

感潮域における地形形成シミュレーション

Simulation of at geography at tidal area

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 舩屋繁和 (Shigekazu Masuya)
北海道大学大学院工学研究科 正員 清水康之 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

地球上には様々な地形が存在するが、感潮域における複雑な平面形状を有する水路も、その1つである。このような水路は世界中に存在し、イタリアのベニスラグーン(図-1)やオランダのトゥエンテ(図-2)のものが有名である。一方、このような水路は我が国にも存在し、例えば北海道に存在する野付半島湿原(図-3)のように、植生の繁茂によって美しい景観を創出している。しかしながら、このような水路は長い年月をかけて形成されたものであるため、どのように形成されたかが未だ解明されておらず、自然保護の観点からも、その形成過程を明らかにすることは非常に重要な課題である。

図-3を見ても分かるように、これらの水路は上流からの陸水によって形成された河川ではない。一般に、このような水路は潮位変動の影響で形成されたといわれており、近年ではD'Alpaosら¹⁾の比較的簡易なモデルによる再現計算や、Tambroni & Seminara²⁾によるベニスラグーンにおける土砂輸送解析等が行われているが、物理的な土砂輸送モデルを用いて水路自体を再現した例は少ない。本研究では、このような潮位変動によって形成された水

路(以降「タイダルクリーク」と呼ぶ)の形成過程を明らかにするために、既存の比較的簡易な2次元河床変動計算モデルを用いて、潮位変動の影響による水路形成のシミュレーションを行った。



図-1 イタリア・ベニス (Google Mapより)



図-2 オランダ・トゥエンテ (Google Mapより)

図-3 野付半島湿原³⁾

2. 数値計算モデルの概要

(1) 流れの計算モデル

本研究では、流れの計算モデルとして2次元浅水流れ方程式を用いた。連続の式を「式(1)」に、 x, y 方向の運動方程式を「式(2)」 「式(3)」に、それぞれ示す。

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = & -gh \frac{\partial H}{\partial x} \\ & - \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uv h)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} = & -gh \frac{\partial H}{\partial y} \\ & - \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 x, y : それぞれ互いに直行する平面状の座標、 t : 時間、 u, v : x, y 方向の水深平均流速、 ρ : 水の密度、 h : 水深、 H : 水位、 g : 重力加速度、 ν_t : 水深平均に関する渦動粘性係数である。また、渦動粘性係数は「式(4)」によって求める。

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} U^* h \quad (4)$$

なお、 τ_x, τ_y は、それぞれ x, y 方向の河床せん断力を表し、「式(5)」 「式(6)」によって算出する。

$$\tau_x = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

$$\tau_y = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

ここで、 g : 重力加速度(9.8)、 n : マニングの粗度係数である。

(2) 土砂輸送計算モデル

本研究では、掃流砂と浮遊砂を考慮した土砂輸送モデルを用いた土砂輸送計算モデルを用いた。「式(7)」に全流砂連続式を示す。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + q_{su} - w_f c_b \right)$$

$$= \alpha \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

ここで、 z : 河床高、 λ : 空隙率、 q_{bx}, q_{by} : それぞれ x, y 方向の単位幅掃流砂量、 q_{su} : 河床からの土砂浮上量、 w_f : 土砂の沈降速度、 c_b : 基準点浮遊砂濃度である。また、 α は若干の試行計算の結果0.00001とした。

掃流砂量の算出には、「式(8)」の芦田・道上の式⁴⁾を用いる。

$$q_b = 17 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \sqrt{s g d} \quad (8)$$

ここで、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力、 τ_* : 無次元掃流力、 u_{*c} : 限界摩擦速度、 u_* : 摩擦速度、 s : 砂の水中比重(1.65)、 g : 重力加速度、 d : 河床材料粒径をそれぞれ表す。また、基準点浮遊砂濃度は「式(9)」より算出する。

$$c_b = \frac{< c > \beta}{[1 - \exp(-\beta)]} \quad (9)$$

ここで、 $< c >$: 水深方向平均浮遊砂濃度、 β : $w_f h / \varepsilon$ 、 ε : $\kappa u_* h / 6$ 、 κ : カルマン定数である。上式中における、水深方向平均浮遊砂濃度 $< c >$ は各計算地点によって異なり、次の浮遊砂濃度連続式によって求める。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(< c > h)}{\partial t} + \frac{\partial(u < c > h)}{\partial x} \\ + \frac{\partial(v < c > h)}{\partial y} = q_{su} - w_f c_b \end{aligned} \quad (10)$$

また、河床からの土砂浮上量 q_{su} には、次式の板倉・岸の式⁵⁾を用いる。

$$q_{sui} = K \left(\alpha_* \frac{s g d}{u_*} \Omega - w_f \right) \quad (11)$$

ここで、 K : 0.008、 α_* : 0.14である。また、 Ω の算出には次式を用いる。

$$\Omega = \frac{\tau_*}{B_*} \frac{\int_{a'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_{a'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_*}{B_* \eta_0} - 1 \quad (12)$$

ここで、 B_* : 0.143、 α' : $B_* \tau_* / \eta_0$ 、 η_0 : 0.5である。なお、土砂の沈降速度 w_f は、以下のRubeyの式によって算出する。

$$w_f = \sqrt{\frac{2}{3} s g d + \left(\frac{6\nu}{d} \right)^2} - \frac{6\nu}{d} \quad (13)$$

ここで、 ν : 水の動粘性係数(0.01cm²/s)である。

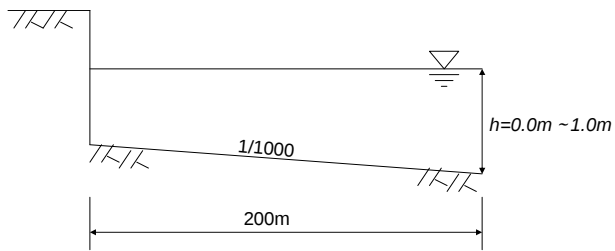


図-4 計算条件概念図(側面)

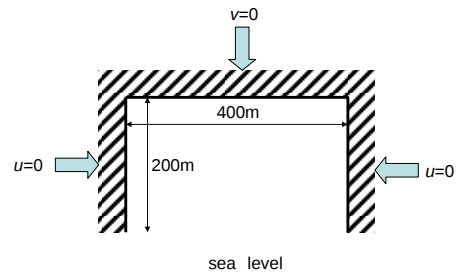
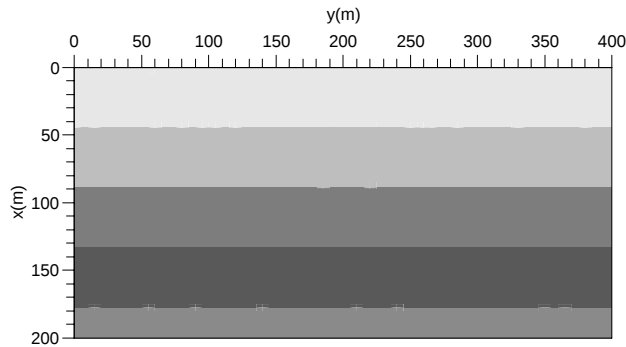
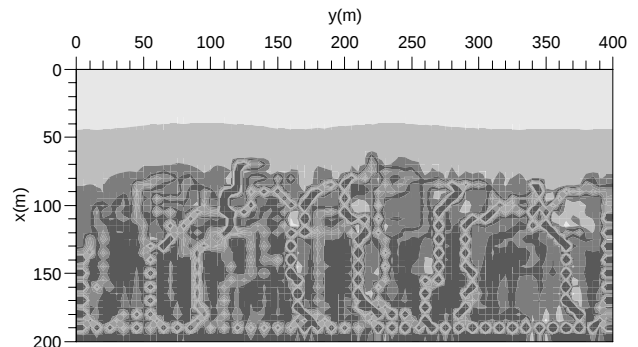


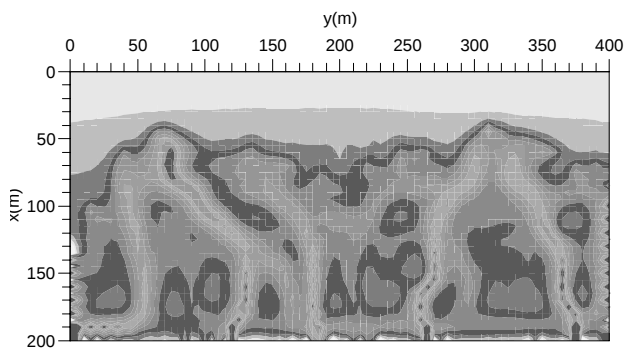
図-5 計算条件概念図(平面)



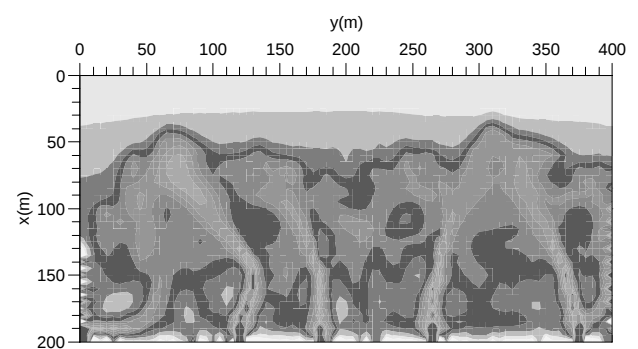
(0日後)



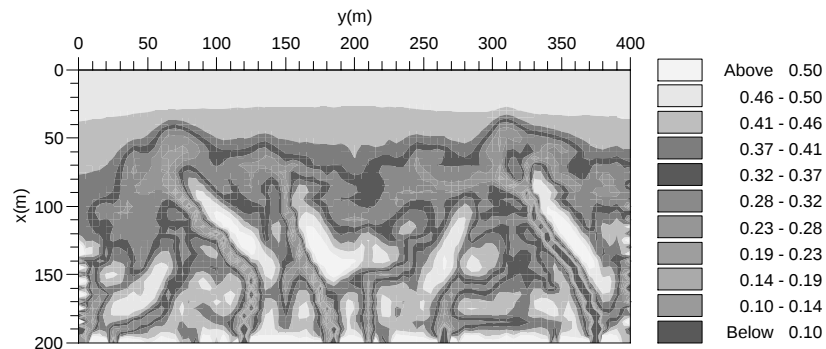
(5日後)



(50日後)



(100日後)



(150日後)

図-6 再現計算河床コンター図

3. 計算条件

本研究では、図-3で示したようなタイダルクリークが数値計算モデルによって再現可能かどうかを確認するために、ある程度の計算スピードを得られるように、計算

領域を200m×400m、 $\Delta x=5.0\text{m}$ 、 $\Delta y=5.0\text{m}$ とし、勾配を1/1000、粒径を0.01mm、粗度係数をマニング・ストリクラーの式を用いて算出した。また、境界条件については、上流端と両サイドでの水と土砂の出入りは無いものとし、下流端水位として潮位を、下流端浮遊砂量として0.00005m³をそれぞれ与え、掃流砂については自由流出

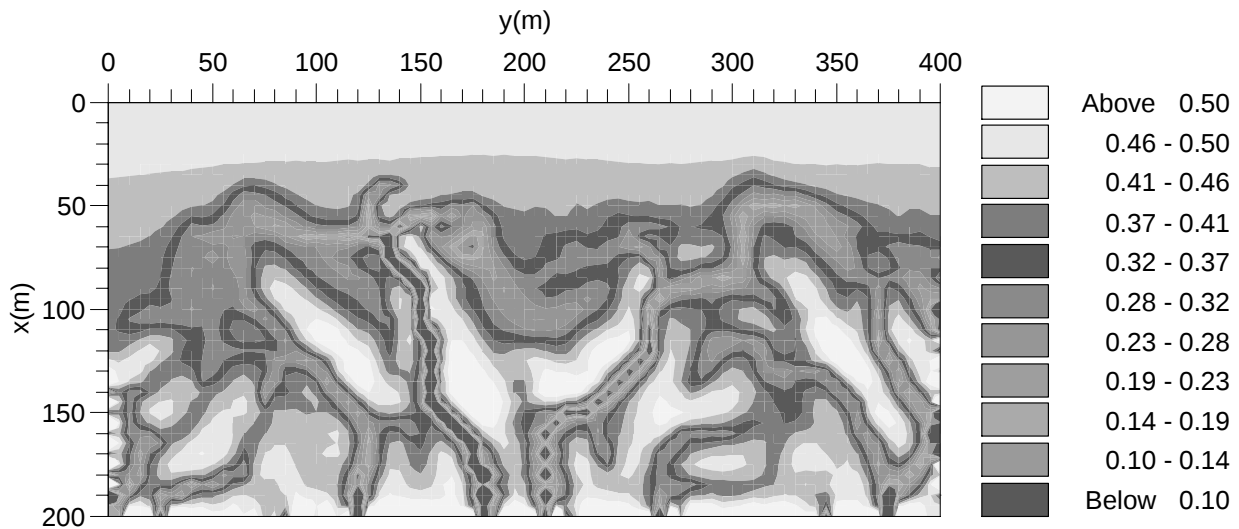


図-7 再現計算河床コンター図(200日後)

とした．なお，計算時間間隔 Δt は次式によって算出した．

$$\Delta t = C_t \min \left(\min \frac{\Delta x}{|u_{ij}| + \sqrt{gh_{ij}}}, \min \frac{\Delta y}{|v_{ij}| + \sqrt{gh_{ij}}} \right) \quad (14)$$

ここで， C_t ：クーラン数 ($0 < C_t < 1$) である．

計算条件の概念図を図-4，図-5に示す．

4．再現計算結果

再現計算0日後，5日後，50日後，100日後，150日後の河床コンター図を図-6に，180日後の河床コンター図を図-7にそれぞれ示す．図-6を見ると，時間が経過するごとに水路が形成されていく様子が分かる．また，図-8をみると，蛇行した水路形状が数本形成されていることから，既存の数値計算モデルを用いたシミュレーションによって，ある程度タイダルクreekを再現することが可能であると考えられる．また，タイダルクreekが河岸の地盤が高くなっており，自然堤防に類似した現象ではないかと考えられる．なお，形成された水路の水路幅は約10～20m程度，横断方向水路間隔は20～100m程度であった．

5．まとめ

本研究では，2次元河床変動モデルを用いて，感潮域におけるタイダルクreekの再現計算を行った．本研究で得られた結果を以下に列挙する．

- 1) 2次元河床変動モデルを用いた再現計算によって，タイダルクreekの再現が可能であることを確認できた．
- 2) 200m×400mの計算領域において潮位差を1mとした場

合，150日程度の再現計算で水路が形成されることが確認できた．

- 3) 再現計算によって形成されたタイダルクreekの水路幅は約10～20m程度，横断方向水路間隔は約20～100m程度であった．

なお，本研究で行った再現計算は，現地スケールに基づいたものではなく，今後の課題として，実際の現地条件に基づいた再現計算を行う必要がある．また，再現されたタイダルクreekの水路幅や水路間隔等が，どのような要因に左右されているかは未だ不明であり，様々な条件で再現計算を行うことにより，タイダルクreekの形成要因を把握することが今後の課題となる．さらに，本研究で行った再現計算は，計算格子間隔を5mとしたため，計算格子間隔を変化させて再現計算を行った場合，タイダルクreekの水路幅がどのように変化するかを確認する必要がある．

参考文献

- 1) A. D'Alpaos, S. Lanzoni, M. Marqni, & A. Rinaldo: *On the morphodynamic evolution of tidal environments*, Proceeding of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, pp.597-607, 2005.
- 2) N. Tombroni & G. Seminara: *The role of the inlets in the morphological degradation of Venice lagoon*, Proceeding of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, pp.635-643, 2005.
- 3) 辻井達一，岡田 操：北海道の湿原，北海道大学図書刊行会，2003．
- 4) 芦田和男，道上正規：混合砂れきの流砂量と河床変動に関する研究，京都大学防災研究所年報，No.14B，1971．
- 5) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, Proc. of ASCE, No.106(HY8), pp.1325-1343