

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

STUDY ON FORMATION MECHANISM OF TIDAL CREEK NETWORK
BASED ON FIELD OBSERVATIONS AND NUMERICAL SIMULATIONS

岩崎理樹¹・清水康行²・木村一郎³・田中岳⁴

Toshiki IWASAKI, Yasuyuki SHIMIZU, Ichiro KIMURA and Gaku TANAKA

- ¹ 学生員 北海道大学大学院工学研究科 (〒 060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
² 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒 060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
³ 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科准教授 (〒 060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
⁴ 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教 (〒 060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

Morphological evolution of salt marsh, including development of tidal creek network, is important from the ecological and river engineering viewpoints. This paper presents field observation of salt marsh and numerical simulations of tidal creek network to clarify the formation mechanism of channel network. Field observation was conducted in Notsuke marsh which has the tidal creek network to examine hydrodynamic and morphodynamic phenomena on tidal marsh. On the basis of consideration which derived from field observation, numerical simulations of tidal creek network were performed to clarify the evolution process of channel network using physical-based morphodynamics model. In this study, computations were carried out under different bed slope and vegetation condition in rectangular domain which has a meandering channel like tidal creek. The results show that the some small channels which are branched from a main channel are formed due to draining flow from tidal flat to a main channel in ebb tide phase with phase lag.

Key Words: tidal creek, formation mechanism, field observation, numerical simulation, phase lag

1. はじめに

内湾のような、流れの場が潮汐により支配されている塩湿地では、Tidal Creek と呼ばれる複雑な水路ネットワークが形成される場合がある。このような湿地帯では、豊かな自然や生態系が形成されているため、環境保全の点から湿地帯の地形変動を明らかにすることは、重要な課題である。また、感潮域に隣接して都市や構造物が形成されている地域 (イタリアの Venice Lagoon など) では、水路ネットワークを含めた湿地帯の地形変動に対する研究は、防災上の観点からも重要であるといえる。

そのため数多くの研究が行われており、Allen¹⁾ により、Tidal Creek を有する塩湿地での水理特性や土砂移動、河床形態に関する調査成果およびそれに対する知見がまとめられている。しかしながら、Tidal Creek の形成は長期間に及ぶ土砂輸送の結果であるため、形成過程や要因については、不明確な点が多い。また、日本においてはこのような地形に対する知見やデータは不足している。一方、近年数値モデルを用いて Tidal Creek の形成過程を明らかにしようとする研究が行われている。D'Alpaos ら²⁾ は簡易的な地形変動モデルを用いて、水路ネットワークのシミュレーションを行っている。し

かし、この地形変動モデルは、流れ・土砂輸送を物理的に表したのではない。また、Masuya ら³⁾ は、河川に適用される 2 次元河床変動モデルを用いて、潮汐の影響のみで水路の外形を再現できることを示している。その結果、外形については再現できたものの形成過程については明らかにされたとはいえない。また、河床粒径や水理条件などのデータが不足していたことから、現地条件にあった Tidal Creek の再現とはなっていない。

本研究では実際に Tidal Creek が形成されている北海道野付半島湿原について現地調査を行い、その結果について報告する。また Masuya らにより提案された数値計算モデルを用いて、地形変動シミュレーションを行い、現地調査で得られた知見と合わせて、Tidal Creek の形成メカニズムについて検討する。

2. 現地調査の概要

感潮域に形成される水路ネットワークに関しては、数多くの現地調査が行われている。例えば、Leopold ら⁴⁾ や Boon⁵⁾ は、Tidal Creek 内部での流量や流速、水深などを測定し、感潮域における水理条件を調査している。また、Pye and French⁶⁾ は、イギリスに形成されている

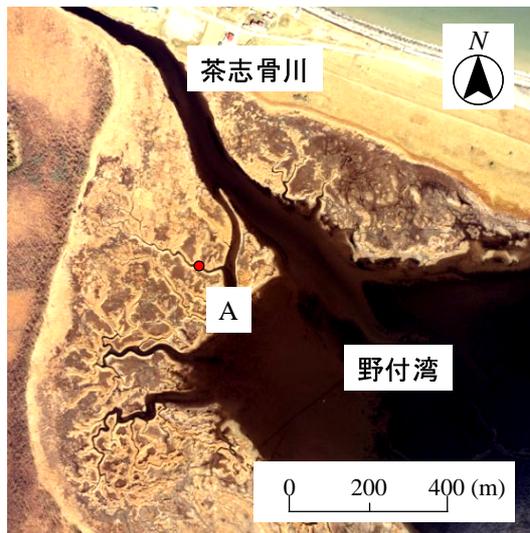


図-1 野付半島湿原の概要 (1978年撮影)⁷⁾

水路ネットワーク形状の調査を行い、ネットワークの種類を分類している。しかしながら、日本においてはこのような地形に関する調査は、著者らの知る限り実施されていない。また、蛇行河川のような地形と比較して、Tidal Creekのような地形は数が少なく、日本においては、北海道の一部など、限定的な地域でしかその形状を確認することはできない。そのため、現象への理解度が低い状態にあり、データや知見も不足しているのが現状である。そこで、Tidal Creekを有する湿地である野付半島湿原を対象として、2008年8月5日に現地観測を行った。

調査対象とした野付半島湿原を図-1に示す。対象地域は、北海道根室支庁標津町と別海町にまたがる野付半島の付け根に位置している。湿原は、野付湾に面しており、横には感潮河川である茶志骨川が流れている。図に示すように、湿原には無数の水路(Tidal Creek)が形成されている。今回の調査では、湿原の地形や河床材料、水理条件を観察すると共に、図-1の赤丸に示すA点において流速・水深の測定を行った。

3. 観測結果および考察

(1) 野付半島湿原の地形特性

野付半島湿原では、非常に緩やかな勾配を持つ湿地帯に、いくつかの蛇行した水路すなわち Tidal Creek が形成されている。以下、現地調査時に観測した地形特性について述べる。

A点の上流に形成される Tidal Creek は、幅が最大 5m 程度、水路底から湿地面までの高さが 1.5m 程度である。河床材料は、湿原全域にわたって強い粘着性を持つ粘性土によって構成されている。特に湿地帯では、非常に軟弱で微細な粒子で構成される腐泥層が堆積している。一方、水路内部における河床材料の構成は湿地帯とは異なっており、表層は 10cm 程度の軟弱層であるが、湿

地帯よりも粘性土の割合は少なく、細砂と粘性土が混ざり合っている状態である。これは、次節の水理条件にも示すが、水路内で 30~40cm/s 程度の流速が生じ、細粒分が流出したためだと考えられる。粒度分布はばらつきが大きく、およその中央粒径は 0.2~0.3mm 程度である。

水路沿いには調査期間が夏季ということもあり、ヨシが密に繁茂し、自然堤防のような地形を形成している。繁茂しているヨシの高さは 1m 程度、茎の直径が 2~3mm 程度、密度は 150~250 本/m² 程度である。この植生と強い粘着性をもつ河床材料により、河岸の勾配はほぼ直角かオーバーハングしており、河岸侵食スピードは極めて遅いと考えられる。しかし、河岸の侵食過程として、オーバーハングした粘性土が、崩れ落ちていく様子が所々で観測できた。また、湿地全体としても土砂の侵食スピードがかなり緩やかであることが見受けられた。

(2) 感潮域における水理特性

感潮域では、潮汐により 1日に1回もしくは2回の水位変動の影響を受ける。観測の結果、野付半島湿原では、満潮時には野付湾側から水が浸入し、湿地全体は完全に冠水する。一方干潮時には、湿地地表面は一部の水溜りを除きほぼ大部分が露出し、水路においても上流側では水路床の一部が露出する。野付半島近傍の花咲港での潮位データ⁸⁾によると、観測実施日の 2008/8/5 は、大潮から小潮に遷移する中間であり、このあたりの海域にはおよそ 1m の干満差がある。このような標準的な潮位条件の下で、湿地面が冠水・露出を繰り返すことから、潮汐が小潮に近い状態以外は、湿原は常に冠水・露出の影響を受けていると考えられる。また、観測中の水面は非常に静穏であり、気象条件が悪化する場合を除いて、波浪や吹送流の影響は小さく、潮汐による流れが支配的であるといえる。したがって、野付半島湿原では、潮汐による地表面の露出・冠水サイクルに伴う流れにより、このような地形が形成されたと考えられる。

次に、定量的な観測結果として図-2に水深の時間変化を、図-3に流速の絶対値の時間変化を示す。図中には測定結果と合わせて野付半島近傍で潮位観測が行われている花咲港での潮位データを点線で示してある。なお、このデータは水位であることに注意されたい。

図-2に示すように、観測された水深の時間変化は、花咲港における潮位変動とは異なっている。7時から10時ごろに観測を行った下げ潮時には、花咲港の潮位変動と比較して水深の変化が緩やかであることがわかる。この原因として、内湾と外洋では現象の規模が異なるために内湾では外洋より潮汐の振幅が小さくなること、湿原に貯留された水が遅れて流出することなどが考えられる。この時間遅れに伴う流れについては、次節で詳しく述べる。一方、15時から17時ごろに観測を行った満ち潮時には、水深の立ち上がりが遅れている上に、

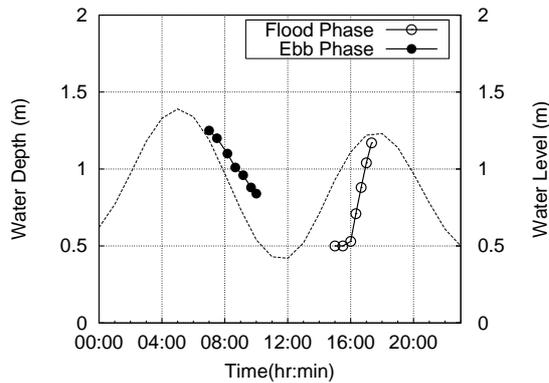


図-2 A点における水深の時間変化

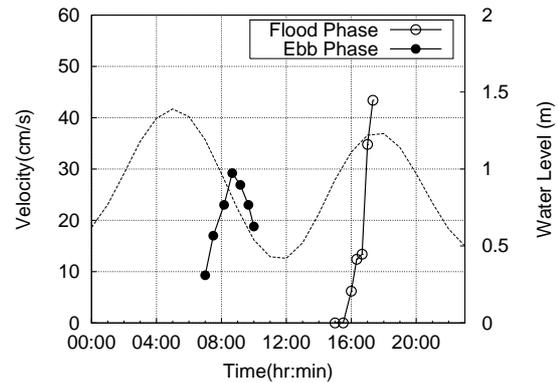


図-3 A点における流速の絶対値の時間変化

かなり急激に上昇していることがわかる。これは、水深観測水路の河口が、土砂の堆積により若干閉塞していることから、水が流れ込んでくるのに遅れが生じ、このような急激な水位変動となったと考えられる。

水深の変化に伴い、流速も大きく変化する。図-3に示すように、下げ潮時は水深が下がり始めると共に流速が上昇していき、水深変化が最も大きくなる中間潮付近でピーク値をとる。一方、満ち潮時は水深変化が急激であることから、流速は下げ潮時より速く、変化も急激である。今回の調査では、満ち潮時の流速ピーク値の測定を行うことはできなかったが、水深の変化が緩やかになるにつれて流速は減少すると考えられる。

ここで、流速と水深の関係を図-4に示す。図中では、下流側(海側)に向かう流速を正としている。なお、水深1.1m付近に示す点線は、河岸の高さと水位が等しくなったときの水深を示している。図より上げ潮時のほうが下げ潮時よりも流速の変化が大きくなっていることがわかる。また、流速のピーク値が現れる水深は、上げ潮時と下げ潮時で異なっている。流速ピーク時の水深が上げ潮時と下げ潮時で異なることは、Leopoldら⁴⁾やBoon⁵⁾の観測結果と同様の傾向を示している。一方、Allen¹⁾は、満ち潮時に水位が河岸より上昇した場合は、一度流速が減少する傾向にあると指摘している。今回の観測結果は、この知見とは異なる結果を示したが、この傾向は湿原の地盤高と海域の平均潮位により異なってくると考えられる。しかし、今回の調査では現象の観察に重点を置き、定量的なデータについても定点観測による流速と水深のみしか測定することはできなかった。したがって、野付半島湿原の水理特性や地形特性を観測によって説明するためには、水理量の時空間的測定や測量など、さらなる調査を行う必要がある。

(3) 地形形成過程に関する考察

流速を測定した結果、水路内部では最大流速が40cm/sを超える値を示すことがわかった。しかしながら、観測中の流水の様子を見る限り、活発な土砂移動は見られなかった。また、湿地帯における水の流れは、水路よりも緩やかであることが観測されたため、平坦湿地

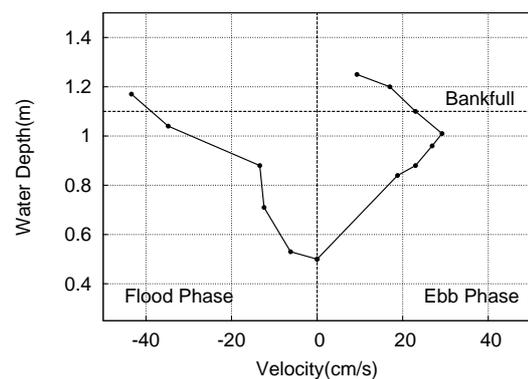


図-4 A点における流速と水深の関係

から水路形成までのメカニズムには、流れが集中するような過程があると考えられる。この地形形成メカニズムの1つとして、現地観測の結果以下のような考察が得られた。

湿地帯は非常に緩やかな勾配を持っている。このため、満ち潮時に氾濫した水は、引き潮時に下流の水位が低下しても排水されづらい状態にある。実際の観測でも、メインとなる水路の水位が河岸の高さより低下しても、湿地帯には残留水が存在している様子が見られた。このように、湿地帯の水が排水される時間と潮位変化との間に時間遅れができるために、湿地帯から水路内部に流下する流れには、大きな水面勾配が生まれ、非常に浅い水流がメインとなる水路に流れ込むと考えられる。その結果、土砂の移動が活発になり、メインの水路から分岐する流路が形成されたのではないかと考えられる。同様の現象として、潮汐の影響を受ける水制間のワンド内に形成される水路がある。木村ら⁹⁾は、ワンド内に形成される水路内において、水深と流速を時空間的に測定した結果、流量の最大値としては、水深の大きい時間に発生するが、土砂の移動は、水位が下がりきった後に水路内に生じる浅い流れによって支配されるとしている。この時間遅れは、堆積層に含まれる伏流水が、水位低下後に堆積層から流出することで生じるとされている。野付半島湿原では、河床材料が粘性土であり、非常に小さな透水係数であると推定されるため、伏流水による流出の時間遅れは生じないといえるが、平坦に近い湿地帯に残留する水が、こ

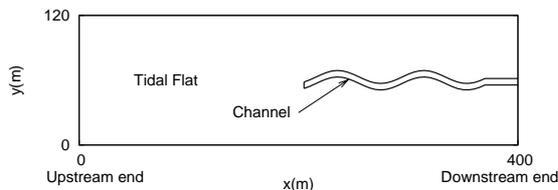


図-5 初期河床

れの代わりに時間遅れを生み出し，水路の形成に寄与しているものと考えられる．

4. 数値シミュレーションモデルを用いた検討

現地観測の結果から，Tidal Creek に接続する水路は，非常に平坦な湿地帯に残留した水が，下げ潮時に時間遅れを伴って，水路に排水されることで形成されるのではないかという知見が得られた．この知見について，Masuya らによって提案された数値モデルを用いて検討を行った．この数値モデルは，河川の河床変動計算に用いられる掃流砂・浮遊砂を考慮した 2 次元河床変動モデルである．詳細については論文³⁾を参照されたい．

(1) 計算条件

本研究では，メインとなる水路から分岐する水路の形成過程について着目する．そこで，計算領域を図-5のように 400m × 120m とし，中央部に Tidal Creek を模した蛇行水路を設置したものを初期河床とする．なお，格子間隔は dx を 5m， dy を 2m とする．計算モデルは，直交座標系を用いているため，滑らかな蛇行水路を初期河床とすることはできないが， y 方向に 3 メッシュ分の川幅を確保することで蛇行形状を表した．なお，水路の深さは 0.5m とした．また，河床材料粒径を 0.1mm，対象とする潮汐を振幅 0.8m，周期 12 時間の規則波とする．この値は，河床粒径については現地に観測される中央粒径より若干小さく，潮汐振幅は潮位データ⁸⁾から大潮と中間潮の中間あたりであり，大きめの値となっている．実際の水路形成は長時間の地形変動の結果であることから，観測値をそのまま用いると，非常に長期間の計算が必要となる．このことから，本研究では地形変動を促進させる目的で，現地観測の結果に近い条件を与えつつ，土砂移動が起こりやすい条件とした．この結果，計算結果が示す地形変動は実スケールよりも短期間に生じると考えられる．しかし，本研究では実時間スケールで現象を再現するのではなく，形成過程に関する考察を行うことを目的としているため，計算時間も考慮してこのような値を設定した．境界条件は，下流端で潮位を与え，土砂の流出は自由流出とする．なお平均潮位を，下流端の湿地標高と一致させるように設定した．また，その他の 3 領域では水，土砂の流入出力共になしとする．

観測結果の考察から，平坦な湿地帯からの水の流入により水路が形成されると考えられるので，まず計算

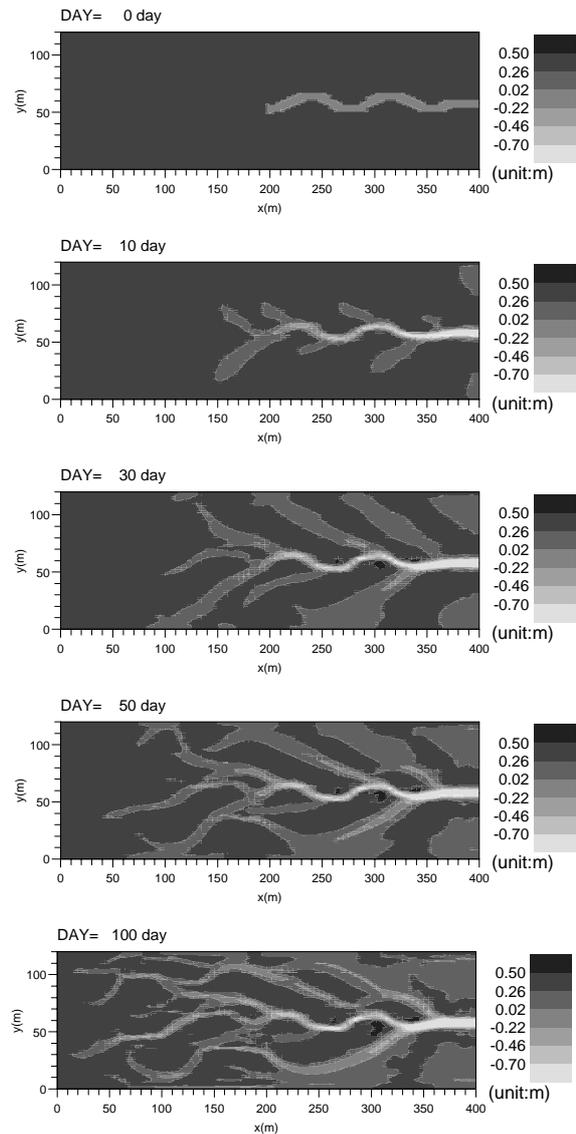


図-6 Run1 における河床コンター図

領域の勾配を 0 とした場合 (Run1) と 1/2500 とした場合 (Run2) で計算を行う．計算結果より水路の形成過程を考察すると共に，両者を比較し，勾配の影響を確認する．なお，Run2 の勾配 1/2500 は河口域としては急勾配であるが，比較を容易にするためにこの値を採用した．また，水路沿いに繁茂する植生も分岐水路の形成に何らかの影響を及ぼすと考えられるので，植生の影響を考慮したシミュレーション (Run3) も同時に行った．植生を考慮した地形変動モデルおよび植生成長モデルについては，著者ら¹⁰⁾のものを用いる．このモデルでは，流れの方程式中に植生の抵抗力を考慮し，流れが減速される効果で，植生を考慮した土砂輸送量を間接的に表現したものである．また，地形変動と合わせて植生の時空間分布を考慮する．植生分布については，植生成長が可能かどうかは標高のみによって決定されると仮定し，地点標高がある基準となる標高以上となったときに，植生の成長を開始させる．植生の成長に関しては，植生成長期間，植生の密生度および高さの成長限界値を設定し，成長期間に達するまで植生

の密度と高さを線形的に増加させる。なお、侵食により河床が植生進入時の河床より低下した場合、植生が消滅するとしている。植生要素のパラメータは、今回の観測で得られた値を用い、植生成長時間は地形変動スピードと適合するよう試行錯誤的に20日と決定した。また、ヨシは平均潮位程度でも成長可能であること¹¹⁾と試行錯誤的な計算から、植生成長可能標高を平均潮位より0.08m(振幅の1割)高く設定した。

(2) 地形形成過程について

Run1の計算結果を図-6に示す。図より、時間の経過と共に初期に設置した蛇行水路から分岐する流路が形成され、最終的に流路網が形成されていることがわかる。図-1に示す現地地形と比較すると、水路の分岐や蛇行している水路が再現されていることがわかる。また、分岐流路が発達すると同時に設置した初期蛇行水路は上流側に移動する。これは、満ち潮時に下流からの流れにより、土砂が移動した結果であると考えられる。メインの水路においては、満ち潮時の流速のほうが引き潮時よりも大きいため、このような現象が起きたと考えられる。実際には、干満により土砂移動方向を変えながら蛇行形状が変化していると思われる。

ここで、図-7に計算開始10日後における満潮から干潮へ移行する時の流速ベクトルと浮遊砂濃度の分布を示す。下流端の潮位はおよそ中間潮付近である。この図を見ると、下流端の水位はなくなっているが、水路両サイドの領域に残留している水が、水みちを介して水路内部に流れ込んできている様子が見られる。また、流れにより生じるせん断力で浮遊砂が発生していることもわかる。これにより、メインの水路から分岐する水路が形成されたと考えられる。

一方、図-8に干潮から満潮に水位が上昇してくる時の流速ベクトルと浮遊砂濃度の分布を示す。これは、図-7と同様に計算開始10日後の地形におけるもので、下流端の水位は中間潮程度である。図-6の河床コンター図をみると、水路の周りには自然堤防が形成されていることがわかる。これは、水路から巻き上げられた浮遊砂の堆積によるものである。水路沿いに自然堤防が形成されることにより、引き潮時に形成された分岐水路に、より流れが集中する。図-8を見てわかるように、水路からあふれ出すように水が流れ、それに伴い浮遊砂が引き潮時とは逆に水路外に輸送されていることがわかる。つまり、引き潮により形成された分岐水路に、流れが集中するため、流路がさらに発達していき、最終的な水路形状となると考えられる。

(3) 勾配、植生の影響

Run2の計算により得られた河床コンターの時間変化を図-9に示す。Run1とRun2の結果を比較すると、Run2のほうが水路から分岐する水路ができづらいたことがわかる。下流に向かって標高が下がるような勾配があることにより、引き潮時には、メインとなる水路や

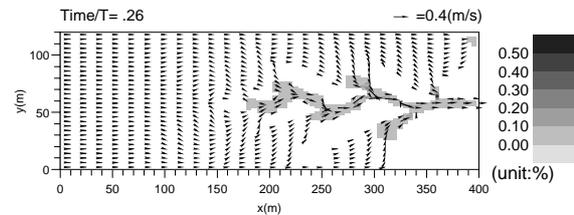


図-7 引き潮時での流速ベクトルと浮遊砂濃度分布

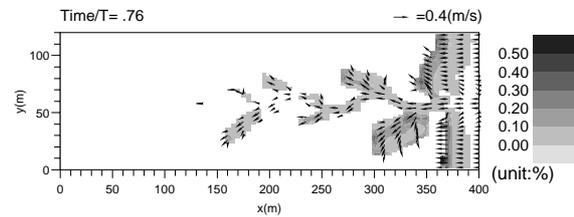


図-8 満ち潮時での流速ベクトルと浮遊砂濃度分布

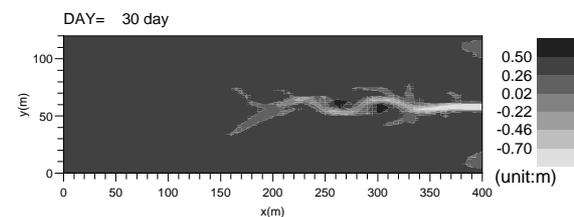


図-9 Run2における河床コンター図

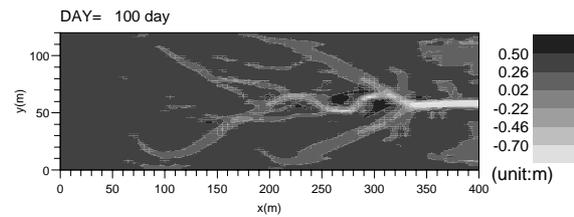


図-10 Run3における河床コンター図

下流側に水が流れやすくなり、大きな水面勾配ができる前に水が排水される。その結果、土砂の移動量が少なくなり、水路の形成が抑制されたと考えられる。しかし計算結果を見ると30日の時点では、Run1と比較して分岐水路の形成は遅いものの、分岐水路ができ始めると流れが集中して、100日後では水路網が発達していることがわかる。

一方満ち潮時は、水路から氾濫する水の流速方向が勾配と逆方向となるため、水の流れは弱められる。したがって、満ち潮、引き潮両方で平坦床の場合と比較して流れが弱められ、水路ができにくくなったと考えられる。このように勾配によって、水路ネットワークの形成が異なると考えられる。Pye and French⁶⁾は水路ネットワークの分類を行ったときに、形状は地形勾配や河床材料の粒径によって変化すると指摘している。したがって、今後種々の条件下でシミュレーションを行い、

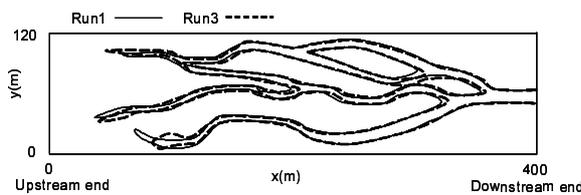


図-11 Run1 と Run3 に形成される水路ネットワークの比較

形成される水路ネットワークの形状はどのような要因により変化するかを調べる必要がある。

次に植生を考慮した Run3 の計算結果を図-10 に示す。また、Run1 と Run3 により得られた水路ネットワークを比較したものを図-11 に示す。図-11 からわかるように、植生を考慮した場合のほうが、蛇行部の上流側への移動が抑えられていることがわかる。これは、河岸に繁茂した植生が流れを減速した結果、侵食土砂量をおさえ、水路の移動量が減少する一方、水路沿いでの土砂堆積量が増加し、水路が固定化されたためだと考えられる。また、河床コンター図を見ると、初期に設置した水路や形成された水路の川幅は時間的にそれほど変化していないことがわかる。これは、本研究では河岸侵食の影響を考慮していないためである。河床変動計算では、これらの機構は河床材料の安息角を用いて河床が崩れるようなモデルによって表現される^{12, 13)}。しかし、観測結果から河岸の安息角は 90 度に近く、本研究のような大き目の格子サイズを用いる場合などからも考えると、地形を安息角より小さくするような侵食モデルでは、河岸侵食などを再現できないと考えられる。よって、今後より細かなスケールで水路の移動について検討すると同時に河岸侵食のモデル化についても考える必要がある。

5. おわりに

本研究では、これまで調査が実施されてこなかった野付半島湿原に形成される Tidal Creek について現地調査を行い、現象の観察と、流速・水深の定点観測を行った。これにより得られた知見を既存の地形変動モデルを用いた数値シミュレーションと合わせて検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- 1) 野付半島湿原では、強い粘性を持つ微細な土粒子により構成された湿地帯に、Tidal Creek が形成され、潮汐により地表面の冠水・露出サイクルの影響を受けている
- 2) メインとなる水路から分岐する水路の形成は、引き潮時に排水されなかった湿地帯の水が、時間遅れを伴って流出してくることに起因する
- 3) 緩い勾配を持つ湿地帯のほうが、湿地帯からの流出に時間遅れが生じ、水面勾配が大きくなることから、水路の分岐は促進される
- 4) 植生を考慮した場合は、水路沿いでの侵食量が抑制され、水路の移動が抑制される

このように、現地観測の結果と数値モデルを用いた検討から、水路の形成過程について定性的に示すことができた。しかし、現象へのさらなる理解や数値モデルの検証を行う必要がある点から、より詳細な現地観測データが必要であるといえる。また、数値モデルによる水路ネットワークの再現においても、現状のモデルでは実際に形成される複雑な形状を持つ蛇行流路までは再現できていない。特に、河床変動スピード、格子間隔および計算領域の規模は、相互に関係して、計算結果に影響を及ぼしていると考えられるため、今後これらの相互関係について検討すると同時に、計算手法に関しても考えていく必要がある。

謝辞：野付半島湿原での調査を行うに当たり、株式会社北開水工コンサルタントからは多大なご協力、ご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Allen, J.R.L.: Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe, *Quaternary Science Reviews*, Vol.19, pp.1155-1231, 2000.
- 2) D'Alpaos, A. Lanzoni, S. Marani, M. Fagherazzi, S. and Rinald, A.: Tidal network ontogeny: Channel initiation and early development, *Journal of Geophysical Research*, Vol.110, F02001, doi:10.1029/2004JF000182, 2005.
- 3) Masuya, S. Shimizu, Y. and Giri, S.: Simulation of morphology in the tidal environments, *Proceedings of the 5TH IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp.755-762, 2007.
- 4) Leopold, L.B. Collins, J.N. and Collins, L.M.: Hydrology of Some Tidal Channels in Estuarine Marshland Near San Francisco, *CATENA*, Vol.20, pp.469-493, 1993.
- 5) Boon, J.D.: Tidal discharge asymmetry in a salt marsh drainage system, *Limnology and oceanography*, Vol.20(1), pp.71-80, 1975.
- 6) Pye, K. and French, P.W.: Erosion and accretion processes on British Salt Marshes, *Cambridge Environmental Research Consultants*, 1993.
- 7) 国土交通省：国土画像情報(カラー写真)，国土情報ウェブマッピングシステム
- 8) 気象庁：<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/index.php>.
- 9) 木村，北村，鷺見，鬼束，武田，庄：ワンドの水理特性と河川環境，河川懇親会共同研究成果報告書，2002.
- 10) 岩崎理樹，清水康行：植生の繁茂を考慮した Tidal Creek の形成過程に関する研究，応用力学論文集，Vol.11，pp.745-752, 2008.
- 11) 栗原康，山崎博道，鈴木孝男：エコテクノロジーからみた浚渫汚泥の有効利用-3. 人工汽水性湿原法-，用水と排水，Vol.41，No7，pp.22-26，1999.
- 12) 清水康行，平野道夫，渡邊康玄：河岸侵食と自由蛇行の数値計算，水工学論文集第 40 巻，pp.921-926，1996.
- 13) 長田信寿，細田尚，村本嘉雄，M., Rahman：移動一般座標系による側岸侵食を伴う河道変動の数値解析，水工学論文集第 40 巻，pp.927-932，1996.

(2008.9.30 受付)