

没水した直立円柱周辺の 3 次元流体場の数値解析

榎田真也*・馬替敏治**・由比政年***・石田 啓****

振動流中および一様流中に没水した小口径の直立円柱周辺の 3 次元流体場に関する数値解析を行った。円柱高さの違いによる流況および底面せん断力の変化を系統的に解析し、渦流れ過程および底面せん断力の増幅特性に与える円柱の相対高さの影響について考察を行った。没水円柱周辺の流れは馬蹄形渦、後流渦および頂部剥離渦により特徴付けられ、各渦の大きさや強度の関係および底面せん断力分布は相対高さに強く依存する。馬蹄形渦はある相対高さ以下になると縮小し、その限界高さは主流域下の底面境界層が厚いほど高くなる傾向があること、底面せん断力の増幅範囲や最大値は相対高さとともに増加することなどが分かった。

1. 序 論

海岸・海洋構造物の基礎部周辺で生じる局所洗掘は、構造物の被災の主要な原因である。その洗掘機構は、流れ収縮、馬蹄形渦や後流渦などの渦の発生、波の反射・回折、碎波、地盤内の圧力変動などの現象に支配される (Sumer・Fredsoe, 2002)。小口径の柱状構造物周辺の洗掘は、特に縮流、馬蹄形渦および後流渦などの渦流れの影響を強く受ける (Niedoroda・Dalton, 1982)。この問題に関しては様々な観点から幅広く研究が行われてきた。著者らは背の高い非没水状態の直立柱体を対象に、底面付近に形成される馬蹄形渦や後流渦の内部構造を数値的・実験的に明らかにしてきた (榎田, 2001)。

一方、近年頻繁に利用されているサクシオン式のケーソン基礎を考慮する場合、前述の 2 つの渦に加えて、構造物頂部における流れの剥離に伴う第 3 の渦が発生するため、3 者の渦流れの詳細構造および渦間の干渉過程に関する知見を得ることが重要になる (Yeow・Cheng, 2003)。しかしながら、没水状態の直立柱体周辺の流体場に関する研究例は僅かである。一様流場に関する Baker (1985) の実験結果が報告されているが、波動場・振動流場の流況特性および構造物の高さの変化が渦の詳細構造や底面せん断力特性に与える影響に関して不明な点が多い。

そこで本研究では、振動流中および一様流中に没水した直立円柱周辺の 3 次元流体場に関する数値解析を行い、円柱の相対高さの違いによる渦流れの内部構造および底面せん断力の変化について考察した。

2. 解析方法と条件

図-1 に示すような没水状態の直立円柱周辺の正弦振

動流場および一様流場を対象とする。円柱壁面や底面近傍における境界層の剥離や再付着を伴う複雑な渦流れ現象を厳密に解析するために、一般曲線座標系に変換した Navier-Stokes 方程式を用いて非定常・3 次元流体場の数値解析を行った。本解析モデルの詳細は石田ら (2002) を参照されたい。

没水した直立円柱周辺の振動流場は、流体運動に関する次の 2 つのパラメータ、

$$KC = \frac{U_w T}{D}, \quad \beta = \frac{D^2}{\nu T} = \frac{Re}{KC} \dots\dots\dots (1)$$

および物体形状に関する次のパラメータ、

$$\frac{h}{D}, \quad \frac{H}{D} \dots\dots\dots (2)$$

で特徴付けられる。ここで D は円柱直径、 T は振動周期、 ν は動粘性係数、 U_w は最大流速を表す。 H は水深、 h は円柱高さである。ここでは、 $KC = 35$ 、 $\beta = 45$ 、 $H/D = 10$ とし、円柱の相対高さを $h/D \leq 7$ の範囲で変化させた。主流域底面上の振動境界層の排除厚 δ^* は約 $0.05D$ で、流速振幅最大で定義する境界層厚 δ は約 $0.2D$ である。

流れ方向を x 軸、円柱中心の鉛直軸を z 軸、両者の直角方向を y 軸とし、原点 o は底面上の円柱中心とする。解析格子は円筒形で、周方向 94 点、半径方向 84 点、 z 軸方向 75 点配置した。解析領域は半径方向に円柱直径の約 30 倍を確保した。以下では、座標値は円柱直径で、流速

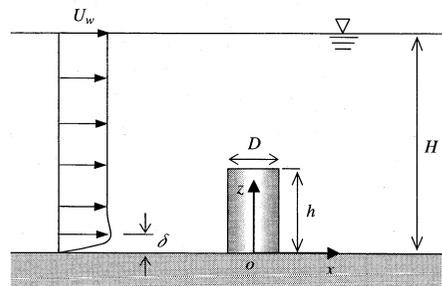


図-1 没水円柱周辺の流れと軸の設定

* 正会員 博(工) 金沢大学助手 大学院自然科学研究科
 ** 正会員 金沢大学教授 大学院自然科学研究科
 *** 正会員 博(工) 金沢大学助教授 大学院自然科学研究科
 **** 正会員 工博 金沢大学教授 大学院自然科学研究科

は最大振動流速で規準化した無次元量で表記する。

3. 流況解析の結果および考察

図-2は相対高さの異なる3つの没水円柱周辺の渦構造の時間変化を比較したものである。渦領域は λ_2 法 (Jeong・Hussan, 1995) を用いて特定した。時間を t として振動流の位相を t/T で表示した。紙面に限りがあるので、同図には振動流が x 軸の正方向に作用する前半周期 ($t/T = 0 \sim 1/2$) の様子のみ表示したが、後半周期も渦の形成・発達過程はほぼ同様である。

没水円柱周辺の流れは馬蹄形渦、後流渦と頂部剥離渦の3種類の渦により構成される。馬蹄形渦は円柱前面での底面境界層の3次元剥離により形成され、円柱の根元を囲むようなU字型の平面形状を持つ。後流渦は円柱側面に沿う境界層の剥離に伴うせん断層が巻き込んだ状態の渦である。頂部剥離渦は円柱上部に接近する流れが円柱頂部の上流縁で剥離することで発生する渦であり、円柱頂上に位置する三日月状の渦である。この渦の再付着点が円柱頂部にある場合、流れは円柱頂部の下流縁で再度剥離するため、第2の剥離渦が円柱背後に形成される。頂部剥離渦と馬蹄形渦は主に水平方向の渦軸を、後

流渦は鉛直方向の渦軸をもつ。各渦の大きさや強度の関係および渦間の干渉は円柱の相対高さに依存する。

円柱高さが直径に対して低い場合 (図-2(a)), 馬蹄形渦と頂部剥離渦は円柱前面で近接する。円柱背後には第2の頂部剥離渦が形成されるが、後流渦の発生は明確でなく、渦放出現象はない。流れは1周期間を通して $y = 0$ 平面に対してほぼ対称であり、各渦の移動範囲は狭い。

円柱高さが直径と同じ場合 (図-2(b)), 後流渦の放出現象が生じて、後流域の流れは非対称になる。1周期間に4組の渦対が x 軸方向に放出される。後流渦は円柱背後に形成される第2の頂部剥離渦と接近するため、円柱背後で両者が結合したような複雑な渦構造を示す (図-2(b) (ii))。頂部剥離渦は振動流速が加速する位相 ($t/T = 0 \sim 2/8$) で発生・拡大し、減速位相 ($t/T = 2/8 \sim 4/8$) で縮小・消滅する。馬蹄形渦も半周期毎に円柱前後側で交互に発生・消滅を繰り返すが、存在時間は比較的短い。

頂部剥離渦の大きさは振動流速が最大となる位相 ($t/T = 2/8$) で最大になるが、馬蹄形渦は減速位相の $t/T = 3/8$ 付近で最大になる。これは、底面境界層内の流れは境界層の外の振動流より位相が進み (石田ら, 1999),

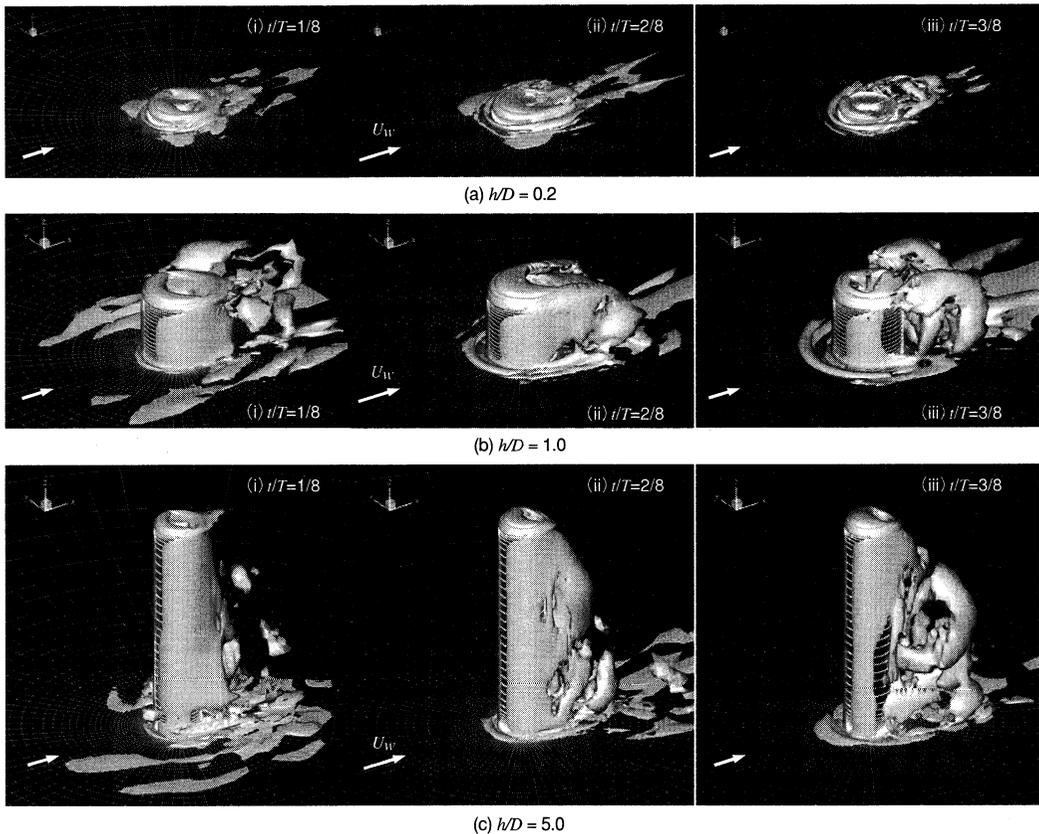


図-2 没水円柱周辺の渦構造の時間変化, $\lambda_2 = -1$ 平面 (前半周期, $h/D = 0.2, 1.0, 5.0$)

$t/T = 3/8$ で流向が反転するため、馬蹄形渦が反転した流れにより円柱半径方向へ拡大するためである (図-2 (b) (iii)). ただし、馬蹄形渦内部の渦度は $t/T = 2/8$ 位相で最大となり、その後は上流の底面境界層から渦度が供給されないため、渦径は拡大するものの強度は低下している。

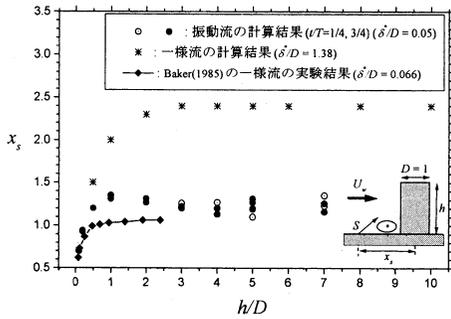


図-3 剥離点距離と相対高さの関係

円柱高さが直径に対して十分高い場合 (図-2(c)), 後流渦の運動は2次元円柱周辺のものと同様である。渦放出個数は1周期間に5組であり、2次元円柱に関する従来の実験・解析結果 (例えば, Williamson, 1985) と同じである。円柱の相対高さが低くなると、放出渦の数が減少し、円柱に作用する y 軸方向の流体力 (揚力) の変動周波数が低下する傾向が別途確認された。

図-3に、最大流速時の馬蹄形渦の大きさを、渦上流端に発生する底面境界層の剥離点 S と円柱中心軸との距離 x_s を用いて表示した。図中には、振動流場に関する本計算結果とともに、一様流場に関する計算結果および Baker (1985) の実験結果を示す。3者の剥離点距離は相対高さが増加するにつれて急激に増加し、その後一定値に近づく。剥離点距離が一定になる相対高さの下限値 h_c/D は流れに依存する。一様流場の計算条件では底面境界層が厚いために、 h_c/D は高く、剥離点距離は長い。一方、底面境界層が非常に薄い条件下の実験および振動

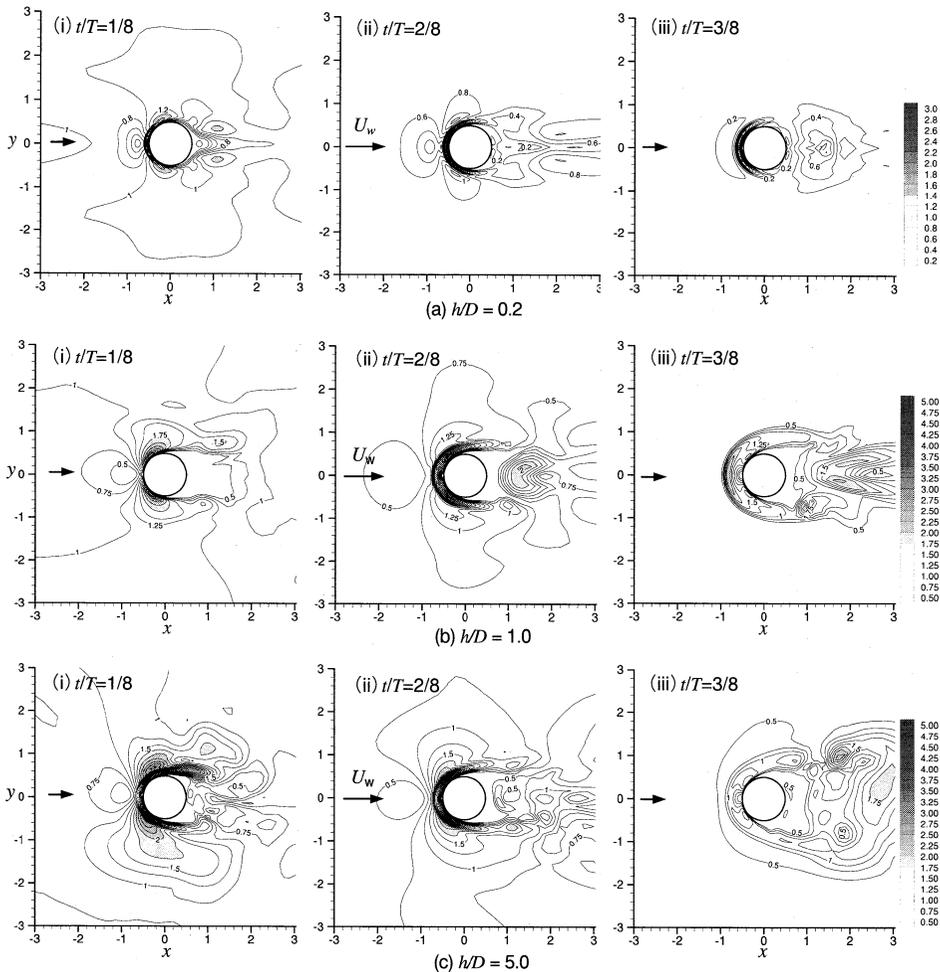


図-4 底面せん断力の時間変化(前半周期, $h/D=0.2, 1.0, 5.0$)

流の計算では h_c/D は低く、剥離点距離は短いので、馬蹄形渦は小規模である。この結果は複数の実験結果を整理して得られた Sumer・Fredsoe(2002)の報告と整合する。

振動流場における馬蹄形渦や後流渦の位置は半周期毎に交互に移動するため、同位相であっても各渦の大きさ、強度および配置は若干変動する。特に、円柱高さが直径より大きく後流渦が発達する条件では、剥離点距離はその影響を受けて周期毎に変化し、 $h/D > 3$ で x_s は 2 割前後の変動幅をもつ。これに対し、振動流でも相対高さが低い場合や一様流場の馬蹄形渦の剥離点位置は安定する。

4. 底面せん断力解析の結果と考察

図-4 は図-2 の流況に対応する底面せん断力の時間変化を示す。ここでは底面せん断力の大きさを円柱から $10D$ 以上離れた主流域下の底面せん断力の時間最大値で基準化した値で表記した。主流域の底面せん断力は振動流速より位相が $1/8$ 早く、その値は $t/T = 1/8$ (図-4 (i)) で最大、 $t/T = 3/8$ (図-4(ii)) でゼロになる。

位相 $t/T = 1/8 \sim 2/8$ 前後の馬蹄形渦の発達段階において、渦下の底面せん断力が円柱前面から側面にかけて増加する。円柱高さが直径以上の場合、その後 ($t/T = 2/8 \sim 3/8$) も馬蹄形渦の拡大に伴い大きな底面せん断力を受ける範囲が主に円柱の半径方向に広がる (図-4 (b), (c))。しかし、馬蹄形渦は減衰段階にあり、底面せん断力のピーク値は低下する。円柱高さが直径未満の場合、馬蹄形渦の強度に対応して底面せん断力は比較的小さな

値に留まる。また、後流渦の発達も十分でないので、後流域での底面せん断力も 1 周期を通して小さい。渦放出現象が発生する相対高さになると、後流渦の周辺および渦を形成するせん断層周辺における底面せん断力が増大する。その値は主流せん断力の $2 \sim 3$ 倍程度であるので、馬蹄形渦や縮流の影響下にある円柱前面や側面のせん断力に比べるとやや小さい。

図-5 は図-4 に示した瞬間の底面せん断力に対する時間平均値および最大値の分布を示す。平均値は相対高さによらずほぼ x 軸に対称に分布するが、最大値の分布は相対高さが大きくなると円柱から $0.5 \sim 2.5 D$ 離れた範囲で非対称になる (図-5 (b) (iii))。このことから円柱付近に存在する馬蹄形渦は形状や強度が周期的に安定するのに対して、放出される後流渦の個々の強度や配置が不安定であることが分かる。平均せん断力の空間的な極大値は円柱側面の点 a 付近に存在するが、最大せん断力の極大値は円柱肩部の点 b 付近に存在する (図-5 (ii))。この主な理由は、円柱側面部は 1 周期中の大半は縮流にさらされるため平均せん断力が増加し、円柱肩部は半周期未満の短時間ではあるものの、強い馬蹄形渦に曝されるため最大せん断力が増加するためである。

次に円柱の相対高さの違いが底面せん断力の増幅範囲に与える影響を考察するために、底面せん断力の円柱半径方向 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ の変化を図-6 に示した。横軸 $r = 0.5$ は円柱壁面の位置であり、縦軸の底面せん断力 $\tau_{m,m}$ は図-5 (a) に示した平均底面せん断力の $r =$ 一定の

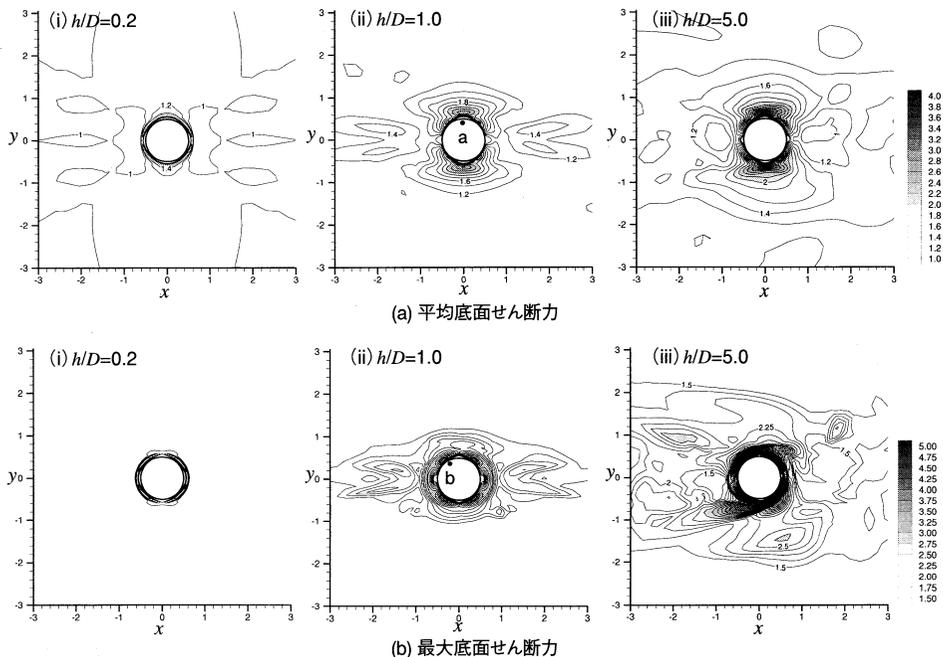


図-5 底面せん断力の時間平均値・最大値 ($h/D = 0.2, 1.0, 5.0$)

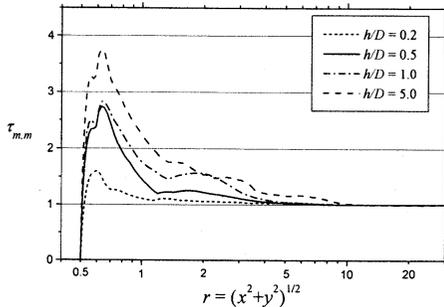


図-6 底面せん断力の半径方向変化

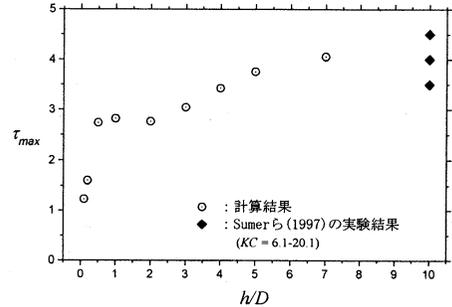


図-7 時間平均底面せん断力の空間最大値

円上での最大値を与える。円柱壁面から離れるにつれて、せん断力 $\tau_{m,m}$ は急激に増加し、円柱表面から $0.1 \sim 0.2 D$ 付近で最大値をとり、その後、 $\tau_{m,m}$ は急激に減少する。相対高さが高い場合、円柱表面から $1 \sim 1.5 D$ 付近で2つ目の低いピークが現れる。最大値である第1ピークは馬蹄形渦と縮流の作用下で、第2ピークは最も発達する放出直前の後流渦の中心部の下で生じる。相対高さが減少するにつれて各渦の規模や強度は低下するため、底面せん断力の増幅範囲は縮小するとともに、 $\tau_{m,m}$ の第1ピークが出現する位置も円柱表面に接近し、その最大値は減少する。

図-7は底面せん断力の最大値と相対高さの関係を示す。縦軸 τ_{max} は図-5(a)に示した時間平均底面せん断力の空間最大値に対応する。相対高さの増加に対して τ_{max} は増加傾向を示す。 $h/D < 0.5$ では、 τ_{max} は主流底面せん断力の2倍未満、 $h/D = 0.5 \sim 2$ では3倍未満、 $h/D \geq 3$ では約3~4倍に達する。相対高さが十分に高くなると、Sumerら(1997)の非没水状態の直立円柱に対する実験値 $\tau_{max} = 3.5 \sim 4.5$ に接近し、実験結果との整合性が認められる。

5. 結 論

振動流および一様流中に没水した直立円柱周辺の3次元流体場に関する数値解析を行い、円柱の相対高さの変化が流況特性および底面せん断力特性に与える影響について検討した。本研究で得られた主要な結果は次のようにまとめられる。

(1) 没水円柱周辺の流れは馬蹄形渦、後流渦および頂部剥離渦により特徴付けられ、各渦の大きさ、強度および存在時間は円柱の相対高さに強く依存する。ある相対高さ以下になると、馬蹄形渦は相対高さの低下とともに縮小する。この限界の相対高さは主流速分布の底面境界層が厚いほど高くなる傾向にある。後流渦の放出個数は相対高さの増加とともに増加傾向にあり、限界高さ未満では渦放出は発生しない。頂部剥離渦は円柱頂上に形成される三日月状の渦と円柱頂部の背後に形成される第

2の渦がある。第2の頂部剥離渦は後流渦と干渉して、複雑な3次元形状の渦を形成する。

(2) 底面せん断力は馬蹄形渦および後流渦の影響下で増加し、その絶対値や増幅範囲は渦と同様に相対高さに強く依存する。相対高さが増加するにつれて底面せん断力の空間最大値は急激に増加し、その後は主流域下の底面せん断力の3~4倍程度の大きさに漸近する。

謝辞：本論文を作成するにあたり高瀬智佳子さん（奈良県）の多大な助力を得た。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号：17760401）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

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，第46巻，pp. 801-805.
- 石田 啓・榎田真也・由比政年(2002)：振動流中に設置された直立円柱周辺の馬蹄形渦および後流渦の特性，土木学会論文集，No. 705/II-59，pp. 115-128.
- 榎田真也(2001)：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，博士論文，金沢大学大学院，187p.
- Baker, C.J. (1985)：The position of points of maximum and minimum shear stress upstream of cylinders mounted normal to flat plates, J. Wind Eng. and Industrial Aerodyn., Vol. 18, pp. 263-274.
- Jeong, J. and F. Hussan (1995)：On the identification of a vortex, J. Fluid Mech., Vol. 285, pp. 69-94.
- Yeow, K. and L. Cheng (2003)：Local scour around a vertical pile with a caisson foundation, Proc. of APAC2003, 7p.
- 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.
- Sumer, B.M. and J. Fredsoe (2002)：The mechanics of scour in the marine environment, World Scientific Co. Pte. Ltd. 536p.
- Williamson, C.H.K. (1985)：Sinusoidal flow relative to circular cylinders, J. Fluid Mech., Vol. 155, pp. 141-174.