

植生の影響を考慮したタイダルクリークの形成機構に関する研究

The simulation of tidal creek with vegetation effect

北海道大学工学部
北海道大学工学研究所
株式会社ドーコン

○ 学生員 岩崎理樹 (Toshiki IWASAKI)
正会員 清水康行 (Shimizu YASUYUKI)
正会員 舩屋繁和 (Shigekazu MASUYA)

1 はじめに

感潮域に位置する湿地帯では、タイダルクリークと呼ばれる複雑な平面形状を有する水路が形成されることがある(例えば北海道野付半島湿原(図-1))。これらの水路は、一般に長期間に及ぶ潮汐の作用によって形成されると考えられているが、どのように形成されたかは明らかにされておらず、自然保護の観点からもその形成機構を明らかにすることは重要な問題である。

このような背景から、タイダルクリークを含めた感潮域の地形変動については多くの研究が行われている。D'Alpaos¹⁾は、流れの計算を簡略化した地形変動モデルを用いて、水路の再現や塩湿地の地形変動について研究を行っているが、物理的なモデルを用いて水路を含めた湿地帯を再現する研究は少ないのが現状である。近年、舩屋²⁾は2次元河床変動モデルを用いることで、潮汐の影響のみでタイダルクリークが再現可能であることを示している。しかし、図-1を見ても分かるように、実際の湿地帯ではタイダルクリークの形成と合わせて植生が繁茂していることから、実際の現象を把握するためには植生の影響を考慮したモデルを構築することが必要となる。

そこで本研究では、植生を含めたタイダルクリークの再現計算を行う第一段階として、まず舩屋らによって提案された数値モデルのうち流れのモデルに植生の抵抗を付加することで植生を考慮したモデルを構築する。これを1本の水路を有する地形を対象として、植生が繁茂している場合としていない場合の計算を行い、水路の発達過程および発達過程に及ぼす植生の影響を明らかにすることを目的とする。

2 感潮域の特徴

潮汐の作用によって地形が周期的に冠水、露出を繰り返す感潮域では、潮汐による流れだけでなく風による風送流や波浪、河川からの流入、コリオリ力などさまざまな力が重複して作用し、流れの場が形成されている⁴⁾。

一般に、感潮域の地形変動には砂浜の場合波浪の効果、干潟の場合潮汐の効果が強く影響するとされている⁴⁾。タイダルクリークが形成される湿地帯としては、先にあげた野付半島湿原の他に北海道風連湖のものや海外ではイタリアの Venice Lagoon、オランダのワデン海のものなどがある。これらの湿地帯はいずれも内湾性の感潮域に位置しており、なおかつ図-1のように上流からの河川流量の流入がないため、干潟と同様に地形変動の要因としては潮汐の作用が支配的だと考えられる。そこで本研究では、流れの駆動力として潮汐のみを対象とし、その他の作用を無視して計算を行うこととした。



図-1 野付半島湿原³⁾

3 計算モデル

3.1 流れのモデル

流れの計算には、2次元浅水方程式に植生の抵抗を加えたものを用いる。本来、植生を考慮した流れは3次元性が強く、特に潮汐を対象とする場合、水深が時間的に大きく変動するため、植生が水没する場合があります。2次元モデルで現象を正確に再現することは難しいと考えられる。しかしながら、タイダルクリークを含めた感潮域の地形変動を再現するには、長期間の地形変動シミュレーションを行う必要があるため、計算が煩雑となる3次元モデルではなく、2次元モデルを採用した。

また、植生の抵抗を運動方程式に導入するには植生をモデル化する必要がある。実際にタイダルクリークが形成されている野付半島湿原では、シバナ、ヨシ、ウミドリなどの塩生植物が繁茂しているとされている³⁾。これらの植物は、柔軟で高密度に繁茂するという特徴を持っているが、本研究ではこれらを簡素な形でモデル化するために、植生は直立性で流れによってたわまないかと仮定する。連続の式、および運動方程式は以下ようになる。

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

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

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

ここに、 x, y : 直行系の座標、 t : 時間、 u, v : x, y 方向の水深平均流速、 ρ : 水の密度 (1000 kg/m^3)、 h : 水深、 H : 水

位, g : 重力加速度 (9.8m/s^2) である. ν_t は水深平均渦動粘性係数であり, 次式で求める.

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

ここに, κ : カルマン定数 (0.4), u_* : 摩擦速度である. また, τ_x, τ_y は x, y 方向の河床せん断力で, 次式により算定する.

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

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

ここで, n : マニングの粗度係数である. なお, D_x, D_y : は植生による抵抗力で

$$D_x = \frac{1}{2} \rho C_D \min[h, D] \lambda u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

$$D_y = \frac{1}{2} \rho C_D \min[h, D] \lambda v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

である. ここに, C_D : 植生の抵抗係数, D : 植生高さ, λ : 単位体積に占める植生の遮断面積で

$$\lambda = \frac{n D_m}{S^2} \quad (9)$$

で表され, n : 植生の本数, D_m : 植生の直径, S : サンプリング間隔である.

なお, これらの流れの方程式は高精度差分法の一つである CIP 法を用いて計算を行った. 詳しい解法は成書 (例えば矢部⁵⁾) を参照されたい.

3.2 土砂輸送モデル

土砂輸送の計算には, 掃流砂と浮遊砂を考慮した 2 次元河床変動モデルに斜面効果を加えたものを用いる. 以下に土砂輸送の連続式を示す.

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + q_{su} - w_f c_b \right) \\ = \frac{q_b}{1-\lambda} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

ここに, z : 河床高, λ : 空隙率, q_b : 掃流砂量, q_{bx}, q_{by} : x, y 方向の掃流砂量, q_{su} : 河床からの土砂浮上量, w_f : 土砂粒子の沈降速度, c_b : 基準点浮遊砂濃度, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} 無次元限界掃流力, μ_s : 静摩擦係数, μ_k : 動摩擦係数で $\mu_s \mu_k = 0.5$ である. また, 浮遊砂連続式は拡散を考慮した以下の式を用いる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(uch)}{\partial x} + \frac{\partial(vch)}{\partial y} \\ = q_{su} - w_f c_b + \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial(ch)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D \frac{\partial(ch)}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

ここに, c : 水深平均浮遊砂濃度, D : 浮遊砂拡散係数で渦動粘性係数に等しいとする. また, 掃流砂の算出には芦田・道上の式を, 土砂浮上量の式には岸・板倉の式を, 土砂沈降速度の式には Rubey の式を, 限界摩擦速度は岩垣の式を用いる. 具体的な計算式については舩屋らの論文²⁾を参照されたい.

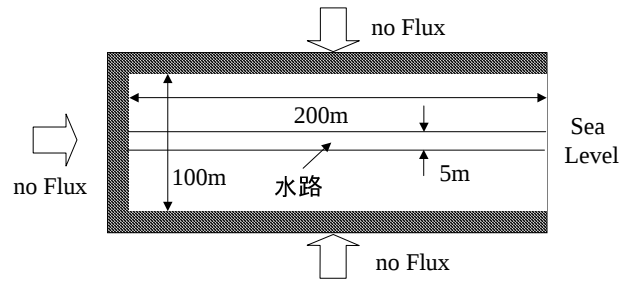


図- 2 初期河床および境界条件 (平面図)

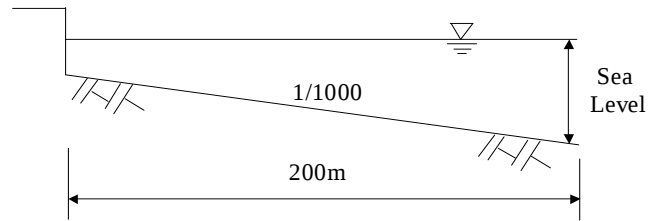


図- 3 初期河床 (縦断面図)

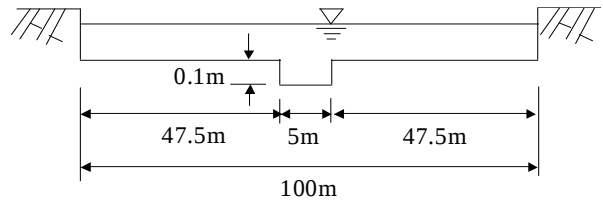


図- 4 初期河床 (横断面図)

4 計算条件

実際にタイダルクレークが形成されている野付半島湿原 (図-1) ではタイダルクレークに沿って植生が繁茂しており, これらの植生が水路の発達に何らかの影響を及ぼすと考えられる. そこで, 本研究では水路の発達過程及び水路に沿って繁茂する植生の影響を明らかにするために, 図-2~4 に示すような $200\text{m} \times 100\text{m}$, 下流端の標高が 0.3m , 勾配 $1/1000$ をもつ長方形領域の中央部に 0.1m の水路をつくり, これを初期地形として計算を行った. また, 河床材料については粒径を 0.01mm , マニングの粗度係数を 0.035 , 河床の空隙率を 0.4 とした. 境界条件は, 下流端で水位を潮位, 掃流砂および浮遊砂を自由流出とし, その他の境界では水と土砂の流入出を 0 とする. 潮位は, 平均水位 0.8m , 振幅 0.5m , 周期 12hr の規則波として与える.

計算を行うにあたり, 格子間隔は舩屋らの検討より $\Delta x, \Delta y$ を 5m とし, 時間刻み Δt は次式により時間ステップごとに最適値を求める.

$$\Delta t = C_t \min \left(\min \frac{\Delta x}{|u_{i,j}| + \sqrt{gh_{i,j}}}, \min \frac{\Delta y}{|v_{i,j}| + \sqrt{gh_{i,j}}} \right) \quad (12)$$

ここで, C_t : クーラン数 (0.8) である. 植生については, 野付半島湿原に繁茂しているとされるヨシを参考に一般的な値⁶⁾として n を $31 \text{ 本}/\text{m}^2$, D_m を 6.5mm , D を 2m と設定した. その結果, $\lambda = 0.202$ となる. また形状係数 C_D を 1.0 とする. これを, 水路の両サイドの格子に繁茂しているとして, 植生なしの場合と合わせて計算を行った.

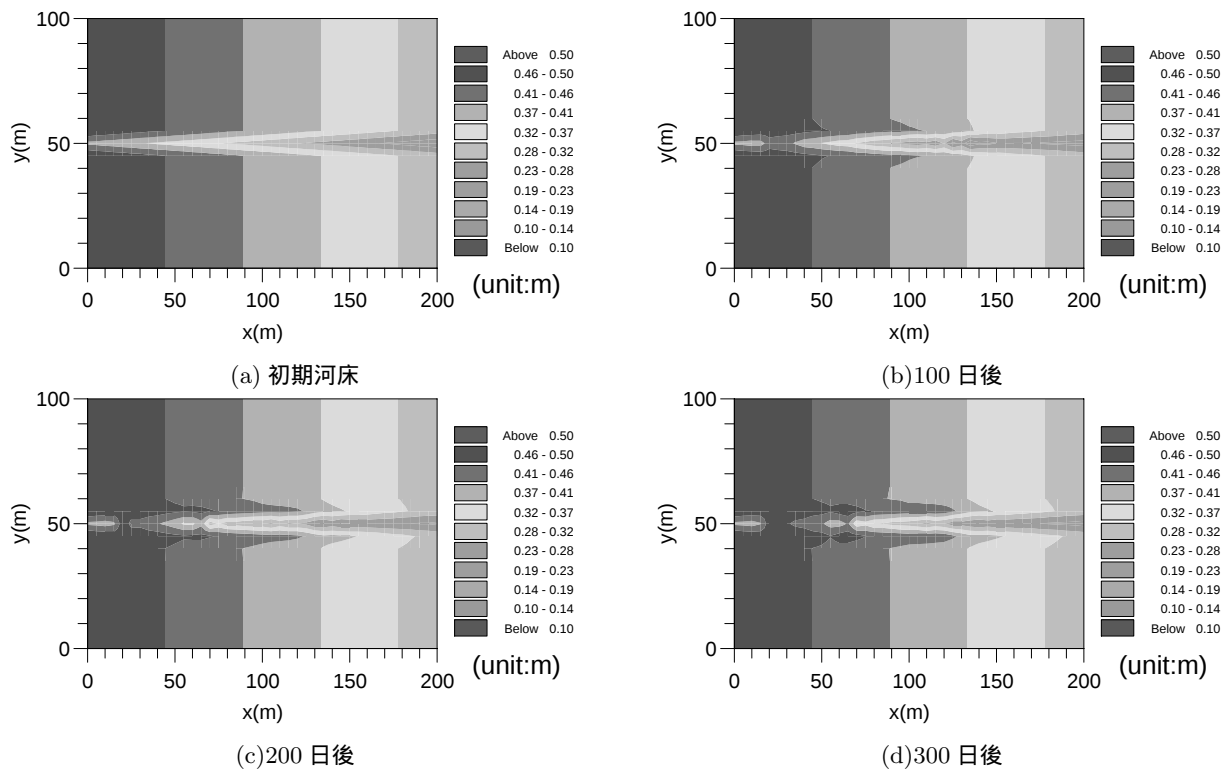


図- 5 水路の発達過程

5 計算結果

5.1 水路の発達過程について

計算結果として、植生なしの場合での0,100,200,300日後の河床コンター図を図-5に示す。これらの図から時間の経過と共に水路沿いの標高が上昇していき、自然堤防のような地形が形成されることがわかる。

本研究では、土砂輸送モデルには掃流砂と浮遊砂を考慮しているが、掃流砂は水路に流入することがあっても水路から流出してくることはないと考えられるため、自然堤防の発達機構には主に浮遊砂が関係していると考えられる。

ここで、図-6に図-5に示すxが100m、yが45mの地点、すなわち水路わきの地点における浮遊砂濃度の時間変化を示す。この図より、水路沿いの地点における浮遊砂濃度は周期的に増加していることがわかる。この浮遊砂濃度が増加している時間帯は、ちょうど干潮付近である。水路内部では、特に引き潮時に水路周辺から水が流入してくるため、他の部分よりも流速が速くなる。したがって、干潮時には水路内部で浮遊砂の巻き上げが起こり、浮遊砂濃度が上昇する。この浮遊砂が、水深の増加と共に水路周辺に越流もしくは拡散され堆積することにより、水路周辺の標高が高くなったと考えられる。

また、水路の縦断方向の変化を見てみると図-5よりxが0mの方向の水路が埋没していく様子がわかる。これは、先ほど述べたように干潮時に巻き上げられた浮遊砂が満ち潮時に岸側に輸送され、堆積したものだと考えられる。

5.2 植生が及ぼす影響について

植生が繁茂している場合でも、植生なしの場合と同様に水路沿いに自然堤防が形成される。ここでは植生が水路の発達過程に及ぼす影響を考察するため、図-7, 8にxが150mの地点における横断図を示す。ここで、図-7が植生なし、図-8

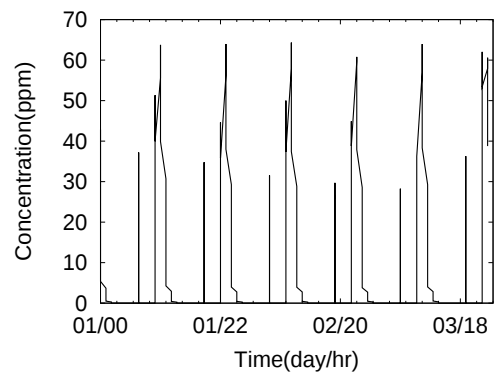
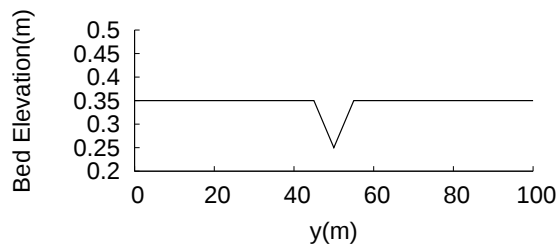


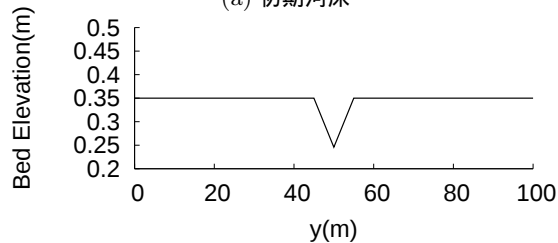
図- 6 浮遊砂濃度の時間変化

が植生ありの場合である。この図から、植生が繁茂している場合、自然堤防の形成に要する時間が50日程度で、最終的な自然堤防の高さが5cm程度であるのに対し、植生が繁茂していない場合では形成される時間が200日程度で、最終的な高さが2.5cm程度であることがわかる。つまり、植生が繁茂している場合の方が自然堤防の発達が促進されるという結果が得られた。

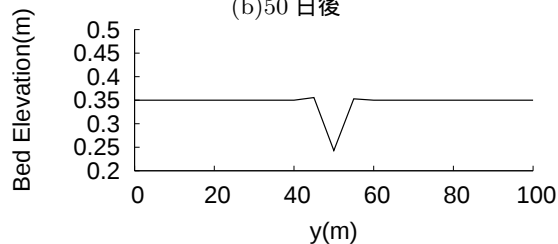
植生が繁茂している地点では、運動方程式中に植生の抵抗が加わるため、植生がない場合と比較して流速が遅くなる。また前節で示したように、自然堤防は水路から越流・拡散した浮遊砂が沈降することにより形成される。つまり植生が繁茂している場合は、水路から越流もしくは拡散してきた浮遊砂が植生の抵抗による流れの減速により沈降しやすくなり、堆積量が増加して標高の上昇速度が増加したと考えられる。



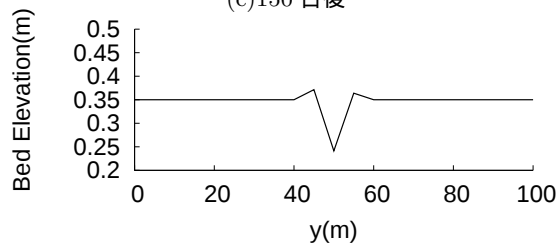
(a) 初期河床



(b) 50 日後

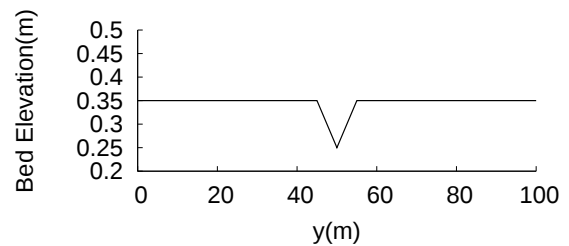


(c) 150 日後

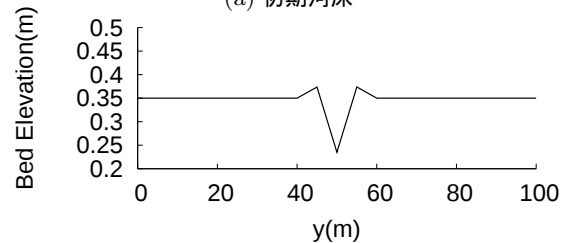


(d) 250 日後

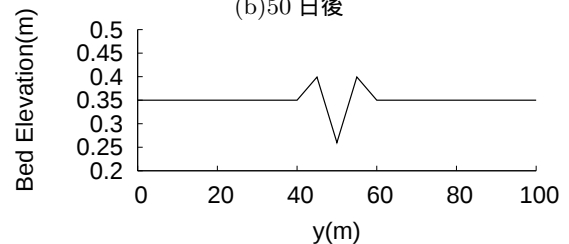
図- 7 植生なしの場合の水路の時間変化



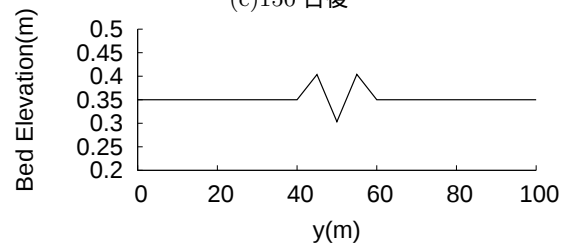
(a) 初期河床



(b) 50 日後



(c) 150 日後



(d) 250 日後

図- 8 植生ありの場合の水路の時間変化

6 結論

本研究では、舁屋らによって提案されたタイダルクリークの再現モデルのうち流れのモデルに植生の影響を付加することで、植生を考慮した再現モデルを提案した。このモデルを用いて1本の水路が存在する地形の変動をシミュレーションし、水路の発達過程及び水路沿いの植生が地形変動に及ぼす影響について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 自然堤防は、水路内において発生した浮遊砂が水路わきにあふれ出すことにより形成される
- 2) 水路沿いに植生が繁茂していた場合、植生の抵抗により流れが減速され、浮遊砂堆積量が増加して自然堤防の発達が促進される

このように自然堤防は、水路内部に生じた浮遊砂によって形成されることが確認できたが、これは植生を含めた水路の発達に大きな影響を与えることが考えられる。すなわち、水路の形成後に自然堤防が形成され、水深の低下により植生が繁茂し、さらに標高が上昇するといった経過をたどる

ことが予測される。しかし、このような過程を再現するには植生生長モデルを組み込んだ再現モデルが必要となる。これと合わせて植生モデルや境界条件などの計算条件については今後の課題である。

参考文献

- 1) A.D'Alpaos, S.Lanzoni, M.Marani, A.Rinaldo : Landscape evolution in tidal embayments: Modeling the interplay of erosion, sedimentation, and vegetation dynamics, J of geophysical research, vol.112, 2007
- 2) S.Masuya, Y.Shimizu, S.Giri: Simulation of morphology in the tidal environments, River Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM2007
- 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) 内山雄介: 干潟のながれと地形変化, ながれと地形, 2005
- 5) 矢部, 緒方, 滝沢共著: CIP 法と Java による CG シミュレーション, 森北出版, 2007
- 6) 淡海環境保全財団, 琵琶湖のヨシ再生に向けた植栽条件に係わる調査研究報告書, 日本財団図書館