

植生環境長期変動を考慮した河川シミュレーターの開発

北海道大学大学院 工学研究院 久加 朋子
愛知工業大学工学部 土木工学科 赤堀 良介

植生環境長期変動を考慮した河川シミュレーターの開発

久加 朋子¹・赤堀 良介²

Tomoko KYUKA and Ryosuke AKAHORI

¹北海道大学大学院工学研究院 特任准教授

²愛知工業大学工学部土木工学科 准教授

要 旨

適切な河道内樹木の管理には, 流路変動と樹木の動態との相互関係を解明し, 数値計算にて将来予測可能とすることが有用である. 本研究は3年計画にて植生環境の長短期変動による河床・流路変動および河川環境変化を包括的に考慮可能な河川シミュレーターの構築を目指すものである. 本報告はその3年目として (2年計画時の申請時の説明通り, 2016年北海道豪雨災害を背景に当初の計画を一部変更), 十勝管内の大多数の河川において河道内樹木が大規模流出したことを背景に下記の検討を実施した.

以下の報告には下記テーマについて記載する.

- (1) 河道内への植生定着モデル開発と流路変動特性への影響 (久加朋子)
- (2) 2016年北海道豪雨災害時における実河川を対象とした流木流下機構に関する検討 (赤堀良介)

(1) 河道内への植生定着モデル開発と流路変動特性への影響

久加 朋子¹
Tokomo KYUKA

¹北海道大学大学院工学研究院 特任准教授

要 旨

本研究では、3年計画として、河道内への新規植生定着モデル開発と流路変動特性への影響について検討を行った。初年度は、水路実験より河道内樹木（ここでは道内河川の優占種であるヤナギ類を想定）の種子が交互砂州および網状流路の裸地砂州へと新規侵入する際の種子定着特性を明らかとした。次年度は、2016年北海道豪雨災害を受けて若干計画を変更し、植生の平面的な分布状況が短期的な大出水時に流路変動特性、特に蛇行化に与える影響を検討した。3年目である本年は、初年度の水路実験データを背景に、砂州への植生侵入モデルの開発、精度検証、および植生の平面分布が流路変動特性へ与える影響までを検討した。

《キーワード：種子定着特性；流路変動；交互砂州；網状流路；樹木侵入モデル》

1. はじめに

近年、治水安全度の向上に伴う洪水攪乱の減少等を要因として、世界的に河道内樹木の増加が報告されている。図-1は、十勝川水系の二次河川である札内川上流域の上札内における航空写真である。図-1のように、札内川上流域においても河道内樹木（ヤナギ類）は増加しており、かつて礫床の複列砂州を有する網状流路だった河道形状は、単列に近い蛇行流路へと遷移したことが分かる。永多ら¹⁾は、航空写真を用いて1945年から2016年に至るまでの札内川上流域における樹木の河道内占有率（ R_w ）を調査し、1970年代頃までは $R_w \approx 40\%$ で均衡的に推移していたものが2015年までに $R_w \approx 70\%$ 程度まで増加したことを確認した。河道内樹木の増加は、河積の減少や樹林帯周辺における流況の変化等を引き起こし、河川管理上のリスクを高めることが懸念されている。このような観点から、適切な河川管理を行う上で河道内樹木が流路形態の形成プロセスに与える影響を明らかにすることは重要な課題である。

河道内樹木と流路変動との関係性に注目した現地調査、水路実験、数値解析はこれまでに多数報告されている^{2),3),4)}。これらの報告では、植生の主な影響として、1) 植生は網状流路の流路本数を減らすこと、2) 植生は河岸浸食の速度を遅くすること、3) 植生は流路の横方向移動を励起すること（蛇行流路の形成）、4) 植生は蛇行の発達と流路のショートカットを促すこと等が知られている。また、近年では植物の成長や死滅まで考慮した植生動的モデルを扱った報告もいくらか存在する。しかしながら、これらの報告では、樹林化後の低水路内での流路変動特性についてはある程度明らかにされているものの、河道内樹木の初期定着特性から樹林化プロセスは十分に明らかとされていない。

なかでも、植生侵入の第一段階と考えられる裸地砂州への植生侵入に関する検討は少なく、初期の植生分布の違いがその後の流路変動に及ぼす影響については未解明な部分も多い。数少ない検討^{5),6)}として、Van Dijk et al.⁵⁾は、水路内に網状流路を形成し、砂州上にマメ科植物のalfalfa種子を一様に散布した場合と流水によって散布した場合について、その後の流路変動の違いを報告している。彼らの報告では、植生が均一に分布する場合、河岸が安定し、流路を蛇行させる作用が強く働く。一方、植生が局所的に

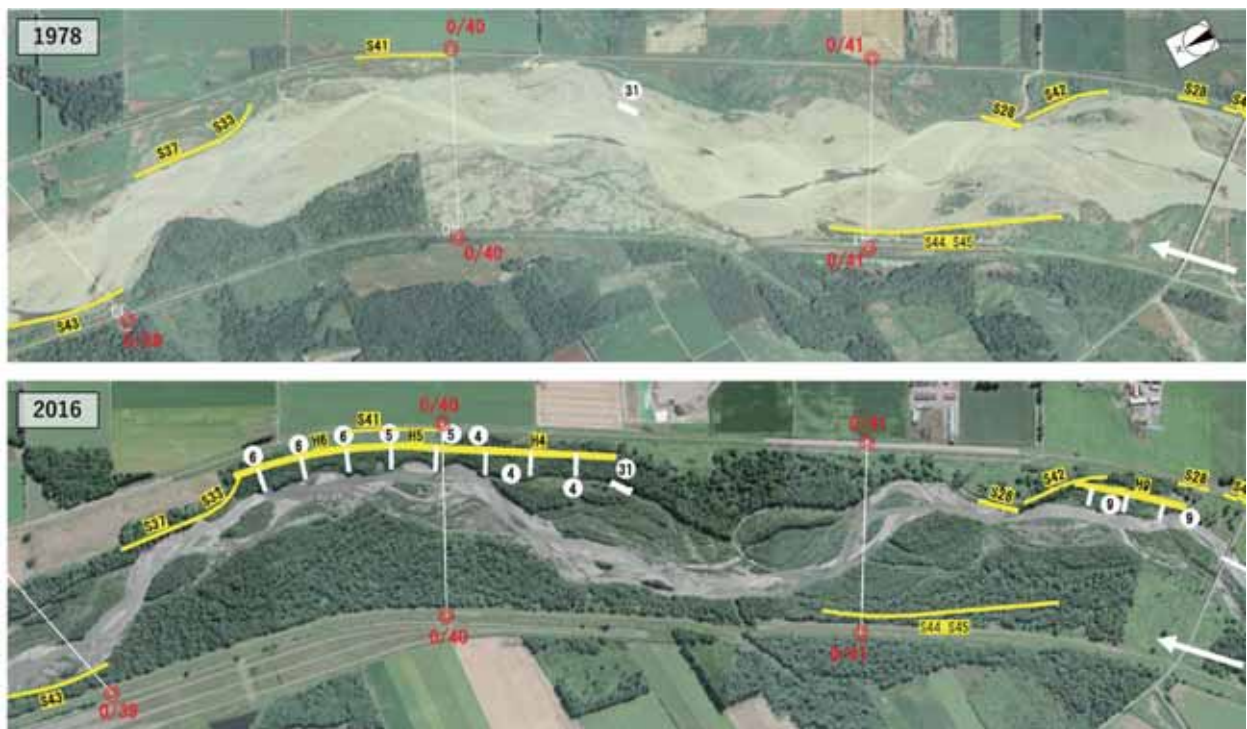


図-1 札内川上流域における河道内の樹林化（帯広開発建設部提供）
上) 1978年撮影，下) 2019年撮影

分布する場合、砂州の一部でのみ安定性が増し、植生上流部に土砂が堆積するなどから、蛇行流路ではなく Island Braiding（砂州上に安定した植生域を有するような複数流路からなる河川）が形成されると示唆されている。ただし、彼らの報告は種子の定着特性までは考察されておらず、植生定着と流路変動特性との関係性については不明確な点が残されている。また、内田ほか⁶⁾は、黒木・岸⁷⁾による中規模河床形態の分類における短列交互砂州形成条件下で移動床実験を報告している。彼らの報告によると、交互砂州上では種子は流路内の流量が減少する過程で砂州前縁に集中的に定着し、成長後の植生が土砂を捕捉することで砂州の比高差を増大させることを示した。しかしながら、実河川では、交互砂州が形成されるような場から、上述した札内川のように川幅が広く礫床の複列砂州を有する場まで様々な流路形態が存在する。したがって、実河川を対象とした新規植生定着特性から流路変動特性までを一連で把握し、将来的な河道整備計画へと反映させるには、数値解析モデルを用いた検討が有用であると考えられる。

既往報告⁸⁾によると、北海道における河畔のヤナギ林の延長比率は7割と、融雪出水の少ない本州中南部の地域における1割と比してかなり多い状況である。これは、融雪出水による新たな裸地の形成時期とヤナギの種子散布時期が一致しているためと考えられている。ヤナギ類の種子は数mmと小さく、軽量で風散布型の種子を大量に生産するが発芽には十分な地下水が必要であり、種子は水面に浮き二次散布として流水散布されることによって好適な環境への定着することが知られている。そこで、本研究では、初年度に実施した水路実験データ（交互砂州と網状流路への流水による種子定着特性および流路変動特性の把握）を用い、河道内への植生定着モデルを開発すると共に、その精度検証、および流路変動特性への影響までを検討することを試みた。なお、本報では研究2年目に実施した平面的な植生分布特性が流路変動に与える影響については言及していないため、別途昨年度の報告書を参照されたい。

2. 水路実験・方法

本研究では、図-2に示す土木研究所寒地土木研究所所有の循環型長方形矩形水路（全長26m、幅3m、勾配0.01）を利用した。水路内の河床材料は粒径0.765mmの一樣砂とし、初期河床を低水路幅45cm、低水路河岸2cmとなるように整形し、通水を続けることで網状流路が形成される条件とした。水路上下流端には固定堰をそれぞれ設け、上下流端の初期河床が浸食されないようにした。実験中は、水路上流端の固定床と移動床の接続部が河床上昇および河床低下しない程度に、河床材料と同じ粒径の土砂を常に給砂し続けた。

表-1の下段に実験ケースおよび実験水理条件を示す。表-1に示す実験ケース横の数字は、順に通水1回目、2回目を意味する。実験流量は、全てのケースで定常給水条件を与えた（ただし、実験終了時の

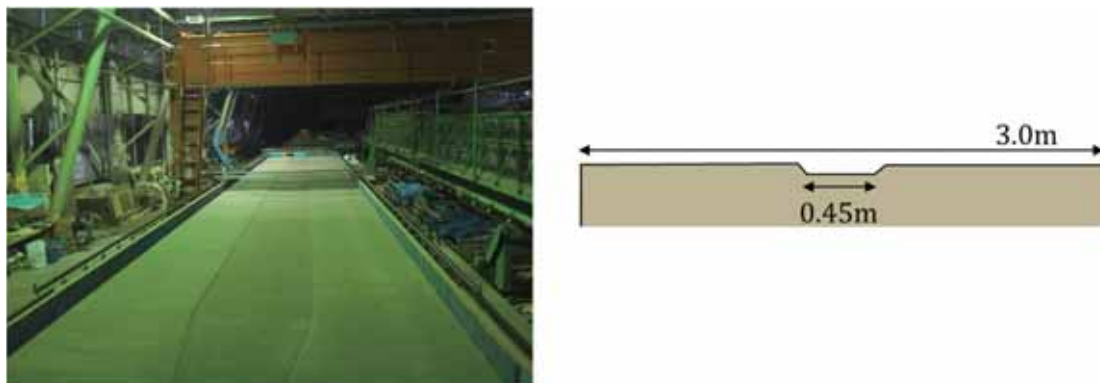


図-2 実験水路概要

表-1 実験条件

| ケース | | 初期低水路幅 (m) | 初期低水路高 (m) | 流量 (m ³ /s) | 初期平均水深 (m) | 無次元掃流力 τ^* | 通水時間 (hour) | 種子散布 | 種子散布タイミング |
|--------|---|------------|------------|------------------------|------------|-----------------|-------------|------|------------|
| Case A | 1 | 0.45 | 0.02 | 0.00276 | 0.14 | 0.111 | 8.5 | 流水散布 | 通水 4.0 時～ |
| | 2 | — | — | 0.00276 | 0.14 | 0.111 | 1.5 | 流水散布 | 通水 0.5 時間～ |
| | 3 | — | — | 0.00087 | 0.07 | 0.055 | 1.5 | — | — |
| Case B | 1 | 0.45 | 0.02 | 0.00276 | 0.14 | 0.111 | 8.5 | 全面散布 | 実験終了後 |
| | 2 | — | — | 0.00276 | 0.14 | 0.111 | 1.5 | 全面散布 | 実験終了後 |
| | 3 | — | — | 0.00087 | 0.07 | 0.055 | 1.5 | — | — |

減水期を除く)。この初期条件は、黒木・岸⁷⁾によると、単列砂州形成条件に該当する。これらを札内川の流量規模に換算すると、札内川の20年確率程度の出水に相当する。なお、本実験は札内川を想定したものであり、初期通水ケースは山口・渡邊⁹⁾の実験と同条件としている。種子は比重を考慮し、既往研究で用いられることの多いalfalfaではなく、ベントグラス（西洋芝ベントグラス ペンクロス、タキイ種苗株式会社）を用いることとした。

Case AおよびCase Bは、いずれも8.5時間通水して実験水理条件に応じた網状流路を形成するが、種子の散布方法を異ならせたものである。Case A-1では、水路上流端から常時供給する給砂材料に種子を一定割合で混ぜて供給した。これは、ヤナギ等のように流水を利用して種子散布を行う樹木を想定したものである。種子と給砂材料の配合率は、蛍光塗料着色種子、非着色種子、および給砂材料の重量比を1:1:80とした。蛍光塗料着色種子と非着色種子を混ぜた理由は、種子を流砂調査用蛍光塗料（シンヒロイ株式会社）で着色すると発芽率が低下するためである。Case B-1では、種子散布を通水4.0時間後～通水終了まで実施した。この際、各時間帯における種子定着箇所がある程度目視で分かるよう、90分ごとに青色、ピンク色、黄色に着色した種子を順に用いた。実験終了時は、流量を30分かけて線形にゆっくり減水させるようにした。種子定着箇所は、実験終了後にブラックライトを水路上面から照射した状態で写真撮影することで確認した。一方、Case B-1では、実験終了後、河道全面に種子を散布した。この際、種子をできる限り一様に散布するため、850 μ mの目合のフルイを用いて種子散布を行った。

表-1に示すCase A-2、Case A-3およびCase B-2、Case B-3は、植生分布が異なる場合における流路変動を比較するものである。Case A-2およびCase B-2は、1回目の通水から12日経過後に実施した。2回目と3回目の通水時間は、水路内に既に流路形態が存在することから各々90分程度とした。これは、札内川の規模に換算すると洪水が約15時間継続したことに相当する。

実験終了後の河床形状は、カメラ撮影すると共に、3Dレーザースキャナ（STONEX社製モデルX300）を用いて河床高を計測した。また、Case A-1とCase B-1終了後は、砂州上のベントグラス種子の発芽と生育および低水路内での種子発芽を抑制するため、少ない流量を水路内に常に供給し続けた。

3. 実験結果

(1) 網状流路の形成 (Case A-1, Case B-1)

Case A-1とCase B-1では始めに単列砂州が形成され、その後、砂州の発達に伴い浮州が形成され、流路が網状化した。本実験では河岸浸食を許容しているため、時間経過とともに川幅・水深比が大きくなり、網状流路の形成条件に移行した。

(2) 種子の定着特性 (Case A-1)

図-3に、Case A-1終了時の河床変動量コンター図、流路中心部における流路の位置（流量を下げた状態で緑塗料で着色した水を通水）、種子定着箇所（ブラックライト照射下にて撮影）を示す。種子の色は、

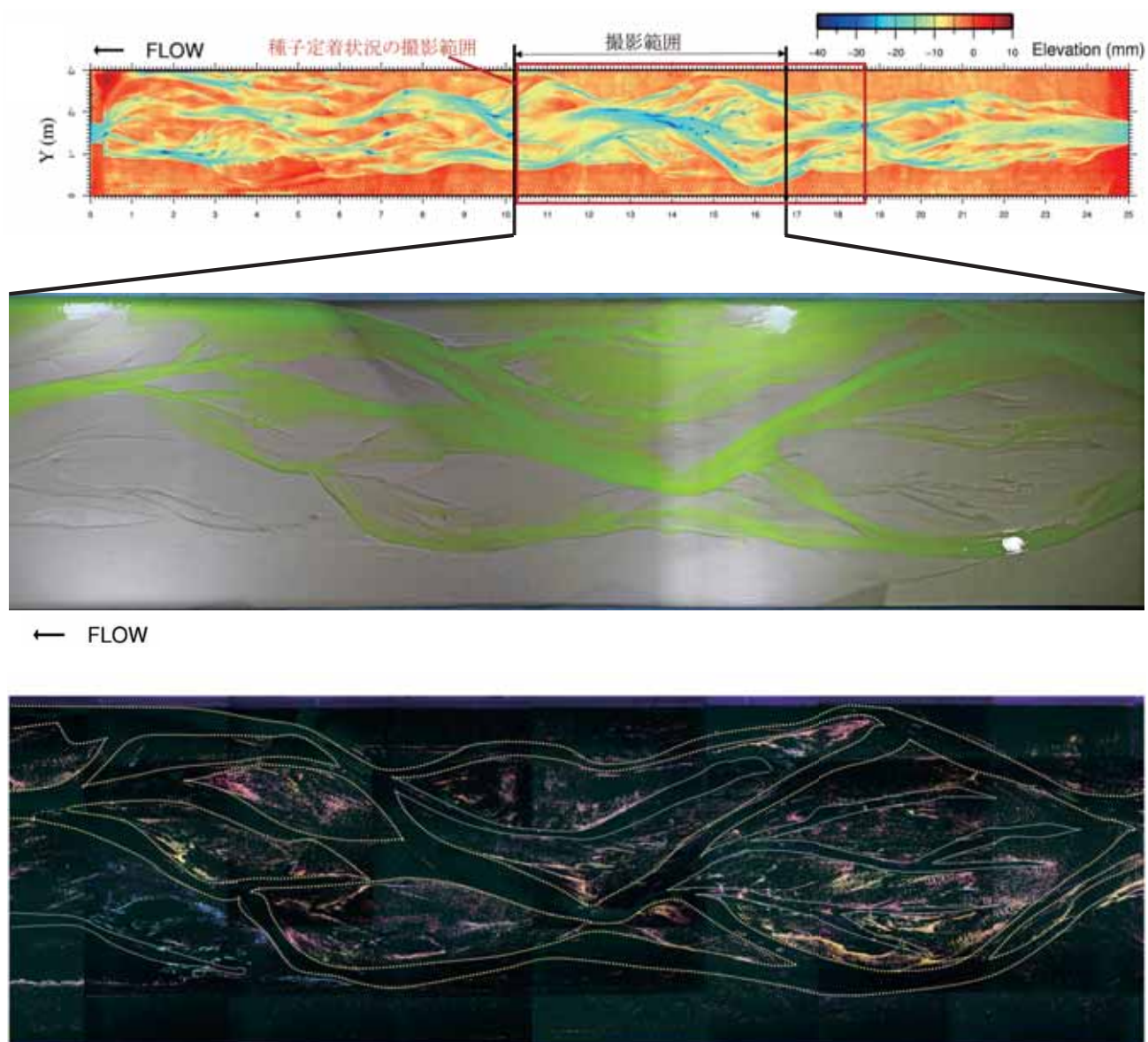


図-3 網状流路の形成と、実験終了時における種子定着状況
上段) 実験終了時の河床変動量コンター図
中段) 実験終了時の低水路位置 (緑塗料で着色した水を通水)
下段) 実験終了時の種子定着箇所 (ブラックライト照射下にて撮影, 実験経過時間に応じて青色, 赤色, 黄色と散布種子の着色を異ならせている.)



図-4 ベントグラス定着 (Case A-1) から12日後の生育状況、砂州全域に植生が定着しつつも、縦断方向に局所的に高密度で生育する様子を確認。

青色、赤色、黄色の順に実験時間に応じて異ならせたものである。図-3より、流れによって輸送された種子は、網状流路の浮州や高水敷上に広く分散しつつ、かつ局所的に縦断方向にライン状に集中して定着したことが分かる。この結果は、交互砂州を対象とした内田らの報告⁶⁾や、とくに本研究と同じく網状流路を対象としたVan Dijk et al.⁵⁾の既往報告と比較すると明らかに広範囲な定着であると言える。これは、Van Dijk et al.⁵⁾の報告では減水時にのみ種子を供給していたが、Case A-1では洪水時にも常に種子を供給し続けたためと考えられる。実際、図-3より定着した種子の色と場所を確認すると、実験前半や中盤に散布した青色、ピンク色の種子ほど実験終了時の低水路から離れた場所に存在しており、種子が砂州全体に渡って定着することに寄与したことが分かる。このような幅広い定着は、Case A-1のように浮州形成とそれに伴う流路変動の活発な網状流路では、定常給水条件下であっても各流路内の流れが非定常となるため、流路切り替えや消滅に伴う流量減水時に種子が砂州上に取り残されるためである。このことは、図-4に示すCase A-1から12日経過後のベントグラスの定着状況からも推察される。図-4では、ベントグラスが砂州上に縦断方向のラインを形成して定着する様子を確認できる。これは、各流路内において流量減衰が生じた際における、種子が砂州上を輸送される最小水深の水際線だと考えられる。なお、このような縦断方向に一直線に並ぶような樹木の侵入は実河川でも確認されており、たとえば札内川と同じく十勝川水系の二次河川である音更川（未発表）においても、2016年北海道豪雨災害時に裸地となった砂州にて、河道内砂州上への縦断方向に高密度に連続して侵入する植生・樹木侵入状況を確認することができる。

(3) 植生分布の違いに伴う網状流路の河床・流路変動特性 (Case A-2, Case B-2)

図-5および図-6に、Case A-2とCase B-2の開始前および終了時の河床変動量コンター図を示す。図-5および図-6より、植生分布の違いは網状流路の流路本数の減少に影響を与えたことが分かる。砂州や浮州上に植生パッチが形成されていたCase A-2 (図-5) では、流路本数の減少や流路の蛇行化は認められず、むしろ流路形状が複雑化したように見える。また、明瞭な流路切り替わりも認められず、流路は主に側方へと移動した。一方、水路全体にベントグラス種子を散布したCase B-2 (図-6) では、低水路以外の

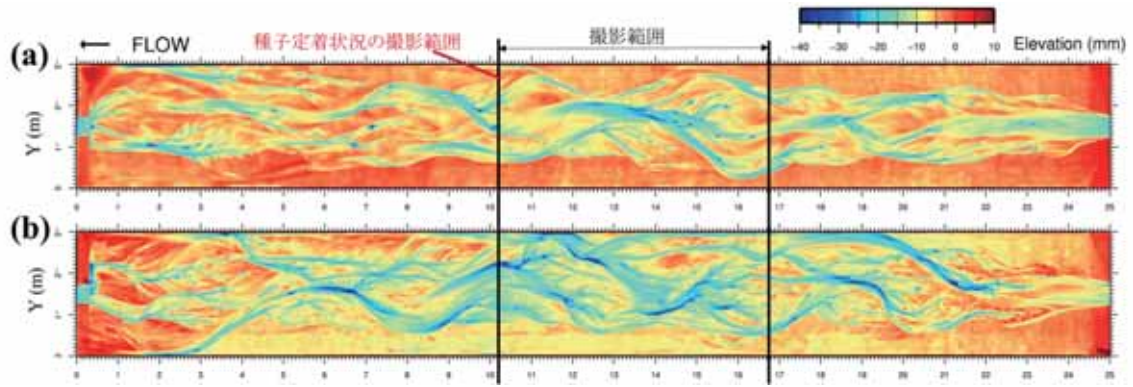


図-5 Case A-2の河床変動量コンター図
a) Case A-1終了時, b) Case A-2終了時

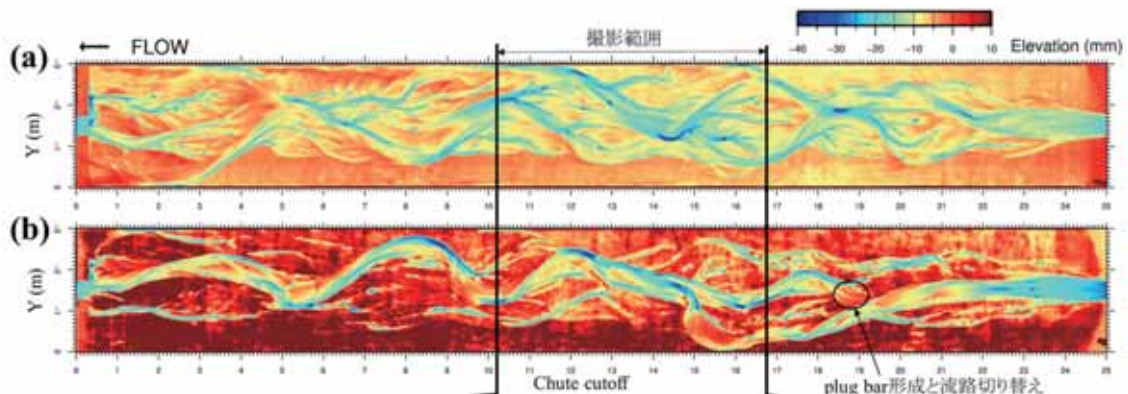


図-6 Case B-2の河床変動量コンター図
a) Case B-1終了時, b) Case B-2終了時

浮州や高水敷にベントグラスが生育し（水没した種子や水分量の多すぎる場所では発芽しないため）、ここに2回目の出水を与えることで網状流路が蛇行化する様子が確認された。

4. 数値モデル

実河川の複雑な地形や流路形状に応じたヤナギ等の流水散布に由来する植生・樹木侵入特性およびそれに伴う流路変動特性を検討するには、数値解析を用いることが適当である。そこで、ここでは上述した実験データを用い、未解明な部分の多い流水性種子の初期定着特性について、植生定着モデルを開発すると共に、その精度検証を試みた。

(1) 計算モデル

河道内樹木の時空間的な定着特性と流路変動に与える影響を検討するため、非定常2次元河床変動解析を行った。計算モデルには、オープンソフトウェアのiRIC ver. 3.0を用い、一般曲線座標系で記述された非定常平面2次元流れ・河床変動解析モデルであるNays2Dに、後述する植生の種子散布・定着モデル、樹木成長モデル、樹木流出モデルを追加したものを用いた。

種子散布・定着モデルでは、種子に見立てた粒子を任意の場所から任意のタイミングで継続的に与えるようにした。本計算では、図-7に示すとおり、水路上流端の中心付近から与えるように設定している。粒子の移動ベクトルは、粒子の近傍格子点における流速ベクトルからの線形補完で与えている（図-7）。

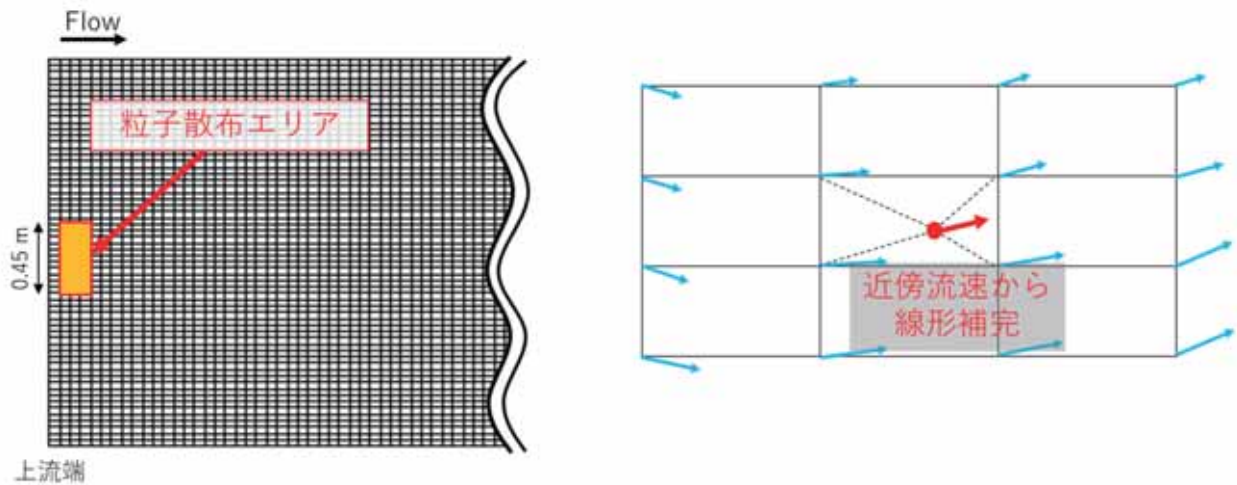


図-7 粒子散布エリアと粒子ベクトルの評価イメージ

また、粒子は実スケールで1mm以下程度の種子を想定しているため、流れには影響を与えないone-wayモデルとしている。種子は、移動が停止した場合に加え、設定した水深以下になった場合に定着したと判定している。

植生の発芽・成長モデルは、出水後の平水状態の時期に各計算セル内の定着粒子数に応じて設定できるようにした。発芽後の植生は、次の出水時の計算において、運動方程式の中に抗力の形で考慮される。

植生流出モデルでは、発芽時の河床高を初期値とし、そこから事前に設定可能とした根長の深さまで洗堀が発生した場合、植生が流失するものとした。

(2) 計算条件

図-8に本研究で利用した計算格子を示す。格子形状は縦断方向に8cm、横断方向に5cmである。水理条件は上述の水理条件と同様とし、札内川における20年確率出水規模を1/100スケールで再現したものとした。図-9に本計算で用いたハイドログラフを示す。Run 1からRun 3では、いずれも8.5時間の1度目の通水時の計算を行い、通水時に定着した粒子の位置に植生を発芽・成長させた後、1.5時間の2度目の通水時の計算を行った。Run 1からRun 3の違いは、粒子の散布条件と植生成長モデルの設定方法である。Run 1では、実験Case A-1と同じく、実験開始から4.5時間経過後から4時間に渡って粒子を流れに乗せて散布した。その後、8.5時間経過時に通水を終了し、各計算セル内の粒子の定着数に応じて植生セルの密生度を0.05を上限として設定した（なお、この部分に関しては今後さらに詳細な検討が必要である）。一方、Run 2では、上述した実験Case B-1と同じく通水時に粒子の散布は行わず、8.5時間経過時に非浸水域の全計算セルに一律に0.05の植生密生度を与えた。これにより、植生分布の違いに伴う流路変動への影響を考察する。Run 3では、既往研究のVan Dijk et al.⁹⁾と同じく、実験終了直前にのみ粒子を散布した。これは、Run 1と比較し、時間・空間的な粒子定着特性を検討するためのものである。他、すべての計算にてマンシングの粗度係数を0.024に設定し、流砂量式は芦田・道上の平衡流砂量式、横断方向の流砂量式には長谷川の式を用いた。河岸侵食は、隣あうメッシュ間の河床高の差が安息角以下になるように考慮した。

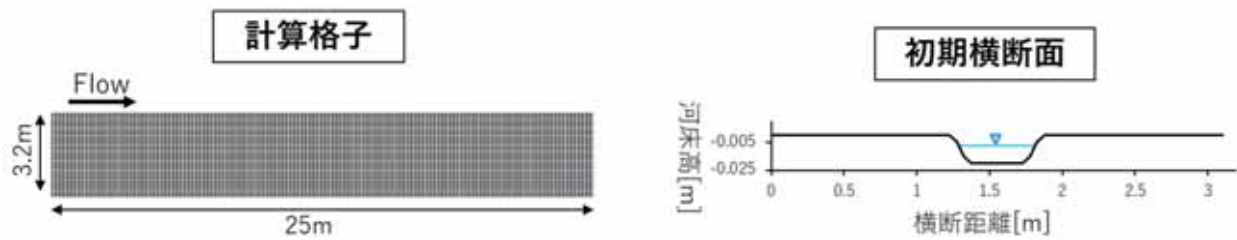


図-8 計算格子

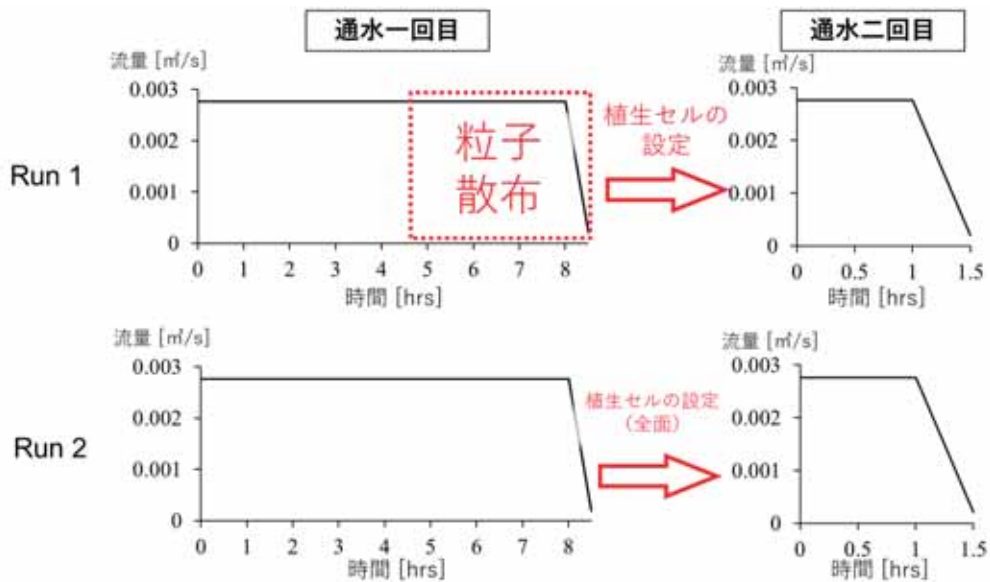


図-9 Run1とRun2のハイドログラフ，粒子散布時間

(3) 粒子（種子）の定着特性

図-10に，Run 1～Run 3で共通する4.5時間通水終了時の水深コンター図，下に河床変動量コンター図を示す．実際の礫床急流河川や，札内川を模した実験でも観られたような複列砂州を有する河道形状を形成したことが分かる．

図-11に，Run 1の8.5時間経過時の計算結果を示す．上が水深コンター図，下が河床変動量コンター図である．また，図中には定着した粒子を黒丸で示している．図-11によると，粒子は主に計算終了時の低水路に沿って集中的かつ縦断的に定着したことが分かる．また，それ以外にも，計算終了時の低水路沿いから離れた砂州上にも粒子は定着していることが分かる．これは，上述の水路実験と類似する定着結果であり，本モデルが流水性の種子の定着特性をある程度再現していることを示すものである．

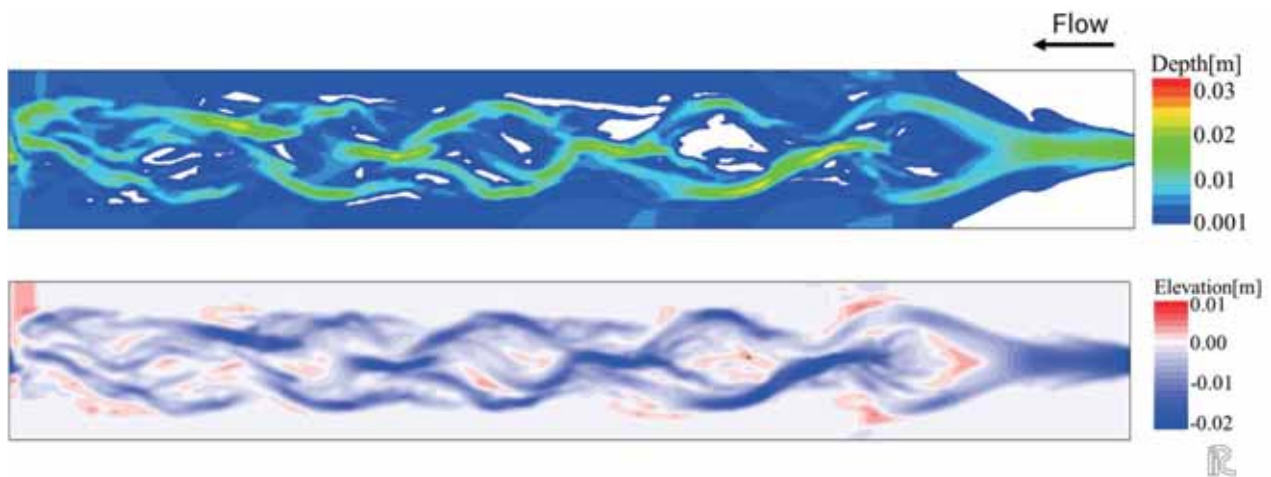


図-10 Run 1 ~ Run 3の4.5時間経過時
上)水深コンター図, 下)河床変動高コンター図

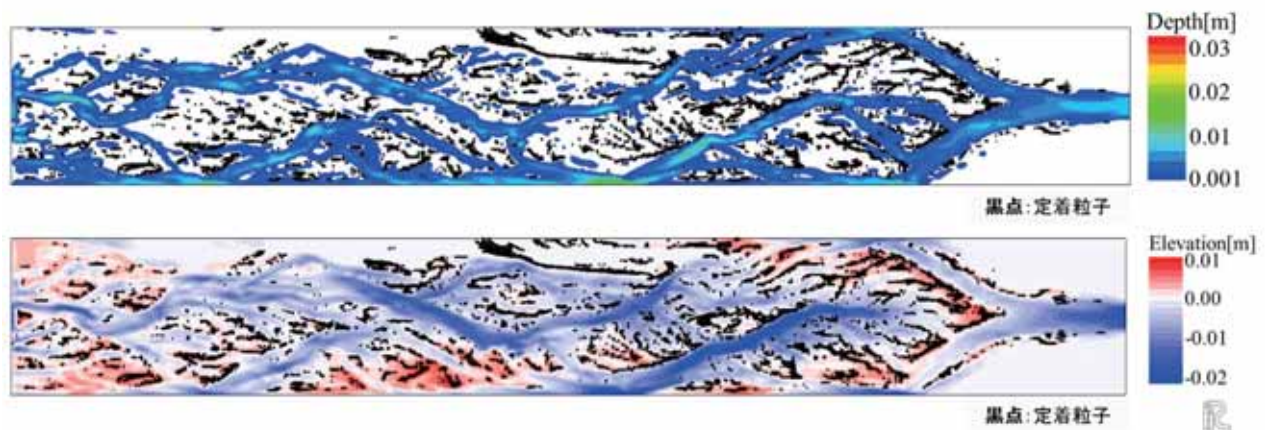


図-11 Run 1の8.5時間経過時
上)水深コンター図, 下)河床変動高コンター図

次に、図-12に、Run 1の各時間における粒子の定着状況を示す。上から6.5時間経過時、7.5時間経過時、8.5時間経過時である。粒子は、実験と同じく、それぞれ散布時間の早い順に青色、赤色、黄色の点で示している。また、図-13に、これら3つの図を重ね合わせたものを示す。図-12および図-13によると、本計算では上述の水路実験と同じく、実験の比較的終盤に散布された黄色の粒子は最終的な低水路沿いに近い位置に分布している一方で、比較的早期に散布された青色と赤色は最終的な低水路から離れた箇所にて定着していることが分かる。つまり、複列砂州や網状流路において広域的に種子が定着する要因は、交互砂州を対象とした内田らの報告⁸⁾と異なり、出水中に低水路の位置が時空間的に変化するためと言える。

そこで、図-14に実験開始から8時間経過後のみ粒子を散布した場合の定着結果を示す。図-14を実験開始4.5時間後から粒子の散布を継続した図-11および図-13と比べると、8時間経過時以降に散布された粒子(図-14)は最終的な低水路沿いに集中して定着している一方で、低水路から離れた砂州上には定着が著しく少ない(図-11)ことが分かる。これより、流路変動が顕著な複列流路においては、粒子は出水中に小スケールな流路の消長に伴って流路全面に定着するものであることが確認された。

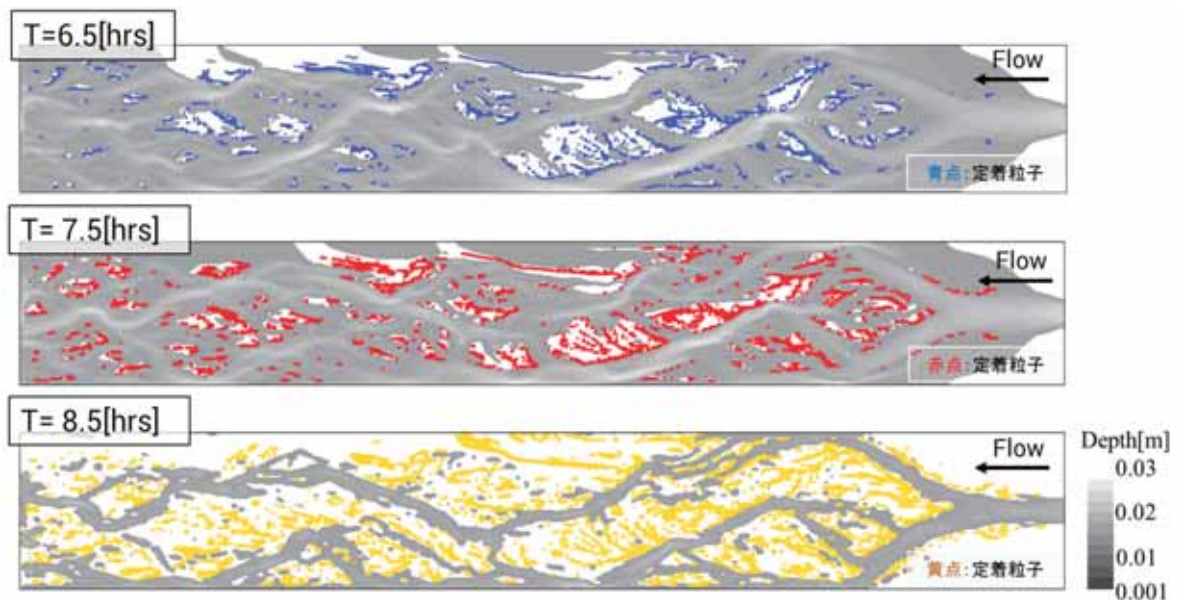


図-12 Run 1の各時間における種子定着状況
上から6.5時間経過時, 7.5時間経過時, 8.5時間経過時

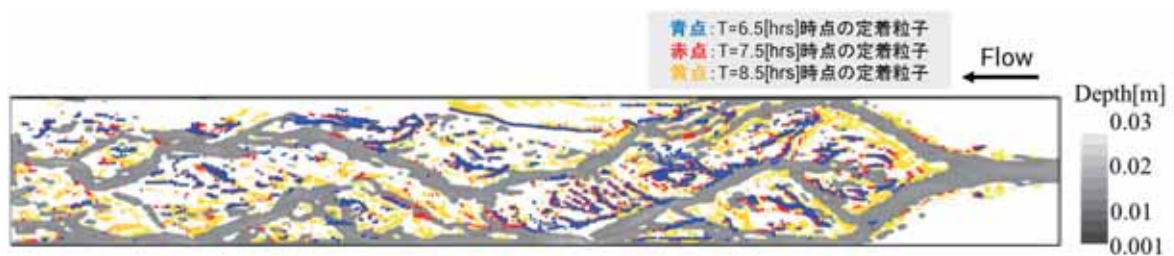


図-13 Run 1の6.5時間経過時, 7.5時間経過時, 8.5時間経過時の種子定着状況を重ねた図

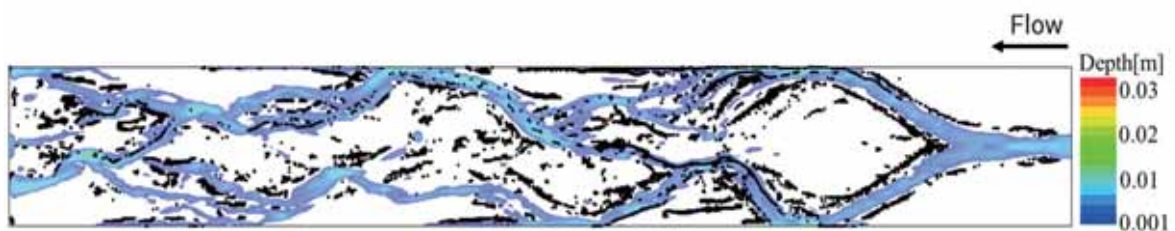


図-14 Run 3の8.5時間経過時, 黒点で粒子の位置を示す

(4) 流路変動特性

続いて、粒子定着位置に植生を繁茂させ、Run 1およびRun 2の流路変動を比較する。図-15および図-16は、Run 1およびRun 2の8.5時間経過時の粒子定着状況を考慮して設定した植生セルである。Run 1では、セル内の粒子一つあたり密生度が0.0001上昇するものと仮定（この部分に関しては、今後の更なる検討が必要である）して、植生の発芽を考慮した。一方、Run 2は水路実験において8.5時間経過後に水路全面に播種・養生を行ったケースを再現するものであり、水深が3 [mm]以下の場合に一律に発芽するものとした。計算セルへの植生設定後、水路実験と同じく90分間の通水を計算した。

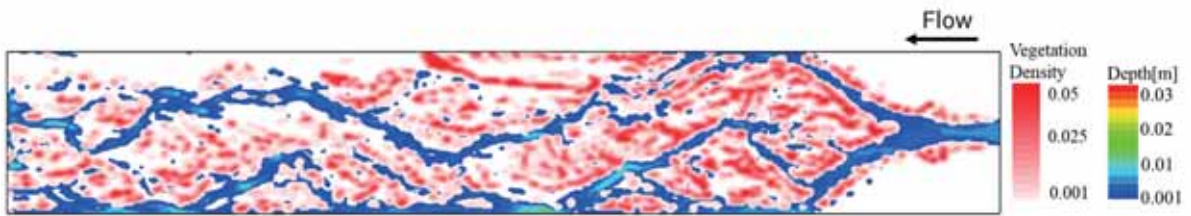


図-15 Run 1の植生セル設定状況



図-16 Run 2の植生セル設定状況

図-17に、Run1およびRun2の2度目の通水による計算終了時の低水路位置を示す。図-17よりRun 1とRun 2を比較すると、全面に植生を考慮したRun 2ではRun 1に比べて比較の流れが集中し、低水路の流路幅が広がっているように見受けられる。ならびに、Run 2においてのみ主流路の水深が増大していること、小さい流路が減少していることが分かる。今回の計算ではRun 2において明瞭な流路の蛇行化は認められなかったものの、平面的な植生の分布状況によって流路変動特性が異なることが確認された。今回の計算では、水路実験と異なり3回目の通水を行っていないため、流路変動特性については引き続き検討を行う。

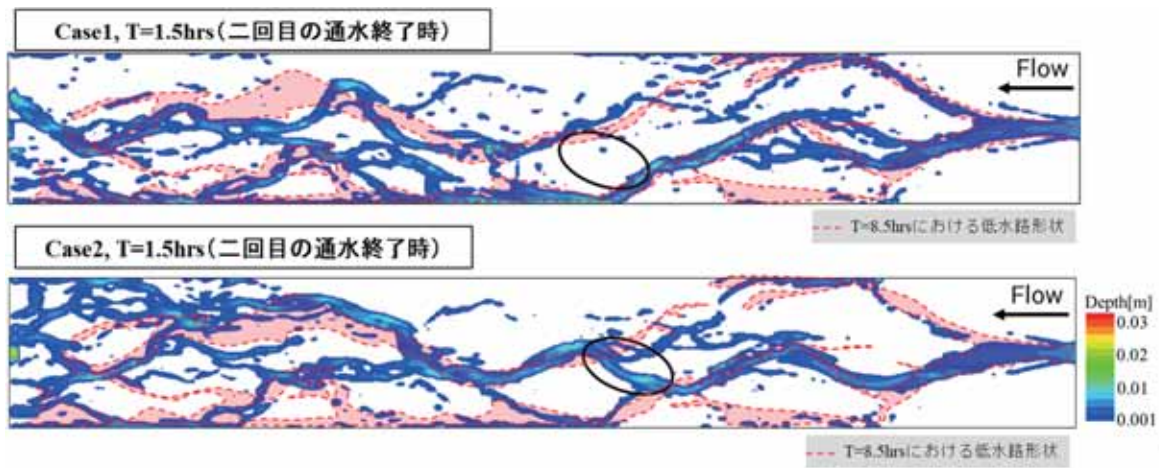


図-17 計算終了時の水深コンター図及び8.5時間経過時の低水路形状図，
上) Run 1, 下) Run 2

謝辞

本実験は、寒地土木研究所の川村里実氏、北海道大学の渡邊健人氏の協力のもと実施された。また実験計画を構築するに際し、帯広開発建設部、北海道、旭川開発建設部、室蘭開発建設部、および札幌開発建設部の皆様方に札内川、音更川、美生川、石狩川、忠別川、沙流川、鶴川、豊平川、漁川等に関する樹木侵入状況に関する現地見学、および資料等をご提供頂いた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 永多朋紀・渡邊康玄・清水康行・井上卓也・船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究, 水工学論文集, Vol.60, pp.1081-1086, 2016.
- 2) Tal, M. and Paola, C.: Effects of vegetation on channel morphodynamics: Results and insights from laboratory experiments, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.35, pp. 1014-1028, 2010.
- 3) Jang, C. L., Shimizu, Y.: Vegetation effects on the morphological behavior of alluvial channels, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, pp.763-773, 2007.
- 4) Iwasaki T., Shimizu Y., Kimura I.: Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River, *Advanced in Water Resources*, Vol. 93, pp. 118-134, 2016.
- 5) Van Dijk, W. M., Teske, R., Van de Lageweg, W. I. and Kleinhans, M. G.: Effects of vegetation distribution on experimental river channel dynamics, *Water Resources Research*, Vol.49, pp. 7558-7584, 2013.
- 6) 内田典子・久加朋子・木村一郎・清水康行：裸地砂州への種子定着特性と植生分布が河床変動の応答に与える影響, 水工学論文集, Vol. 60, pp. 1087-1092, 2016.
- 7) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, Vol.342, pp.87-96, 1984.
- 8) 傳甫潤也・堀岡和晃・米元光明・伊藤昌弘：人為改変後の低地における河畔におけるヤナギ林の地域分布, 応用生態工学会士, Vol. 11. Pp.13-27, 2008.
- 9) 山口里実・渡邊康玄：節腹連続河道形状の発達過程に関する実験, 水工学論文集, Vol.60, pp.745-750, 2016.

(2) 2016年北海道豪雨災害時における 実河川を対象とした流木流下機構に関する検討

赤堀 良介¹

Ryosuke AKAHORI

¹ 愛知工業大学工学部土木工学科 准教授

要 旨

出水時の流木による被害は多数報告されており、橋梁や取水施設等に集積し閉塞による氾濫や施設の破壊などを生じさせる例が知られている。本研究では、河道内での流木の発生から輸送、集積までを対象とした3年計画のうちの3年目として、前年度に実施した水理実験に対する成果である、橋脚周辺での流木が鉛直方向に集積し閉塞をもたらす際の条件を示すモデルに対し、実際のH28北海道豪雨災害における流木の集積状況を用いて検討した。対象としては、北海道豪雨災害における氾濫箇所である、札内川と戸蔦別川との合流点、および音更川の上流部である。これらの出水後の測量や現地観測のデータから流木の集積箇所とその高さの検討を実施したほか、レーザー測量成果を用いて平面2次元数値解析からピーク時の流速や水深といった水理量を算出した。結果から、立体的な流木の集積が生じた箇所における特徴として、1) 集積の切っ掛けとなる植生や橋脚などによる透過性を有する領域が存在すること、および2) 既往研究で得られた水面からの流木の引き込みが生じ得る条件を上回る表面流速が存在していること、などが確認された。この結果より、流木の集積が閉塞に至る状況、すなわち治水上の潜在的な問題となり得る箇所に関しては、流木自体の比重などの特性と、平面2次元の数値解析により得られる水理量からある程度推測可能であることが示された。

《キーワード：流木；集積；橋脚；現地観測》

1. はじめに

近年の大規模な豪雨災害において、流木の集積による河道の閉塞が、溢水による氾濫や河川構造物への被害を生じさせる事例が多数報告されている。これに対し、赤堀らの既往研究¹⁾より、構造物周辺などで流木が集積する際に後続の流木が水面から河床に引き込まれて立体的な集積状況となった場合は、河道断面が閉塞し上流側での水位上昇を生じやすいことが示された。前年度までの検討から、このような構造物周辺での停滞した流木の鉛直方向への引き込みが生じ得る条件に関しては、水面に存在する流木に働く流下方向の抗力と、流木を水面に留まらせる力（浮力と重力の差）が、流木同士の接触点を介して生じさせるモーメントによって検討可能であることが示唆されている。

流木の集積のメカニズムに関しては、水理実験やLagrange的なモデル化に基づくアプローチに依存した微視的なスケールでの検討例が多く、実現象を対象としたそれら知見の適用性の検討はあまり例が見られない。また観測例からの検討では、一般に橋脚のスパンや橋桁のクリアランスに着目する例が多く、水理的機構の解明までは意図されていない。このような状況の中、本年度は、2016年8月北海道豪雨災害時に十勝川水系の札内川、および音更川で観測された流木の集積状況の実測値を水害発生時の現地データとし、これに対して数値解析から得られた水理的な物理量の推測値を適用することで、上記のように推測される水理的条件の適用性に関して検討を行った。

また、前年度までの検討では一旦構造物周辺で流木が滞留した後の挙動に関して検討の主眼を置いたが、本年度は補足的な検討として、そもそもの滞留が発生する条件について、流木を構成する材料の特性から検討を実施した。

流木の挙動に着目した既往研究²⁾から、個別要素的な手法に基づく流木流下状況のモデル化に関してはおおむね妥当な成果を得ていることから、本年度の検討項目である「構造物周辺での集積の発生条件」、「流木の集積が立体化する条件」について十分な精度が確認された場合、流木の流下状況から推測される流木集積の危険度が定量的に把握可能となると考えられる。

2. 対象領域

2016年8月北海道豪雨災害において、十勝川水系の各河川で大規模な氾濫が生じた。本研究では、札内川と戸蔦別川との合流点、および音更川を対象として、出水後の観測データを元とした検討を実施した。これらの対象地点では、流木と氾濫被害の関連性についての報告は確認されていないが、区間内の多数箇所では流木の集積が観察されている。また、出水後に航空レーザー測量が実施されており、河道地形や流木集積の状況が詳細に観測されているため、水深や流速といった水理量が数値解析から推測可能である。このような水理量の空間的分布と、航空写真や詳細地形から把握可能な流木の集積位置や状態について、GIS上で整理した上で定量的に検討した。なお、本研究では氾濫の要因としての流木集積を検討することではなく、あくまでも出水時の水理的条件が流木の集積状況に与える影響について、既往知見の適応性に関して検討することを目的とした。

3. 札内川と戸蔦別川との合流点における流木集積状況の検討

(1) 検討手法

2016年8月北海道豪雨災害において、まず札内川と戸蔦別川との合流点に関して研究手法の概要を述べる。対象地点では上記の豪雨災害において破堤による氾濫が生じ、大量の流木の集積が観察された³⁾。ここでは、上流側（戸蔦別川右岸）と下流側（合流部）で2箇所破堤が生じ、上流側からは農地への氾濫が、下流側では札内川への還流が生じた（図-1）。本研究では、流木堆積状況の概況を得るため、札内川と戸蔦別川の合流点での出水後の航空レーザー測量データ（北海道開発局帯広開発建設部提供）の結果を元にGIS（ESRI社ArcGIS10.2）を用いて検討を行った。ここでは、出水後の「オリジナルデータ」と、地表高を示す1m解像度のメッシュデータ（1mメッシュDigital Elevation Model, 1mメッシュDEMとする）を利用した。「オリジナルデータ」の定義としては、該当測量業務の作業報告では「航空レーザー計測により得られたランダムな点群データからノイズ（雲や多重反射などによるデータ）を除去して得られた3次元座標データ」としており、基本的に地表高そのものではなく、植生や河道内の堆積物の表面高さを含んだ情報である。このオリジナルデータを実際の解析に用いる際には、上記GISソフトウェアを利用してInverse Distance Weighted (IDW) 補間を用いて1mメッシュの格子データへと変換して利用した。このようにして得られたオリジナルデータから1mメッシュDEMモデルを差し引くことで、流木の堆積や高さを検討した。

また、上記の出水後1mメッシュDEMを基に、iRIC⁴⁾に含まれるNays2Dの改良ソルバーを用いて流れの解析を行い、出水時の水理量の空間分布を算出した。前提として、ピーク流量時の水理量を求めることを主たる目的としているため、河床変動計算は実施せず、地形データとしても出水後に測量されたものを用いた。まず復旧後に取得された1mメッシュDEMに示された地盤高の堤防部分から、周囲の地盤高を参考に破堤部分のみ取り除き、氾濫時の地形を作成した。これを5mメッシュで解像した格子データを作製し計算時の格子として用いた。計算条件は、石田⁵⁾らを参考に流量 1500m³/sとし、マンニングの粗度係数0.03を与えた。解析では50m³/sから7200s掛けて1500m³/sまで流量を増加させ、その後一定流量で3600s間計算を行なった。この計算結果をグリッドデータとして再びGISに読み込み、先に示した流木の堆積情報と重ね合わせることで、この後の検討を実施した。

(2) 解析結果

まず前述の手法で得られた結果のうち、植生の高さや流木の堆積高さを示すと考えられるオリジナルデータと1mメッシュDEMとの差分についての結果をコンター図として図-2に示す。河道の裸地部分での差は当然小さく（図-2中で淡いピンクの領域）、樹林化した地帯では植生の樹冠部を含むために大きい値を示す（濃い茶色の領域）。ここで同時に取得されたオルソ画像で判別可能な流木の集積箇所と図-2を比較すると、おおむね差分が0.2mから2.0mの範囲（図-2中で濃いピンクから明るい緑の領域）が、流木の集積箇所と一致していることが分かる。この結果を強調するために上記差分データのうち、値が0.2mから1.0mまでとなった領域と1.0mから2.0mとなった領域について、ポイントデータとして抽出したものが図-3である。両者を比較すると、0.2mから1.0mの範囲の流木は河道の砂州上の裸地に点在しており、1.0mから2.0mの値となったものは、河道周辺の低水路と植生域の境界付近に集中している様子が見られる。

次に、札内川と戸蔦別川との合流点における流れの数値計算結果について、計算終了時の流速の瞬間値をコンター図として図-4に示す。当然ながら、河道の中央の主流路となっている箇所で大い値を示しており、低水路部で約5m/s程度、最大で6m/s程度の値となった。

ここで、図-3に示した流木集積箇所と思われるポイントについて、各ポイントデータの位置に該当する流速コンター図の計算結果を抽出し、ポイントデータが有していたオリジナルデータと1mメッシュ

DEMの差分値を横軸に、該当箇所の流速コンターの値を縦軸として散布図を作成した。この結果を図-5に示す。この結果が示すところでは、差分値の大きさが大きくなるほど（流木の集積高が高い）、該当する箇所での流速の値が一定の範囲に収束していくことが分かる。この範囲は下限を1.7m/sとしており、上限が4m/s前後である。この状況を空間的な分布として可視化するため、図-4の流速コンター図のうち特定の範囲のみを抽出し、そこに集積高さが1.0m以上となる箇所のポイントデータを重ねて示したものが図-6である。この図より、流木の集積高が高い（すなわち流木が立体的に集積した）箇所が、おおむね特定の流速の幅に治まった領域に存在しており、流速の早い河道の中央部ではほとんど観察されないことが示された。また、数値計算結果が示す水深のうち、0.8mから1.4mの範囲のみ色付けして抽出し、1m以上の高さの流木集積箇所のポイントと重ねて示した図が図-7である。両者の比較から、流木の集積高が高い箇所については、その高さが流量ピーク時の水深にほぼ近い値を取っていたことが示された。これは、鉛直方向に水深の高さだけ集積が生じた結果であり、既往¹⁾の水理実験との関連からは、該当の流木集積が、「立体的な集積」と呼ばれる水面から底面への流木の引き込みが生じた状況であったことが推測される。

この流木の立体的集積の下限となった値については、昨年度の成果に示された流木の集積条件との関連について、音更川の事例とともに後述の考察で検証する。



図-1 札内川・戸蔦別川合流点での2016年8月北海道豪雨災害後の被災状況

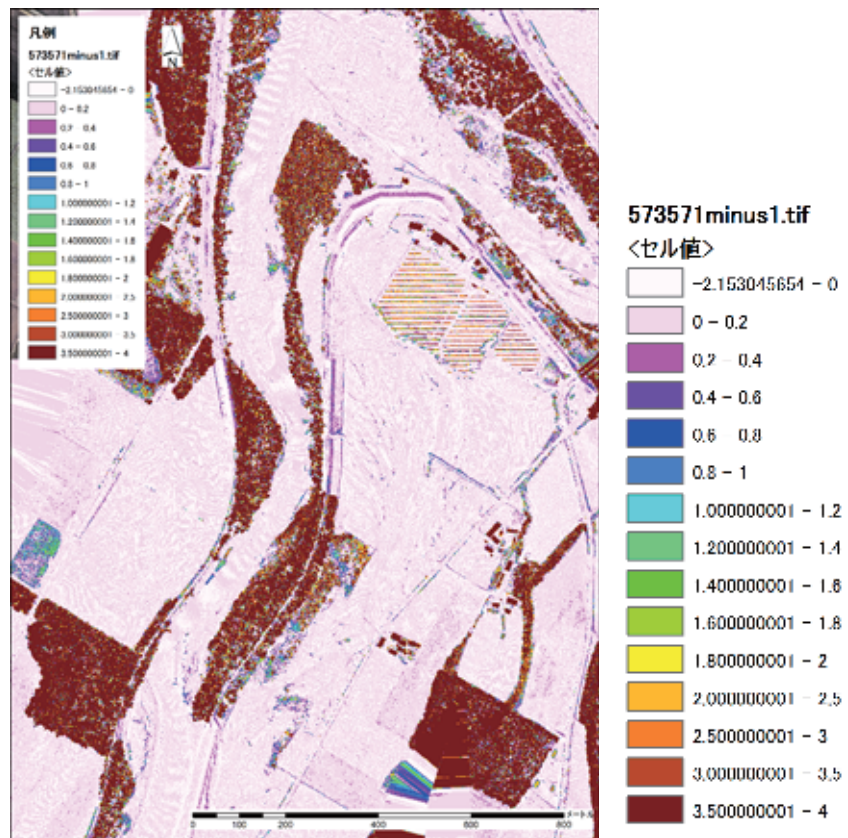


図-2 H28出水後の航空レーザー測量におけるオリジナルデータと地表面高さの差分値(m)のコンター図



図-3 オリジナルデータと地表面高さの差分値(図-2)における0.2m~1.0mの領域(淡色)と1.0m~2.0mの領域(濃色)をポイントデータとして抽出したもの

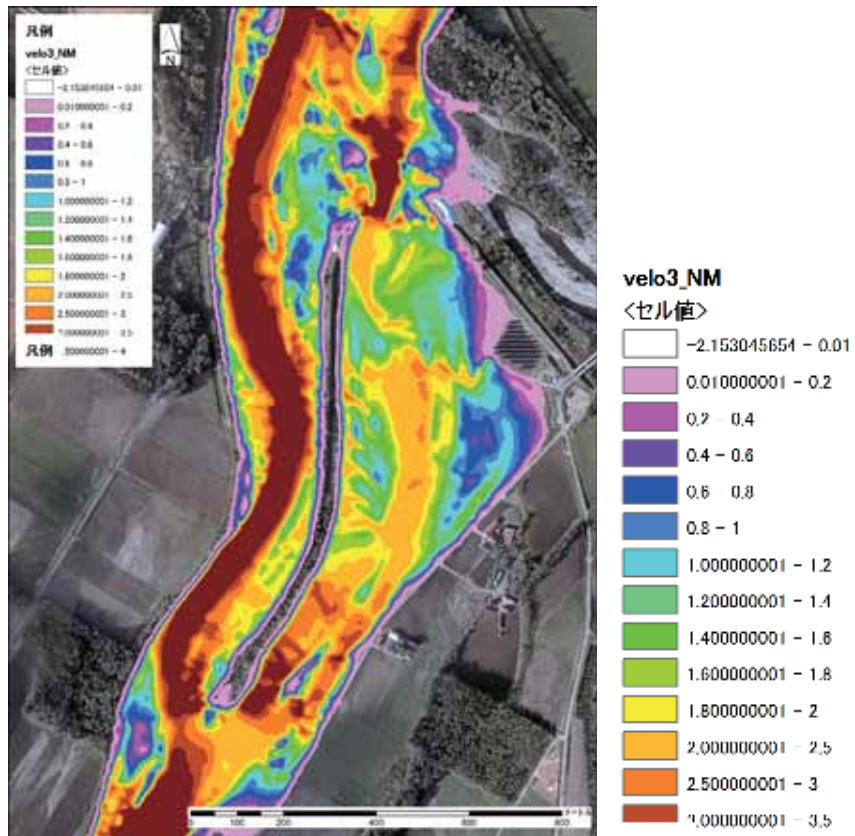


図-4 札内川・戸蔭別川合流点での流量 $1500\text{m}^3/\text{s}$ とした計算結果の流速 (m/s) コンター図

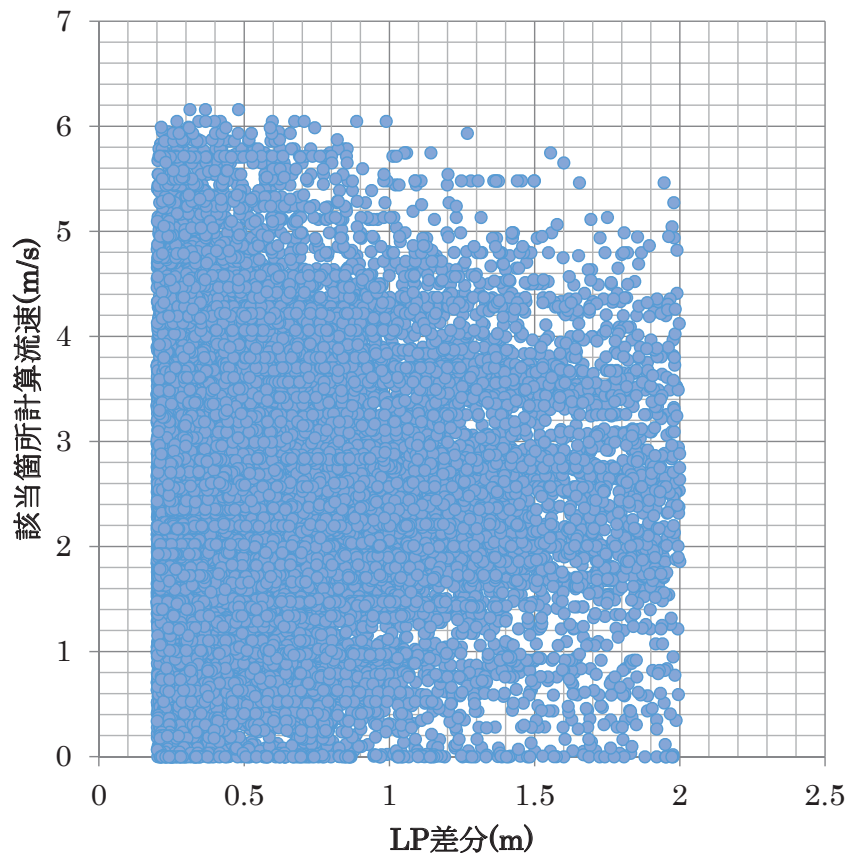


図-5 流木集積箇所の堆積高さ (LP差分) と該当箇所での流速計算値のプロット

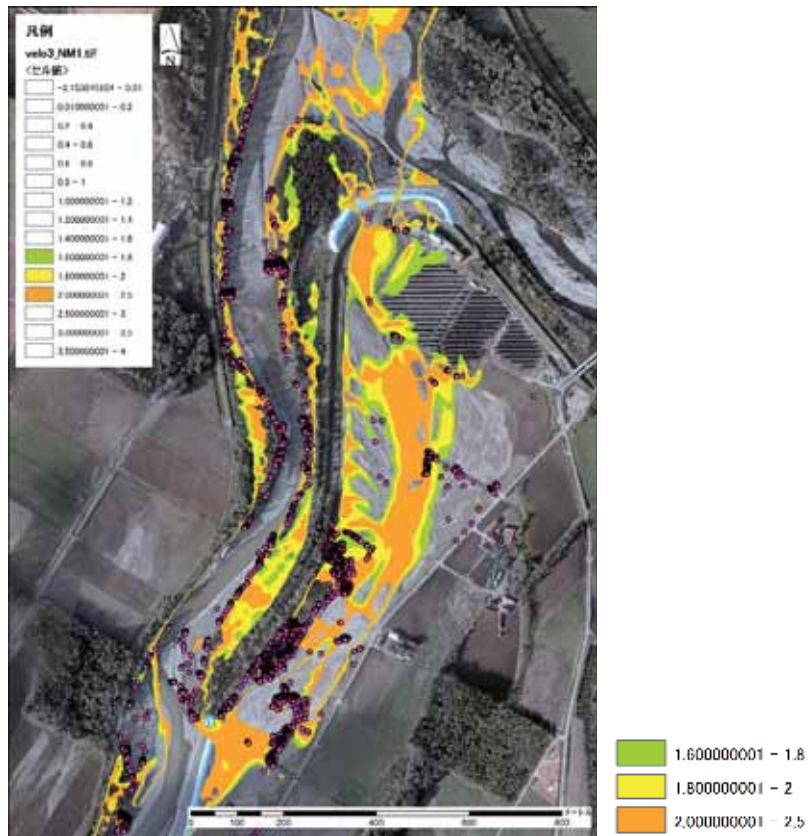


図-6 流木集積高さが1m以上のポイントと流速1.6m/s~2.5m/sの範囲のコンターを抽出して重ねたもの

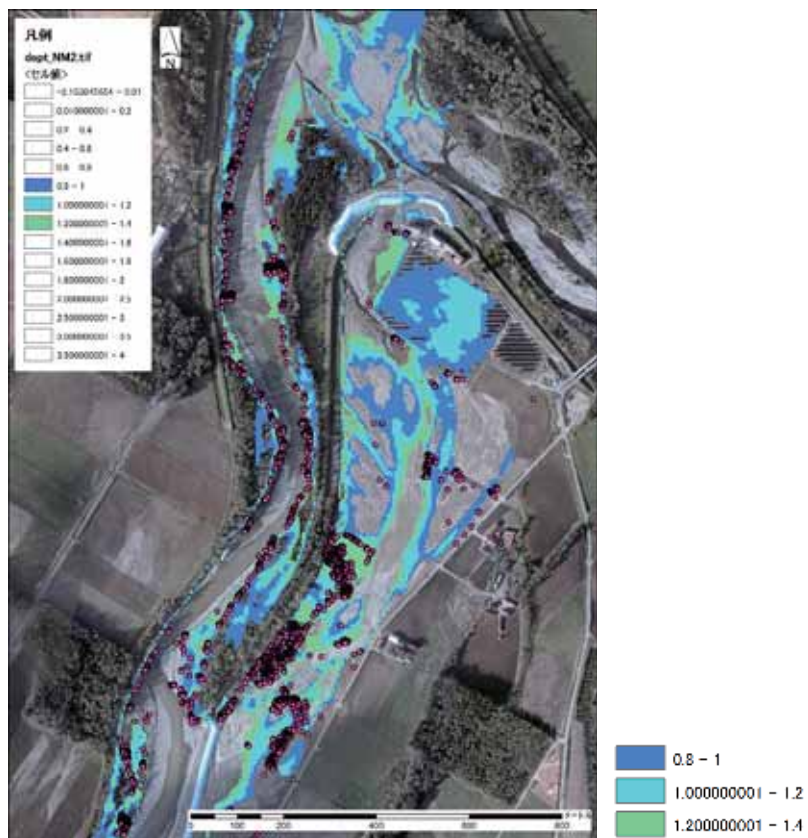


図-7 流木集積高さが1m以上のポイントと水深0.8m~1.45mの範囲のコンターを抽出して重ねたもの

4. 音更川における流木集積状況の検討

(1) 検討手法

ここでは同様に2016年8月北海道豪雨災害における音更川を対象とした検討に関して研究手法の概要を述べる。対象地点は音更川上流部の上士幌橋から四十号橋（SP4100）を挟んで西上橋に掛けての区間である。ここでは上記豪雨災害における出水により大規模な河岸侵食が生じ、左右岸連続で7箇所に及ぶ特徴的な破堤が発生した^{6),7)}。この被害の発生後、航空レーザー測量とともに、流木の堆積状況調査⁸⁾も実施された。本章では、流木堆積状況の概況を得るために後者の流木調査のデータ（北開水工コンサルタント提供）を基本的な情報として、出水後の航空レーザー測量データ（北海道開発局帯広開発建設部提供）の結果と共にGIS（ESRI社ArcGIS10.2）を用いた検討を行った。出水後の河道地形に関しては前者の航空レーザー測量の結果を利用し、ポイントデータとして提供されたデータをGISに読み込み、Triangulated Irregular Network（TIN）により補間処理した後に、1mメッシュのDEMデータとして処理した。こちらの値に関しては地表面高さを示すものであり、かつ出水後に施工された仮締切の天端高を含んだものとなる。流木の集積状況に関しては後者の流木調査結果⁸⁾を用いた。この調査では、現地での流木の堆積状況が「樹木残存・流失」、「樹齢」および「積層」といった項目で調査されており、これらの情報の空間分布がポリゴンの形でGIS用のシェープファイルとして整理されている。本検討では、この項目のうち「積層」の項目で整理されたポリゴン情報を、流木の堆積状況として利用した。ここで「積層」とは、流木の面積あたりの堆積本数を算出するための係数を示しており、たとえば積層0.4を示すポリゴンであれば、そのポリゴン面積に係数0.4を乗じた場合に、ポリゴン領域内の堆積樹木本数を示すこととなる。直接に集積した高さを示すものではないが、面積あたりの情報で整理されていることで、集積高さに関しての間接的な指標になると考えられる。

流木集積データの検討とあわせて、3章の札内・戸蔦別合流部での検討と同様に、数値解析による水理量の空間分布の推定も実施した。先と同様、上記の出水後1mメッシュDEMを基に、iRIC⁴⁾に含まれるNays2Dの改良ソルバーを用いて流れの解析を行い、出水時の水理量の空間分布を算出した。こちらもピーク流量時の水理量の推定が目的であり、河床変動計算は実施せず、出水後の地形データを利用した。まず復旧後の1mメッシュDEMに示された地盤高の仮締切部分に関しては、周囲の地盤高を参考に手作業でその分の標高を取り除き、氾濫時の地形を作成した。ここでは、これをiRIC上で2.5mメッシュで解像し、格子データを作製した。計算条件は、岡部⁷⁾らを参考に流量763m³/sとし、マニングの粗度係数0.03を与えた。解析では50m³/sから3600s掛けて763m³/sまで流量を増加させ、その後一定流量で3600s間計算を行なった。この計算結果をグリッドデータとして再びGISに読み込み、先に示した流木の堆積情報と重ね合わせることで、この後の検討を実施した。

(2) 解析結果

まず流木現地調査結果の「積層」情報について、ポリゴンとして表した結果を図-8に示す。ここでは、濃色で示されたポリゴン部分が、立体的な集積を生じている箇所と推測される。村中ら⁸⁾の検討では、砂州の上流側に単木での流木の堆積が見られるとしている。淡色の堆積ポリゴンに関しては単木と同様に砂州の上流側に見られ、積層厚の薄い状態を示していると考えられる。一方で積層の厚い（立体的な集積と推測される）濃色のポリゴンはやはり低水路と樹林帯の境界に位置しているように見受けられる結果となった。

次に、計算終了時の流速に関して、コンター図として図-9に示す。流路中央部分が最大の流速を示しており、低水路の大部で流速は4.0m/s前後、最大で7.0m/s程度となった。

ここで、図-8に示した流木集積箇所のポリゴンデータについて、一旦このポリゴンをGIS上で1mメッシュのラスターデータとして変換した後に、同ラスターデータの各メッシュの位置に該当する流速コンター

図の計算結果を抽出し、元の流木ポリゴンの「積層」値を横軸に、該当箇所の流速コンターの値を縦軸として散布図を作成した。この結果を図-10に示す。図-10の結果から、積層の値が高くなるにつれて（すなわち流木の集積高さが高いと推測される領域になるにつれて）、該当する箇所での流速の値が、一定の範囲に収束していくことが示された。この状況は札内・戸蔦別合流部の結果と一致しており、流速の集積範囲の下限の値に関しても1.7m/s前後でほぼ同様の値を示している。図-9の流速コンター図のうち特定の範囲のみを抽出し、図-8のポリゴンを重ね、一部を拡大して示したものが図-11である。この図より、濃色で示されたポリゴンの領域、すなわち流木の積層度が高い（流木が立体的に集積した）箇所が、おおむね抽出したコンター図で示された特定の流速の幅に存在していることが示された。以下、先の3章の結果とあわせて、この流木の立体的集積が特定の流速分布に偏る点について考察を行なった。



図-8 流木現地調査結果（北開水エコンサルタント提供）における「積層」（無次元の定数）情報についてポリゴンの分布で示したもの

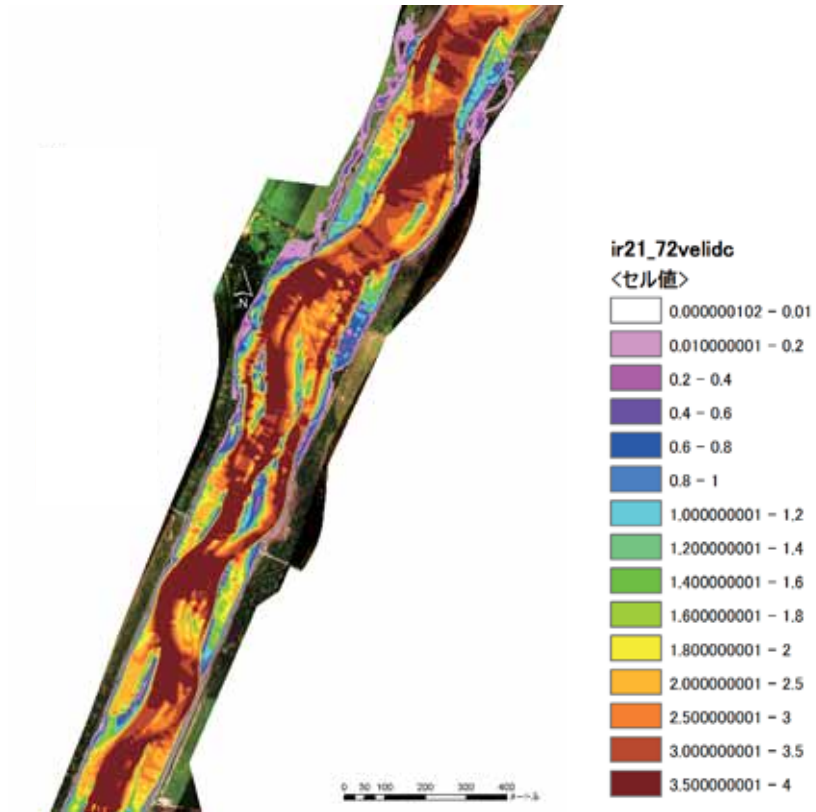


図-9 音更川四十号橋上流での流量763m³/sとした計算結果の流速コンター図

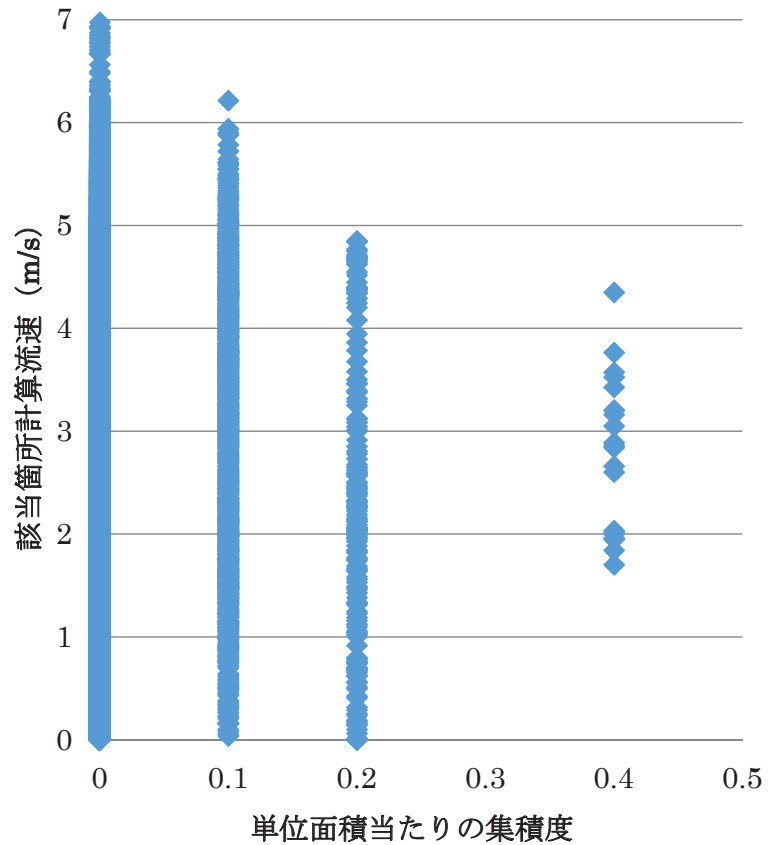


図-10 流木集積ポリゴンの「積層」値と該箇所での流速計算値のプロット

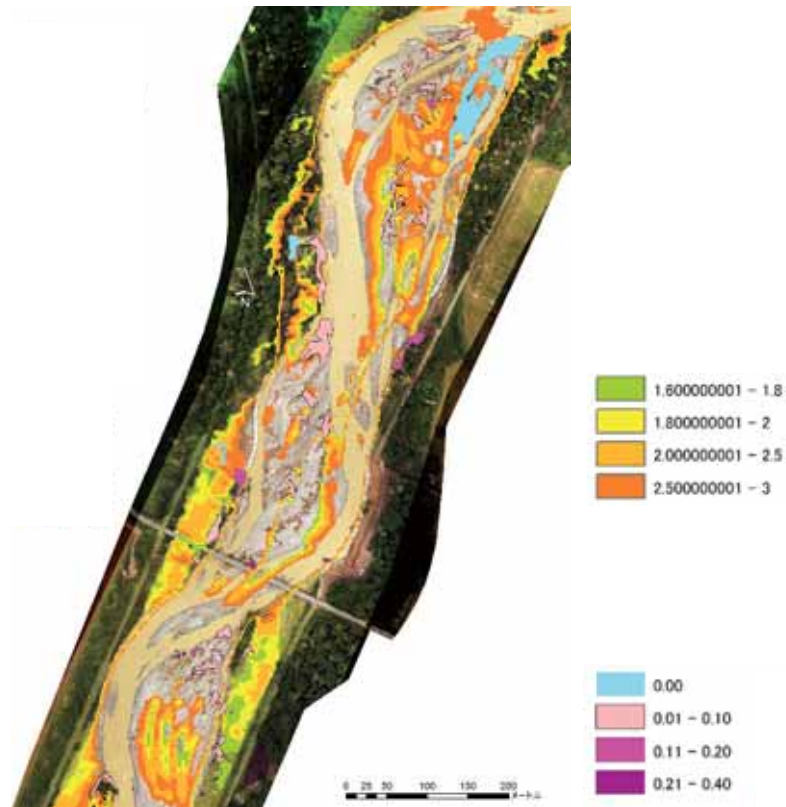


図-11 流木集積ポリゴンと流速1.6m/s～3.0m/sの範囲のコンターを抽出して重ねたもの

5. 流木集積状況の検討結果についての考察

3章、および4章での検討から、2016年北海道豪雨災害時の実河川における流木の集積状況について、河道内の特定箇所では立体的な集積となっていたことが確認された。どちらの検討においても、原則的に植生付近で流木の集積が見られることから、集積を開始させる切っ掛けとして、透過性を有する領域が流木をせき止めるためのフィルターとして働くことが必要条件であることは容易に推測できる。一方で、図-5や図-10の結果を見ると、この透過性領域の有無という条件で一意に流木の立体的な集積が生じるものではなく、鉛直方向に流木の集積が発達した領域には、流速などの水理量に何らかの理由での下限が存在していることが推測される。また図-7の結果から、集積高さがピーク時の水深と関連していることが推測されている。十勝川流域の河畔林の主な樹種としてドロノキ、オノエヤナギなどが想定されるが^{9),10)}、ドロノキに関しては、気乾比重が0.33～0.55、生材の比重が0.7とされている¹¹⁾。ここから基本的に河畔林の比重が通常では1.0を下回ると推測すると、この立体的な流木の集積に関しては、水面を移動してきた流木が水面から河床方向に引き込まれる作用によって生じたと考えるのが妥当である。

ここで、水面からの流木の引き込みの条件に関し、前年度において水理実験で確認した仮定を再掲する¹⁾。流木の立体的な集積が始まる際の挙動として、後発の流木が先行する流木に追いついて停滞した後に横断方向に向き、既に静止した先行する流木の下に潜り込むような状況に着目する。この際の流木を横断面から見た動きを、車輪の段差乗り越えの問題のアナロジーと考え、さらに上下反転させる。流木の鉛直方向への引き込みに関しては、流木を水面に留める力（浮力と重力の差分）と、水面近傍の流れにより流木に働く流下方向の抗力の、流木断面の接触点Cまわりのモーメントを考える（図-12）。いま到達した流木の図心と水面までの角度を α 、先行する静止した流木において浮力と重力が釣り合う際の図心と水面までの角度を θ_0 、流木同士の接触角を θ'' とする。水面の揺動に合わせて微小な上下動を行うことで、この接触角 θ'' は僅かに変動している。このとき、抗力 F_D による回転モーメントの大きさ（ F_D

$\sin\theta'' \cdot d/2$) が、浮力と重力の差 F_U によるモーメント ($F_U \cos\theta'' \cdot d/2$) の大きさより大きいと流木の引き込みが生じる。流木の比重を仮定すると θ_0 と得られるが、この θ_0 と α を用いて θ'' を得る。円柱の抗力係数 C_D を1.0、流木の水面下投影面積を A とし、表面流速 U を与えると、式 ($F_D = 1/2 \cdot \rho C_D U^2 A$) より F_D が定まる。

ここで、浮力の算定にあたり流木の比重が必要であるが、道内の他の河川の事例¹²⁾では、出水時に堆積した流木の2割が河畔林由来で、そのほとんどが新規流木であったとされており、この場合は生材比重を用いることが妥当と想定される。一方で、特に音更川流域では2011年にも河岸侵食を伴う大規模な出水を経験しており、ある程度の乾燥状態が想定される河道内での既存流木と、出水時の新規流木との構成比は異なることが推測される。今回の対象地に関しては、流木に関しての上記構成比の観察結果が存在しないことから、ここでは比重を一意に定めず、上記の検討から0.5（ヤナギ科の気乾比重を想定）および0.7（ヤナギ科の生材比重を想定）の2ケースで考察する。それぞれの流木比重を想定すると、重力とのつりあいから、比重0.5では当然 $\theta_0=0\text{rad}$ 、また比重0.7では約 $\theta_0=0.33\text{rad}$ 、となる。また3章での札内川と戸蔦別川との合流点における出水後のオルソ画像において、堆積した流木の長さをGIS上で確認したところ、おおむね10mから15m程度の長さであった。ここから流木の代表的な長さを12.5mとすると、永多ら¹³⁾で示された道内のヤナギの生長量における胸高直径と樹高との関係式から直径 d は約18cmとなる。

これらより得たそれぞれの比重におけるモーメントを θ'' に対して整理し、**図-13**と**図-14**に示した。比重0.5のケース（**図-13**）では、表面流速2.4m/sのケースでは、ほぼ常に F_D が F_U を同程度か上回っているのに対し、表面流速2.0m/sのケースでは、接触角 θ'' がかなり大きい値にならない限りは F_D が F_U を上回ることが無い。また比重0.7のケース（**図-14**）では、表面流速2.0m/sのケースでは、 F_D が F_U を同程度か上回るが、表面流速1.6m/sのケースでは、接触角 θ'' が大きい値にならない限りは F_D が F_U を上回らない。既存の水理実験¹⁾の結果では、水位計の変動をおおよそその接触角に換算すると、10度～25度前後となった。この接触角の幅の中で、 F_D によるモーメントが F_U によるそれを上回るかが、鉛直下向きへの引き込み、すなわち立体的な集積が生じる条件であるとする、比重0.5では表面流速が2.4m/s、比重0.7では表面流速が2.0m/sが、その条件であると考えられる。ここで、水深を2.0m、勾配を1/200として流速の対数分布を仮定すると、上記の表面流速に対しての水深平均流速は、それぞれ約2.1m/sおよび1.7m/sとなる。平面2次元の数値解析によって得られた流速に関しては、その値が水深平均の値を示していることから、再度、**図-5**と**図-10**を併記して掲載し、上記の水深平均流速を示すラインを加筆して**図-15**に記載すると、どちらの対象地点の結果においても、ちょうど流速1.7m/sから2.0m/sに掛けての領域が、分布の下限に近いことが分かる。

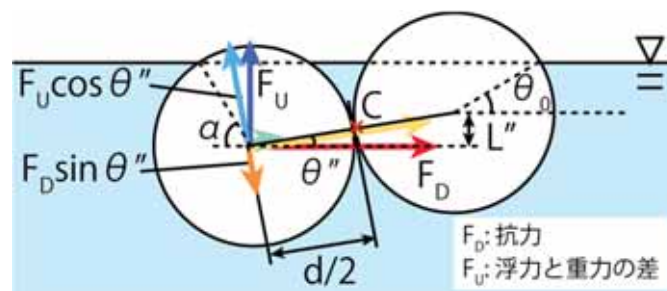


図-12 停滞した先行流木とそこに接触した流木の横断面模式図

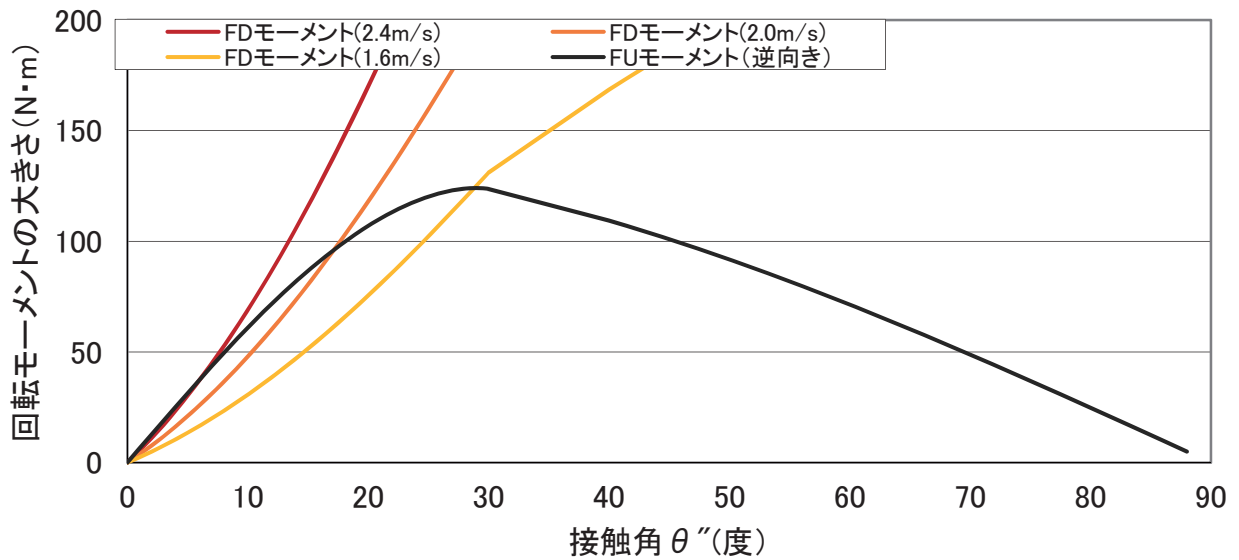


図-13 抗力 F_D と浮力と重力の差分 F_U による接触角に応じた接触点周りモーメントの比較 (流木比重0.5のケース)

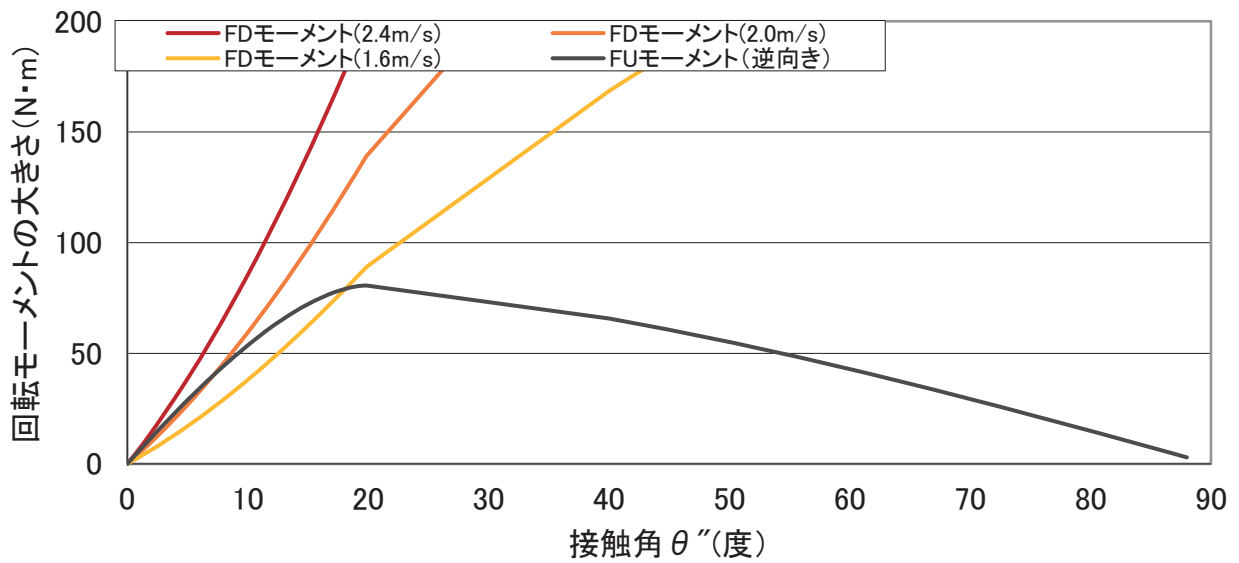


図-14 抗力 F_D と浮力と重力の差分 F_U による接触角に応じた接触点周りモーメントの比較 (流木比重0.7のケース)

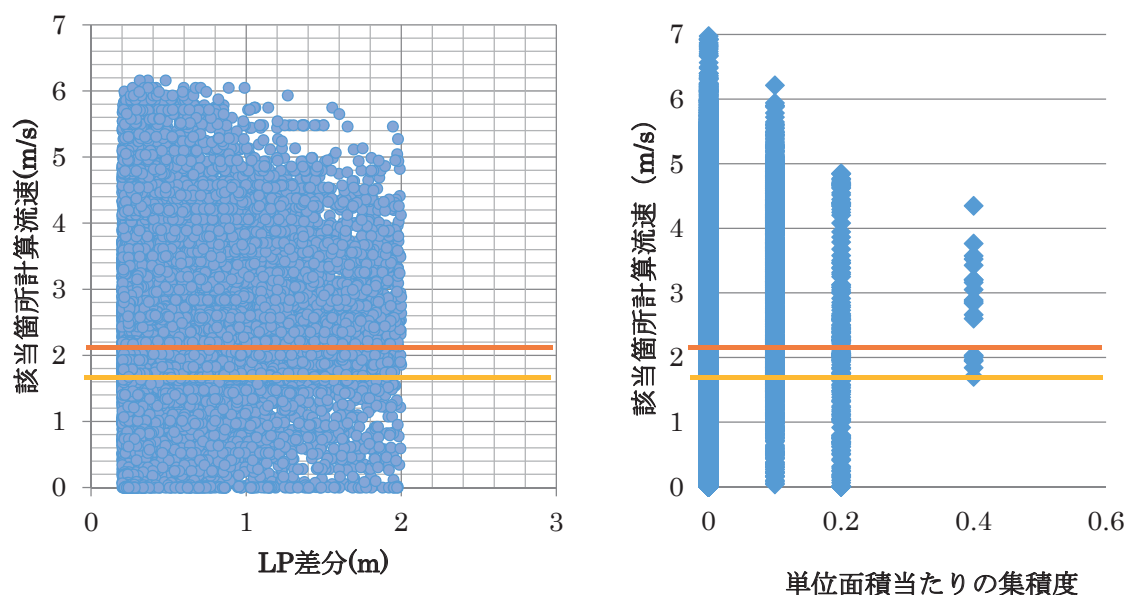


図-15 流速2.1m/s（橙）と1.7m/s（黄）の線を既存の図に重ねたもの、
左：札内川と戸蔦別川の合流点を対象（図-5の再掲）、右：音更川対象を対象（図-10再掲）

6. 流木の滞留開始条件に関する予備的検討

(1) 検討手法

前年度までの水理実験の検討では、橋脚周辺での流木の集積が、水面のみに滞留する「平面的な集積」から（この場合は水面下で河積が阻害されないため水位上昇への寄与が少ないと想像される）、水理条件に応じて、水面下での閉塞をもたらす「立体的集積」に遷移するものとして、後者に検討の主眼を置いた。そこでは、後続の流木が立体的な集積が生じる得る条件についての考察にボリュームを割いており、先行流木が最初に橋脚で滞留を開始する条件に関しては、「流木群の最大の大きさ」とスパンとの大きさの関係でのみ整理していた¹⁾。本年度の検討では、「流木群」の動きに関して、その最大の大きさを規定する条件が変化する状況を想定し、水理実験を行った。

流木群がその形状や大きさを保つには、投入された流木同士が一度密着した場合に散逸しないことが必要である。これが容易に単木に散逸する状況であれば、流木の滞留開始条件は単純に1本の流木長とスパンとの比で検討可能であるが、実際には流木の投入数が多い状況ではそのような事態にはなりにくいことが観察されている¹⁾。既往の研究では、こういった流木群が容易に散逸しない状況を想定するために、根付きモデルを用いて検討する例¹⁴⁾などが見られるが、「根付き」の状況を物理的な指標で定量化することは難しく、モデル上でのパラメータとして設定する際には経験式として置き換えるような対処が必要となる。そこで、本章での検討では、この流木同士が群としての形状を保つために重要となる指標を、流木模型同士の摩擦係数で単純化し、その差異が流木の滞留開始条件に与える影響について検討を実施した。

ここでは、既往研究¹⁾で行われた実験と同様の方法で検討を実施した。水路として、愛知工業大学7号館の可傾斜水路を用いた。実験水路は全長7.5m、幅50cmである。ポンプの能力から、最大流量は約8.31L/sであった。この水路の下流側に堰を設け、水深と流速の変更を可能にした。勾配を1/1000に設定すると、堰上げがない場合は水深4.0cmであり、堰上げの調整により水深を11.0cmまで上げることが可能であった。また、橋脚模型の橋脚間長は8.0cmであり、水路幅50cmに対し5つの橋脚を設置した。

水路両端では、水路側面と橋脚側面の間隔を6.5cmとした。この橋梁模型を設置した開水路で流木流下実験を実施し、橋梁での平面的な流木の集積が開始される条件について、流木模型の素材および投入量を変化させながら検討した。流木模型は、長さ10cm、直径0.6cmの木材であり、比重を0.68、摩擦係数0.2とした。また、比較対象として木材の流木模型に摩擦係数0.04のフッ素樹脂粘着テープ（スリーエムジャパン 3M PTFEテープ）を巻き付けた流木模型を作成した。こちらの流木模型も長さ、直径、木材、比重の3つを同様のものとした。この2種類の流木模型を用いて橋脚周辺での流木模型の平面的な堆積の違い、捕捉率の変化の確認を行った。

(2) 検討結果

実験における橋脚での捕捉率を、時間あたりの流木投入本数と平均流速で整理し、流木模型の種類ごとに示した表が、表-1および表-2である。表-1は被覆の無い流木模型（粗度が高い）の結果を示し、表-2は樹脂テープで被覆された流木模型（粗度が低い）の結果を示す。なお、この実験条件ではすべてのケースにおいて表面流速がそれほど大きい値とならず、著しい「立体的な集積」を生じる状況となっていなかった。従って、橋脚上流側で滞留した流木は、基本的には水面にのみ存在し、特に閉塞を生じていない状況であった。また、ここで、捕捉率は橋梁模型により捕捉された流木数を投入流木の総数で除したものである。捕捉率が増加するのに応じて、各セルを緑、黄、橙と変化させていた。

この結果から、捕捉率は流速10.0cm/sのケースでは2種類の流木模型に変化はほぼ見られないが、流速が17.9cm/sを越えた程度から2種類の流木模型ともに捕捉率が減少し、特に樹脂テープ被覆の流木模型の捕捉率が大幅に減少していくのが分かる。これは、橋脚での集積に際し、表面粗度の違いにより摩擦係数が低いために、先行した樹脂材の流木模型を後発した模型が押し出したことにより生じた。この結果から、表面粗度が低く、流木群としての形状の維持が困難な状況では流木は容易に単木化し、粗度が高い状態と比較して、より滞留が開始し難い状態となることが分かる。また、流速が高いほど滞留が生じない結果となっており、流木に働く流体力が高い状況では流木群が散逸しやすく、流木集積の最初の切っ掛けとしては、むしろ発生しがたい状況となることが分かる。モデル化に至るまでには、これらの結果の定量化が必要であるが、現在のところ今後の課題としている。

表-1 橋脚周辺での木材の流木模型の捕捉率：緑(～0.3)、黄(0.3～0.6)、橙(0.6～)

| 流速 (cm/s) | 水深 (cm) | 投入本数 | | | |
|--------------|------------|-------|-------|--------|--------|
| | | 2本/5s | 5本/5s | 10本/5s | 20本/5s |
| 10.0 | 11.5 | 0.00 | 0.82 | 0.68 | 0.82 |
| 17.9 | 9.0 | 0.00 | 0.78 | 0.90 | 0.90 |
| 19.1 | 8.0 | 0.00 | 0.71 | 0.82 | 0.68 |
| 22.4 | 7.2 | 0.00 | 0.10 | 0.52 | 0.57 |

表-2 橋脚周辺での樹脂テープ被覆の流木模型の捕捉率：緑(～0.3)、黄(0.3～0.6)、橙(0.6～)

| 流速 (cm/s) | 水深 (cm) | 投入本数 | | | |
|--------------|------------|-------|-------|--------|--------|
| | | 2本/5s | 5本/5s | 10本/5s | 20本/5s |
| 10.0 | 11.5 | 0.00 | 0.67 | 0.75 | 0.80 |
| 17.9 | 9.0 | 0.00 | 0.51 | 0.62 | 0.58 |
| 19.1 | 8.0 | 0.00 | 0.24 | 0.56 | 0.68 |
| 22.4 | 7.2 | 0.00 | 0.08 | 0.21 | 0.06 |

7. まとめ

本研究では、既往研究により推測された流木の立体的集積が生じる得る条件を、実際の出水時に観測された流木のデータを用いて解析することで、その知見の適用について検討した。対象としては、2016年北海道豪雨災害における氾濫箇所である、札内川と戸蔦別川との合流点、および音更川の上流部である。これらの出水後の測量や現地観測のデータから流木の集積箇所とその高さの検討を実施したほか、レーザー測量成果を用いて平面2次元数値解析からピーク時の流速や水深といった水理量を算出した。結果から、立体的な流木の集積が生じた箇所における特徴として、1)フィルターとして働き集積の切っ掛けとなる植生や橋脚などによる透過性を有する領域が存在すること、および2)既往研究¹⁾で得られた水面からの流木の引き込みが生じ得る条件を上回る表面流速が存在していること、などが確認された。

参考文献

- 1) 赤堀良介：橋脚周辺における流木の3次元的集積に関して，土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_679-I_684, 2018.
- 2) 赤堀良介，初田直彦，清水康行，伊藤丹：水理構造物周辺の流れの構造に対する流木の応答，水工学論文集，第58巻，pp.I 691-I 696, 2014.
- 3) 土木学会 水工学委員会，2016年8月北海道豪雨災害調査報告書，
<http://committees.jsce.or.jp/report/taxonomy/term/50>
- 4) iRIC： <http://i-ric.org/ja/>
- 5) 石田義明，山口里実，久加朋子，岩崎理樹，清水康行，川村育男，泉 典洋：札内川・戸蔦別川合流地点における堤防決壊と氾濫原からの還流による被害特性の検証，河川技術論文集，第23巻，p.1-6, 2017.
- 6) 久加朋子，山口里実：側岸に繁茂する植生が流路変動に与える影響，土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_1135-I_1140, 2018.
- 7) 岡部和憲，久加朋子，清水康行，長谷川和義，新庄興，山口里実：流量低下時における河道変動の応答特性～十勝川水系音更川を事例として～，土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_1501-I_1506, 2018.
- 8) 村中寿孝，佐々木香織，岡部和憲，長谷川和義：音更川出水時における河道樹木の流失・堆積について，土木学会第72回年次学術講演会(平成29年9月)，pp.229-230, 2017.
- 9) 新山馨：札内川に沿ったケショウヤナギの分布と生育地の土性，日本生態学会誌，Vol.39, No.3, pp.173-182, 1989.
- 10) 高木麻衣，中村太士：ダムによる流量調節が河畔林に及ぼす影響について－北海道札内川の事例－，日林誌，85(3)，pp.214-221, 2003.
- 11) 森林総合研究所：改定4版 木材工業ハンドブック，丸善株式会社，2004.
- 12) 鈴木優一，渡邊康玄：沙流川での台風10号における流木の挙動，水工学論文集，第48巻，pp.1633-1638, 2004.
- 13) 永多朋紀，渡邊康玄，清水康行，井上卓也，船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究，土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I_1081-I_1086, 2016.
- 14) 渋谷一，香月智，大隅久，石川信隆：根付き流木モデルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討，構造工学論文集A, Vol.57, pp.1087-1093, 2011.