

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。現時点では、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箇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、花崗閃綠岩、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。

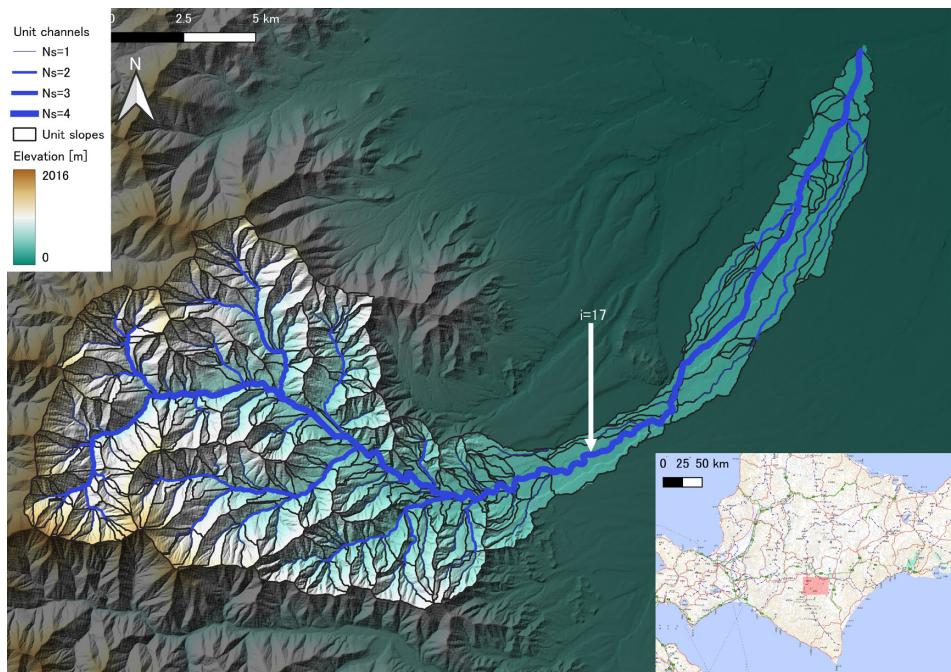


図-2 美生川を対象に抽出した単位河道・単位斜面の形状と標高分布の関係、単位河道は河川次数（Strahler number）毎に幅を変えて示している。

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、

$$\frac{\Delta h_i}{\Delta t} = \frac{1}{B_{ci} L_{ci}} (Q_{in1_i} + Q_{in2_i} - Q_i) + \frac{1}{B_{ci}} (q_{rd,j} + q_{rd,k}) Q_i = B_{ci} \frac{1}{n_{mc}} h_i^{5/3} \sin^{1/2} c_i \quad (4)$$

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、以下のマニング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} は河道部におけるマニングの粗度係数、 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ができる。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 f	0.001 - 0.02 [mm/h]	0.02000 [mm/h]
斜面の粗度係数 n_{ms}	0.1 - 1.0 [$m^{-1/3}s$]	1.000 [$m^{-1/3}s$]
河道の粗度係数 n_{mc}	0.02 - 0.05 [$m^{-1/3}s$]	0.05000 [$m^{-1/3}s$]
初期水深 h_{ini}	$0.5D_B$ - D_B	$1.000 \times D_B$
A層透水係数 k_A	1.0×10^{-4} - 1.0×10^{-2} [m/s]	1.379×10^{-3} [m/s]
B層透水係数 k_B	1.0×10^{-6} - 1.0×10^{-4} [m/s]	1.101×10^{-5} [m/s]
A層の厚さ D_A	0.01 - 0.5 [m]	0.1549 [m]
B層の厚さ D_B	0.1 - 5 [m]	3.006 [m]

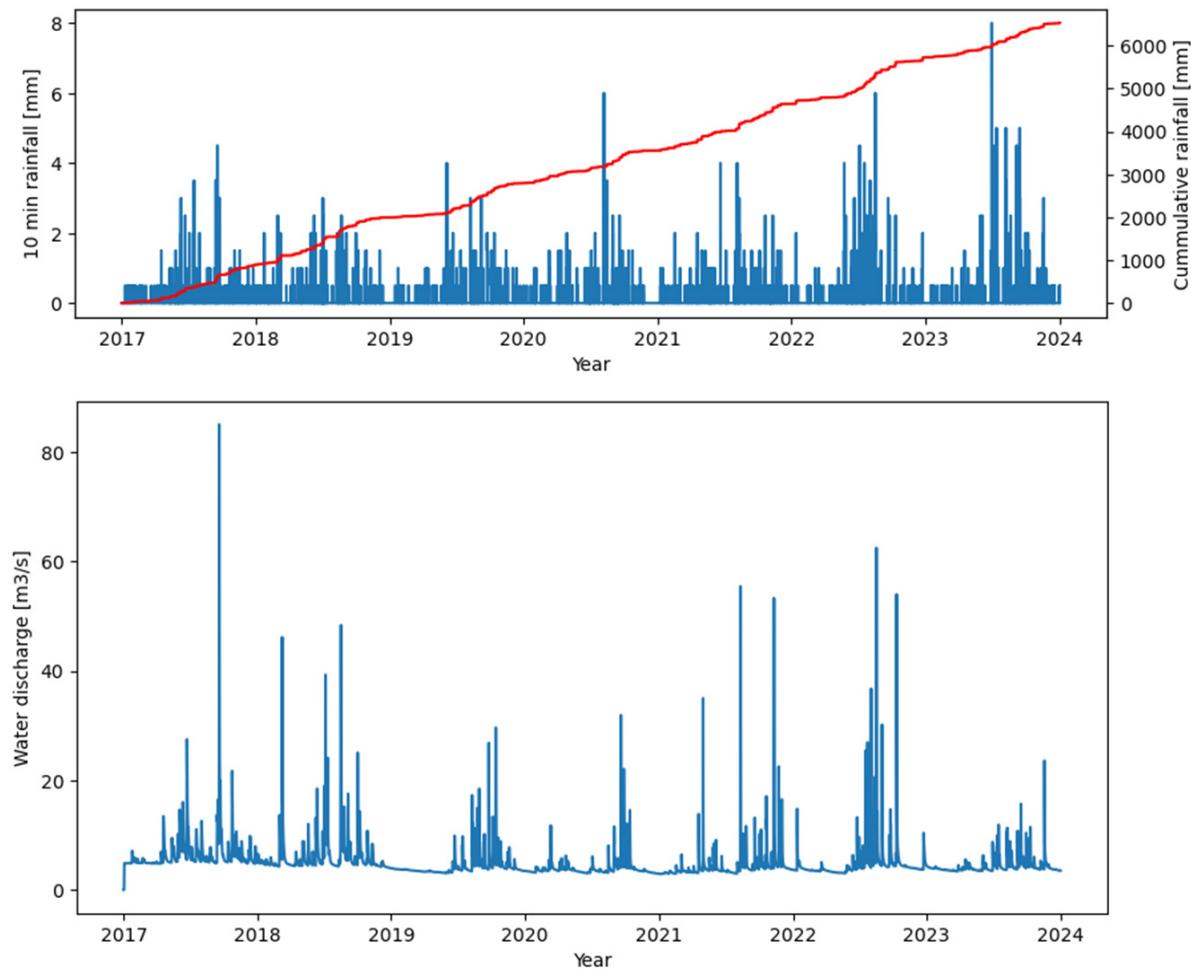


図-3 美生川の降雨と流量の計算結果

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

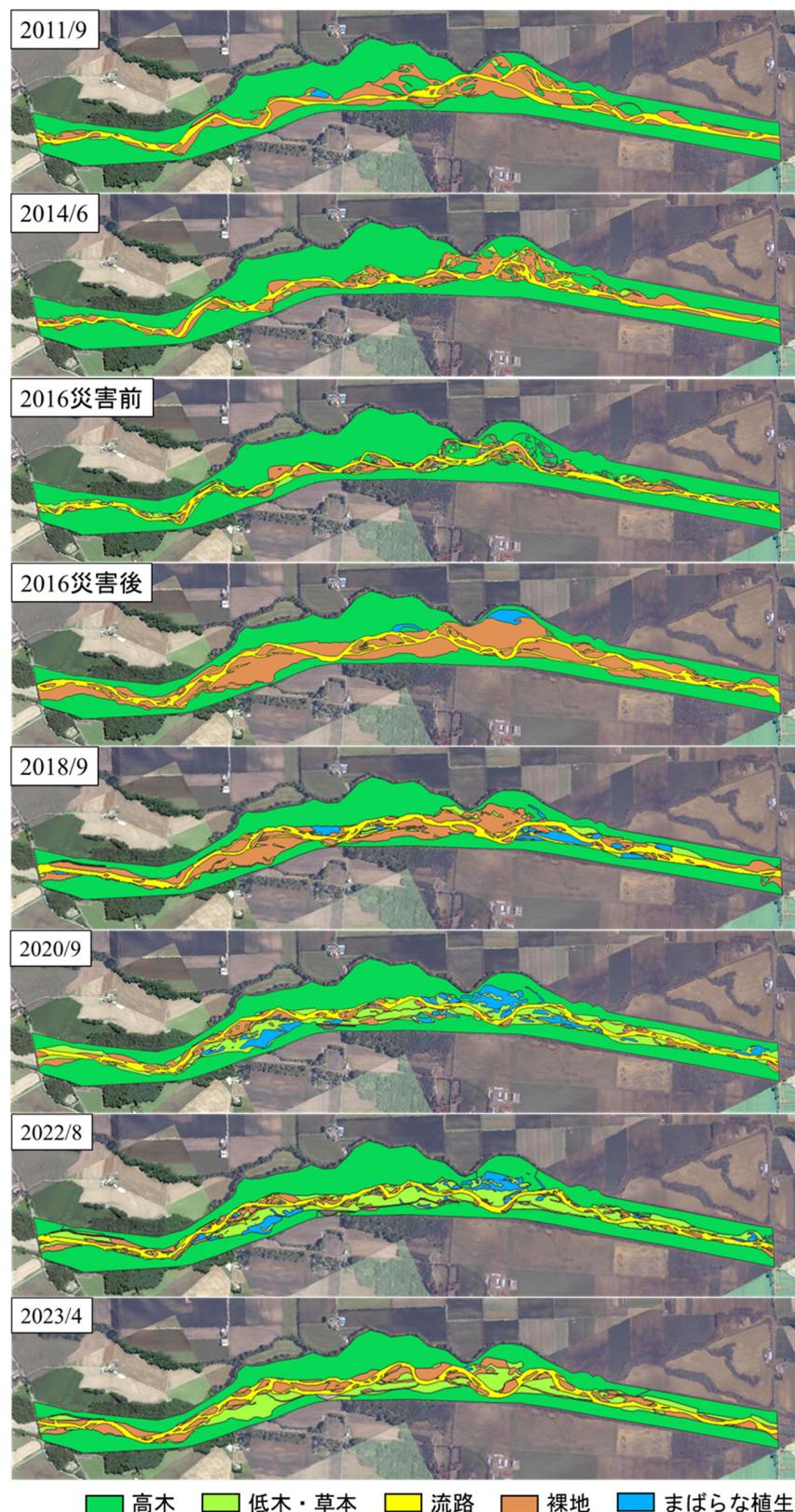


図-4 美生川における環境類型区分の経年変化（2016年災害後～2019年）

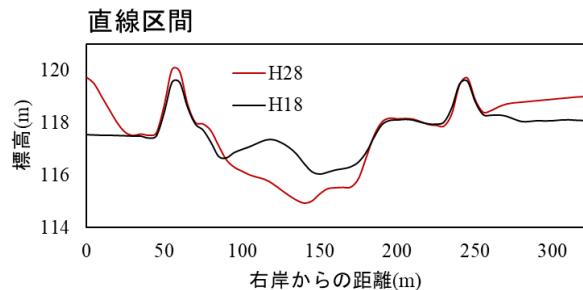


図-5 2016年豪雨災害前後の横断図（直線区間）

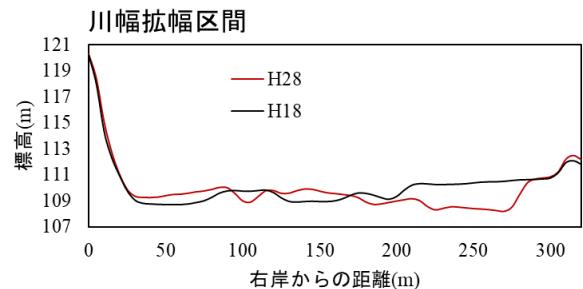


図-6 2016年豪雨災害前後の横断図（川幅拡幅区間）

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、時期の異なる横断図を示す。図より横断形状を比較すると、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る。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 5×5 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。この他、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。

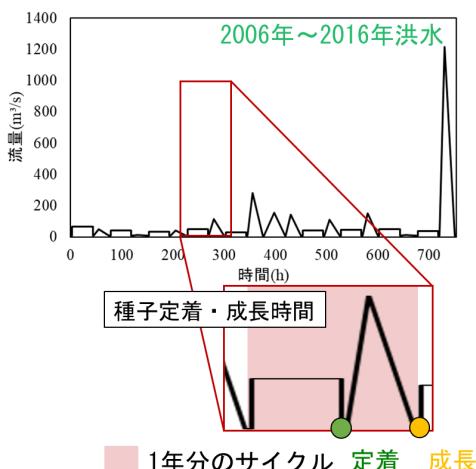


図-7 流量ハイドログラフ

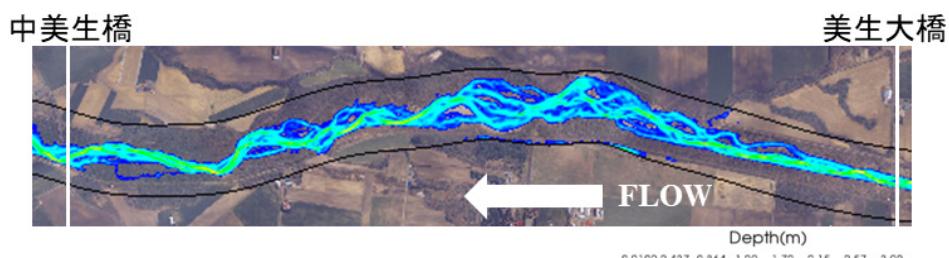


図-8 融雪出水ピーク時の水深コンター図

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（ $1,200\text{m}^3/\text{s}$ 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つた。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

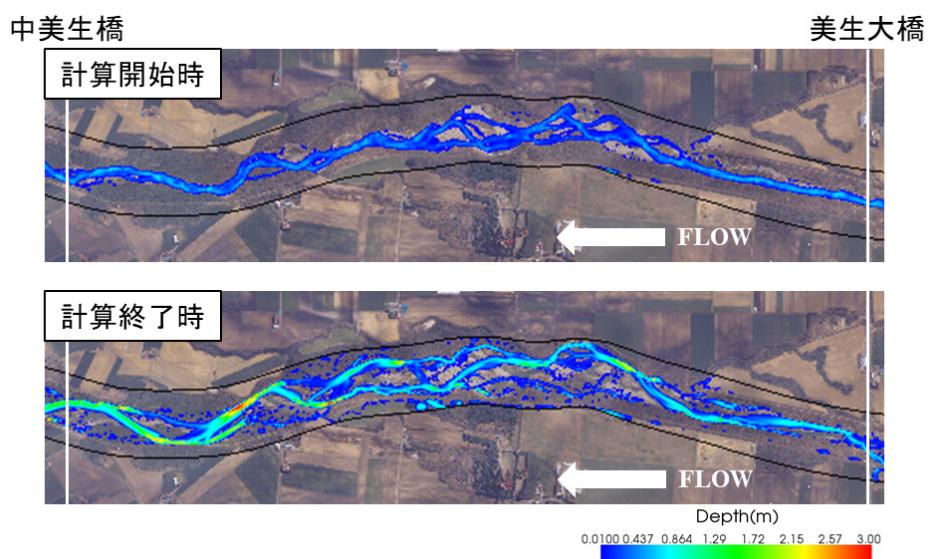


図-9 水深コンター図の時間変化、上) 計算開始時、下) 計算終了時（2016年規模出水経験後）

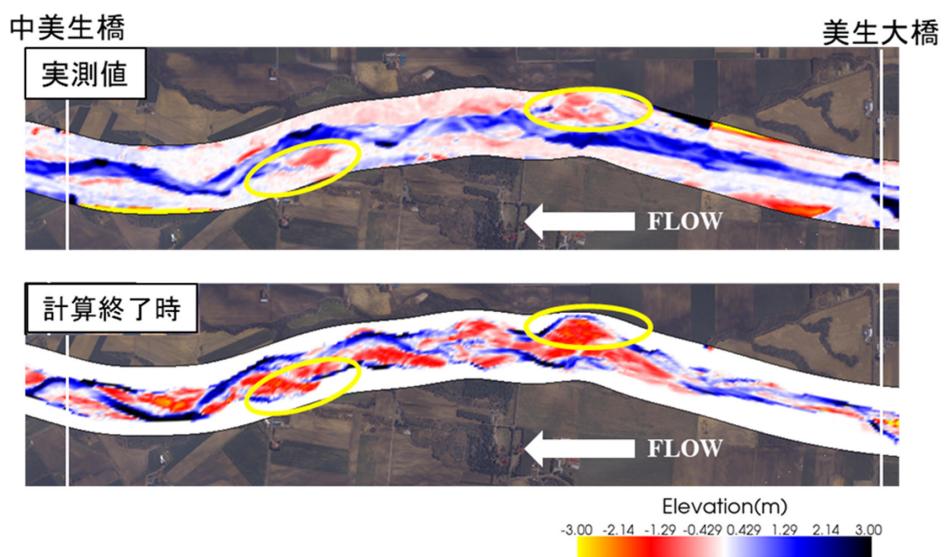


図-10 2006年～2016年災害後の河床変動量コンター図、上) 実測値、下) 計算結果

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。

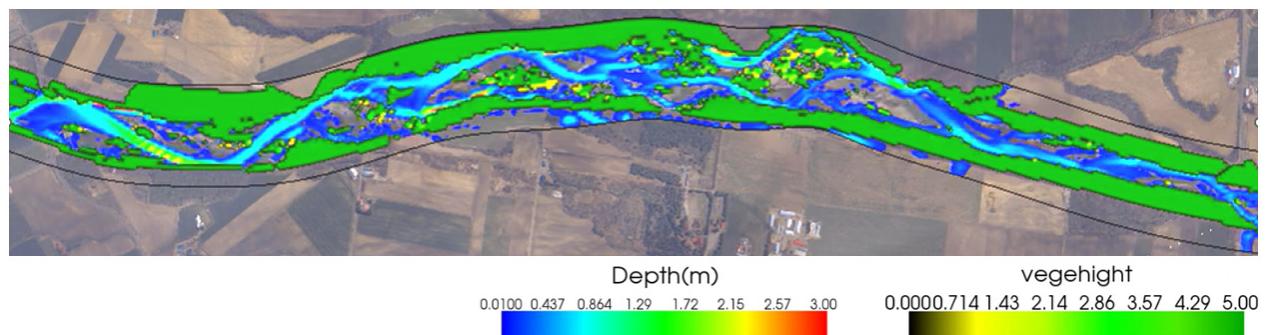


図-11 計算終了時の水深コンター図と樹高コンター図

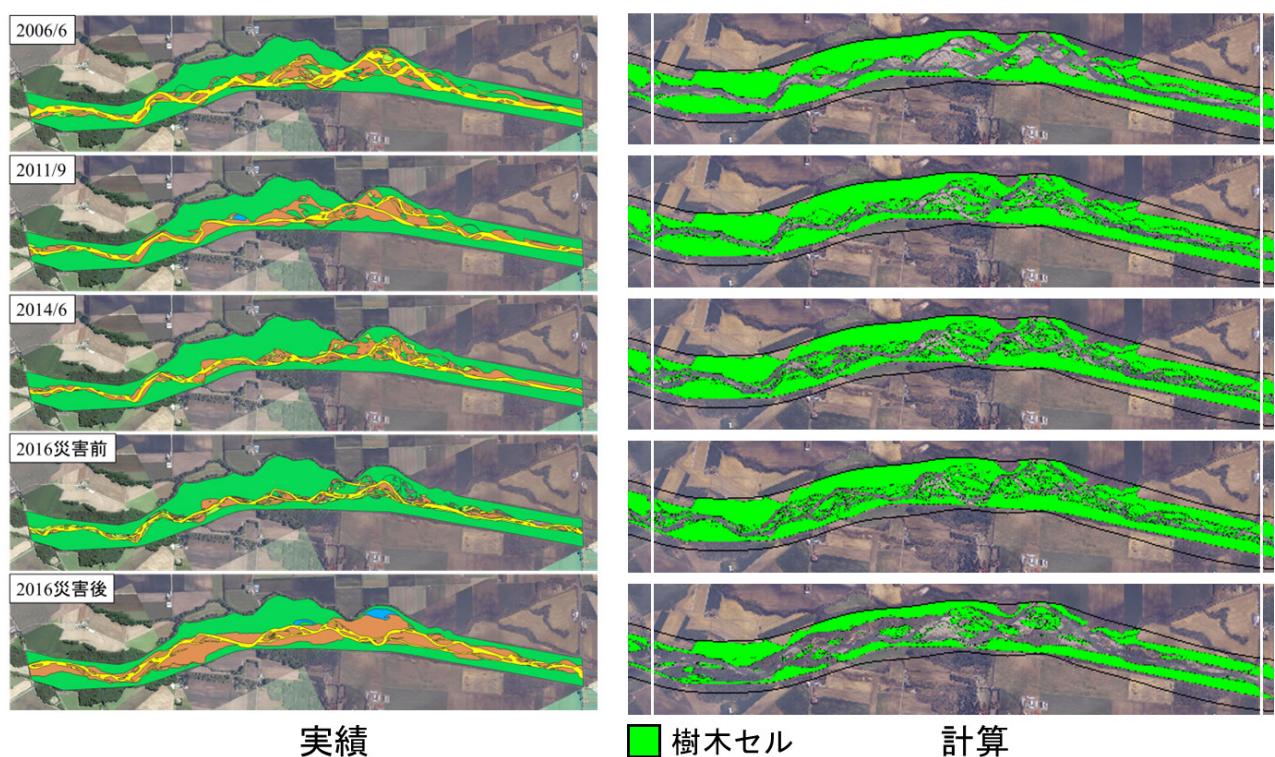


図-12 計算途中における樹木分布の変化（2006年～2016年）、左）実績、右）計算

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 曜, 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: 磯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.