異なることから、円柱後面で生成された渦の規模は異なっている。流れが静止する直前から円柱後面で生成された渦は円柱表面に沿って移動し始める。流れが静止する位相においては、円柱後面で生成された2つの渦と円柱の下方で放出された渦で誘起されたとみられる右下から円柱の上側で生成された渦に向う強い流れが粒子の動きで観察された。すなわち、この位相における円柱への接近流速の方向は主流流れの方向から大きく外れ、かつ流速は主流流速に匹敵するか、それ以上になるのではないと思われる流速が観察された。この様な流況の結果、生成されたばかりの渦と円柱表面との間に生ずる流れで渦の規模が急速に成長し、その前方に回転方向が同じである渦が生成される。流速が最大となる位相では円柱の上、下面を移動してきた前方の渦が円柱面上で衝突し、両渦と円柱表面との間に新しい渦が生成される。渦の生成から放出される過程は、流れの対称、非対称によって基本的には違わないが、生成される渦の規模と成長の度合が異なる。

4. まとめ

振動流中の円柱に作用する抗力と揚力とを同時測定した結果と電解沈澱法で渦の生成から放出される過程を可視化した結果について検討して得られた結果を要約すると次の通りである。すなわち、

1) 抗力の変動では振動流周波数が卓越していて、抗力が流速によってほぼ規定されているが、KC数が8~18の範囲での揚力の変動には振動流周波数からその4倍周波数での複数の卓越周波数が混在していて、結果的には渦の生成から放出までの過程が揚力の発生に重要な役割を持つことになるが、形成過程の渦と放出された渦とで誘起される接近流れの歪が揚力ならびに抗力の絶対値に大きな役割をしている。

2) KC数が8~18の範囲において、Fourier平均で求めた流体力係数とKC数との関係は描点の散乱が大きくて系統性を見いだせないが、Morison式を用いて算出した抗力係数、質量係数ならびに半周期間での最大の抗力と揚力および最大合力の平均値から求めた抗力係数、揚力係数、合力係数とKC数との関係は複数の曲線となる。この原因はなんらかの攪乱が増幅されて非対称な渦の生成から放出までの過程が安定して持続される場合と、攪乱が減衰して対称な状態が維持される場合とで揚力と抗力の値が異なる結果である。

3) 低KC数においては、渦は流れの減速時に生成され始め、流れが静止する直前から円柱表面上を移動して、反転した流れの流速がほぼ最大となる位相において放出される。したがって、渦の生成位置と放出される位置は異なり、かつ2つの渦が同時に放出されることが明らかにされた。しかしながら、渦の形成される過程は基本的には同じであるが、同一実験条件で渦形成の対称、非対称が持続される原因について今後検討を要する課題である。

参考文献

- 1) Morison J. R., M. P. O'Brien, J. W. Johnson & S. A. Schaaf: The forces exerted by surface waves on piles; Petroleum Transaction, AIME, Vol.189, pp.149-157, 1950
- 2) Kealegan, G. H. and L. H. Carpenter: Forces on cylinders and plates on oscillating fluid; Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol.60, No.5, pp.423-440, 1958
- 3) T. Sarpkaya: Forces on cylinders and spheres

- in a sinusoidally oscillating fluid; Journal of applied Mechanics, Transaction of the ASME, pp.32-37, 1975
- 4) Bidde D. D.: Laboratory study of lift forces on circular piles; Proc. ASCE, WW. 4, pp.595-614, 1971
 - 5) 榎木享, 中村孝幸, 喜田浩: 円柱に作用する規則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, 1977
 - 6) 榎木享, 中村孝幸: 波動場の円柱後流渦と波力に関する研究, 愛媛大学紀要, 第8巻, 第4号, 1977
 - 7) 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
 - 8) 石田啓, 桑山勝則: 円柱及び角柱背後の後流渦に関する基礎的研究, 第26回海岸工学講演論文集, pp.421-424, 1979
 - 9) 沢本正樹, 柏木条介: 振動流中におかれた円柱に作用する流体力, 第27回海岸工学講演論文集, pp.378-382, 1980
 - 10) 池田駿介, 中村宏昭, 山本吉道: 振動流中におかれた円柱に作用する流体力と渦の関係, 第27回海岸工学講演論文集, pp.383-386, 1980
 - 11) 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.411-419, 1979
 - 12) 林建二郎, 竹内俊雄: 波動場における抗力係数, 質量係数の時間変化について, 第26回海岸工学講演論文集, pp.326-366, 1979
 - 13) 河野二男: 波による円柱の合成流体力(仮称)について, 第25回海岸工学講演論文集, pp.797-798, 1978

(平成6年4月15日受理)