

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

由比政年*・石田 啓**・煤田真也***

1. 序 論

振動流中に設置された柱体の受ける流体力やその周辺の流況の特性を知ることは、海岸・海洋構造物の受ける波力および周辺の流体場の特性を解明・予測する上で、重要な基礎項目の一つとなる。こうした観点から、これまでに、小口径円柱周辺の正弦振動流を対象とした実験的研究が広く進められてきた。その結果、周期的に反転する流体場における渦の相互干渉が、振動流固有の流況パターンを生み出すこと、さらに、この流れパターンの変化が、振動方向および直交方向の流体力特性に大きな影響を与えることが明らかにされてきた（たとえば、Williamson, 1985；Obasaju, 1988 など）。

一方、近年の数値流体力学の発展に伴い、柱体周辺の振動流場を数値的に解いて力学的検討を行うことが可能となってきた（たとえば、Justesen, 1991；佐藤ら, 1996 等）。著者らも、これまでに、一般曲線座標系に変換された Navier-Stokes 方程式を用いて円柱周辺振動流場の数値解析を行い、円柱周辺の渦構造の特性と KC 数や Reynolds 数（あるいは粘性パラメータ $\beta: \beta = \text{Re}/\text{KC}$ ）との関連について解析を進めてきた（石田・由比, 1996；石田ら, 1997）。そこで得られた解析結果は、従来の実験結果と良く整合し、その信頼性が確認されたが、計算時間上の制約から、解析の対象は、 $\text{KC} \leq 10$ かつ運動開始後 3 周期目までの、過渡的な振動流場に限定され、流体力特性に関する検討も定性的なものを主体としていた。

本研究では、従来の解析をさらに発展させ、 $\text{KC} \leq 20$ の範囲で、かつ、運動開始後 20 周期という十分に発達した振動流場を対象として、円柱の受ける流体力特性の詳細な解析を行う。以下では、まず、KC 数の変化による流体力特性の変化を、特に揚力変動に着目して解析し、次に、流体力の時間変化とその周辺の流況の関連を検討する。さらに、解析で求めた流体力係数の値を従来の実験結果と比較し、計算手法の定量的な有効性を検証する。

2. 解析の手法

2.1 基礎方程式

解析に用いた基礎方程式は、2 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式および連続式を無次元化したものである。この基礎方程式系に対して、MAC 法 (Harlow ら, 1965) による数値解析を行う。ここでは、その概略を説明する。なお、解析手法の詳細に関しては、前報（石田・由比, 1996；石田ら, 1997）に示した通りである。

円柱周辺の振動流場を解析する際には、円柱表面近傍の境界層の構造を精度良く解析することが重要であり、円柱表面に沿った境界適合座標系を利用することが有効となる。MAC 法では、連続式に代わるものとして、圧力に対する Poisson 方程式を導き、運動方程式と組み合わせるが、ここでは、先の点を考慮し、これらの式を次に示すような一般曲線座標系に変換して解析を行う。

$$\xi = \xi(x, y, t), \quad \eta = \eta(x, y, t), \quad \tau = t \cdots \cdots (1)$$

変換された運動方程式および圧力に対する Poisson 方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned} u_\tau &= [(u-x_\tau)y_\eta - (v-y_\tau)x_\eta]u_\xi/J \\ &\quad + [(v-y_\tau)x_\xi - (u-x_\tau)y_\xi]u_\eta/J \\ &= -(y_\eta P_\xi - y_\xi P_\eta)/J + \tilde{A}u/\text{Re} \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_\tau &= [(u-x_\tau)y_\eta - (v-y_\tau)x_\eta]v_\xi/J \\ &\quad + [(v-y_\tau)x_\xi - (u-x_\tau)y_\xi]v_\eta/J \\ &= -(x_\xi P_\eta - x_\eta P_\xi)/J + \tilde{A}v/\text{Re} \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{A}p &= -[(y_\eta u_\xi - y_\xi u_\eta)^2 + 2(x_\xi u_\eta - x_\eta u_\xi) \\ &\quad \times (y_\eta v_\xi - y_\xi v_\eta) + (x_\xi v_\eta - x_\eta v_\xi)^2]/J^2 \\ &\quad + (y_\eta u_\xi - y_\xi u_\eta + x_\xi v_\eta - x_\eta v_\xi)/(J\Delta t) \cdots (4) \end{aligned}$$

ここに、 (u, v) は速度、 p は圧力、 Re はレイノルズ数である。また、下付き添え字は偏微分を、 $\tilde{A}$ は一般曲線座標系での Laplace 演算子を、 J は座標変換のヤコビアンをそれぞれ表す。

2.2 基礎方程式の差分化

式 (2) および式 (3) を時間積分する際には、時間 1 次精度の陰的な Euler スキームを用いた。一方、空間的な差分化においては、式 (2) および式 (3) の対流項以外はすべて 2 次精度の中心差分を用い、対流項の差分

* 正 会 員 博(工) 金沢大学講師 工学部土木建設工学科

** 正 会 員 工 博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

*** 学生会員 工 修 金沢大学大学院自然科学研究科

化に関しては、3 次精度の風上差分 (Kawamura ら, 1986) を用いた。こうして得られた差分方程式を SOR 法を用いて解き、流体場の時間発展の計算を行った。なお、計算格子には物理量の評価点と差分格子点とが一致する通常格子を用いている。

3. 解析結果および考察

3.1 解析の条件

円柱周辺の正弦振動流場の流況は、2 つの無次元パラメータ、KC 数および β 数 (あるいは、Reynolds 数: $Re = \beta \times KC$) により特徴づけられる。今回は、 β の値を 196 と固定し、KC 数を 1 から 20 まで変化させて流体場の解析を行った。なお、流れ場の代表長さとして円柱の直径を、代表速度として最大振動流速をそれぞれ用いている。計算に用いた格子点数は、 94×79 点であり、計算領域の全体長は半径方向に円柱直径の約 120 倍程度とした。

初期条件としては、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た。なお、流体場の上下非対称性の発現を容易にするために、計算の初期の段階で上下方向の弱い振動を加えている。一方、境界条件としては、次のようなものを用いた。まず、計算領域の外縁は円柱から十分遠方にあるとして、外部境界では一様な正弦振動流場の速度および圧力の値を与えた。一方、円柱表面上では、速度を滑りなしの条件で与え、圧力は外挿により決定した。また、円柱後方 x 軸上の境界では、周期境界条件を用いた。

円柱周辺の振動流解析では、従来、計算時間上の制約から、振動開始後第 3 周期目を取り上げてその特性を論じたものが多い (佐藤ら, 1996; 石田・由比, 1996; 石田ら, 1997)。しかしながら、3 周期目は、流れ場が初期の過渡的段階から周期的変動へと移行し始める段階にすぎず、流体力係数などの定量的検討には、より長い周期に渡る解析が必要と考えられる。今回は、従来の解析コードをベクトル計算機用に最適化し、計算速度を大幅に向上させることにより計算時間上の制約を克服し、20 周期分の計算を実現した。計算時間は KC 数により異なるが、KC = 8 の場合に CPU 時間で約 1 時間である。なお、計算には、金沢大学総合情報処理センターのミニスーパーコンピュータを用いている。

3.2 KC 数による流体力変動特性の変化

図-1 は、KC = 3, 8, 12, 16 の場合の振動方向 (実線) および振動直交方向 (破線) の無次元流体力 F の時間変化を示している。なお、図中の点線は外部流速の変動を表す。また、 T は振動周期である。

円柱まわりの振動流場では、周期的に反転する流れが流体力や渦放出に複雑な影響を及ぼし、先の半周期に発生した渦と次の半周期に発生する渦との干渉過程が KC

数により様々に変化する。Williamson (1985) は、この過程に関する詳細な可視化実験と流体力測定を行い、KC 数により、流れパターンを次のように分類している。

- (I) $0 < KC < 7$: 上下対称 ($KC < 4$), 非対称 ($4 < KC < 7$) の渦対の形成
- (II) $7 < KC < 15$: トランスバースストリート、シングルペア
- (III) $15 < KC < 24$: ダブルペア

ここで、(I) の $KC < 4$ の領域では、流れ場は上下対称に近い形となり、揚力は微小なものとなるが、KC 数が増加

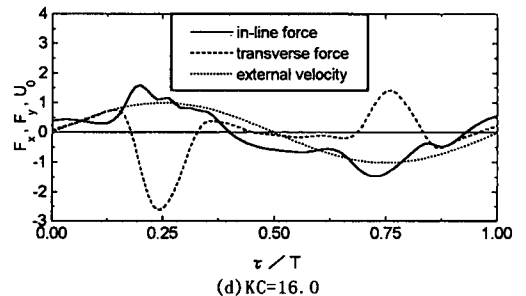
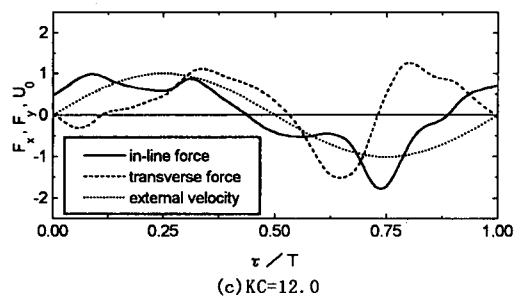
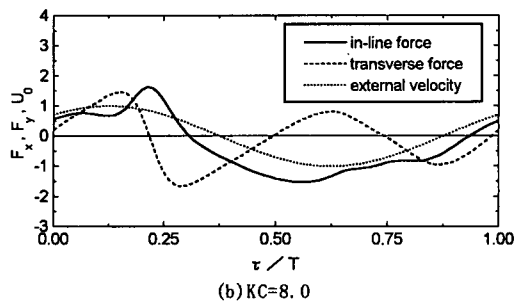
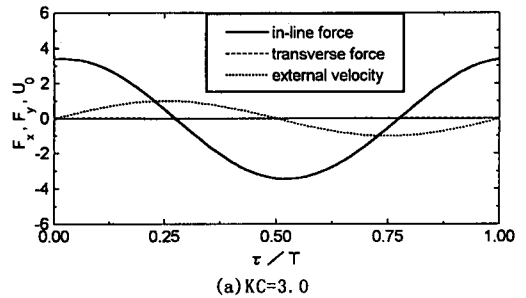


図-1 無次元流体力の時間変化

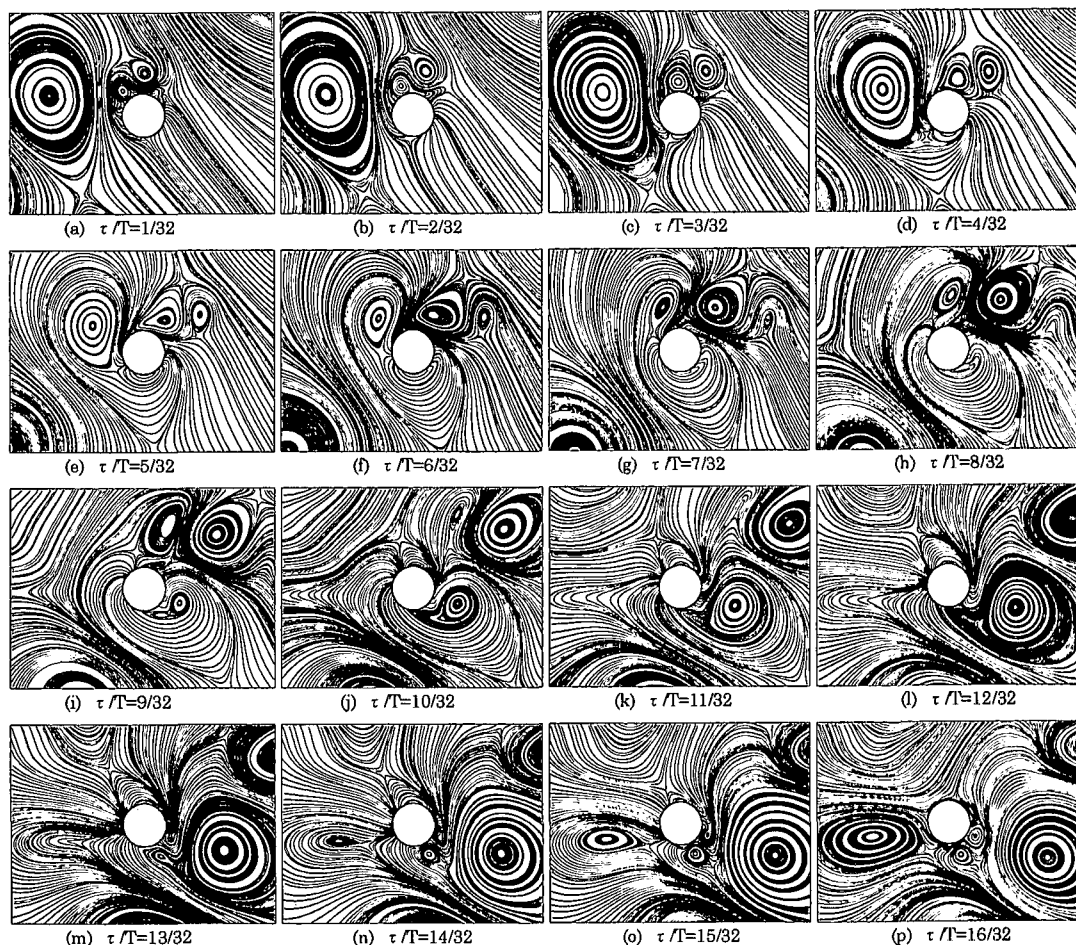


図-2 円柱近傍の流線の時間変化 (KC=16.0)

するにつれて、渦構造の上下非対称性が顕著となり、(II), (III) の領域では、振動方向流体力と同程度あるいはそれ以上の大きさの揚力が発生する。図-1の (a) は (I) に、(b), (c) が (II) に、(d) は (III) の領域にそれぞれ対応する。

KC=3 では、振動方向流体力は非常に安定した周期的変化を示す。このような低 KC 数領域では、慣性力成分が抗力成分に卓越するため、振動方向流体力は余弦的な変動を示している。また、流れ場の上下対称性を反映して、揚力は非常に小さい。一方、KC=8, 12 では、流体場の上下非対称性の発現により、振動方向流体力と同程度の揚力が発生している。さらに、KC=16 の例では、揚力の絶対値の最大値は、振動方向流体力の最大値を大きく上回る形となっている。なお、揚力変動の周波数は、流速変動周波数に対して、KC=8, 12 の場合で約 2 倍、KC=16 の場合で約 3 倍である。これは、(II) および (III) の領域において、1 周期あたりそれぞれ、1 組および 2 組の渦対が放出されることと対応する。この結果は、Wil-

liamson (1985) の実験結果と良く整合しており、KC 数による流れパターンの変化が、今回の解析により的確に捉えられていることを示している。

3.3 円柱近傍の流況の時間変化と流体力変動との関連

図-2 および図-3 は、KC=16 の場合の円柱近傍での瞬間流線および圧力分布の時間変化を示したものである。これらの図は、時間的には図-1(d) の前半の半周期分に対応しており、 $\tau/T=1/32$ ($=0.03125$) から $1/2$ までを $1/32$ 刻みで表示している。なお、円柱近傍の渦構造を明確に表すために、主流とともに移動する座標系から見た流線図を提示している。以下では、円柱近傍の流況の時間変化と図-1(d) の揚力変動の関連を検討する。

主流反転直後 (a) には、円柱近傍に、先の半周期に生成された残存渦が複数個存在する。この内の円柱左側の大きな渦とその隣の渦は、主流が加速するに従って、渦対を形成しながら円柱上方を流れて下流側へと移流し、右斜め上 45 度方向に放出される (a~i)。図-1(d) の揚

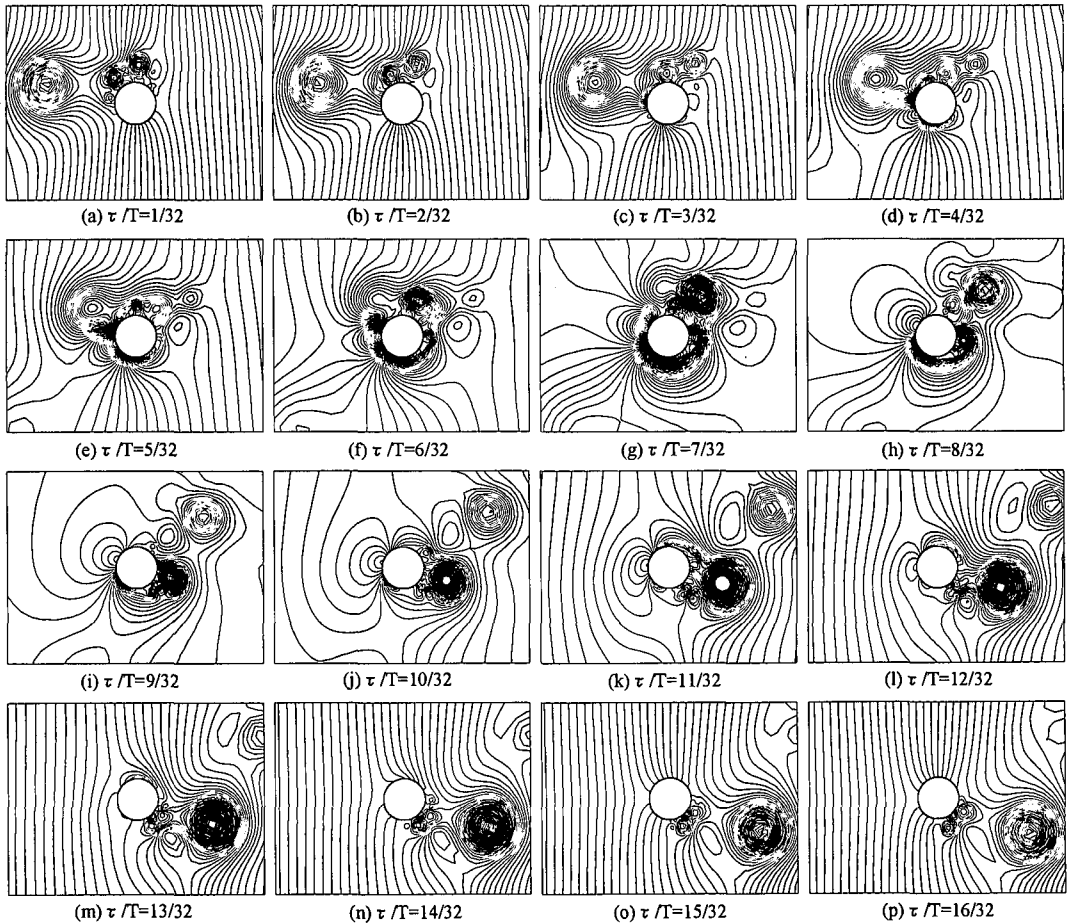


図-3 円柱近傍の圧力分布の時間変化 (KC=16.0)

力変動における最初の正のピークはこの過程に対応する。一方、主流の加速時には、円柱下方からも強い渦が新たに成長し、下流側へと放出される(e~m)。この過程で、円柱下部には強い負圧領域が発生し、大きな負の揚力と第2のピークをもたらす。次に、主流の減速段階では、円柱上方から新たな渦が成長を始め(j~p)、揚力値は再び正の値を示す。この渦は、円柱の下方へと向けて回り込んで行き、円柱右下方の大きな渦と渦対を形成する。この渦対は、次の半周期で円柱の下方を通過して逆方向に押し戻され、先に放出された渦対と反対方向(左斜め下45度方向)へと放出される。後半の半周期では、この過程および円柱上方・下方からの渦の生成に対応して、負・正・負の順で3つの揚力変動のピークが発生する。

3.4 流体力係数の算出

図-4 および図-5 は、振動方向流体力に対する Morison 式中の抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M の値を第3から第20周期までの解析結果から算出し、Obasaju ら(1988)の実験結果と比較したものである。ここで、 C_D お

よび C_M の値は、Fourier 解析により算出している。

解析により求めた抗力係数 C_D は、KC 数が増加するにつれて最初急激に減少し、次いで、KC=3 を境に増加傾向に転じて、KC=10 前後で最大となり、後に再び減少して KC>15 ではほぼ一定値を取る。こうした C_D の変化傾向は、Obasaju ら(1988)の実験結果をほぼ忠実に再現した形となっている。また、両者の定量的一致も良好である。

一方、解析により求めた慣性力係数 C_M は、KC 数が増加するにつれて緩やかに減少し、KC=12 で最小となった後に再び増加して、KC>15 ではほぼ一定値を取る。この傾向も Obasaju ら(1988)の実験結果と非常に良く一致する。また、両者の定量的一致も良好である。

今回の解析結果は、Justesen (1991) のスペクトル法による解析結果とも良く整合している。また、実験値との定量的一致に関しては、今回の解析結果の方が Justesen (1991) の解析結果より優れていることも確認された。

図-6 は、振動方向流体力の RMS 値 (C_{FRMS}) の値を第3から第20周期までの解析結果から算出し、Mauil ら

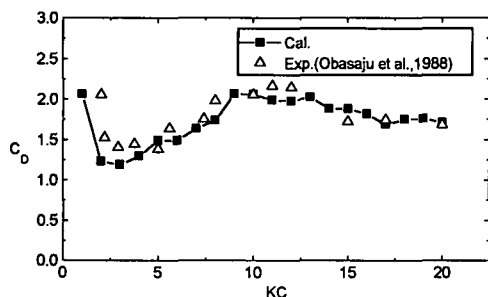


図-4 KC数に対する抗力係数の変化

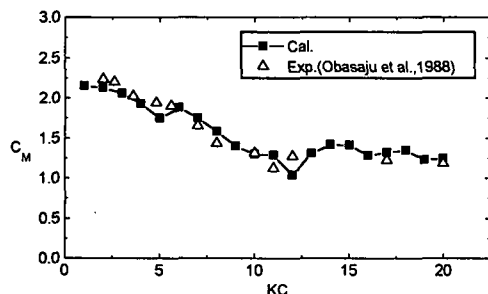


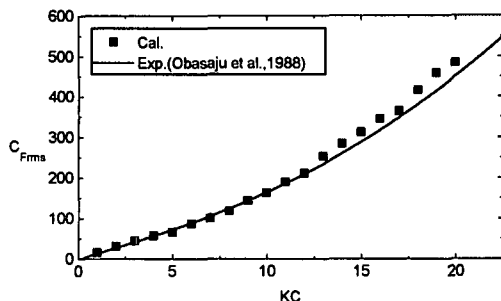
図-5 KC数に対する慣性力係数の変化

(1978) が実験値 ($\beta=200$) から求めた回帰曲線と比較したものである。両者は $KC \leq 20$ の全域で非常に良く一致している。

4. 結 論

2次元非圧縮性の Navier-Stokes 方程式を一般曲線座標系に変換して数値解析を行い、 $\beta=196$ 、 $1 \leq KC \leq 20$ の範囲で、正弦振動流中の円柱の受ける流体力やその周辺の流況の検討を行った。解析結果と従来の可視化実験結果とは、渦の生成、放出、移動等に関して良く整合しており、 KC 数の変化による渦放出パターンの変化や、それに関連した振動方向および直交方向の流体力特性の変化を詳細に捉えることに成功した。また、流体力の時間変化とその周辺の流況の時間変化との関連を検討することにより、剥離渦の生成、放出と、円柱の受ける流体力の変動との関連をとらえることもできた。

次に、第3から第20周期までの解析結果に基づき、振動方向流体力に関する Morison 式中の抗力係数や慣性力係数、あるいは、Maull らの提案する C_{FRMS} とした流体力係数の算出を行った。解析により得られた流体力係数値は、従来の実験値と良好に一致することが確認され、本手法による流体力解析の定量的な有効性が検証された。

図-6 KC数に対する C_{FRMS} の変化

今回は、 β パラメータの値を1つに固定した場合の解析結果を示したが、 β の値を変化させた場合の解析も現在実行中である。さらに、著者らが開発した3次元解析モデル (石田ら, 1998) を利用して、振動流場の3次元構造 (Tatsuno ら, 1990) の解析を進める予定である。

参 考 文 献

- 石田 啓・由比政年 (1996): 一般曲線座標系表示の Navier-Stokes 方程式を用いた円柱周辺流体場の数値解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 916-920.
- 石田 啓・由比政年・平川真史 (1997): 高レイノルズ数領域における円柱周辺振動流場の数値解析, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 816-820.
- 佐藤幸雄・渡部靖憲 (1996): 水平振動流中の円柱の表面に剝離を伴う場合の流体力について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 911-915.
- 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.
- Harlow, F. H. and J. E. Welch. (1965): Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, *Physics of Fluids*, Vol. 8, No. 12, pp. 2182-2189.
- Justesen, P. (1991): A numerical study of oscillating flow around a circular cylinder, *J. Fluid Mech.*, Vol. 222, pp. 157-196.
- Kawamura, T., H. Takami and K. Kuwahara (1986): Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, *Fluid Dynamics Research* Vol. 1, pp. 145-162.
- Maull, D. J. and M. G. Milliner (1978): Sinusoidal flow past a circular cylinder, *Coastal Eng.*, Vol. 2, pp. 149-168.
- Obasaju, E. D., P. W. Bearman, and J. M. R. Graham, (1988): A study of forces, circulation and vortex patterns around a circular cylinder in oscillating flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 196, pp. 467-494.
- Tatsuno, M. and P. W. Bearman (1990): A visual study of the flow around an oscillating circular cylinder at low Keulegan-Carpenter numbers and low Stokes numbers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 211, pp. 157-182.
- Williamson, C. H. K. (1985): Sinusoidal flow relative to circular cylinders, *J. Fluid Mech.*, Vol. 155, pp. 141-174.