

波動場における直立円柱周辺の渦構造に関する PIV 計測

石田 啓*・由比政年**・楳田真也***

1. 序 論

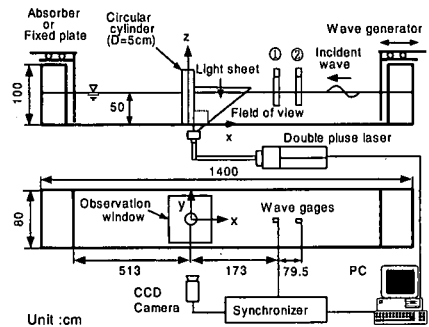
海岸・海洋構造物周辺の洗掘メカニズムを解明・予測するには、底面近傍の流体場の特性を定量的に評価することが基本となる。こうした観点から、これまでに、小口径の柱体周辺の流体場に関する実験的研究が広く進められ、流れ場の可視化や LDV 等の流速計測から底面近傍の流れの状態や位相平均流速等が明らかにされてきた(例えば, Kobayashi, 1992; Sumer ら, 1997)。

近年、流れの可視化画像に基づいて流速の多点同時計測を行うことが可能となってきた。Seal ら (1995) は、粒子画像流速計測 (PIV) 法を用いて、一様流場に設置された角柱前面の鉛直断面の速度場および渦度場を算定し、馬蹄形渦の生成、移動過程を明らかにしている。一方、波動場の柱体周辺の流れに対する適用例は少なく、特に渦の 3 次元的な構造に関する柱体軸方向断面の計測は極めて少ない。これに対し、著者らは、一般曲線座標系に変換した 3 次元 Navier-Stokes 方程式を用いて直立円柱周辺の振動流場に関する数値解析を行い、底面近傍に形成される馬蹄形渦や後流渦の内部構造について解析を進めてきた (Yuh ら, 2000)。そこで得られた結果は従来の実験結果と良好に一致し、その信頼性は確認されたが、対象とする流れ場を振動流から波へと拡張した場合、渦構造の類似点・相違点を究明する必要がある。

本研究では、PIV を用いて直立円柱周辺の水平断面と鉛直断面の速度場を詳細に計測し、波動場や振動流場における馬蹄形渦や後流渦の生成、放出過程および内部構造を定量的に明らかにする。さらに、正弦振動流場の数値解析を行い、流れ場の違いによる渦運動の類似点・相違点を明らかにすると共に、底面近傍で発生する鉛直方向の流れと 3 次元的な渦構造の特性を検討する。

2. 実験条件

図一に実験装置および PIV 計測システムの概略を示す。両端に反射波吸収式造波装置を有する断面水槽の



図一 実験水槽と PIV 計測システム

表一 実験条件

Test	H [cm]	U_{max} [cm/s]	KC	Re	波動場
P-1	1.7	3.9	2.5	1956	進行波
P-2	3.3	7.8	5.0	3891	進行波
P-3	4.6	10.9	7.0	5440	進行波
P-4	6.4	15.2	9.8	7594	進行波
S-1	1.0	3.8	2.5	1900	重複波
S-2	1.8	7.5	4.9	3787	重複波
S-3	2.7	10.5	6.8	5262	重複波
S-4	3.9	15.5	10.0	7737	重複波

中央部に直径 $D=5$ cm のアクリル製円柱を直立に設置し、水深を 50 cm と一定にした。表一に実験条件を示す。入射波には、周期 $T=3.2$ 秒、波高 $H=1.0$ cm $\sim$ 6.4 cm の正弦波を用いた。波動場は、進行波のみならず、重複波の節の位置に円柱を設置して振動流状態の実験を行った。流れ場の代表速度として円柱設置前の予備実験において底面から 10 mm 離れた地点で測定された最大流速 U_{max} を、代表長さとして円柱直径 D を用いて KC 数および Reynolds 数を定義した。(x, y, z) の直交座標系に対して、底面上の円柱中心に原点をとり、円柱中心軸を z 軸、水平沖向きを x 軸とした。周期的に安定した水面波形が見られる造波開始から 50 周期後より、水位変動の測定と同時に、PIV を用いて円柱前面の鉛直対称面 ($y=0$ 平面) および円柱周辺の水平断面 ($z=2$ mm および $z=50$ mm 平面) 内の速度場を計測した。

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科
*** 正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科

3. 解析手法

3.1 画像解析の手法

可視化画像は、平均粒径 $86\text{ }\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン粒子を水中に懸濁させ、計測断面にダブルパルス YAG レーザーを照射して、 1008×1018 画素の相関カメラで撮影した。1組の画像取得間隔は、最大流速時の PIV 計測可能範囲を考慮し $\Delta t = 1\text{ ms} \sim 4\text{ ms}$ とした。2 周期間の計測を行い、連続的に撮影した粒子画像を相互相関法に基づいて解析し、それぞれの瞬間の速度場を算定した。その解析方法は、微小時間 Δt 間隔の 2 つの画像上に捜査領域 (Interrogation spot) を設定し、輝度分布の相関が最大となる移動距離を求め、その範囲の面内流速を計算するというものである。そうして算定された速度は捜査領域の平均流速に相当するため、円柱や底面付近の複雑な渦の構造を正確に把握するには、小さな捜査領域で高い相関を得る必要がある。本研究では、画像の撮影条件、粒子密度および時間間隔等の制約から、捜査領域の大きさを 32×32 または 64×64 画素とした。

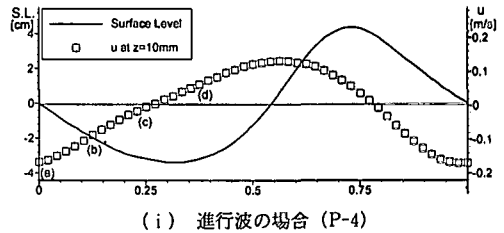
3.2 数値解析の手法

一般曲線座標系に変換した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式および連続式を基礎方程式として、時間微分には 1 次精度の後退差分を、空間微分には対流項は 3 次精度の風上差分を、その他の項には 2 次精度の中心差分を用いて数値モデルを構築した (石田ら, 1998)。円柱表面や底面境界に沿った境界適合格子を作成し、水理実験の KC 数と対応する円柱周辺の正弦振動流場の解析を行った。解析条件の詳細は Yuhi ら (2000) を参照されたい。

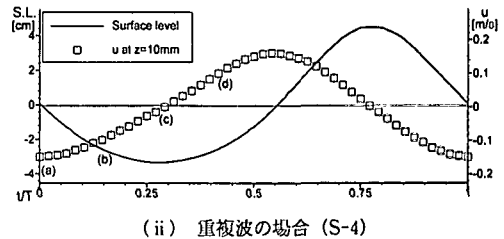
4. 解析結果および考察

4.1 水面変動と流速分布の時間変化

図-2 は、進行波および重複波の場合の、円柱設置前の水面の時間波形および水平方向の流速変動を示す。水面変動は円柱中心軸から沖側 $1/4$ 波長 (重複波の腹の位置)、流速は円柱軸上の底面から 10 mm 離れた地点で計測したものである。 t/T は実時間を周期で除した無次元時間を表し、静水面をダウクロスする瞬間を $t/T=0$ とする。水面波形は、波高の増大につれて波峰が高まり鋭くなり、波谷が平坦になる有限振幅性が見られるが、流速は重複波の場合は正弦的な変動を示す。一方、進行波の流速変動は、水面波形に従って非対称な形となり、水平方向の流速が岸向きとなる位相で最大流速が発生する。重複波の場合 (S-4) の円柱設置前の実験結果から得られた円柱軸上の流速分布の時間変化を図-3 に示す。底面からの高さが約 3 mm の地点を境界として、上層 (主流部分) はほぼ一定流速、下層 (底面境界層) では流速変動に位相のずれと空間的な振幅変化が見られ、底面に



(i) 進行波の場合 (P-4)



(ii) 重複波の場合 (S-4)

図-2 水面波形と水平方向流速の時間変化

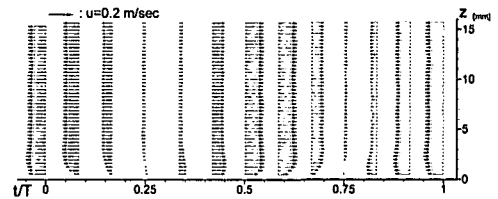


図-3 重複波の下での底面近傍の流速分布 (S-4)

沿う境界層の存在が確認できる。位相によっては、主流部分より境界層の外縁部の流速が大きくなるのが分かる。また、進行波の場合も底面付近では重複波と同じ底面境界層の流速分布の特徴が見られ、境界層の厚さもほぼ一致することを確認した。なお、これらの計測は数十周期に渡るものであり、その水面波形および流速変動の周期的な再現性は良好であった。

4.2 水平面内の速度場

図-4 は、進行波 (P-2) の場合の $z=50\text{ mm}$ および $z=2\text{ mm}$ 平面の流速分布の時間変化を示す。各図面の位相は図-2 中の記号 (a) から (d) に対応する。図中の隣接する速度ベクトルの描画間隔は、相関係数を求める捜査領域の大きさ (32×32 画素) に対応する。

KC 数が 5.0 に相当する実験 P-2 では、円柱表面に付着した 2 つの渦が形成される。位相 (a) と (b) の間に円柱背後域の上側 ($y>0$) で生成された渦が大きく発達するため、渦対は非対称である。これは、振動流場において実験的に確認されている現象 (例えば, Williamson, 1985) と整合するが、非対称性の発現する KC 数の範囲に関しては、実験装置および設定方法による影響を厳密に検討する必要がある。底面境界層内に位置する $z=2\text{ mm}$ 断面内の流況は主流域の $z=50\text{ mm}$ 平面のものとはほぼ同

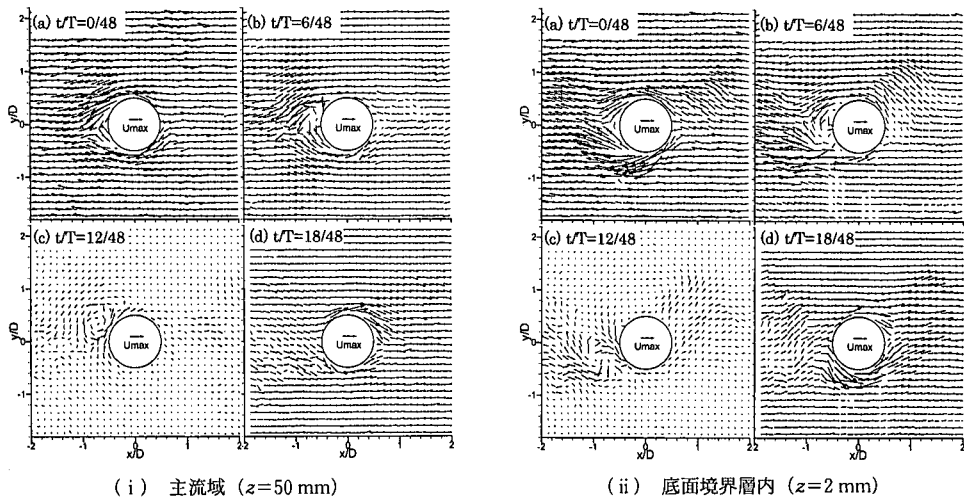


図-4 進行波の下での水平面内の流速分布 (P-2)

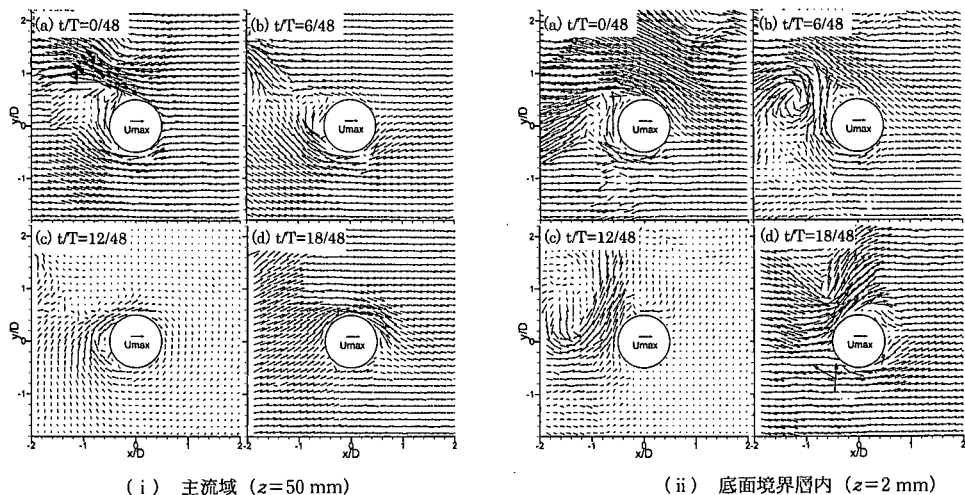
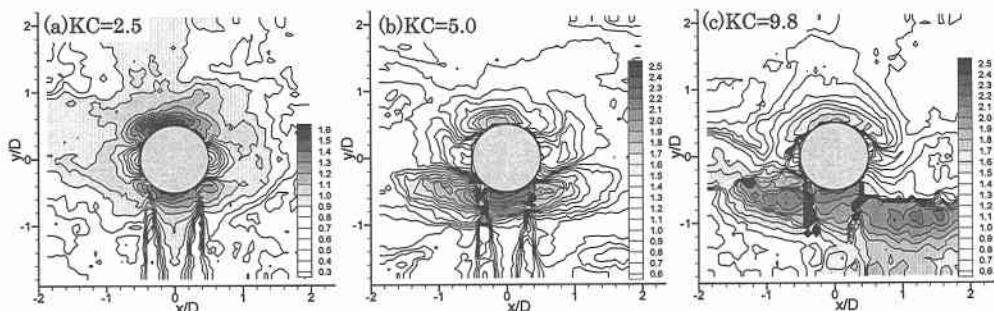


図-5 重複波の下での水平面内の流速分布 (S-4)

じであるが、円柱周辺の渦運動の結果生じる流速は底面付近の方が大きく、底面境界層内の流速分布の影響が見られる。図-5は、 KC 数が10.0に相当する重複波の場合(S-4)の流速分布の時間変化を示す。岸向き最大流速時(a)では、先の半周期に形成された時計回りの渦と、円柱上側で発生した反時計回りの渦が対となり、上方に放出されるのが分かる。渦対の間に誘発された円柱左上方の強い流れに従って、1組の渦対が周期毎に放出され、円柱上斜め45度方向に渦列が形成される。このような渦の生成、放出過程は従来の波動場の研究結果と同様のものである。ただし、重複波の下での渦列の向きは進行波の場合(図-6c参照)とは異なり、 KC 数が10前後の振動流場で現れる振動方向に対して直角方向に形成される渦列(Transverse Street)に近い形となった。底面近傍 $z=$

2 mmの流況は $z=50$ mm平面とは大きく異なる。岸向き流速の減速段階(b)で円柱上側に生成された渦の成長が十分でないため、左隣の大きな渦と対を成すことができず、円柱周辺から渦対は放出されない。その後、波谷位相時(c)では、円柱左側に大きな渦が接近し、流れの加速に伴い円柱上側を通過して、やがて沖向き方向に移流する。一方、進行波の場合、底面近傍でも主流域と同様に1周期間に1組の渦対が放出される渦運動パターンが見られた。ただし、渦の生成、放出や移動過程は境界層内と主流域で位相が若干ずれることが分かった。

図-6は、進行波の場合の2周期間に計測された底面近傍での水平方向の最大流速を示す。図中の最大流速の値は U_{max} で基準化したものである。 $KC=2.5$ では、流れ場の対称性を反映して、 x および y 軸方向に対称な分布



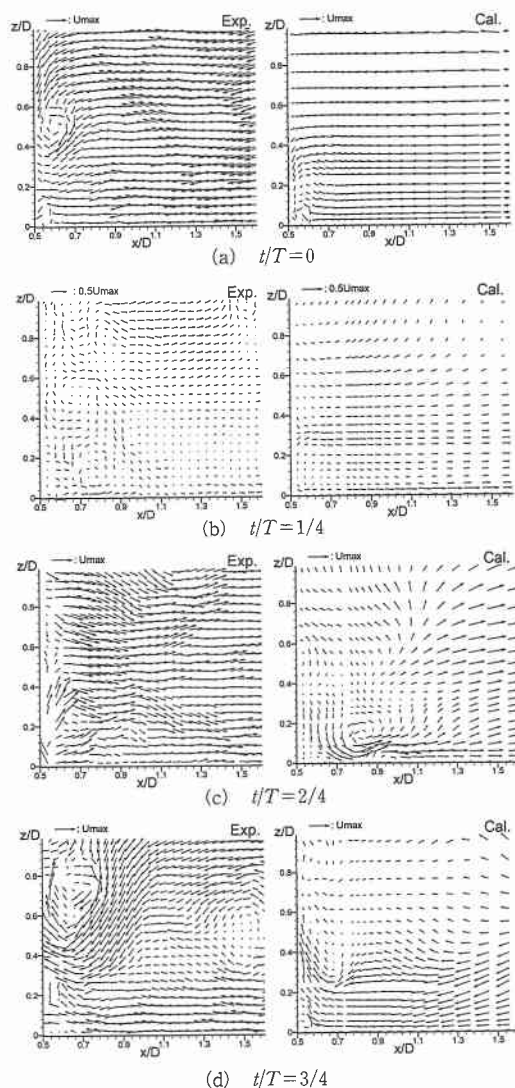
図—6 進行波の下での $z=2\text{ mm}$ 平面の最大流速の分布 ((a): P-1, (b): P-2, (c): P-4)

となり、空間的な最大流速は円柱側面 ($x/D=0$) で発生する。一方、 $KC=5.0$ では円柱下方 ($y<0$) の渦運動が発達するため、 y 軸方向の対称性が崩れる。さらに、 $KC=9.8$ では冲向き方向に形成される渦列の下で流速が最大となり、 x 軸方向にも非対称な分布となる。ただし、この渦列の形成される方向は一定せず、渦の干渉過程に依存して不安定である。また、これらの最大流速は $U_{\max}$ となる位相の直後に発生し、 $KC=2.5, 5.0$ では円柱側面での流れの収縮、 $KC=9.8$ では渦対の間で誘発される強い流れによる。

4.3 鉛直対称面内の速度場

図—7 は、重複波の場合の円柱沖側の鉛直対称面 ($y=0$ 平面) での流速分布の時間変化を示す。左側には PIV 計測、右側には実験条件とほぼ同じ $KC=10$, $Re=7750$ の正弦振動流場の数値解析より得られた結果を示す。なお、横軸 $x/D=0.5$ が円柱表面である。

岸向き流速が最大の時 (a)、円柱表面に沿って下降流が発生するとともに、底面近傍には馬蹄形渦が形成される。下降流および馬蹄形渦が見られる円柱付近以外の領域では、円柱に向かうような流速分布を示し、計測範囲内での水面変動の影響は比較的小さいと考えられる。したがって、重複波の実験結果と自由表面の影響を無視した振動流場の数値解析の結果は良好に一致する。 KC 数が約 5 の場合は Kobayashi (1992) らの実験結果と同様に馬蹄形渦は確認されなかった。そこで、馬蹄形渦の存在する条件を KC 数によって決める場合、その限界 KC 数は 5~10 の間に存在すると予想される。これは Sumer ら (1997) の馬蹄形渦の存在範囲である $KC>6$ と整合する。流れの向きが反転する波谷位相の時 (b)、全体的に流速は小さいが、冲向きの流れが支配的となる。特に、底面に沿って比較強い冲向き流れが発生する。これは円柱設置前の実験で計測された底面境界層内の流速変動や底面近傍の水平断面内での渦運動に見られる位相がずれる現象と密接に関連する。冲向き流速最大の時 (c)、鉛直方向の流れが複雑に混合し乱れた流れが生じる。さら



図—7 円柱前面の鉛直対称面の流速分布 (S-4)

に、(d) では、拡大した後流渦内の戻り流れが、円柱前面に沿って水平方向の軸を持つ渦を複数形成するのが分

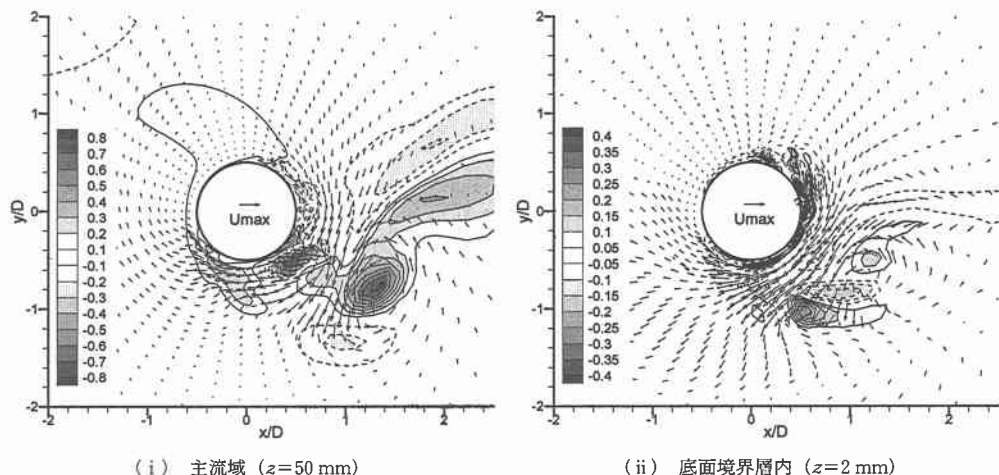


図-8 振動流の下での水平面内の流速分布 ($KC=10$, $Re=7750$, $t/T=3/4$)

かる。このような渦の存在によって、円柱表面近傍および後流渦内部において鉛直方向の流れが誘発される。

図-8は、 $KC=10$ の場合の $z=50$ mm および 2 mm での円柱周辺の流速分布の計算結果を示すものである。図は速度ベクトルと共に鉛直方向の流速成分を等高線で示し、実線は上昇流、点線は下降流である。両断面の水平方向の流速分布は類似するが、円柱近傍と渦の周辺で生じている鉛直方向の流れは大きく異なる。それぞれの平面での最大鉛直方向流速は、 $z=2$ mm 平面では上昇流が最大流速 U_{max} の約 0.4 倍に、 $z=50$ mm では下降流が約 0.8 倍に達し、非常に激しい鉛直方向の流れが発生することが分かる。また、先の半周期に形成された円柱斜め右下方向の大きな渦の内部では上昇流と下降流が混在し、3次元的で複雑な後流渦の構造を示す。これらの流れは後流渦の生成、放出に従って移動し、渦の内部では常に激しい鉛直方向の流れが存在することが分かった。

5. 結 論

PIV を用いた速度場の計測および Navier-Stokes 方程式の解析モデルを用いた数値解析を行い、波動場および振動流場に設置された直立円柱周辺の流体場に関して、水理実験と数値解析を併用して底面近傍での渦構造を検討した。水平断面および鉛直対称断面における速度場の解析を行い、次のような結果を得た。

(1) 進行波と重複波との流れ場の相違にかかわらず、円柱直径だけ底面から離れた水平断面での渦の形成・放出過程はほぼ一致し、その KC 数の変化による渦放出パターンの遷移は従来の振動流場の実験結果とも良く整合する。また、底面近傍の断面において後流渦周辺での流速が増加する現象、渦の形成過程の相違および最大流速分布の KC 数による変化等の底面近傍の流体場の特

性を捉えることができた。

(2) 可視化実験と数値解析結果との比較に基づいて鉛直対称面の流況の時間変化を検討するとともに、波動場における馬蹄形渦の存在や渦周辺の瞬間的速度場を捉えることに成功した。また、振動流場の数値解析モデルによる波動場中の渦の生成、移動過程に関する再現性は良好であり、底面付近の3次元的な渦の内部構造を正確に把握することができた。

謝辞：PIV システムの制御にあたり金沢大学工学部斎藤武久助手より多大な助言を頂いた。また、水理実験の遂行にあたり当時工学部学生の駒井広之、西堀祥史の両氏、現在大学院生の高浜雄作氏の助力を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 石田 啓・由比政年・榎田真也 (1998): 局所洗掘を伴う直立円柱周辺の3次元流体場の数値解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 731-735.
- Kobayashi, T. (1992): Three-dimensional analysis of flow around a vertical cylinder on scoured bed, Proc. 23th Coastal Eng. Conf., pp. 3482-3495.
- Sumer, B. M., N. Christiansen and J. Fredsoe (1997): The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves, J. Fluid Mech., Vol. 332, pp. 41-70.
- Seal, C. V., C. R. Smith, O. Akin and D. Rockwell (1995): Quantitative characteristics of a laminar, unsteady neck-lace vortex system at a rectangular block-flat plate junction, J. Fluid Mech., Vol. 286, pp. 117-135.
- Williamson, C. H. K. (1985): Sinusoidal flow relative to circular cylinders, J. Fluid Mech., Vol. 155, pp. 141-174.
- Yuhi, M., H. Ishida and S. Umeda (2000): A numerical study of sinusoidal oscillatory flows around a vertical wall-mounted circular cylinder, CEJ, Vol. 41, pp. 225-246.