

正弦振動流中に設置された直立円柱周辺の 3次元流体場の数値解析

石田 啓*・由比政年**・榎田真也***・平川真史****

1. 序 論

海岸や河川構造物の部材として小口径の柱体を用いることが多いが、柱体周辺の局所洗掘機構は、底面近傍に形成される馬蹄形渦および後流渦に強く影響される(例えば, Niedoroda・Dalton, 1982)。こうした底面近傍の流体場の内部構造に関して、一様流場については数多くの研究が報告され、馬蹄形渦と後流渦が共に局所洗掘の支配的な要因となることが明らかにされている。一方、波動場や振動流場を対象とする研究例は少なく、特に、馬蹄形渦が局所洗掘に及ぼす影響については未解明な点が多数残されている。

Kobayashi (1992) は、レーザー・ドップラー流速計を用いて波動場中の円柱周辺の流速を計測しているが、その対象は低 KC 数領域に限定され、馬蹄形渦の存在は確認されていない。これに対し、Sumer ら (1997) は、広範な KC 数領域を対象に、馬蹄形渦の形成に関する体系的な実験的検討を行い、KC 数が 6 以上の領域で馬蹄形渦を可視化するとともに、局所洗掘との関連を検討した。しかし、馬蹄形渦の詳細な構造やその速度場や渦度場等の定量的評価には至っていない。一方、後流渦に関しては、底面の影響が小さく流体場が平面 2 次元的となる場合を対象に、多くの知見が蓄積されているが、局所洗掘のメカニズムを考究する上で重要となる底面近傍の後流渦の内部構造に関する研究は非常に少ない。

著者らは、3次元一般曲線座標系 Navier-Stokes 方程式の解析モデルを開発し、一様流中に設置された直立円柱周辺の 3次元流体場に対して詳細な数値解析を実施してきた(石田ら, 1998)。本研究では、このモデルを拡張し、底面近傍の複雑な 3次元渦構造の変形過程を解明することを目的として、正弦振動流中に設置された直立円柱周辺の流体場の解析に適用する。以下、馬蹄形渦の生成過程や底面近傍における後流渦の内部構造を詳細に解析するとともに、KC 数に対する底面せん断力の変化について定量的な検討を行う。

2. 解析の手法

解析に用いた基礎方程式は、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である。この基礎方程式系に対して、MAC 法により、圧力に関する Poisson 方程式を導き、運動方程式と組み合わせて解くが、解析手法の詳細に関しては前報(石田ら, 1998)を参照されたい。ここでは、まず本解析モデルの有効性に関する検証計算の結果について説明する。

底面上に設置された直立円柱周辺の正弦振動流場を解析するには、底面上に発達する振動境界層および円柱表面での渦の生成・放出過程を精度良く捉えることが基本となる。これに関し、著者ら(由比ら, 1998)は、振動流中の円柱周辺の 2次元流体場の解析を行い、流況や流体力の時間変化を精度良く捉えることに成功している。そこで、本論では、平板に沿う振動境界層(Stokes 層)の発達過程を対象とした計算結果の一例を示す。

図-1は、平板上の正弦振動流の境界層内の流速分布を示すものである。曲線は理論解を、記号は計算結果を示し、1周期分を 45°刻みで表示している。境界層内の流体は主流と同じ周期で振動するが、平板に近づくにつれて位相が進み、振幅は指数関数的に減少する。各位相において、計算結果は理論解と非常に良く一致し、本解析モデルは振動境界層を正確に解析できるものであることが分かる。

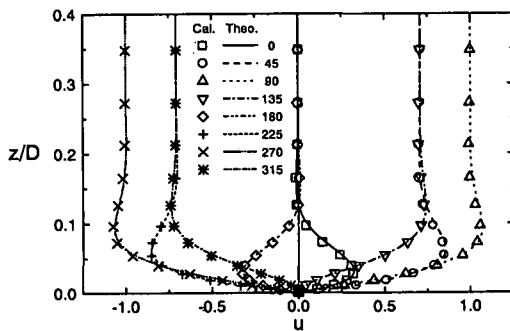


図-1 底面付近の流速の時間変化

* 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 金沢大学講師 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
**** 工修 姫路市

3. 解析結果および考察

3.1 解析条件の設定

一般に、円柱周辺の正弦振動流場の流況は、 KC 数および Reynolds 数により特徴づけられる。ここでは、流れ場に対して、より支配的なパラメータとなる KC 数に着目し、 KC 数を 20 以下の範囲で変化させ、Reynolds 数を 2000 に固定して解析を行った。なお、流れ場の代表長さとして円柱の直径 D を、代表速度として最大振動流速をそれぞれ用いている。また (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 軸として、 x 軸方向に振動流を発生させる。解析に用いた格子は円柱表面に沿う円筒型の格子である。計算領域は、半径方向に約 $60D$ 、円柱の軸方向に約 $2D$ とした。

初期条件として静止流体場を考え、無次元時間 $\tau=0$ から正弦的な振動流場を時間発展させて、3 周期分の計算を行った。一方、境界条件は、まず、計算領域の外縁は円柱から十分遠方にあるとして、外部境界では底面上の一樣な正弦振動流場の流速(図-1)および圧力を与えた。一方、円柱表面および底面では、速度は滑りなしの条件を与え、圧力は外挿により決定した。また、自由表面の影響が小さい底面付近の流れ場を想定し、解析領域上端の境界では対称条件を用いた。以下では、解析領域を $y \leq 0$ に限定して x 軸対称の条件で計算した結果について主に検討し、特に流れの非対称性が重要となる場合は、 $y \geq 0$ の領域をも考慮した計算結果を用いて考察する。

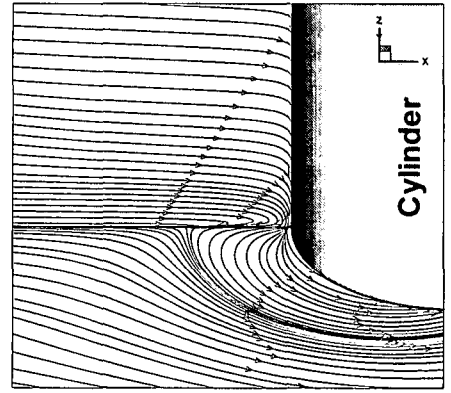


図-2 最大流速時の底面近傍の流線

3.2 解析結果

主流速度が右向きに最大になる位相での、鉛直対称面および底面付近の水平面 ($z/D=0.002$) 上の流線の一例 ($KC=10$) を図-2 に示す。対称面において、円柱前面には下降流が、底面近傍では戻り流れが発生している。一方、水平面では、円柱表面から約 $0.3D$ 離れた所で流線が集中していることが分かるが、この位置で、主流域下の底面境界層内の流れがよどみ点から上流に向かう流れと衝突し、境界層が 3 次元的 (U 字形) に剝離する。こうした渦構造は、一般に一樣流場で確認される馬蹄形渦と同じ特徴を有し、振動流場においても馬蹄形渦が存在することを示している。以下では、 KC 数に対する馬蹄形渦

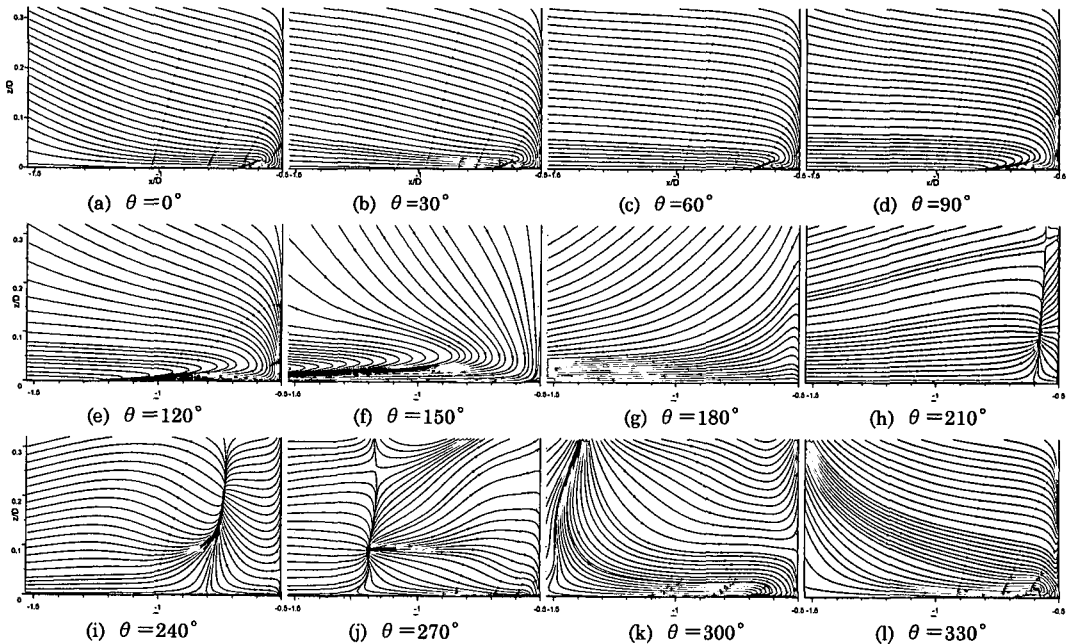


図-3 鉛直対称面の流線の時間変化 ($KC=10$)

および後流渦の生成・放出過程の変化を鉛直対称面および水平面の流況に基づいて検討する。

a) 鉛直対称面の流況の時間変化

図-3は、 $KC=10$ の場合に対して、鉛直対称面での流線の時間変化を示したものである。図中の $\theta=90^\circ$ が図-2と同位相を示し、1周期分を 30° 刻みで表示している。各図の右端に円柱表面が、下端に底面がそれぞれ位置し、 x 軸方向に約 $1D$ 、 z 軸方向に約 $0.3D$ の領域に対して、瞬間の流線を提示している。

主流反転時(a)には、先の半周期に形成された後流渦による右向きの流れが、円柱表面に沿って底面近傍まで下降している。この時、戻り流れが見られる底面近傍で右回りの強い渦度が集中するが、主流の加速に従って、渦度の最大値は減少する(b)。その後、主流により、上流から同じ向きの渦度が円柱近傍に供給され、底面近傍の戻り流れの範囲は拡大する(b~d)。主流の減速段階(e~g)では、底面境界層内の流れが主流と逆向きになるとともに、下向きの圧力勾配により下降流が支配的となる。主流の反転後(g~i)、図示部分は後流域に入り、流れが乱れていく様子が観察される。(h)では $x/D=-0.6$ 付近を始点として左右に流線が分岐している。この位置は後流渦の先端位置に対応し、主流の加速とともに渦領域が拡大する様子が分かる(h~k)。後流渦が発達す

る間、渦の内側では円柱に向かう流れが発達するとともに、底面近傍で戻り流れが発生し、さらに(1)では渦が形成される。横木ら(1989)は、円柱からの剝離渦による流れが主流反転後の馬蹄形渦の生成に大きく寄与すると指摘しており、計算結果は彼らの実験観測と整合する。

b) KC 数による x 軸上せん断力と剝離点の変化

図-4は、 $KC=10$ の場合の、 x 軸上の底面せん断力の時間変化を示したものである。 $x/D=-2.0$ 付近では、ほぼ正弦的な時間変動を、よどみ点付近では、時・空間的に複雑な変動を示す。まず、後流渦によりせん断力が正となる領域が、 $\theta=190^\circ$ 以後、 $x/D>-1.5$ の範囲で拡大し、次いで、 $\theta=285^\circ$ から、よどみ点近傍の戻り流れの発生に従い負のせん断力が急増する。主流反転後、戻り流れの範囲は拡大し始めるが、その底面せん断力は減少する。

図-5は、 $\theta=90^\circ$ における x 軸上のせん断力を、各 KC 数の主流最大せん断力で基準化した値を示すものである。対称面の戻り流れが発生している領域で、せん断力は負となり、その大きさや範囲は KC 数とともに増加する。しかし、半周期毎に馬蹄形渦の生成・消滅過程が繰り返されるため、馬蹄形渦下のせん断力は小さく、 $KC=13$ 以下では主流の値以下である。

図-6は、 x 軸上のせん断力がゼロとなる位置を底面

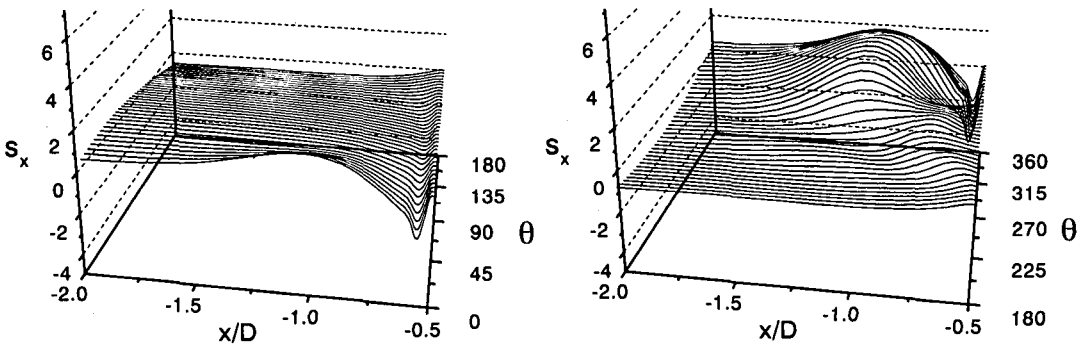


図-4 x 軸上のせん断力の時間変化 ($KC=10$)

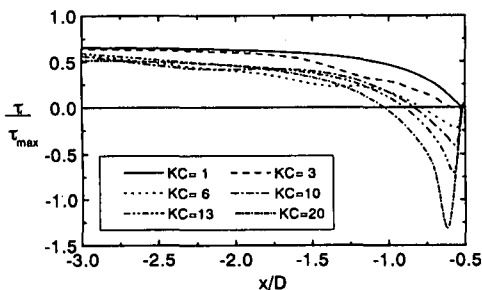


図-5 KC 数に対する x 軸上のせん断力の変化

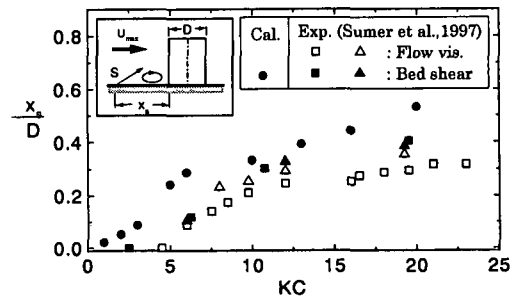


図-6 KC 数に対する剝離点位置の変化

境界層の剝離点と判断し, Sumer ら (1997) の波動場における実験結果と比較したものである。図中の●は計算値を示し, □と△は可視化により, ■と▲はせん断力の測定により判断された実験値を示す。

計算から求めた馬蹄形渦の存在範囲は, 実験結果より若干大きな値を示すものの, KC 数とともに増加する特徴を良く捉えている。実験では, $KC=6$ 以上で境界層の剝離や馬蹄形渦の存在が確認されているが, 計算では, $KC=1$ 以上の範囲で剝離点が存在する。ただし, $KC=3$ 以下の戻り流れは非常に弱く, せん断力はゼロに近い値を示す。 $KC=6$ 付近での剝離点距離の急激な増加は, 馬蹄形渦の構造が拡大することを意味する。さらに KC 数が増加するにつれて, 馬蹄形渦下では, 主流の最大せん断力以上のせん断力が発生し, 底面侵食に直接影響を及ぼす強い馬蹄形渦が形成される。なお, 実験結果と計算結果との相違は, 流れ場の条件, 実験測定の制約および自由表面の効果等によると考えられる。

c) 水平面の流況および底面せん断力の変化

図-7 および図-8 は, $\theta=90^\circ$ における $z=2D$ および z

$=0.1D$ の平面での渦度を, $KC=3, 6, 10$ の場合に対して示したものである。実線は左回り, 破線は右回りの渦度を示す。また, 図-9 に, 対応する位相での底面せん断力の分布を示す。なお, ここでは, 先の対称面の考察とは異なり, 非対称な条件下の計算結果を用いている。

図-7 および図-8 の (a) $KC=3.0$ の場合, 円柱右側に付着した渦が x 軸対称に形成される。 $z=2D$ 平面では, 振動方向に渦度が広範囲に分布するが, 底面境界層内の $z=0.1D$ 平面では, 円柱表面のせん断層の発達が十分でなく, 渦度は円柱近傍の限られた範囲に分布する。

(b) $KC=6$ の場合, 渦構造の x 軸対称性が崩れ, 円柱から渦の放出が始まる。底面境界層の外部では, 円柱周辺の流体運動は z 軸方向にほぼ一様な水平 2 次元の様相を呈する。一方, 底面近傍の流れ場は, 渦放出が抑制されて x 軸対称に近い形となり, 図-9(b) に示されるように, 底面せん断力もほぼ x 軸対称に分布する。

(c) $KC=10$ の場合, 流れの非対称性が顕著となり, 底面近傍においても渦は円柱表面から放出される。1 周期間に 1 つの渦対が放出され, 振動方向に対して直角方向

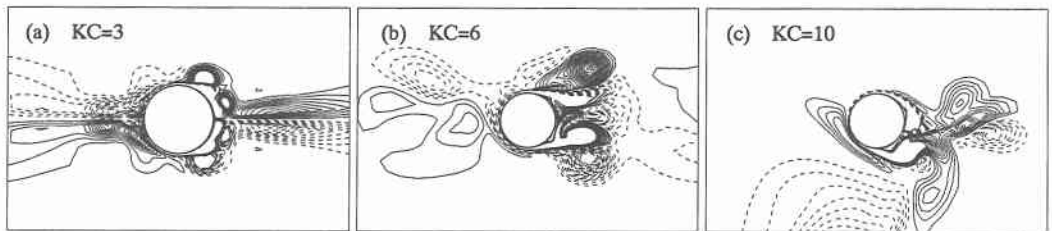


図-7 $z=2D$ 平面の渦度の変化 ($\theta=90^\circ$)

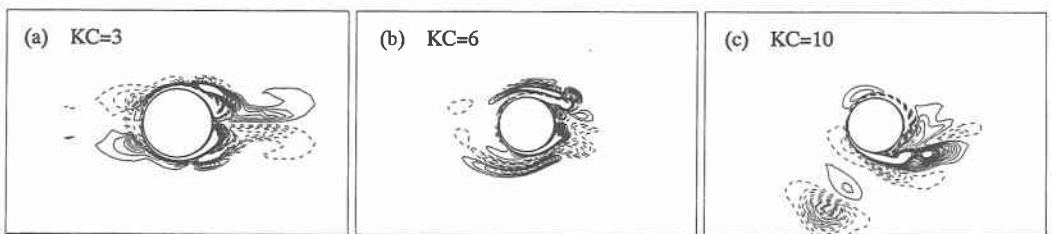


図-8 $z=0.1D$ 平面の渦度の変化 ($\theta=90^\circ$)

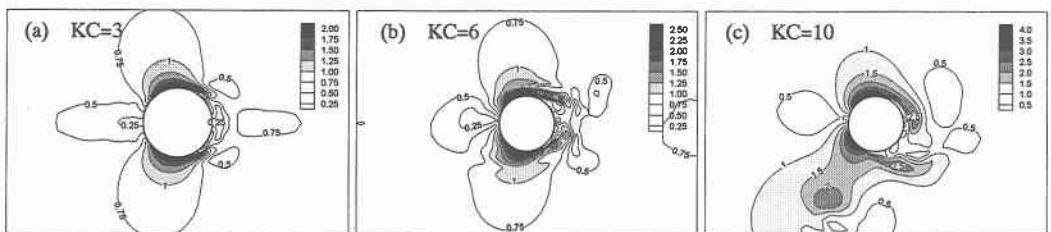


図-9 KC 数に対する底面せん断力の変化 ($\theta=90^\circ$)

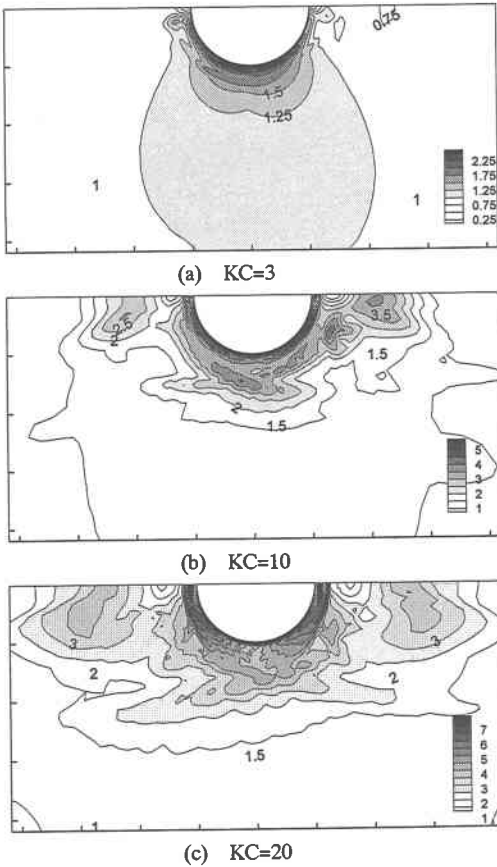


図-10 KC数に対する最大せん断力の変化

に渦列（トランスバースストリート）が形成される。今回の解析条件の範囲 ($KC \leq 20$) では、底面境界層外部での流れパターンの特徴や KC 数の増加によるパターンの遷移は Williamson (1985) の実験結果と全体に良く一致する。

図-10に、 $KC=3, 10$ および 20 の場合の、1周期間の最大せん断力を主流下の最大値で基準化したものを示す。 KC 数の変化によらず、底面せん断力はほぼ左右対称な分布を示し、図-6に示す x 軸上の左右の剥離点付近の値は、共に1以下となる。一方、最大値は KC 数とともに増加する。最大値の発生する位相は、 $KC=3$ では主流速度が最大となる直前、 $KC=10$ 以上では主流反転前後である。これより、低 KC 数では円柱による流れの収縮が、高 KC 数では後流渦が最大せん断力の原因と考えられる。

$KC=3$ では、最大せん断力は円柱の下側に位置するが、 KC 数が増加するにつれて、極大点は左右2点に分離し、円柱表面に沿って左右のよどみ点方向にそれぞれ移動する。この傾向は、Sumerら (1997) の実験結果と良く整合しており、 KC 数に対する底面せん断力の変化の

特性が、解析によりの確に捉えられていることが分かる。

4. 結 論

3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を一般曲線座標系に変換した解析モデルを用いて、正弦振動流中の直立円柱周辺の底面近傍の流れおよび底面せん断力を解析した。今回の解析条件下で得られた主要な結果は、次のようにまとめられる。

(1) 底面近傍における鉛直対称面の流体運動を可視化し、馬蹄形渦の生成・消滅過程を詳細に捉えることに成功した。渦の干渉過程は従来の実験結果と良く一致した。

(2) 最大流速時における底面境界層の剥離点位置に基づき、馬蹄形渦の存在する KC 数の範囲について検討した。 $KC=1$ でも非常に弱い馬蹄形渦が存在するが、その構造が明確になるのは $KC=6$ 付近であり、これは波動場の実験結果と一致した。

(3) KC 数に対する円柱からの渦放出パターンの変化は、2次元振動流場の実験結果と全体的に良く一致する。ただし、底面近傍では比較的高い KC 数まで流れ場の対称性が維持されるという傾向が見られた。

(4) x 軸対称を仮定した流れ条件下での解析結果に基づき、1周期間の最大せん断力を計算した。 KC 数に対する最大値やその発生位置の変化は従来の実験結果と良く一致した。

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.
- 由比政年・石田 啓・榎田真也 (1998): 正弦振動流中に設置された円柱に作用する流体力特性の数値解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 736-740.
- 横木裕宗・小林智尚・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 直立円柱のおかれた波動場底面上の渦運動, 土木学会第44回年次学術講演会概要集, 第2部, pp. 632-633.
- Kobayashi, T. (1992): Three-dimensional analysis of flow around a vertical cylinder on scoured bed, Proc. 23th Coastal Eng. Conf., pp. 3482-3495.
- Niederoda, A. W. and C. Dalton (1982): A review of the fluid mechanics of ocean scour, Ocean Eng., Vol. 9, No. 2, pp. 159-170.
- 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.
- 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 (1999): A numerical study of three-dimensional flow fields around a vertical cylinder mounted on a bed, Proc. Int. Conf. on Coastal Structures, submitted.