

感潮域に形成される水路網に関する研究

(Channel networks in tidal areas)

学位論文内容の要旨

陸-海境界に位置する感潮域では、その独特の水理特性とそれにより生じる土砂輸送により Tidal Creek と呼ばれる大規模水路網に代表される特徴的な地形を創出する。このような地形は感潮域における水・土砂輸送特性を決定する支配要素であり、これらにより創出される物理環境は様々な動植物の生息環境に大きく寄与している。このような流れや土砂輸送の結果として自律的に形成されるシステムは、非常に微妙なバランスの上に成立しており、何れか一つの要素の変化によりシステム全体に不可逆的な変化を引き起こすことが懸念されている。これは、地球温暖化に起因するとされる海面上昇や、陸-海全体の流域開発により生じる土砂収支の変化といった現象が、これらのシステムに深刻な影響を与えることを示している。このような背景から外力変化がもたらす水路網を含めた感潮域の地形に対する影響を定量的に評価する必要があるが、従来現地観測をベースとして研究が展開されていることから、このような現象に対する支配的な物理現象や水路網の形成・発達過程に対する基本的特性は明らかにされていない。また、このような基本的知見の不足により長期的かつ広域な水路網の発達を予測可能とする実用的な数値計算モデルといったツールは存在しないのが現状である。

従来このような複雑な現象の解明には、現地条件を適切かつ単純にモデル化し、詳細な測定や制御された境界条件の下での検討が可能なら室内実験を併用した研究が展開されるが、このような検討は近年になりようやく着手されたに過ぎない。従って、相似則、実験結果の現地への適用性などさらなる詳細な検討が必要である。このような単純化された条件の下における実験を、種々の水理・地質条件において実施することで、詳細な地形変動過程や支配的な水理パラメータの抽出といった基礎的研究を展開する必要がある。また、実験的検討により取得される基礎的データを用いることで、水路の形成やそれに続く水路網への発達に関する物理メカニズムの把握、予測ツールとしての数値計算モデルの検証が初めて可能となると考える。本研究はこのような背景を鑑み、感潮湿原に形成される水路網の形成・発達メカニズムに対して、現地観測をベースとした研究からでは不明であった、より基礎的な地形変動力学に関する検討を行ったものである。

初めに第2章において実際に Tidal Creek が形成されている野付半島湿原において現地調査を行い、現地スケールの水路網に関する水理的、地形的な特徴を明らかにする。現地観測により、これまで未知であった Tidal creek 内の底面材料分布、植生密度が定量的に明らかとなる。また、水路幅-水深比の測定、航空写真から得られる水路網の平面形状評価より、野付半島湿原におけるこれらの値は一般に知られる salt marsh における値と同程度であり、典型的な Tidal creek の特徴を有していることが示される。水路内部における流速-水深変化を測定により、水深に対する流速変動が上げ潮と下げ潮で異なる性質を持つこと、また水理量から推測される底面せん断力では土砂移動が生じづらいことが定量的に示される。これらのデータは、第3章以降に実施するより基本的な検討における基本データとなる。

第3章では、第2章で得られる現地観測データを室内実験に縮小することにより、実験室スケールにおいて Tidal Creek の形成・発達を模擬する。スケールの変換については、流れの力学的相似条件と掃流砂を対象とした相似条件より、北海道野付半島湿原において計

測された水理特性を室内実験スケールに縮小する。同一条件下における実験を複数回行うことで、感潮湿原に形成される水路網の形成・発達に関する素過程を観測し、規則的な潮汐と掃流砂輸送による単純条件下においても Tidal creek が形成されうることを示す。また、模擬された水路網の特性、すなわち水路横断形状を規定する幅-深さ比、水路網平面形状を規定する Nearest edge distance の持つ統計的特性及び水路網発達時間スケールを現地に形成される水路網と比較し、実験水路で模擬された水路網が現地でみられる水路網と同様の特性を持つことを示す。

第4章では、Tidal Creek の形成・発達メカニズムやその形状特性に対する支配的なパラメータの導出や水路網決定モデルの構築に必要な不可欠となる Tidal Creek の持つ複雑な形状特性を定量的に評価するための検討を行う。航空写真などの平面的かつ定性的な観測結果から得られる簡易な情報からでも、水路網の持つ形状特性を評価可能とするために、既に行われた室内実験による水路網及び現地スケールの水路網に対して、陸域の河道網を定量化する際に用いられる Horton-Strahler の方法を用いて水路を位数により等級化し、それぞれの位数の水路長について統計的特徴を解析する。水路長分布に対する検討より、水路長分布が対数正規分布で近似可能であること、この特性が異なる水理条件により有意に変化することが示される。また、このような水路長分布の持つ統計的特徴は空間スケールに対して普遍性を持つことが示される。

第5章では、種々のパラメータ下で行われた水路実験で得られた水路網形状に対して、簡単な解析モデルを用いることでその相違を生み出す要因について解析を行う。感潮域における地形変動を表現する簡易な数学的モデルとして、浅水方程式と掃流砂による流砂モデルを採用し、これらのモデルから地形変動に対する移流拡散型の方程式を導出する。この方程式中に含まれる移流と拡散の比を表すパラメータを定義し、縦断方向に対する移流の影響が強い場合水路が直線的になり、横断方向の拡散の影響が強い場合水路網が形成されづらい傾向にあることを示す。これは、感潮域における地形変動現象が移流拡散型の方程式で説明できる可能性を示すものである。

第6章では、感潮域にみられる複雑な地形変動現象を予測する数値計算モデルを構築する。数値モデルは浅水方程式と掃流砂モデルを組み合わせた浅水流場における一般的な地形変動モデルである。第3章で取得される水路実験結果を検証データとし、得られた数値計算結果と実験結果を第4章で提案される水路網平面形状評価法による比較を通して、計算モデルの実現象に対する予測可能性について議論する。構築された数値計算モデルは、適切な格子サイズの下では、水路頭部の成長や水路形成と流れの集中間の正のフィードバック作用といった地形変動の素過程を再現できるものの、小スケール水路の再現性が低いことが示される。

第7章では、第6章及び従来 of 現地観測的研究から示唆される水路網発達に対する浸透流の影響を考察するために、Darcy 則に基づく飽和浸透流モデルを構築された計算モデルに結合し、地盤内外の流れを連成して解くモデルを構築する。これを用いた数値実験より、潮汐による水位変動と遅れを伴って地盤から流出する浸透流により、小スケールの水路の形成が促進されること、水路幅-深さが増大することが示される。

以上の結果より、基本的なデータの不足からこれまで明らかにされてこなかった水路網の形成・発達過程やそれに及ぼす支配パラメータを把握することが可能となった。また一般に用いられる数値計算モデルの持つ予測可能性と適用限界を示し、これを踏まえた新たなモデルの導入により感潮域における地形変動をより正確に予測できる可能性を示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 清 水 康 行
副 査 教 授 泉 典 洋
副 査 准教授 木 村 一 郎

学 位 論 文 題 名

感潮域に形成される水路網に関する研究

(Channel networks in tidal areas)

近年進行中であるといわれる地球温暖化に伴う海面上昇や陸域から海域にわたる土砂収支の変化は、独特かつ貴重な感潮域の環境に対して大きな影響を与えることが懸念されている。感潮湿原には様々な地形が形成され、その物理環境が生物の生息域に大きな影響を持つが、その中でも感潮域に形成される水路網はその形成規模から感潮湿地全体の水-土砂-物質輸送を支配する第一要素といえる。従って感潮域の地形変動現象の解明に資する研究を展開する必要があるが、既往の現地観測の基本とした研究では、このような非常に長期間、広域にわたるこの水路網発達現象を明らかにすることは容易ではない。これは、より詳細な物理現象を理解するような理論的研究や、予測モデルとしての数値計算モデルの構築といった研究を展開するうえで大きな障壁となっている。近年になり制御された境界条件の元で詳細な検討が可能な室内実験が実施されてきているが、これを生かして総合的に水路網を含む感潮域の地形変動過程を検討した研究は存在しない。

本論文ではこのような背景をうけ、より詳細なデータが取得できる室内実験手法を提案し、この結果を用いることで感潮域の水路網に関するより基礎的な知見を得ることを目的とした総合的な研究である。得られた主要な結論を以下に示す。

・室内実験水路における感潮域に形成される水路網形成・発達のモデル化

長期間にわたるタイダルクレークの形成・発達過程を室内実験水路において再現できる物理的なモデルを構築した。長期間にわたる潮汐流による水路網の形成・発達現象を明らかにするために、野付半島湿原において取得される独自の現地観測データを力学的相似則を用いて実験室スケールに縮小することでその地形変動過程をモデル化した。本モデル化により、ある勾配を持つ斜面に潮汐流が作用することで、(1) 沖側からの初期水路群の発生、(2) 初期水路群の岸側への発達及び (3) それに続く水路網への発達を再現することが可能となった。得られた水路網の平面形状を Nearest edge distance を用いた形状評価手法を用いることで定量化したところ、現地の水路網と同様な特性を持つことが明らかとなった。また、潮汐波形の変化により水路網形状に有意な影響を与えることが示唆された。

・水路網平面形状の定量評価手法の提案

水路網形成・発達に対する支配パラメータの把握や室内実験と数値計算モデルの比較の際に必要な不可欠である、水路網平面形状特性の定量評価手法について提案している。本論文では水路網の平面形状から容易に取得可能な水路形状自体に着目し、これに対して水路長に対する統計解析を行っている。本解析により、(1) 水路長の発生分布は対数正規的分布となる、(2) 潮汐波形が水路長分布に有

意な影響を与える及び (3) 水路長分布特性は空間スケールに対して普遍性があることが示された。

・水路網の形成・発達要因に関する考察

潮汐流による地形変動を簡易モデルで表し、これを異なる水理条件下で実施される移動床実験に適用することで、水路網の形成・発達を支配する一要因について明らかにした。構築した簡易モデルから地形変動に対する移流拡散型の方程式を導出し、移流と拡散の比を示す Peclet 数を実験条件ごとに求めた。これらの結果より、縦断方向の Peclet 数が大きく移流による非線形性が強い場合、水路が直線的になること、横断方向の Peclet 数が小さく拡散による影響が強い場合、水路が形成されづらいことが示された。これは、水路網の形成に対して移流拡散型の方程式により説明する新たな解釈を提案したものと評価される。

・水路網を含む感潮域の地形変動予測モデルの構築

平面二次元浅水流式と勾配の影響を考慮した平衡流砂量式を組み合わせた数値計算モデルを構築し、潮汐流により形成される水路網の発達過程を再現可能な手法に関する検討を行っている。本研究により実施される実験結果との比較により、水路網の形成・発達を定性的に再現可能であることが示された。さらに、構築したモデルに浸透流モデルを結合することで新たな計算モデルを開発し、浸透流の影響により、小スケール水路の形成が促進され水路が複雑化すること、地盤内からの流出により水路横断形状が増大することが明らかとなった。

これを要するに、本論文はこれまでの現地観測を主とした研究では明らかにすることが困難であった感潮域に形成される水路網の形成・発達過程に対して、詳細な検討が可能な室内実験水路におけるモデル化手法を提案するだけでなく、水路網の基本的な性質である水路網の平面形状特性、水路網の形成・発達に対する支配要因を明らかにし、その形成・発達を予測する数値モデルを構築したものであり、感潮域の地形変動現象の解明に資するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。