

Tidal Creek の形成に関する基礎的実験及び数値解析

Fundamental Study on Development of Tidal Creek Networks

北海道大学工学部環境社会工学科シビルエンジニアリングコース	○学生員	奥寺 亮太 (Ryota Okudera)
北海道大学大学院工学研究院	学生員	岩崎 理樹 (Iwasaki Toshiki)
北海道大学公共政策大学院教授	フェロー会員	清水 康行 (Shimizu Yasuyuki)
北海道大学大学院工学研究院准教授	正員	木村 一郎 (Kimura Ichiro)

1. はじめに

1.1 背景

感潮湿地において、潮汐や波及びそれに誘発される表面流や浸透流により形成される特徴的な平面形状を持つ水路網のことを Tidal Creek と呼ぶ。こうした地形は世界各地で観測されており、潮汐による水位変化や海水、淡水の混合などの外的要因によって独特の生態系が創出されている。現在、Tidal Creek の形成過程・発達条件を明らかにする目的で、現地観測や数値解析、実験など様々なアプローチで研究が行われている。しかし未だ明らかになっていない部分も多い。またデータの蓄積も十分であるとは言い難い状況である。

1.2 研究目的とその手法

本研究では、Tidal Creek の発達・形成過程を把握することを目標とする。これを予測する数値計算モデルとして、概念モデル¹⁾と物理モデル^{2) 3)}の2つが考えられる。概念モデルは、流れの方程式を簡略化し、長期的かつマクロな視点での地形変動を予測するものである。しかし Tidal Creek の様に複雑な平面形状を持つ水路の形成過程を再現するためには、物理モデルの方が適切であると考えられる。既往の研究では、物理モデルにより現地で観測される複雑な水路網の形状や変動過程を予測することができるとしている²⁾が、数値計算モデルの評価が十分なされていないわけではない。Tidal Creek は非常に長い時間スケールで形成されるため、計算モデルの評価に必要なデータが乏しく、また広範囲にわたり複雑な水路網が形成されているため、考慮すべき地質条件も複雑なものとなる。これらの要因が数値計算モデルの適切な評価を困難なものとしている。

モデルの評価を行うためには、まず実験によるデータの蓄積が不可欠である。潮汐による地形変動を対象とした実験には、例として潮汐による砂洲⁴⁾、ラグーン内の水路網⁵⁾、一様勾配斜面から形成される水路網⁶⁾等がある。この内水路網を対象としたもの^{5) 6)}は、現地で観測される地形の再現に成功している。しかし、その条件や支配パラメータなどを解明し、詳細なメカニズムについて考察するためにはより多くの実験、検討が必要である。

そこで、本研究では平面二次元モデルを用いた Tidal Creek の形成を予測する物理モデルの確立を目指し、まず簡略化された水路網の形成過程を室内実験によって把握する。そして、地形データの収集を行うとともに、実験で得られたデータを用いて、計算モデルの検証を行う。

2. 実験

2.1 相似則

実験条件を設定するために、まず現地との相似則について考える必要がある。そこで Tambroni et al.⁴⁾にならない、現地と実験の相似性を検討していく。ここでは、水路網の形成が岸沖方向の一次元的な流れに依存するものと仮定し、一次元場での流れ及び土砂輸送に関して、関係式を無次元化する。なお、*は有次元の変数を表す。

まず流れの相似に対する検討を行う。一定水路幅における浅水方程式の運動方程式、すなわち一次元浅水方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + g \frac{\partial H^*}{\partial x^*} + \frac{u^* |u^*|}{C^2 D^*} = 0 \quad (1)$$

ここで、 t^* : 時間、 x^* : 流下方向軸、 u^* : 水深平均流速、 g : 重力加速度(=9.8 m/s²)、 C : 流速係数である。水深 D^* は次式で表される。

$$D^* = h_0^* + H^* \quad (2)$$

ここに、 h_0^* : 一周期での平均水深、 H^* : 潮汐による h_0^* からの変動量である。ここで、流れが振幅 a_0^* 、周期 T^* の正弦波的な潮位変動により生じるものと仮定し、以下の無次元を行う。

$$t^* = t/\omega^*, x^* = L_c^* x, D^* = D_0^* D \quad (3)$$

$$H^* = a_0^* H, u^* = u_0^* u, C = C_0 C \quad (4)$$

ここに $\omega^* = 2\pi/T^*$ 、 $u_0^* = \varepsilon \omega^* L_c^*$ 、 $\varepsilon = a_0^*/D_0^*$ 、 L_c^* : 対象領域の長さ、 D_0^* : 沖側境界における平均水深である。

これらを式(1)に代入すると、以下の無次元化された運動方程式が導かれる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \varepsilon u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{S} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{R}{S} \frac{u|u|}{c^2 D} = 0 \quad (5)$$

ここに無次元数は以下のように定義される。

$$S = \left(\frac{2\pi L_c^*}{L_0^*} \right)^2, \frac{R}{S} = \left(\frac{\varepsilon L_c^*}{C_0^2 D_0^*} \right) \quad (6)$$

なお、 $L_0^* = T^* \sqrt{g D_0^*}$ である。運動方程式の摩擦項にかかる無次元量 R/S は局所的な慣性と摩擦の比を意味するものであり、河床変動の検討を行う際この無次元数を合わせる必要がある。

次に、土砂の輸送に関して以下のシールズ数 θ と粒子レイノルズ数 R_p の相似を考える。

$$\theta = \frac{\tau_0^*}{(\rho_s - \rho) g d_s^*}, R_p = \frac{\sqrt{sg d_s^3}}{v} \quad (7)$$

ここで τ_0^* : 底面せん断力, ρ_s : 土粒子の密度, ρ : 水の密度($=1000\text{kg/m}^3$), d_s^* : 土粒子の粒径, s : 土粒子の水中比重, ν : 動粘性係数($=10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)である. シールズ数の相似を考えるため, 対象とする流砂は基本的に掃流砂となる. 現地での水路網形成には浮遊砂も役割を持つ可能性が考えられるが, 実験装置の制約上浮遊砂を発生させることが困難であるため, 掃流砂のみを扱う.

これら3つのパラメータについて, 現地での観測データと適合するように, すなわち以下の関係式を満足するように実験条件を設定する.

$$\frac{(R/S)}{(R/S)'} = 1, \quad \frac{\theta}{\theta'} = 1, \quad \frac{R_p}{R_p'} = 1 \quad (8)$$

ここに' は実験における値であることを意味する. なお, 一般に式 (8) の相似を考えるとき, 水面勾配項にかかる無次元化数の相似関係は満たされないが, 潮汐により生じる水面勾配は小さいため, 水面勾配項の影響は少ないものと考えられる. 式 (8) に以下に定義される現地と実験の物理量との比をとった Scale Factor ;

$$\lambda_c = \frac{L_c^*}{L_c'^*}, \lambda = \frac{D_0^*}{D_0'^*}, \varphi = \frac{u_0^*}{u_0'^*}, \tau = \frac{T^*}{T'^*} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{d_s^*}{d_s'^*}, \sigma = \frac{(\rho_s - \rho) - 1}{(\rho_s' - \rho) - 1}, \chi = \frac{C_0}{C_0'}, e = \frac{\varepsilon}{\varepsilon'} \quad (10)$$

を代入することで, 満たすべき条件は以下のようになる.

$$\lambda_c = \frac{e\lambda_c}{\chi}, \quad \delta = \sigma^{-1/3}, \quad \lambda_c = \frac{\tau}{e} \chi \sigma^{1/3} \quad (11)$$

2.2 実験条件

実験には図-1 に示すように奥行き 1.8m, 幅 0.9m の水槽を用いる. この水槽の底面に塩化ビニル粉末($\rho_s = 1400\text{kg/m}^3$, $d_s = 0.12\text{mm}$)を敷き詰めた. 地形勾配は, 沖側に向かって急にするため, 岸側が緩く (1/100 ~ 1/150), 沖側が深くなる (1/40 ~ 1/70)様に調整した. これは野付半島の地形を想定したものである. なお, 底面の締め固めは行わない. 沖側に設置されたフロートを上下させることで, 実際の潮汐に近い周期的な水位変動を再現した.

実験条件については, 式 (11) を満たすように決定したが, 不明瞭なパラメータ (流速係数比, 沖側境界水深, 無次元潮汐振幅比) に関しては, Tambroni et al.及び現地条件を参考にしながら, 適切と考えられる値に設定した. 実験は再現性の検討を目的に同一条件で3回 (Run 1), 振幅及び平衡状態についての検討を目的に一部条件を変更して1回 (Run 2) の計4回にわたって実施した. Run 2 は Run 1 の実験条件の内, 振幅, 潮汐周期及び奥行きスケールのみを変更して行った. 本来であれば, ここで変更した条件に相似則を適用する必要がある. しかし, 今回の実験では, 室内実験で形成される地形形状の傾向を探ることに重点を置き, 相似則の適用は省略する. Run 1 では50 サイクル, Run 2 では100 サイクルまで実験を継続し, その過程をデジタルカメラで記録した.

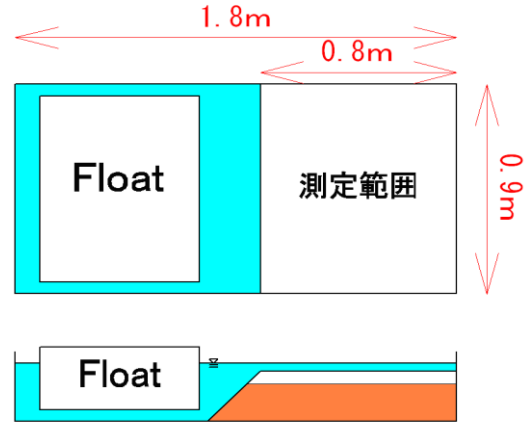


図-1 実験水路の模式図. 上が平面図, 下が縦断面図.

表-1 実験条件及び実物と実験のスケール比

	実験	現地(野付半島)	Scale Factor
L_c^*, m	0.8	2500	$\lambda_c = 3125$
T^*, sec	120	43200	$\tau = 360$
D_0^*, m	0.0035	1	$\lambda = 289$
d_s^*, mm	0.12	0.075	$\delta = 0.64$
$\rho_s, \text{kg/m}^3$	1400	2650	$\sigma = 4.125$
a_0^*, m	0.0075	0.8	$e = 0.37$

2.3 実験結果

(1) Run 1 の結果

図-2 に実験で得られた水路網の発達過程を示す. 実験初期段階から下流端において数本の水路が形成され, その後複雑な水路網に発達していく様子が観測された. いずれの場合にもまず底面に凹凸が形成され, 次第に明確な水路網へと発達し大小様々な水路が観測された. また, 水路網の形成には水位低下時の沖側への流れがより支配的であり, 水面上昇時には土砂輸送及び地形変動があまり観測されないという傾向が3回とも現れた. この実験によって, 実際の Tidal Creek と同様な平面形状を有する水路網が形成されたことから, 実験室において Tidal Creek の形成・発達を定性的に再現することができたと言える. ただし, 最終段階においても微弱ながら引き続き土砂の移動が観測されたことから, 平衡状態における水路形状に関しては更なる検証が必要である. そこで Run 1 における実験条件の内, 振幅 a_0^* , 潮汐周期 T^* , 奥行きスケール L_c^* を半分に設定して再び実験を行った.

(2) Run 2 の結果

図-2 に実験で得られた水路網の結果を示す. Run 1 で観測された特徴的な水路網と同様の形状をもつ地形が形成されたが, Run 1 に比べ, 発達した水路の幅や深さは小さいものであった. Run 1 と同様, 実験初期段階において, 主要な水路が数本発達したのち, 岸側方向への水路の枝分かれが観測されたが, 50 サイクルを経過したのち Run 1 とは異なり沖側方向や水平軸方向への枝分かれも観測された. また, 図-2 に示すように多方向に枝れ分かした水路は別の水路へ接近した場合に干渉を避けるように発達していく様子が観測された.

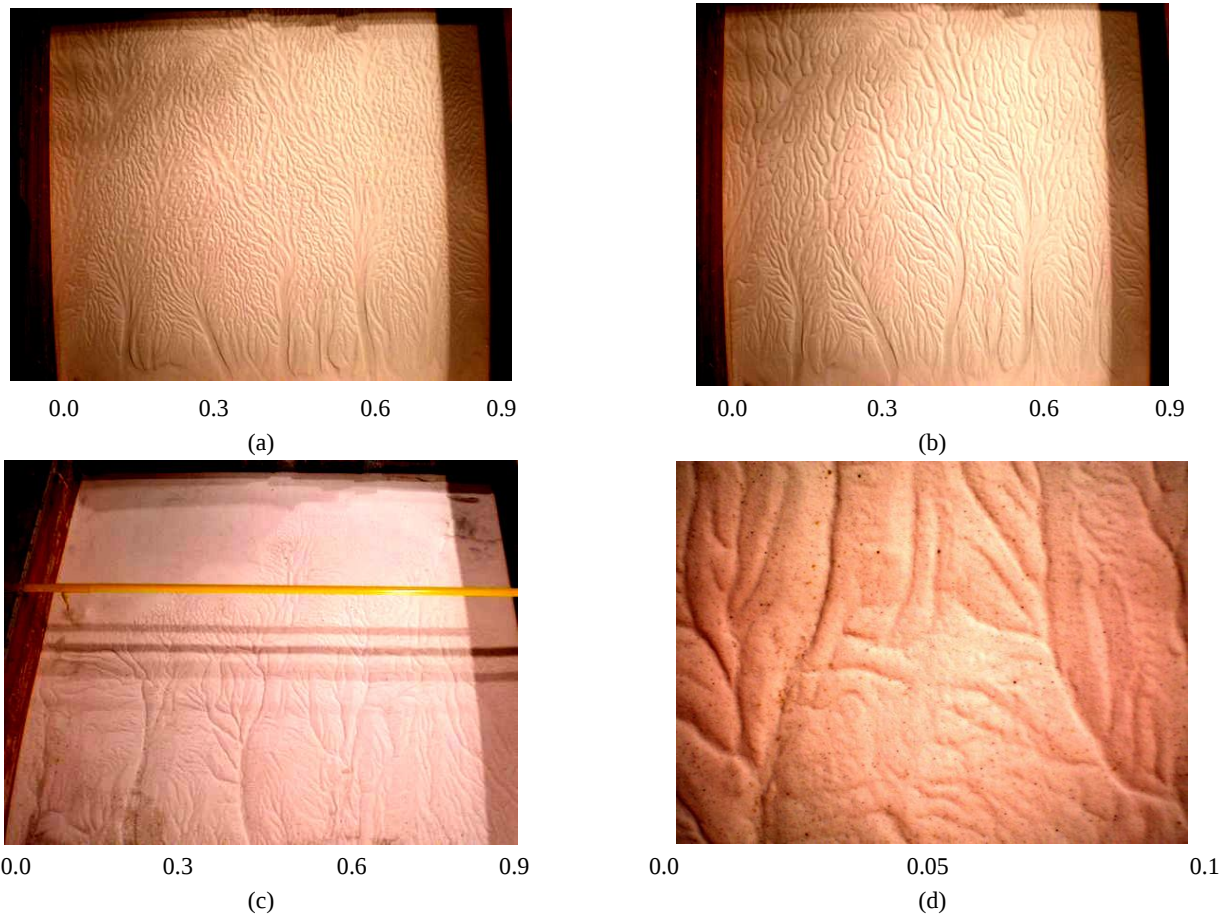


図-2 形成された水路網. 上側が岸側, 下側が沖側である. 写真はそれぞれ(a)Run 1 での地形形状 (9 サイクル後) (b)Run 1 での地形形状 (50 サイクル後) (c)Run 2 での地形形状 (100 サイクル後) (d)Run 2 での地形形状の拡大図 (100 サイクル) を表している. いずれも横軸が x 軸で, 単位は m である.

2.3 実験結果の考察

Run 1, Run 2 いずれの場合にも, 現地で観測される Tidal Creek の形状に類似性のある特徴的な水路網が形成された. この実験は潮汐周期及び振幅, 底面材料や植生の影響などを簡略し, 水面波や風化・侵食の影響を無視して極めて単純化したものである. 今回の実験で観測された水路網の発達過程や平衡状態へ至る過程についての傾向はある程度の普遍性を持つと予想される. しかし, Tidal Creek の形成過程を定量的に評価しているとはいえず, また比較検証を行うための十分なデータは得られていない. 今後の課題として更なる実験データの収集及びその定量的な評価方法について検討する必要がある.

3. 平面二次元モデルによる数値解析

3.1 計算モデル

本研究では, 実験で観測された Tidal Creek の形成・発達過程の定性的な比較検討によるモデルの評価を目的とし, 既往の研究において提案されている平面二次元河床変動モデル⁷⁾を用いた実験結果の再現計算を行う. 流れは水深平均された二次元浅水流方程式から計算し, 得られた流れ場から掃流砂・浮遊砂量を見積もり地形変動の計算を行うものである. 詳細は論文を参照されたい.

3.2 計算条件

計算条件は表-1 と同様に設定する. 境界条件として, 沖側境界で周期的な水位変動を与え, 岸側境界及び側壁での流れ, 土砂フラックスは 0 とする. まずは, 格子サイズを 1cm と 5mm に設定し, 計算結果に対する格子サイズについて検討する.

3.3 計算結果及び実験結果との比較

計算開始初期 (10 サイクル) と最終段階 (50 サイクル) の 2 つの段階における 1cm 及び 5mm の格子サイズを用いた場合の数値計算結果を図-3 に表す. 格子サイズが 1cm の計算結果では, 岸側から沖側への土砂輸送は観測されたものの, 実験で形成された複雑な水路網は再現できなかった. 実験で観測された水路は大きいもので幅 2~3cm, 深さ 2~3mm 程度であったことから, 格子サイズのスケールをより小さなものに設定する必要があると考えられる. 一方, 格子サイズが 5mm の計算結果では, 計算初期段階から沖側で水路が形成された後, 岸側に向かって発達していく様子が再現された. こうした水路網発達のプロセスは実験においても観測されたが, 実験初期段階で岸側に形成される複雑な凹凸については十分に再現できていないといえず. また水路形状も実験とは異なりより直線的なものであった. 計算モデルによって, 実験と同様の傾向を持つ水路形成過程を定性的

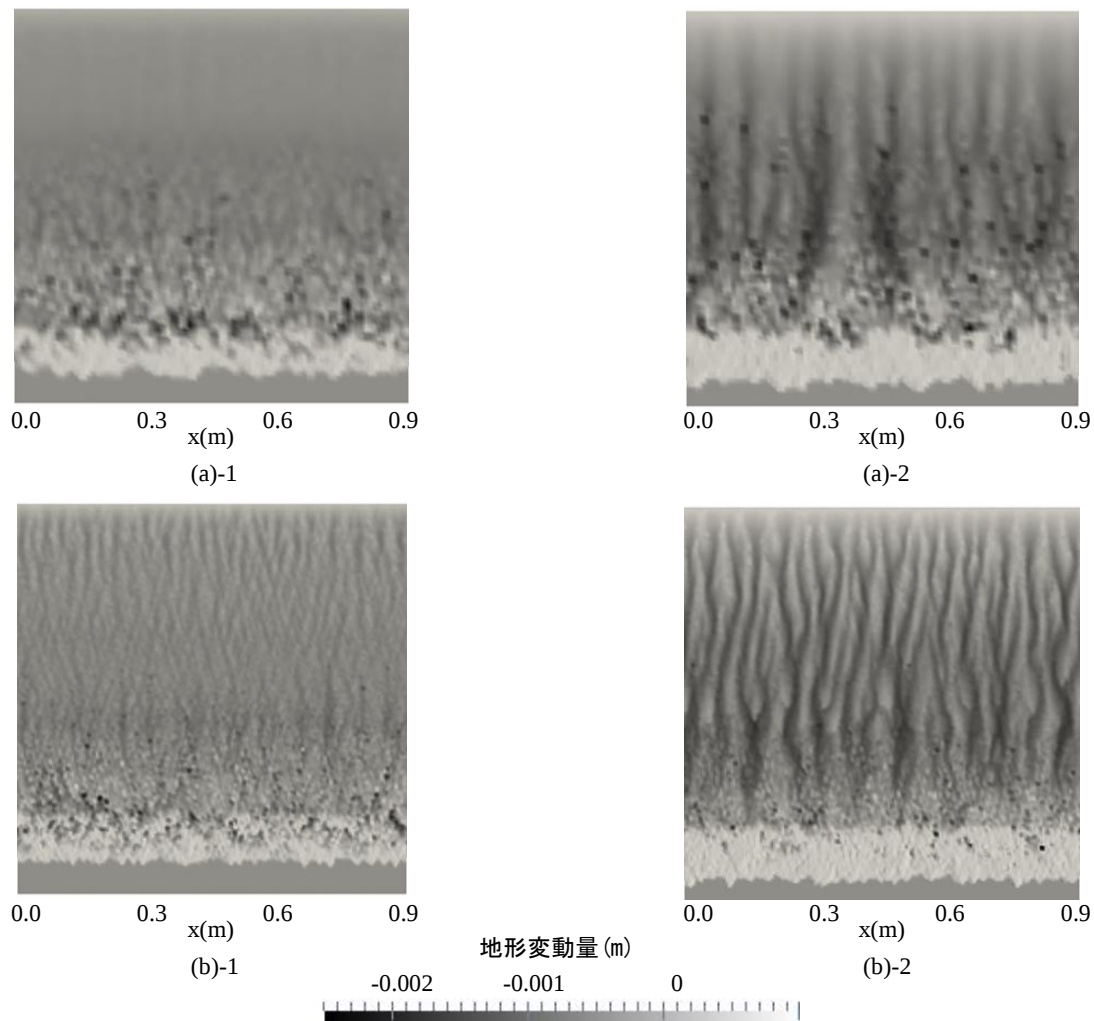


図-3 平面二次元地形変動モデルによる地形変動量のコンター図。上図が(a) 1cm, 下図が(b) 5mm の格子サイズを用いたもので、左側が(1) 10 サイクル、右側が(2) 50 サイクル後の結果である。また、上端が岸側、下端が沖側である。

に再現できること明らかになったが、今後その再現性を定量的に評価する方法を確立し、格子サイズや振幅等計算条件の検討を行っていく事が重要であると考えられる。

4. おわりに

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 野付半島湿原を想定した条件による室内実験を行うことで、現地で観測される複雑な水路網を定性的に再現することができた。
- 2) 実験の再現性を定量的に評価するためにも、土砂輸送や平衡状態、水路形状についての検討が重要である。
- 3) 平面二次元河床変動モデルにより、行った実験と同一条件下で複雑な水路網を定性的に再現する事ができた。
- 4) Tidal Creek の形成過程をより定量的に再現するため格子サイズをはじめ計算条件について検討していく必要がある。

今後は実験データの蓄積と並行して、実用可能な計算モデルの確立を目指し検討を進めて行きたい。

5. 参考文献

- 1) D'Alpaos, A., S. Lanzoni, M. Marani, S. Fagherazzi, and A. Rinaldo : Tidal network ontogeny: Channel initiation and early

development, *J. Geophys. Res.*, **110**, F02001, doi:10.1029/2004JF000182, 2007.

- 2) Marciano, R., Z.B. Wang, A. Hibma, H. J. de Vriend, and A. Defina : Modeling of channel patterns in short tidal basins, *J. Geophys. Res.*, **110**, F01001, doi:10.1029/2003JF000092, 2005.

- 3) Masuya, S., Y. Shimizu and S. Giri : Simulation of morphology in the tidal environments, *Proceedings of the 5th IAHR symposium of river, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp.755-762, 2007.

- 4) Tambroni, N., M. B. Pittaluga, and G. Seminara : Laboratory observations of the morphodynamic evolution of tidal channels and tidal inlets, *J. Geophys. Res.*, **110**, F04009, doi:10.1029/2004JF000243, 2005.

- 5) Stefanon, L., L. Carniello, A. D'Alpaos, and S. Lanzoni : Experimental analysis of tidal network growth and development, *Continental Shelf Research*, **30**, pp. 950-962 doi:10.1016/j.csr.2009.08.018, 2009.

- 6) Brigitte, V. : Three-Dimensional morphology of experimental tidal channels, *Earth Surf. Proc. Land.*, in review.

- 7) 岩崎理樹, 清水康行, 木村一郎, 田中岳 : 現地観測と数値解析による Tidal Creek の形成過程に関する考察, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, pp.745-750, 2008