

干潟の地形変化モデルの現地適用性 に関する研究

APPLICATION OF SIMULATION MODEL FOR COHESIVE SEDIMENT
TRANSPORT AND BOTTOM TOPOGRAPHY CHANGES TO TIDAL FLAT

三島豊秋¹・山下隆男²・駒口友章³・フィトリ リアンディニ⁴

Toyoaki MISHIMA, Takao YAMASHITA, Tomoaki KOMAGUTI and Fitri RIANDINI

¹正会員 博（工）広島大学客員研究員（株）碧浪技術研究所（〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1）

²正会員 博（工）広島大学教授 大学院国際協力研究科（〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1）

³正会員 工博（株）碧浪技術研究所（〒111-0041 東京都台東区元浅草一丁目17-15）

⁴ Dr. Eng., Ministry of Public Work, Indonesia.

Simulation model for bottom topography changes in tidal land are applied to field data. A formulation for settling velocity in cohesive sediment transport model is described through a flocculation model that includes the effect of turbulence-induced aggregation and floc breakup. Firstly, wet-dry scheme is applied into the simulation model to incorporate the effect of tidal flat to make clear the tidal circulation properties in North Ariake Sea. Secondly, bottom topography change model is applied to bottom topography changes in navigation channel and tidal flat. These simulation results show that the simulation model in this study is effective to predict bottom topography changes due to only tidal-induced current in tidal flat.

Key Words : *cohesive sediment transport, flocculation, consolidation, bottom topography changes, tidal land*

1. 緒 言

かつては東京湾および大阪湾沿岸でも多くの干潟が存在していた。しかしながら、現在では埋立などによる開発に伴い、それらの多くは消失しつつある。底生生物およびそれを捕食する生物などの多様な生物の生息場所である干潟は、生物環境および水産資源の保全の対象として重要なエリアである。また、そこに生息する底生生物によるプランクトンおよびデトリタスなどのろ過・捕食効果の消失は、周辺海域の水質および生物環境へ影響を及ぼすと考えられているため、近年になり環境保全の観点からの干潟の重要性が認識されるようになってきている。実際、現在全国的に展開されている自然再生事業においても、干潟の再生もしくは人工干潟の造成がその対象の一つに挙げられている。

このような干潟の再生もしくは人工干潟の造成事業を効果的に実施するためには、精度の高い地形変化予測モデルが必要である。しかしながら、これまでの沿岸域における地形変化の予測は、砂浜海岸を対象としていた。

これは、越波・高潮災害などの防災上および国土保全の観点からの海岸侵食問題の解決が優先されたこともあがあるが、シルトおよび粘土などの干潟を形成する粘着性材料に対する浮遊、沈降および堆積過程のモデル化が困難であったためであると考えられる。粘着性底質の浮遊および沈降過程には、特にエスチャリーに見られる淡水と塩水とが混合する海域において、floc形成による凝集沈降およびCBS層（高濃度浮泥層）の存在などが大きく関与する。さらに、堆積および再浮上過程には堆積した底泥層の圧密による質の変化などが影響するなど、幾つかの現象が複雑に絡んでいる。粘着性底質におけるこれらの現象を統括的に扱うことのできるモデルとして、エスチャリーを対象とする流況モデルであるECOMSED¹⁾に、欧州連合で行われたMASK-IIIのCOSINUMプロジェクトにおける粘着性底質に対する成果^{2),3),4)}を取り込んだ改良モデルが開発されている^{5),6)}。

本研究では、改良されたECOMSEDを有明海の干潟の地形変化に適用することにより、干潟の地形変化モデルとしての現地適用性について検討する。まず、有明海における潮流の数値計算を実施すると同時に、テスト計

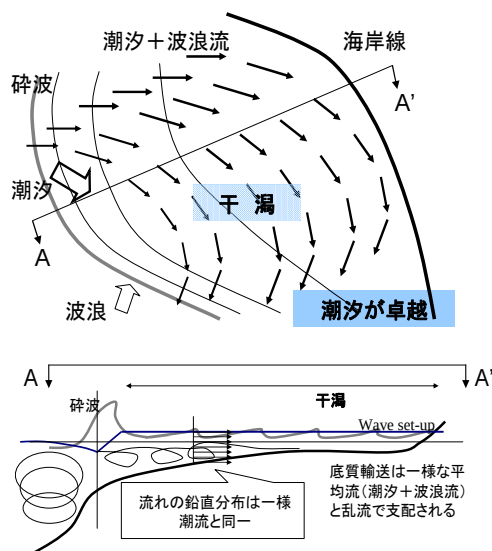


図-1 干潟における流況場の概念図

算として粘着性底質の干潟の滞筋への堆砂特性について数値実験により検討する。さらに、有明海での干潟の地形変化へ適用することにより、改良されたECOMSEDの干潟の地形変化モデルの現地適用性について検討する。

2. 干潟の地形変化モデルの概要

(1) 流況モデルの概要

図-1に干潟における流況場の概念図を示す。干潟形成の条件としては、粘土およびシルト成分を流出する河川が存在すること、および潮汐が卓越した海域であることが挙げられる。干潟では、潮汐の干満によって微細粒子が凝集、沈降および移動して地形変化が生じる。台風および季節風などによる高波浪時には、干潟上で波のエネルギーは碎波により流れ(波浪流)に変わり、潮汐流と足し合わされた強い流れ(または弱い流れ)が発生する。このとき、流れの鉛直分布は一樣であり、潮汐流とほぼ同一であると仮定できる。底質の輸送現象に対しては一樣な平均流(潮汐+波浪流)と乱流運動が支配的な外力要因になる。さらに、この流れは海岸で堰止められ、干潟上の平均海面は上昇する。すなわち、高波浪時には干潟上の水位は上昇し、波浪流と潮流とが同一方向の場合、流れは通常より強くなり、逆方向の場合には流速は弱くなる。このように、干潟上で底質輸送に及ぼす波浪の影響は、水粒子が楕円軌道を描く波動運動としての流れではなく、碎波に伴う平均流的な流れおよび水位上昇として寄与する。

現在、干潟でのこのような流れの場を計算する代表的なモデルとしてECOMSEDがある。ECOMSEDはHydroQual Inc.で開発された海洋モデルPOM (Princeton Ocean Model)⁷⁾のエスチャリー版であり、沿岸域および

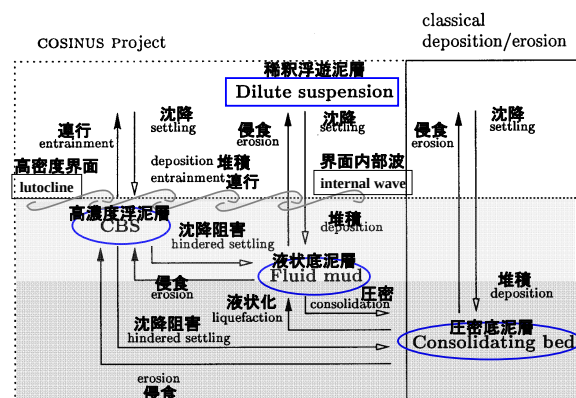


図-2 粘着性底質の挙動の概念図

湖沼での3次元の流体運動および底質輸送を対象とするモデルである。本研究では、移動境界条件を考慮したwet-dry POM⁸⁾のwetting and drying (WAD) schemeをECOMSEDに適用している。

(2) 底質モデルの概要

粘土およびシルトなどの粘着性底質は、河川などの淡水域から塩水域の海域へ流出するとflocが形成され、粒径が大きくなって沈降が加速される。さらに、底層近傍に高濃度浮泥層(CBS)と呼ばれる濃度の高い層が形成され、ここでは沈降阻害が起こることなどが知られている。欧州連合(EU)のMASK-IIIにおいて3年間かけて実施されたCOSINUSプロジェクトにおける大きな成果は、エスチャリーおよび沿岸域におけるそのような粘着性底質の挙動を明らかにしたことである。特に、floc粒子の挙動に関しては、フラクタル理論および乱流との相互作用を前提としたfloc粒子の成長および破壊過程の定式化など新たな見地での成果が得られている。

図-2にCOSINUSプロジェクトの成果である粘着性底質の挙動の概念図を示す。このプロジェクトにおける主な成果は、i) 浮遊底質と乱流との相互作用、ii) flocの成長に及ぼす流れのせん断応力と濃度の関係式、iii) 圧密による堆積層の強度増加機構、iv) 沈降抑制効果による高密度界面の形成、v) 高密度界面に形成される内部波とその不安定化による鉛直混合および乱流の生成、vi) CBS層、fluid mud層および圧密層からなる堆積層のモデル化、およびvii) CBS層・fluid mud層の流動モデル(Bingham塑性体のせん断応力導入)、圧密過程モデル(フラクタル理論によるGibson方程式の変形)などである。なお、CBS層およびfluid mud層は伴にゲル状の高濃度浮泥層であるが、前者はその上層の乱流の影響を受ける乱れを伴うゲル状の浮泥層として定義される。一方、後者のfluid mud層は、乱れを伴わない層流状に流れる浮泥層であり、CBS層から圧密層への遷移層として定義される高濃度浮泥層である。

以下では、COSINUSプロジェクトの成果を取り込ん

だ本研究における底質モデルの特徴であるfloc形成モデルおよび圧密モデルについて概説する。

(3) floc形成モデル^{3,4)}

floc 形成モデルには凝集および破壊過程が導入されている。乱流せん断能力場での粘着性底質の floc 形成の基礎方程式は、Einstein 表記を用い次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ u_i - \delta_{i3} w_s \frac{(1-\phi)(1-c/\rho_s)}{1+2.5\phi} \right\} N \Bigg\} \\ - \frac{\partial}{\partial x_i} \left((D_s + \Gamma) \frac{\partial N}{\partial x_i} \right) \\ = -k_A(1-\phi)Gd_f^3 N^2 + k_B G^{q+1} (d_f - d_p) d_f^{2q} N \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 x_i ：空間座標の*i*成分 ($i=1\sim 3$ であり、 $i=3$ を鉛直座標 z とする)、 N ：数密度、 u_i ： i 成分方向の流速、 w_s ：沈降速度、 ϕ および ϕ ：floc粒子の体積濃度および $\phi=\min(1, \phi)$ 、 c ：質量濃度、 ρ_s ：本来の底質粒子の密度、 D_s ：分子粘性、 Γ ：乱流拡散係数、 G ：乱流減衰率、 δ_{i3} ：Kroneckerデルタ、 d_f および d_p ：floc粒径および本来の底質粒径、 q ：経験定数であり、 k_A および k_B は次式で表わされるfloc粒子の凝集および破壊に関連するパラメタである。

$$\left. \begin{aligned} k_A &= 1.5\pi e_c e_d \\ k_B &= a e_b d_p^{-p} (\mu/F_y)^q \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 e_c 、 e_d および e_b ：衝突による凝集効率、拡散による凝集効率およびflocの破壊効率、 μ ：海水の動粘性係数、 F_y ：flocの破壊強度であり、 a 、 p および q は経験定数である。

また、式(1)における底質の数密度と質量濃度および体積濃度との間には次式のような関係がある。

$$\phi = f_s N d_f^3 = \frac{c}{\rho_s} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{3-n_f} \quad (3)$$

ここに、 f_s ：形状係数であり、また n_f は次式で定義されるfloc粒子のフラクタル次元である。

$$n_f = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\ln(N(L))}{\ln(L)} \quad (4)$$

ここに、 L は d_f/d_p に相当するflocの無次元代表長さである。

(4) CBS層、fluid mud層および圧密層モデル⁴⁾

CBS層、fluid mud層および圧密層は、フラクタル理論により移流・拡散型圧密方程式に変形したGibsonの圧密方程式と、Bingham流体を仮定した流動モデルとを連立させることにより、連続的に解くことができる。

圧密過程の初期において、底質中の間隙水の変形は徐々に土壌粒子の有効応力へと伝達される。floc粒径、透水係数および有効応力などはフラクタル次元によるべき乗則として体積濃度と関係付けることができ、このと

きGibson方程式は粘性土相および砂相の各相に対する移流・拡散型圧密方程式に変形される。粘性土相に対するGibson方程式は次式ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_s^m}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\Xi_s^m \phi_s^m \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left((D_s + \Gamma + \Gamma_c) \frac{\partial \phi_s^m}{\partial z} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_c \frac{\phi_s^m}{1-\phi_s^{sa}} \frac{\partial \phi_s^{sa}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \Xi_s^m &= f_{hs}^m + \frac{f_c}{1+\eta f_c}, \quad \Gamma_c = \frac{2}{3-n_f} \frac{K_k K_p}{g \rho_w} \\ f_c &= \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} k (\phi_s^m + \phi_s^{sa}), \quad k = K_k \left(\frac{\phi_s^m}{1-\phi_s^{sa}} \right)^{\frac{2}{3-n_f}} \\ f_{hs}^m &= \frac{(1-\phi^m - \phi_s^{sa})(1-\phi_s^m - \phi_s^{sa})}{1+2.5\phi^m} w_{s,r}^m \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

であり、 ϕ_s^m および ϕ_s^{sa} ：粘性土相および砂相における固相（底質）の体積濃度、 g ：重力の加速度、 k ：透水係数、 K_k および K_p ：透水係数および有効応力と体積濃度とを関連付けるパラメタ、 ρ_w ：海水もしくは水の密度、 $w_{s,r}^m$ ：沈降障害の無い時のfloc粒子の沈降速度、 η ：経験定数である。

一方、砂相に対するGibson方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_s^{sa}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\Xi_s^{sa} \phi_s^{sa} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(D_s + \Gamma + \Gamma_c \frac{\phi_s^{sa}}{1-\phi_s^{sa}} \right) \frac{\partial \phi_s^{sa}}{\partial z} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_c \frac{\phi_s^{sa}}{\phi_s^m} \frac{\partial \phi_s^m}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \Xi_s^{sa} &= f_{hs}^{sa} + \frac{f_c}{1+\eta f_c} \\ f_{hs}^{sa} &= \frac{(1-\phi^m - \phi_s^{sa})(1-\phi_s^m - \phi_s^{sa})}{(1-\phi^m)(1+2.5\phi^m)} (w_{s,r}^{sa} - \phi^m w_{s,r}^m) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

であり、また $w_{s,r}^{sa}$ は沈降障害の無い時の砂の沈降速度である。

流動の無いときの圧密層の変形に対するGibson方程式は、微小変形を仮定することにより、次式のTerzaghiの圧密方程式に帰着させることができる。

$$\frac{\partial \sigma_{zz}^{sk}}{\partial t} - c_v \frac{\partial^2 \sigma_{zz}^{sk}}{\partial z^2} = 0, \quad c_v = \frac{k(1+e)}{g \rho_w} \frac{\partial \sigma_{zz}^{sk}}{\partial e} \quad (9)$$

ここに、 σ_{zz}^{sk} ：有効応力および e ：空隙率である。圧密方程式(9)および式(5)から(8)で表わされるGibson方程式は、界面での密度（濃度）の連続条件により接続される。

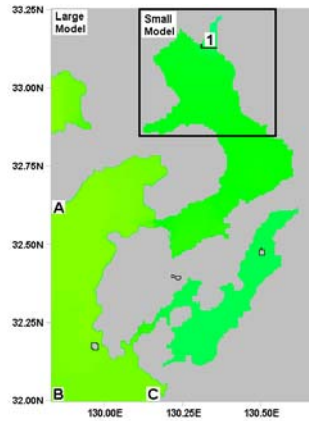


図-3 潮流計算における広領域および狭領域

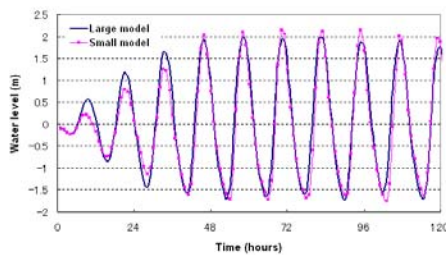
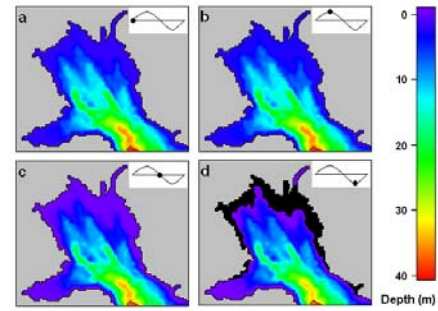
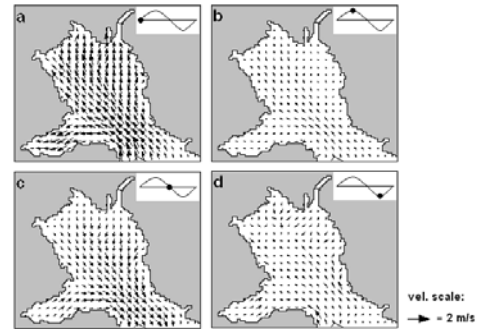


図-4 広領域および狭領域計算における水位の比較



(1) 水深変化



(2) 潮流流速ベクトル

図-5 狭領域における流れの計算結果

3. Wet-dry POMの有明海への適用

有明海は、日本国内でも有数の大きな干潟の存在する海域である。ここではまず、WAD schemeを適用したPOMを有明海の潮流へ適用する。

図-3に潮流計算における広領域（Large Model）および狭領域（Small Model）を示す。このときの広領域における空間メッシュは1500m×1500m、狭領域における空間メッシュは500m×500mであり、水深方向には両領域共に10層のσ座標を用いている。また、有明海ではM2潮が卓越していることから対象とする潮汐はM2潮とし、広領域から狭領域へネスティングを行っている。図-4には、図-3に示す地点1における広領域計算での水位変化および狭領域計算でのそれが示されている。両者の水位変化はよく対応しており、広領域から狭領域へのネスティングは良好であることがわかる。

図-5に、狭領域における水深変化および潮流流速ベクトルの変化を示す。有明海東側海域では、筑後川からの河川流の影響による循環流が発生することが知られている。図-5に示されている潮流流速ベクトルの変化には同様の循環流が再現されている。また、有明海湾奥には干出干潟が存在する。水深変化および潮流流速ベクトルの変化では、潮汐の低水位時に干出する状況が再現されており、WAD schemeによる移動境界条件も十分機能していることがわかる。

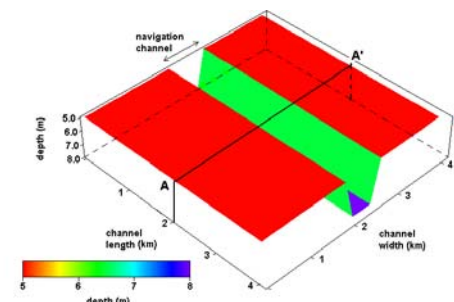


図-6 滞筋のモデル地形

表-1 滞筋への堆砂特性の検討ケース

	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
SS平均濃度 (mg/L)	500	5	500	500
塩分濃度 (psu)	15	15	30	15
潮位の振幅 (m)	2	2	2	4

4. 地形変化への適用

(1) 滞筋への堆砂特性の検討

改良されたECOMSEDを干潟の地形変化へ適用するためのテスト計算として、潮汐による干潟の滞筋への粘着性底質の堆砂特性について検討する。図-6に対象とする干潟の滞筋のモデル地形を示す。このとき、空間メッシュは100m×100mで、水深方向の層分割は10層である。また、粘着性底質の最小粒径は4μmとしている。表-1に

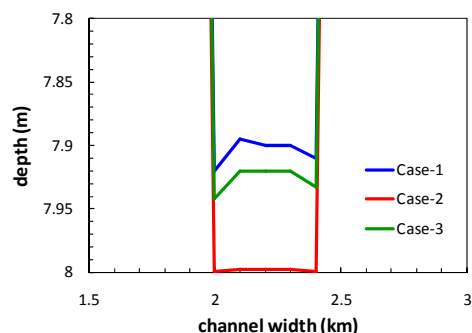


図-7 堆砂への土砂および塩分濃度の影響

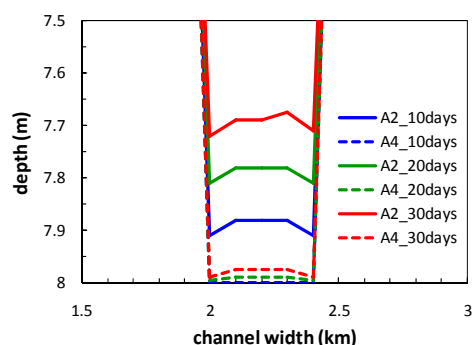


図-8 堆砂への潮汐振幅の影響
(A2 : 潮汐振幅2m, A4 : 潮汐振幅4m)

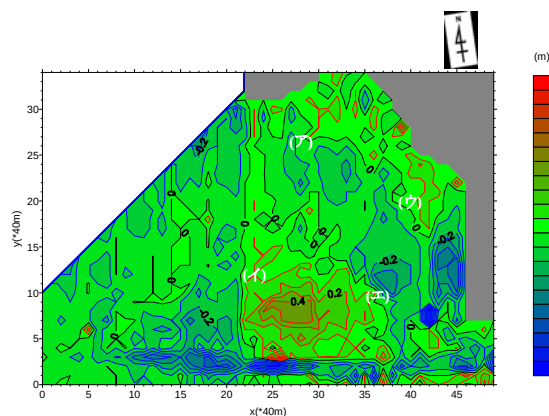
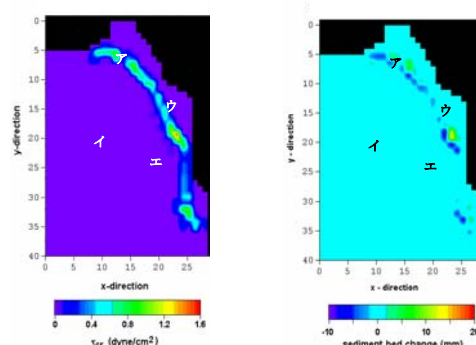


図-9 対象干潟における3年間の地形変化

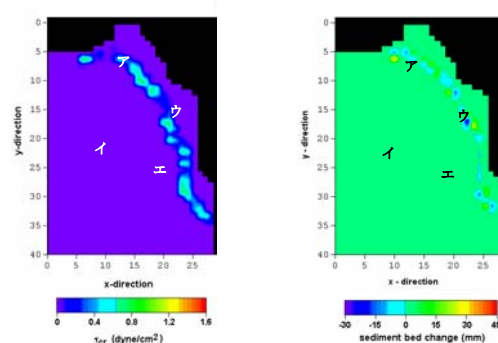
干潟の滞筋への堆砂特性の検討ケースを示す。

図-7は、表-1のCase-1, 2および3に対する図-6に示すA-A'断面での滞筋への粘着性底質の10日後の堆砂状況を示したものである。Case-2に対する計算結果には粘着性底質の濃度が低いこともありほとんど堆砂しないが、Case-1および3では10cm程度の堆砂が見られる。また、塩分濃度の低いCase-1における堆砂は塩分濃度の高いCase3のそれより大きく、河川などの影響により干潟での塩分濃度が低い場合には粘着性底質はより堆砂することがわかる。

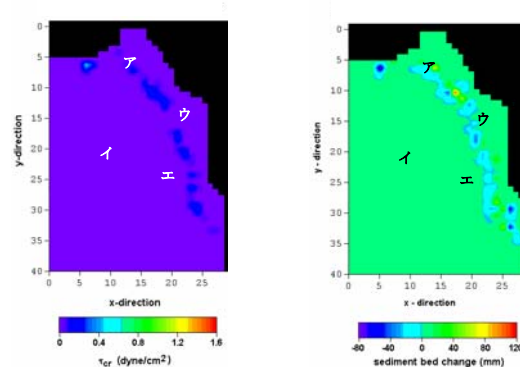
同様に、図-8に潮汐振幅2mのCase-1および4mのCase-4



(1) ケース1



(2) ケース2



(3) ケース3

図-10 対象干潟における限界せん断応力および地形変化量

に対する10日, 20日および30日後のA-A'断面の滞筋底面付近での堆砂状況を示す。潮汐振幅2mのCase-1においては30日後には30cm程度堆砂するのに対して、潮汐振幅4mのCase-4に対する結果は20cm程度と少ない。これは、潮汐振幅が大きな場合には上げ潮時に流入する流量および土砂量が多いが、下げ潮時に滞筋内で発生する流速も速く流出する流量も多くなるためであると推測される。

(2) 干潟の地形変化への適用

干潟の地形変化モデルを適用する干潟は、有明海中央部に位置する河口干潟である。図-9に対象干潟における

3年間の地形変化を示す。対象干潟における地形変化傾向は次のようである。北側の湾曲部のはじまりから中央付近までの領域（ア）で堆積傾向があり、河川流路の直近の北側（イ）では堆積域がみられる。このうち、後者（イ）については浚渫土砂を投入した実績があり、その影響が現れていると推測される。一方、東側の道路護岸側の前面（ウ）および河川の出口付近（エ）で侵食域がみられる。この侵食傾向は河川の出口付近（エ）が最も大きい。河川流路内でも侵食傾向がみられるが、航路浚渫の影響の可能性があると考えられる。

図-9に示された対象干潟の地形変化は3年間に対するものであるが、潮汐を外力とする地形変化はその外力に対する一定の安定形状の地形へ向かって変化する。本研究では、潮流外力に対する侵食限界せん断応力により底泥の移動速度を変化させ、潮汐を外力とする安定化した地形との観点から対象干潟における3年間の地形変化の再現を試みる。このとき、侵食限界せん断応力には土砂の密度の関数として表わされる次式を適用する。

$$\tau_{ce} = \alpha \rho_s^\beta \quad (10)$$

ここに、 τ_{ce} ：限界せん断応力、 ρ_s ：土砂の密度、 α および β ：底質移動の時間変動を調整するパラメタである。

表-2 限界せん断応力におけるパラメタ

	α	β
ケース1	0.068	2.24
ケース2	0.0068	2.24
ケース3	0.0068	1.5

表-2に、検討に用いた式(10)におけるパラメタの値を示す。ケース1におけるパラメタの値は、COSINUSプロジェクト²⁾において実施された模型実験で得られた値であり、ここではこれらを基準値とする。ケース2およびケース3では α の値をケース1の場合の1/10にすることにより、底泥を移動しやすくしている。なお、その他の計算条件は、塩分濃度30psu、水温20℃、粘着性底質の最小粒径4 μ m、および空間メッシュ40m×40mであり、また計算期間は10日としている。

図-10に、ケース1、2および3に対する限界せん断応力および地形変化量の平面分布を示す。ケース1の場合に最大せん断応力は最も大きい、侵食・堆積量は最大でも2cm程度である。ケース2およびケース3の結果に着目すると、侵食量と堆積量との比率は両ケースともに同様であるが、変化量の絶対値は検討ケース3が検討ケース2に比べて大きい。各ケースともに底質の動きは全体的には同様の傾向であるが、底質の移動の範囲および量はケース1では局所的な変化であり、ケース3では底質の移動幅が最も大きくなる。しかしながら、ケース3ではせん断応力は最も小さく、土砂のピックアップ効果が小さいため、ケース-1および2のように東側の道路護岸

の前面（図-9における（ウ））での侵食・堆積傾向は十分に再現できていない。

湾口の狭い有明海では、平常時には来襲波浪が小さいため、干潟の地形変化は主に潮汐により引き起こされている。台風等により高波浪が来襲したときに引き起こされる大きなイベント的な地形変化は、長期的には平常時に引き起こされる潮汐を外力とする安定化へ向かう地形変化によりある程度消されてしまうと推測される。対象干潟における3年間の地形変化がどの程度安定化した地形であるかは不明であるが、ケース2における限界せん断応力を適用した場合の結果が最も対象干潟における地形変化を再現している。

5. 結 語

粘着性底質のfloc形成および堆積過程を考慮して改良したECOMSEDの概要を示し、このモデルの干潟の地形変化モデルとしての現地適用性について検討した。現状においては、このモデルの適用性を検討するために必要な十分な現地データは少ない。今後、さらに現地の干潟の地形変化へ適用することにより、その有用性について検討する必要がある。

参考文献

- 1) HydroQual Inc.: *A primer for ECOMSED version 1.3; user manual*, HydroQual Inc., New Jersey, 2002.
- 2) Berlamont, J.E. and E. Toorman (editors): *COUSINUS final scientific report*, Hydraulics Laboratory, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- 3) Winterwerp, J.C.: *On the dynamics of high-concentrated mud suspension*, Report 99-3, Communication on Hydraulic Engineering, Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University, 1999.
- 4) Winterwerp, J.C. and W.G.M. van Kesteren: *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*, Developments in Sedimentology 56, Elsevier, Amsterdam, 2004.
- 5) Riandini, Fitri, 山下隆男：高濃度底泥の沈降・輸送モデルと移流・拡散型圧密方程式のECOMSEDへの導入，海岸工学論文集，第52巻，pp.991-995，2005.
- 6) Riandini, Fitri, 山下隆男，高山知司：底泥の輸送・凝集・圧密モデルのマハカムエスチャーへの適用，海岸工学論文集，第53巻，pp.476-480，2006.
- 7) Mellor, G.L.: *Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, 1998.
- 8) Oey, L.-Y.: A wetting and drying scheme for POM, *Ocean Modelling*, 9, pp.133-150, 2005.

(2007. 9. 30受付)