## 感潮域における地形形成シミュレーション SIMULATION OF MORPHOLOGY IN THE TIDAL ENVIRONMENTS

### 舛屋繁和<sup>1</sup>・清水康行<sup>2</sup>・岩崎理樹<sup>3</sup> Shigekazu MASUYA, Yasuyuki SHIMIZU, Toshiki IWASAKI

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社ドーコン 河川部 (〒004-8585 北海道札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4番1号)
 <sup>2</sup>正会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科 (〒060-0808 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
 <sup>3</sup>学生員 北海道大学 土木工学科 (同上)

This study aims to develop a physically-based morphodynamic model in order to reproduce incision of tidal creek networks as well as evolution of geomorphology in the tidal environments. The process of incision and long-term geomorphologic evolution on tidal flats and marsh is of practical significance from the environmental view point. Generally, it is postulated that tidal creeks are developed as a result of ecomorphologic processes of tidal system driven by tidal energy. Some previous investigations have provided significant insight to this problem. However, there is still lack of a physically-based modeling approach that can replicate the initiation and evolution process of this phenomenon. In this study, physically-based model was applied to a narrow area referred to as tidal flats in order to provide quantitative and qualitative evaluation of its reproducibility. Calculation was conducted for different time scale up to 350 days. Calculation results revealed that the incision of tidal network and its initial development process can satisfactorily be reproduced by a physically-based computational model.

*Key Words:* Tidal creek, Two-dimensional morphodynamic model, Sediment transport, Suspended sediment

#### 1. はじめに

海岸付近には様々な地形が存在するが、複雑な平面形 状を有する水路(Tidal Creek)も、その1つである. Tidal Creekは世界中に存在し、イタリアのベニスラグー ン(図-1)等が有名である.一方、このような水路は我 が国にも存在し、北海道に存在する野付半島湿原(図-2)のように、植生の繁茂と相まって美しい景観を創出 している.しかしながら、Tidal Creekは長い年月をかけ て形成されたものであるため、その形成過程が未だ解明 されていない.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-2を見ても分かるように、Tidal Creekは上流域からの出水によって形成された水路ではなく、一般に、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<sup>2)</sup>やTambroni & Seminara<sup>3)</sup>らによって、ベニス ラグーンにおける土砂輸送解析が行われている.しかし、 物理モデルによるTidal Creekの再現計算は行われておら ず、その形成過程は未だ不明である.

本研究は、Tidal Creekの形成過程を明らかにするため



図-1 ベニス衛星写真(Google Mapより)



野付半島湿原 図-2

に、潮位変動によってTidal Creekが形成されるか否かを、 に関する渦動粘性係数である. また、渦動粘性係数は 2次元河床変動モデルを用いて検証を行った.

# 「式(4)」によって求める.

### $v_t = \frac{\kappa}{6} U^* h$ (4)

# 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.

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

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

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

ここで, x, y: それぞれ互いに直行する平面上の座標, t:時間, u, v: x, y方向の水深平均流速, p: 水の密度, h:水深, H:水位, g:重力加速度, y: 水深平均

なお、 て,て,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.

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

$$\tau_{y} = \frac{\rho g n^{2} v \sqrt{u^{2} + v^{2}}}{h^{\frac{1}{3}}} \tag{6}$$

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 ルに、長谷川4による斜面の効果を考慮した流砂量を組 み込んだ,全流砂連続式を用いた.斜面の効果を考慮し た全流砂連続式を「式(7)」に示す.

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

$$= \frac{q_B}{1 - \lambda} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)$$
(7)

ここで、z:河床高、 $\lambda$ :空隙率、 $q_{su}$ :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、  $q_B$ :流線方向の掃流砂量、 $\mu_{k}\mu_{k}$ :それぞれ静止摩擦係数 および動摩擦係数 ( $\mu_{k}\mu_{k}=0.5$ )である. $q_{bx}q_{by}$ は、それぞ れ $x_{y}$ 方向の単位幅掃流砂量であり、次式で表される.

$$q_{bx} = q_B \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \tag{8}$$

$$q_{by} = q_B \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \tag{9}$$

流線方向の掃流砂量<sub>q</sub>の算出には、「式(8)」の芦田・ 道上の式<sup>5)</sup>を用いる.

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*_C}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*_C}}{\tau_*}}\right) \tag{8}$$

ここで、 $\tau_{*c}$ :無次元限界掃流力、 $\tau_*$ :無次元掃流力、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.

$$c_b = \frac{\langle c \rangle \beta}{\left[1 - \exp(-\beta)\right]} \tag{9}$$

ここで、 <*c*>:水深方向平均浮遊砂濃度, β:*wh/ε*, ε:*wh/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.

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

また、河床からの土砂浮上量q<sub>su</sub>には、次式の板倉・岸の 式<sup>®</sup>を用いる.

$$q_{sui} = K \left( \alpha_* \frac{sgd}{u_*} \Omega - w_f \right)$$
(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.

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

ここで、 $B_*: 0.143$ 、 $\alpha': B_*/\tau_*-1/\eta$ 、 $\eta_0: 0.5$ である.なお、 土砂の沈降速度 $w_i$ は、次のRubeyの式によって算出する.

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



ここで、v:水の動粘性係数(0.01cm<sup>2</sup>/s)である.

なお、本研究では流れの計算には分離解法を用い,拡 散項に中央差分法,移流項にCIP法を用いた.

#### 3. 予備計算

#### (1) 計算領域および△t

本研究の目的である潮位変動によるTidal Creekの形成 過程を検証するためには、長期間の計算が必要となる. しかし、上記の数値計算モデルによって計算結果を得る ためには、多大な計算時間が必要となる.そこで、ある 程度の計算スピードを得るために、計算領域は最も単純 と考えられる矩形領域(直行座標系)とした.また、計 算時間間隔ムは次式によって算出した.

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

ここで,*C*<sub>t</sub>:クーラン数 (0<*C*, $\phi$ 1) である.

上式によって $\Delta t$ を算出する場合,計算格子間隔が大き くなるほど $\Delta t$ を大きくすることができる,そこで,計算 格子間隔をある程度大きく設定できるように,計算領域 は200m×200mとした.なお,計算格子間隔5.0mとした 場合,本研究で使用した計算機(Pentium(R)D3.20GHz) にて200m×200m領域を25日間計算すると,計算所要時 間は約1日間である.

#### (2) 境界条件及び初期条件

前述の通り、本研究は潮位変動によるTidal Creekの形 成過程を検証する事を目的としている.そこで,潮位変 動のみによってTidal Creekが形成されるか否かを検証す るために、上流端および両サイドにおいて、流れ及び土 砂の出入りは無いものとし、下流端には潮位を与えるこ ととした(図-3).また、下流端における掃流砂境界条 件は自由流出とした.なお、河床材粒径を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、 初期河床にはランダムに微小な凹凸(0.1mm程度)を与 えている.河床勾配については、予備計算の結果、急勾 配であるほど水路の形成スピードが速かったことから、





図-5 Tidal Creek再現計算結果(10日後)

河口域としては急勾配であるが、本研究では1/1000を採用した.

#### (3) 計算格子間隔の検討

長期間の計算を行う場合,計算スピードが重要な要素 となる.同一条件下で計算を行う場合,一般に,計算 メッシュ数が少ない方が計算スピードは大きい.しかし, 計算格子間隔が大きくなると、細部の現象を再現するこ とが出来なくなり、現象の再現性が低下する.そこで、 本項では計算格子間隔が2.0m、2.5m、5.0m、10.0mの場 合の4パターンについて計算を行い、計算結果を比較し た.計算結果を、それぞれ図-4a)、図-4b)、図-4c)、 図-4d)に示す.計算結果によると、計算格子間隔が2.0m、 2.5m、5.0mの場合については、水路形状を再現すること



図-6 Tidal Creek再現計算結果(100日後)



図-7 Tidal Creek再現計算結果(200日後)

ができたが、計算格子間隔が10.0mの場合については水 路形状を再現することができなかった.これは、計算格 子間隔が10.0mの場合、計算領域200m×200mに対して格 子間隔が大きすぎたものと考えられる.仮に、大領域で の計算を行った場合、計算格子間隔が10.0mであっても 規模の大きなTidal Creekを再現できる可能性があるため、 計算格子間隔については今後も検討が必要であると考え られる.

本研究では、長期間の計算を行う計算格子間隔として、 水路形状を再現できた計算格子間隔のうち、最も計算ス ピードが大きくなる5.0mを用いることとした.

#### 4. 長期間計算結果

前項の検討において、計算格子間隔5.0mとした場合、 200m×200mの領域を25日間計算すると、所要時間は約1 日であった.本研究では、1ヶ月程度の所要時間で約1年 間程度の計算結果が得られることから、長期間の計算を 行う際には計算領域を200m×400mとしてTidal Creek再現 計算を行い、Tidal Creekの初期形成過程を計算した.計 算結果を図-5、図-6、図-7及び図-8に示す.計算結果に よると、計算初期段階では細かい水路が多数形成され、



図-8 Tidal Creek再現計算結果(350日後)

その後、流れが卓越する水路以外は淘汰されていくこと が分かる. さらに時間が経過すると、水路周辺に土砂が 堆積し、自然堤防のような地形を形成する. この土砂の 堆積によって、より鮮明な水路が形成される. その後、 水路形状が時々刻々と変化する様子が再現されている. なお、計算領域境界部に数値振動が見られることから、 水路形状は再現できたものの、計算精度はそれほど高く ないものと考えられる.

本研究で行ったTidal Creek再現計算結果と野付半島湿 原の航空写真を比較すると、計算と航空写真のスケール は異なるが、航空写真において水路周辺に植生が繁茂し ているのに対して、計算結果でも水路周辺に自然堤防形 状が形成されている事や、蛇行形状を有している事など から、計算結果はTidal Creekの特徴を良く再現している と考えられる.

#### 5. まとめ

本研究は、潮位変動によってTidal Creekが形成される か否かを検証するために、2次元河床変動モデルを用い てTidal Creek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.

- 2次元河床変動モデルを用いた数値シミュレー ションによって, Tidal Creekの再現が可能である.
- Tidal Creekは、潮位変動の影響によって形成される事が確認できた。
- 3)計算の結果,水路周辺に自然堤防が形成された. この事から,現地における植生は形成された自 然堤防上に繁茂したものと考えられる.

なお、本研究で行ったTidal Creek再現計算は、現地ス ケールに基づいたものではない.また、再現されたTidal Creek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、野付半島湿原に見られ るようにTidal Creek周辺に植生が繁茂している場合、 Tidal Creekの形成・維持に対して植生が何らかの影響を 与えていることが想定される.以上のことから、今後の 課題として、

- Tidal Creek 再現計算における計算領域と計算格 子間隔の関連性の検討
- 2)様々な条件下での再現計算による,Tidal Creek の形成要因の把握
- 3) 実際の現地条件に基づいた計算
- 4) 植生の影響を考慮した計算

等が挙げられる.

#### 参考文献

- 1) 辻井達一,岡田 操:北海道の湿原,北海道大学図書刊行会, 2003.
- A. D'ALpaos, S. Lanzoni, M. Maraqni, & 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.
- 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.
- 4) 長谷川和義: 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する 水理学的研究, 北海道大学博士論文, pp1-184, 1984.
- 5) 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.
- 6) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, Proc. of ASCE, No.106(HY8), pp.1325-1343

(2007.9.30受付)