

河川基金助成事業

「計画規模の洪水において河道内植生等が
河岸浸食リスクに与える影響の検討」

助成番号：2021 - 5311 - 008

埼玉大学大学院理工学研究科

助教 五十嵐 善哉

2021年度

1. はじめに

平成 23 年 9 月の出水において大規模な河岸侵食が発生した音更川の 18.2KP では、痕跡水位は計画高水位より 1 m 程度下回っていた。河岸侵食による堤防の欠損は例え河川水位が計画高水位を超えてなかったとしても、堤防が欠損して決壊に至る可能性がある。令和元年東日本台風では、記録的な豪雨により多くの地点で堤防決壊等による甚大な被害が生じた。千曲川の 104KP 右岸では流路変動や河岸侵食により堤防が欠損し、上田電鉄鉄道橋が落橋した¹⁾。荒川の熊谷大橋付近では、浮遊物を捕捉した樹木の周辺が大きく洗掘されていた。熊谷の場合、洗掘域が堤防とは離れていたため決壊等の被害は生じなかったが、浮遊物を捕捉しうる樹木が堤防付近に存在する場合、洗掘域が堤防に達して決壊に至る恐れがある。

河岸侵食については様々な研究が行われている。福岡ら(1993)²⁾は、自然堆積河岸の侵食過程を解明するため、荒川高水敷上で河岸侵食実験を実施し、①河岸の下層（非粘着層または弱い粘着性層）の侵食、②ヒサシ状に突き出した上部層の崩落、③崩落した土塊の細分化・掃流という三段階の過程を繰り返すことで侵食が進行することを明らかにした。また、このような河岸侵食を特にヒサシ状河岸侵食という。このようなヒサシ状河岸は、高水敷上に株同士が地下茎で繋がっているオギやツルヨシなどが生息している河川においてよく見られる。福岡ら(2003)³⁾は、ヨシの地下茎の密度を変化させた侵食実験を行い、ヨシの密度が一定以上であれば水流による侵食量が小さくなることを示した。尾花ら(2018)⁴⁾は、河道内植生が河岸侵食に与える影響について実験的に検討しており、植生密度が大きいほど側岸侵食を抑制することを示している。地下茎を有する草本の河岸侵食抑制効果については、地下茎がつながる方向が重要だと考えられるが、その影響は不明である。以上の背景を踏まえて、地下茎を有する植生の有無と、その地下茎の発達方向（地下茎が縦断的に繋がっている場合と横断的に繋がっている場合）がヒサシ状河岸侵食の進行プロセスにどのような影響を与えるかについて水理模型実験により検討した。また、荒川の上流において地下茎の発達方向を GIS より推定し、地形的特徴と地下茎の発達方向の関連について検討した。さらに、洪水時の浮遊物の捕捉や樹木周辺の河床変動を平面二次元解析の枠組みの中で解析するための二層流モデルを開発した。

2. 水理模型実験

2.1 実験概要

本実験は長さの縮尺を 1/10 とし、**図 2.1** に示すような長さ 14m、幅 0.5m、高さ 0.38m の循環式開水路を用いた。水路床勾配は 1/500 とした。実験水路内に幅 20 cm、高さ 5 cm の高水敷と幅 30cm の低水路部を設けた (**図 2.2(a)**)。高水敷は上流端と下流端は固定床とし、流れが一樣となる中流部のみ移動床とした。高水敷の移動床部分は側岸の横断勾配を 40°とした。これは、使用する移動床材量の水中安息角 (42°) より緩やかになるように設定している。高水敷移動床部分の上下流端各 0.8 m は、水流の影響を考慮し、固定床部分との繋がりが滑らかになるように。低水路部は上流から下流まで固定床とするが、粗度を高水敷（移動床）と同程度にするため、**図 2.2(b)** 珪砂 4 号をベニヤ板に張り付け、低水路

床の材料として使用した。

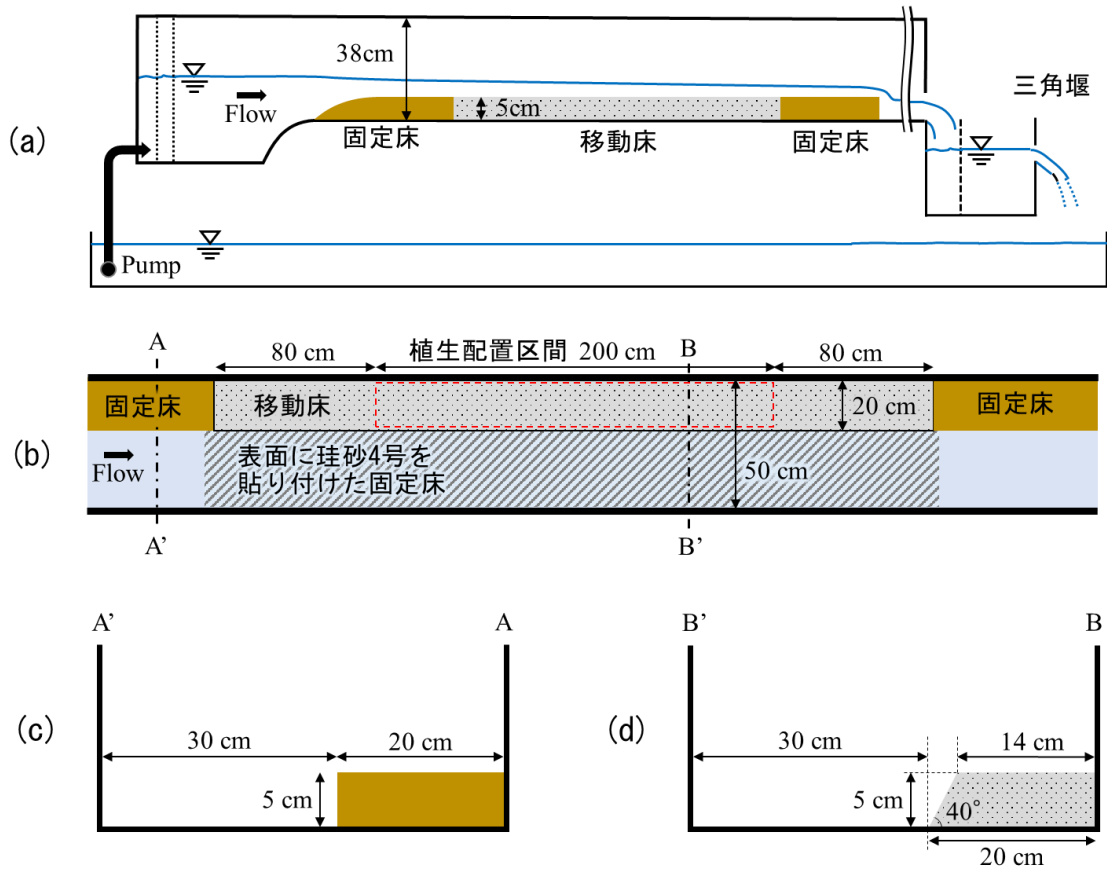


図 2.1 使用した開水路のイメージ ((a): 平面図, (b): 縦断図, (c): A-A' の横断図, (d): B-B' の横断図)

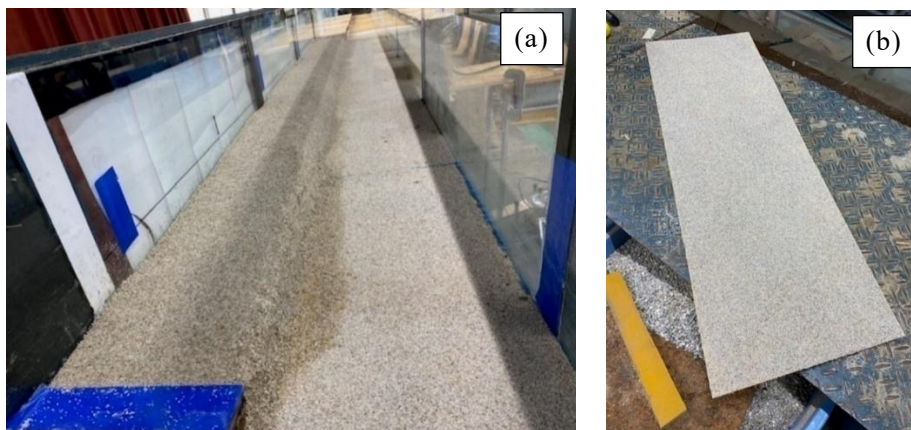


図 2.2 (a) 水を流す前の高水敷と低水路の初期状態と (b) 低水路部の床材量として用いたベニヤ板に珪砂を貼り付けた様子

2.2 実験ケース

本実験では、植生の条件として、高水敷に植生がない場合、地下茎が縦断方向に繋がっている場合、地下茎が横断方向に繋がっている場合の3ケースを実施した。それらの3ケ

ースについて、水位は2ケース実施し、合計6ケースの実験を実施した(図2.3)。低水路部の最大水深が0.09m、高水敷の最大水深が0.04mとなるように水深を決定した。また、水位が高水敷高と等しい場合も実施した。実験条件の詳細は次節以降に示す。

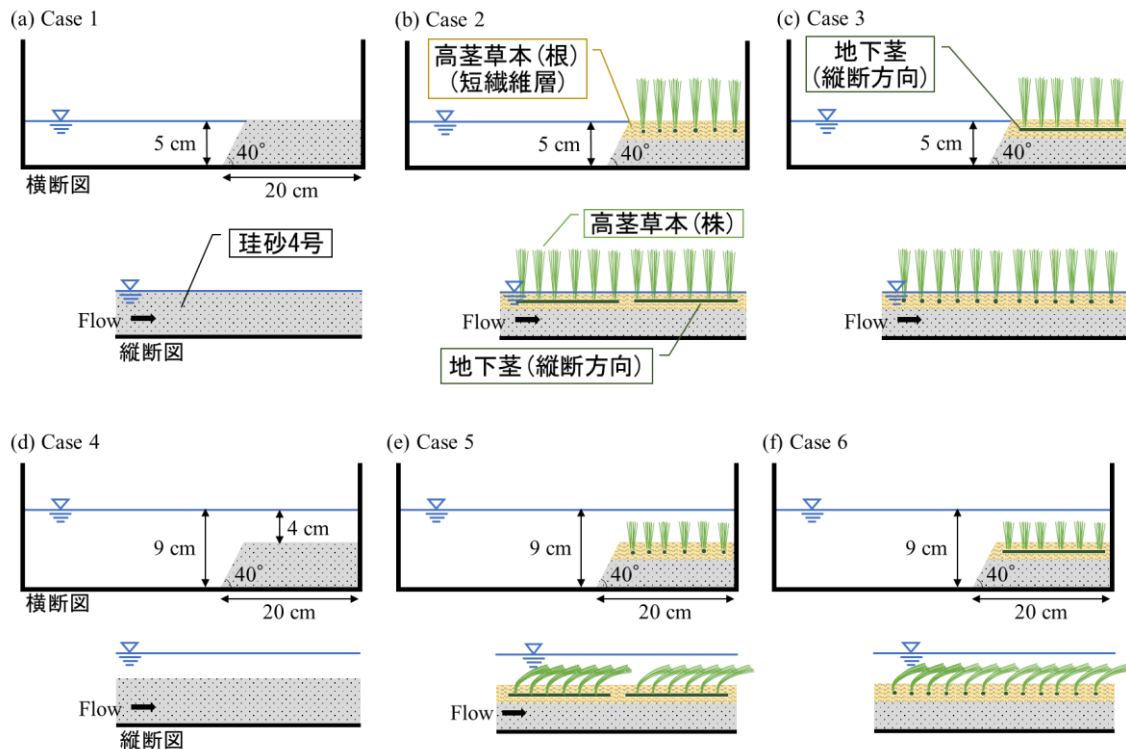


図 2.3 実験ケース ((a): Case1, (b): Case2, (c): Case3, (d): Case4, (e): Case5, (f): Case6)

2.3 横断形状および高水敷のモデル化

田中ら(2010)⁵⁾は、河道内砂礫州の樹林化し易さを評価する簡易指標として、破断・倒伏・転倒指標(BOI)と流出指標(WOI)を提案している。WOIは、90%粒径の無次元掃流力 τ_{*90} を90%粒径の無次元限界掃流力 τ_{*c90} で除した値(τ_{*90}/τ_{*c90})である。これは、樹木が生育している基盤の90%粒径 d_{90} の流出限界を表しており、田中ら(2010)⁶⁾はWOIが1以上で樹木が流出するとした。Yagisawa and Tanaka⁷⁾より、ツルヨシの流出限界としてWOIが1.9-2.0以上であることを参考にして、本実験の低水路部では植生が流出する条件(WOIが2以上)となり、高水敷では植生が流出しない条件(WOIが1未満)となるように使用する材料を珪砂4号とした。珪砂4号の最適含水比は9%であった。スライド式ダンパーで30 cmの高さから1カ所あたり2回落下させ、締固め度が90%以上になるよう突き固めを行った。

2.4 植生のモデル化

2.4.1 高茎草本

本実験では、ツルヨシやオギのような高茎草本を想定してモデル化した。ツルヨシはイネ科湿生植物であり、水深が浅い河川の上流域の砂地等に主に生息している。株から放射状に匍匐茎を伸ばすことで群落を拡大させていくことが特徴であり、強い群落拡大能力を

有している。また、洪水時には土砂を捕捉するという特徴もあり、砂州の固定化や樹林化の促進に大きな影響を与えている。ツルヨシは、株同士が地下茎で繋がっているため耐侵食性が増すことや、崩落した土塊が水中に長時間保持されることで河岸近傍の流速が低下されることなどが挙げられる。そのため、本実験ではツルヨシの匍匐茎による耐侵食性に注目し、ツルヨシの地上部、地下茎、根について、比重や剛性、空隙率を再現するように高茎草本をモデル化した。

2.4.2 高茎草本のモデル化

高水敷高より水位が高いケース(Case 4~6)の実験では、植生の抵抗が流れに影響を及ぼす。そこで、現地調査で計測された植生の情報等から植生モデルの地上部高さや密度等について決定する。また、本実験で対象とする高茎草本は、従来植生の実験でよく用いられる円柱でのモデル化は困難である。上述したように、高茎草本の特徴でもある匍匐茎はヒサシ状河岸侵食に大きく影響すると考えられるため、地下茎のモデル化は必須である。また、高茎草本の地上部は、洪水時には流れによってなぎ倒され、高水敷表面を覆うような形状をとる(図 2.4)。そのため、流れに対して直立するような円柱ではモデル化できない。本実験では、図 2.5 に示すように高茎草本の地上部のモデル化には釣り糸を束ねて高茎草本の株を再現し、地下茎のモデル化には塩化ビニルを、根のモデル化にはポリプロピレン繊維を用いた。選定理由は後述する。

青木ら(2007)⁸⁾が実施した現地調査では、熊谷大橋付近のツルヨシの高さは 65cm であった。本実験では長さの縮尺は 1/10 としたため、植生模型の高さを 6.5 cm とした。次に、高茎草本の地上部の株の間隔について検討する。田中ら(2010)⁹⁾は、ツルヨシとオギの繁茂密度は 100 (茎の本数/m²)、茎の直径は 0.005 m と示している。これより、100 本の茎の断面積の和は 0.00785 m² であり、空隙率は 0.992 である。本実験では高茎草本の地上部(株)を 2 cm 間隔で設置したため、0.25 株/cm² である。空隙率を 0.992 とすると、1 株の断面積の和は 0.032 cm² である。使用した釣り糸 3 号の直径は 0.0285 cm であるため、1 本あたりの断面積は 0.00064 cm² である。よって、1 株あたり釣り糸を 50 本束ねることで、田中ら(2010)⁹⁾のツルヨシとオギの現地調査結果と同様の空隙率となる。



図 2.4 洪水後の高茎草本の様子



図 2.5 植生モデル（地上部と地下茎）

2.4.3 植生モデルの比重

ヒサシ状河岸侵食の実験においては、植生モデルの流出タイミングや低水路部への沈降等を再現するため、植生モデルの比重は重要なパラメータの1つである。そのため、現地調査で採取したオギの比重を参考にモデル化で使用する材料を選定した。5つのオギのサンプルから測定した結果、葉（地上部）の比重は0.24～0.83（平均0.52）、根の比重は1.12～1.55（平均1.29）、根と葉を合わせた全体の比重は0.46～1.00（平均0.86）であった。葉に比べて根の比重が大きいことが分かる。そこで本実験では、地上部分を比重0.77の釣り糸、地下茎を比重1.18の塩化ビニルでモデル化した。

2.4.4 植生モデルの剛性

釣り糸を束ねて作成した植生の地上部モデルについては、流れの流体力によりたわむ程度の剛性を有することを確認した。植生の地下茎については、ヒサシ状河岸侵食が進行した際、地下茎が横断方向に伸びていると、地下茎がむき出しの状態となることが想定される。そこで、地下茎のモデル化では、現地調査で採取したオギの根と変形量を相似とするため、簡易的な片持ち梁試験によりヤング率を算出した。

荒川の現地調査で採取したオギの根のヤング率は2.17 GPaであった。なお、フォースゲージを用いて荷重を与えた。本実験で植生の地下茎モデルとして使用する塩化ビニルのヤング率を5回計測した結果、使用した塩化ビニルの実スケールに換算したヤング率は平均で1.94 GPaであり、現地で採取したオギの根のヤング率と同程度であることを確認した。このことから、本研究では地下茎のモデル化に塩化ビニルを用いることとした。なお、塩化ビニル（地下茎モデル）に2 cm 間隔で穴を開け、各穴に釣り糸50本ずつ（地上部モデル）通し、接着剤で固定した。

2.4.5 高茎草本の根のモデル化

ヨシやオギの根の部分のモデル化として、短繊維（ポリプロピレン繊維：TSファイバー プラスタ9 mm）を使用した。永多ら(2014)⁹⁾は、河道内植生の根系がもたらす土砂緊縛効果に関する基礎的研究において、短繊維（ポリプロピレン繊維）が根系の役割を十分に果たすことを示した。そこで、本実験では、永多らの実験を参考に珪砂に対する短繊維の体積比が1%になるように調整し、高水敷の地表面から2 cm（実スケールで20 cm）の範囲で珪砂4号と混合させた。福岡ら(1994)¹⁰⁾がオギ・ヨシ等の植生の河岸保護機能の評価で行った調査では、オギの地下茎深は10-30cmと示されている。この値から上述した短繊維層厚(2 cm)を決定した。短繊維層を作成する際は、短繊維が絡まってダマにならず、偏りが出ないように十分に注意した。短繊維混合層においても、上述した方法で締固めを行った。

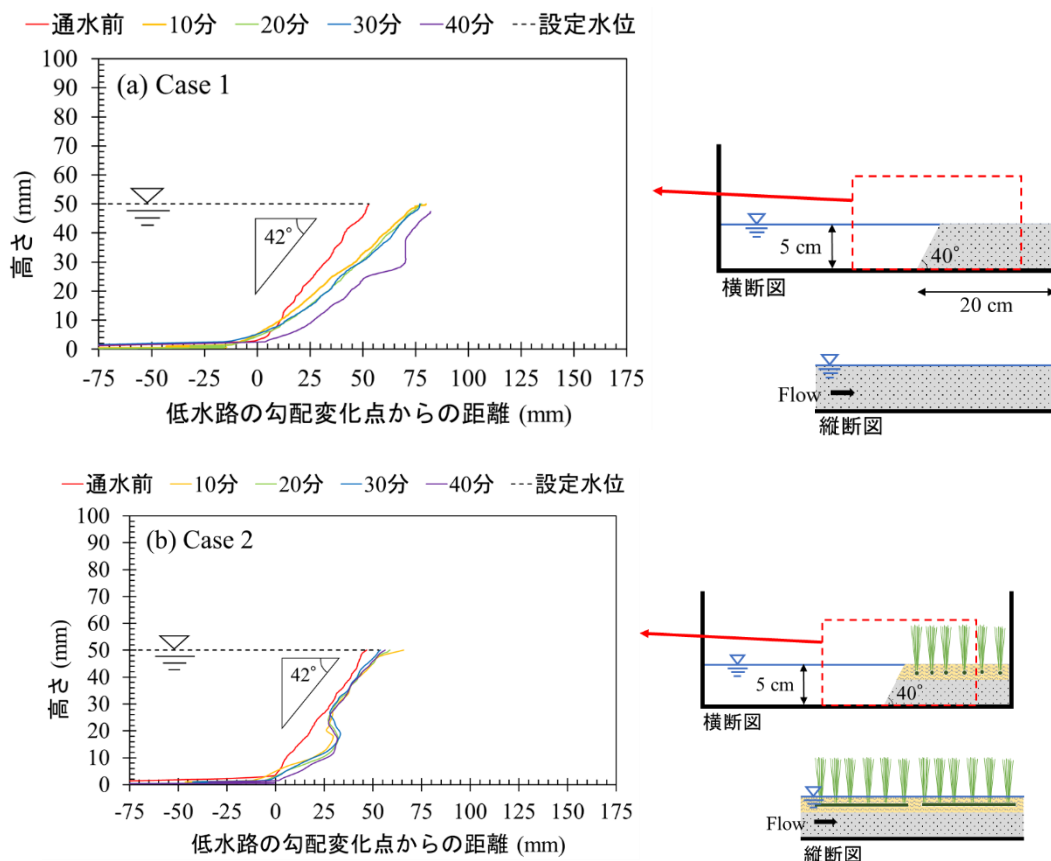
2.4.6 高水敷形状の計測方法

高水敷の形状の計測には、レーザー変位計(KEYENCE 社製, LJ-V7300)を使用した。斜面にヒサシ状河岸侵食が確認できる際は、レーザー変位計を水路の横に設置し、それ以外の時は水路の上部に設置して横断面形状を縦断方向に 2 cm 間隔で計測した。なお、本報告書では、水路の側壁側から計測したデータのうち、代表的な断面の計測結果のみを示す。Case 1~3 は合計 40 分間通水し、10 分ごとに停水して高水敷形状を計測した。Case 4~6 は 1 分 30 秒ごとに停水、計測を行い合計 7 分 30 秒間通水した。Case 5 では、ヒサシが崩落した直後にも停水し、追加で計測を行った。

3. 水理模型実験の結果と考察

3.1 水位が高水敷高と等しいケース (Case1, Case2, Case3) の侵食状況

水位が高水敷高と等しい Case 1~Case3 の侵食状況を図 3.1 に示す。植生が無い Case 1 では、10 分間で横断方向に約 27 mm 侵食が進行した。20 分後、30 分後は侵食があまり進行せず、変化は小さかった。一方、40 分後は横断方向に約 38 mm 侵食されており、高水敷高もわずかに減少している。これは、移動床区間の上流端の洗掘が進行し、流れの状況が変わったため、計測区間でも高水敷に水が乗り上げたためだと考えられる。すなわち、Case1 の 40 分の結果は上流端の境界条件が計測区間に影響を与えているため、参考にならない値である。侵食時の勾配は 10 分から 30 分では斜面の勾配は約 30°であり、水中安息角 42°より緩勾配であったが、一様な勾配となった。



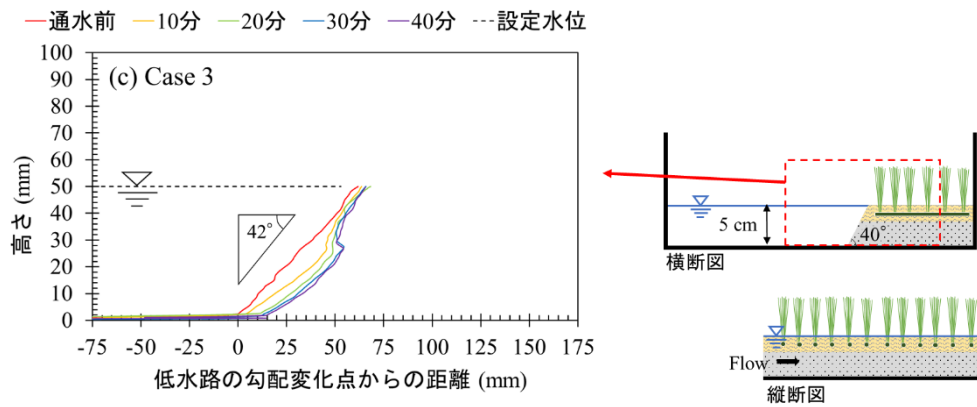


図 3.1 水位が高水敷高と等しいケースの侵食状況 ((a):Case1, (b):Case2, (c):Case3)

一方、高水敷に植生モデルがある Case 2 と Case 3 では、ヒサシ状の河岸侵食が発生した。高茎草本の根のモデル化として短繊維を混ぜた表面から 2 cm 厚の層はほとんど侵食されず、その下部が侵食された。Case 2 と Case 3 では、計 40 分経過時点でヒサシ部分が横断方向にそれぞれ 22 mm, 24 mm 侵食が進行した。特筆すべきは、30 分時点の Case1 の侵食幅(25 mm)と Case 2, Case3 の侵食幅 (30 分時点でそれぞれ 19 mm, 23 mm) が同程度である点である。すなわち、短繊維層により表層が侵食されにくくなった場合でも、ヒサシの下部の横断方向侵食速度はあまり低下しなかった。ただし、これは水位が高水敷高と等しい場合であり、横断方向の侵食量が少ない条件であることに注意が必要である。この条件では、通水 60 分後でもこれ以上侵食は進行せず、ヒサシ部分の土塊の崩落も発生しなかった。これは、ヒサシ状の河岸侵食が進行するとヒサシ部分が長くなり、その下部の流速とせん断力が低下するためだと考えられる。

Case 3 の方が Case 2 より侵食幅、侵食面積が大きくなったが、これらの 2 ケースでは地下茎の方向を除いて同じ条件である。そのため、この差は移動床部分の設置時の砂の突き固めや、短繊維の混ざり方の誤差と考えられる。図 3.2 に Case2 と Case3 の通水 40 分後の様子を示している。この写真からも短繊維層により侵食が抑制されたことが分かる。Case3 では短繊維層の一部が侵食された影響で、短繊維が Case2 よりも多く表面に露出している。

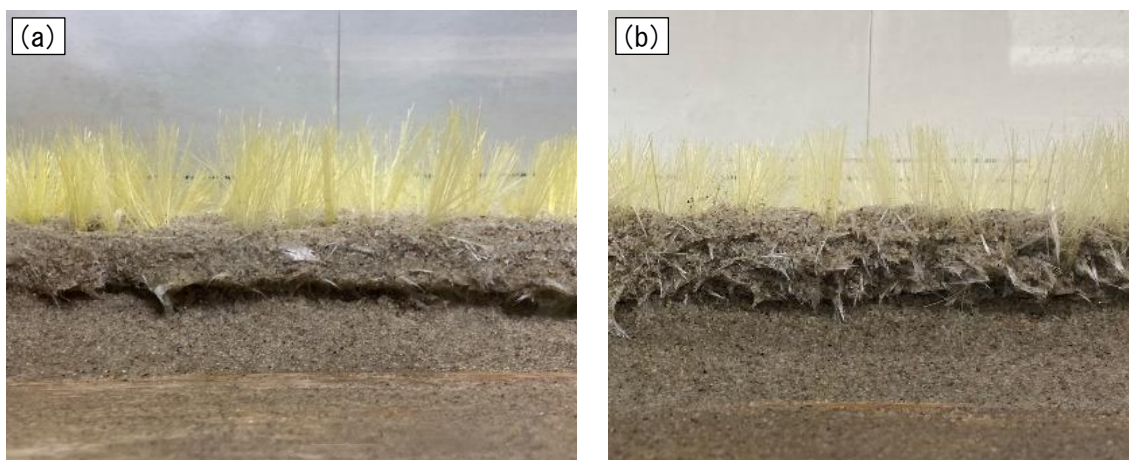


図 3.2 通水 40 分後の様子 ((a)Case2, (b)Case3)

3.2 水位が高水敷高より高いケース (Case4, Case5, Case6) の侵食状況

水位が高水敷高より高い Case 4~Case6 の侵食状況を図 3.3 に示す。植生が無い Case4 では、通水から 1.5 分で高水敷が横断方向に約 47 mm, 鉛直方向に約 10 mm 侵食が進行し, その後も通水 7.5 分後まで徐々に侵食が進行した。この流量条件では高水敷の上面も侵食される (鉛直方向の侵食が進行する) ため, 斜面の勾配は緩やかになり, 通水 7.5 分後の時点で約 15°となった。

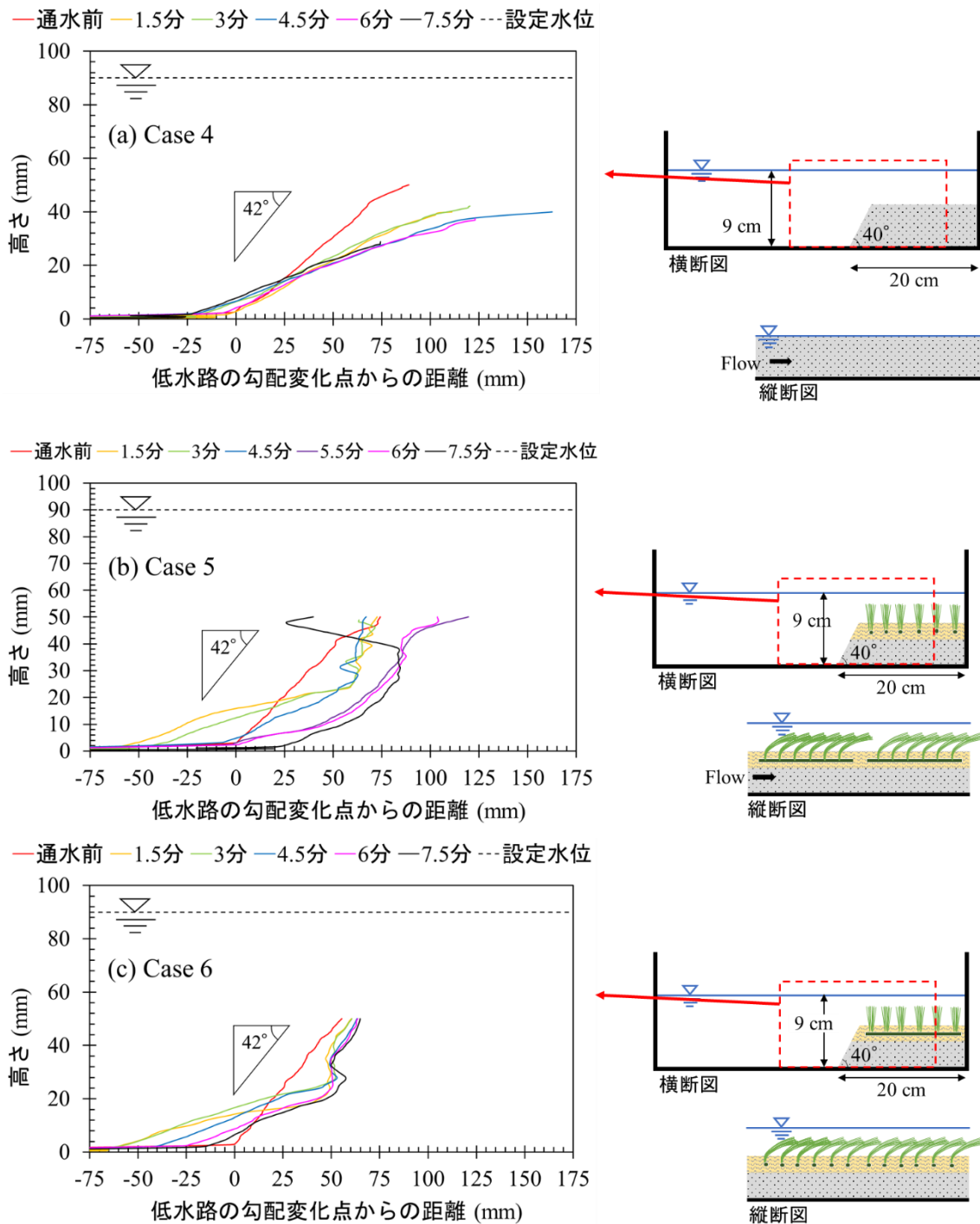


図 3.3 水位が高水敷高より高いケースの侵食状況 ((a):Case4, (b):Case5, (c):Case6)

水位が高水敷高さと等しい場合は、地下茎の方向(Case2, Case3)による差は小さかったが、水位が高水敷高より高い場合は侵食状況に大きな差が見られた。地下茎が縦断方向に伸びている Case5 では、通水 1.5 分の段階で短繊維層が侵食され、法尻部に堆積が見られる (図 3.3(b))。この法尻部の堆積は、侵食された短繊維層部分が横断方向に移動したものだけでなく、上流側からの掃流砂の堆積も含まれる。通水直後から 1.5 分までの侵食の様子を図 3.4 に示す。図 3.4(a) は通水前の状態である。図 3.4(b) より、水位が高水敷高付近まで上昇した段階で、ヒサシ状の河岸侵食が発生していることが分かる。その後、高水敷の水深が 4 cm に達した段階では短繊維層が侵食され、地下茎が露出している (図 3.4(c))。また、図 3.4(c) の上流側 (左側) の地下茎は地下茎長さ全体でヒサシが発達したため、その直後に流出した (図 3.4(d))。図 3.4(e) は通水 1.5 分後の状況である。

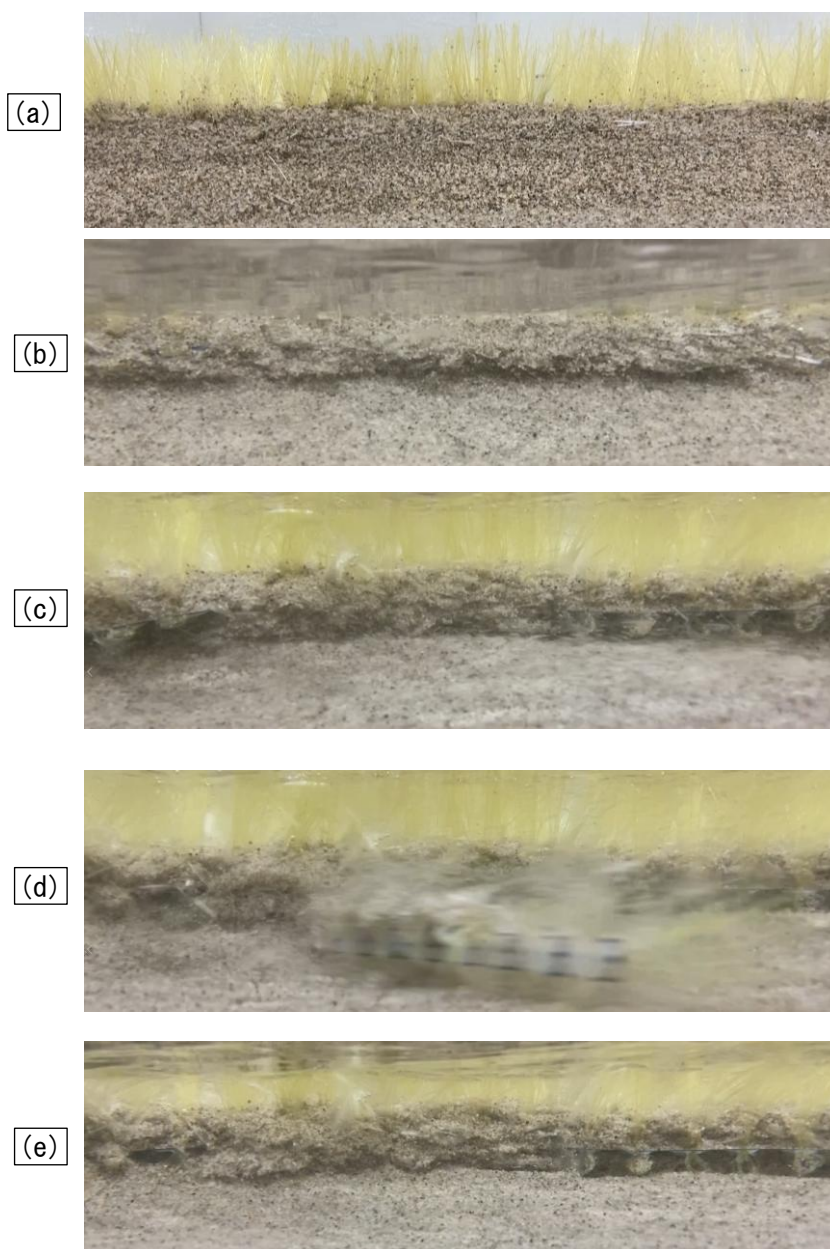


図 3.4 Case5 における通水開始から 1.5 分後までの様子

図 3.3(b)より，レーザー変位計による計測地点では 1.5 分後と 3 分後の短繊維層の浸食はあまり変化しないものの，法尻部の堆積が増加している．これは上流側から供給された砂の堆積が生じたことを示している．4.5 分後では，短繊維層の侵食はあまり進行していないものの，法尻部に堆積していた砂が下流に流されている．その影響で，ヒサシ状の河岸侵食が進行し，通水 5.5 分後にはヒサシ部分の落下が生じた．その結果，4.5 分後から 5.5 分後の間で短繊維層が横断方向に 23 mm 程度侵食された．通水 7.5 分後の侵食状況を見ると，高さ 40 mm より上側の様子が 6 分後と大きく異なる（図 3.3(b)）．これは，図 3.5 に示すように通水後水位が低下する際に浮力がなくなることでヒサシが崩落し，横断方向に（低水路側に）植生部分が傾いた部分を計測したためである．福岡ら(1994)¹⁰は，ヒサシ状河岸侵食が生じた際，洪水後にヒサシ上層に植生するヨシが垂れ下がることで側岸の侵食を小さくすると述べている．本実験では，水位低下時に同様の現象が確認された．レーザー変位計での計測の結果，地下茎が縦断方向に伸びている場合は，ヒサシは地下茎の横断方向の幅（約 10 mm，実スケール 10 cm）まで保たれ，それ以上ヒサシの下部が侵食されると，ヒサシ部分が塊で流出した．

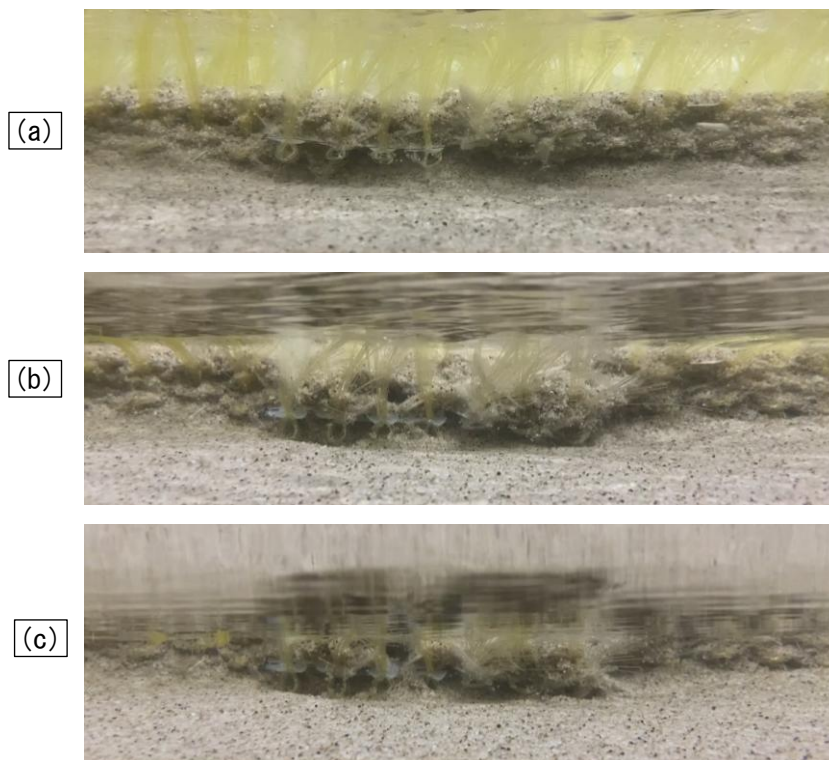


図 3.5 通水 7.5 分後の水位低下時のヒサシ崩落様子 (Case5)

一方，地下茎が横断方向に伸びる Case6 では，ヒサシの崩落は発生しなかった．短繊維層の下側から侵食が始まり，法尻部では堆積が生じた．その後，法尻部に堆積した砂は徐々に下流に流出した（図 3.3(c)）．通水 7.5 分後には，ヒサシ部分は横断方向に約 30 mm 侵食されたものの，地下茎が流失しなかったため，高水敷高の鉛直方向の変化は確認できなかった．また，7.5 分後には約 15 mm のヒサシが確認できた．地下茎が縦断方向に伸びる Case5 ではヒサシが約 10 mm まで発達すると植生モデルが地下茎ごと流失したが，地下茎

が横断方向に伸びる Case6 ではヒサシが約 15 mm になっても地下茎の大部分は短繊維層の内部にあるため流出はしなかった (図 3.6).

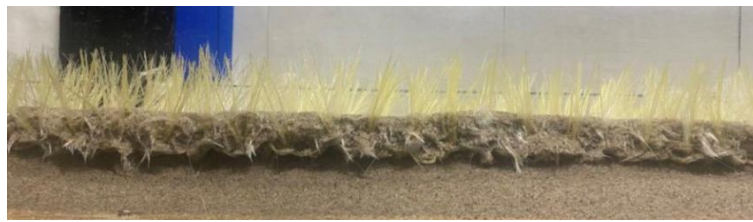


図 3.6 通水 7.5 分後のヒサシの様子 (Case6)

3.3 各ケースのまとめと比較

本実験において実施した 6 ケースについて、通水時間と横断方向の最大侵食距離の関係を整理する。例として、Case3 の高水敷の侵食状況と横断方向侵食距離を図 3.7 に示す。横断方向侵食距離は、図 3.7 (a) に示すように通水前の断面と各時刻の断面を同じ高さごとに比較した横断方向の侵食距離である。その後、図 3.7 (b) に示すように各時刻の横断方向侵食距離で最も大きい値を横断方向の最大侵食距離とした。以上の整理方法により求められた各ケースの横断方向の最大侵食距離を図 3.8 に示す。

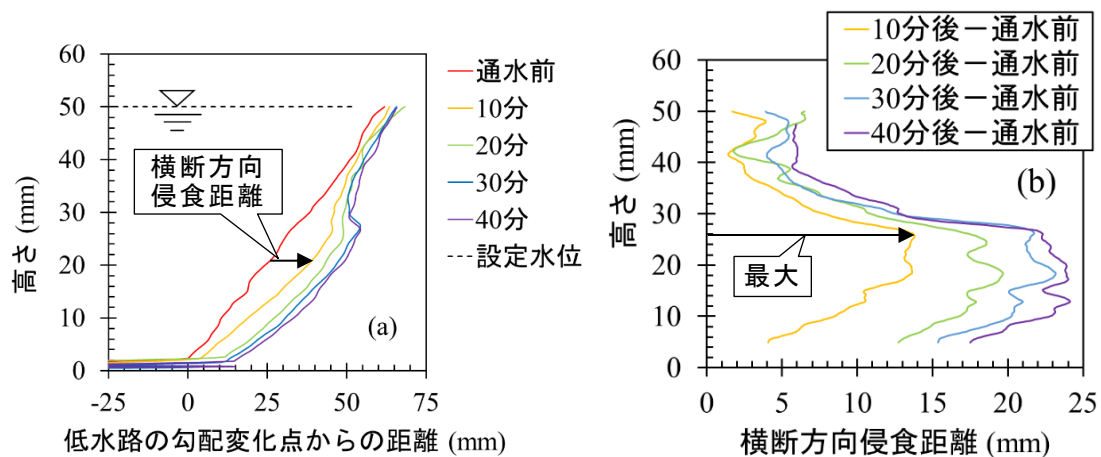


図 3.7 Case3 の (a) 高水敷の侵食状況と (b) 横断方向侵食距離

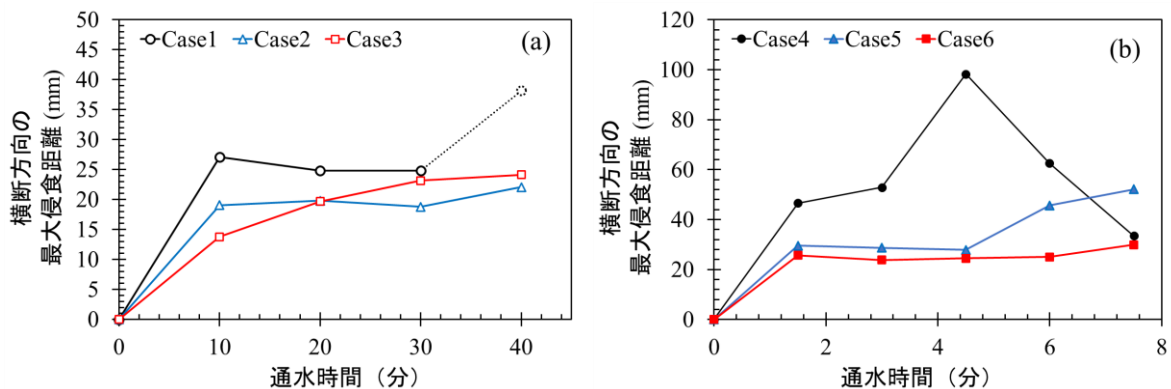


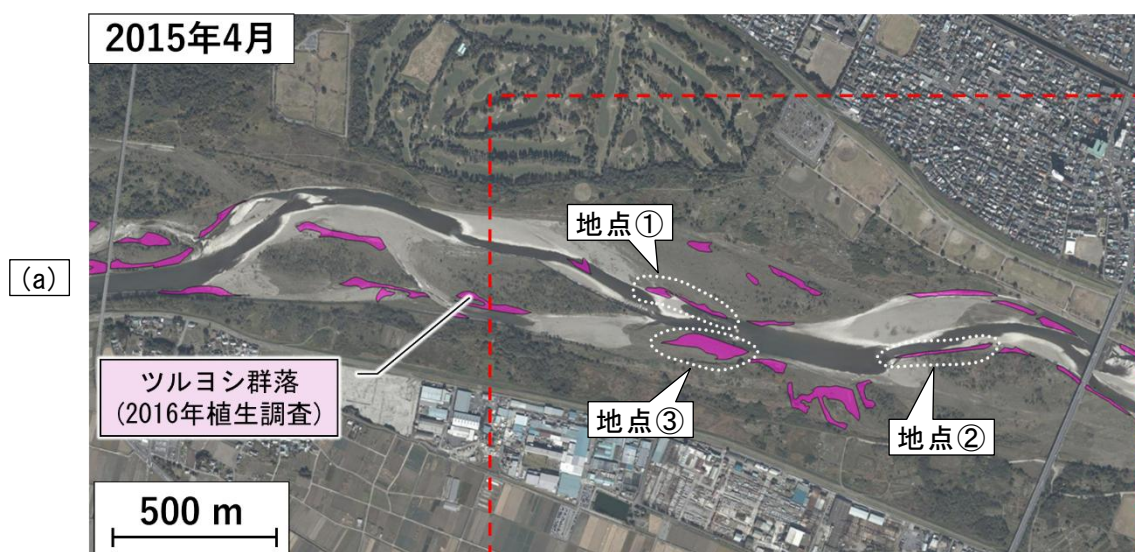
図 3.8 各ケースの横断方向の最大侵食距離 ((a): Case 1~3, (b): Case4~6)

6 ケースともに、通水前から最初の通水後までの間で最も侵食が進んでいる。Case1～Case3 では、30 分経過時点の横断方向の最大侵食距離に大きな差はないが、Case1 では高水敷の上面部分が最も侵食されているのに対し、Case2 や Case3 ではヒサシの下部が最も侵食されている点に違いがある。Case4 では、4.5 分の段階で横断方向の最大侵食距離が最大となり、その後低下している。これは、高水敷の上面が侵食されたことによる影響であり、堆積が生じたわけではない。4.5 分の段階までは Case5 と Case6 に大きな差はないものの、6 分、7.5 分の段階では差が大きくなっている。これは、地下茎が縦断方向に伸びる Case5 では、この計測点では 5.5 分の時点でヒサシが崩落し、流出したためである。

4. GIS データを活用したツルヨシの分布の整理

2016 年の植生調査の GIS データより、荒川上流におけるツルヨシ群落の分布の様子を図 4.1(a), (b)に示す。図 4.1(a), (b)は背景の航空写真が撮影された年月が異なり、それぞれ 2015 年 4 月、2018 年 5 月である。この図の範囲に限ったことではないが、荒川上流では低水路に沿って縦断的にツルヨシ群落が増大しているものが見られた。本実験の結果からすると、縦断的に増大しているツルヨシは比較的流出しやすい傾向にある。一方、横断的にも 50 m 以上の幅で増大しているツルヨシ群落も複数確認された。図 4.1(a), (b)の赤い破線の範囲における標高のコンター図を図 4.1(c)に示す。これを見ると、縦断的にツルヨシ群落が増大している地点①、②では横断方向の勾配が急であることが分かる。一方、ツルヨシ群落が横断的にも 70m 程度増大している地点③では、横断方向の勾配が緩やかである。ツルヨシ群落は、高水敷や砂州が浸水する程度の出水において、水面に沿って種子が河床に付着し、成長・増大すると考えられるため、横断勾配が急な場合は縦断的に群落が増大し、横断勾配が緩やかな場合は横断方向にも群落が増大したのだと考えられる。

図 4.1(a)と(b)を比較すると、縦断的にツルヨシ群落が増大していた地点①と②では河岸侵食により 2015 年 4 月時点では砂州であった部分が、2018 年 5 月時点では低水路になっている。ツルヨシ群落の増大の方向の影響だけに限定することはできないが、縦断的に増大したツルヨシの河岸侵食抑制効果が比較的低いことが影響した可能性もある。



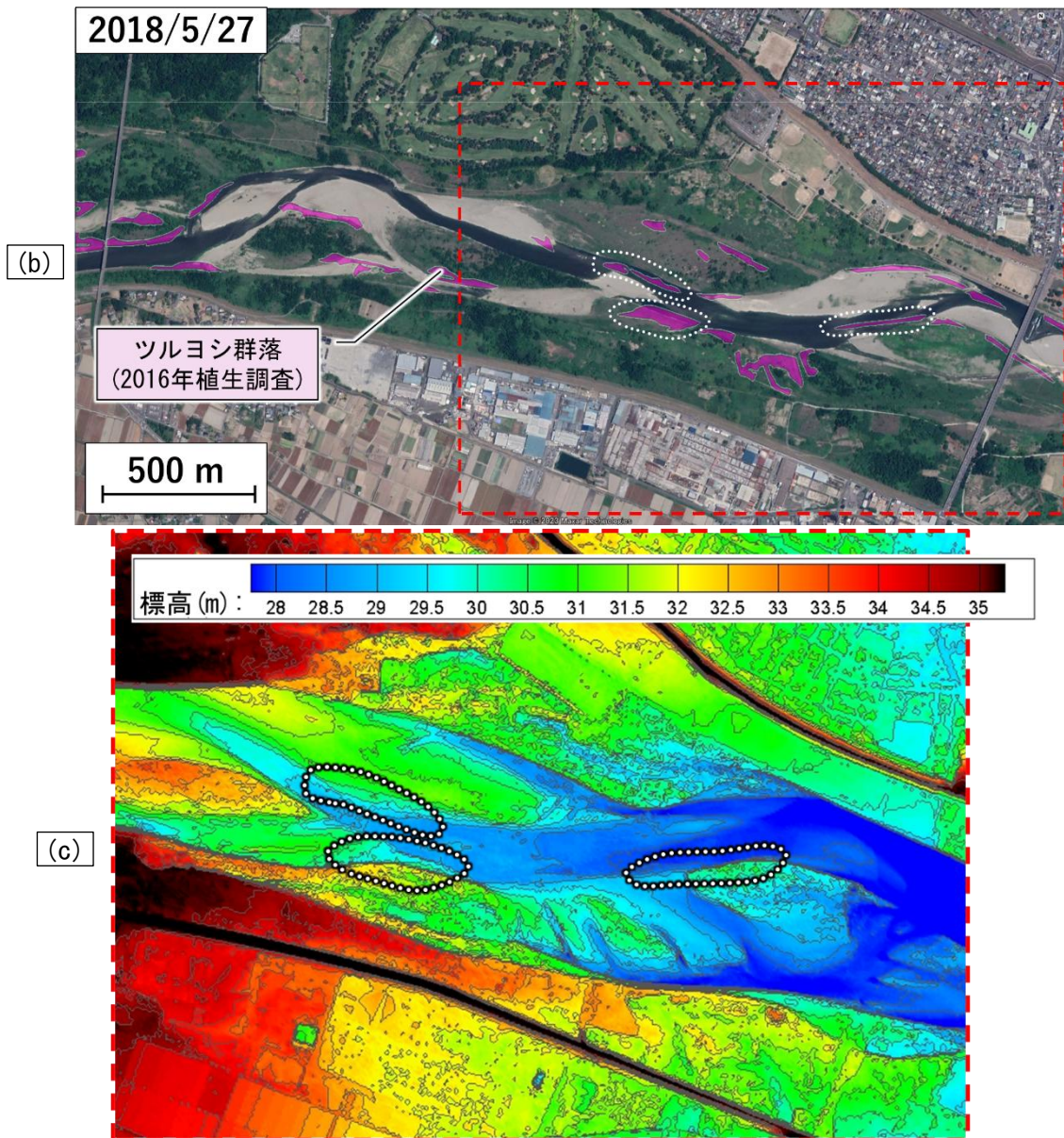


図 4.1 ツルヨシの分布状況（背景の航空写真は，(a)：2015年4月，(b)：2018年5月）と(c)地点①～③周辺の標高コンター図

5. 二層流の河床変動モデルの開発

本研究では，植生が河床変動に与える影響を考慮した二層流河床変動モデルの開発を試みた．第一段階として，荒川において高水敷への浸透を考慮した平面二次元の洪水流・氾濫解析手法¹¹⁾を開発した．第二段階として，植生の鉛直構造を考慮した二層流の河床変動モデルを開発した．本研究では，この二層流モデルの現地適用までは実施できていないが，今後はこの二層流モデルを，浸透を考慮した平面二次元の洪水流・氾濫解析と組み合わせることで，浸透による河岸の強度低下を考慮した解析が可能になると期待される．

5.1 高水敷への浸透を考慮した平面二次元の洪水流・氾濫解析

5.1.1 浸透を考慮した氾濫解析の概要

荒川中流域には広大な高水敷と横堤群があり，洪水をゆっくりと流す構造を有している。さらに，旧河道が現在の高水敷，低水路と交差する地点も多く存在し，浸透の影響は無視できない。また，荒川中流域では低水路が深く，高水敷との比高差が大きい。そのため，洪水時には動水勾配が大きくなり，高水敷や砂層（浸透層）への浸透は大きいと考え，田端・福岡(2017)¹²⁾を参考に平面二次元の洪水流・氾濫解析に準二次元の浸透解析を組み込んだ。解析の概要を図5.1に示す。

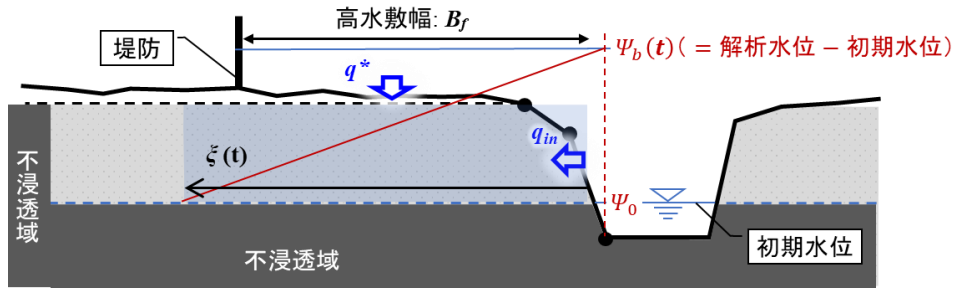


図 5.1 準二次元浸透解析の概要

地表流れの支配方程式は水深積分型の連続式（式(1)）と運動方程式（式(2), (3)）を用いる。高水敷への浸透が生じるグリッドにおいては，連続式に吸い込み項を設けた。

$$\theta \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - k_{infil} v_{infil} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{\theta h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{\theta h} \right) + \theta g h \frac{\partial \eta}{\partial x} + \theta \frac{g n^2}{h^{7/3}} q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2} + \theta \frac{f_x}{\rho} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{\theta h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{\theta h} \right) + \theta g h \frac{\partial \eta}{\partial y} + \theta \frac{g n^2}{h^{7/3}} q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2} + \theta \frac{f_y}{\rho} = 0 \quad (3)$$

ここに， t ：時間(s)， h ：全水深(m)， η ：水位(m)， θ ：空隙率， ρ ：水の密度(kg/m³)， q_x, q_y ： x, y 方向の単位幅流量(m²/s) v_{infil} ：高水敷への浸透による水面の低下速度(m/s)， k_{infil} ：当該計算グリッドにおける高水敷への浸透有無（1：浸透有，0：浸透無）， g ：重力加速度(m/s²)， n ：河床の粗度係数(m^{-1/3}s)， f_x, f_y ： x, y 方向の単位面積当たりの植生抵抗(N/m²)である。

地中の流れの連続式と運動方程式は式(4)から式(5)に示す。

$$\lambda D \frac{\partial \xi(t)}{\partial t} = q_{in} + q^* \quad (4)$$

$$q_{in} = \overline{Ks} D \frac{\Psi_b(t) - \Psi_0}{\xi(t)} \quad (5)$$

$$q^* = \int_0^{B_f} \overline{Ks} \left(\frac{\Psi_b(t) - \Psi(x, t)}{D} \right) dx = \frac{\overline{Ks} B_f^2}{2D} \left(\frac{\Psi_b(t) - \Psi_0}{\xi(t)} \right) \quad (6)$$

ここに， λ は空気空隙率， D は浸透層厚， $\xi(t)$ は浸潤線フロント位置， q_{in} は低水路から高水敷への水平方向の浸透量フラックス， q^* は高水敷上面からの鉛直方向浸透量フラックス， \overline{Ks} は砂層厚 D の範囲における平均透水係数， $\Psi_b(t)$ は低水路グリッドにおける圧力水頭， Ψ_0

は平水時における圧力水頭， B_f は高水敷幅である．砂層内の圧力水頭 $\Psi(x, t)$ は田端・福岡(2017)¹²⁾と同様に直線分布を仮定している．

浸透解析において設定する必要がある変数は高水敷幅 B_f ，浸透層厚 D ，低水路の初期水位，浸透長さ L ，平均透水係数 \overline{Ks} ，空気間隙率 λ である．高水敷高は浸透方向の解析グリッド数より求めた．浸透層厚は，平水時流量を上流端で与えた際に水深が正のグリッドを低水路グリッドとして，低水路グリッドに近い方から 2 グリッドのうち，標高が高いグリッドの地盤高と，初期水位の差より求めた．低水路の初期水位は平水時流量を上流端で与え続けた助走計算により求めた．浸透長さは，公開されている柱状図を参考に，荒川の各縦断位置における浸透層の高さの範囲に，土質分類が砂と記載されている層がわずかでも存在する場所までは浸透可能として，浸透層長さを設定した．平均透水係数 \overline{Ks} は公開されている柱状図を参考に，荒川の各縦断位置における浸透層の範囲に土質種別が礫，砂，シルトと記載されている層の割合から求めた．空気間隙率 λ は，砂，砂質土，砂質シルト，粘土シルトに対して，自然状態の土の性質（自然含水比，自然間隙比）から λ （土の全体積に対する間隙（気体）の割合）をそれぞれ求め，平均値より 0.36 とした（詳細は五十嵐ら(2022)¹¹⁾を参照のこと）．

5.1.2 浸透を考慮した氾濫解析の主な結果と考察

主な結果として，荒川 53.6KP の太郎右衛門橋水位観測所における令和元年東日本台風時の水位観測データと，解析水位ハイドログラフの比較を図 5.2 に示す．10 月 12 日 6 時から 15 時頃の解析水位が実測水位に比べて水位の立ち上がりが遅い点については市野川からの流入量の解析精度が影響していると考えられるが，これは今後の課題である．同日 16 時以降は，浸透無しの解析に比べ，浸透を考慮した解析では観測水位と近い傾向を示した．本解析の特徴として，高水敷の側岸からの浸透も考慮しているため，河道内水位が高水敷高より低い段階（10 月 12 日 12 時から 16 時頃）においても浸透の影響が出ている点にある．これにより，浸透無しの解析に比べて浸透ありの解析では，水位の上昇速度が観測された水位上昇速度に近い傾向を示している．

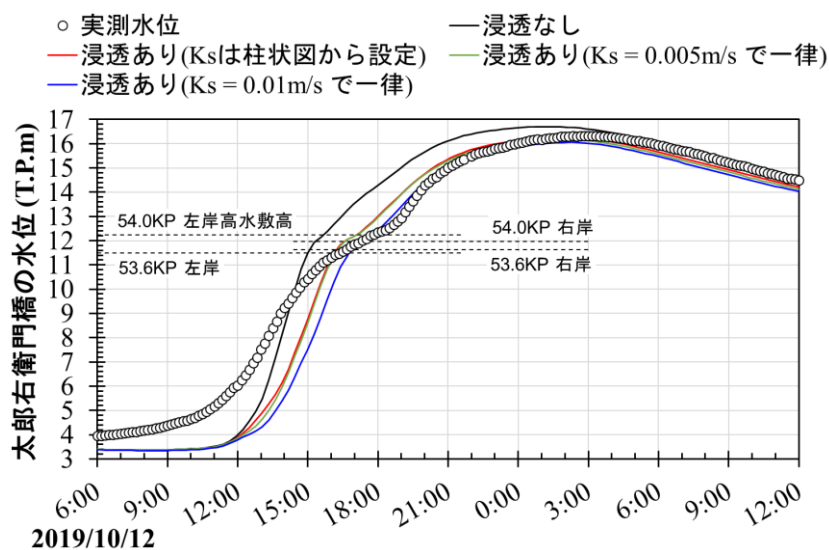


図 5.2 太郎右衛門橋の水位ハイドログラフの比較

5.2 植生の鉛直構造を考慮した二層流モデルの開発

5.2.1 二層流モデルの概要

河道内に樹林帯が存在する場合、樹林帯条件によってはその周辺が局所洗掘される。水深積分型の平面二次元解析では、樹林帯前面では水位が上昇し断面平均流速が低下するため、洗掘が計算されない。実際は、低木や高木等樹冠を有する植生では鉛直方向の抵抗の違いにより流速は鉛直分布を持つ。樹冠の抵抗が大きい場合は下層の流速の方が速くなり、洗掘される可能性がある。そこで本研究では図 5.3 のように、単純な二層流れを仮定し、河床変動計算に用いる流速を断面平均流速 u ではなく河床近傍の流速 u_2 とすることで、樹林帯前面の洗掘の再現の可能性を検討した。

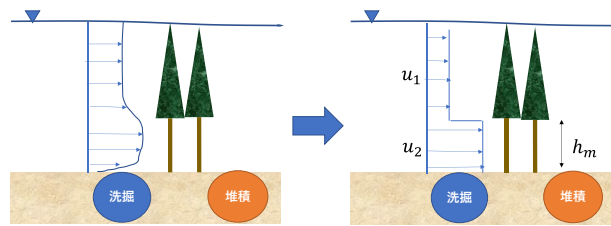


図 5.2 二層流モデルの概要

流れの解析については水深積分型の連続式、運動方程式を用いた。河床変動の計算には、芦田・道上式¹³⁾より平衡流砂量を求め、内田・福岡(2011)¹⁴⁾を参考に、非平衡性を考慮した河床変動解析モデルを構築した。樹木の単位高さあたりに作用する抗力は式(7)のようになる¹⁵⁾。

$$F_i = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} D_{BH} u_i^2 \frac{d_i}{D_{BH}} \frac{C_{di}}{C_{d-ref}} = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} D_{BH} u_i^2 \alpha_i \beta_i \quad (7)$$

ここに、下付き文字の i は、1 のとき樹冠部分の各物理量、2 のときは幹部分の各物理量を表す。 ρ は水の密度、 C_{d-ref} は基準抗力係数、 D_{BH} は胸高直径、 u は単位高さあたりの平均流速、 d は幅、 C_{di} は抗力係数である。樹冠と幹部の抗力の関係 (式(8)) より、底面付近の流速 u_2 を補正する。

$$u_1^2 \alpha_1 \beta_1 k^2 = u_2^2 \alpha_2 \beta_2 \quad (8)$$

ここで、樹冠部と幹部での単位高さあたりの抗力が等しいとき $k = 1$ となる。すなわち、 k は $0 < k \leq 1$ を満たす係数である。本解析では、 $k = 1$ と仮定した。すなわち、樹冠部と幹部の抗力が同じになるように流れていることを想定している。水深積分型の解析で求まる断面平均流速を u として、連続式は式(9)のようになる。

$$hu = (h - h_m)u_1 + h_m u_2 \quad (9)$$

ここに、 h : 水深、 h_m : 枝下高、 u_1 : 樹冠部の平均流速、 u_2 : 幹部の平均流速である。式(7)、式(8)から、求める流速は式(10)のようになる。ここで求めた u_2 を河床変動計算に用いる。

$$u_2 = \frac{h}{(h - h_m) \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha_2 \beta_2}{\alpha_1 \beta_1}} + h_m} u \quad (10)$$

解析で用いる植生は低木を想定し、実スケールで樹高 3 m、枝下高 1.5 m、樹冠幅 2.8 m、

胸高直径 0.1 m, 密度 0.03 本/m²とした. 本解析は実験室スケールで行い, 長さの縮尺は 1/50 とする. 幅 50 cm の水路に, 側面から 1 cm 離してパッチ状の植生 (横断方向 30 cm, 縦断方向 12 cm) を設定した. 河床勾配は 1/500 である.

5.2.2 二層流モデルの結果および考察

一層流, 二層流の河床変動解析をそれぞれ Case K1, Case K2 とする. 図 5.4 に各ケースで計算された水路壁から 1.5 cm の位置の地盤高の縦断図を, 図 5.5 に平面的な河床変動量のコンター図を示す. 通常の平面二次元解析の結果(Case K1)では, 樹林帯の前面では洗掘されず, 樹林帯の出口付近が最も洗掘されている. これは, 樹林帯の抵抗により水面勾配が付き, 樹林帯の出口付近の流速が加速されるためである. 一方, 二層流の計算(Case K2)では, 底面付近の流速 u_2 を用いることで, 最大洗掘深となる位置が上流側に移動し, 樹林帯の前面でも洗掘が生じていることが分かる. 図 5.5 より, Case K2 では, 側壁側だけでなく樹林帯の前面が全体的に洗掘される傾向が見られた. これは, 洪水時に観察される洗掘域に似た傾向である. ただし, 最大洗掘深や樹林帯前面の洗掘域長さ等, 定量的な解析精度の検証は今後の課題である.

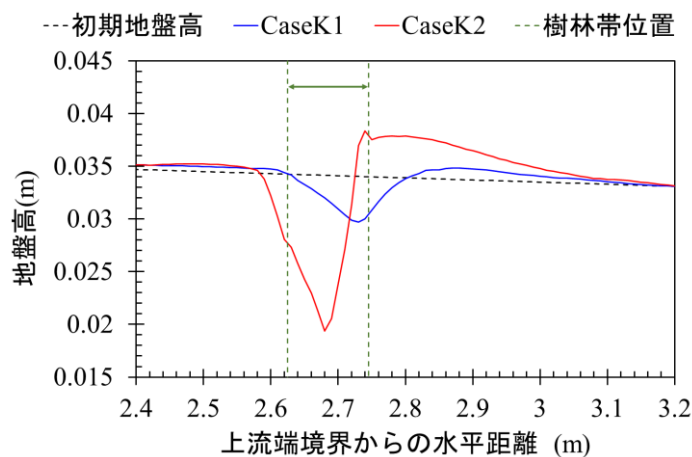


図 5.4 二層流モデルの概要

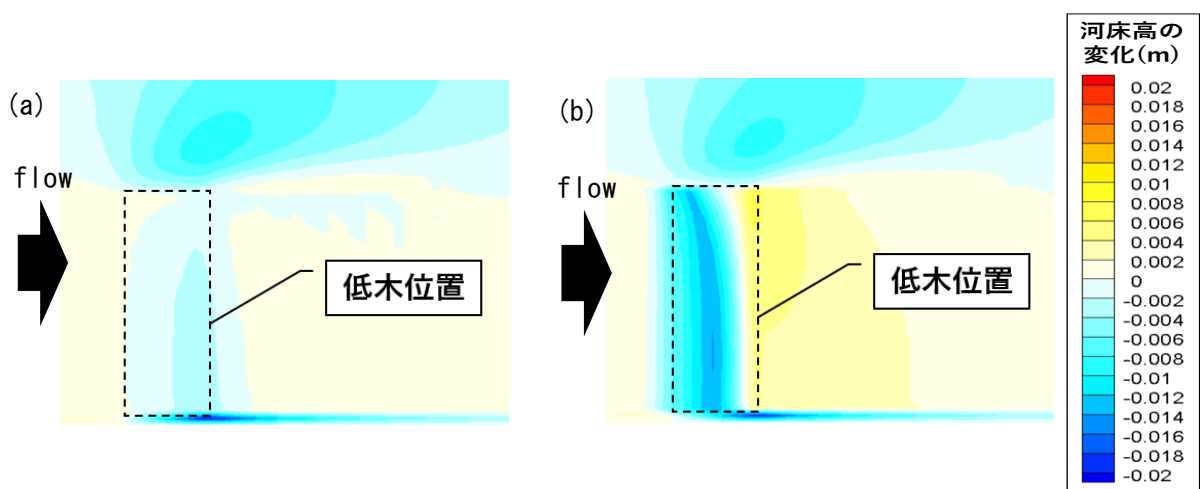


図 5.5 河床高変動量の平面コンター図 ((a):通常の平面二次元河床変動解析 (Case K1), (b):二層流モデル (CaseK2))

6. 結論

本研究では、第一に、高茎草本の地下茎が繋がる方向の違いがヒサシ状河岸侵食に与える影響を明らかにするため、高茎草本の根、地下茎、株をモデル化した水理模型実験を実施した。第二に、GIS データよりツルヨシ群落の分布を確認し、ツルヨシ群落の拡大の方向（縦断方向、横断方向）と河岸侵食の状況について検討した。最後に、植生周辺の河床変動を計算するため、二層流の初期モデルを開発した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 洪水位が高水敷高と等しい場合は、地下茎の繋がる方向による差は小さく、横断方向の侵食速度は植生が無い場合と大差がないことが分かった。
- 2) 洪水位が高水敷高より高い場合は、植生による河岸侵食の抑制効果が明確に表れた。特に地下茎が横断方向につながる場合は、ヒサシ状河岸侵食が進行し、ヒサシの長さがある程度長くなってもヒサシの崩落が生じなかった。これは、地下茎により連結された植生による支持力のためだと考えられる。一方、地下茎が縦断的に連結している場合は、ヒサシの長さがある程度まで長くなると地下茎で連結された植生モデルが流出する様子が観察された。その影響で、地下茎が横断的につながる場合よりも縦断的につながる場合の方が河岸侵食は横断的に進行することが分かった。
- 3) 2016年の植生調査（GIS データ）よりツルヨシ群落の拡大の方向を確認すると、低水路際に縦断的に拡大するものが大半であった。一方、横断方向に 50 m 以上群落が拡大しているツルヨシも確認された。植生調査の前後の航空写真の確認から、ツルヨシ群落が縦断的に拡大している地点の一部では、河岸侵食によりツルヨシが流出していることが推定された。
- 4) 河床変動解析の前段階として、高水敷からの浸透を考慮した平面二次元洪水流・氾濫解析手法を開発した。その後、植生の抵抗の鉛直分布を考慮し、樹冠部分より幹部分（底面付近）で流速が加速される現象を解析可能な二層流モデルを開発した。その結果、樹林帯の前面の洗堀が解析可能であることを示した。今後は、二層流モデルの定量的な検証を行うとともに、浸透を考慮した平面二次元洪水流・氾濫解析と組み合わせることで、浸透による河岸の強度低下を考慮した洗堀の計算が実施可能になることが期待される。

参考文献

- 1) 岩崎理樹，溝口敦子，上田市堤防欠損地点における流路変動の状況，令和元年台風 19 号豪雨災害調査団報告書，2020.
- 2) 福岡捷二，木暮陽一，佐藤健二，大東道郎：自然堆積河岸の侵食過程．水工学論文集，37, 43-648, 1993.
- 3) 福岡捷二，福田朝生，永井慎也，小谷哲也，富田紀子：ヨシを用いた水際保護の研究．水工学論文集，47, 997-1002, 2003.
- 4) 尾花まき子，中村俊之，戸田祐嗣，椿涼太：植生流出が河岸侵食に与える影響に関する実験的研究，土木学会論文集 B1(水工学)Vol.74, No.5, I_1267-I_1272, 2018.
- 5) 田中規夫，八木澤順治，福岡捷二.樹木の洪水破壊指標と流失指標を考慮した砂礫州上樹林地の動態評価手法の提案．土木学会論文集 B, 66(4), 359-370, 2010.

- 6) 田中規夫, 八木澤順治, 福岡捷二: 砂礫州上における繁茂場所の相違が樹木の洪水時流失限界に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 53 卷, pp.631-636, 2009.
- 7) Yagisawa, J. and Tanaka, N.: Wash-out conditions of plants growing on islands by floods, *Research Rep. of Dept. of Civil and Env. Eng., Saitama Univ.*, Vol.37, pp. 9-20, 2010.
- 8) 青木信哉, 田中規夫, 八木澤順治: 洪水攪乱影響の違いがツルヨシの形態的特徴と繁茂量・拡大幅に与える影響. 水工学論文集, 51, 1255-1260, 2007.
- 9) 永多朋紀, 渡邊康玄, 井上卓也, 安田浩保, 伊藤丹: 河道内植生の根系がもたらす土砂緊縛効果に関する基礎的研究. 土木学会論文集 B1 (水工学), 70(4), I_973-I_978, 2014.
- 10) 福岡捷二, 渡辺明英, 新井田浩, 佐藤健二: オギ・ヨシ等の植生の河岸保護機能の評価. 土木学会論文集, (503), 59-68, 1994.
- 11) 五十嵐善哉, 田中規夫, 石原慎也: 洪水時の高水敷や砂層への浸透を考慮した平面 2 次元洪水氾濫解析法の開発. 土木学会論文集 B1 (水工学), 78(2), I_763-I_768, 2022.
- 12) 田端幸輔, 福岡捷二: 準二次元非定常浸透流解析に基づいたパイピングによる堤防破壊危険度の評価法. 土木学会論文集 B1 (水工学), 73.4: I_1327-I_1332, 2017.
- 13) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究. 土木学会論文報告集, (206), 59-69, 1972.
- 14) 内田龍彦, 福岡捷二: 底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析. 土木学会論文集 B1 (水工学), 67(1), 16-29, 2011.
- 15) Norio Tanaka, Junji Yagisawa: Effects of tree characteristics and substrate condition on critical breaking moment of trees due to heavy flooding, *Landscape Ecol Eng*, 2009.