

N 分散相二流体モデルに基づく干潟の流動・地形変化の数値解析

陸田秀実*・高橋俊之**・土井康明***

本論文は、干潟の代表的な物理現象である潮位変動、干出・冠水プロセス、細砂やシルト分から構成される干潟土壌粒子の粒径別挙動、土壌中の浸透水挙動などを解析することを目的として、Euler 型および Lagrange 型の固液二相流モデルの利点を融合することによって、メソスケールの流れの素過程から大規模体系流れまでを同時に取り扱うことが可能な N 分散相二流体モデルに基づく干潟の流動・地形変化シミュレーション技法を開発したものである。その結果、定性的ではあるが干潟域特有の物理現象の再現性が確認できた。

1. はじめに

干潟域の代表的な物理現象として、土壌中の浸透水挙動、干出・冠水プロセス、浮遊砂および掃流砂の粒子群挙動、軟泥質・粘土質と流れの相互作用等が挙げられるが、いずれも物質の輸送・微生物の生息にとって不可欠な物理過程である。このような物理現象の把握と予測は、干潟の設計・維持管理を検討する上でも極めて重要である。特に、自然干潟に相応しい生物多様性豊かな人工干潟の造成に際しては、シルトの移動・流出を考慮した地形安定化の予測技術、さらにはそれに基づく設計法の確立が緊急の課題(李ら, 1999)とされている。このような背景から、干潟域に適合した土壌粒径別の流砂・漂砂の数値シミュレーション技法の開発が望まれているのが現状である。

既往の流砂・漂砂の流動解析において、例えば、Euler 型固液二相流モデル(例えば、ECOMSED)が適用されることが多い。これは、実スケールに即した大規模体系の固液二相流現象を解析対象とする際に有効であるが、様々な空間・時間スケールで生起する現象を考慮しつつ数多くの相互作用モデルを構築する必要がある、また、個々に分散された土壌粒子群の相間相互作用を考慮することが難しく、詳細な力学運動を表現できない。一方、個別の土壌粒子挙動を直接計算する Lagrange 型追跡法(例えば、後藤ら, 2003)は、固液二相の界面近傍で生じる流動現象を考察する際に有用であるが、計算コストの面から、解析対象を広領域に設定することが困難であり、現地スケールの再現計算に課題を残している。

本研究の目的は、現地スケールへの適用を念頭に、細砂やシルト分から構成される干潟土壌粒子の粒径別挙動解析と、潮位変動に伴う干出・冠水プロセスによる干潟の流況解析が可能となる流砂・漂砂の数値シミュレーシ

ョン技法を開発することである。このような干潟域に適合した混相流解析のフレームワークとして、ここでは、前述の Euler 型および Lagrange 型の固液二相流モデルの利点を融合することによって、メソスケールの流れの素過程から大規模体系流れまでを同時に取り扱うことが可能な N 分散相二流体モデルに基づく干潟の流動・地形変化シミュレーション技法を開発し、干潟域特有の物理現象の再現性について検証を行う。

2. 数値計算法

(1) N 分散相二流体モデル

N 分散相二流体モデルは、干潟域の混相流体場を連続液相、連続気相、分散相(土壌粒径によって N 種類に分類)の 3 分類に分けて取り扱うものである。

本研究では、土壌粒子群によって構成される分散相と液体で構成される連続液相で固液混相流動モデルを構成するため、Euler 型モデルを基本とし、Tomiya 等(2001)の提案した $(N + 2)$ - Field Model (以下、NP2)を参考に、干潟域の流動・地形変化予測の基礎方程式を構成することにする。NP2モデルでは、N 種類の分散相・連続液相・連続気相を取り扱うために、混相流に含まれる相を連続液相(Liquid phase)、連続気相(Gas phase)、土壌粒子の大きさによって N 種類に分類した分散相(Dispersed phase)に分類する。各相をおのおの下付添え字の L, G, dm ($m = 1, 2, \dots, N$, N 種類の粒子分散相)で表すと、相体積率 α には以下の関係式が成り立つ。

$$\alpha_L = \begin{cases} 1: \text{液相} & \dots\dots\dots (1) \\ 0: \text{粒子分散相} \end{cases}$$

$$\sum_{m=1}^N \alpha_{dm} = \begin{cases} 0: \text{液相} & \dots\dots\dots (2) \\ 1: \text{粒子分散相} \end{cases}$$

また、これらの相体積率には以下の関係が常に成り立つものとする。

$$\alpha_L + \sum_{m=1}^N \alpha_{dm} = 1 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、左辺第 1 項は連続液相の相体積率、左辺第 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

** 正会員 修(工) 復建調査設計株式会社環境技術部 環境技術 1 課

*** 正会員 工博 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

項は N 種類に分類した土壌粒子の相体積率の和を表す。

なお、連続気相の相体積率 α_G は、連続液相の相体積率 α_L と補完関係にあるものとし、これ以降は省略する。したがって、本研究では、空隙のある乾燥した土壌は解析対象としておらず、気液および固気相互作用は無視することとした。

支配方程式は、分散相質量保存、連続液相質量保存、分散相運動量保存、連続液相運動量保存である。これは、 N 種類の分散相と連続液相を取り扱える多流体モデルである。例えば、 N 種類の分散相を考慮する場合、各分散相の質量保存式と運動量保存式を N 個ずつ連立させることとなる。なお、分散相の数・種類は、現地干潟地盤の粒度組成の空間的な分布とその占有率に応じて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 種類の粒径の 3 次元挙動を個別に追跡するとともに、その占有率の和から干潟の地形変化および干出・冠水領域の直接的な表記が可能となっている。

非圧縮性流体を仮定すると各相に対する平均化方程式は以下の通りであり、これらを静水圧近似した準 3 次元モデルとして差分式を取り扱った。

$$\frac{\partial \alpha_{dm}}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{dm} V_{dm}) = R_{dm} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_L V_L) = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{dm}}{\partial t} + V_{dm} \cdot \nabla V_{dm} = & -\frac{1}{\rho_{dm}} \nabla P + F_{\mu dm} + g \\ & -\frac{1}{\rho_{dm} \alpha_{dm}} (M_{Ldm} + M_{\gamma m} + M_{Rm}) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

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

ここで、 V_{dm} および V_L は分散相および連続液相の流速、 R_{dm} は分散相間の分裂・合体による正味の体積輸送（低濃度混相流においてゼロ）、 M_{Ldm} は抗力・仮想質量力などの分散相・連続液相間の相関運動量輸送項、 $M_{\gamma m}$ 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 は気液界面における表面張力項である。なお、本研究では、 N 種類の分散相およ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・連続液相間の相関運動量輸送項 M_{Ldm} のみ考慮することとした。

M_{Ldm} は各粒径 m に対して下式で表せるものとした。

$$M_{Ldm} = \beta \gamma (V_{dm} - V_L) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 γ は分散相と連続液相の相互作用係数、流体抵抗係数 β は以下の式 (C.Y.Wen ら, 1966; S.Ergun, 1952) を用いた。

$$\beta = \frac{\nu(1-\alpha_L)}{d_p^2 \alpha_L} [150(1-\alpha_L) + 1.75 Re_p] : (\alpha_L \leq 0.8) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$= \frac{3}{4} C_D \frac{\nu(1-\alpha_L)}{d_p^2} \alpha_L^{-2.7} Re_p : (\alpha_L > 0.8) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$Re_p = \frac{|V_{dm} - V_L| \alpha_L d_p}{\nu} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 C_D は単一球の抵抗係数、 d_p は各分散相の平均粒子径、 ν は動粘性係数を表す。

混合 m 粒径の平均的な底面の追跡には以下の保存型移流方程式を利用する。

$$\frac{\partial \langle \bar{\alpha} \rangle}{\partial t} \sum_{m=1}^N \nabla \cdot (\alpha_{dm} V_{dm}) = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $\langle \bar{\alpha} \rangle$ は底面を表すので、以下の関係式が成り立つものとする。

$$\langle \bar{\alpha} \rangle = \sum_{m=1}^N \alpha_{dm} \quad \dots\dots\dots (13)$$

また、圧力 P は 1 圧力 2 流体モデルの考え方から粒子相と液相で同一とし、粒子分散相内部で生じる粘性応力及び乱流応力は、圧力勾配や相関運動量に比べて小さく無視できるものとした。

(2) 格子系と相体積率 α の考え方

図-1 は、本モデルにおける格子系および相体積率 α の概念図を示したものである。I 領域は気相領域 ($\alpha_L = 0$, $\alpha_{dm} = 0$) であり、II および III 領域は固液混相領域 ($0 < \alpha_L \leq 1$, $0 < \sum \alpha_{dm} < 1$)、IV 領域は固相流域 ($\sum \alpha_{dm} = 1$) である。

気相領域である計算領域上端および不透水層面である計算領域下端を固定境界とする一方で、潮位および干潟土壌面は移動境界として取り扱う。その移動境界面の追跡には、先に示した式 (4) および (5) を用いることとする。したがって、潮位および干潟土壌の移動境界面は潮位変動に伴って交差することとなり、自動的に干出・冠水プロセスが再現できる。また、干潟の地盤形状も式 (12) から自動的に求めることが可能となる。

(3) モデル地形と初期条件

干潟の流動、地形変化、干出・冠水プロセス、分級過程といった基本的な物理現象を確認するため、ここでは仮想的な干潟モデル地形を与えることとした。

干潟の不透水層を 3 次元的に正確に与えることは非常に難しいため、ここでは、ある一定の深さに不透水層境界面が存在するものとし、これを計算空間の仮想境界条件（最下端）として扱うこととした。図-2 は、本モデル地形における不透水層境界面を示したものであり、干潟特有の滲筋を考慮している。また、 N 種の粒子分散相で構成される干潟地盤は、この不透水層面上に堆積させることとし、初期地盤高は、静水面下 1 m となるよ

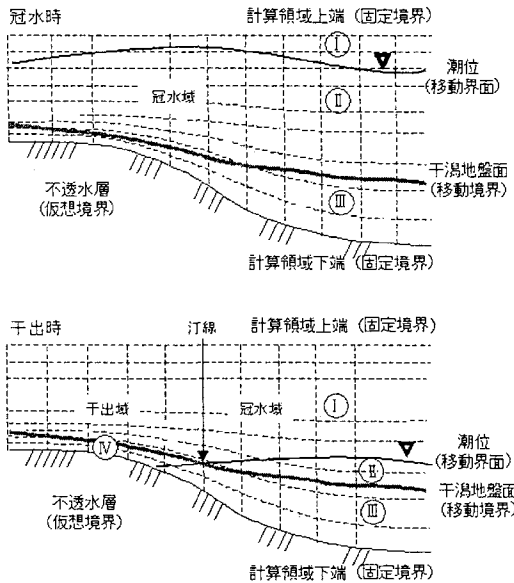


図-1 格子系および相体積率 α の概念
(上段：冠水時，下段：干出時)

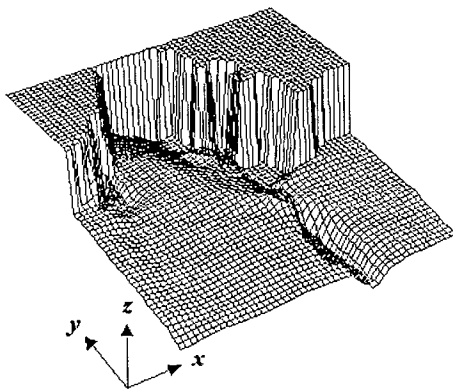


図-2 モデル地形の不透水層境界面 (計算領域下端)

う計算領域全体で一様として簡易的に与え、長時間積分の後、潮流変化に伴って、安定な干潟地盤が自動形成されるものとする。

干潟土壌の構成は、本来ならば対象とする干潟の粒度組成を現地調査し、それに基づいたN種類の土壌を選定し、粒径及び占有率を初期条件として与えることとなる。ここで示す干潟モデル地形では、細砂、シルトおよび粘土の3種類の分散相で構成される干潟土壌とし、土壌粒子径は細砂：0.5 mm，シルト：0.075 mm，粘土：0.005 mm，土壌密度は細砂：2700 kg/m³，シルト：2650 kg/m³，粘土：2600 kg/m³とした。また、土壌領域におけるそれぞれの占有率は細砂： $\alpha_{d1}=0.7$ ，シルト： $\alpha_{d2}=0.2$ および粘土： $\alpha_{d3}=0.1$ とし、それぞれの透水係数 K_T は細砂： 10^{-5} ，シルト： 10^{-6} ，粘土： 10^{-8} と設定した。

格子数は $51 \times 54 \times 11$ とし、水平方向の格子間隔は20 m 直交格子とする一方で、鉛直格子サイズは水深変化を考慮して0.5~0.2 mの範囲とした。計算時間は、スピニングアップ期間を1週間(7日間)とし、その後、1週間(7日間)の定常計算を行ったため、合計2週間(14日間)の時間積分を行った。潮位は、14周期目までは振幅を線形に増大させ、15周期目以降、潮位振幅2 mとなるように設定した。時間刻みは、内部モード10 s，外部モード2 sとした。

3. 数値計算結果

図-3は、計算領域のほぼ中央(St.2)における潮位の時系列変化を示したものである。計算開始から14周期目までをスピニングアップ期間として、15周期目以降、潮位振幅2 mの規則的な潮位変動が作用していることが分かる。なお、他の測点においても位相遅れはほとんどなく同様の潮位変動を示していることを確認している。

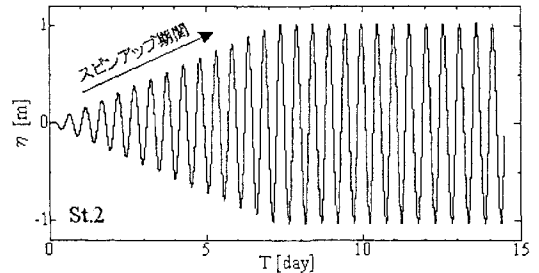


図-3 潮位変動 (15 周期目以降に定常)

図-4は、28周期目の1周期間における干潟表面付近の断面における流況を示したものである。なお、満潮時は $3/12 T$ ，干潮時は $9/12 T$ である。図より、 $1/12 T \sim 5/12 T$ 時刻においては、計算領域全体の干潟土壌は冠水状態であるのに対して、 $7/12 T \sim 11/12 T$ 時刻においては、干出状態となる領域が現れていることが分かる。この干出領域を詳しく見たものが図-5であり、干潮時刻 $9/12 T$ 時前後において、干出エリアの水平分布及び汀線が著しく変化していることが分かる。また、滞筋において流速場が卓越傾向にあることも分かる。

図-6および図-7は、28周期目の上げ潮最強時 $1/12 T$ 時刻及び干潮時 $9/12 T$ 時刻における干潟地形の鳥瞰図、細砂10%領域およびシルト5%領域の3次元空間分布を示したものである。これらの図から、干潟土壌との速度差が大きく固液間相互作用の卓越する $1/12 T$ 時刻において、細砂およびシルト分の空間分布に細かな分布形状が見られるのに対して、 $9/12 T$ 時刻のそれは大きく組織立った形状となっていることが分かる。また、 $1/12 T$ 時刻においては、干潟表面のせん断応力が卓越する

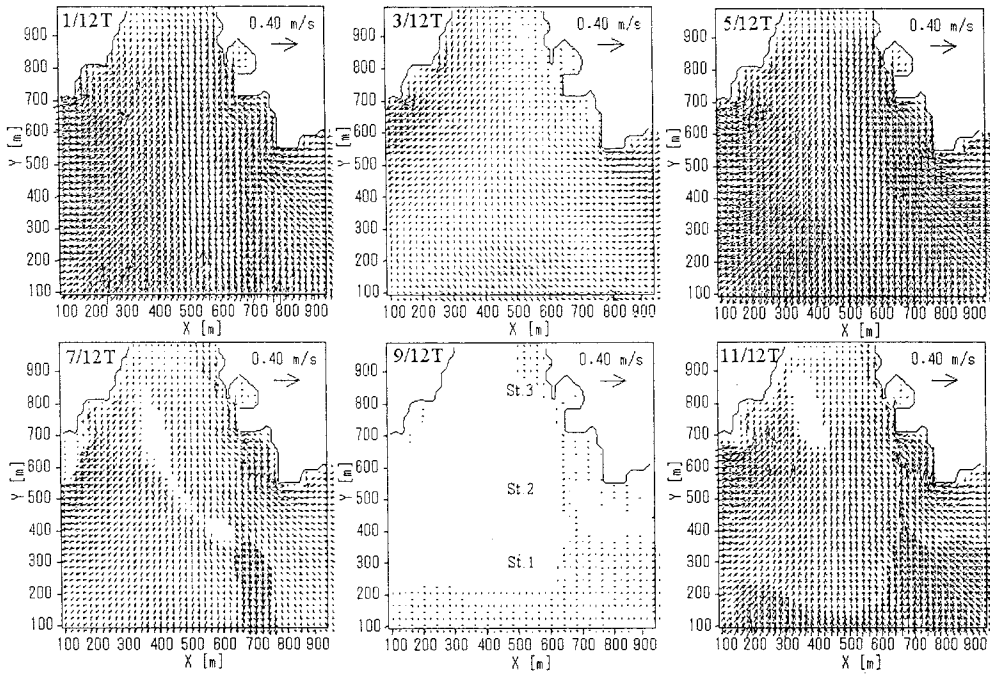


図-4 1 潮汐間における水平方向の流速分布 (28周期目)

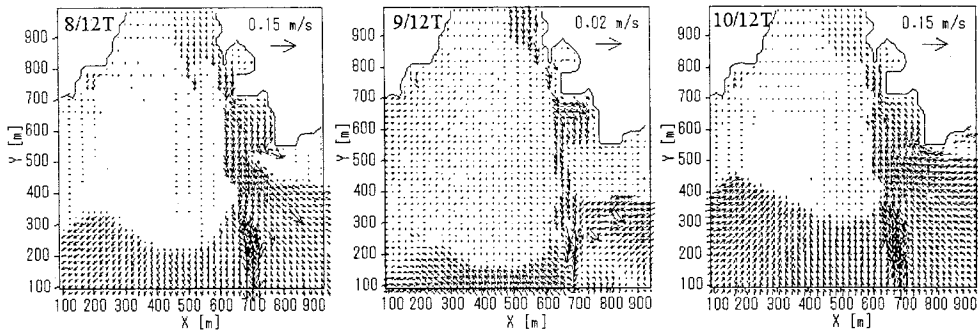


図-5 1 潮汐間における水平方向の流速分布 (28周期目)

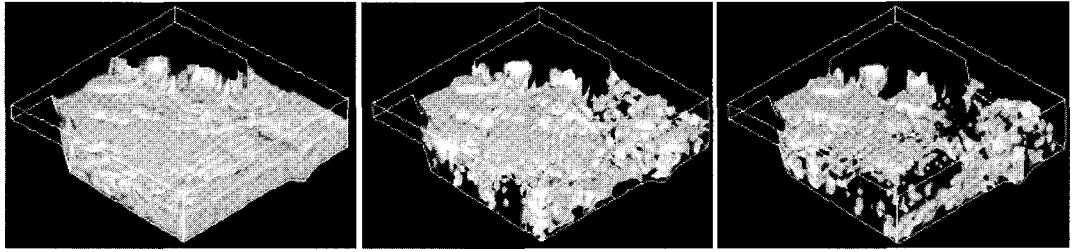
ため、干潟表面に細かな凹凸形状が不規則に分布している。

図-8は、潮位振幅が定常となる14周期目以降の液相の体積率 α_L および干潟土壌の体積率 $\Sigma\alpha_{dm}$ の時系列変化を示したものである。また、図-9は、各分散相の体積率 $\alpha_{d1} \sim \alpha_{d3}$ の時系列変化を示したものである。なお、St.1~3は図-4に示す通り、順に干潟域の沖側、中間点、岸側の代表点であり、いずれも干潟表面付近のモニタリングポイントを設定している。これらの図から、潮汐変動と同一周期で液相の体積率 α_L は変化し、その逆位相で干潟土壌の体積率 $\Sigma\alpha_{dm}$ は変動していることが分かる。また、St.3においては、固液の相体積率がほぼ一定であるにも関わらず、St.1及びSt.2においては液相の体積率が漸増している一方で、固相の体積率は減少傾向にある。

これは、干潟土壌の沖への流出プロセスを示すものである。また、この時の粒度組成の変化については、St.3においてはほぼ定常状態であるのに対して、St.1では α_{d2} および α_{d3} 、St.2では α_{d1} の体積率が減少傾向となっており、各測点で粒度組成に変化が生じていることが分かる。

4. おわりに

本研究では、メゾスケールの流れの素過程から大規模体系流れまでを同時に取り扱うことが可能なN分散相二流体モデルに基づく干潟域に適合した流動・地形変化シミュレーションモデルを開発し、滞筋を有する干潟モデル地形において検証を行った。その結果、干出・冠水プロセス、土壌粒径別の空間分布、地形変化など、干潟域特有の物理現象の再現性について、定性的ではあるも

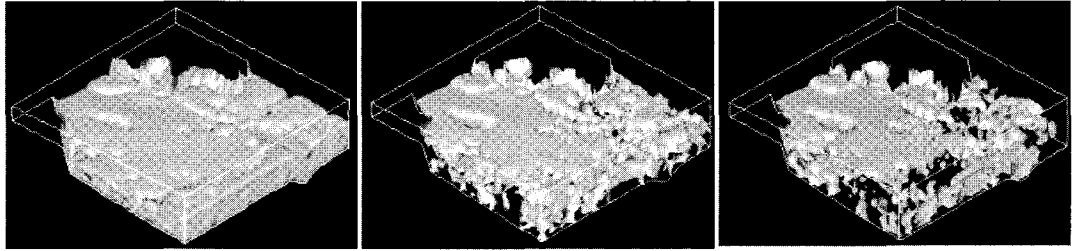


(a) 干潟形状の鳥瞰図

(b) 細砂 10% 領域の分布

(c) シルト 5% 領域の分布

図-6 干潟土壌の3次元空間分布 (上げ潮最強時: 1/12 T)

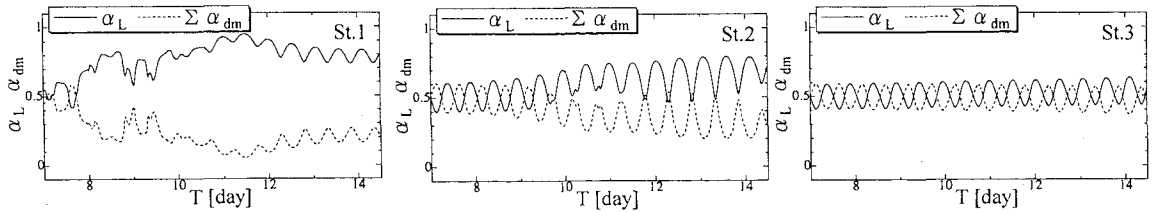
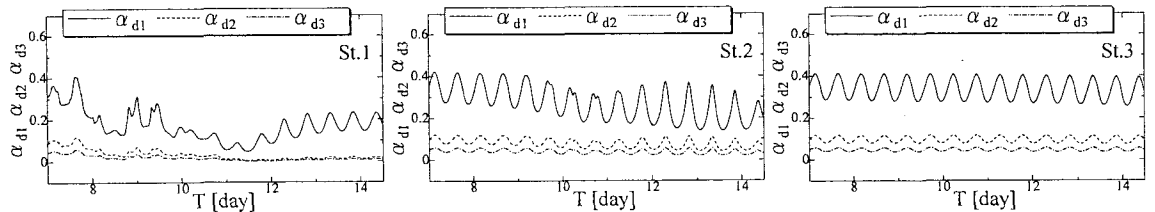


(a) 干潟形状の鳥瞰図

(b) 細砂 10% 領域の分布

(c) シルト 5% 領域の分布

図-7 干潟土壌の3次元空間分布 (干潮時: 9/12 T)

図-8 液相の体積率 α_L および干潟土壌の体積率 $\sum \alpha_{dm}$ の時系列変化図-9 各分散相の体積率 $\alpha_{d1} \sim \alpha_{d3}$ の時系列変化

のの妥当性が得られた。しかしながら、各分散相間及びそれらと連続液相の相互作用項の高精度化、現地の粒径分布との検証、浮遊シルト分の挙動と分布などにおいて問題点が残されているため、今後の課題とする。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（課題番号15360264, 16760411）の助成によるものであり、ここに謝意を表す。

参 考 文 献

後藤仁志・林 稔・酒井哲郎(2003)：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，土木学

会論文集，Vol.719/II-61，pp. 31-45。

李正奎・西嶋渉・岡田光正(1999)：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。

C. Y. Wen and Y. H. Yu(1966)：Mechanics of fluidization, Chem. Eng. Prog. Sympo. Ser.6, pp. 100-111。

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

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

S.Ergun(1952)：Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Prog., 48, pp. 89-94。

Tomiya, A. and N.Shimada(2001)：(N + 2)-field modeling for bubbly flow simulation, Comp. Fluid Dynamics J., 9-4, pp. 418-426。