潮汐と波浪外力による 干潟域の流動・地形変化の数値計算 NUMERICAL SIMULATION OF TIDAL CURRENT AND TOPOGRAPHY CHANGE CAUSED BY WAVE AND TIDE

高橋俊之¹・陸田秀実²・新井洋³・土井康明⁴ Toshiyuki TAKAHASHI, Hidemi MUTSUDA, Hiroshi ARAI and Yasuaki DOI

¹正会員 修(工) 復建調査設計株式会社 環境技術部(〒732-0052 広島市東区光町二丁目10-11)
²正会員 博(工) 広島大学助教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)
³学生会員 広島大学工学部第四類 (同上)
⁴正会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

The quantity of silt-clay in soil is very significant for benthos to live, so a simulation technique which can predict the movement of soil included silt-clay will be effective to develop tidal flat. In this paper, we took the interaction between fluid and soil into consideration, and calculated to verify how soil and fluid move under tidal current, wind wave, and both of them by "N-dispersed phase two flow model", which can deal with N kinds of soil movement classified by particle size and density. We employed Radiation Stress to consider wind wave force to flow. Calculation results shows that this model can reproduce 3-dimensional soil distribution, and process of seabed being flooded and dried up automatically. In the case considered tide and wind wave, the horizontal velocity becomes stronger, and the change of vertical distribution of soil size changes toward soil surface.

Key Words : Artificial tidal flat, (NP+2)-Field Model, wind wave, tidal current, interaction, Silt-clay, numerical simulation

1.序論

近年,閉鎖性海域における干潟再生プロジェクトが活 発に議論されている.干潟における底生生物の生息に とっては,シルト粘土の含有量が重要である¹⁾ことが指 摘されており,干潟を造成する場合,シルト粘土分を含 めた干潟土壌の挙動に関する予測技術を確立することが 緊急の課題となっている.

加藤ほか²は,干潟域を解析対象とした粒度変化につ いて検討しており,粒度分布が正規分布すると仮定し, N種類の粒度分布を確率密度関数により表現している. 海外では,大規模スケールに対して,Euler型モデルであ るECOMSED³⁾が適用されることが多く,土砂輸送につ いて浮遊・沈降過程が考慮されたモデルである.しかし ながら,土砂と流体との物理的な相互作用は考慮されて いない.

後藤ほか⁴はLagrange型の固液二相流モデルにより, 粒子間相互の物理過程を考慮した粒子の挙動解析を行っ ているが,干潟のような細粒分を多量に含む現地への適 用は現実的には計算コスト面から困難である. これらに対して,著者ら⁵は,現地スケールへの適用 を念頭に,Euler型モデルとLagrange型モデルの利点を融 合したN分散相二流体モデルに基づく流砂・漂砂数値シ ミュレーションモデルの開発を行っており,干潟域の干 出・冠水過程及び粒子間の相互作用まで考慮した土壌粒 径別の挙動を取り扱うことが可能となっている.計算に おける外力は潮汐のみで,波浪については取り扱ってい ない.

干潟勾配は数百分の1~千分の1のオーダーであり,波 浪によるシルト粘土分の巻き上げや質量輸送が存在し, 干潟生物への生息環境に対しては,波浪による干潟土壌 の分布への影響は重要であると考えられる.

本研究では,著者ら⁵によるN分散相二流体モデルを 基本として,潮汐と波浪外力による干潟特有の流動・地 形変化現象の再現に加え,土壌分布への影響を把握する ことを目的とし,その適用性について検討を行った.

2.N分散相二流体モデル

N分散相二流体モデルは,混相流体場を連続液相,連

続気相,粒子分散相(土壌粒径によってN種類に分類可能)の3種類に分けて取り扱うものである.本研究では, 干潟域の混相流体場として,干潟土壌粒子群で構成され る粒子分散相及び液体で構成される連続液相を対象とし たEuler型モデルを基本とし,支配方程式の構成に当たっ ては,Tomiyamaほか⁶によって提案された(NP+2)-Field Modelを参考にした.支配方程式については以下に示す とおりである.

(1) 相体積率

干潟域における混相流体場の連続液相,連続気相,粒 子分散相をそれぞれ,下添え字でL,G,dm(m=1,2,・・・ N:N種類の分散相)として表すと,相体積率αは以下 の関係式が成り立つ.

$$\alpha_L = \begin{cases} 1 & 液 & l \\ 0 & 粒子分散 l \end{cases}$$
(1)

$$\sum_{m=1}^{N} \alpha_{dm} = \begin{cases} 0 ~ 液 ~ 相 \\ 1 ~ 粒子分散相 \end{cases}$$
(2)

また,これらの相体積率には以下の関係式が常に成り 立つものとする.

$$\alpha_L + \sum_{m=1}^N \alpha_{dm} = 1 \tag{3}$$

ここで, 左辺第一項は連続液相の相体積率, 左辺第二 項は粒子分散相の相体積率(N種類の粒子分散相相体積 率の総和)である.なお,連続気相については,連続液 相と補完関係にあるものとして,連続気相については省 略する.さらに,空隙がある土壌については解析対象と していない.したがって,気液及び固気の相互作用につ いては無視することとする.

(2) 支配方程式

N分散相二流体モデルにおける支配方程式は,式(4)~ (7)に示すとおりであり,分散相質量保存,分散相運動量 保存,連続液相質量保存,連続液相運動量保存により構 成される.分散相については,N種類(m=1,2,・・・N)を 扱うことが可能であるから,N種類を取り扱う場合はN 個の粒子に対する質量保存,運動量保存,及び連続液相 の質量保存,運動量保存を連立させて解くこととなる.

干潟土壌に相当する粒子分散相について,N種類の土 壌粒子を考慮する場合は,現地の土壌の空間的な粒度組 成から初期設定できるものとする.また,各分散相の移 流方程式によって,N種類の粒径粒子を個別に追跡する とともに,相体積率の総和から干潟の地形変化及び干 出・冠水領域の直接的な表記が可能となっている.

解析においては,非圧縮流体を仮定した各相の平均化 方程式を,静水圧近似した準三次元モデルとして取り 扱った.

$$\frac{\partial \alpha_{dm}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\alpha_{dm} V_{dm} \right) = R_{dm} \tag{4}$$

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\alpha_L V_L \right) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial V_{dm}}{\partial t} + V_{dm} \cdot \nabla V_{dm} = -\frac{1}{\rho_{dm}} \nabla P + F_{\mu dm} + g$$

$$-\frac{1}{\rho_{dm}\alpha_{dm}} \left(M_{Ldm} + M_{\gamma dm} + M_{Rm} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_L}{\partial t} + V_L \cdot \nabla V_L = -\frac{1}{\rho_L} \nabla P + F_{\mu L} + F_s + g$$
$$+ \frac{1}{\rho_L \alpha_L} \sum_{m=1}^{N} (M_{Ldm} + M_{\gamma dm})$$
(7)

ここに、 V_{dm} , V_L はそれぞれ粒子分散相・連続液相 の流速, R_{dm} は分散相間における分裂・合体による正 味の体積輸送, M_{Ldm} は抗力・仮想質量力などの分散 相・連続液相間の相間運動量輸送項, M_{ydm} は分散相か ら連続液相への正味の体積輸送に伴う運動量輸送, M_{Rm} は分散相間の合体・分裂に伴う正味の体積輸送に 伴う運動量輸送(無視), $F_{\mu L}$ は粘性拡散項, F_s は表 面張力項, g は重力加速度である.なお,本研究では, N種類の分散相及び連続液相の相互作用としては,抗 力・仮想質量力などの分散相・連続液相の相間運動量輸 送項 M_{Ldm} のみ考慮することとした.なお,粒子間相 互作用については,現時点では透過係数を用いて簡略化 した.

(3) 分散相・連続液相間の相互作用項の取り扱い

本研究では,相互作用項M_{Ldm}は以下の式で表した.

$$M_{Ldm} = \beta \gamma \left(V_{dm} - V_L \right) \tag{8}$$

ここで, γ は分散相・連続液相間の相互作用係数, β は流体抵抗係数であり,高濃度域及び低濃度域に対して C.Y.Wen・Y.H.Yu⁷⁾, S.Ergun⁸による式を用いた.

$$\beta = \begin{cases} \frac{\mu(1-\alpha_L)}{d_P^2 \alpha_L} [150(1-\alpha_L)+1.75R_{eP}] & (\alpha_L \le 0.8) \\ \frac{3}{4}C_D \frac{\mu(1-\alpha_L)}{d_P^2} \alpha_L^{-2.7}R_{eP} & (\alpha_L > 0.8) \end{cases}$$

(9)

また, C_D は単一球に対する抵抗係数, d_P は粒子径であり, R_{eP} は以下のとおり表される.

$$R_{eP} = \frac{\left|V_{dm} - V_L\right| \alpha_L d_P}{\nu} \tag{10}$$

(4) 海底面の追跡

混合m粒径の平均的な底面の追跡については,粒子分

散相の相体積率を以下の保存型移流方程式で時間発展させることにより追跡した.

$$\frac{\partial < \overline{\alpha} >}{\partial t} + \sum_{m=1}^{N} \nabla \cdot \left(\alpha_{dm} V_{dm} \right) = 0 \tag{11}$$

ここに,<
$$\overline{lpha}$$
>= $\sum\limits_{m=1}^N lpha_{dm}$ である.

また, 圧力 P は1 圧力2流体モデルの考え方から, 粒子分散相と連続液相において同一とし, 粒子分散相内部 での粘性応力や乱流応力は,相間運動量や圧力勾配に比 べて非常に小さく, 無視できるものとした.

(5) 波浪外力の算定

波浪外力による潮汐流動場への影響を把握するために 式(12)に示すradiation stress項を鉛直積分した式(7)の右辺 項に追加した.また, radiation stress項の算定にあたって は,事前に波浪変形計算を実施し,求まった平面的な波 高・周期・波向の分布を用いて算定した.波浪変形計算 に使用したモデルは,緩勾配方程式に放物型近似を施し たものであり,浅水変形,屈折,回折,砕波を取り扱え る.

$$R_{i} = \frac{1}{\rho_{L}(\overline{\eta} + h)} \left(\frac{\partial S_{ij}}{\partial x_{j}} \right)$$
(12)

ここに, h は平均水深, ŋ は水位変動量である.

ここに, S_{xx} , S_{xy} , S_{yx} , S_{yy} はradiation stress項, E は波の エネルギー, C, C_g は波速及び群速度, α は波向き角 度, H は波高, T は周期, k は波数である.

$$S_{xx} = E\left\{\left(\frac{C_g}{C} - \frac{1}{2}\right) + \frac{C_g}{C}\cos^2\alpha\right\}$$
(13)

$$S_{yy} = E\left\{\left(\frac{C_g}{C} - \frac{1}{2}\right) + \frac{C_g}{C}\sin^2\alpha\right\}$$
(14)

$$S_{xy} = S_{yx} = E \frac{C_g}{C} \sin \alpha \cos \alpha$$
(15)

$$E = \frac{1}{8}\rho_L g H^2, C = \frac{gT}{2\pi} \tanh kh, C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2h}{\sinh 2kh} \right)$$
(16)

(6) 格子系と相体積率α

格子系及び相体積率 α の概念は図-1に示すとおりであ り,各相の相体積率は領域において気相領域($\alpha_L = 0$, $\Sigma \alpha_{dm} = 0$),領域及びは固液混相領域($0 < \alpha_L = 1$, $0 < \Sigma \alpha_{dm} = 1$),領域において($\Sigma \alpha_{dm} = 1$)である.

本モデルにおける固定境界は,気相領域上端及び不透 水地盤で設定し,自由水面及び土壌界面は移動境界とし て取り扱う.その移動境界の追跡にあたっては,先に示 した式(4),式(5)によって追跡することから,干出・冠 水に伴う自由水面と干潟土壌面が交差することから,自動的に干出・冠水過程を再現することが可能である.また,干潟の地盤形状も式(11)によって追跡可能である.



3.計算条件

(1) モデル地形及び潮位条件

図-2は本モデル地形における不透水面(計算領域下 端)を示したものであり,干潟域における地下の不透水 面を把握することは困難であることから,仮想的に設定 した.粒子分散相(透水層)はその上面に,静水面 (*z*=0)から1.0m下に一様な平坦面として与えた.座 標軸は,計算領域沖側を原点とした.

潮位条件は図-3に示すとおりである.潮位振幅2.0mで 半日周期の変動を計算領域の左右端及び沖側において開 境界条件として与え,岸側は固定境界とした.また,計 算対象域は,x方向(沿岸方向)4.5km~10.5km,y方向 (岸沖方向)6km~15kmとし,以降ではこの領域の計算 結果について議論する.





(2) 波浪外力条件

波浪外力条件は,計算領域沖側において,波高0.3m, 周期1.52s,波向30°(y軸に対して)を与え,先に述べ た波浪変形計算モデルによって求めた波高,周期,波向 より,沿岸方向及び岸沖方向のradiation stressを求めた. ここで,潮汐変動による流動場へのradiation stressの付加 においては,その定義が水面高さを一定とした平均場で の応力であることから,潮汐変動の時間ステップ毎に求 めるのではなく,1時間毎に水位を一定としてradiation stressの更新計算を行った.

(3) 計算時間,相体積率,外力条件

計算時間は,計算初期においてはスピンアップ期間を 2日間とし,その後4日間の計算を行ったので,合計12潮 汐(6日間)の時間積分を行った.したがって,3日目以 降に潮位振幅2.0mの定常状態となる.

粒子分散相の設定においては,本来ならば現地干潟土 壌の粒度組成から設定するが,今回は3種類の粒子分散 相を対象とし,各分散相の粒子径は,細砂:0.5mm,シ ルト:0.075mm,粘土:0.005mmとした.土壌密度はそ れぞれ2700kg/m³,2650kg/m³,2600kg/m³とした.さらに, 計算初期における分散相の相体積率は細砂: α_{d1} =0.7, シルト: α_{d2} =0.2,粘土: α_{d2} =0.1とし,それぞれの透 過係数は細砂:10⁵,シルト:10⁶,粘土:10⁸とした.

格子数は50×50×10とし,水平方向は直交格子で 300m×300m,鉛直方向は0.2m~0.9mとした.

計算ケースは表-1に示すとおりであり,波浪外力の付加による流動場や地形変化への影響を把握するために, 外力条件を変更した3ケースについて計算を行った.時間ステップは外部モード2.0s,内部モード10.0sとした.

表-1 計算ケース

Case No.	外力条件
Case1	潮汐のみ
Case2	波浪場のみ
Case3	潮汐+波浪場

4.数値計算結果

図-4,図-5はそれぞれcase1~case3における水平方向 の流速分布を示している.図中に示すSt.1及びSt.2は干潟 表面付近のモニタリングポイントである.

上げ潮 (1/12T) における流速分布について, case1と





case3を比較すると,波浪を考慮したcase3ではcase1に比 べて流速が大きくなっている.これは,長周期(半日周 期)の潮汐変動に加えて,波作用下での水位変動による 水面勾配が生じるためである.また,case2ではcase1, case3と比較して小さくなり,岸側では離岸流が発生し ている.干出時(10/12T)においては,case1,case3に おいて流速は小さくなり,図中の赤点線で示す干出域が 陽的に再現されている.なお,case2は潮位変動がない 条件で計算した結果である.

図-6,7は相体積率の時系列変化を示しており,連続 液相と分散相の相体積率が逆位相で変動している.沖側 St.1では,潮汐変動があるcase1,case3において,緩やか に土壌が減少するが,case2では変化がほとんど見られ ない.岸側St.2では,case2において連続液相と分散相の 相体積率は潮汐の影響を受けずに変動し,相体積率の上 下動は地形変化の影響によるものと考えられる.また, case3ではcase1よりも相体積率の変動が大きく,潮汐に よる往復流に加えて波浪効果が現れたものと考えられる.

図-8は式(11)により求めた干潟土壌面の鳥瞰図 (case3:上げ潮時)であり,岸側境界付近では左右非 対称になっていることが分かる.

図-9~11は上げ潮時の土壌質量百分率の鉛直分布であ り,凡例は図-3のy軸を示す.質量百分率はグリッド毎 の相体積率から土壌の全質量を求め,各粒子の質量*n_{dm}* (*m*=1,2,3)との比をとった.算定式は以下に示すと おりである.

$$n_{dm} = \frac{\rho_{dm} \alpha_{dm}}{\rho_{d1} \alpha_{d1} + \rho_{d2} \alpha_{d2} + \rho_{d3} \alpha_{d3}}$$
(17)

グラフ横軸は,計算初期と12潮汐目の質量百分率の偏 差を,縦軸は静水面からの深さを示している.これより, case1では岸沖方向に見た粒径の鉛直分布はわずかに変 化する程度で, case2ではほとんど変化しない. 一方, case3では表層に近いほど細砂は増加傾向, シルト粘土 分は減少傾向となり, 鉛直方向の粒度分布の違いが生じ ていることが分かる.また,岸側(11km, 12km)に着目 すると,シルト粘土分の質量百分率はほとんど変化しな い,あるいは微増傾向であることが分かる.したがって, 波浪を考慮することによって,土壌粒度の分級が岸沖方 向及び鉛直方向に変化することが分かる.

図-8 干潟土壌面の3次元空間分布(case3上げ潮時:1/12T)

5.結論

本研究で得られた主な結果は以下のとおりである.

・相体積率の移流方程式によって,干潟域の干出・冠 水過程を陽的に取り扱うことが可能である.

・潮汐と波浪を考慮した場合の水平方向流速分布は, 潮汐のみの場合と比較して大きくなる.

・波浪を考慮することで,相体積率の変動が大きくなる,すなわち,地形の変動が大きくなる.

・潮汐と波浪を考慮した場合,土壌の鉛直分布は,岸

沖方向にシルト粘土と細砂の分布に差異が見られ, シルト粘土は沖側で減少傾向,細砂はその逆となる. しかし,波浪条件や地形形状の違いによって,水平 方向の粒径分布傾向も変化してくるものと考えられ る.また,鉛直方向の格子分割サイズが大きくなっ た場合,同じ時間ステップに対して鉛直流速が大き く評価されると考えられる.

今後の課題として, CFL条件の設定,相互作用項の高 精度化,実海域における検証を行う必要がある. 謝辞:本研究は科学研究費補助金(課題番号: 16760411)の助成によるものであり,ここに謝意を表する.

参考文献

- 李正奎・西嶋渉・岡田光正:干潟造成における立地選定と 土壌構造を決定する因子に関する研究,水環境学会誌, Vol.2243, pp.1206-1209, 1999.
- 2)加藤一正・田中則男・灘岡和夫:干潟上潮流計算及び干潟 変形予測の手法,港湾技術研究所報告,第18巻4号,1979.

 ECOMSED : HydroQual, Inc, Environmental Hydrodynamic & Sediment Transport,

http://www.hydroqual.com/ehst_ecomsed.html, 2004.4.

- 4)後藤仁志・林 稔・酒井哲郎: 固液二相流型粒子法による 大規模土砂崩壊に伴う水面波の発生過程の数値解析, No.719/II-61, pp.31-45, 2002.
- 5) 陸田秀実・高橋俊之・土井康明:N分散相二流体モデルによる干潟域の流動・地形変化の数値解析,海岸工学論文集, 第52巻(印刷中)
- Tomiyama, A. and Shimada, N.: (NP+2)-Field modeling for bubbly flow simulation, *Comp. Fluid Dynamics J.*, 9-4, 418-426, 2001.
- C. Y. Wen. and Y. H. Yu.: Mechanics of fluidization, *Chem. Eng. Prog. Symp.* Ser., 6, 100-111, 1966.
- S, Ergun.: fluid flow through packed columns, *Chem. Eng. Prog.*, 48, 89-94, 1952.

(2005.9.30受付)