

# 振動流場における小口径円柱周辺の局所洗掘に関する3次元数値解析

## Three-dimensional numerical model for scour around a slender pile in oscillatory flow

楳田真也<sup>1</sup>・由比政年<sup>2</sup>・石田 啓<sup>3</sup>

Shinya UMEDA, Masatoshi YUHI and Hajime ISHIDA

We have developed a three-dimensional numerical model for temporal developments of flow and scour around a slender pile exposed to oscillatory flow. The flow model is based on the Navier-Stokes equations in moving generalized curvilinear coordinate systems and is coupled with a morphological model. The morphological model consists of the sediment mass-balance equation, the sediment transport models for bed load and suspended load, and the sand slide model. The calculations show that the present model reproduces the main features of the wave-induced scour processes. Detailed descriptions are given of the live-bed scour processes in conjunction with vortex flow and sediment transport. Investigations were also conducted on the effect of the sediment transport models on the numerical solutions.

### 1. はじめに

海岸構造物基礎周辺で発生する局所洗掘を正確に予測することは、構造物の安定性を検討する上で重要である。従来、洗掘実験と共に、流体運動・底質輸送・底面地形変動の干渉過程をモデル化して解析する研究が進められてきた (Sumer, 2007)。しかし、その大部分は河川流に代表される一方向流場での洗掘現象を対象とするものであり (例えば、長田ら, 2001; Roulandら, 2005)、波浪場における構造物周辺の洗掘予測に関する研究はあまり進んでいない。最近、海底パイプライン周辺の洗掘 (Liang・Cheng, 2005) や海底掘削溝の埋没 (Jensen・Fredsoe, 2001) 等の現象を断面2次元的に解析した成果が発表されているが、流体・底質の複雑な3次元運動を伴う小口径構造物周辺の洗掘現象のモデル化に関する研究は稀少であり、その適用性に関する知見は十分とは言えない。

波浪場における小口径構造物周辺の洗掘現象を精度良く解析するには、馬蹄形渦や後流渦に代表される3次元渦構造を精密に捉えた上で、底質輸送と海底地形変化を適切に評価する必要がある。このうち、流体場に関する数値解析技術は近年進展が著しい。一方、底質輸送に関しては、主に、定常流や時間平均的な流れ場に対応する流砂・漂砂量式を援用した解析が実施されており、波浪場・振動流場における非定常な輸送過程を再現するための課題も多く残されている。

これらの課題の特性を明らかにし、今後の検討の指針を得るためには、波動場や振動流場を対象とした基礎解

析を実施し、工学的知見を蓄積していくことが基本となる。こうした観点から、本研究では、流体場・底質輸送・底面地形変動の連成解析モデルを開発し、振動流場における直立円柱周辺の洗掘過程の解析を行って、既往の実験結果との比較・検討を実施した。その目的は、比較的簡易な (定常流場を基本対象とした) 底質輸送モデルと3次元非定常流解析モデルを連成させた際の、流況と洗掘地形に関する定性的 (渦流れの構造、洗掘孔概形や周辺の砂漣形成等) ・定量的 (洗掘の進行速度や最大洗掘深等) な再現性や課題を明らかにすることである。

### 2. 解析モデル

本解析モデルは、一方向流場における円柱周辺の洗掘現象に関して著者ら (2006) が開発した解析モデルを基に、振動流場への拡張、浮遊砂輸送モデルの導入や地形変動解析の改良等を行ったものである。流れ場、底質輸送および底面地形の各要素モデルの概要を以下に示す。

#### (1) 流れ場

円柱壁面や移動床付近における境界層の剥離や再付着を伴う複雑な渦流れを精度良く解析するために、移動一般曲線座標系に変換した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に基づく流体解析モデルを用いた。定式化の詳細は、石田ら (2002) を参照されたい。解析モデルの信頼性に関しては、平坦床やモデル洗掘地形上の直立円柱周辺における流速場、馬蹄形渦の発生条件や規模、後流渦パターンおよび底面せん断応力分布等について幾つかの実験結果との比較から、流体解析モデルの妥当性を確認している (Yuhiら, 1999; 楳田ら, 2001; 石田ら, 2002)。

#### (2) 底面地形

底面の地形変動の解析には水柱内における底質の体積保存を考慮した Liangら (2005) の式を用いた。

1 正会員 博(工) 金沢大学講師 環境デザイン学系  
1 正会員 博(工) 金沢大学教授 環境デザイン学系  
2 フェロー 工博 金沢大学教授 環境デザイン学系

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{1-n} \left[ \frac{A_{ij}}{J} \frac{\partial q_i}{\partial \xi_j} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_h^H c dz \right) \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $h$  は底面高さ,  $n$  は空隙率,  $H$  は水位,  $z$  は鉛直座標,  $c$  は浮遊砂の体積濃度である. 底質輸送フラックス  $q_i$  は, 掃流砂と浮遊砂の和で評価する.

$$q_i = q_{bi} + q_{si} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, 掃流砂フラックス  $q_{bi}$  および浮遊砂フラックス  $q_{si}$  はそれぞれ次式で求める.

$$q_{bi} = q_b \frac{\tau_i}{|\tau_i|}, \quad q_{si} = \int_{h+\Delta_s}^H u_i c dz \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $\tau_i$  は底面せん断応力,  $q_b$  は単位面積当りの掃流砂量,  $\Delta_s$  は浮遊砂濃度に関する基準点高さである.

**(3) 底質輸送**

掃流砂量  $q_b$  の評価式は数多く提案されているが, ここでは Meyer-Peter・Muller の式を用いる.

$$q_b = \begin{cases} 8\sqrt{g(s-1)d^3}(\theta - \theta_c)^{3/2} & \text{if } \theta > \theta_c \\ 0 & \text{if } \theta \leq \theta_c \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $\theta_c$  は底質の移動限界 Shields 数,  $d$  は底質の中央粒径,  $s$  は底質比重,  $g$  は重力加速度である.  $\theta$  は Shields 数であり, 底面せん断応力を無次元化した値で定義する.

$$\theta = \frac{|\tau_i|}{\rho g(s-1)d} = \frac{u_*^2}{g(s-1)d} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで  $\rho$  は流体の密度,  $u_*$  は摩擦速度である.

平坦床上の移動限界 Shields 数  $\theta_{c0}$  を条件として与え, 底面勾配と流向を考慮して任意地形上の移動限界 Shields 数  $\theta_c$  を評価する.  $\theta_c$  は底質に作用する掃流力・重力・摩擦力の釣合い条件より求める (Kovacs・Parker, 1994).

$$\left| \frac{\theta_c}{\theta_{c0}} a_i + \frac{1}{\tan \phi} b_i \right| = |c_i| \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $\phi$  は底質の安息角,  $a_i$  は底面せん断応力方向の単位ベクトル,  $b_i$  および  $c_i$  は単位鉛直ベクトルの底面に対して接線方向および法線方向のベクトルである.

浮遊砂濃度  $c$  の評価には次の移流拡散方程式を用いた.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u_i - u_{si}) \frac{A_{ik}}{J} \frac{\partial c}{\partial \xi_k} = \frac{A_{ik}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left( \frac{v_s}{\sigma_c} \frac{A_{ik}}{J} \frac{\partial c}{\partial \xi_k} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$u_{si}$  は沈降速度,  $v_s$  は拡散係数,  $\sigma_c$  は乱流 Schmidt 数である. 今回は  $\sigma_c=1.0$  と仮定し, 拡散係数  $v_s$  には Smagorinsky の SGS 乱流モデルによる渦動粘性係数を与えた.

$$v_s = (C_s \Delta)^2 |S_{ij}| \quad \dots\dots\dots (8)$$

$C_s$  は定数 (0.1 とした),  $\Delta$  は格子サイズ,  $S_{ij}$  はひずみ速度テンソルである. 底面付近の基準高さ  $\Delta_s$  における浮遊砂濃度  $c_b$  は Van Rijn (1987) の式を用いて求める. 式中の  $T_*$  と  $D_*$  は超過せん断応力および底質の無次元粒径,  $u_{*c}$  は底質の移動限界摩擦速度,  $\nu$  は動粘性係数である.

$$c_b = 0.015 \frac{dT_*^{1.5}}{\Delta_s D_*^{0.3}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$T_* = \frac{u_*^2 - u_{*c}^2}{u_{*c}^2}, \quad D_* = \left[ \frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} d \quad \dots\dots\dots (10)$$

**3. 連成解析の方法**

本解析では, 次の①～⑦の手順を反復することで, 流れ場, 底質輸送および底面地形を連成的に解き, 局所洗掘の発達過程を再現する. ①流れ場を NS 式および圧力に関する Poisson 方程式を利用して解き, 速度と圧力を求める. ②摩擦速度やひずみ速度テンソルを計算して, 浮遊砂濃度を式 (7) ～ (10) より求める. ③底質輸送フラックスを式 (2) ～ (6) より求める. ④底面高さの変化量を式 (1) より求め, 底面地形を変化させる. ⑤底質の安息角を越える急勾配斜面の形成の有無を調べる. 急勾配斜面が発生した場合, 斜面勾配が安息角に等しくなるように周辺の底面地形を修正する. その際は底質の体積保存を満足するように修正量を決める. ⑥底面近傍の最小格子幅を固定して, 鉛直方向に格子点を再配置することで, 更新された底面地形に適合した格子点を作成する. ⑦時間を 1 ステップ分  $\delta t$  進め, 各格子点の移動速度を求める.

数値安定性を良くするために, NS 式と式 (7) の時間積分には陰的 Euler スキームを用いた. 式 (1) の時間積分には陽的 Euler スキームを用いた. 空間差分に関しては, 対流項には Kawamura・Kuwahara (1984) の 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適用した.

**4. 振動流中の小口径円柱周辺洗掘の 3 次元解析**

**(1) 解析条件**

一様な砂質地盤上に設置された直立円柱周辺の振動流場を対象に, 渦流れの発達に伴う局所洗掘の進行過程を解析する. 底質や流れ場の条件は, Sumer ら (1992) の波による洗掘実験とほぼ対応するように設定した. 実験では幅 4m, 長さ 28m, 深さ 1m の造波水槽が用いられ, 円柱直径  $D=10$  cm, 砂の中央粒径  $d=0.18$  mm, 水深  $H=40$  cm である. 周期  $T=4.5$  秒の規則波を作用させ, 主流域の最大流速  $U_m=32.6$  cm/s, 最大摩擦速度  $u_{*m}=1.9$  cm/s である. Reynolds 数は  $Re=33000$ , Keulegan-Carpenter 数は  $KC=14.6$  になる. 円柱から十分離れた地点においても底質が移動する動的洗掘状態にあり, 円柱周辺に逆円錐形状の洗掘孔が形成された. 最終洗掘深  $S_c$  は約 2.2 cm に達し,  $S_c/D=0.22$  であった (約 800 周期後).

上記の実験条件より底質の移動限界 Shields 数と沈降速度  $u_{s3}$  を Soulsby (1997) の実験式から推定し, 解析条件として  $\theta_{c0}=0.05$  と  $u_{s3}/U_m=0.06$  を与えた. また, 底質の安息角  $\phi=30^\circ$ , 空隙率  $n=0.3$ , 比重  $s=2.65$  とした.

初期の解析格子は円柱壁面や底面の境界形状に適合し

た円筒型格子で、周方向94点、半径方向82点、鉛直軸方向44点配置した。境界層内に4点の格子を常に確保し、解析領域の範囲は半径方向に円柱直径の約30倍にした。計算の時間刻みは $\delta t = T/2000$ とした。初期条件は静水状態とし、正弦振動流を発生した。境界条件は次のように設定した。円柱表面や底面では、速度は滑りなしの条件を与え、圧力は境界層近似に基づいて外挿した。濃度と底面高さも同様に円柱表面で法線方向に勾配ゼロの条件を課した。水面は滑り条件の固定境界とした。円柱から離れた解析領域の外縁境界でも空間勾配ゼロの条件を与えた。また、浮遊砂濃度の基準高さは $\Delta_s = 5d$ とした。

## (2) 流況と洗掘の発達過程に関する解析結果・考察

図-1は洗掘開始から10周期後における流況、底面せん断応力、浮遊砂濃度および底面の洗掘状況を示す。半周期毎に1組の渦対が発生・放出される渦流れパターンが形成されており、後流渦の干渉過程はWilliamson (1985)の流れの可視化実験の結果と整合する。馬蹄形渦は上流側の円柱根元付近に形成され、振動流の反転と共に側を変えながら発生と消滅を繰り返す。後流渦、馬蹄形渦および円柱周辺部での縮流の影響下において底面せん断応力が増加する。その値は、洗掘初期段階において、円柱から離れた主流域下の最大底面せん断応力の約4~5倍に達する。なお、主流域下の最大底面せん断応力の解析結果 $\theta = 0.11$ は、Sumerら (1992)の実験結果 $\theta = 0.13$ より

若干小さいものの、移動限界Shields数 $\theta_{c0} = 0.05$ より十分大きく、解析結果は動的洗掘条件を満足している。なお、主流域の水平流速の鉛直分布は平面に沿う振動境界層の理論解とほぼ等しい状態であった (Yuhira, 1999)。

発達した後流渦では、底面付近の流れは渦中心部に向かって収束し (図-1 (b)), 水面付近の流れは渦中心部から発散して (図-1 (a)), 渦内部では上昇流が支配的となる。渦下の底質は巻き上げられ浮遊し、渦の運動に伴って浮遊砂は移流・拡散する様子が捉えられていることが浮遊砂の濃度分布等から確認できた。洗掘開始10周期後の時点では底面地形変動は円柱周辺部に限られ、洗掘は円柱肩部を中心に壁面に沿って広がり、円柱側面付近には堆積域が僅かに形成される。

洗掘地形の発達状況を図-2に示す。円柱根元部分の侵食が進行するに従って円柱側面にあった堆積域は消滅し、円柱周辺の洗掘孔は底質の安息角と同じ斜面勾配を持つ逆円錐形状に近づくとともに、洗掘孔の外縁部には砂漣地形が徐々に形成される様子が分かる。この解析結果は洗掘孔外縁部付近において地形の起伏が若干激し過ぎる傾向が見られるものの、洗掘孔の概形および動的洗掘状態における砂漣の形成状況はSumerら (1992)の実験観測結果と整合しており、今回のモデル構成でも、洗掘の進展過程を定性的に良く再現しうることが確認できた。

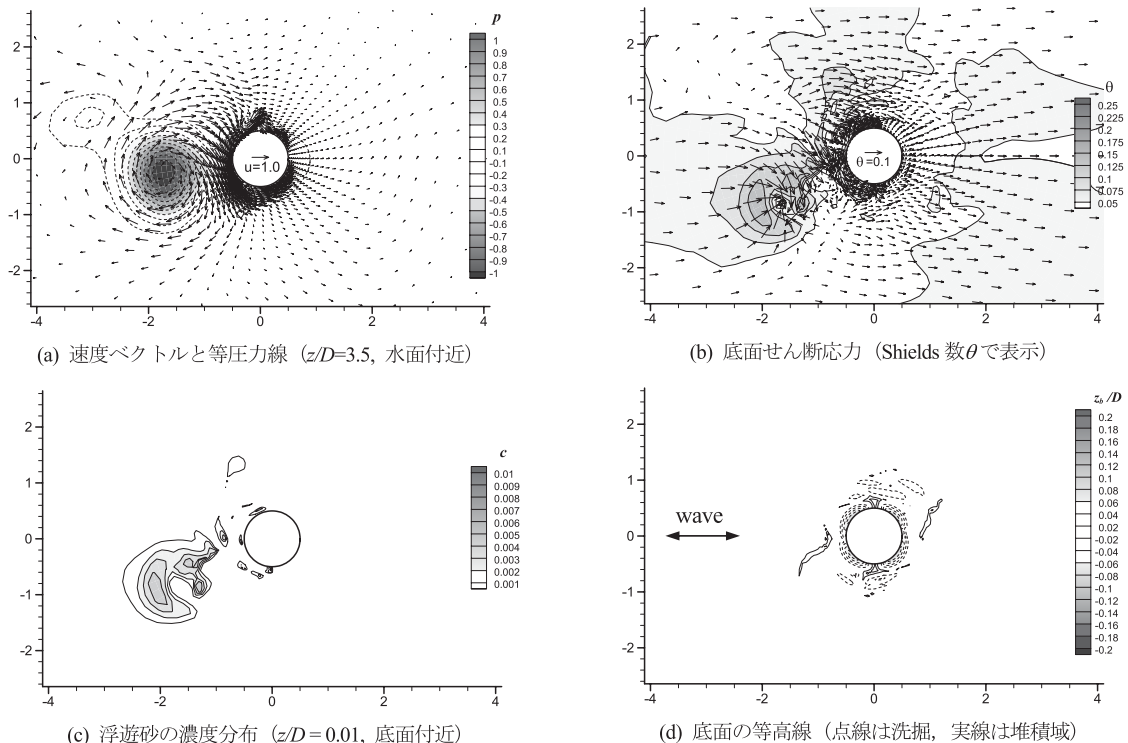
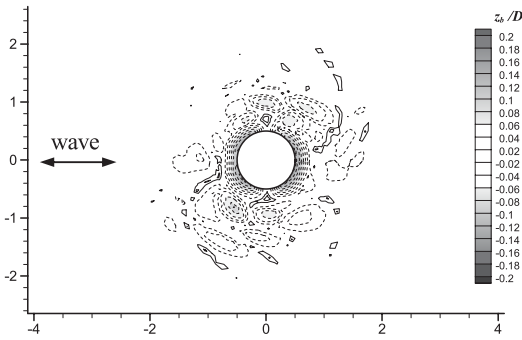


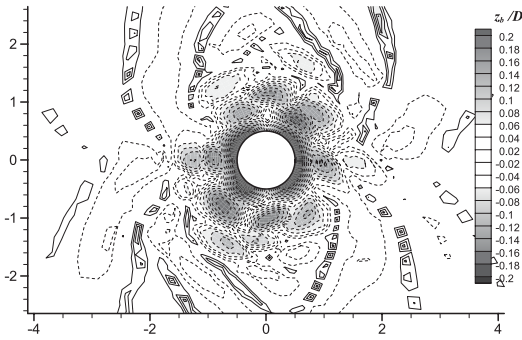
図-1 洗掘開始から10周期後の流況、底面せん断応力、浮遊砂濃度および底面地形 ( $t/T=10$ , 等高線の点線部は負値)



一方で、洗掘の進行に関する定量的な再現性に関しては課題が確認された。図-3は洗掘開始から100周期までの円柱表面の各固定点での洗掘深 $S_{0-180}$ および空間的な最大洗掘深 $S_{max}$ ・堆積高 $De_{max}$ の時間変化を示す。洗掘は円柱肩部( $S_{45}$ ,  $S_{135}$ )から始まり、約7周期以降になると円柱岸沖よどみ点( $S_0$ ,  $S_{180}$ )でも洗掘が始まる。一方、円柱側面部( $S_{90}$ )においては洗掘初期段階に円柱肩部で侵食された底質の一部が堆積する。その後、円柱よどみ点で洗掘が開始する頃、円柱側面の堆積物は侵食傾向に転じ、洗掘は30周期前後から円柱側面でも始まる。最大洗掘深は初期段階で急激に増加するものの、徐々にその増加率が減少する。最大堆積高さも同様の傾向を示す。図-3に示したSumerら(1992)の実験結果と比較すると、本解析では洗掘の深さや進行速度が過大評価されていることが分かる。この原因は波動場と振動流場の現象の相違および乱流や底質輸送過程のモデル化に起因する課題等が考えられるが、現時点ではその原因を特定するには至っておらず、その説明および対策は今後の研究課題としたい。なお、最終洗掘深はKC数で整理されることが多いが、既往の関連研究(Sumerら, 1992; 小林ら, 1993)を参照すると、最終洗掘深に関する実験結果は大きなばらつきを示しており、こうした点も含めて検討を進める必要がある。



(a) 洗掘開始30周期後 ( $t/T=30$ )



(b) 洗掘開始100周期後 ( $t/T=100$ )

図-2 洗掘地形の発達状況 (点線は洗掘, 実線は堆積)

(3) 底質輸送モデルの影響に関する解析結果・考察

次に、本解析での地形変化に対する掃流砂と浮遊砂の寄与度を推測するために、同一の解析条件に対して、底質輸送フラックスとして掃流砂と浮遊砂の両方、掃流砂または浮遊砂のみをモデル化した3つの場合の解析を行った。図-4は、底質輸送モデルの相違による最大洗掘深の変化である。洗掘深や進行速度は浮遊砂のみ、掃流砂のみ、両方の順に大きくなり、本解析においては浮遊砂より掃流砂による底質輸送が洗掘深に大きな影響を与えることが分かる。

図-5は掃流砂および浮遊砂モデルのみの場合の100周期後の洗掘地形の解析結果を示すものである。掃流砂モデルのみの場合、図-2(b)に示した掃流砂・浮遊砂混成モデルの結果に比べて最大洗掘深が15%前後減少するものの、円柱周辺の洗掘孔の形状や砂連の発生状況は混成モデルの結果と類似する。一方、浮遊砂モデルのみの場合、最大洗掘深が混成モデルに比べて40%前後も減少し、砂連は形成されない。洗掘深やその進行速度は底質輸送モデルによって異なるが、円柱近傍の洗掘地形は3者とも類似し、洗掘孔が逆円錐形状に近づくことが確認できる。

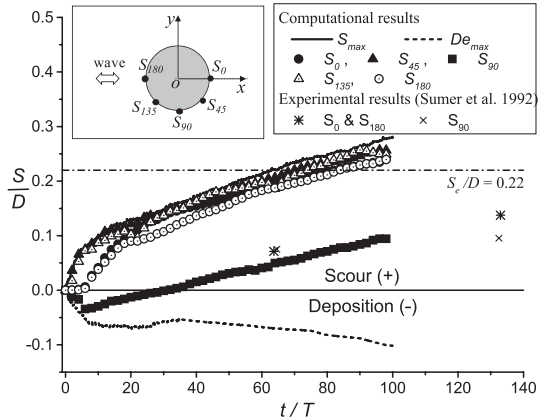


図-3 最大洗掘深・堆積高および円柱周辺の洗掘深の時間変化

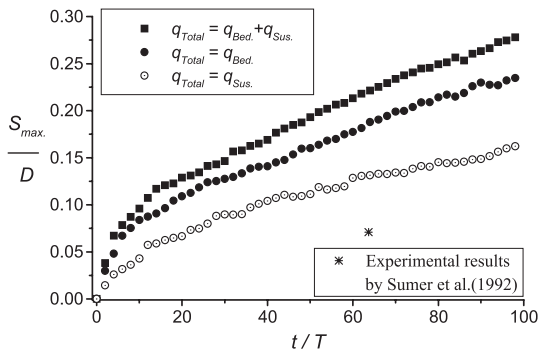


図-4 底質輸送モデルの違いによる洗掘深の変化

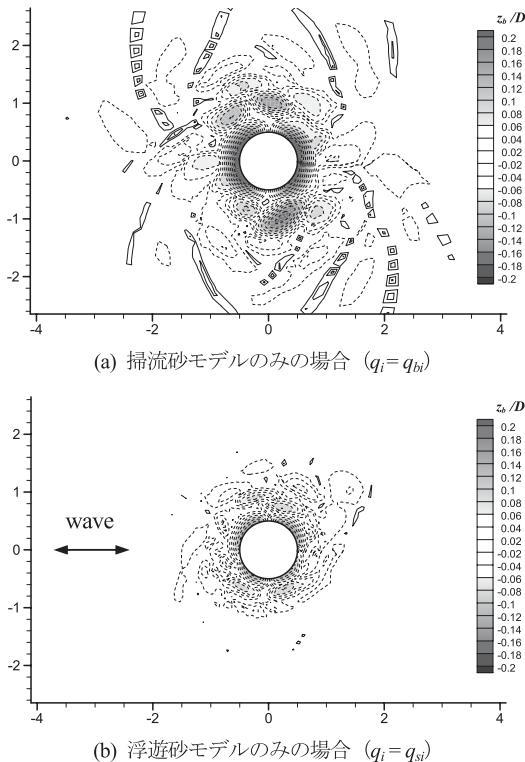


図-5 底質輸送モデルによる洗掘状況の違い ( $t/T=100$ )

## 5. おわりに

移動一般曲線座標系 Navier-Stokes 方程式に基づく流体解析モデルに掃流砂・浮遊砂の両形態の底質輸送モデルおよび水柱内の底質の体積保存を考慮した底面地形モデル等を連続的に組み込んだ3次元流体・底質輸送・地形変動解析モデルを開発し、振動流場における小口径直立円柱周辺の流れと洗掘現象に関する数値解析を行った。

解析結果は既存の洗掘実験で観測されている動的な洗掘地形の発達過程、洗掘孔の形状、砂連の形成、渦流れパターンおよび底質輸送状況等の主要な特徴を定性的に良く再現することができた。しかしながら、最大洗掘深や洗掘の進行速度は過大評価されることが分かった。

本解析モデルでは、式形の簡便単さを主眼に、定常流場で評価された掃流砂量式 (4) および浮遊砂濃度式 (9) を振動流場に援用したが、今後は非定常流に対して信頼性の高い評価式を導入し、様々な洗掘条件に対する適用性を検討する必要がある。また、計算には1周期当り約2時間 (CPU: Xeon 5160/ 3.0GHz) 費やすため、今回は洗掘平衡状態の結果に達していない。流れ場と地形変動の時間スケールの違いを考慮して、計算時間を短縮するこ

とも今後の課題の一つである。

**謝辞:** 本研究を進める上で H. Oumeraci 教授 (ブラウンシュバイク工科大学) には波浪場における洗掘現象に関して貴重なご助言を賜りました。また、本研究の一部は、科学研究費補助金 (課題番号: 19760335) の補助を受けました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 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・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, 第48巻, pp.796-800.
- 榎田真也・由比政年・石田 啓 (2006): 直立円柱周辺の3次元流体場および局所洗掘の数値解析, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.756-760.
- 小林智尚・小田健次・神崎正美・橋本康弘 (1993): 円柱まわりの局所洗掘の発達過程に関する実験, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.521-525.
- 長田信寿・細田 尚・中藤達昭・村本嘉雄 (2001): 円柱周りの流れと局所洗掘現象の3次元数値解析, 水工学論文集, 第45巻, pp.427-432.
- Jensen, J.H. and J. Fredsoe (2001): Sediment transport and backfilling of trenches in oscillatory flow, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 127(5), pp. 272-281.
- Kawamura, T. and K. Kuwahara (1984): Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, AIAA paper-84-0340.
- Kovacs, A. and G. Parker (1994): A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels, *J. Fluid Mech.*, Vol. 267, pp. 153-183.
- Liang, D., L. Cheng. And F. Li (2005): Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents Part II. Scour simulation, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp. 43-62.
- Liang, D. and L. Cheng (2005): Numerical model for wave-induced scour below a submarine pipeline, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 131(5), pp. 193-202.
- Rouland, A., B. M., Sumer, J. Fredsoe and J. Michelsen (2005): Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *J. Fluid Mech.*, Vol. 534, pp. 351-401.
- Soulsby, R. (1997): *Dynamics of Marine Sands*, Thomas Telford, London, 272 p.
- Sumer, B.M., J. Fredsoe and N. Christiansen (1992): Scour around vertical pile in waves, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 118(1), pp. 15-31.
- Sumer, B.M. (2007): Mathematical modeling of scour: A review, *J. Hydraulic Research*, Vol. 45(6), pp. 723-735.
- Van Rijn, L.C. (1987): Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport, Delft Hydraulic Communication No. 382.
- 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 sinusoidal oscillatory flow around a vertical wall-mounted circular cylinder, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 41(3 & 4), pp. 225-246.