

共存流による直立円柱底面付近の 3 次元流体場の変動特性

楳田 真也*・由比政年**・石田 啓***

振動流と定常流の共存場における直立円柱底面付近の 3 次元流体場に対して、一般曲線座標系 Navier-Stokes 方程式を用いた数値解析を行った。定常流速や KC 数の変化によって生じる渦流れパターンの変化を系統的に解析し、共存流が馬蹄形渦および後流渦の内部構造に及ぼす影響、渦構造と底面せん断力分布との関連性およびせん断力の増幅率の変動特性について検討した。相対速度や KC 数の増加につれて馬蹄形渦は拡大し、その渦径は 1 つの無次元パラメータで良く整理できることを見出した。相対速度の増加に従って底面せん断力分布は一樣流場の分布に似通ってくることで、共存流の影響は低 KC 数領域でより顕著に現れることが分かった。

1. 序 論

海岸・海洋構造物周辺で発生する局所洗掘を正確に予測し、適切な設計を行うには、(1)構造物周辺の流体運動、(2)漂砂や流砂の輸送、(3)海底地形の変動、および各要素間の相互作用を総合的に評価する必要がある。従来、(3)に関して洗掘地形や洗掘深などの現象論的な知見が豊富に蓄積されてきた (例えば Sumer et al., 2001)。さらに、(2)の底質移動を予測するには、時空間的に複雑に変化する (1)の渦流れの挙動を把握すること、および洗掘地形に関する従来の知見を利用して (3)と (1)との相互作用を把握することが重要な課題である。こうした観点から、著者らは、一般曲線座標系 Navier-Stokes 方程式を用いた解析モデルを開発し、洗掘を伴う直立円柱周辺の 3 次元振動流場に対する数値解析を行った (楳田ら, 2001)。その結果、構造物底面付近に形成される馬蹄形渦や後流渦の内部構造を詳細に捉え、KC 数や洗掘深に対する渦構造と底面せん断力の変動特性を明らかにした。

一方、現実の海象条件を考慮した場合、波動成分と共に潮流や海浜流などの流れ成分が存在するため、両者の共存場における流況特性を正確に把握することが必要である。このような波・流れ共存場における構造物底面付近の 3 次元的な渦構造特性に関する研究例はきわめて少なく、相対的に小さな流れが共存する場合を対象とした Sumer ら (1997) の実験的研究が存在するのみである。

そこで、本研究では、著者らが開発・検証してきた解析モデルを共存場へ応用し、直立円柱底面付近の 3 次元流体場に関する詳細な数値解析を行う。以下では、洗掘現象を支配する馬蹄形渦や後流渦などの大規模な渦の挙動および底面せん断力に注目し、共存流が馬蹄形渦や後流渦の内部構造に及ぼす影響、渦構造と底面せん断力分布との関連性、KC 数および共存流速に対する底面せん断力の増幅率の変動特性に関して検討を行う。

2. 解析方法および条件

平坦な底面上に固定された直立円柱に対して定常流と振動流が平行に作用する場合の共存場を解析した。解析モデルは振動流場を対象とした Yuhi ら (1999) と同様である。共存場の外部境界条件の設定を容易にするために、移動座標を考慮した一般曲線座標系表示の 3 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いた。本解析では、静止流体中で円柱と底面を移動させ、共存場を再現した。

共存場における流況は振動流に関する支配パラメータの KC 数および Stokes 数 β に、定常流の相対的な強度を表す相対速度 V_r を加えた、次の 3 つの無次元パラメータにより特徴づけられる (Sarpkaya・Storm, 1985)。

$$KC = \frac{U_m T'}{D}, \quad \beta = \frac{D^2}{\nu T'}, \quad V_r = \frac{U_c}{U_m} \dots\dots\dots (1)$$

ここで D は円柱直径、 T' は振動周期、 ν は動粘性係数、 U_c は定常流速、 U_m は最大振動流速を表す。なお、プライムを付した変数は有次元量である。相対速度 $V_r=0$ の場合は振動流単独の場合に対応する。KC 数を 2.5~20、 V_r を 0~1.5 の範囲で系統的に変化させ、Stokes 数は 775 に固定した。なお、以下では、座標値は円柱直径で、流速は最大振動流速で基準化した値を用いる。

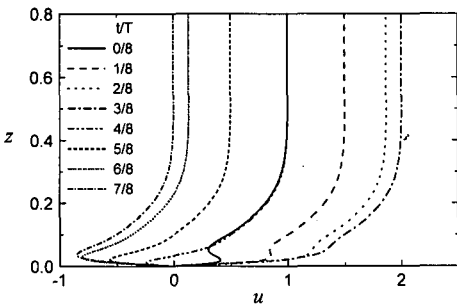
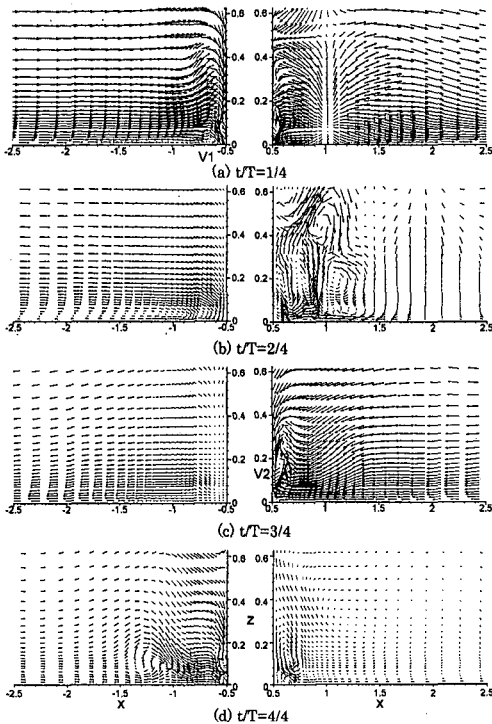
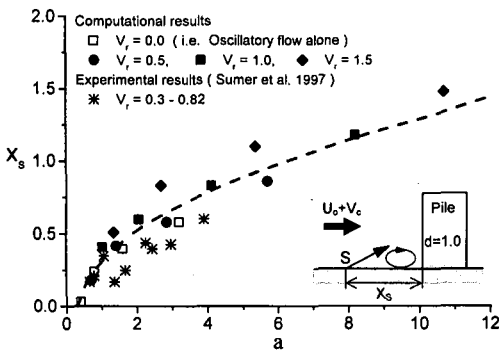
3. 解析結果および考察

3.1 共存場における底面付近の流速特性

図-1 は、相対速度 $V_r=1.0$ の場合の底面付近の流速分布の時間変化を 1/8 周期刻みで表示したものである。前半周期 ($t/T=0\sim 4/8$) は、定常流と振動流が同方向で、主流速は大きく、後半周期は、両者が逆向きとなるので主流は減速する。振動流単独の流速分布 (石田ら, 1999) と比べて、底面境界層内外で速度変動に位相差が生じる点は同じであるが、共存場の場合、流速分布は極値を 2 つ持ったためより複雑である。定常流が共存するので、境界層の外側で流速は常に正值をとるが、底面境界層の内側では共存流に関わらず負の流速が発生する。

図-2 は KC=10 で定常流速が相対的に小さい $V_r=$

* 正会員 工博 金沢大学助手 工学部 土木建設工学科
** 正会員 工博 金沢大学大学院助教授 自然科学研究科
*** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部 土木建設工学科

図-1 共存場における底面付近の流速分布 ($V_r=1.0$)図-2 鉛直対称面の流速分布の時間変化 ($KC=10$, $V_r=0.5$)図-3 KC 数, V_r に対する馬蹄形渦の渦径の変化

0.5 の場合の鉛直対称面における流速分布の時間変化を示す。円柱前面 ($x \leq -0.5$) と後面 ($x \geq 0.5$) での速度ベクトルを同段の左右に表示した。主流が最大流速となる (a) $t/T=1/4$ の時、接近流は円柱前面で下降流となり、底面近傍に時計回りの渦 V_1 を形成する。この渦が馬蹄形渦である。振動流単独の場合も高 KC 数域では同様に馬蹄形渦が形成される (石田ら 1999)。ただし、共存流は下降流速を加速し、渦径を増大させる効果がある。一方、円柱下流域では後流渦が形成され、同図の $x=1.0$ 付近に後流渦の下流端が存在するため、その境界の両側で流れの方向が左右に分かれる。後流渦の周りおよび円柱近傍の流れは非常に複雑で、上昇・下降流が混在し、(c) $t/T=3/4$ で渦 V_2 が後流域で生じる。この渦は次の半周期も円柱近傍に残存する。(b) $t/T=2/4$ では、振動流速がゼロで、定常流は右向きに作用する。図-1 の主流下の流速変動を反映し、底面近傍の流れは左向き、その上方では右向きの流れが生じる。このような流れによって渦 V_1 はせん断されて、渦は底面に沿って細長く変形する。その後、この渦は (c) $t/T=3/4$ となると消滅する。一方、円柱背後の領域では、馬蹄形渦は生成されない。これは、共存流により主流が減速することと、図-1 に示すように後半周期では底面境界層内の流速の絶対値が外部流速より大きく、その流速差に起因する上向きの圧力勾配が円柱近傍に生じるため、下降流が十分発達しないことが原因と考えられる。

3.2 共存流に対する渦構造の変化

図-3 は最大流速時 ($t/T=1/4$) の馬蹄形渦の大きさを、渦上流に発生する底面境界層の剝離点 S と円柱との距離 X_s を用いて示したものである。横軸には、 KC 数や V_r に代わり、主流域における流体粒子の移動距離と円柱直径との比で定義した新たな無次元パラメータ a を用いた。 a と KC , V_r との関係は次式で与えられる。

$$a = \frac{1}{D} \int_0^{T^*} U_c + U_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = KC \frac{2 + \pi V_r}{4\pi} \dots (2)$$

式 (2) は相対速度を $V_r=0$ とすることで、振動流単独の場合にも対応するので、同図には Sumer ら (1997) の実験結果も表示した。計算結果は実験結果と良く一致し、馬蹄形渦の渦径が a で良く整理できることが分かる。なお、式 (2) の関係から、渦径は KC 数および V_r に比例する。図-3 の破線は、静止流体中で一方向へ急進する円柱周辺の流況解析から得られた付着点距離を表す (椋田, 2002)。この時、(2) 式の a は円柱の無次元移動距離で定義する。 KC 数や V_r の相違に関わらず共存場の解析結果は一方向流の結果と良く一致する。流れ場の相違に関わらず、馬蹄形渦の大きさは (2) 式の無次元距離 a の関数で表現できる。

次に、底面付近の組織的な渦構造 (coherent structure)

を抽出し、馬蹄形渦や後流渦の3次元構造について検討する。渦構造の抽出には、Jeong・Hussan (1995) により提案された vortex core を用いる。この渦特定方法は相対的な渦度の大きさに関わらず渦管を抽出するため、馬蹄形渦を明確に捉えることができる(楳田ら, 2001)。

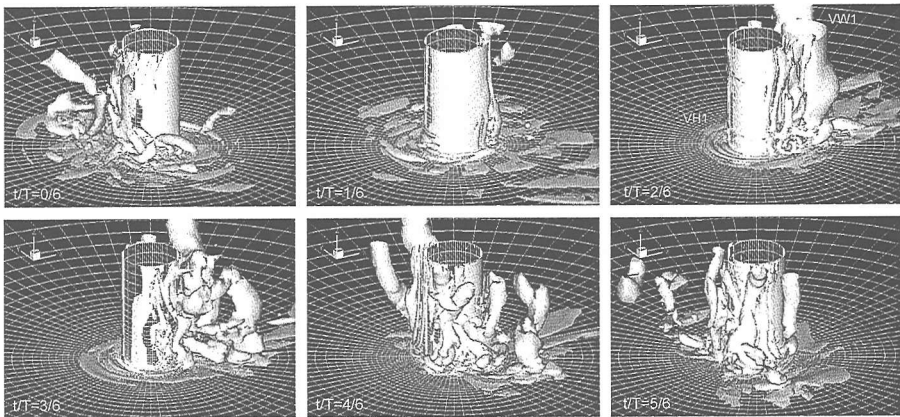
図-4 は、 $KC=10$ で $V_r=0.5$ および $V_r=1.5$ の場合の円柱周辺の vortex core の時間変化を示す。円柱上流域の底面付近に分布する U 字形の渦管 (VH1, VH2) が馬蹄形渦、円柱下流域の円柱スパン方向に発達した大きな渦管 (VW1, VW2) が後流渦の形状を明確に捉えている。振動流成分が卓越する $V_r=0.5$ の場合、主流の反転に応じて後流渦が円柱前後で生成される。一方、共存流が卓越すると、後流渦は円柱下流域でのみ生じる。後流渦の発生、成長過程は主流速度に依存する。後流渦は定常流と振動流が同方向の位相で大きく成長、放出されるが、逆方向の位相では渦形成が抑制される。円柱表面に付着した成長途中の渦 VC1 および放出渦 VC2 はスパン方向に一樣な2次元形状を呈する。その渦は流下す

るに従って、3次元構造へと変化する。 $V_r=1.5$ の場合、円柱上流域に後流渦が存在しないので、比較的一様な流れを円柱が受けるため、後流渦は2次元である。一方、 $V_r=0.5$ の場合、先の半周期に形成された渦が円柱周りに残存し、主流が乱されるので、後流渦は生成段階から3次元的に複雑な構造をとる。

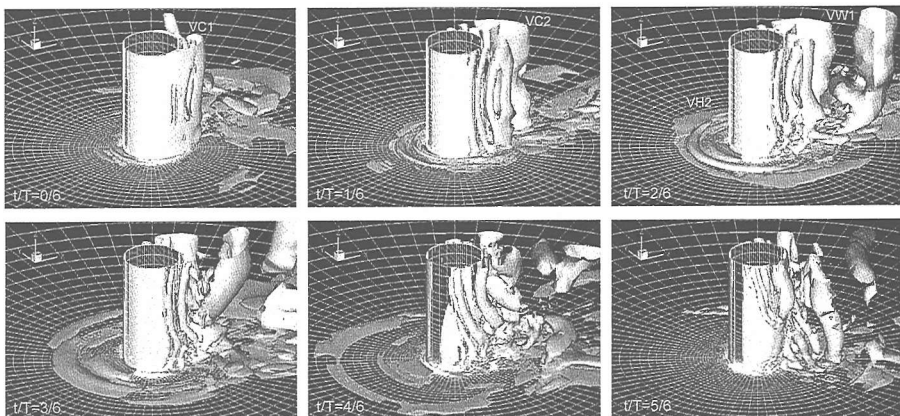
馬蹄形渦は常に円柱上流域に形成される。馬蹄形渦は相対速度に比例して拡大し、一樣流場における渦構造に類似する。ただし、前述した通り、底面付近では振動流場と同様に流れが反転するため、共存流が大ききとも馬蹄形渦は周期毎に発生、消滅する。 KC 数および相対速度が増加するに従って、馬蹄形渦の存在時間が長くなる。渦の存在時間は $KC=10$, $V_r=0.5$ で $t/T=1/6 \sim 3/4$, $V_r=1.5$ で $t/T=0 \sim 3/4$ である。この結果は Sumer ら (1997) の波・流れ共存場の実験結果と良好に一致する。

3.3 最大流速分布および底面せん断力特性

図-5 および図-6 は、図-4 の流況下における底面近傍の $z=0.04$ 平面における1周期間の最大流速分布を示



(a) $V_r=0.5$ の vortex core 分布



(b) $V_r=1.5$ の vortex core 分布

図-4 直立円柱周辺の渦構造の時間変化 ($KC=10$)

す。水平方向流速を図-5に、鉛直方向流速を図-6に表す。流速は最大振動流速 U_m で基準化した値である。相対速度が小さい場合、後流渦の発生地点および後流渦の放出方向にかけて、水平流速成分が増大する。相対速度が増加するに従って後流渦は強度を維持しながら流下するので、振動流速の3倍以上の水平流速が円柱側方から後流域にわたる広範囲に発生する。この流速分布は一様流場の解析結果と良く似ている。馬蹄形渦の存在は鉛直流

速分布に対して大きな影響を与える。特に、相対速度が増加すると、馬蹄形渦の形状に対応して、円柱前面の鉛直流速が増大する。また、円柱背後のよどみ点付近でも主流速度と同程度の鉛直流が発生する。前者の鉛直流は馬蹄形渦に伴う下降流、後者は後流渦内部で生じる戻り流れの上昇流による。

図-7には、底面せん断力の周期最大値の分布を示す。せん断力値は主流域下の底面せん断力値で基準化した増

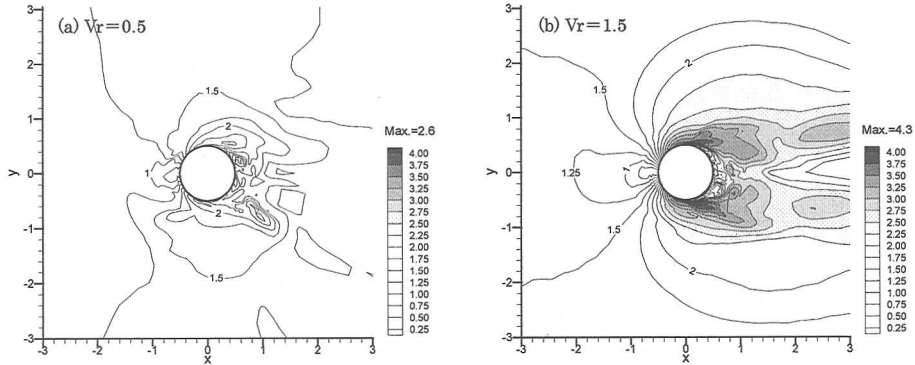


図-5 底面付近における水平方向流速の最大値 ($KC=10$, $V_r=0.5, 1.5$)

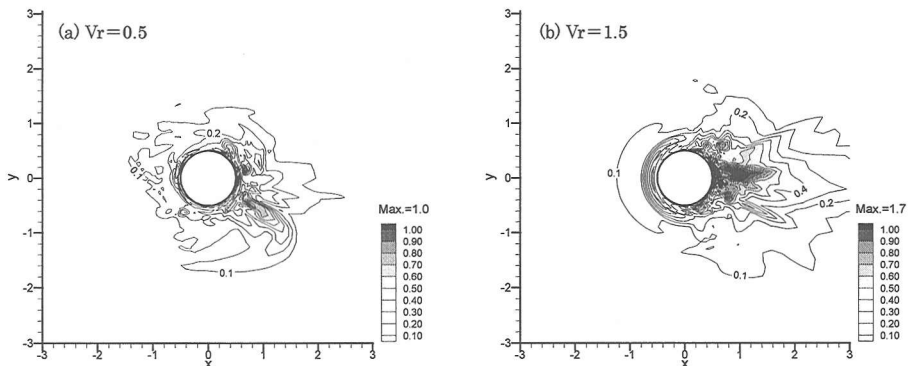


図-6 底面付近における鉛直方向流速の最大値 ($KC=10$, $V_r=0.5, 1.5$)

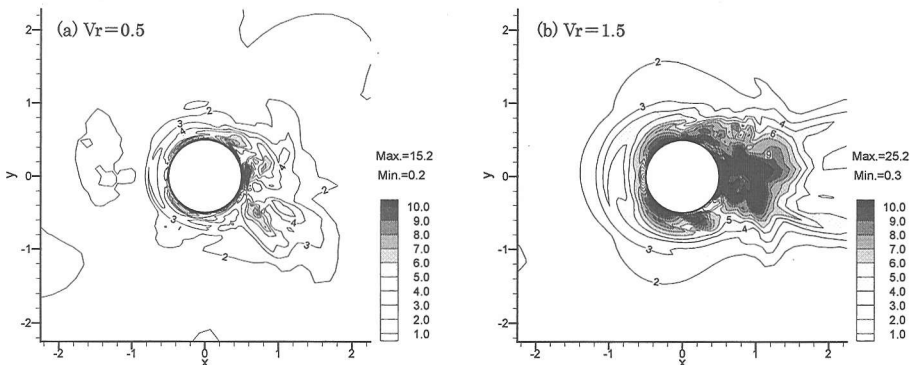


図-7 底面せん断力分布 ($KC=10$, $V_r=0.5, 1.5$)

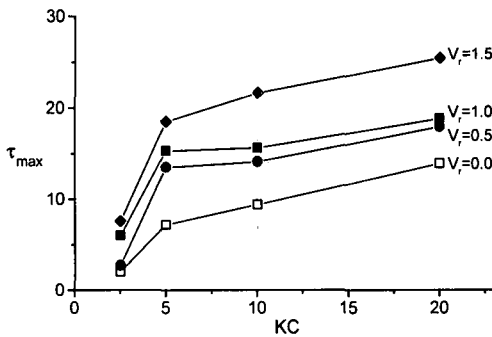


図-8 底面せん断力の最大増幅率と KC, V_r との関係

幅率を表す。振動流のみの場合、円柱近傍と放出渦下で比較的大きな底面せん断力が発生するのに対して、共存場の場合、相対速度 V_r の増加に従って、まず、後流渦の発達によって円柱下流域の底面せん断力が増大し、次に、縮流効果により円柱斜め側方での底面せん断力が増加し、さらに、馬蹄形渦下のせん断力が増加する。その結果、共存場の底面せん断力分布は KC 数, V_r の増加につれて一様流場のせん断力分布に似通ってくる。底面せん断力と底面近傍の最大流速分布を比較すると、後流域では鉛直方向流速成分の最大値と底面せん断力との相関が高く、上流域では水平方向流速成分の最大値との相関が高いことが分かる。鉛直方向流速が大きい場合、底面近傍での水平方向流速も同時に大きくなるため、底面上での速度勾配が増加し、大きな底面せん断応力が生じる。後流渦内部で生じる複雑な鉛直方向流れが底面せん断力の増加に大きく関与する。振動流のみの場合、後流渦および円柱側面の加速流れによって大きな底面せん断応力が引き起こされるが、共存場においては、両者の流れに加えて馬蹄形渦の運動が底面せん断応力の増加に大きな影響を及ぼす。

図-8 は、底面せん断力の増幅率の空間的な最大値と KC 数, 相対速度 V_r との関係を示すものである。KC 数や V_r の増加に対して、最大せん断力値は増加傾向を呈し、 $KC=2.5\sim5$ の範囲で増幅率が急激に増加する。 $KC\leq 5$ の低 KC 数域では底面せん断力の絶対値は小さいものの、振動流下の底面せん断力値に対する共存場の底面せん断力の増加割合が大きく、共存流の影響は低 KC 数領域でより顕著に現れることが分かる。

4. 結 論

Navier-Stokes 方程式を移動一般曲線座標系に変換した解析モデルを用いて、振動流と定常流との共存場における直立円柱底面付近の渦の 3 次元構造および底面せん

断力の特性について検討した。共存流速および KC 数の変化に対する解析結果から得られた主要な結論は、次のようにまとめられる。

(1) 相対速度が 1.0 を超えても、共存場における底面境界層付近では、流れは反転するため、馬蹄形渦は周期毎に生成、消滅すること、馬蹄形渦の存在時間は相対速度および KC 数に比例することが分かった。

(2) 馬蹄形渦の渦径を主流域での流体粒子の無次元移動距離を用いて良く整理できることを見出した。その渦径に関する解析結果は従来の実験結果と良好に一致し、さらに、流れ場の相違に関わらず、馬蹄形渦の渦径を評価できることを示した。

(3) 相対速度の増大による後流渦、縮流、馬蹄形渦の発達に従って、最大底面せん断力は、円柱下流域、円柱斜め側方、円柱上流域で増大する。その結果、共存場の底面せん断力は KC 数, 相対速度の増加につれて徐々に一様流場のせん断力分布に近づくことが分かった。

(4) KC 数や相対速度の増加に対して、底面せん断力の増幅率は増加傾向を示すこと、 $KC=2.5\sim5$ の範囲で底面せん断力が KC 数に対して急増し、低 KC 数領域において共存流による底面せん断力の増加割合が大きいことを明らかにした。

謝辞：小清水信生氏（富山県）および山岸重之氏（柿本商会）には、金沢大学在学中にデータ解析にあたり多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 石田 啓・由比政年・榎田真也・平川真史 (1999): 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, 海岸工学論文集, 46 巻, pp. 801-805.
- 榎田真也・由比政年・石田 啓 (2001): 局所洗掘による直立円柱周辺の 3 次元流体場の変動特性に関する数値解析, 海岸工学論文集, 48 巻, pp. 796-800.
- 榎田真也 (2002): 一様流と振動流および両者の共存場における直立円柱底面付近の流体運動に関する研究, 金沢大学大学院, 博士論文, p. 187.
- Jeong, J. and F. Hussain (1995): On the identification of a vortex, J. Fluid Mech., Vol. 285, pp. 69-94.
- Sarpkaya, T. and M. Storm (1985): In-line force on a cylinder translating in oscillatory flow, Applied Ocean Research, Vol. 7, No. 4, pp. 188-196.
- 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.
- Sumer, B. M., R. Whitehouse and A. Torum (2001): Scour around coastal structures: a summary of recent research, Coastal Engineering, Vol. 44, pp. 153-190.
- Yuhi, M., H. Ishida and S. Umeda (1999): A numerical study of sinusoidal oscillatory flows around a vertical wall-mounted cylinder, CEJ, Vol. 41, No. 3&4, pp. 225-246.