

流域土砂動態の変化を考慮した
急流河川の河床・流路変動特性の検討（2年目）

富山県立大学大学院 工学研究科
京都大学 防災研究所
広島大学大学院 先進理工系科学研究科
国立研究開発法人 寒地土木研究所

久 加 朋 子
山野井 一 輝
井 上 卓 也
山 口 里 実

流域土砂動態の変化を考慮した 急流河川の河床・流路変動特性の検討（2年目）

久加 朋子¹・山野井 一輝²・井上 卓也³・山口 里実⁴

Tomoko KYUKA, Kazuki YAMANOI, Takuya INOUE, Satomi YAMAGUCHI

¹ 富山県立大学大学院 工学研究科 准教授

² 京都大学 防災研究所 准教授

³ 広島大学大学院 先進理工系科学研究科 准教授

⁴ 国立研究開発法人 寒地土木研究所 主任研究員

要 旨

近年、将来気候における降雨特性や流量ハイドログラフの検討事例は全国的に蓄積されつつあるものの、それに応答した流域土砂動態の変化、およびそれに伴う急流河川における河床・流路変動特性の評価は依然として限定的である。特に、細粒成分を含む混合粒径場での流路変動や、地下水位の変動、上流・河岸からの土砂供給といった複合的要因が河岸侵食に及ぼす影響については、現象把握と数値モデルによる再現の両面で課題が残されている。本研究では、これらの課題解決を目的として、水路実験と数値解析を組み合わせた現象解析を行っている。2年目にあたる本年度は、(1) 直線・蛇行流路における混合砂礫の構成と出水応答に関する水路実験、(2) 透明砂を用いた地下水位変動を伴う河岸侵食挙動の観測・分析、(3) 流域スケールにおける土砂移動特性のシミュレーション解析を実施した。これらの成果により、急流河川における混合粒径場特有の流路変動様式や河岸侵食のプロセス、およびそれに対する数値モデルの再現限界と改善の方向性について一定の知見が得られた。以下は研究初年度に実施した内容であり、下記テーマについて報告する。

- (1) 蛇行流路における混合砂礫場の流路変動特性に関する水路実験（久加朋子・山口里実）
- (2) 透明砂を用いた河岸侵食の進行過程の実験的研究（井上卓也）
- (3) 美生川を対象とした流路変動・土砂移動シミュレーション（山野井一輝・久加朋子）

1.蛇行流路における混合砂礫場の流路変動特性に関する水路実験

久加 朋子¹・山口 里実²

Tomoko KYUKA, Satomi YAMAGUCHI

¹ 富山県立大学大学院 工学研究科 准教授

² 国立研究開発法人 寒地土木研究所 主任研究員

要 旨

近年、全国各地の山地河川において、斜面・河岸崩壊や土石流に起因する大量の土砂流入による災害が増加しており、これらの土砂流入が河床・流路変動に与える影響の把握が重要な課題となっている。特に、崩壊地から供給される細粒を含む土砂の挙動を理解することは、急流河川における流路変動の解明に不可欠と考えられる。しかしながら、これらに関する基礎的知見は限られた状況にあり、本年度研究では大規模水路実験から一様粒径と混合粒径場における河床・流路変動特性の違いを詳細に把握するためのデータ取得を目的としている。久加・山口は、これまでに一様粒径条件下での網状流路における流路変動実験を実施し、砂州発達や樹木の影響など把握してきた。これらの水路実験データを比較対象データとし、本年度は混合粒径場を対象とした網状流路における水路実験を新たに1ケース実施した。実験は平衡給砂条件とし、8.5時間の通水を行った。なお、今年度は実験の設計・実施と基礎的な整理に重点を置いたため、河床・流路変動特性の定量的な分析については次年度に実施予定である。本稿では、今年度実施した水路実験の構成・手法・観測項目等の概要について報告する。

《キーワード：混合粒径；水路実験；河床変動；細粒土砂》

1. はじめに

河道内に流入する細粒土砂は、その濃度によって氾濫原の高さ、河岸侵食量、土砂輸送特性を変化させ、沖積河川の中長期的な河床・流路形態に影響を与えることが知られている¹⁾。しかしながら、我が国のような急勾配河川における山地から生産される細粒土砂の挙動や、それらが河道内へ流入した後の輸送特性に関する知見は非常に限られた状況にある。こうした背景のもと、本研究の1年目の検討では、河岸を固定させた蛇行流路を作成し、その中で一様粒径と混合粒径を用いた際における河床・流路変動特性を比較するための水路実験を実施した。しかしながら、蛇行角をあらかじめ固定していることから、河床材料構成に与える影響を比較することはできるが、砂州の波長などの中規模河床形態に由来する河床・流路変動特性の比較を行うことが難しい課題があった。そこで、本年度は網状流路を想定した混合粒径実験を実施し、過去に実施した一様粒径を用いた網状流路実験との比較を行うことを目的とした水路実験を新たに実施することを試みた。新規水路実験は2ケースとし、平衡給砂条件および過剰給砂条件とを扱った。2ケースの実験はそれぞれ、平衡給砂条件および過剰給砂条件の設定とし、これまでの一様粒径実験との比較を行うことを主目的としている。なお、今年度は実験の設計・実施と基礎的な整理に重点を置いたため、河床・流路変動特性の定量的な分析については次年度に実施予定である。本稿では、今年度実施した水路実験の構成・手法・観測項目等の概要について報告する。

2. 水路実験

2.1. 実験条件

実験には、寒地土木研究所所有の長方形矩形水路を用い、初期水路形状として水路延長26.0 m、水路幅3.0m、低水路幅0.45 m、勾配0.01を作成した（図-1）。初期地形の土砂は高水敷に厚さ10cm、低水路に厚さ8 cmで敷設し、低水路河岸高は2 cmとなるようにした。これら条件は2016年に同水路で実施した一様粒径を用いた網状流路実験²⁾と同じ初期形状である。本年度の検討では、河床材料のみ混合粒径に変更している。本実験にて用いた混合砂は平均粒径0.76 mmであり、粒径加積曲線を図-2に示す。

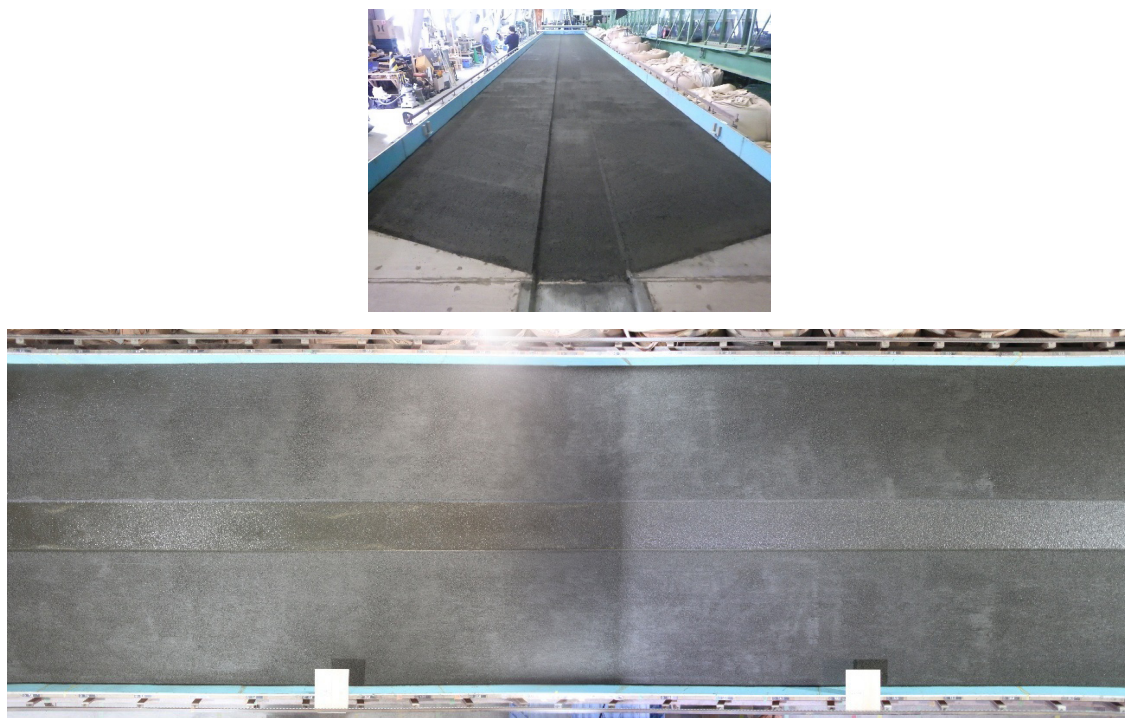


図-1 初期河床の様子，上) 水路上流側から撮影，下) 水路上部から撮影

表-1 実験ケース

Case	初期地形	初期水深	初期無次元掃流力	河床材料	通水時間
Case1 ^{※1}	複断面水路	14 mm	0.111	一様粒径(0.765mm)	8.5
Case2	複断面水路	14 mm	0.111	混合粒径 (0.763mm)	8.5

※1: 2016 年実施の既往実験

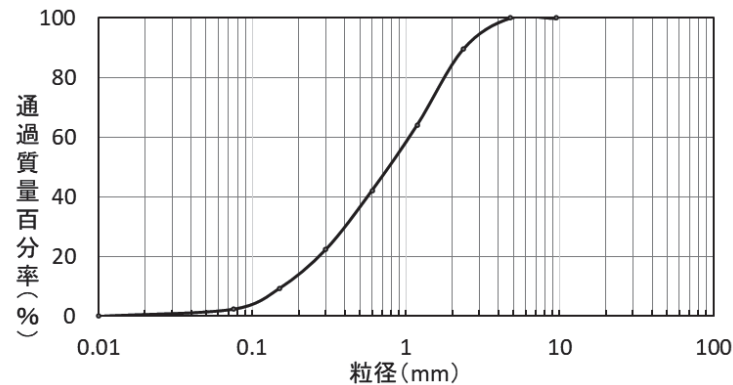


図-2 実験に用いた混合粒径材料の粒径加積曲線

2. 1. 実験ケース

実験ケースを表-1に示す．実験水理条件は既往実験²⁾ および岸・黒木³⁾を参考とし，初期条件のもとでは交互砂州形成領域となるように定めた．これは，一様粒径の既往実験では，交互砂州が形成された後，低水路幅拡幅に伴い多列流路へと時間変化する実験条件である．流量は一定流量 ($0.00276 \text{ m}^3/\text{s}$) とし，水路上流端からは2016年既往実験と同じ給砂量を平衡掃流砂量として与え続けた．

表-1に示すCase1は，2016年実施の既往実験である．初期河床材料を一様砂とし，8.5時間の通水中に水路上流端から平衡掃流砂量（実験上流端直下の河床が上昇も低下もしない給砂量）を供給し続けたものである．Case2は初期河床材料を混合砂とし，Case1と同じく8.5時間の通水中に水路上流端から平衡掃流砂量（Case1と同量）を供給し続けたものである．混合粒径の場合，Case1とは平衡掃流砂量が異なることも考えられたが，実験条件をできる限りそろえることを優先し，Case1と同じ土砂量を平衡掃流砂量と定義して与えてものとした．

実験データの取得は，Case1では水路上部にタイムラプスカメラを設置して河床変動の様子を記録すると共に，通水前後の河床高を3Dスキャナ（STONEX製X300）にて計測した．今回実施したCase2では，実験中は水路上部にタイムラプスカメラに加えて4Kビデオを設置し，河床変動の様子を記録している．また，通水前と通水終了後は，河床高を超高速インラインプロファイル測定器（KEYENCE社製）にて計測した．

3. 結果・考察

図-3に実験終了時の河床の様子を示す．図より，一様砂で行ったCase1は，側壁近くまで広がる形で多列流路を形成していると分かる．一方，混合粒径で行ったCase2はCase1と同じく多列流路を形成するものの，流路の側壁方向への移動量がCase1に比べて小規模であると分かる．低水路の深さの違いなどはR7年度に整理予定であるが，実験中の目視では，Case2の方が水深のある流路を形成しているように見受けられた．これは，混合粒径の方が一様粒径よりも砂礫の安息角が大きく，河岸侵食量が小さくなるためと考えられる．本結果は実験前からある程度想定された結果ではあるが，これまで数値計算に用いるための検証用に利用できる水路実験は限られており，貴重な実験データと考えられる．

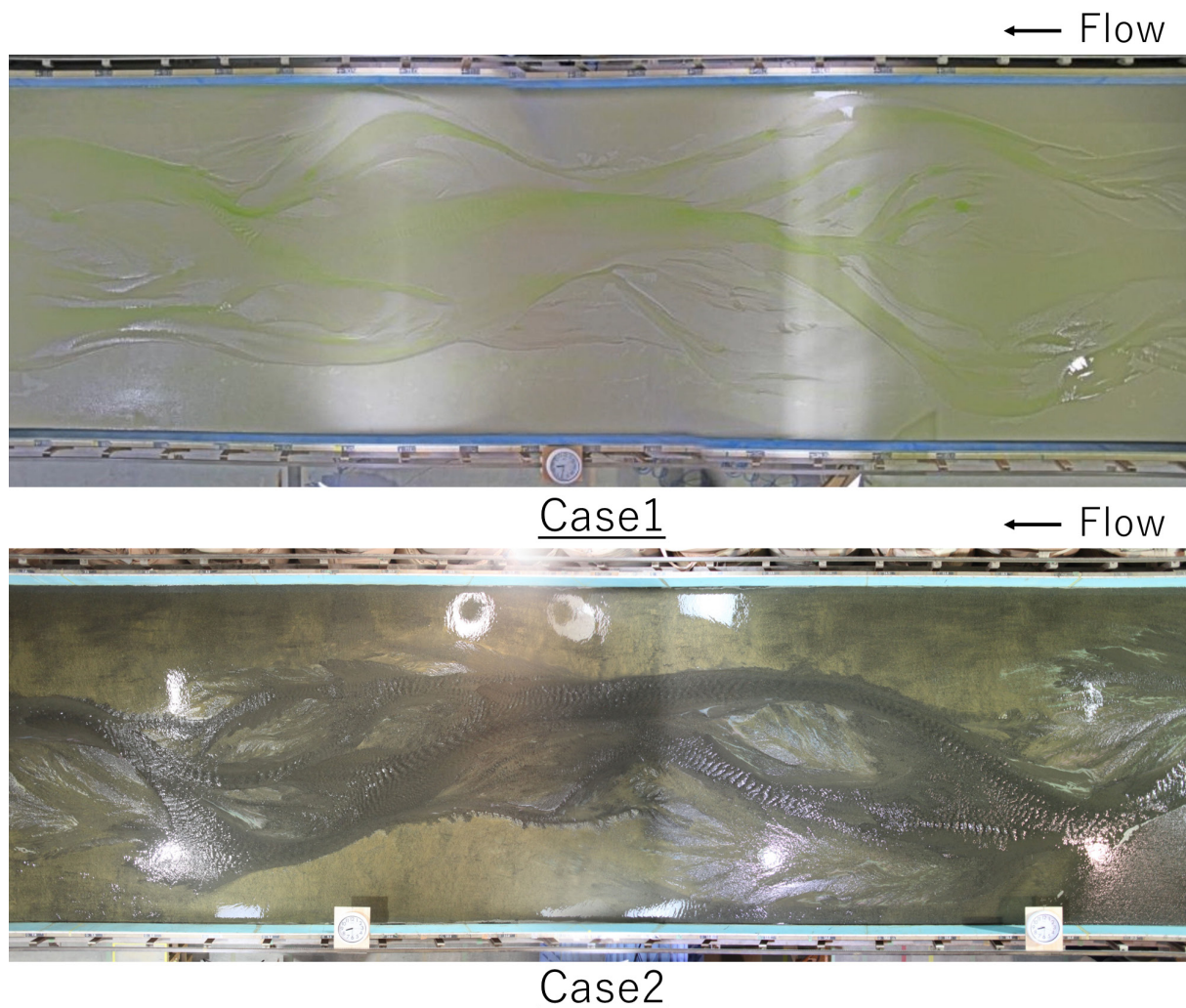


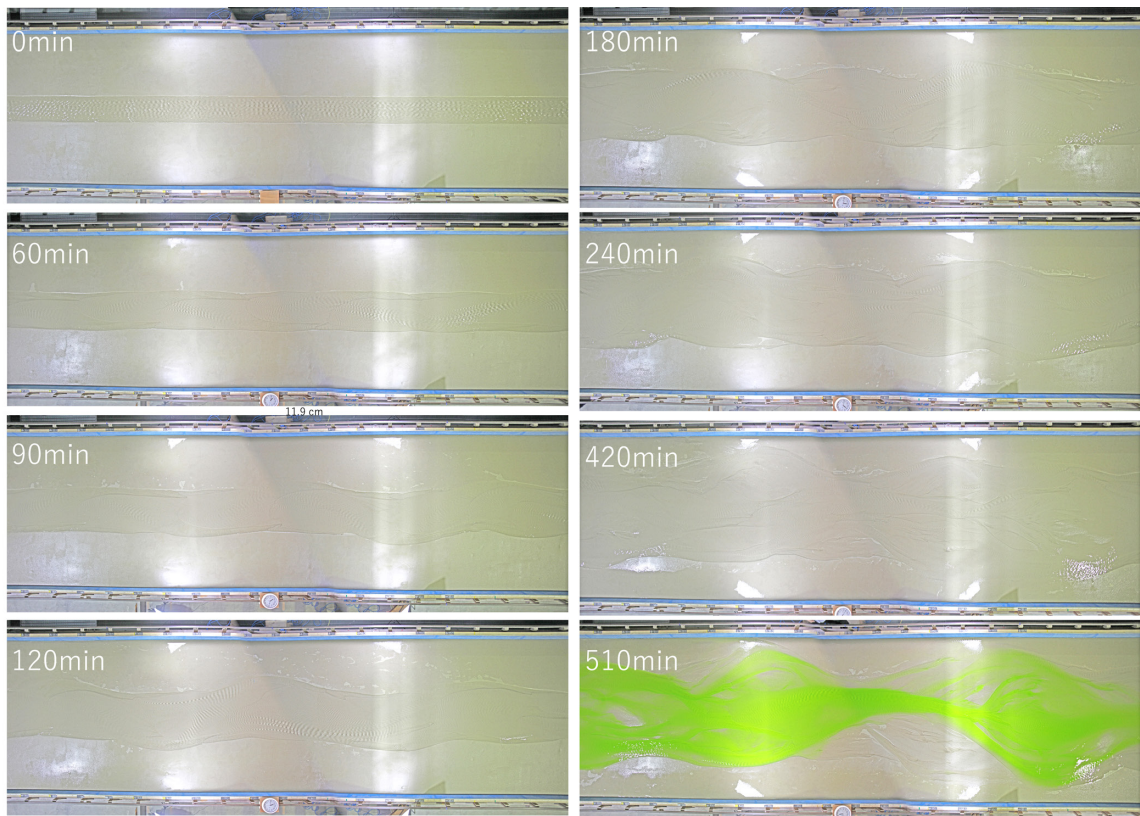
図-3 実験終了時の様子，上) Case1（一様粒径），下) Case2（混合粒径）

図-4にCase1とCase2の実験中の流路変動速度の違いの様子を示す。図より，Case1に比べてCase2の方が初期の河床変動量が大きく，短時間で交互砂州から多列流路へと遷移した。しかしながら，180分経過後あたりからCase2では流路の拡幅が止まり，流路の平面的な位置の変化も小規模となる。一方，Case1はCase2に比べて初期段階での側方移動量は少ないものの，時間経過と流路の側方移動あるいは新たな流路が形成され，Case2よりも広い低水路幅を形成することとなる。

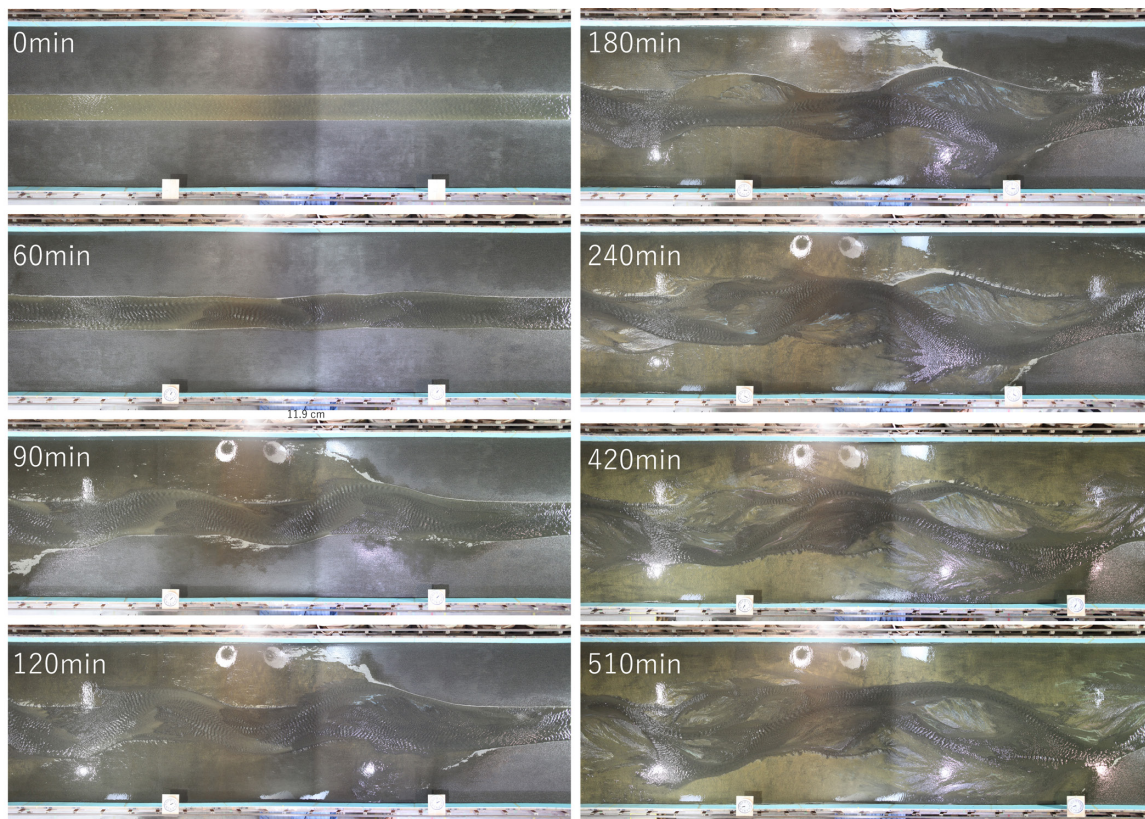
本年度は水路実験を実施し，簡単な整理のみを実施した。R7年度，R5年度とR6年度の実験結果を整理し，一様砂と混合砂における河床・流路変動特性の違いを詳細に比較する予定である。

4. 結論

混合粒径を用いた検討として2年目となる本研究では，2016年度に実施した一様粒径での網状流路を対象とした水路実験を比較対象とし，混合粒径場における河床・流路変動特性の違いを把握するための水路実験を実施した。結果，混合粒径では一様粒径に比べて実験開始直後の河床・流路変動量が大きく，90分程度の短時間で交互砂州から流路蛇行化へと移行し始めた。さらに，180分経過後あたりから低水路幅の拡幅が止まり，Case1よりも狭い低水路幅の中で流路移動が生じることとなった。



Case1



Case2

図-4 河床・流路変動の時間変化, 上) Case1 (一様粒径), 下) Case2 (混合粒径)

参考文献

- 1) M. G. Kleinhans, B. de Vries, L. Braat, M. van Oorschot: Living landscapes: Muddy and vegetated floodplain effects on fluvial pattern in an incised river, *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, pp. 2948–2963, 2018.
- 2) 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の検討と植生分布が河床変動の応答に与える影響，*土木学会論文集B1（水工学）*. 72（4），pp. 1087–1092, 2016.
- 3) 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*, 342, pp.87–96, 1984.

2.透明砂を用いた河岸侵食の進行過程の実験的研究

井上 卓也

Takuya INOUE

広島大学大学院 先進理工系科学研究科 准教授

要 旨

近年の気候変動に伴う豪雨の増加により、流路変動が橋梁被災を引き起こす事例が多発している。特に、洪水下降期における河川水位と地下水位の差が河岸侵食を促進する可能性が指摘されているが、その詳細なメカニズムの解明は進んでいない。本研究では、透明砂（トランスパレントソイル）を用いた光切断計測法（LIF法）による河岸侵食の進行過程の可視化と計測を試みた。本研究では、まず透明砂の基礎特性を整理し、LIF法と組み合わせた計測手法（LIFiTS法）を開発した。次に、水理模型実験を通じて、地下水位の変化が河岸侵食に与える影響を検討した。予備実験により適切な実験条件を設定し、本実験では地下水位の有無による河岸侵食の進行速度やパターンの違いを明らかにした。その結果、地下水位が高い場合、侵食速度が大きくなり、崩落が急激に進行する可能性が示唆された。本研究の成果は、河岸侵食メカニズムの理解を深めるとともに、河川管理や橋梁防災対策の基礎資料となる。今後は、取得したデータを基に光切断法による詳細な解析を行い、地下水位と水位の関係性についてさらに検討を進める予定である。

《キーワード：透明砂；河岸侵食；水理実験；地下水位》

1. はじめに

洪水時における橋梁被災による交通ネットワークの寸断は、避難行動を阻害するだけでなく、その後の経済活動にも大きな影響を及ぼす。近年、気候変動に伴う豪雨の増加により、河川の流路がダイナミックに変動し、橋台が被災するケースが増えている（図-1）。例えば、2016年の北海道豪雨では、中小河川を中心に100を超える橋梁が流路変動によって被災した。また、2019年の東日本台風では、長野県の千曲川に架かる鉄橋が崩落したことも記憶に新しい。



図-1 流路変動による橋台被災の例

流路変動は、洪水下降期に進行しやすい。その要因として、①流量の低下に伴い砂州が発達し、偏倚流速が増加すること、②河川水位と河岸内部の地下水位の差が拡大し、間隙水圧が上昇することが挙げられる。これまで①の影響に着目し、実験的・数値解析的な研究を行ってきた^{1),2)}。しかし、2021年7月の広島県三津大川における洪水では、砂州の発達が限定的であったにもかかわらず、河岸崩落が発生した。この洪水時、三津大川では流量の下降期と瀬戸内海の引潮のタイミングが重なっていた。その影響で河川水位が急激に低下し、地下水位との差が拡大した結果、河岸崩落が発生した可能性が高い。このような、地下水位と河川水位の差によって引き起こされる河岸崩落は、他の河川においても発生する可能性がある。

流路変動発生時の地下水面形の計測は、極めて困難である。山地斜面の崩落や破堤の場合、浸透流と斜面崩壊の方向が一致しているため、図-2aのように側面のガラス面から地下水面を視認できる。一方、流路変動時には、河川流の主流方向と河岸の崩落方向が異なるため、図-2bのように崩落方向の地下水面を直接観察することができない。さらに、河床や河岸では侵食と堆積に伴い土粒子間隙が変化する。この影響により、浸透流や地下水面形が空間的に変動し、河岸の不安定化を引き起こす。地下水面や間隙構造は時間とともに変化するため、3次元のリアルタイム計測が求められる。

そこで、本研究では、地下水位と河川水位の差が河岸侵食に与える影響を把握することを目的とし、従来の計測手法では困難であった動的環境における地下水の挙動や地形変化を、LIF法（光切断計測法の一つ）と透明砂（トランスパレントソイル）を併用してリアルタイムに可視化する計測手法の開発を試み、水理模型実験を実施した。

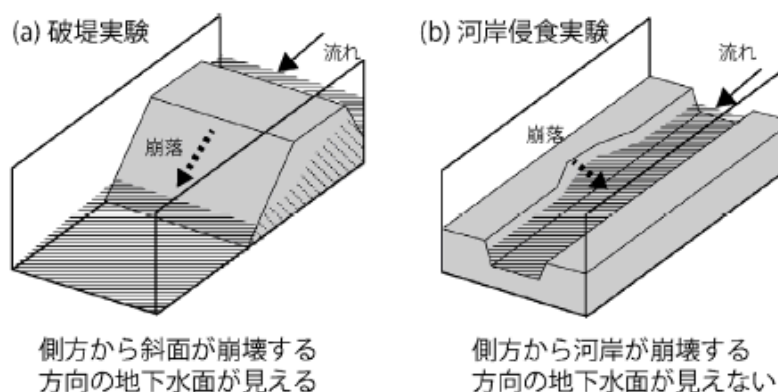


図-2 破堤実験と流路変動実験の違い

2. 透明砂実験の概要

(1) 計測手法

本研究では、光切断計測法的一种であるLIF法（Laser Induced Fluorescence法）と透明砂（トランスパレントソイル）を併用し、地下水面形と土粒子間隙の時空間変化を計測する手法を開発する（図-3a）。

透明砂と屈折率が等しいヨウ化ナトリウム水溶液を注水することで、砂内部を透過した可視化が可能となる^{3),4)}。次に、この水溶液にフルオレセインを少量添加し、暗室内で水路底面からレーザーシートを照射、さらに光学フィルタを装着したカメラを斜め下方から撮影する。すると、フルオレセインを含む水だけが蛍光し、透明砂や大気は蛍光しないため黒く映る（図-3a 右下）。この撮影を水路軸方向に移動させながら連続的に行うことで（図-3b）、時空間的に変化する地下水面・間隙構造・地形を同時計測するLIFiTS法（Laser Induced Fluorescence in Transparent Soil法）の開発を試みる。

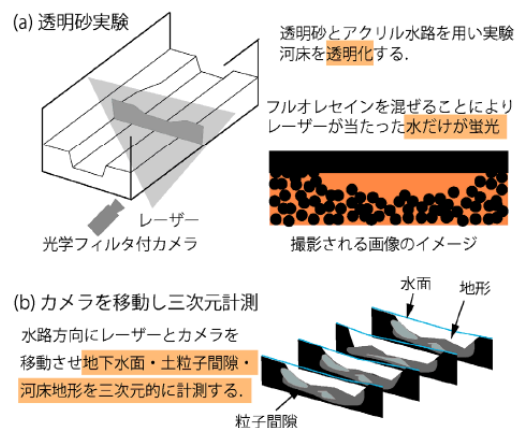


図-3 LIFiTSを用いた3次元計測の概念図

(2) 透明砂に関する基本事項

透明砂は、地盤工学の分野で利用されており、透水係数やせん断強度などの基本的特性を調べることで、天然砂の性質に近いことが確認されている⁴⁾。河床材料に使用する透明砂は、石英（ソリスSiO₂グレードS）の粒径0.4–1.0mmの針形状除去品を使用した（図-4）。石英の屈折率が1.458であり、屈折率が等しいヨウ化ナトリウム水溶液（23℃）を準備した。事前準備により、水1Lに対してヨウ化ナトリウム1.19kgの濃度に設定することで、石英が透過することを確認した（図-5）。また、濃度を調整したヨウ化ナトリウム水溶液にチオ硫酸ナトリウムを加え、チオ硫酸陰イオンが水溶液中のヨウ素と反応することにより変色を防ぐ処理を行った。

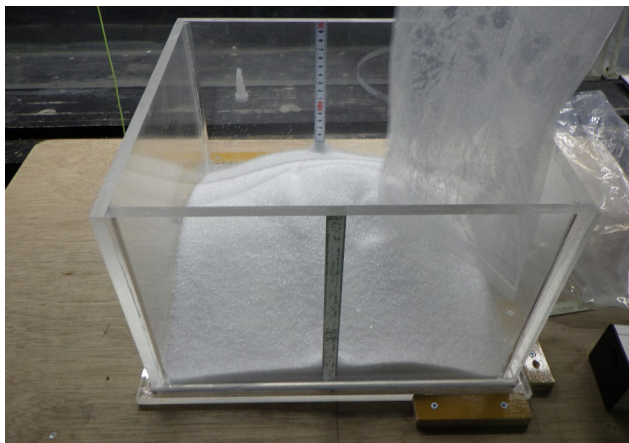


図-4 使用した石英

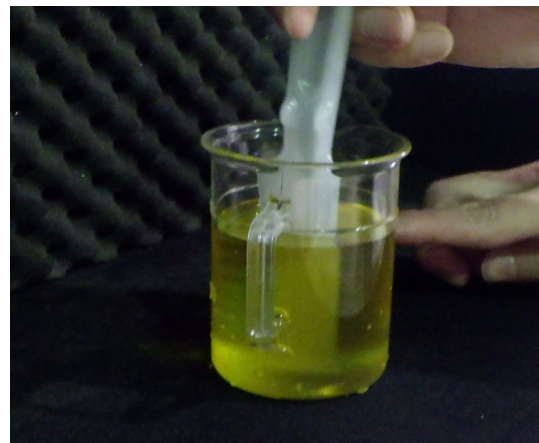


図-5 攪拌直後の石英とヨウ化ナトリウム水溶液

3. 水理模型実験

(1) 実験準備

実験水路は、上下流助走区間30cm、河道区間50cm、水路幅は上下流5cm、河道区間の水路幅は河岸侵食を把握するため30cmとした（図-6,7）。中央の河道区間は光切断計測を行うため、アクリル板を使用した。上流側に水槽を2段設け、下部の水槽には整流するためヘチマロンを敷設した。下流端には水受け用の水槽を設け、ポンプでくみ上げて上流に水を循環させる構造とした。河床勾配は適宜変更できるよう実験水路の下に板を敷いて可動式に設定した。地下水位は、下流から河道区間右岸際にコンバーター付きポンプで小流量をくみ上げアクリル板の側壁から水位を調節することとした。



図-6 実験水路

光切断法計測は、暗室内でアクリル水路底面からレーザーシートを照射し、さらに光学フィルタを装着したカメラを斜め下方から撮影する。そのため、水路下の下流側にカメラを設置し、横断方向にレーザーをシート状に照射した状態で写真撮影できるように設定した。また、レーザー照射による撮影の際、撮影の邪魔となる波長域をカットするためシャープカットフィルター（シグマ光機株式会社製：SCF-50S-580）を使用した。レーザー照射断面の撮影を行うにあたり、ヨウ化ナトリウム水溶液にフルオレセインナトリウムを加えた。フルオレセインの濃度は水溶液の1/30,000倍とし、レーザー装置の出力値は「30A」とした。河岸侵食状況を平面的に把握するため、水路上方にビデオカメラを設置した。

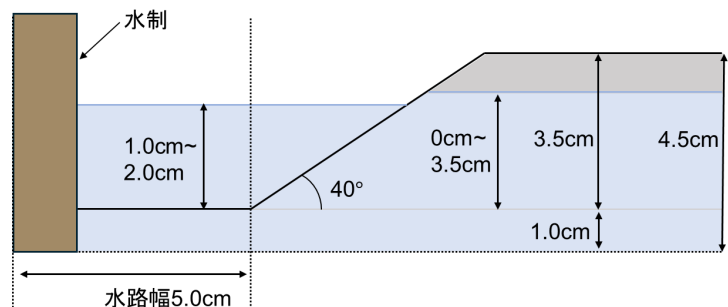


図-7 河床断面図

(2) 予備実験による実験条件の選定

ヨウ化ナトリウム水溶液を使用した本実験を行う前に、実験条件を選定するための予備実験を実施した（表-1）。アクリル板で製作した河道区間に、河床部は2cm、右岸の高水敷は4.5cm透明砂を敷設した。河岸の法面勾配は40°とした。選定する実験条件は、河床勾配、水深、地下水位である。河床勾配は、1/200及び1/400の2パターン、水深は1.0cm、2.0cmの3パターン、河岸侵食を促すための水制（縦断方向に

表-1 水理条件

S=1/200

川幅 (cm)	粒径 (cm)	流量 (L/s)	粗度係数	勾配	水深 (cm)	流速 (m/s)	u^* (cm/s)	u^*c (cm/s)	τ^*	Fr	給砂量 (L/min)
5	1	0.11	0.015	0.005	1	0.22	0.022	0.023	0.03	0.69	
5	1	0.21	0.015	0.005	1.5	0.28	0.027	0.023	0.045	0.74	0.012
5	1	0.34	0.015	0.005	2	0.34	0.031	0.023	0.06	0.78	0.044

S=1/400

川幅 (cm)	粒径 (cm)	流量 (L/s)	粗度係数	勾配	水深 (cm)	流速 (m/s)	u^* (cm/s)	u^*c (cm/s)	τ^*	Fr	給砂量 (L/min)
5	1	0.07	0.015	0.0025	1	0.15	0.015	0.023	0.015	0.49	
5	1	0.15	0.015	0.0025	1.5	0.20	0.019	0.023	0.022	0.52	
5	1	0.24	0.015	0.0025	2	0.24	0.022	0.023	0.03	0.55	

3cm, 横断方向に2.4cm) の設置位置は水路上方から10cm, 20cmの2パターンの条件から選定を行った。

予備実験の結果(図-8), 勾配が1/400の場合, 水制を設置したにも関わらず河岸の侵食は発生せず, 勾配1/200の場合は, 水制周辺の砂礫が掃流することによる河岸の崩落がみられた。水制位置は, 河道区間から10cm下流に設置した場合, 水制が上流端に近いと上流側の水位が上昇し堰上げが発生した。そのため, 流況の影響の妨げになりにくい20cm下流位置に水制を設置することとした。設定水深を2.0cmで通水を実施した場合, 河岸の侵食は横断方向ではなく下流側に進行し下流側壁に到達した。以上の予備実験から, 本実験では, 河床勾配1/200, 設定水深1.5cm, 水制位置上流端から20cmとし, 地下水位を変更させることで地下水位が河岸侵食に及ぼす影響を把握することとした。

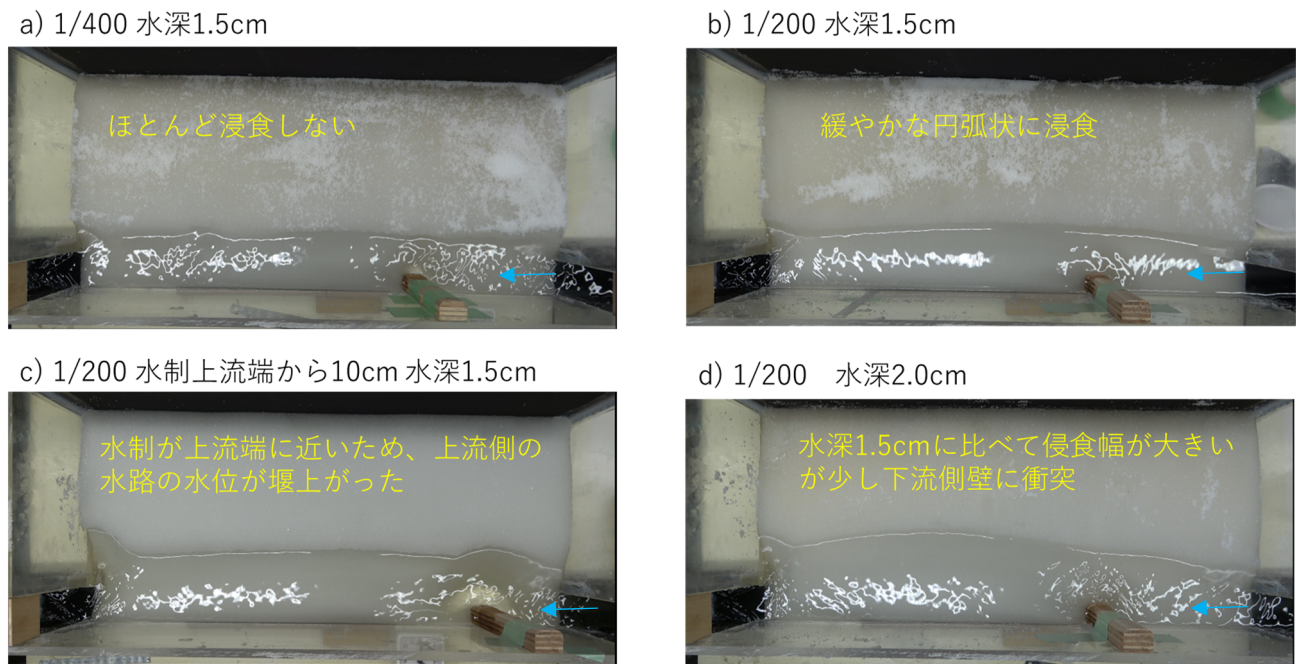


図-8 予備実験の実験結果

(3) 本実験

本実験にあたり, 地下水位を一定に管理するため, アクリル河道右側壁から5cm離れた位置にスリットを設けた。実験条件は, 予備実験で選定した条件の他に, 地下水位は0cm(地下水位なし)及び4.5cmの2ケースとした。通水時間は20分とした。実験中の計測は, 水路上方からシャープカットフィルター付きのビデオカメラで河岸侵食状況の撮影, 光切断法計測用の一眼レフカメラから5秒間隔からの撮影, 水路上方, 中流, 下流および地下水位用スリットの4箇所に設置した量水標による水位計測とした。また, 給砂量は予備実験から52ml/minとし, 上流側助走区間から連続して給砂を行った。実験終了後は, 流砂量の計測を実施した。地下水位が4.5cmのケースの場合, 河岸の透明砂にヨウ化ナトリウム水溶液を湿潤した状態を初期河床とした。通水前に水路と高水敷の間に仕切り板を設け, ポンプを起動し水路の水深が安定した状態で仕切り板を引き抜き, 通水開始とした。

地下水位0cm(ケース名case200_1.5_0)場合, 通水5分後までは一定の速度で河岸が崩落し12cmまで侵食が進行した。15分後で河岸の侵食は停止し, 最終的な河岸侵食幅は14cmであった。地下水位4.5cm(ケース名case200_1.5_4.5)場合, 通水10分後まで一気に侵食が進行し, 河岸の侵食は停止した。最終的な河岸侵食幅は, 地下水位がないケースと同じ14cmであった。地下水位によって河岸が湿潤状態にあるcase200_1.5_4.5は, 侵食開始から侵食停止まで一定の速度でかつ, 地下水位なしのcase200_1.5_0に比べて侵食速度が大きいことが確認された。

各ケースの水位の時間変化を図-9に示す。Case200_1.5_0は、水路から浸透した水溶液が地下水位のスリットに流れ込み5分後には水位が40mmを示しており、河岸は約40mm高で湿潤状態であったことがわかる。Case200_1.5_4.5の場合、地下水位45mmを維持するよう管理しており、水位は45mmで一定であった。

水路下方からアクリル水路に垂直にレーザーを当てたCase200_1.5_0の断面写真（図-10）をみると、通水直後（図-10a）では、水路と高水敷が仕切り版で仕切られており、水路には透明砂河床と水溶液の境界が確認された。通水25秒後では、水路幅が拡大しており、河岸侵食が進行していることがわかる。また、河床高が通水直後に比べて高くなっている。Case200_1.5_0の流砂量は給砂量とほぼ同量であったことを鑑みると、侵食した河岸の土砂は下流に掃流されずに水路に堆積した可能性が高い。今後は、この写真に屈折率を考慮した補正を行い、河床高や水位、水路幅変化について整理を行う予定である。

本研究の本実験の結果、地下水位の有無が河岸侵食の進行に影響を及ぼす可能性を示唆した。今後は光切断法計測によるデータ分析及び地下水位と水位の関係性について更なる検討を行っていく。

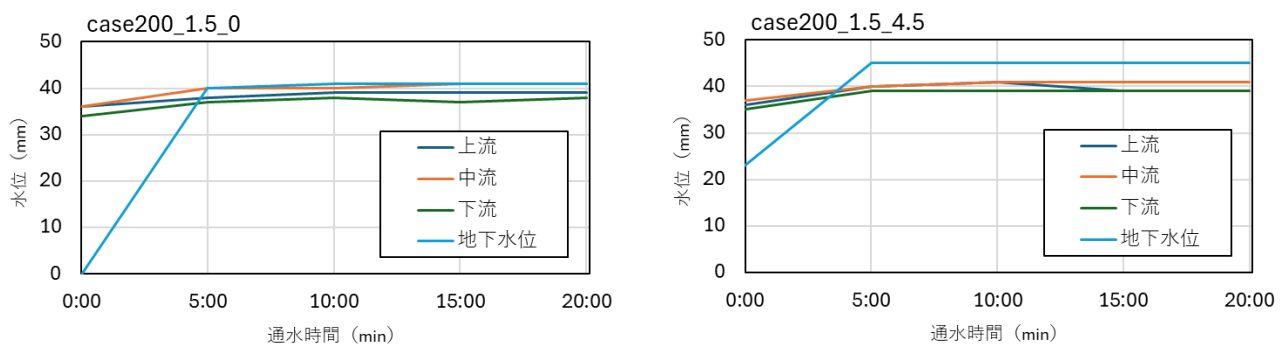


図-9 水位の時間変化

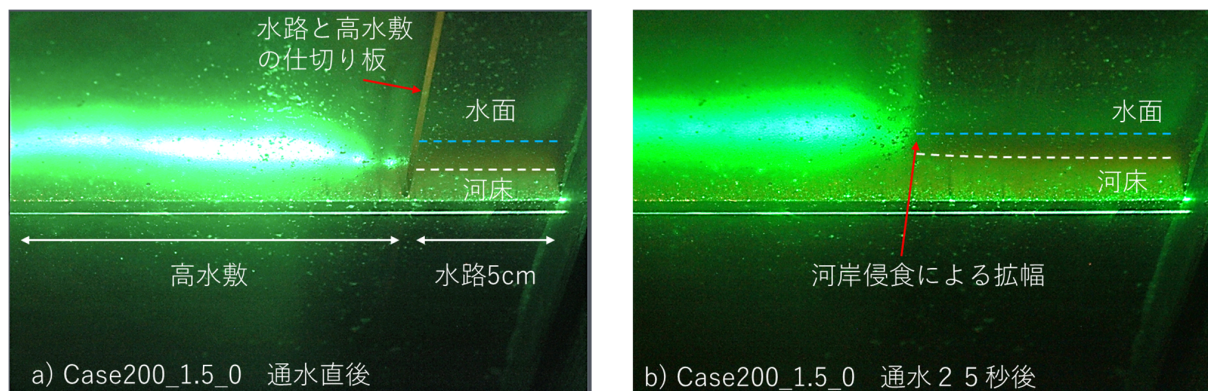


図-10 光切断法用の通水直前a)と通水25秒後b)の写真

参考文献

- 1) Inoue et al.: Supplied Sediment Tracking for Bridge Collapse with Large-Scale Channel Migration, *Water*, 2020.
- 2) Inoue et al.: Numerical Simulations of Meanders Migrating Laterally as They Incise Into Bedrock, *WRR*, 2021.
- 3) Carvalho, T., Suescun-Florez, E., Omidvar, M., and. Iskander, M.: A Nonviscous Water-Based Pore Fluid for Modeling With Transparent Soils, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.38, No.5, pp.1-7, 2015.
- 4) 音田慎一郎, 加納隆伸, 肥後陽介, 山口凌大, 高野大樹: トランスパレントソイルを用いた堤防決壊プロセスの可視化に関する試み: 土木学会論文集B1 (水工学), vol77, 第2号, pp.I_643-I_648, 2021.

3.美生川を対象とした植生を考慮した流路変動解析

久加 朋子¹・山野井 一輝²
Tomoko KYUKA, Kazuki YAMANOI

¹ 富山県立大学大学院 工学研究科 准教授

² 京都大学 防災研究所 准教授

要 旨

気候変動に伴う出水特性の変化は、流域スケールでの土砂動態に加え、河道内の植生分布や流路形態に中長期的な影響を及ぼす可能性がある。特に急流河川では、極端出水により生じる流砂過程と樹木動態との相互作用を通じて、河床・流路の変化が顕著となることが知られている。しかし、こうした現象を数値的にモデル化するためには、地形や地質特性に応じたパラメータの設定が求められる一方で、十分な観測データの整備が困難なケースも多い。そこで本研究では、北海道十勝川水系の美生川を対象に、観測が欠損している2017年以降の水と土砂の動態を再現するため、既存の流量・粒径分布データと地形情報を用いたパラメータ補完手法を適用し、流出パラメータ最適化および地形条件に基づく粒径分布推定を行った。さらに、iRIC Nays2DHへと動的樹木モデルを組み込み、一様粒径条件下での非定常2次元河床変動解析を実施した。その結果、砂州への樹木侵入と2016年豪雨災害での既往最大出水による流失過程を概ね再現できた。ただし、樹林化の進行速度や河床変動量に課題が残り、今後は樹木流失条件や河床材料構成の精査が必要であることが明らかとなった。

《キーワード：流域土砂動態；パラメータ最適化；河床・流路変動；樹木動態》

1. はじめに

気候変動下における出水特性の変化は、流域スケールでの土砂動態を変化させ、さらに河道内の樹木動態などを通じて流路変動特性に影響を与える可能性がある。現時点で、これら複雑な相互作用をシミュレーションにより定量的に把握することは容易ではなく、防災・減災の観点にとどまらず、治水計画や河道内環境の維持管理における重要な基礎課題となっている。

特に急流河川においては、極端降雨に伴う出水により、中長期的な流砂過程が樹木の動態と流路変動との相互作用を通じて、河床地形の変化を引き起こすと考えられる。しかし、こうした現象をモデル化するには、地質条件や土砂生産特性に応じた流出・流砂パラメータの空間分布、および樹木の動的特性などを適切に設定する必要がある。これに対し、詳細な流量・流砂データの整備には多大なコストと時間を要するため、限定的な観測データから現実的なパラメータを抽出・補完する手法の確立が求められている。

そこで昨年度は、十勝管内に位置し、現在も比較的網状流路を維持している美生川を対象に、過去に観測された流量データ（2014年まで）および地形・土地被覆データを用いて、流域全体の土砂動態の再現可能性について検討を行った。具体的には、流出モデル内の多数のパラメータをCMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) 法により最適化するとともに、地形勾配・集水面積・代表粒径の関係式と対数正規分布モデルを組み合わせ、下流部での限定的な観測データから流域全体の粒径分布を推定する手法を適用した。

これにより、中長期的な流量ハイドログラフや粒径別の流砂量が得られたが、これらを河川区間における非定常平面2次元河床変動解析へ応用するためには、混合粒径モデルに関する十分な検証が必要である。そこで、本研究ではその前段階として一様粒径条件に基づくモデリングを行うとともに、動的樹木モデルの構築と再現性の検討を行った。

2. 美生川緒元

美生川は、北海道河西郡芽室町南西部、日高山脈の芽室岳付近に源を発し、十勝川に合流する流路延長40.8 km、流域面積206.2 km²の河川である。2016年8月31日から9月1日にかけての北海道豪雨災害では、既往最大の出水を記録し、流域では溢水による浸水被害や複数個所での河岸侵食が生じた。この出水により、河道内では樹木の流失および流路の大規模な変動が確認されている（図-1）。本研究では、後述する数値解析モデルに樹木の侵入・流出プロセスを考慮する動的モデルを組み込むにあたり、まず美生川を対象とした再現計算を実施した。これにより、実河川における樹木動態と流路変動の連関に対して、提案モデルがどの程度再現可能であるかについての精度検証を行った。



図-1 美生川の位置と北海道豪雨災害後の航空写真（9月1日撮影、北海道提供）

3. 対象領域，シミュレーション概要，1時間流量の推定

3. 1. 対象領域，シミュレーション概要

対象領域は図-2に示す美生川流域とした．計算で用いる単位河道・単位斜面を抽出した結果を同図に併記している．流域面積（単位斜面の総面積）は182km²となった．同流域上流部は日高山脈内にあり，地質は斑レイ岩，花崗閃緑岩，片麻岩，片岩から成る¹⁾．最下流の単位河道の国道38号との交点には美生橋があり，この地点で水位・流量観測が実施されているが，2016年の災害以降，欠測となっている²⁾．本研究では，江頭・松木の土砂流出モデル³⁾を発展させた，SiMHIS⁴⁾による流出計算を行う．この計算モデルは，地形モデルに河道を合流点毎に分割して直線に近似した単位河道と，単位河道の両岸に接続する単位斜面から成る単位河道・単位斜面モデルを採用し，単位斜面における降雨流出と，単位河道における水と土砂の輸送を予測するものである．降雨流出モデルはいわゆる表面流・中間流統合型のKinematic Wave法に基づくモデルであり，斜面部の基礎式は，

$$\frac{\partial q_r}{\partial x} + \alpha \frac{\partial h_r}{\partial t} = r - f \quad (1)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (h_r > D_A + D_B) \\ \phi & (h_r \leq D_A + D_B) \end{cases} \quad (2)$$

$$q_r = \begin{cases} k_B h_r & (h_r \leq D_B) \\ k_B D_B + k_A (h_r - D_B) & (D_B < h_r \leq D_A + D_B) \\ k_B D_B + k_A D_A + \frac{1}{n_{ms}} (h_r - D_B - D_A)^{5/3} \sin^{1/2} \theta & (D_A + D_B < h_r) \end{cases} \quad (3)$$

のように表され， h_r は水深， q_r は単位幅流量， r は降雨量， f は単位時間当たりの損失水頭， ϕ は空隙率， D_A ， D_B はそれぞれA層，B層の層厚， k_A ， k_B はそれぞれA層，B層の透水係数， θ は斜面勾配， n_{ms} は斜面の粗度（等価粗度）である．

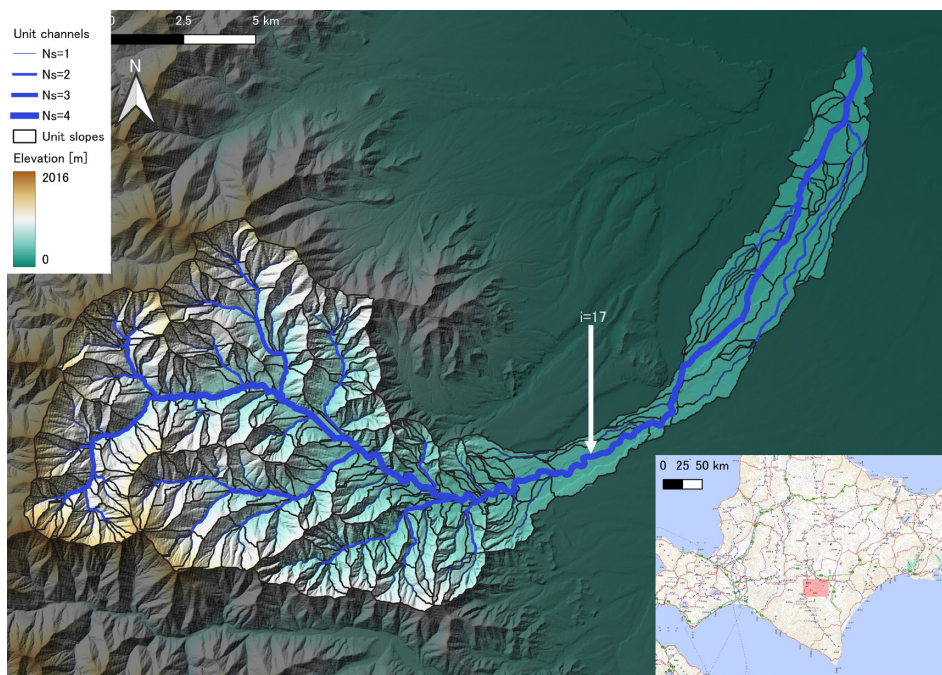


図-2 美生川を対象に抽出した単位河道・単位斜面の形状と標高分布の関係，単位河道は河川次数（Strahler number）毎に幅を変えて示している．

河道部の基礎式は、単位河道網の形式で差分化した状態で示すと、

$$\frac{\Delta h_i}{\Delta t} = \frac{1}{B_{ci}L_{ci}}(Q_{in1i} + Q_{in2i} - Q_i) + \frac{1}{B_{ci}}(q_{rd,j} + q_{rd,k})Q_i = B_{ci}\frac{1}{n_{mc}}h_i^{5/3}\sin^{1/2}c_i \quad (4)$$

となる．ここに、 h_i は単位河道*i*における水深、 B_{ci} は単位河道*i*における川幅、 L_{ci} は単位河道*i*における河道長さ、 $q_{rd,j}$ 、 $q_{rd,k}$ はそれぞれ単位斜面*j*、*k*の下流端における単位幅流量である． Q_i は単位河道*i*における流量であり、以下の Manning 式によって算出する．

$$Q_i = B_{ci}\frac{1}{n_{mc}}h_i^{5/3}\sin^{1/2}c_i \quad (5)$$

ここに、 n_{mc} は河道部における Manning の粗度係数、 c_i は単位河道*i*の河床勾配である．

以上より、流域内の空間分布を無視した場合の降雨流出パラメータは、表-1左列のように整理できる．また、後述の最適値探索範囲は、各値の物理的な意味を反映して同表中列のように設定した．

3. 2. 最適化手法を用いた降雨流出パラメータの推定

降雨流出モデルのパラメータの最適化手法については、多数の手法が既に提案されている．よく使用される方法として、例えばSCE-UA (Shuffled Complex Evolution algorithm developed in University of Arizona) 法⁵⁾や粒子群最適化⁶⁾などがあげられる．一方で、近年は、機械学習のハイパーパラメータの推定等、より一般的な問題で最適化計算が扱われるようになってきている．中でもCMA-ES⁷⁾は、進化戦略に基づくアルゴリズムで、汎用性が高いことから、多様な問題に利用されている．また既にオープンソースのPythonライブラリOptunaが整備されており、非常に小さいコーディングコストで利用できる．そこで本研究は、このライブラリを用いて、パラメータ最適化を実装した．最適化する関数は、美生橋地点における流量の Nash-Sutcliffe 係数 (NSE) とした．NSE の計算式を下記に示す．

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - Q_{calc}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (6)$$

ここに、 Q_{obs}^t と Q_{calc}^t はそれぞれタイムステップ*t*における流量の観測値と計算値である．計算期間は、2017年～2024年とし、欠損する流量データを補完することを目的とした．ただし、本モデル中に積雪・融雪過程が含まれていないため、NSEの算定期間は、積雪・融雪期を除外している．降雨条件には、気象庁の解析雨量を用いた．

10000回の繰り返し計算を並列実行し、その試行中で最大のNSEが得られたケースのパラメータ値を表-1の右列に示す．この条件を用いた場合の流量の計算結果を図-3に示す．この条件でのNSEの値は、0.740であり、完全一致ではないものの良好な予測結果といえる．

表-1 降雨流出モデル中のパラメータ

パラメータ	最適値探索範囲	最適化結果
損失水頭 <i>f</i>	0.001 - 0.02 [mm/h]	0.02000 [mm/h]
斜面の粗度係数 <i>n_{ms}</i>	0.1 - 1.0 [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$]	1.000 [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$]
河道の粗度係数 <i>n_{mc}</i>	0.02 - 0.05 [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$]	0.05000 [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$]
初期水深 <i>h_{ini}</i>	$0.5D_B$ - D_B	$1.000 \times D_B$
A層透水係数 <i>k_A</i>	1.0×10^{-4} - 1.0×10^{-2} [m/s]	1.379×10^{-3} [m/s]
B層透水係数 <i>k_B</i>	1.0×10^{-6} - 1.0×10^{-4} [m/s]	1.101×10^{-5} [m/s]
A層の厚さ <i>D_A</i>	0.01 - 0.5 [m]	0.1549 [m]
B層の厚さ <i>D_B</i>	0.1 - 5 [m]	3.006 [m]

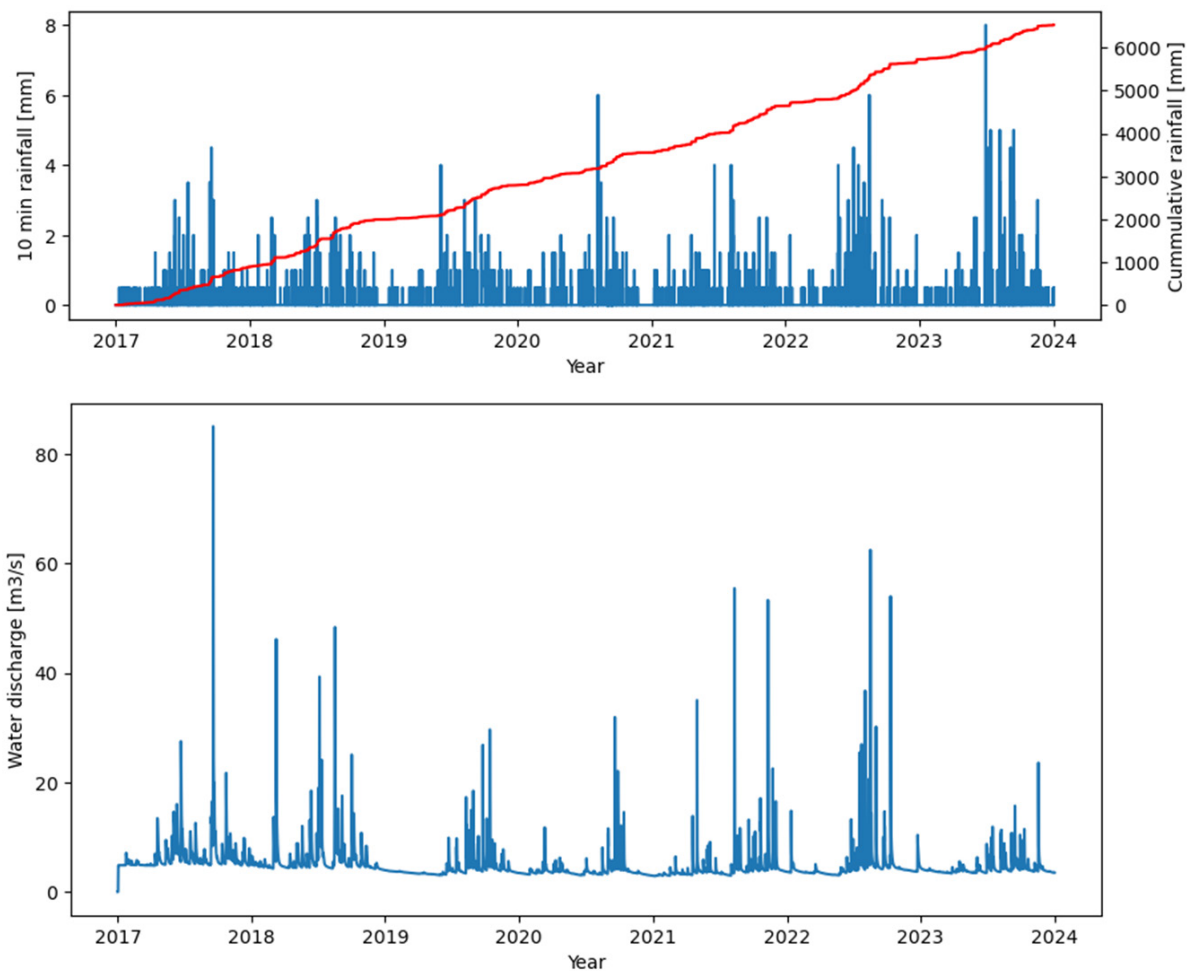


図-3 美生川の降雨と流量の計算結果

4. 美生川での衛星画像を用いた樹林化面積判定

4. 1. 方法

ここでは、美生川河川区間における河床変動計算へと中長期的な樹木分布を考慮する準備として、樹木面積の経年変化を把握した。方法は、航空写真、衛星画像、UAV撮影画像を目視で確認し、QGIS上で2006年～2023年までの環境類型区分をポリゴンとして整理した。対象範囲は中美生橋から美生大橋とした。本区間は他区間に比べ、河川改修工事が少ないことから河川本来の樹林化特性を把握するうえで最適だと判断した範囲となる。

4. 2. 樹木繁茂状況の経年変化と考察

図-4に、美生川における環境類型区分の経年変化を示す。環境類型区分は、高木、低木・草本、流路、裸地、まばらな植生の5つに分類した。このうち、まばらな植生とは航空写真（衛星画像）において樹木が密に繁茂しているとは判断しがたい場所になる。まず図-4より、2016年豪雨災害前について樹木繁茂と流路平面形状とを比較する。2006年時点では川幅が拡幅する区間で網状流路が形成されている。2011年も2006年と同様に裸地砂州が比較的広域に分布している。その後、2014年～2016年にかけては樹木域が次第に拡大し、その影響で裸地砂州の割合が減少すると共に、流路本数が減少する様子が見受けられる。

次いで、2016年豪雨災害後について樹木繁茂と流路平面形状とを比較する。図-4より、2016年北海道豪雨災害前後を比較すると、既往最大規模の洪水を受けて樹木の流失を伴う流路変動が生じ、裸地砂州

が広域に形成されたことが分かる。さらに2018年から2022年を確認すると、再樹林化が確認され、2016年災害直前と同程度の樹木繁茂へと短期間で戻っていることが分かる。この期間、流路は固定化傾向にあることが分かる。つまり、大出水後に形成された流路位置からほとんど動いておらず、樹木の流失量は少ない。これは、2016年豪雨災害は既往最大出水であったため、災害前よりも砂州比高が増大してお

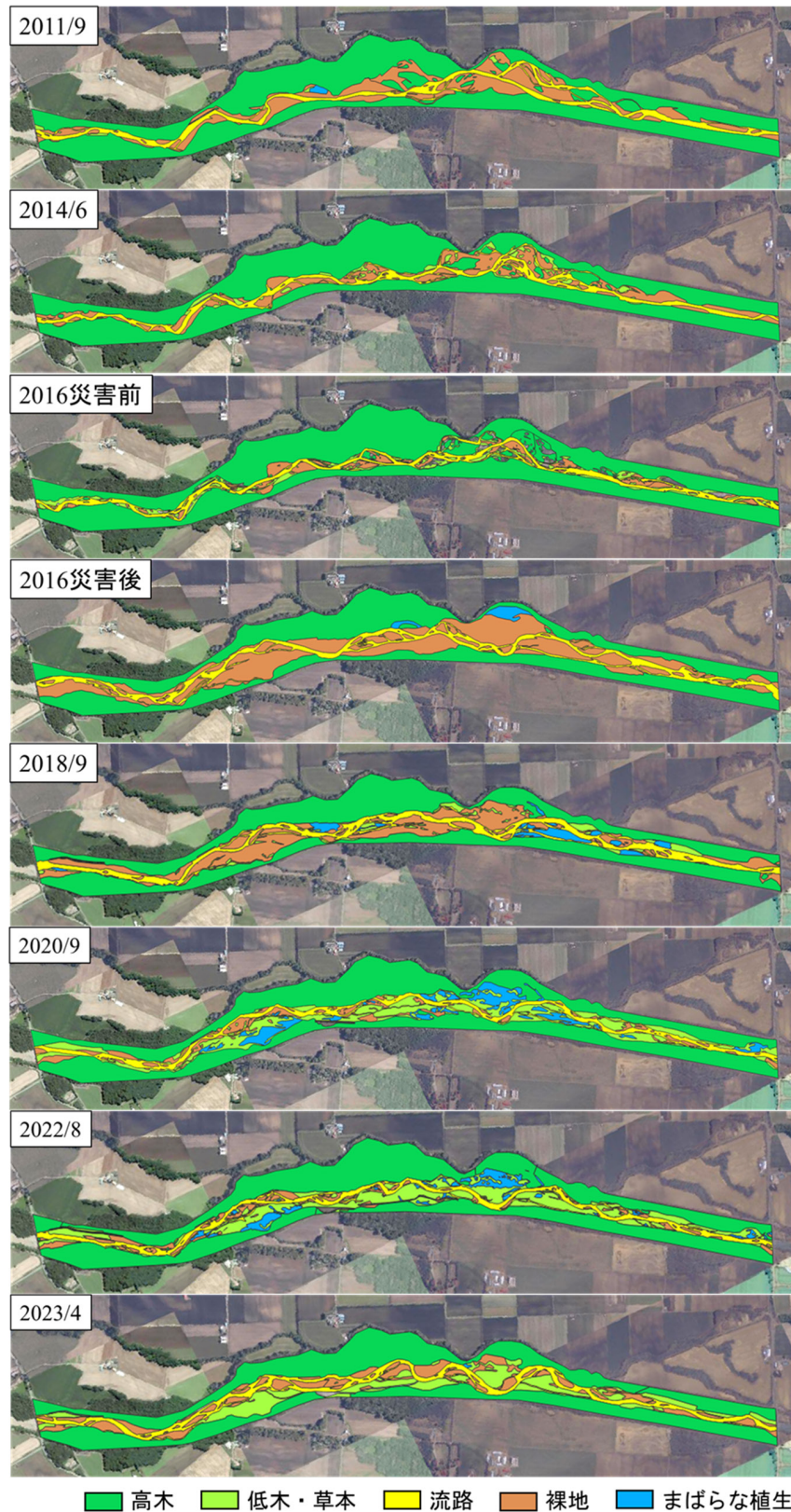


図-4 美生川における環境類型区分の経年変化（2016年災害後～2019年）

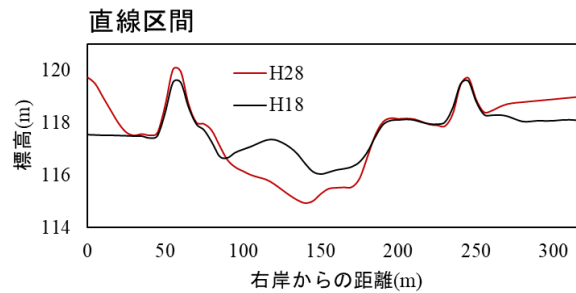


図-5 2016年豪雨災害前後の横断面図（直線区間）

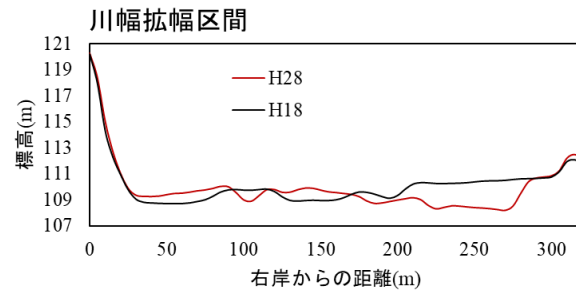


図-6 2016年豪雨災害前後の横断面図（川幅拡幅区間）

り、中小規模の出水では大幅に流路変動しなくなっているためではないか、と考えられる。そこで、図-5、図-6に、図-4（災害後）における直線区間と川幅拡幅区間における、時期の異なる横断面図を示す。図より横断面形状を比較すると、直線区間では2016年豪雨災害後に低水路全体が深堀れし、川幅拡幅区間では2016年豪雨災害後に河岸侵食により砂州比高が1mから2mに増大したことが分かる。

5. 数値解析

5. 1. 樹木繁茂状況の経年変化と考察

iRIC Nays2DHにおける樹木の扱いは、運動方程式の中で植生を流れの抵抗（抗力）として扱うものである。本検討では、この樹木を初期値として与えるのではなく、動的樹木動態（侵入・成長・流失）を考慮するためのモデル追加を行った。樹林化動態を考慮した平面2次元河床変動計算モデルは、いくつかの既往報告がある^{8) 9) 10)}。本検討ではそれらを参考とし、以下の通りのモデル修正を実施した。

（1）出水時の冠水セルへの樹木の侵入・成長

樹木の新規侵入には、流量ピーク時において冠水しており、かつ減水後に陸地化する（等流水深の1/10以下の水深）セルに対し、樹木が新規定着するモデルを追加した。

（2）時間経過による樹木の成長

侵入直後の樹木は樹高0mとし、樹木の成長速度は1年毎に1mとし、成長上限の樹高は任意で与えられるようにした。計算開始時点で既に河道内に繁茂する樹木については、初期条件として与える樹高最大値を与え、それ以上成長しない設定とした。根長は定着初期を0mとし、仮に一年毎に5cm成長し、最大根長を20cmとすることとした⁸⁾。

（3）河床低下に伴う樹木の流失

河床変動に伴う樹木の流失を考慮するため、植生定着時の河床高を基準とし、根長以深の河床低下が生じた場合には樹木が消失するモデルを追加した。ただし、発芽から1年未満の樹木については、モデル内での根長が0のため、閾値として無次元限界掃流力 $\tau_{*}=0.05$ を採用した。これは、本計算にて用いた

平均粒径程度の土砂が動き出す程度の値である。

5. 2. 計算ケース

計算範囲は中美生橋上流～美生大橋下流である。図-7に計算に用いた流量ハイドログラフを示す。これは2006年～2016年洪水を考慮し、各年の融雪出水と夏季出水の規模を組み合わせたものとして試行的に作成したものである。図に示す流量ハイドログラフのうち、四角形状のものが融雪出水、三角形形状のものが夏季出水である。融雪出水では定常で40時間ピーク流量を与え、夏季出水では10時間でピークに達し、20時間で減水するものとした。融雪出水終了後には新規樹木の定着判定を行い、夏季出水終了後には樹齢の加算に伴う樹高と根長を成長させた。

河床高データには、2006年のLPデータ（帯広開発建設部提供）を用いた。河床材料には55 mmを与えている。計算格子は、いずれのケースも約 $5 \times 5 \text{ m}$ とし、マニングの粗度係数は0.03とした。安息角には繰り返し計算を行い、 $\tan \theta = 0.6$ を採用した。その他、美生川の右岸側は自然崖である場所や、ブロックが投下されている場所などが多数あり、これらの場所においては固定床の設定を用いている。なお、安息角により河岸侵食が生じた場合に固定床から移動床へと変化するモデルを試行的に導入したが、流路変動が過度に生じる傾向が見られた。加えて、2016年の既往最大出水時においても本区間内の護岸被災は1か所のみであったことから、本検討においては、これらの箇所の固定床設定に対し、固定床の消失判定モデルは適用しないものとした。

5. 3. 計算結果

図-8に融雪出水ピーク時の水深コンター図を示す。図-8より、2006年地形を用いた計算では、美生川は網状流路形態を有しており、融雪出水規模で裸地の広範囲が冠水することが分かる。

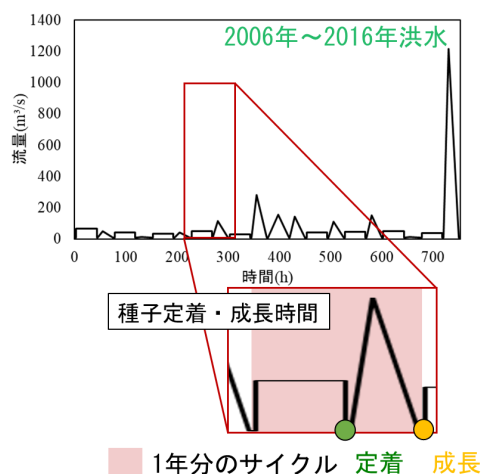


図-7 流量ハイドログラフ

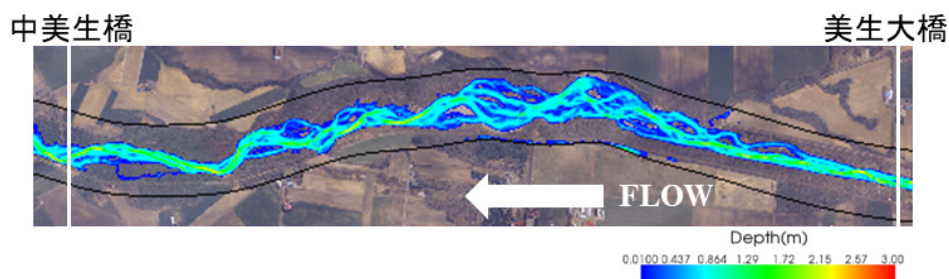


図-8 融雪出水ピーク時の水深コンター図

次いで、図-9に計算開始時と終了時における水深コンター図を示す。図より、2016年既往最大出水規模（1,200m³/s規模）を経験した後は、流路の蛇行波長が大きくなると共に、流路の側方移動が明瞭に生じる状況が確認された。流路本数が減少し、主流路が明瞭となる点については、図-4に示す環境類型区分と一致する結果である。

図-10に計算終了時に河床変動量コンター図を示す。図より、流路変動量について実測と計算結果とを比較すると、実測に比べて計算は低水路への堆積量が大きいこと、砂州上への堆積量が大きいことが分かる。とくに、黄枠で示した箇所は堆積傾向が強すぎる場所であり、ここでは詳細を報告しないが、2016年豪雨災害後の樹木侵入計算を行った際、樹木侵入面積を過小評価する領域となった。流路変動量が多すぎる要因の一つには、今回55mmの一様砂を用いたこと、あるいは樹木侵入モデルを用いていることなどが影響している可能性が考えられる。今後、各条件についての精査を行う。

図-11に計算終了時の水深コンター図と樹高コンター図を重ねたものを示す。また、図-12に2006年～2016年災害後までの樹木面積の実績（図-4から抜粋）と解析結果との比較を示す。図より、2011年時点

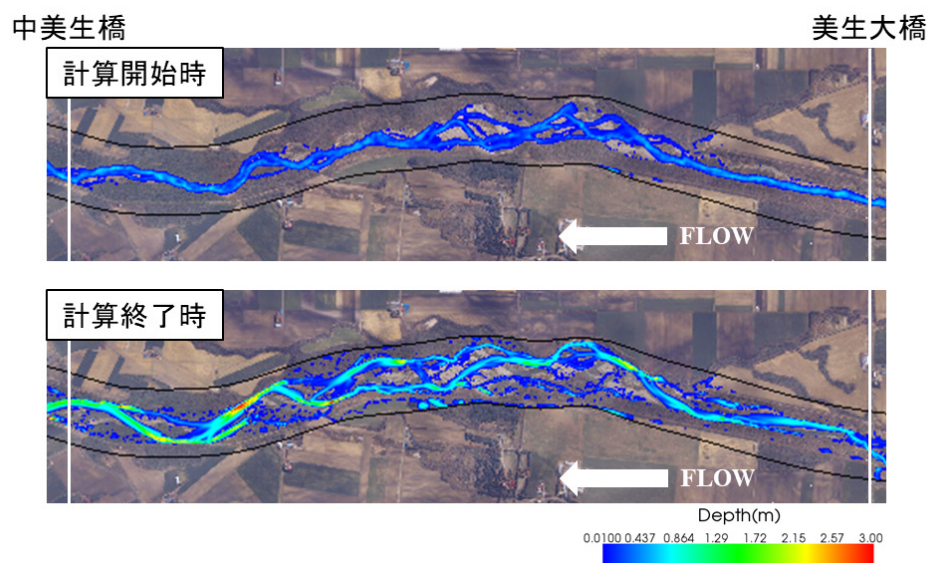


図-9 水深コンター図の時間変化，上）計算開始時，下）計算終了時（2016年規模出水経験後）

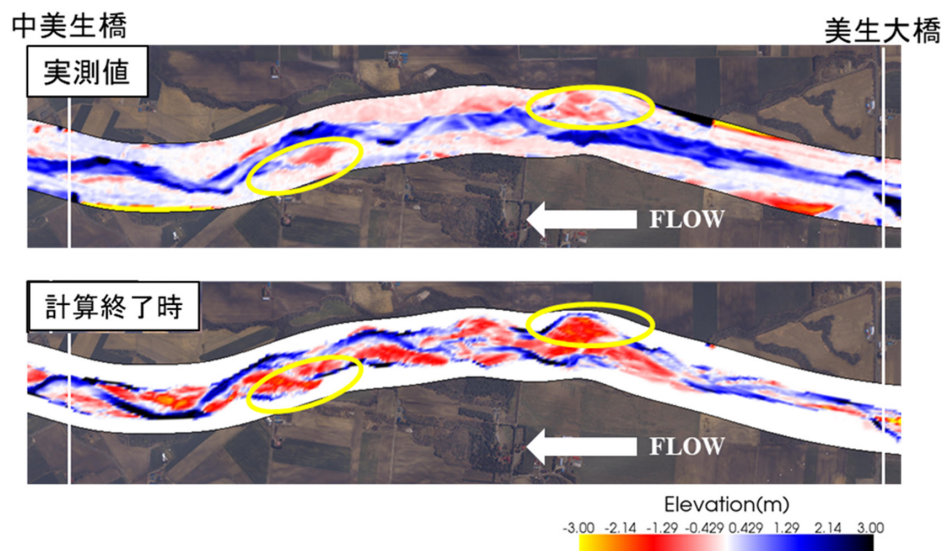


図-10 2006年～2016年災害後の河床変動量コンター図，上）実測値，下）計算結果

で樹木面積を過大評価傾向であるが、徐々に面積が増加することは再現できている。ならびに2016年災害後は樹木流失量が不足する場所と多すぎる場所があると分かる。後者については2006年の地形を用いているため、2016年豪雨災害直前の計算での流路位置が実績に比べて蛇行形状を有しているためと考えられる。本計算では、融雪出水によって新規侵入するヤナギを代表する樹木を考慮した結果、徐々に侵入域が拡大する様子を再現すると共に、出水途中に樹木が流失すると共に流路変動が進むことを計算することが出来た。今後、樹木の侵入および流失に関する条件の精査を行うと共に、計算で用いる河床材料の検討を行う。

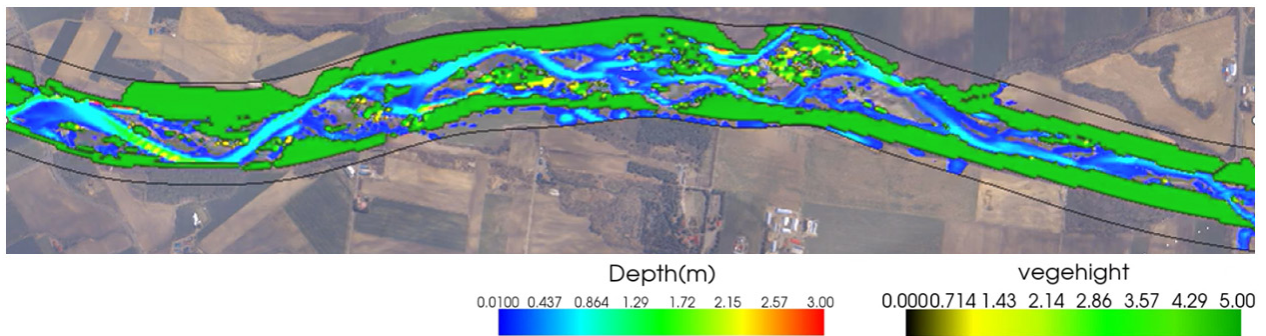


図-11 計算終了時の水深コンター図と樹高コンター図

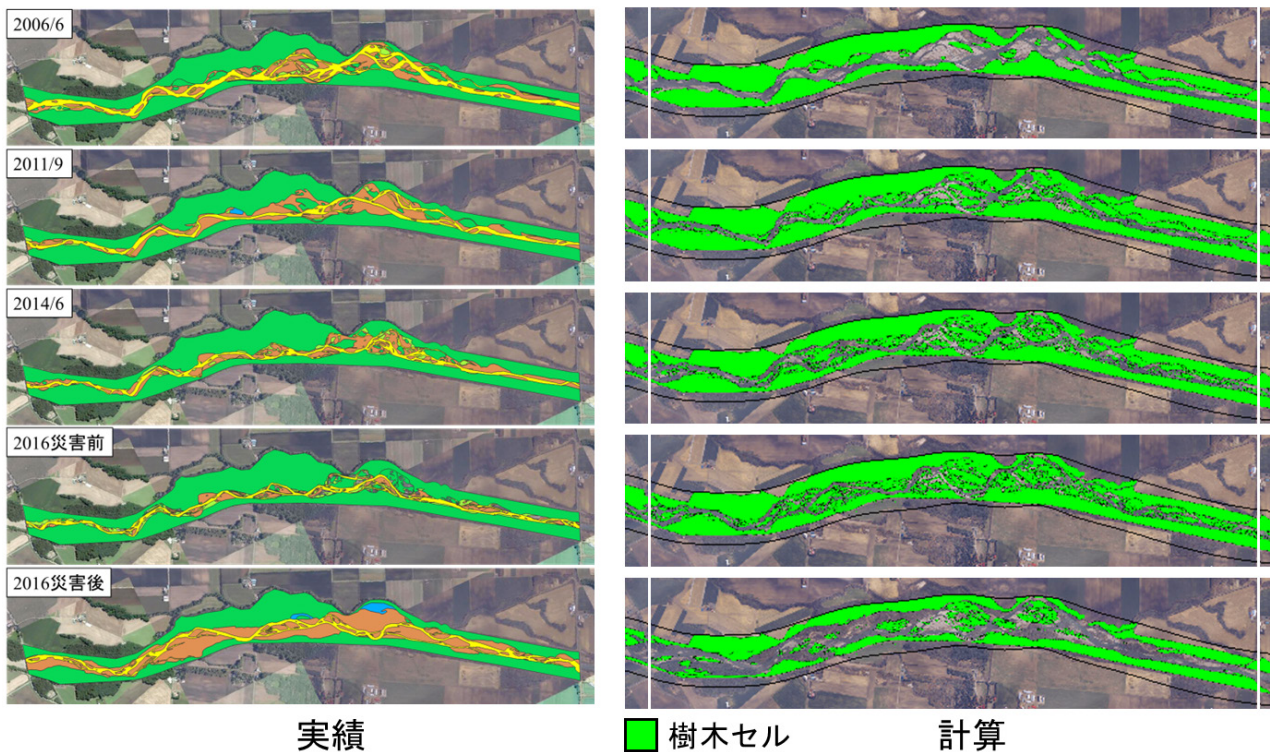


図-12 計算途中における樹木分布の変化（2006年～2016年）、左）実績、右）計算

6. 結論

本研究では、美生川流域を対象に、2014年、2015年の流量観測結果で同定した流出パラメータと、下流域の粒径分布調査結果と流域地形データから推定された流域全体の粒度分布データを用いて、2017年以降の水と土砂の動態の計算による復元計算を行うことで不足する流量データを作成した。ならびに、これらを用いた河川区間における河床変動を再現することを目的とし、まずは一様粒径にて、動的樹木モデルを追加したiRIC Nays2DHを用いて中長期の河床変動計算を実施した。結果、徐々に砂州上へと樹木が侵入し、2016年既往最大出水にて樹木が流失する状況を再現することができた。ただし、河床変動量が実績よりも大きいこと、樹林化速度が速いことなどの課題も見受けられ、今後の条件精査を行う。

参考文献

- 1) 小山内 信智, 笠井 美青, 林 真一郎, 桂 真也, 古市 剛久, 伊倉 万理, 高坂 宗昭, 藤浪 武史, 水垣 滋, 阿部 孝章, 布川 雅典, 吉井 厚志, 紅葉 克也, 渡邊 康玄, 塩野 康浩, 宮崎 知与, 澤田 雅代, 早川 智也, 松岡 暁, 佐伯 哲朗, 稲葉 千秋, 永田 直己, 松岡 直基, 井上 涼子, 平成28年台風10号豪雨により北海道十勝地方で発生した土砂流出, 砂防学会誌, 2016, 69 巻, 6 号, p. 80-91
- 2) 国土交通省 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/caution.html>, 2024/2/6閲覧
- 3) 江頭進治, 松木敬: 河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第44巻, pp.735-740, 2000.
- 4) 山野井一輝, 藤田正治: 土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合型モデルの開発と山地流域への適用, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol70, No4, pp.925-930, 2014.
- 5) Duan, Q. Sorooshian, S. and Gupta V.K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resources Letters, Vol.28, pp1015-1031, 1992.
- 6) 多田毅: PSOアルゴリズムによる流出モデルパラメータの最適化, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, No. 5, pp. 450-461, 2007
- 7) Hansen N., The CMA Evolution Strategy: A Tutorial. ArXiv e-prints, arXiv: 1604.00772, 2016.
- 8) 山野井 一輝, 藤田 正治, 大規模な土砂生産および洪水後の土砂管理に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2015, 71 巻, 4 号, p. I_961-I_966
- 9) 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), 72 (4), pp. I_1081-I_1086, 2016,
- 10) 渡邊健人, 久加朋子, 山口里実, 清水康行: 大規模出水時における河道内樹木と流路変動特性の関係: 札内川を事例として, 土木学会論文集B1 (水工学), 74 (5), pp. I_1015-I_1020, 2018.