

混合砂河床における Tidal Creek の発達過程に関する研究

Computation of Tidal Creek Network with Nonuniform Sediment

北海道大学工学研究科
北海道大学工学研究科
北海道大学工学研究科

○学生員 岩崎理樹 (Toshiki IWASAKI)
正会員 清水康行 (Yasuyuki SHIMIZU)
正会員 木村一郎 (Ichiro KIMURA)

1 はじめに

感潮湿地では潮汐や波、またそれに誘発される表面流や浸透流など様々な流れの作用によって Tidal Creek と呼ばれる複雑な平面形状を持つ水路網が形成される。一方で、陸・海域境界に位置する感潮域では周期的な水位の変化や淡水・塩水の混合により、独特の生態系が形成されており、貴重な自然環境を創出している。このような場では、地形変動と生態系は密接な相互関係を持っており、近年世界規模で危惧されている海面上昇や人工構造物による周辺環境の変化によって、これらの環境に大きな影響を与えることが懸念される。従って、貴重な自然環境を保護する観点から、感潮域における地形変動予測技術を確立することは非常に重要な課題である。

感潮域の地形変動を予測する手法は、概念モデルによるもの¹⁾と物理モデルによるもの^{2,3)}に大別される。概念モデルを用いた予測では、流れの方程式を簡略化することで長期間の地形変動予測を可能としている。しかしながら、流れと地形変動の影響、さらには環境や生態系を考慮するためには、物理モデルを用いることが望ましい。このような観点から著者ら²⁾や Marciano et al.³⁾は、平面二次元における物理な地形変動モデルを用いて水路網形成要因や、ネットワーク形状に関する考察を行っている。また、Dastgheib et al.⁴⁾は従来の数値モデル³⁾に混合粒径モデルを加えたモデルを構築し、これをオランダ・ワデン海に適用することで、水路網形状や粒径の平面分布を再現し、水路形状をより詳細に再現できることを示している。しかしながら、彼らの研究では水路網形状に関する考察はなされていない。そこで、本研究では既往の平面二次元河床変動モデル²⁾に芦田ら⁵⁾による混合粒径モデルを導入することで、水路網とそれに対応した河床材料の分級現象を再現可能な地形変動モデルを構築した。これを用いて、混合砂からなる河床での Tidal Creek の形成過程及び河床材料の分級現象をシミュレーションするとともに、河床材料が水路網形状に与える影響について考察を行った。

2 計算モデル

2.1 流れの方程式

本研究では、以下に示す連続式と運動方程式からなる浅水流方程式を解くことで、流れ場を計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

ここに、 h ：水深、 u, v ： x, y 方向の水深平均流速、 g ：重力加速度 (9.8m/s^2)、 H ：水位、 ρ ：水の密度 (1000kg/m^3)、 ν_t ：渦動粘性係数でゼロ方程式モデルで計算する。また、 τ_x, τ_y ： x, y 方向の河床せん断抵抗であり、マニング則を適用して求める。詳細は論文²⁾を参照されたい。

2.2 土砂輸送モデル

本研究では、既往の掃流砂・浮遊砂を考慮した河床変動モデルを清水の研究¹⁾を参考に、混合粒径を用いた場合に拡張する。河床連続式は次式で求められる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial (\sum_k q_{bxk})}{\partial x} + \frac{\partial (\sum_k q_{byk})}{\partial y} + \sum_k (q_{suk} - c_{bk} w_{fk}) \right] = 0 \quad (4)$$

ここに、 z ：標高、 λ ：空隙率、 q_{bxk}, q_{byk} ： x, y 方向の粒径別掃流砂量である。流線方向の掃流砂量 q_{bk}^s は以下の芦田・道上式から求める。

$$\frac{q_{bk}^s}{\sqrt{sgd_k^3}} = p_{mk} 17 \tau_{*k}^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*} \right) \quad (5)$$

ここに、 s ：土粒子の水中比重 ($=1.65$)、 d_k ：階層 k における土粒子の粒径、 p_{mk} ：交換層における階層 k の土粒子の存在割合、 $u_{*ck}, \tau_{*k}, \tau_{*ck}$ ：それぞれ階層 k における限界摩擦速度、無次元掃流力及び無次元限界掃流力である。また、流線に直交方向の掃流砂量 q_{bk}^n については以下の長谷川の式を用いる。

$$q_{bk}^n = q_{bk}^s \left(\frac{u_b^n}{V_b} - \gamma \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (6)$$

また、係数 γ については次式で求める。

$$\gamma = \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\mu_k \mu_s \tau_{*k}}} \quad (7)$$

また、 q_{suk} は粒径別に拡張された板倉・岸の式を用い、粒径毎の沈降速度 w_{fk} については Rubey の実験式から求める。また、基準点浮遊砂濃度 c_{bk} は各粒径の浮遊砂鉛直分

布がそれぞれ指数分布に従うと仮定し求める。水深平均の浮遊砂濃度は以下の移流方程式より求める。

$$\frac{\partial (c_k h)}{\partial t} + \frac{\partial (u c_k h)}{\partial x} + \frac{\partial (v c_k h)}{\partial y} = q_{suk} - c_{bk} w_{fk} \quad (8)$$

ここに、 c_k :各粒径の水深平均浮遊砂濃度である。

また、混合粒径による遮蔽効果については各粒径の限界摩擦速度を以下の浅田の式⁷⁾から求める。

$$\frac{u_{*ck}^2}{u_{*cm}^2} = \left[\frac{\log_{10} 23}{\log_{10} (21d_k/d_m + 2)} \right]^2 \frac{d_k}{d_m} \quad (9)$$

ここに、 u_{*cm} :平均粒径に対する限界摩擦速度で、岩垣の式により求める。また d_m は平均粒径で、階層 k の存在確率を p_k として、 $d_m = \sum d_k p_k$ で定義する。

また分級現象の再現のため、芦田ら⁵⁾により提唱された多層モデルを用いる。このモデルでは河床表層を混合層と定義し、その下に遷移層及び堆積層を設けるものである。詳細は参考文献⁵⁾を参照されたい。各粒径の存在確率は次式により計算される。

$$\frac{\partial p_{mk}}{\partial t} + \frac{p_{bk}}{e_m} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{e_m(1-\lambda)} \times \left[\frac{\partial q_{bxk}}{\partial x} + \frac{\partial q_{byk}}{\partial y} + q_{suk} - c_{bk} w_{fk} \right] = 0 \quad (10)$$

ここに、 e_m :交換層の層厚でここでは初期粒度により求められる d_{90} を用いる。なお、 p_{bk} は河床の堆積・侵食により以下のように場合分けされる。

$$p_{bk} = p_{mk} \quad (\partial z / \partial t > 0), \quad p_{bk} = p_{tk} \quad (\partial z / \partial t < 0) \quad (11)$$

ここに、 p_{tk} :遷移層における階層 k の存在割合である。

3 計算条件

前節に示した地形変動モデルを単純な計算領域に適用し、混合砂からなる河床での Tidal Creek の形成過程及び河床材料の分級現象をシミュレーションする。計算領域は図-1に示すような岸沖方向に 400m、それに直交する方向に 200m となる平坦な矩形領域とし、格子間隔は両方向ともに 2.5m とする。なお、本研究では水路形成のきっかけを作るために計算領域全体に 1mm 程度の凹凸を与えている。また境界条件として、下流端で振幅 0.6m、周期 12 時間の潮汐を与え、土砂は掃流砂・浮遊砂ともに自由流出とする。ただし、下流端からの土砂流入は考慮しない。その他の 3 領域では流れ・土砂輸送のフラックスを 0 とする。なお、本計算では計算領域が冠水・露出サイクルを受ける場を想定し、潮汐の平均潮位は初期河床面に一致するように設定する。

混合粒径河床を対象とするシミュレーションでは、図-2に示すような 50%粒径 0.1mm の粒度分布を仮定する。ここでは、この粒度分布を 4 階層に分割し計算を行った。なお、交換層厚は d_{90} 、堆積層厚は 0.2m と仮定している。この混合粒径を用いたシミュレーションと 50%粒径である 0.1mm を用いた均一砂におけるシミュレーションも同時に行い、両者の水路網形状を比較する。

4 計算結果

4.1 水路網発達過程について

ここでは、均一粒径と混合粒径を用いた場合の水路網発達過程について考察を行う。計算された河床コンター図を

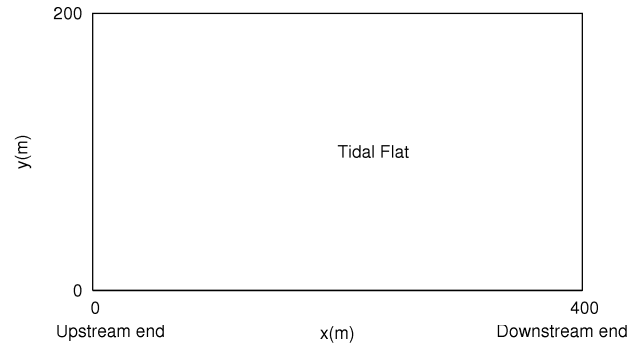


図-1 計算領域。

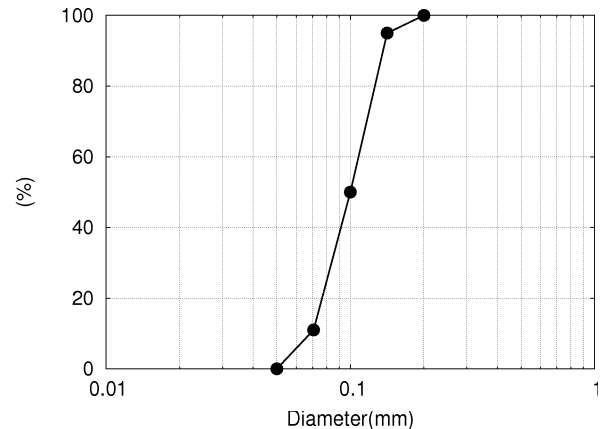


図-2 計算で用いる河床材料の粒度分布。

図-3 に示す。図-3-(b),(c) はそれぞれ均一粒径と混合粒径河床での 300 日後の河床コンター図である。この図より均一粒径河床の場合では、複雑な水路網が計算領域全体にわたって発達しているのに対し、混合粒径河床の場合では水路網は十分に発達していないことがわかる。これは、上流側への土砂の移動及び堆積が異なるためだと考えられる。一般に、感潮域に形成される水路網は陸域に形成される水路網と特徴が異なるとされており、その一つの原因が流れが上下流に往復することに起因するといわれている。特に、上流側への土砂移動は形成された水路の先端部に土砂を堆積するため、水路の分岐に大きく影響すると考えられる。均一粒径を用いた場合、上流側へ輸送される土砂は水路の先端部付近に堆積するため、これが水路に流れ込んでくる流れを分岐させ、水路網を発達させたと考えられる。一方、混合粒径河床の場合では上流側に輸送される土砂が均一砂の場合と比較して小さいため、水路先端部に堆積せずに、上流端側へ輸送され堆積する。これにより、水路先端部における分岐する流れが抑制され、水路網が十分に発達しなかったと考えられる。

次に形成された水路の形状について考察する。図-4 は計算 300 日後の計算領域下流端における地形の横断形状を表わしている。この図からわかるように、均一粒径河床の場合に比較して混合粒径河床の場合では、形成された水路が浅くなっていることがわかる。これは、水路内部が粗い粒径によりアーミングされ侵食が抑制されたためと考えら

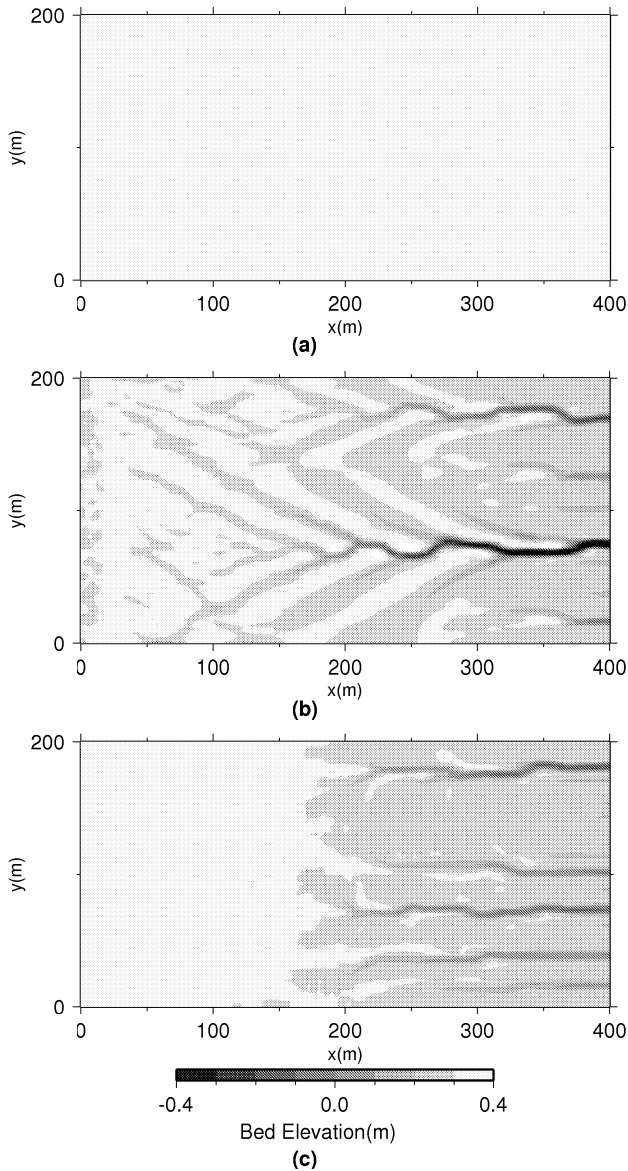


図- 3 計算された河床コンター図. それぞれ (a) 初期河床, (b) 均一粒径の場合の計算結果及び (c) 混合粒径の場合の計算結果を示している. なお, (b),(c) の計算結果は 300 日後のものである.

れる. 粒径の分布については次節で詳しく述べる. これは, Dastgheib et al. らのシミュレーションと同様の傾向を示している. しかしながら, 水路の横断形状は形成された水路が持つ集水面積にも大きく影響を受けると考えられるため, 混合粒径河床での水路網発達とその水路横断形状についてはさらなる検討が必要である.

4.2 水路網発達に伴う分級現象について

本節では, 水路網発達に伴う河床材料の分級現象について考察する. 図-5 に, 計算開始 5 日, 50 日及び 300 日後の交換層における平均粒径の分布を示す. また, 図中の実線はおよその水路網の形状を示している. 計算初期では, 水路が形成されていないため上下流方向に土砂が輸送され, 上流側への細粒分の移動により上流端側では河床は細粒化する一方で, 下流端側は粗流化する. 計算開始 50 日後の計算

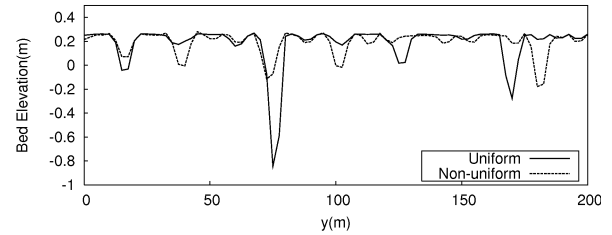


図- 4 計算領域下流端における地形の横断形状. 実線が均一粒径, 破線が混合粒径の場合のものである.

結果をみると, 形成された水路網内部では粗流化がおり, アーマリング状態であることがわかる. その一方で, 水路内部で巻き上げられた細粒分は水路上流もしくは側方に堆積し, 河床を細粒化させる. 計算開始 300 日後では, この土砂移動により形成された水路網の側方には細粒化した部分が形成されていることがわかる. 著者ら²⁾の野付半島湿原における現地調査においても, 非水路地帯である湿地帯では非常に細かい土砂が堆積し腐泥化しているのに対し, 水路内部では砂が多く粗流化していることが観測された. したがって, 本計算モデルは水路網発達に伴う分級現象を定性的に再現できるといえる. しかしながら, 湿地帯での土砂は非常に粘性が強いため, 今後このような影響を計算モデルに考慮することが必要となる. また, 湿地帯に見られる腐泥層は土砂の移動だけではなく生物的作用も大きく影響を及ぼしていることが考えられる. このような点から見て, 今後モデルを改良する必要があるといえる.

5 結論

本研究では, 既往の平面 2 次元モデルに混合粒径モデルを追加することで, 感潮域の水路網発達過程とそれに伴う分級現象を再現可能な数値モデルを構築した. これを単純化された条件に適用し, 混合砂からなる河床での TidalCreek の形成過程及び河床材料の分級現象をシミュレーションするとともに, 河床材料が水路網形状に与える影響について考察を行った. その結果次のような結論を得た.

- 1) 混合粒径を考慮した場合, 水路網発達に寄与すると考えられる水路先端部付近への堆積が均一粒径の場合と比較して少なく, 水路網の発達が抑制される.
- 2) 水路網の発達に伴い水路内部がアーマリングされ, 均一粒径の場合と比較して水路の形状がより浅くなる.
- 3) 水路内部が粗流化するのに対して, 水路内部から巻き上げられる細粒分は水路周辺に堆積し, 非水路地帯は細粒化する.

しかしながら, 本研究では非常に単純化した条件での計算しか行っておらず, 計算モデルの妥当性については実験や現地観測からさらなる検討が必要である. また, 本研究の計算では一つの粒度分布のみの計算であるが, 混合砂が Tidal Creek の発達に及ぼす影響を考察するために, 異なる平均粒径や粒度分布を用いた計算を行う必要がある.

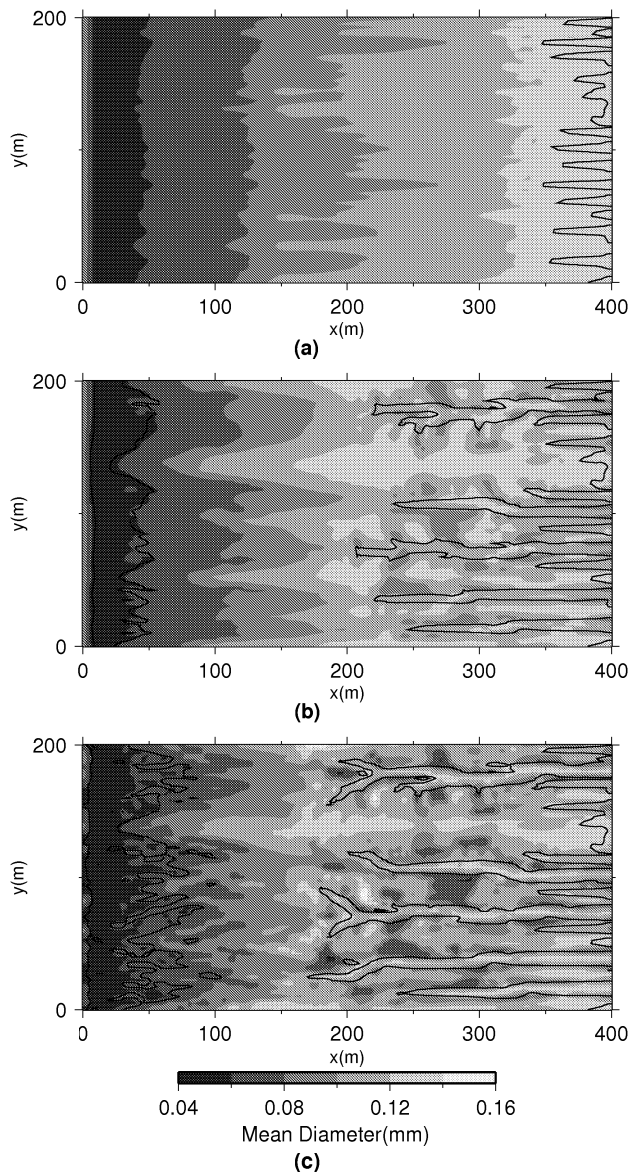


図- 5 交換層における平均粒径の時間変化. それぞれ計算開始から (a)5 日, (b)50 日及び (c)300 日後のものを示している.

参考文献

- 1) D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M., Fagherazzi, S. and Rinaldi, A.: Tidal network ontogeny: Channel initiation and early development, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, F02001, doi:10.1029/2004JF000182, 2007.
- 2) Iwasaki, T., Shimizu, Y. and Kimura, I.: Study on initial evolution process of tidal creek network, *Proceedings of 6th IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM2009*, pp. 635-642, 2009.
- 3) Marciano, R., Wang, Z.B., Hibma, A., de Vriend, H.J. and Defina, A.: Modelling of channel patterns in short tidal basins, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, F01001, doi:10.1029/2003JF000092, 2005.
- 4) Dastgheib, A. and Roelvink, J.A. : Effect of different sediment mixtures on the long-term morphological simulation of tidal basins, *Proceedings of 6th IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM2009*, pp. 913-918, 2009.
- 5) 芦田和男・江頭進治・劉炳義・梅本正樹: 蛇行流路における Sorting 現象および平衡河床形状に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 33 号, B-2, pp.261-279, 1990.
- 6) 清水康行: 沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究, 北海道開発局開発土木研究所, 河川研究室, 1991.
- 7) 浅田宏・石川晴雄: 水流による河床砂礫の分級機構に関する研究 (III), 電力中央研究所報告, 第 71015 号, 1972.