

浮体混在型河川災害の予測・減災モデルの 構築とiRICへの実装

富山大学 学術研究部 (都市デザイン学系)
立命館大学 理工学部

木 村 一 郎
カ ン テウン

浮体混在型河川災害の予測・減災モデルの構築とiRICへの実装

Modeling of flows with floating bodies for mitigating disasters and its implementation in iRIC

木村 一郎¹・カン テウン²

Ichiro KIMURA and Taeun KANG

¹ 富山大学 学術研究部 (都市デザイン学系) 教授

² 立命館大学 理工学部 博士研究員

要 旨

近年の河川災害は、河川水・土砂二相流の枠組を超越し、流木、家屋、車両等の流出、および氾濫水への油混入等、浮体を含む事例が急激に増加し、河川災害の物理的メカニズムは複雑化しつつある。これをふまえ、本研究は災害予測・減災に資する浮体混在型河川流モデルを新たに構築し、さらにはこれをiRICに実装することで、河川災害減災に貢献することを目的とする。本年度は、三年計画の最終年度に当たり、これまでの二か年間の研究成果をベースとしつつ、より応用的、実務的な3つのテーマのもとで研究を遂行した。

まず、第1章(担当:木村)では、流木を河道から除去し、下流域への流木災害を減災する施設であるバイパス型流木捕捉工について、昨年度に引き続き検討を実施した。特に捕捉領域の形状や、流木密度が捕捉率に及ぼす影響を、流れ構造の特徴とともに考察し、より効率の高い捕捉工設計へ向けての検討を実施した。次に、第2章(担当:カン・テウン)では、2011年の東北地方大津波において、河岸林(松林)が根こそぎ破壊され、流木化した現象を対象に、シナリオを再現できる平面二次元型数値解析モデルの構築を行うとともに、既往の観測結果との比較からその精度を検証した。最後に第3章(担当:木村)では、ダム湖内に堆積する比重が1より大きい流木(沈木)を対象に、その出水時の動態や、ゲートへの到達・捕捉状況などを再現可能な三次元モデルの構築を実施した。さらに、構築したモデルは長野県裾花ダムに適用し、既往の観測結果との比較からその妥当性を論じた。

《キーワード: iRIC ; 流木 ; 流木捕捉工 ; 津波 ; 沈木 ; 貯水池》

1. バイパス型流木捕捉工の捕捉効率に及ぼす流木密度と捕捉地形状の影響（担当：木村一郎）

(1) 本章の目的と概要

バイパス型（ワンド型）流木捕捉工は、河道内の流木を除去する有効の施設として海外で提案されたものである¹⁾。我が国においてもいくつかの河川で試行的に建設が行われ、実用に供されている。このようなバイパス型捕捉工は、一般に河川の湾曲部外岸側に設置される。これは、慣性力を利用して河道中の流木を自然に捕捉域に誘導することが可能と考えられるためである。

一方、河道の直線部分に捕捉工を設ける場合には、流木移動の慣性力を利用できないと考えられるため、流木を捕捉域に誘導するには、何らかの別の工夫が必要である。これに対し、岡本ら²⁾は、捕捉域の対岸側に水制を設け、これに流木を衝突して方向を転換し、捕捉域に向かわせること方法が有効であることを実験により示した。さらに岡本らは、捕捉域に入口の形状を変化させることで、捕捉特性が変化し、入口に傾斜をつけて流れの剥離を抑えて構造とすることで、捕捉率が向上することも実験により示した。Kimura et al.³⁾はこれを数値シミュレーションにより再現し、同様な現象がシミュレートできることを示した。

一方、Kimura et al.⁴⁾は、湾曲部に設けられた捕捉工における流木捕捉効率は、流木密度によって大きく変化し、流木密度が1を超える場合は、外岸側に設置された捕捉工への流木の侵入割合が大幅に低下することを示した。これは、湾曲部に発生する第一種二次流の構造により、簡潔に説明づけられることも示している。

本研究では、これらの既往の研究をふまえ、直線部に設置されたバイパス型流木捕捉工における流木捕捉性能に及ぼす流木の密度の影響と、捕捉工の形状の影響を水理模型実験と数値シミュレーションにより検討するものである。まず、水理模型実験を実施し、流木挙動の特徴を把握するとともに、流木捕捉率を求める。次に、実験と同条件で数値シミュレーションを実施し、実験の再現性を検討するとともに、現象のメカニズムの解明を試みる。



図1 水理模型実験に用いた可変傾斜循環型開水路実験装置の全体像（富山大学水理実験室）

(2) 実験装置と実験の条件

・実験装置の概要

実験には富山大学水理実験室に設置された長さ4m、幅30cmの亚克力製可変傾斜循環型開水路実験装置を用いた。実験装置の全体の様子を図1に示す。

この実験装置の水路をスチレンボードにより仕切りを入れて、水路幅を20cmとし、右岸側に流木捕捉域を設けた。水路の平面図を図2に示す。流木捕捉域の幅は6cm、長さは90cmとし、捕捉域の対岸には岡本らによる実験と同様に水制を二本設置した。上流側の水制（第二水制）は下部を透過型とし、下流側の水制（第一水制とする）は、不透過型とした。これらの設定は、岡本らの既往の研究を参考に決定した。

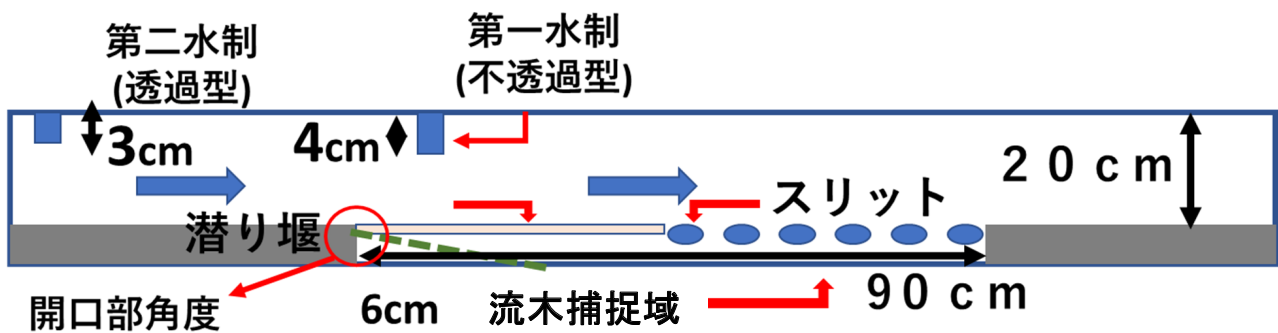


図2 水路の平面図

・実験の条件

流木のモデルとしては、すべての実験で円柱形状のものを用い、長さは6.0cm、直径は6.0mmとした。流木投入本数は、10本の流木を10回に分けて投入し、全部で100本の流木を投入することとした。なお、実験の再現性を考慮して、同一の条件の実験を3回繰り返し、捕捉率の平均値を求めることとした。

実験は流木比重と、流木開口部の形状の2つを変化させた条件で実施した。

流木比重を変化させた場合の実験では、流木モデルの材料として、木材（比重0.8）、塩化ビニル棒（比重1.3）、亚克力棒（比重1.5）の3通りのものを用いた。

一方、貯水域の形状としては、開口部の入口角度（図2参照）を、8°、15°、25°、90°の4通りに変化させて実験を実施した。

(3) 数値シミュレーションの概要

実験とほぼ同条件で数値シミュレーションを実施し、結果を比較することで、計算モデルの妥当性の評価と、流木捕捉メカニズムのより深い説明を試みた。用いた数値シミュレーションモデルは、iRICの三次元ソルバー、NaysCUBE^{5,6)}である。これは、流れを静水圧近似を用いずに動水圧を考慮して移動一般曲線座標系において三次元的に解くもので、乱流モデルとしてはRANS型（Reynolds Averaged Navier Stokes equation type）の二次の非線形k-εモデルを用いることで、二次流の再現性にも考慮している。流木のモデルとしては、球体要素を連結したものを用いており^{7,8)}、これらの球体要素を微小時間についてラグランジュ方程式により粒子間の拘束を無視して移流させた伸び、重心移動距離と平均的な回転角度から粒子を流木形状に並べ替える。これらの操作を時間ステップごとに繰り返すことで、連続的な流木移動を近似的に追跡することが可能となる。また、流木同士の衝突には個別要素法を用いて評価している^{9,10)}。

公開版にNaysCUBE⁵⁾では、流木捕捉フェンスの影響や、底面と流木の摩擦力を適切に評価できない

ため、これらの機能を追加した改良版のNaysCUBEを用いた。流木フェンスの評価には、流れには影響を及ぼさず、流木のみに対して抵抗となる「流木フェンスセル」の設定を可能とすることで計算に反映した。また、底面摩擦については、流木の転がりと滑動の双方を考慮した非等方摩擦係数を考慮してモデル化を行っている。

なお、この改良版のNaysCUBEは、iRIC ver.4に搭載されている。

計算格子は構造型格子とし、すべてのケースで主流方向は1cmの等間隔で分割した、一方、横断方向については、開口部角度90°の場合は全領域で1cmの等間隔格子とし、それ以外の角度のケースでは、捕捉域の入口から下流に向けて格子幅を線形に広げていく格子を用いた。鉛直方向の格子分割数は5とした。

数値シミュレーションにおける流木モデルのスケールは実験と同一とした。しかしながら、流木の比重については、実験と異なり0.6, 1.0 (中立), 1.1の3通りとした。これは、既往の研究²⁾との比較の容易さを考慮したためである。

(4) 結果と考察

・実験における流木の流送・捕捉過程

図3は、水理模型実験における流木の流送・捕捉状況のスナップショット（斜め写真）を示したものである。このケースでは開口部の角度は15°、流木の比重は0.8の場合を示している。なお、この図では流れの向きが右から左であることを注意を要する。赤色の棒が流木であり、水制ではねられた流木モデルが捕捉域側に沿って流送され、その意尾部が捕捉域に侵入し、フェンスにより再流出が抑制されていることがわかる。この過程は基本的に流木密度や開口部角度によらず、似通った結果となっている。

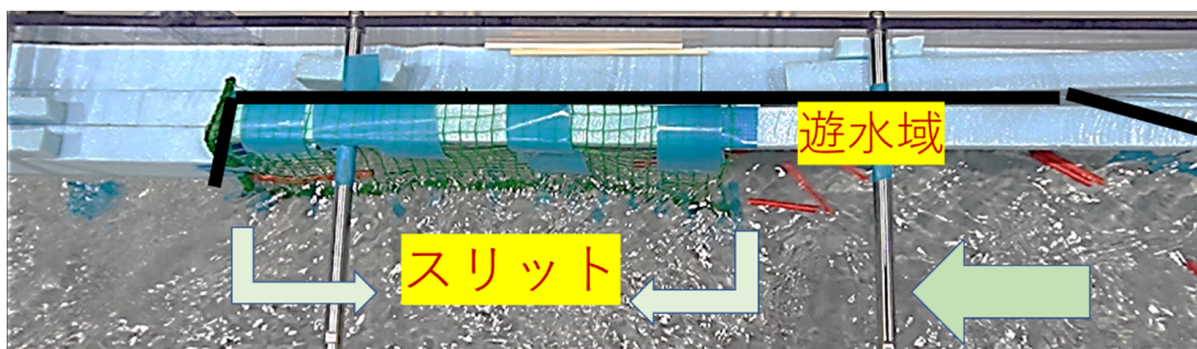


図3 水理模型実験における流木の流送・捕捉状況の一例（流木比重0.8，開口部角度15°の場合，流れの向きは右から左）

・実験における流木比重と捕捉率の関係

流木捕捉率を、投入された流木の全本数に対する捕捉された流木の本数の百分率で定義する。同一の条件で3回の実験を行い、それらから算出された捕捉率の平均で、各ケースの捕捉率を算出した。表1は、水理実験における流木捕捉率と流木比重の関係を示したものである。これより、流木比重が大きくなると流木捕捉率も大きくなることがわかる。この関係は、湾曲部の外岸側に設置された流木捕捉工の場合とは全く逆の結果となっていることに留意が必要である。湾曲部の場合には、第一種二次流の働きにより、底面付近の流れが内岸側を向くことから、比重が大きい流木が捕捉域に侵入しにくくなり、捕捉率が低下することが示されている⁴⁾。一方、直線水路の場合は、比重の大きい流木は底面の摩擦の影響を受けながら進行するため、比重が小さい流木よりも流送速度が小さくなるため、水制による水刃の影響を受けやすくなり、捕捉域への侵入割合が大きくなると考えられる。一方、比重が小さい流木では、流送速度が大きくなり、水制による水刃に対して主流方向を直進しようとする慣性力が勝るため、捕

捉域への侵入割合が低下すると考えられる。

ただし、これらのメカニズムについて解釈は限られた条件の実験により得られた仮説の段階であり、さらに多くの条件で検討を実施する必要がある。

表1 水理模型実験における流木比重と流木捕捉率（%）の関係

流木モデルの材質と比重	木材(0.8)	塩化ビニル(1.3)	アクリル(1.5)
捕捉率	36.7%	56.0%	62.7%

・ 開口部入口角度の影響

表2は、水理模型実験における開口部角度を8°、15°、25°、90°とした場合の流木捕捉率をまとめたものである。流木比重は0.8の場合について示している。これより、捕捉率が25°付近で極小となり、それより小さくとも大きくとも捕捉率が大きくなることがわかる。

表2 水理模型実験における開口部入口角度を変化させた場合の流木捕捉率の変化（流木比重0.8（木材）の場合）

開口部の角度	8°	15°	25°	90°
捕捉率	36.7%	34.7%	8.7%	20.0%

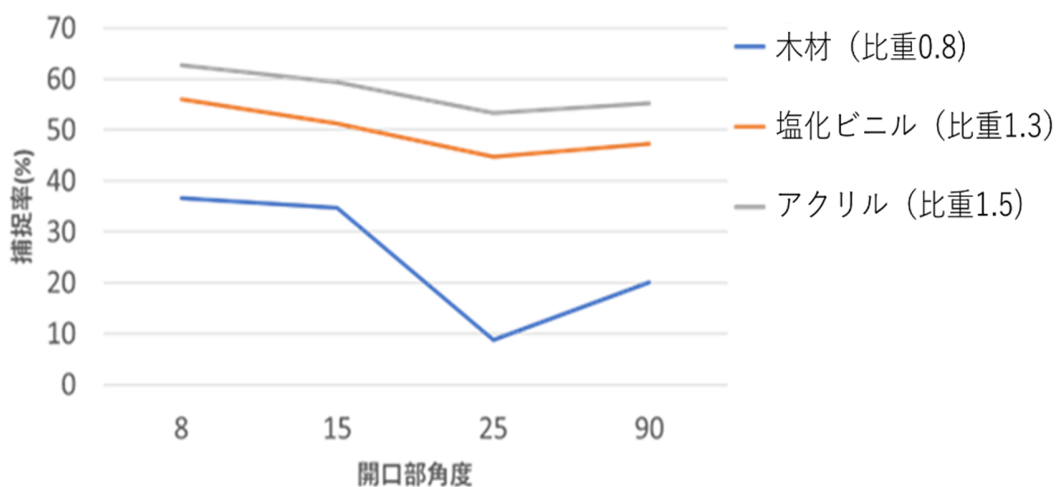


図4 水理模型実験における開口部角度と捕捉率の関係（三つの異なる比重の流木モデルについてのまとめ）

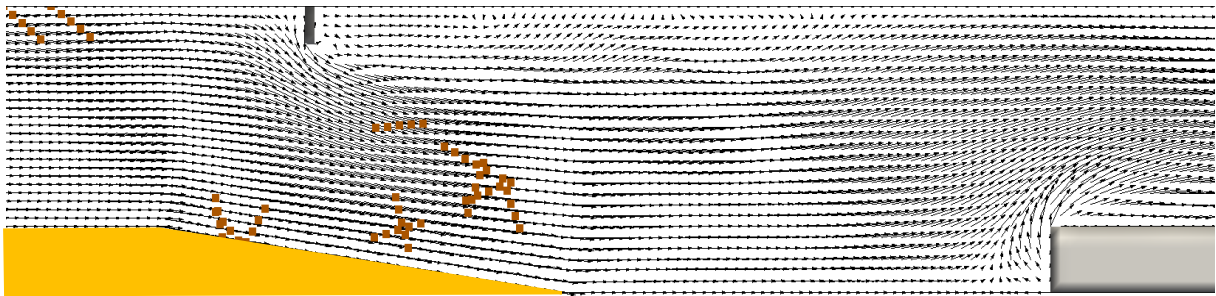
図4は、水理模型実験における流木捕捉域の開口部角度と捕捉率の関係を、3種類の比重の流木モデルを用いた場合の結果についてまとめたものである。この図から、いずれの比重の流木モデルを用いた場合でも、流木捕捉率が開口部角度25°付近で極小値をとること、さらにこの極小値は比重が小さい場合により明確に現れることがわかる。これは大変興味深い現象であり、流木密度によらずに現れる現象であることから、何らかの普遍的なメカニズムに起因するものであることが予想される。さらに、この特性をうまく利用すれば、より効率の高い流木捕捉工の設計につながる可能性があり、今後さらに検討を行う必要がある。

現在のところ、このような捕捉率の極小値が出現するメカニズムは不明であるが、考えられる原因として、開口部付近の主流の曲がりの影響や、第一種二次流の特性が開口部の傾斜角度に依存する点などが考えられる。前者については、のちほど数値シミュレーション結果に基づいて考察する。後者については第一種二次流が大きくなると、比重の大きい流木の捕捉率が低下することは、既往の研究でも指摘されている⁹⁾。今後さらに多くの条件で実験を実施し、詳細な計測を実施することにより、そのメカニズムの解明を目指す必要がある。

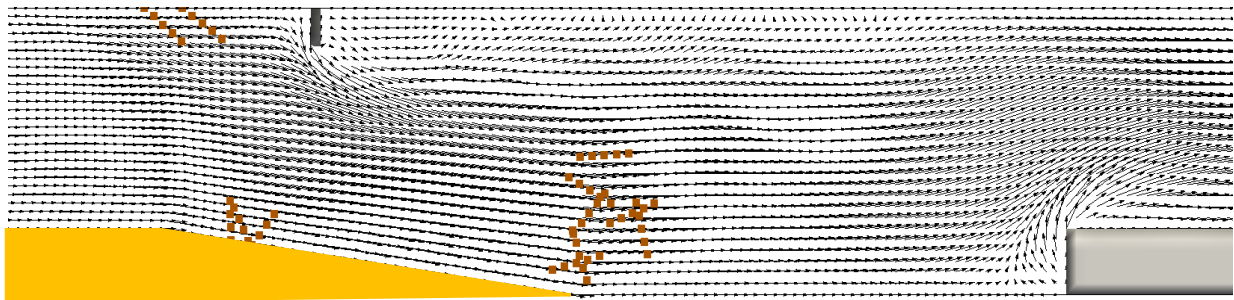
・数値シミュレーション結果と考察

【流木挙動について】

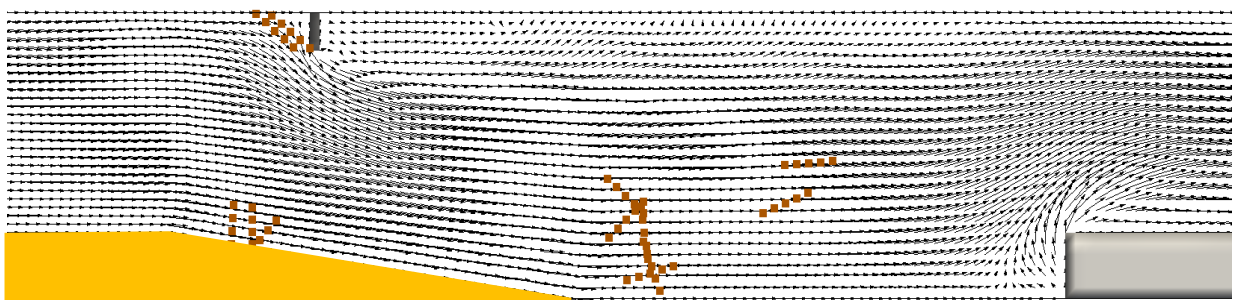
まず、数値シミュレーションで再現された流木挙動の基本的特性を検討する。図5は、流木比重0.6、開口部角度15°の場合の流木の挙動と、水面の流速ベクトルを0.4[sec]間隔で重ねて描いたものである。なお、この図では計算領域全体ではなく、捕捉域周辺のみを切り出して表示している。流木の一部は左岸側の水制に衝突して、右岸側の捕捉域の方向に移動の向きを変える挙動や、右岸の傾斜した側岸に沿って流木が捕捉域に進行する様子が再現されている。また、水制によって剥離された水の流れが不安定となり、非定常に振動している様子も再現されている。これらの挙動は水理模型実験で観察された流木の挙動と定性的に一致している。



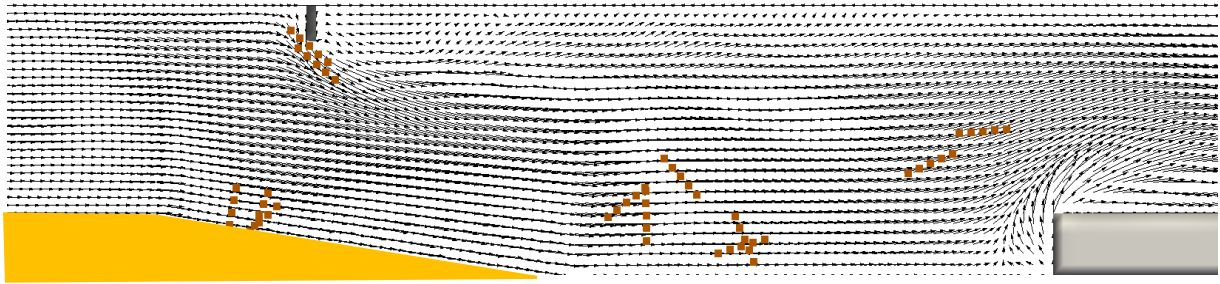
(a) $t = 95.2$ [sec]



(b) $t = 95.6$ [sec]



(c) $t = 96.0$ [sec]



(d) $t = 96.4$ [sec]

図5 数値シミュレーションにより再現された流木の移流状況の例（入口角度 15° の場合，流木比重0.6，流れは左から右方向，0.4[sec]間隔）

【開口部角度が流況に及ぼす影響】

図6は，流木捕捉域の入口の側岸の角度が 8° ， 15° ， 25° ， 90° の場合における数値シミュレーション結果について，水面付近の水流の流速ベクトルと，底面付近の流速のマグニチュード（流速ベクトルのノルム）のカラーコンターを合わせて示したものである．いずれの計算結果においても，捕捉域対岸に設置された水制による水刎ね効果と衝突効果によって，流向が捕捉域に向かって転向することや，水制の下流側では広い範囲にわたって流速の小さい領域（死水域）が生じていることなどの共通する特性が示されている．

一方，流木捕捉域周辺の流れ場に注目すると， 90° のケースのみで，捕捉域入口に剥離渦が生じており，捕捉域の上流側のかかなり広い範囲にわたって，流速の非常に小さい領域が生じ，死水域となっていることがわかる．他のケースでは流れの入口付近での流れの剥離はみられないが，入口の側壁傾斜角度が 25° のケースでは，入口の直下流部において流速のかかなり小さい部分が生じている点に特徴がみられる．

これらの結果から，流木捕捉率の入口角度による変化を次のように解釈することができる．

入口角度が緩やかな場合，流れは右岸側の側壁にそって滑らかに捕捉域に向かうため，流木もその流れに追従することで，スムーズに捕捉域に進入できる．ところが，入口角度が 15° ， 25° と大きくなると，捕捉域に流入する流れが急に右岸側に折れ曲がるように転向するのに対し，流木は慣性力を有するため，これに忠実に追従することができず，捕捉率が低下することが考えられる．これは，アクリルのような比重が大きい流木の場合，慣性力もそれに応じて大きくなることが予想され，流木が捕捉域に進入しにくくなること考えられる．この特性は，水理模型実験結果でみられた図4の傾向とも一致している．

一方，開口部角度が 90° となると，入口角部で流れが明確に剥離し，循環流と死水域が生じる．このため，主流部の流線に大きな曲がりには生じなくなるため，水制ではねられ，方向を変えた流木は，開口部付近をそのまま界面に沿って移動し，流木フェンスに衝突することで捕捉される．このため，図4に示されたように，流れ場の剥離の生じる 90° のケースでは，捕捉率がわずかながら向上したものと考察される．

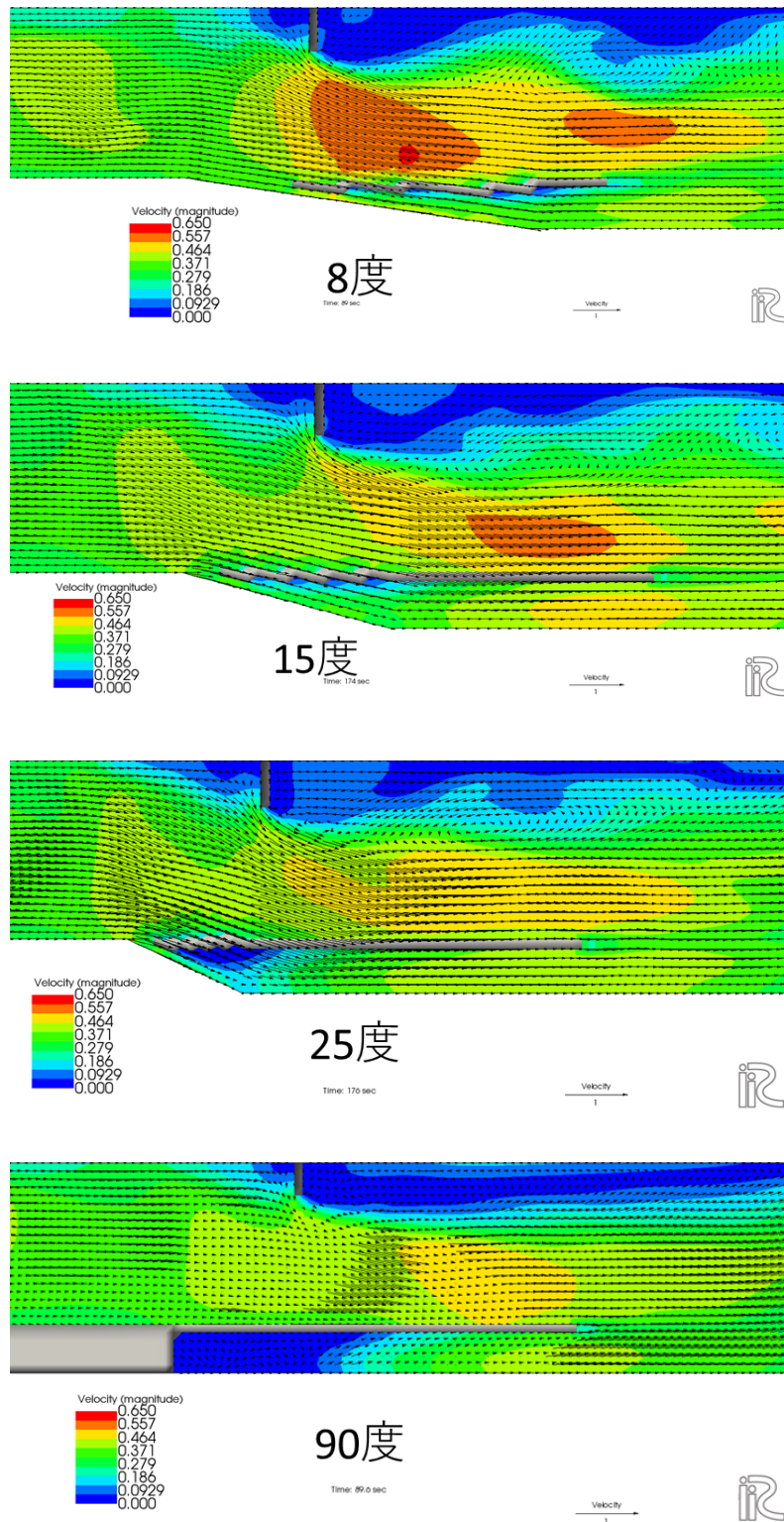


図6 数値シミュレーション結果における入口角度が異なる場合の流況（水面付近の流速ベクトルと底面付近の流速マグニチュードのカラーコンター）の比較

【流木比重の影響】

表1は、流木比重を0.6, 1.0, 1.1と変化させた場合の数値シミュレーション結果における流木捕捉率を比較したものである。これより、流木比重が大きくなるにつれて捕捉率が大きくなる傾向が示された。これは、表1で示した水理模型実験結果の結果とは逆の傾向となっている。これには次のような原因が考えられる。

表3 流木比重を変化させた場合の数値シミュレーション結果における捕捉率の比較

比重	0.6	1.0	1.1
捕捉率	56.3%	25.0%	13.7%

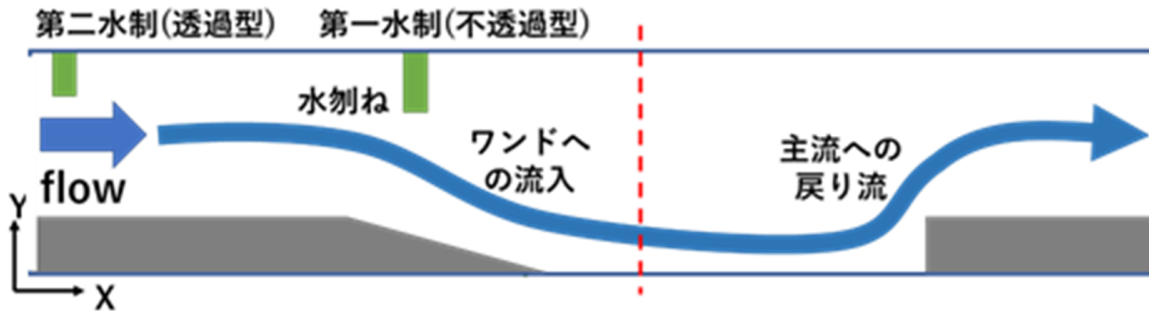


図7 水制と開口部の傾斜側岸によって起因する蛇行流の模式図

水制と開口部の側岸の傾斜は主流に反時計回りの方向の図7に示すような蛇行流を生じさせる効果があり、これにより遠心力に不均衡に起因する第一種二次流が断面内に発生する。図8は、数値シミュレーションにより再現された断面内の二次流の様子であり、開口部角度が8°の場合について、図7の赤い破線に沿った断面での流速ベクトルを示している。このような二次流は底面付近の水流を捕捉域から主流域方向へ向かわせ、水面付近は逆に主流域から捕捉域に向かわせる。図9は、数値シミュレーションにおける流速ベクトルの横断方向（y方向）の流速成分を水面付近と底面付近で比較したものである。入口角度は8°の場合について示している。正の流速は捕捉域から主流域に向かう流れを表す。水面付近では、負の流速、すなわち主流から捕捉域に向かう流れが卓越しているのに対して、底面付近では負の流速が小さくなっている。さらに、図10、図11は、底面付近および水面付近の横断方向の流速のカラーコンターを示したものである。水面付近では青色の負の流速が捕捉域入口付近で卓越していることがこの図からも理解できる。このような二次流の挙動だけを考えると、比重の大きい流木ほど捕捉域に進入しにくくなることが予想される。

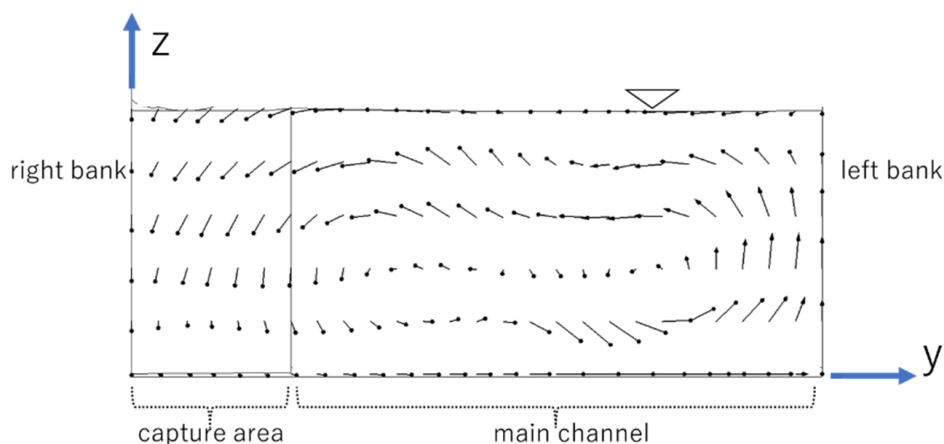


図8 数値シミュレーションにより再現された断面内の二次流の一例（入口角度8°の場合、図7の赤い破線にそった断面内の流速ベクトル）

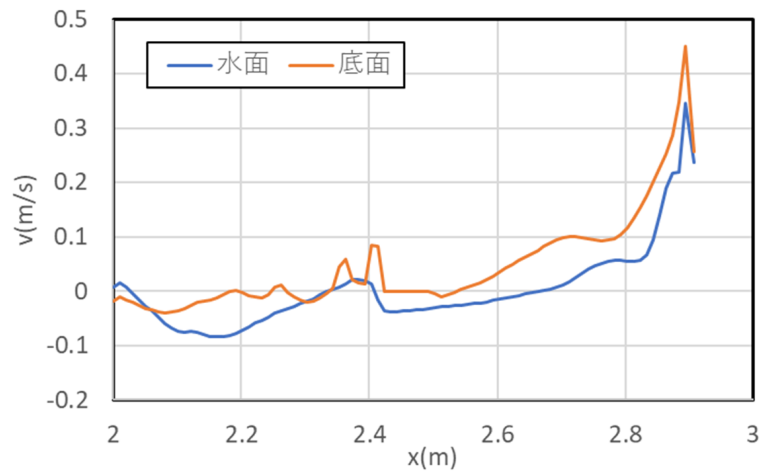


図9 流速ベクトルの横断方向成分の底面と水面での比較（図7の赤い破線にそう断面，入口角度 8° ，正の値は捕捉域から主流域に向かう方向の流れを表す）

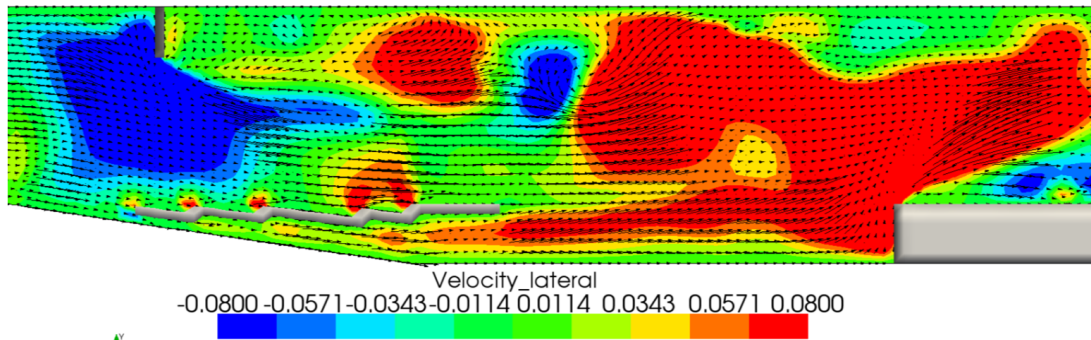


図10 横断方向流速コンターと流速ベクトル（底面付近）

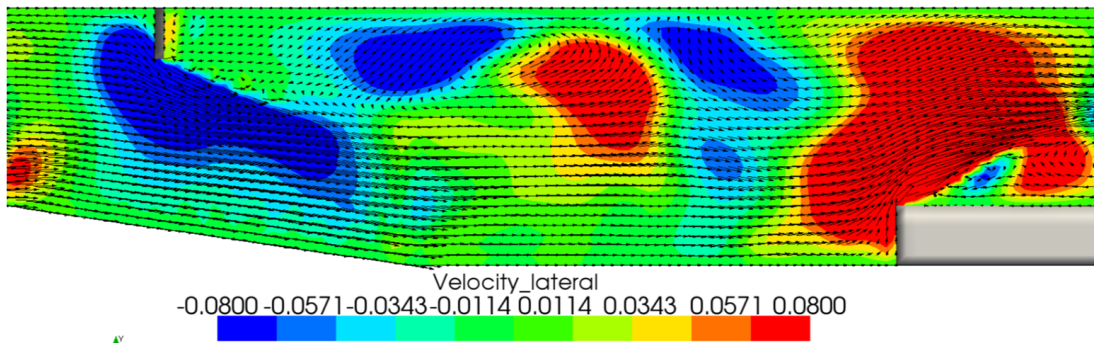


図11 横断方向流速コンターと流速ベクトル（水面付近）

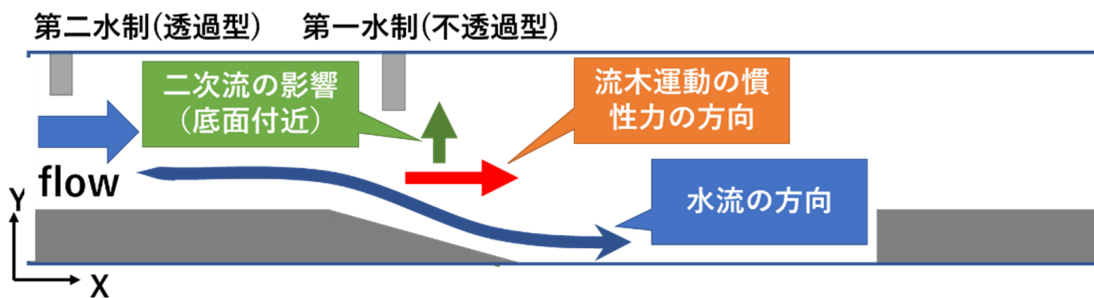


図12 開口部入口非金において流木に作用する三つの力の方向

ところが、実験結果の考察において述べたように、底面付近の流木は底面摩擦の効果により流送の速度が低下し、流木の慣性力が低下することで、流れの曲がり（特に開口部入口付近の捕捉域方向へ転向する流れ）により追従しやすくなる（図12参照）。この効果は、比重の大きい流木ほど捕捉域に進入しやすくなる効果を発現する。流木の捕捉はこれら二つの相反する効果のトレードオフによって決定すると考えられる。

実験と数値シミュレーションの結果を比較すると、水理模型実験において二次流の効果より底面摩擦による効果が勝ったのに対し、数値シミュレーションでは二次流の効果の方が勝ったものと推測される。このため、定量的な予測につなげていくには数値シミュレーションにおける底面摩擦項の取り扱いや、二次流強度を左右する乱流モデルについて、さらに検討を行い、モデルの改良を行う必要性が示唆される結果となった。

(5) 本章のまとめ

本章では、河川直線部に設置されたバイパス型流木捕捉工について、水理模型実験と三次元の数値シミュレーションにより検討を行ったものである。特に、流木の比重の影響と、捕捉域入口の形状（側岸の傾斜角度）が流れ場や流木挙動に及ぼす影響を詳細に検討した。得られた主な結果を箇条書きで示すと次のようになる。

- 数値シミュレーションにより、流木の水制による流木の移動方向の転向や、捕捉域側壁に沿っての進入・捕捉に関わる基本的な動態を定性的に再現できることが確認された。
- 水理実験において流木比重の大きい流木ほど捕捉率が向上する結果になったのに対し、数値シミュレーションではこれと逆の傾向が示された。これは、第一種二次流、流木の慣性力という2つの現象が底面付近に相反的な作用を及ぼし、このトレードオフによって流木の移動方向が決まることに起因するものと推測された。数値シミュレーションモデルでは底面摩擦の影響が十分反映されず、慣性力が卓越したものと考察された。
- 実験結果では、開口部側壁角度が 25° 付近で捕捉域の極小値が生じることが確認された。この極小値は流木密度に依存せずに出現することが確認された。
- 開口部角度を変化させた数値シミュレーション結果から、開口部角度が 90° の場合には流れの剥離と再循環流が形成されること、それ以外では剥離は報じないが、 25° のケースでは流入部直後に流速の小さい死水域が形成されることなどが示された。

今後、流木と水路底面との摩擦力の評価方法についての再検討を行うとともに、さらに多くの水理・流木条件で水理模型実験や数値シミュレーションを実施することにより、より効率の良い流木捕捉工について提案していきたい。

謝辞

本研究の遂行に当たり、富山大学都市デザイン学部学生村田翔氏より、水理模型実験の遂行や、実験データの整理、数値シミュレーションの実行において様々な協力をいただいた。また、富山大学都市デザイン学部技術職員神亀理恵氏にも、水理模型実験に対する助言や補助を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) Schmocker, L. and Weitbrecht, V. : Driftwood risk analysis and engineering measures, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.139, pp. 683–695, 2013.
- 2) 岡本隆明, 山上路生, 樫原 : 遊水域を利用したアクティブな流木捕捉システムに関する実験的研究, *土木学会論文集B1 (水工学)*, Vol.74, pp.673–678, 2018.
- 3) Ichiro Kimura, Kakeru Murata and Takaaki Okamoto : 3D Computations of Driftwood Movement Around an Inlet Type Driftwood Capture Facility, *Proceedings of 39th IAHR World Congress*, Granada, Spain, pp.4158–4163, doi://10.3850/IAHR-39WC2521716X20221688, 2022.6.24.
- 4) Ichiro Kimura, Taeun Kang and Kazuo Kato : 3D-3D Computations on Submerged-Driftwood Motions in Water Flows with Large Wood Density around Driftwood Capture Facility, *Water* 2021, 13, 1406. <https://doi.org/10.3390/w13101406>, pp.1–21, 2021.5.18.
- 5) Jonathan M. Nelson, Yasuyuki Shimizu, Takaaki Abe, Kazutake Asahi, Mineyuki Gamou, Takuya Inoue, Toshiki Iwasaki, Takaharu Kakinuma, Satomi Kawamura, Ichiro Kimura, Tomoko Kyuka, Richard R. McDonald, Mohamed Nabi, Makoto Nakatsugawa, Francisco R. Simões, Hiroshi Takebayashi and Yasunori Watanabe : The International River Interface Cooperative : Public Domain Flow and Morphodynamics Software for Education and Applications, *Advances in Water Resources*, Vol.93, pp.62–74, DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.09.017, 2016.7.
- 6) 木村一郎 : iRICによる河川シミュレーション, 森北出版, 2021.
- 7) 越塚誠一 : 数値流体力学, 培風館, pp178–181, 1997.
- 8) 初田直彦, 赤堀良介, 清水康行 : 蛇行流路の流体場と流木の挙動に関する実験と数値解析, *応用力学論文集*, 15, 415–422, 2012.
- 9) Ichiro Kimura and Kazuya Kitazono : Effects of the driftwood Richardson number and applicability of a 3D-2D model to heavy wood jamming around obstacles, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol.20, pp.503–525, 2020.
- 10) 木村一郎 : 3D-3Dカップリングモデルを用いた橋脚による流木捕捉過程の再現性, *土木学会論文集B1 (水工学)*, Vol.75, No.2, I_601–I_606, 2019.

2. 津波による流木の発生・輸送の計算モデリング（担当：カン・テウン）

(1) 本章の目的と概要

2011年3月11日、宮城県仙台市の東179kmの海岸からマグニチュード9.0の地震が発生し、波高6～15mが発生し、2万人以上の死者がでた。仙台地方沿岸部では、津波により3.8km²の防風林(海岸林)全体が転覆または一部根こそぎにされ、津波とともに内陸に流れ込み、農地や家屋に被害をもたらした。図1は東北大津波発生前後の仙台地区の海岸の航空写真を比較したものである。このような大津波は頻繁には発生しないが、一旦津波が発生すると、甚大な被害をもたらすもので、これに対する対策は非常に重要である。

2011年の東北地方の大津波は、沿岸地域の津波遡上のプロセスと、都市部の浸水特性を広範囲に理解することの重要性を浮き彫りにしたものとなった。津波が浅い沿岸地域に入ると、津波の波長と速度の低下により波の高さが大幅に増加し、壊滅的に破壊力が拡大する。既往の研究として、Inagaki et al. (2012)¹⁾が仙台地域から取得した観測データに基づいて、流木の発生と津波による輸送の数値モデリングを行った。また、2次元水深平均流洪水追跡モデルと流木挙動を組み合わせたモデルとしては、清水らによる二次元氾濫シミュレーションモデル(Nays2D Flood, Shimizu, et al., 2015)^{2,3)}と流木力学モデルを用いて流木の挙動をシミュレーションしたKang and Kimura (2018)⁴⁾や、Kang et al., (2020, 2021)^{5,6)}の研究が上げられる。

これらの背景や既往の研究をベースとして、本研究では津波によって海岸林に生息する個々の樹木が流木に変化する簡易流木生成モデルを新規に開発し、平面二次元数値シミュレーションに適用する。このモデリングに基づいて、森林の樹木密度に応じて、流木の発生パターンと輸送とともに津波による流木の動的挙動を予測する。

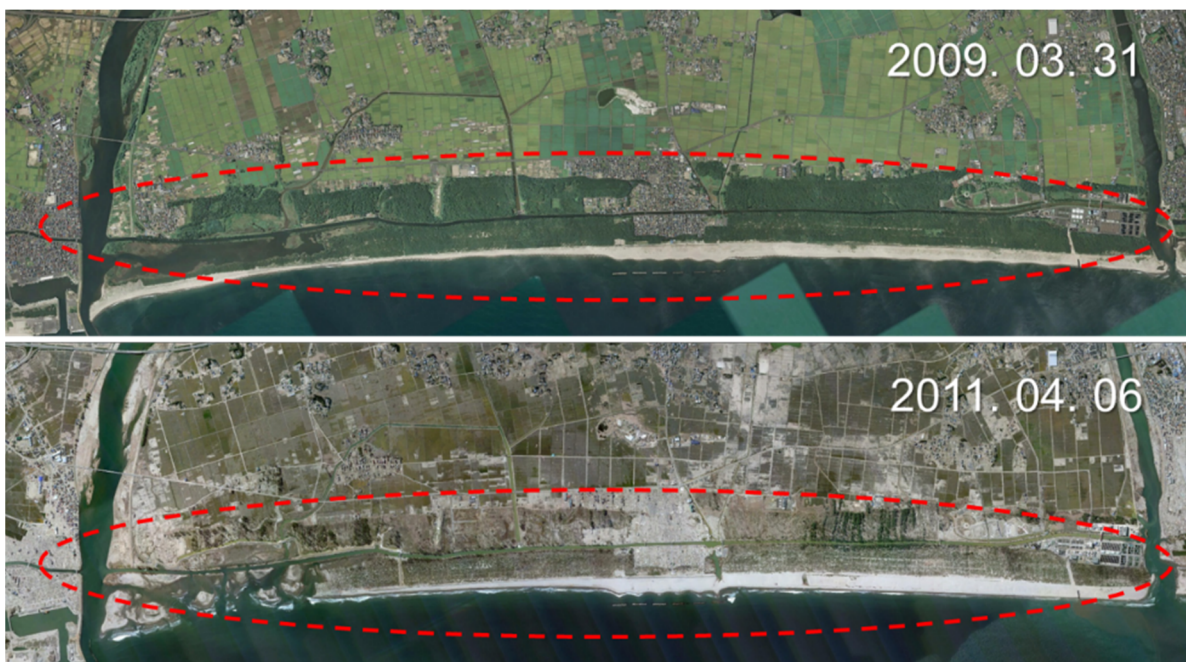


図1 津波災害前(2009.03.31)と津波災害後(2011.04.06)の仙台地域沿岸地域
(Google earth 2021)

(2) 計算モデルと計算条件

a) 二次元浅水流モデル

本研究では、iRIC(国際河川シミュレーションプラットフォーム)²⁾のフリーソフトウェア上で稼働する、離散要素法(DEM)と二次元氾濫シミュレーションソルバーのNays2D Flood³⁾を組み合わせで開発された平面二次元数値シミュレーションソルバーを用いる。これにより、津波による遡上流と流木挙動のダイナミクスを数値解析的にシミュレートする。流れのモデルは、氾濫シミュレーションなどで広く用いられている水深積分型の平面二次元モデルである。乱流モデルはゼロ方程式モデルが適用され、水際移動についても考慮することが可能である。モデリングの詳細は既往の論文(Kang et al., 2020)⁶⁾を参照されたい。

b) 数値シミュレーションモデルにおける津波の簡易境界条件

2011年の東北地方の大津波の数値シミュレーションは、これまでもいくつかの研究で実施され、論文が報告されている。本研究では、これらの既往の数値シミュレーション研究を総合的に検討し、津波の境界条件を導出するための簡易的なハイドログラフを作成することとした。これをもとに、海岸線付近の上流端境界条件の水深の動的変化を設定した。一方で、計算領域の境界条件の下流側の辺は自由流出境界条件とした。既往の研究では、遡上する津波の水位の変位に主な焦点を当てるものであった。しかしながら、津波の正確かつ詳細な水位を推定することはできなかつたため、津波のピーク水深を三種類と仮定した。さらに重要なことは、浅瀬における波の進行速度は、波の周期よりも水深の影響を受けるという点である。したがって、浅瀬の波は深海の波とは性質が異なる。異なるピーク水深を使用して得られた三種類のハイドログラフに応じて、海岸線近くの津波の波の速度は次のように表すことができる。

$$\pm V = \sqrt{gh} \quad (1)$$

ここに、V：波浪の速度，g：重力加速度，h：水深をそれぞれ表す。

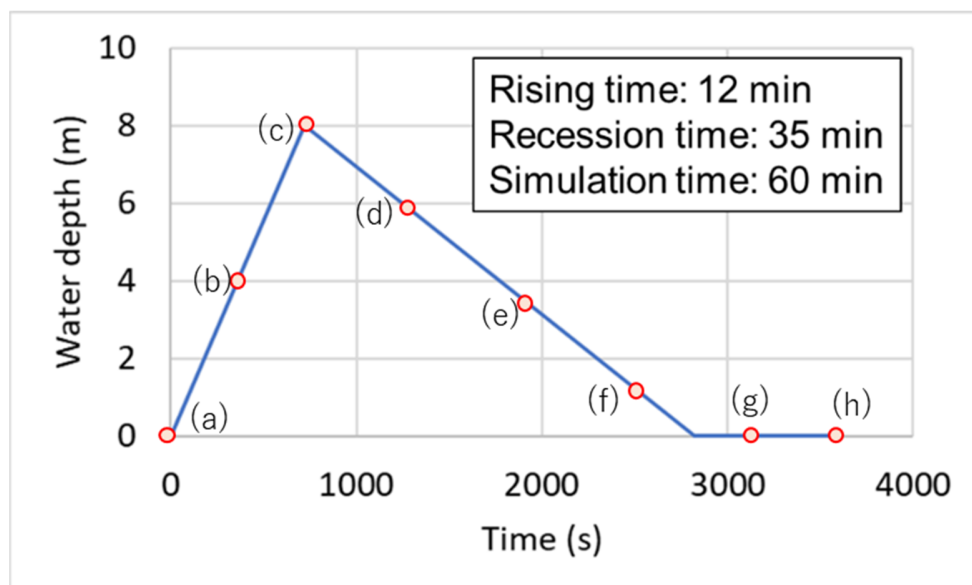
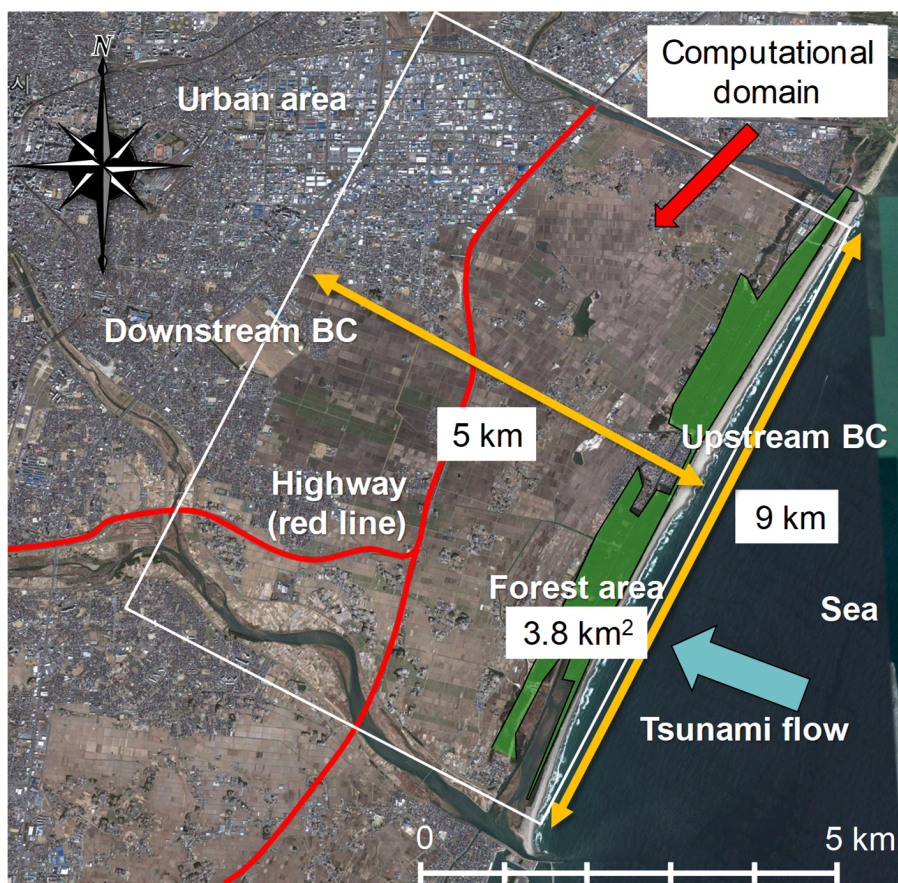
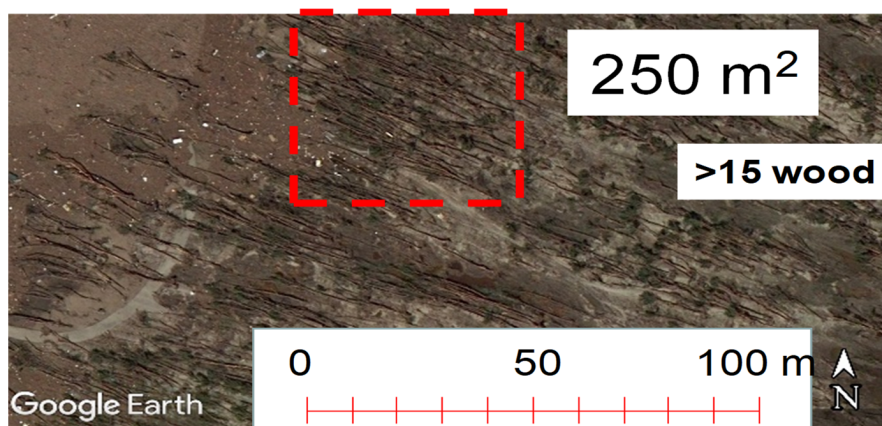


図2 上流境界条件の推定ハイドログラフ (図中の(a)~(h)の記号は、図5 (a)~(h)の時刻に対応)



(a) 調査地域



(b)森林の密度(Google Earth,2021).

図3 計算領域の森林分布と植生密度の推定

これまでのいくつかの研究によると、仙台地域近くの推定高さは約7~9 mとの情報である。仙台地域の津波の高さについては比較的正確な情報を取得することが可能で、宮古の観測データ(大石ら2016)と気仙沼湾のLiDAR(Fritz et al. 2012)⁷⁾を使用することとした。これらのデータをもとに、試行錯誤の手法により、津波水深を流木の観測データと比較することで推定した。ここで、海岸線の長手方向の水路傾斜の絶対値は0.1であり、これを Manning式による初期水深の平均流速から計算に用いた。上流境界条件のピーク水深は上記の観測データと試行錯誤の結果に基づいて、観測値のおよその平均値と考えられる8mとした。全体として、津波の立ち上がり時間は12分、後退時間は35分、合計のシミュレーション時間は60分とした。

図2に上記の方法で推定されたハイドログラフを示した。

c) 海岸線付近の初期木材分布

森林の植生密度は、木の数に基づいて推定された。図3に示すように、Google Earth[®]を通じて、森林内の単位エリア内の樹木分布をキャプチャした。図を拡大することで、ある程度樹木数の判別が可能となり、津波後の堆積流木密度は0.06本/m²で、合計で22.5万本程度の木が存在することを確認した。また、津波時には流出した流木の本数も相当する存在することが考えられる。これらを考慮して、津波前の森林の樹木数を30万本と推定した。

津波災害に関する調査では、21,054本の流木が内陸に流れ込んだことが観測されている。この流出流木数は、津波による抗力のチューニング時の再現性の検証に用いられた。

d) 流木生成モデル

流木を含む土石流や河川工学に関する研究は広範に行われているが^{例えは9,10)}、流木生成に着目した研究はほとんど行われていない。本研究では、最初に植林した樹木から流木の生成を誘発する流木生成モデルを開発し、森林への影響を検討した。提案された流木生成モデルは、簡単のために、二次元水深平均流れの抗力を樹木倒壊への影響として考慮する。

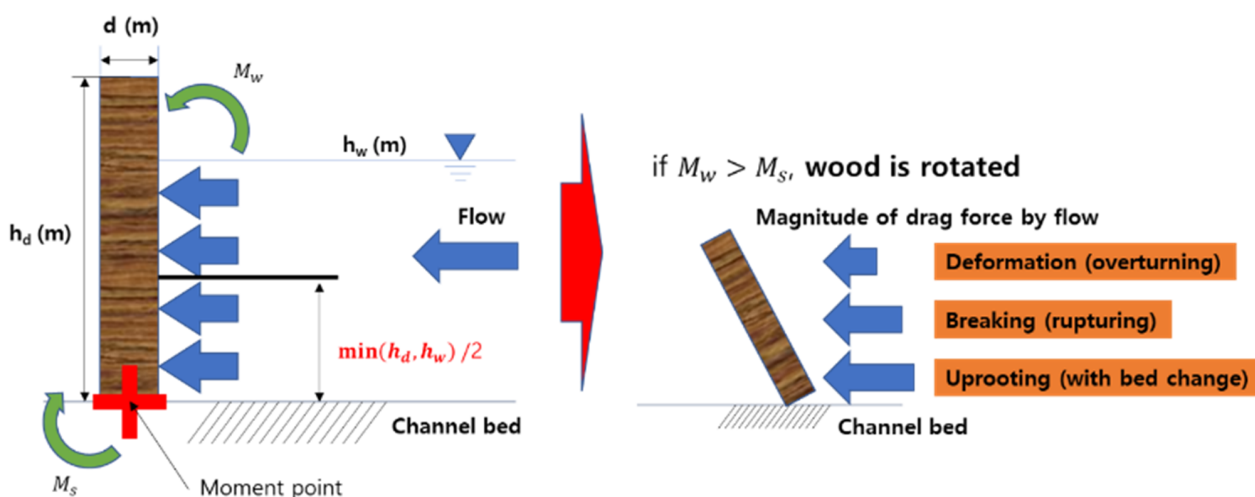


図4 倒木生成のメカニズムと倒木生成過程の分類

流木の生成の種類は、図3に示すように、転倒、破断、根こそぎ倒木に分類される。ここでは、流木生成の観点から、転倒と破断の2種類の流木生成についてモデル化を検討する。転倒倒木は空間的には固定された水没木材であるため、より大きな投影領域の水流に影響を与え、通常の片持ち梁状の立木よりも大きな抗力を引き起こす。図3に示すように、ある程度以上の抗力が木に作用すると、片持ち梁の木は完全に破裂し、流木に変化する。なお、根こそぎ倒木も流木生成の重要なメカニズムの一つである。しかしながら、そのメカニズムは転倒や破断とは異なり、河床の変動や根の大きさにも関連しており、現象が複雑でモデル化にはより多くの情報が必要となる。このため、今回の計算では根こそぎ倒木による流木生成は無視する。

本研究では、流木は、臨界曲げ応力よりも大きな力で流れの強い抗力が生じることで、流木が生成したと仮定した。変形と破壊の臨界曲げ応力の値は、既往の研究を参考に、それぞれ8MPaと45MPaと仮定されている (USDA, 2010)。¹¹⁾ 木材は、図4に示すように曲げ応力を受ける片持ち梁であると仮定する。

また、片持ち梁の端部は地表に固定され、流れ方向による抗力が均一な荷重としてカンチレバー梁（木の幹）に作用し、モーメントを発生させると仮定する。

このように、流木の生成は、木幹の直径、木幹の許容曲げ応力木幹に作用する抗力などの木材、および水流パラメータを使用して決定される。木に作用する抗力のモーメントが8 MPa以上、45 MPa未満（変形と破裂の間）の場合、樹木はシミュレーション結果では倒壊して固定された障害物として計算に反映される。

e) 計算条件

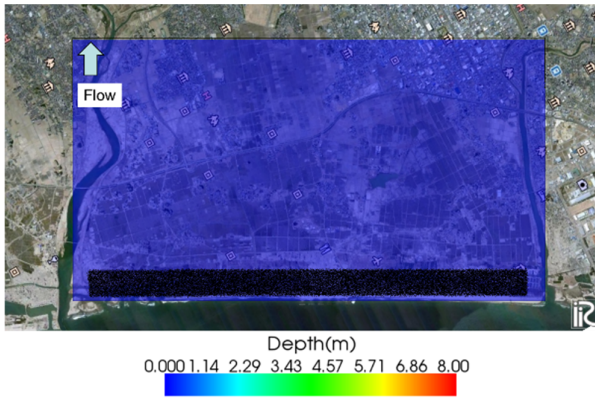
モデルの構築条件を表1に示す。仙台地域の地形データには、グローバルマップジャパン (<http://cyberjapandata.gsi.go.jp>) が提供する解像度 $3.75 \times 3.75 \text{m}^2$ のデジタル標高図 (DEM) を使用した。これに対し、流木の長さを10~20mと考慮して、格子サイズを $15 \times 15 \text{m}^2$ と設定し、計算領域の面積を9(幅) \times 5(長さ) km^2 とした。マニング粗度係数については、大石ら(2015)が $0.025 (\text{s/m}^{1/3})$ を用いたことを確認し、これと同じものを用いた。また、沿岸の津波による濁度を考慮して、水密度を 1200kg/m^3 とした(Oishi et al., 2015)¹²⁾。

表1 計算シミュレーションモデルの各種パラメータ

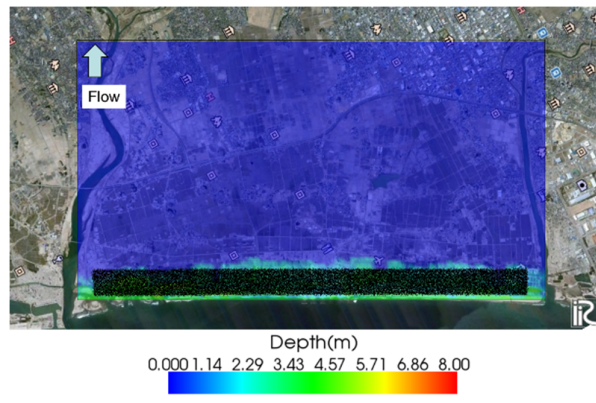
パラメーター	値 (単位)	パラメーター	値 (単位)
入口流境界条件	波の加速度方程式を持つ水深ハイドログラフ	下流境界条件	フリーフロー条件 (境界での変化量=0)
乱流モデル	ゼロ方程式	移流スキーム	TVD-MUSCL
計算ドメインのサイズ	9 (幅) $5 \times$ (長さ) (km^2)	均一なグリッドサイズ	$15 \times 15 (\text{m}^2)$
地形データの解像度	$3.75 \times 3.75 (\text{m}^2)$	マニング粗さ係数	$0.025 (\text{s/m}^{1/3})$
時間ステップ	0.1 (秒)	シミュレーション時間	3600 (s)
津波水の密度	1200 (kg/m^3)	森の植樹数	300000
木材密度の範囲	500~1000 (kg/m^3)	木材の長さの範囲	10-20 (m)
流木の静摩擦	0.7	木材の直径の範囲	0.5-1 (m)
流木の転がり摩擦	0.2	流木の動摩擦	0.4

前述のように、沿岸林に生息している樹種の大部分は松の木であることが識別されている。しかしながら、そのサイズや樹木密度、生息密度を定量的に特定するための現地観測データ取得は極めて困難である。したがって、森林内の樹木の長さ、直径、および生息密度は、表1に示すように、想定される範囲内でランダムに生成させることとした。

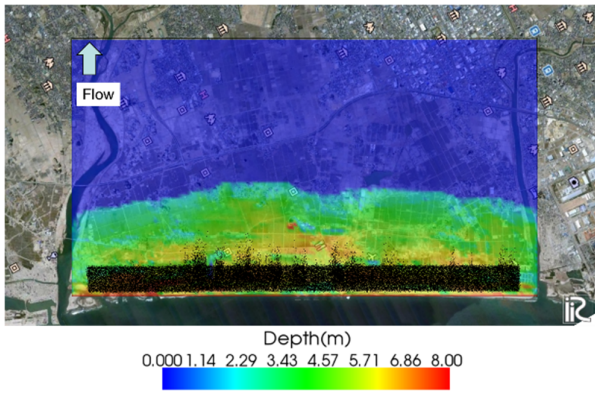
流木の移動形態のうち、流木が河床を滑って移動する場合、底面と流木の間には摩擦力が発生する(Kang et al., 2021)⁴⁾。この摩擦力の係数は、静的、動的、転がりに応じて異なる値をとることが指摘されている。これらの3つの異なる摩擦係数については、既存の数値シミュレーションによる研究によってもすでに詳細に検討されている(Kang et al., 2020, 2021)^{4,5)}。これらの既往の研究結果を参考に、試行錯誤の結果、これらの摩擦係数の値はそれぞれ0.7, 0.4, 0.2と推定された。最初に展開された海岸林を構成する樹木の総数は30万本で、片持ち梁で地面に固定されているものと仮定して計算を実施することとした。



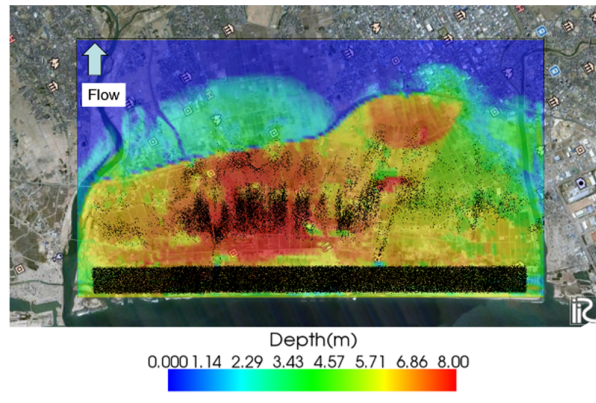
(a) 0 s



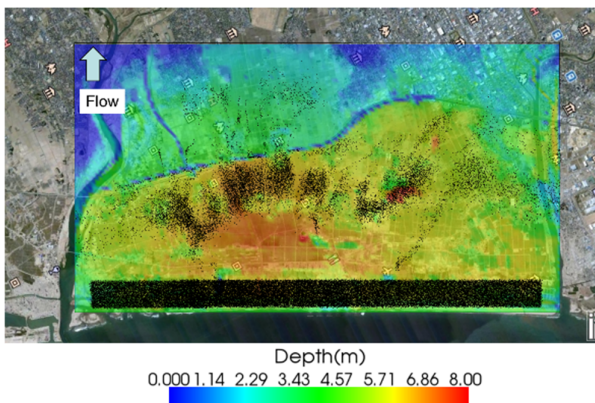
(b) 360秒(立ち上がり時間の間)



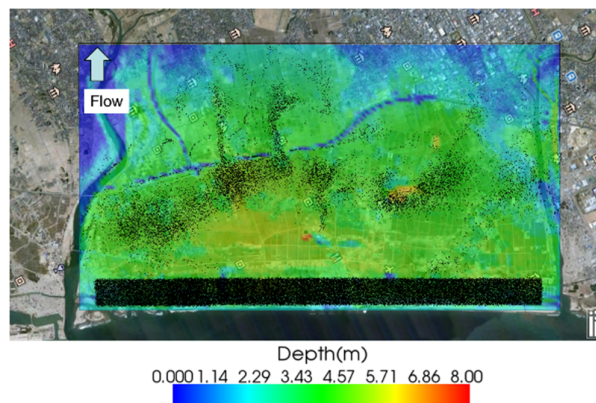
(c) 720 s



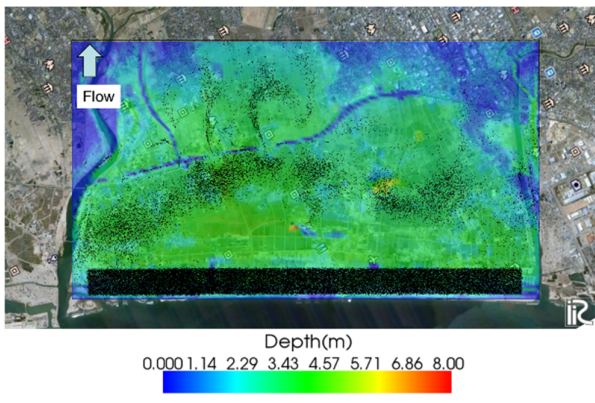
(d) 1320 s



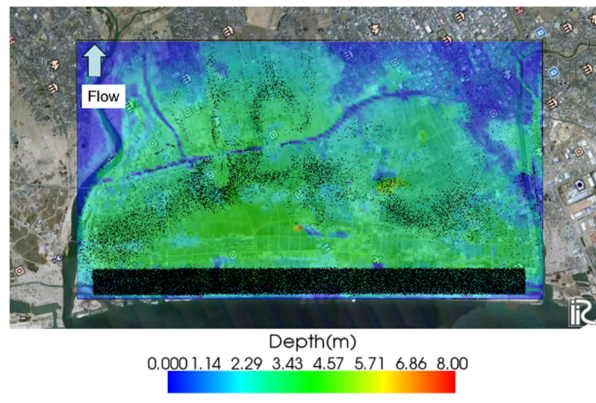
(e) 1920 s



(f) 2520 秒



(g) 3120 s



(h) 3600 秒

図5 シミュレーション結果の水深(色)と流木(黒粒子)の時間変化(Run1:ピーク深度8m)

(3) 計算結果と考察

本研究では、津波による流れと、それに伴う流木の発生の度合い、さらには流木の移動特性をシミュレーションする。津波による水深の変化のカラーコンターと流木生成の数値シミュレーション結果の経時的な挙動は、図5に示されている。

数値計算の初期(図5a)においては、海岸林の下に固定された片持ち梁として海岸に30万本の木が最初に設定され、津波の水深が上昇する段階の途中までは固定されたままである(図5a)。つづいて、図5bに示すように、津波が発生・遡上しつつも、流木はまだ発生していない状態であり、海岸からの水深が3mまで増加している。図5cでは、津波水深がピーク値に達する。この状態では、海岸沿いに水深が8mとなり、流木が形成され始める。このときには、津波は海岸から2km以上の内陸部にまで流れ込んでいることがわかる。ピークに達してから10分後(図5d)、津波の遡上により、沿岸地域全体を含む高速道路の堤防を氾濫させている。注目すべき点として、流木はこの段階できわめて活発に移動することがシミュレーションされている。さらに10分後になると、高速道路の堤防を横切る流木が多数観測されており(図5e)、ほぼすべての計算領域が津波によって浸水した状態となっている(図5f)。

続いて、引き潮の段階で上流端の流入深度が0mに達した状況を図5g-hに示す。海岸沿いの標高は内陸部よりも低いため、津波の流れは海岸に戻り、流木は上流(海岸線)に戻されている。Inagaki et al. (2012)¹⁾の結果と比較すると、流木堆積分布は、長手方向に存在する流木の数を合計して図5に示されている。ここで、Runs1~3は、津波ピークの水深をそれぞれ8m(観測ベース)、7m(シナリオ)、9m(シナリオ)に示す。具体的には、700m以前の地域は、海岸林が位置していたため、流木堆積分布から除外する。

図6より観察されたように、流木の堆積物の縦方向の分布は、観測値(21046)と比較して、Run1とRun2が過小評価され、Run3が過大評価されていることを示している。さらに、Run2の結果は、津波ピーク値が7mであり、海岸林に作用する抗力が他のシミュレーション結果よりも小さいため、流木の発生が非常に少ないという結果となった(生成数1095本)。Run3の場合、津波水深のピーク値は9mで、津

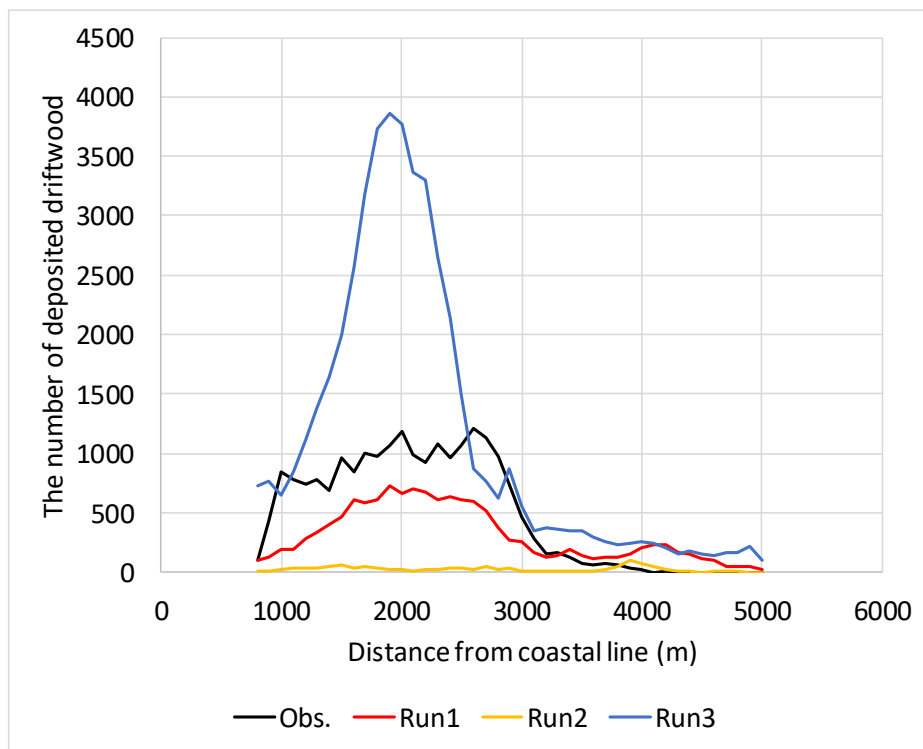


図6 海岸線からの縦方向の堆積木材の数.

波の流速と水深が増加し、47726個の流木が生成した。これは過大に流木生成数を再現する結果となっている。一方、Run1の場合、13289個の流木が生成され、堆積している。これは、観測値よりも小さいが、最終的な分布の相関係数は0.78であり、堆積分布も定性的に観測結果と同様の傾向を示している。

したがって、今後の検討の方針として、Run1に基づく境界条件の津波沿岸水位ハイドログラフをベースとして、流木生成モデルやそのパラメータについてさらに検討を詳細な進め、海岸林の樹木数に対して詳細な感度解析を行うことで、シミュレーションモデルをさらに高精度のものにしていくことが可能と考えられる。

(1) 結論

本研究では、仙台地域における津波とそれに伴う流木による被害を予測するための初期モデルを開発し、観測データと数値モデルを用いてシミュレーションした。

数値シミュレーションの結果から、流木による堆積物の分布は津波による浸水地域と類似していることが明らかになった。さらには、本研究で開発した数値シミュレーションモデルにより、津波遡上範囲は水深のみならず、流木や瓦礫による被害を予測し、対応策を考案する基礎資料を得ることが可能であることを実証することができた。

全体として、開発したモデルは、森林の樹木密度に基づいて流木の輸送と流木の発生パターンとともに津波の流れを予測するもので、限られた情報から境界条件や初期条件を与えることが可能であり、また平面二次元シミュレーションモデルであることによる計算機負荷の合理性とあいまって、極めて実用性の高いアプローチと考えられる。

将来的には、今回のような沿岸の津波災害の再現にとどまらず、河川の氾濫による流木や瓦礫の動態の数値シミュレーション研究にも適用することが視野に入る。さらには、浸水被害、流木輸送、瓦礫輸送、さらにはそれらによる橋梁や家屋の破壊などを予測可能な総合的な水災害減災シミュレーション手法の開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) Inagaki, K.; Nakaza, E.; Iribe, T.; Watanabe, Y. Distribution of the pine trees drowned by Tohoku Tsunami along Sendai coastal area. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser. B3 (Coastal Engineering)*, **2012**, 68, I_120-125.
- 2) International River Interface Cooperative (iRIC). 2022. Available online: <http://i-ric.org/en> (accessed on 1st of Feb. 2023).
- 3) Shimizu, Y.; Suzuki, E.; Kawamura, S.; Inoue, T.; Iwasaki, T.; Hamaki, M.; Omura, K.; Kakegawa, E. Nays2D Flood solver manual. *Int. River Interface Coop.* **2015**.
- 4) Kang, T.; Kimura, I. Computational modeling for large wood dynamics with root wad and anisotropic bed friction in shallow flows. *Adv. Water Resour.* **2018**, 121, 419-431.
- 5) Kang, T.; Kimura, I.; Onda, S. Application of Computational Modeling for Large Wood Dynamics with Collisions on Moveable Channel Beds. *Adv. Water Resour.* **2021**, 152, 103912. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103912>.
- 6) Kang, T.; Kimura, I.; Shimizu, Y. Numerical simulation of large wood deposition patterns and responses of bed morphology in a braided river using large wood dynamics model. *Earth Surf. Process. Landf.* **2020**, 45, 962-977. <https://doi.org/10.1002/esp.4789>.
- 7) Fritz, H.; Phillips, D.; Okayasu, A.; Shimozone, T.; Liu, H.; Mohammed, F.; Skanavis, V.; Synolakis, E.; Takahashi, T. The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesennuma

- Bay using LiDAR. *Geophysical research letters*, **2012**, *39*, L00G23, doi: 10.1029/2011GL050686.
- 8) Google earth. **2021**. Available online: <https://www.googleearth.com> (accessed on 1st of Feb. 2023).
 - 9) Kimura, I.; Kitanozo, K. Effects of the driftwood Richardson number and applicability of a 3D–2D model to heavy wood jamming around obstacles. *Environ. Fluid Mech.* **2020**, *20*, 503–525.
 - 10) Shrestha, B.; Nakagawa, H.; Kawaike, K.; Baba, Y.; Zhang, H. Driftwood deposition from debris flows at slit-check dams and fans. *Nat. Hazards* **2012**, *61*, 577–602.
 - 11) United States Department of Agriculture. *Wood Handbook*; Department of Agriculture: Washington, DC, USA, **2010**.
 - 12) Oishi, Y.; Imamura, F.; and Sugawara, D. Near-field tsunami inundation forecast using the parallel TUNAMI-N2 model: Application to the 2011 Tohoku–Oki earthquake combined with source inversions. *Geophysical research letters*, **2015**, *42*, 1083–1091, doi: 10.1002/2014GL062577.

3. ダム湖における沈木の動態シミュレーションモデルの開発（担当：木村一郎）

(1) 本章の目的と概要

貯水池内に河川から流木が侵入すると、その一部は湿潤時間の経過とともに比重が増加し、比重が1を超えると湖底に沈降する。沈降した流木の一部は水流とともにダム堤体方向に引きずられるように移動し、洪水調節用ゲートを通過したり、ゲートにからまって停止したりすることがある。このようなダム湖内の沈下流木（以下「沈木」と呼ぶ）は、ダムの種々の機能に悪影響を及ぼすことが考えられる。このため、沈木の生成メカニズムや、動的挙動の解明が、ダム管理上の理由から非常に重要である。しかしながら、河川流中の流木とは異なり、沈木の挙動については、これまでほとんど研究が行われておらず、未解明の点が極めて多い。



図1 裾花ダムのゲート付近に堆積した流木の様子（2017）¹⁾

我が国の裾花ダムは、長野県長野市に位置し、信濃川水系裾花川に建設されたアーチ式ダムである。2017年、この裾花ダムにおいて、常用洪水吐き入り口付近に土砂と沈木が集積し、洪水調節用ゲートの操作が不能となるという重大な事象が生じた¹²⁾。これは、ゲートの入口の高さ付近にまで到達した堆砂とともに沈木がゲート開口部へ引き込まれたことと、さらには、ゲートは土砂・沈木の流入の影響を設計段階で想定しておらず、ゲート操作に関わる外力の増加に対応できなかったことなどに起因する（図1）。ダムゲートの機能低下は洪水調節機能の低下に直結し、下流への影響も懸念される²⁾ことから、再発防止に向けての方策の構築が喫緊の課題となっている。

既往の研究において、ダム貯水池における沈木の観測事例は非常に少ない。さらに、沈木の移動、および停止、再移動に関する知見はほとんど存在せず、過去に観測された事例も筆者の知る限りほとんど存在しない。

高田ら³⁾はダム湖内に沈降静止した沈木について、通常は堆砂測量等で用いられることの多いマルチビーム音響測深による探査を試みている。これは、最小測点間隔約5cm程度の解像度の湖面形状を取得できる手法である。裾花ダムにおいて観測された事例においては、沈木が観測されたのみならず、沈木

の長さ、根・幹形状の詳細、さらには、沈木の一部が堆砂面に埋没している状況なども把握することができている（図2）。また、沈木はダム貯水池の流心軸に対し平行に近い角度で停止している様子も観察されている³⁾。

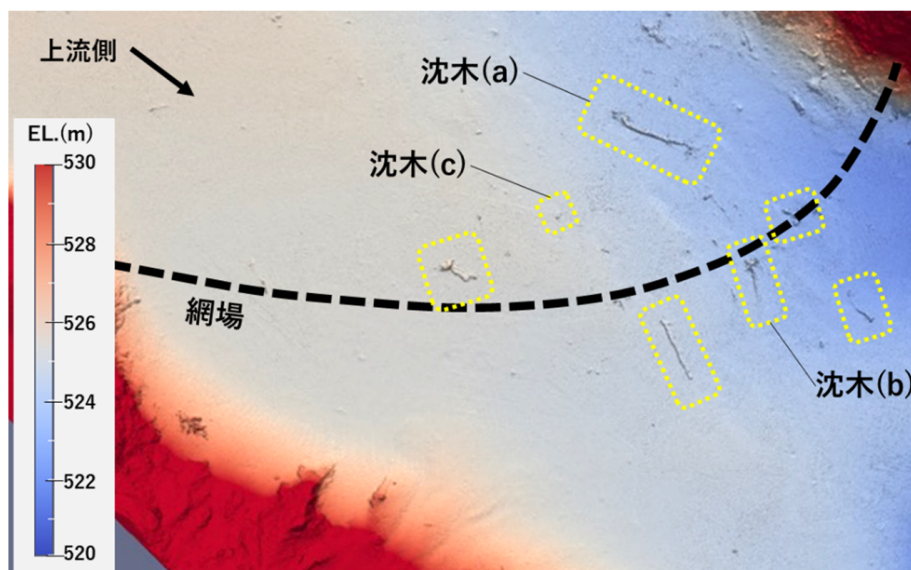


図2 マルチビーム音響測深技術を用いたダム湖内の沈木の観測事例²⁾（裾花ダム）

このような状況を鑑み、本研究では、ダム湖内の水の流動と、ダム湖に進入した沈木の挙動を再現する数値シミュレーションモデルを新たに構築する。これを用いて、ダム湖内の沈木の基本的動態特性を解明するとともに、沈木の運動におよぼす影響因子について検討を行うものである。さらには、構築した数値シミュレーションモデルは、国際河川解析プラットフォームiRIC上で稼働する三次元ソルバーNaysCUBEに組み込むことで、GUI環境のもとでダム湖内の流動や流木挙動の再現が可能となるツールを構築する。

(2) 数値シミュレーションツール

ダム貯水池内の沈木の再現に向けて、三次元水流・沈木シミュレーションモデルを構築する。これには、iRIC上の三次元ソルバーNaysCUBEをベースとするが、目的の達成のためには次の2点について、新たに改良を行う必要がある。

- ①ダム湖内の水の流動を再現するための下流端境界条件の改良
- ②ダム湖内の沈木とダム固定との摩擦力の考慮

■NaysCUBEにおけるダムとゲート流出流量の設定

まず、①については、次のように扱うこととする。

- ・下流端のダム堤体を「障害物」セルとして設定
- ・ダムゲートを「アンダーパス」セルとして設定
- ・下流端ゲートからの放水流量を設定する機能を追加

上のうち、「障害物」セルと「アンダーパス」セルの2つの機能については、既往のNaysCUBEに既に実装済みであり、これらのセル設定機能をそのまま適用することができるため、特に改良や機能追加は必要ない。

一方、既往のNaysCUBEでは、上流端に流量を与え、下流端は水位のみを与えた上で、自由流出条件としていたため、ゲートからの流出流量を陽に与えるにはこの点の改良が必要である。そこで、下流端ゲートの断面積を算出し、アンダーパスとして設定された各セル流量フラックスを計算し、これらを下流端の主流方向流量フラックスとして陽に与える改良を実施した。この改良の結果をiRICに反映させるため、NaysCUBEの「計算条件」設定メニューの、「高度な設定」のタグ内に、下流端にダムを設置するか否かを指定する「Set dam at outlet」という項目と、ゲート流量を設定する「Discharge from dam gate」の二項目を追加した（図3）。

なお、ゲート流出流量については、もしもゲートが複数ある場合にはそのトータルの流量で指定し、各ゲートへの配分はゲートの断面積に比例して行われる。また、現時点ではゲート流量は「一定流量」のみを考慮できるが、今後、ゲートの動的操作に対応して、ゲート流量の時間的変化をグラフとして与える方法への改良も容易である。

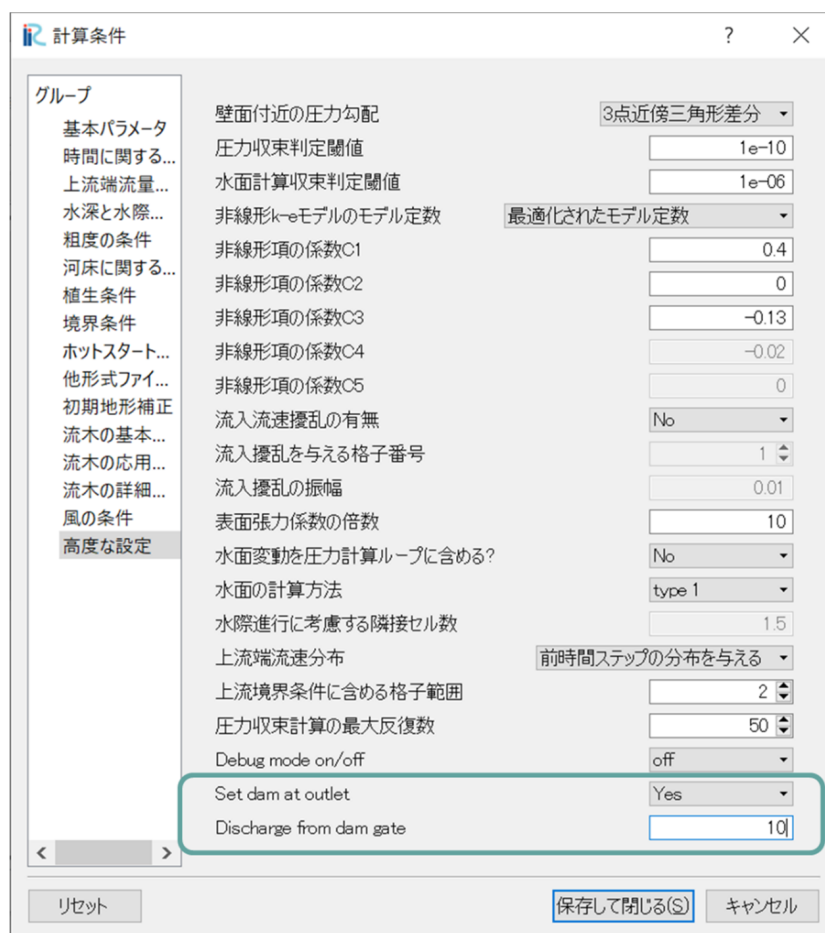


図3 NaysCUBEの改良（下流端ダムの有無とゲート流量の設置項目の追加）

■ダム湖底を移動する沈木に作用する力の評価

ダム湖底を移動する沈木の挙動は、水面を浮流する流木と異なり、次の2点について考慮する必要がある。

- ① 底面と流木との摩擦力の考慮
- ② 湖底の傾斜に伴う重力の影響の考慮

上の①については、Kangら^{45,6)}がすでに河川における流木の挙動について、滑動、転動を考慮したモデルを構築し、平面二次元モデルに組み入れることで、浅い河川流中を移動する流木の挙動を精度よく再現する方法を構築している。これを今回構築するダムとゲート流出機能を実装した三次元モデルにも導入することで、目的が達成できる。

一方、上の②についてはダム湖内の沈木の挙動を考える上できわめて重要となる。これはダム湖の地形的特性による。すなわち、V字谷をせき止めて作られたようなダムによる貯水池の場合、海底の傾斜が横断方向に非常に急となり、重力の影響が河川流中よりも大きくなるのが容易に想像されるためである。重量の影響は、流木に対する底面の抗力の斜面方向の成分によって表される。まず、抗力Nについては、重量Wと浮力Bの差として、

$$N = W - B \quad (1)$$

で表され、作用の方向は底面に対して垂直である（鉛直上向きでは無いことに注意）。この抗力Nを斜面方向の一般曲線座標系の2つの成分（ $\xi - \eta$ 方向）に変換して、運動方程式の外力項に反映させれば良い。

(3) 単純化した貯水池モデルにおける検討

■貯水池モデルの条件と格子分割

ダム貯水池内の流木、沈木の挙動の基本的な特性を検討するため、まずは単純化された地形の貯水池モデルを用いたシミュレーションを実施する。これには、長さ50m、幅10m、勾配1/10の矩形の領域を考え、その下流端にダムが存在し、1個の矩形断面のゲートを有するものと仮定する。なお、横断方向の勾配は水平とし、上流端から15mまでの範囲では、川幅2m、勾配1/10の河川が接続しているものとする。このような領域の様子と格子分割を図4に示す。格子分割は、25cm×25cmの正方形格子で水平面内を覆った形とする。また鉛直方向は10層の等間隔で分割する。このため、格子数は200×20×10 = 40000セルとなった。図の青い格子は通常の水のセルを、灰色の格子は障害物として設定された格子を表す。

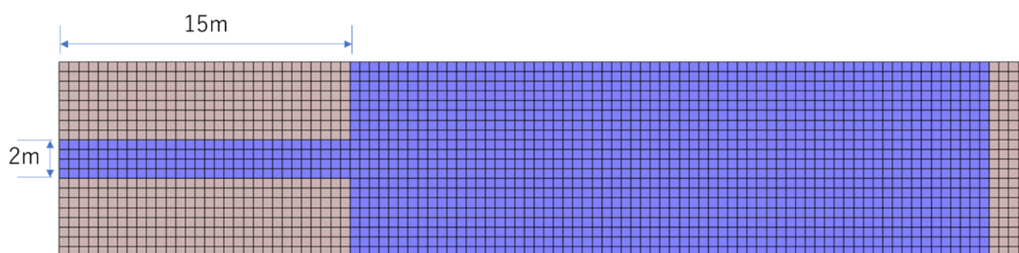


図4 単純化された貯水池モデルの領域と格子分割（50m×10m、勾配1/10（図の右側が深い）、下流端にダムの堤体が存在、青いセル：通常の水セル、灰色のセル：障害物）

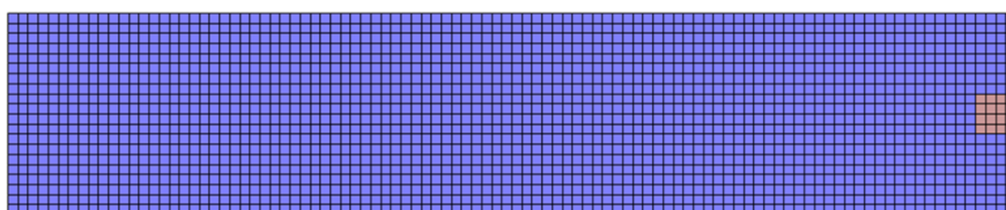


図5 ダムゲートの設定（アンダーパスによる設定、幅1m、高さは4セル分）

次に、図4の貯水池モデルの下流部に位置するダムのでき体にゲートを設定する。これにはNaysCUBEのアンダーパスセルの機能を用いる。ゲートの個数は1個とし、その大きさは、幅1 m、高さは4セル分とする。この操作の様子を図5に示す。

■ 計算条件

ダムからの流出流量は $1\text{m}^3/\text{s}$ とし、底面粗度は0.02とする。また河床は固定床と仮定し、河床変動計算は行わない。

流木のモデルは枝の無い円柱形状とし、流木長さ4[m]、直径0.2[m]とし、流木の密度は $900[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 $1000[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 $1100[\text{kg}/\text{m}^3]$ の三通りを検討する。このうち、流木密度 $1100[\text{kg}/\text{m}^3]$ のケースが沈木を想定したものである。一方、 $900[\text{kg}/\text{m}^3]$ は浮遊する流木、 $1000[\text{kg}/\text{m}^3]$ のケースは中立（水の密度と同一）の場合を想定している。

流木の投入は、貯水池の入口の河川部分に、計算開始と同時に上空から投下させる方法で投入した。流木投入本数は1ケースにつき20本とした。

総シミュレーション時間は200.0 [sec]とし、1.0 [sec]ごとにシミュレーション結果のファイルを出力した。計算には、ノートPC (CPU Core i7, RAM 16GB) を使用し、CPU時間は1ケースにつきおよそ2分であった。

■ 計算結果と考察

図6, 7, 8はそれぞれ、流木密度が $900[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 $1000[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 $1100[\text{kg}/\text{m}^3]$ の3つのケースの計算結果を $t = 5[\text{sec}]$ 、 $t = 15[\text{sec}]$ 、 $t = 30[\text{sec}]$ 、 $t = 200[\text{sec}]$ の4つの異なる時刻で示したものである。これらの図で、実線は流線を、カラーコンターは流速の大きさを示し、また緑色の棒状の図形は流木を表している。

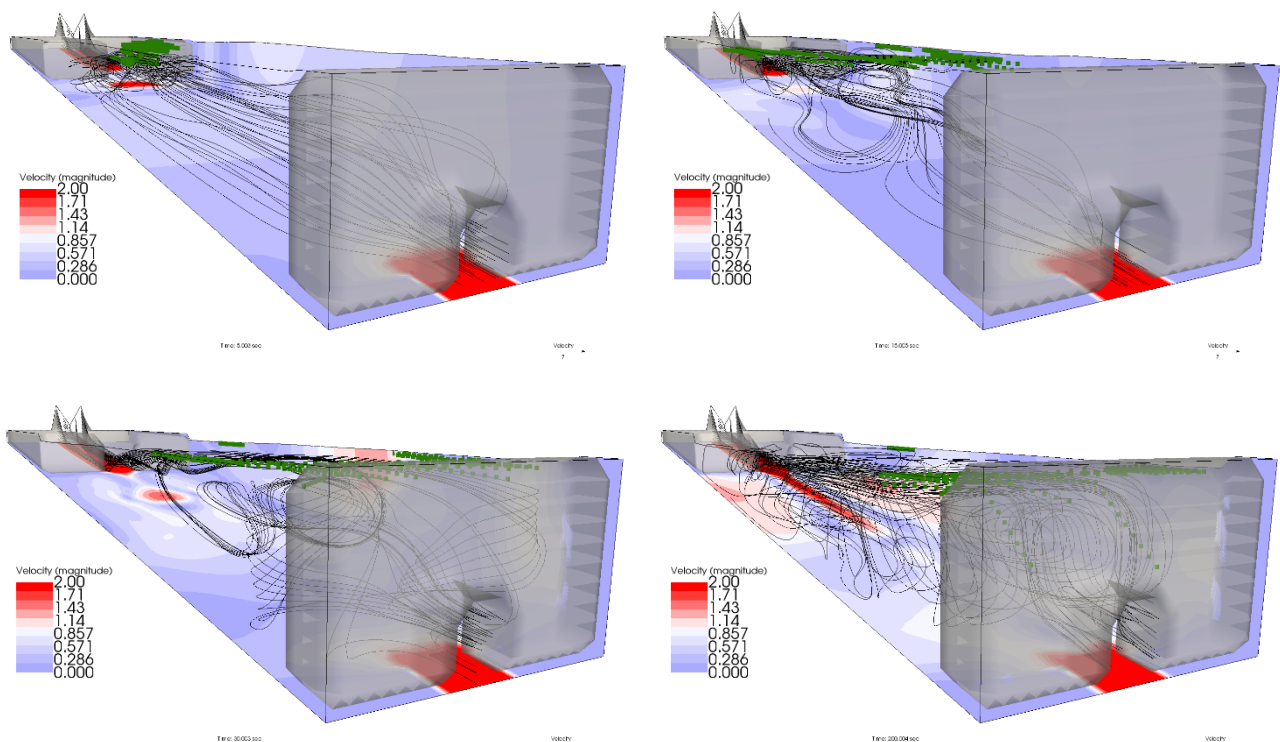


図6 計算結果（流木密度 $900\text{kg}/\text{m}^3$ ）（左上： $t=5\text{s}$ 、右上： $t=15\text{s}$ 、左下： $t=30\text{s}$ 、右下： $t=200\text{s}$ ）（流線、流速の大きさのカラーコンター、流木を可視化し、斜め方向から見たもの）

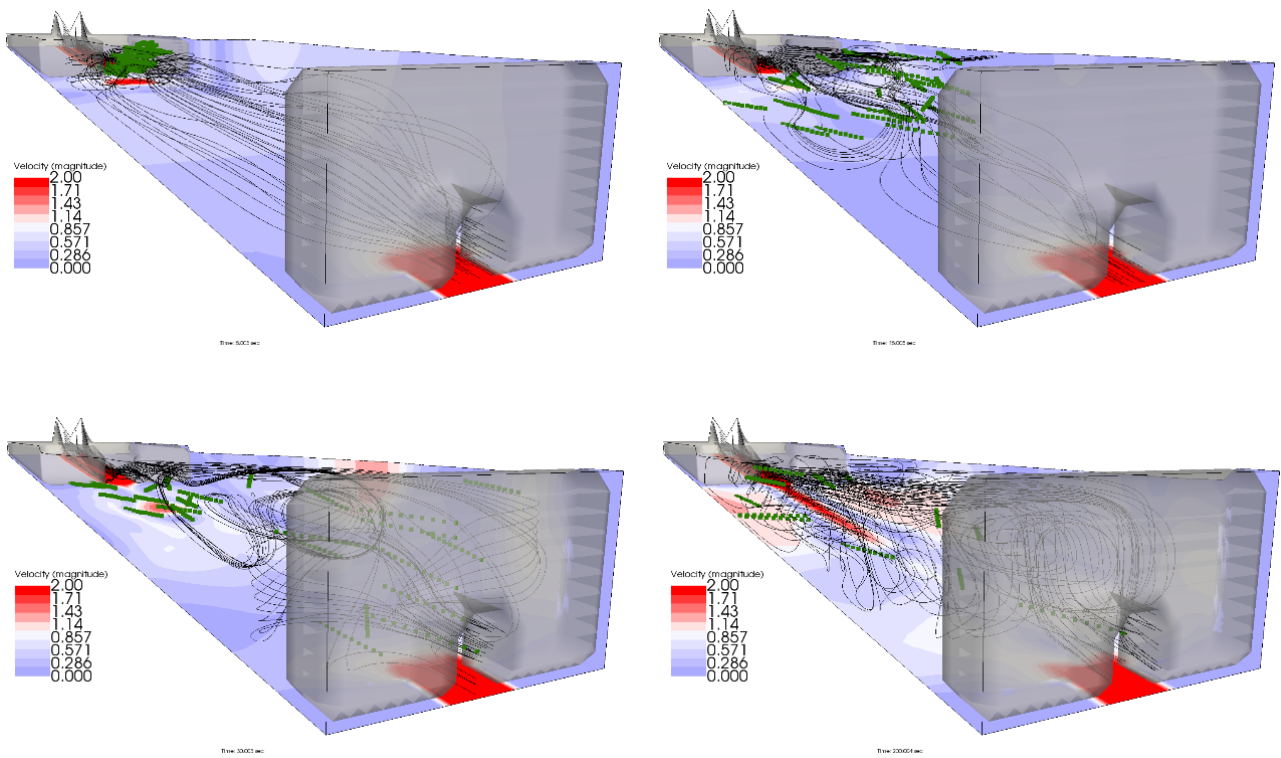


図7 計算結果（流木密度 1000kg/m^3 ）（左上： $t=5\text{s}$ ，右上： $t=15\text{s}$ ，左下： $t=30\text{s}$ ，右下： $t=200\text{s}$ ）
（流線，流速の大きさのカラーコンター，流木を可視化し，斜め方向から見たもの）

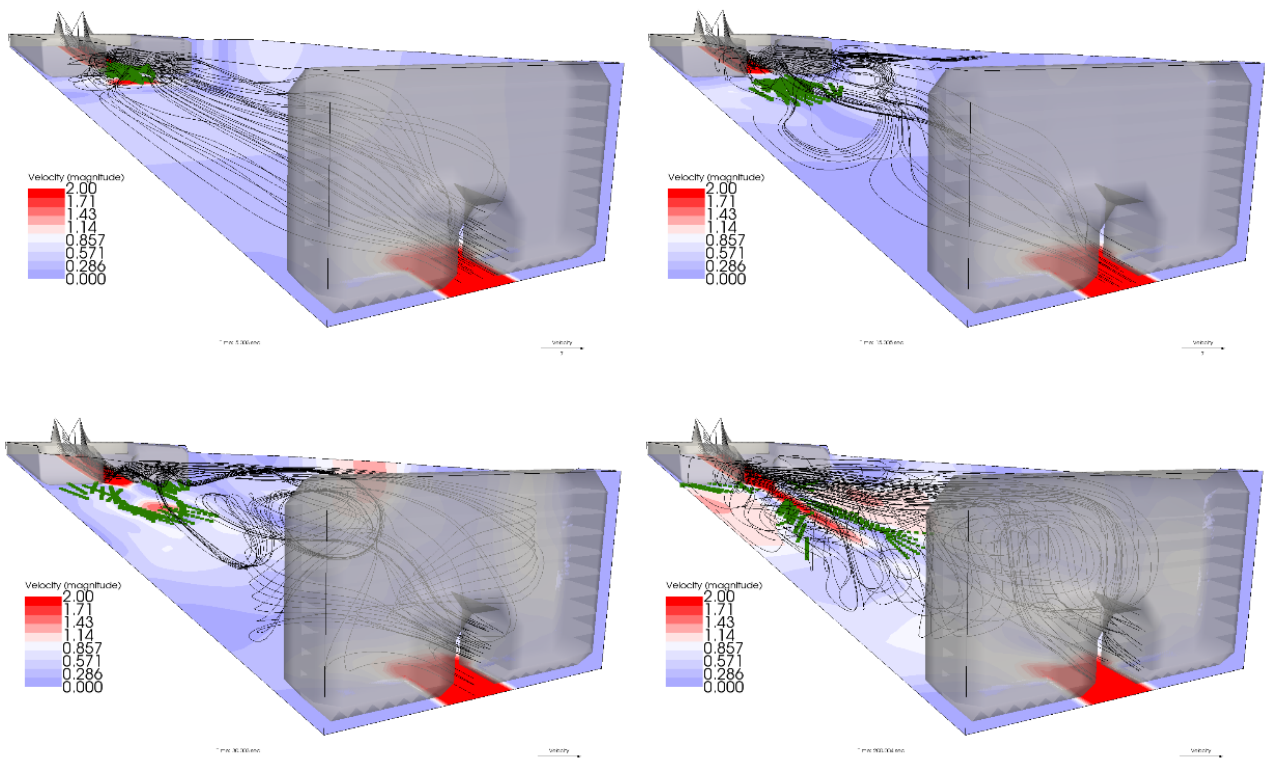


図8 計算結果（流木密度 1100kg/m^3 ）（左上： $t=5\text{s}$ ，右上： $t=15\text{s}$ ，左下： $t=30\text{s}$ ，右下： $t=200\text{s}$ ）
（流線，流速の大きさのカラーコンター，流木を可視化し，斜め方向から見たもの）

流木密度が $900 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ のケース（図6）では、流木は投入後、水中に水没することなく水面を流下していき、 $t=30\text{[s]}$ 付近ではすでに多くの流木がダム堤体付近にまで到達している。また、ゲートを通過する流木は観察されない。

一方、流木密度が $1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ のケース（図7）については、流木は投入とともに水中に侵入し、な流動とともにダム堤体部に向かう。流木の進行速度は図6の場合と大差はないが、 $t = 30\text{[s]}$ 付近では、一部の流木はダムゲートから水流とともに排出されている。実際のダムでは流木がゲートに捕捉されたり、ゲートが閉塞したりする可能性が示された結果といえる。

最後の流木密度 $1100 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ の場合には、投入された流木が速やかに沈降し、底面付近に到達する様子がわかる。また、流木の進行速度が他の2ケースに比較して非常に遅く、 $t = 200\text{[sec]}$ においても、大部分の流木がダム堤体付近までは到達していないことがわかる。これは、流木と底面との摩擦の影響によるものである。

以上の結果から、本研究で開発したダムと沈木を考慮した三次元ソルバーは、ダム湖内の流木の挙動や、それに及ぼす流木密度の影響、さらにはゲートからの流木の排出などの基本的な特性を再現できることが確認された。

（4）裾花ダムにおける検討

■裾花ダムと沈木の観測

裾花ダム（図9）は、長野県長野市の信濃川裾花川に設置されているアーチ式コンクリートダムで、1962年に建設を開始、1969年に完成している。このダムの建設は、1949年に襲った長野市の水害が契機となっている。建設から50年以上が経過し、堆砂が相当進んでいることから、バイパス水路などによる対策も検討されている。



図9 裾花ダム（Wikipedia「裾花ダム」より）

裾花ダムでは、2017年に、堆砂の進行とともに、沈木が洪水調節用ゲート付近に捕捉され、ゲート操作に支障を来たす事態が生じた。このような災害の対策を講じるには、ダム湖内の沈木の挙動を把握することが不可欠である。しかしながら、ダム湖内は一般に水深が河川に比べて大きく、また、透明度が小さいことから、沈木の観測手法の構築は容易ではない。

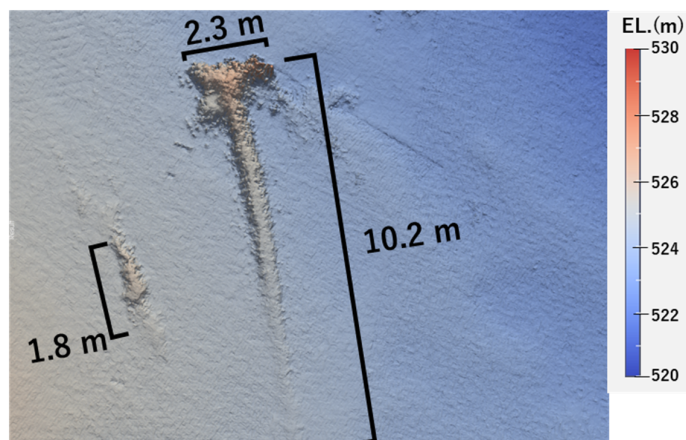


図10 ナローマルチビームソナーによる沈木の観測結果³⁾ (裾花ダム)

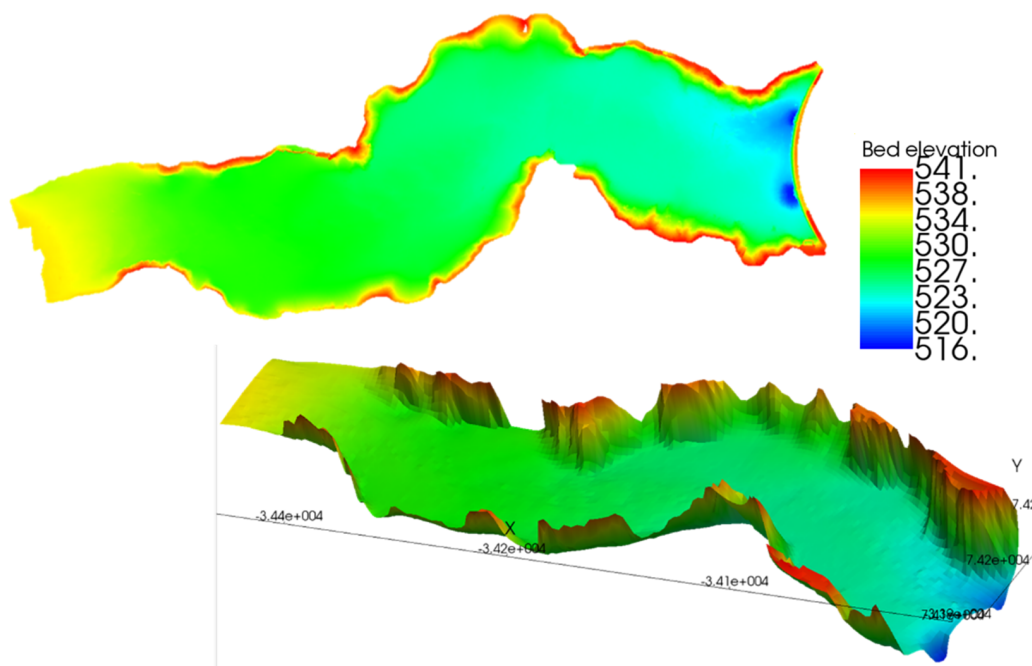


図11 裾花ダムにおける数値シミュレーションの計算対象領域と地形

これに対し、高田ら³⁾は、ナローマルチビームソナー(NMB)を用いた沈木の観測を裾花ダムで実施した。観測結果では、沈木が固定内に横たわる様子や、根の位置、沈木の一部が堆砂に埋もれて隠れている様子などが克明に見てとれる(図10)。この結果は、初めて沈木を直接観測した研究として注目に値する。しかしながら、このような観測は常時行うのは困難であり、ピンポイント的な情報の取得にとどまっているのが現状である。このため、信頼できる数値シミュレーションモデルの構築が待たれるところであり、本研究ではこれを目指す第一歩として、裾花ダムにおける沈木のシミュレーションを試みることにした。

■ 数値シミュレーションの条件

・ 計算モデル

用いる数値シミュレーションモデルは、前節（3）で用いたものと同一である。

・ 地形条件

図11に、計算対象領域の地形の平面図と鳥観図を示す。堤体から上流側に向かっておよそ500mの範囲をシミュレーション対象としている。流れは左から右である。堆砂は堤体から100m上流付近にまで達している。下流側には2個のゲートが存在しており、ゲートの近傍では河床がえぐられていることから、ゲートを通じて堆砂の一部が排出されていることが理解できる。

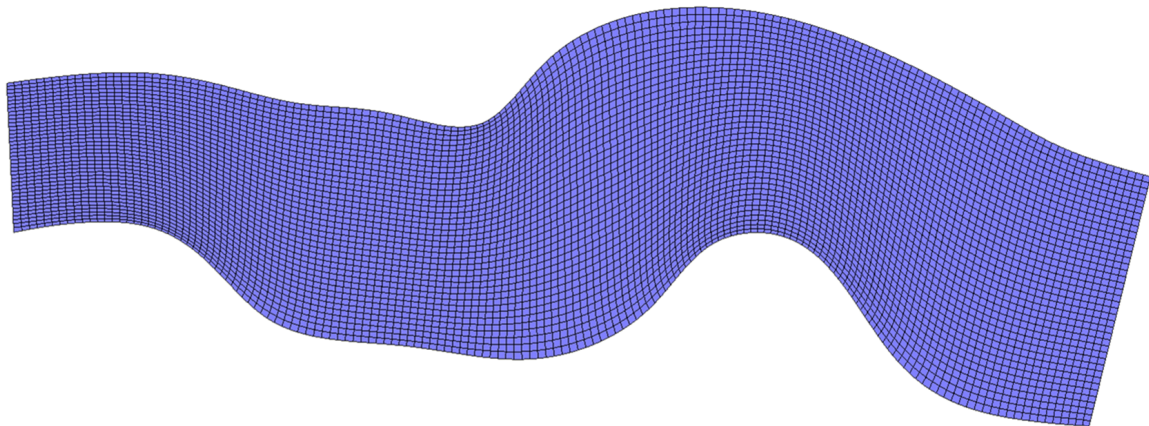


図12 水平面内の計算格子分割

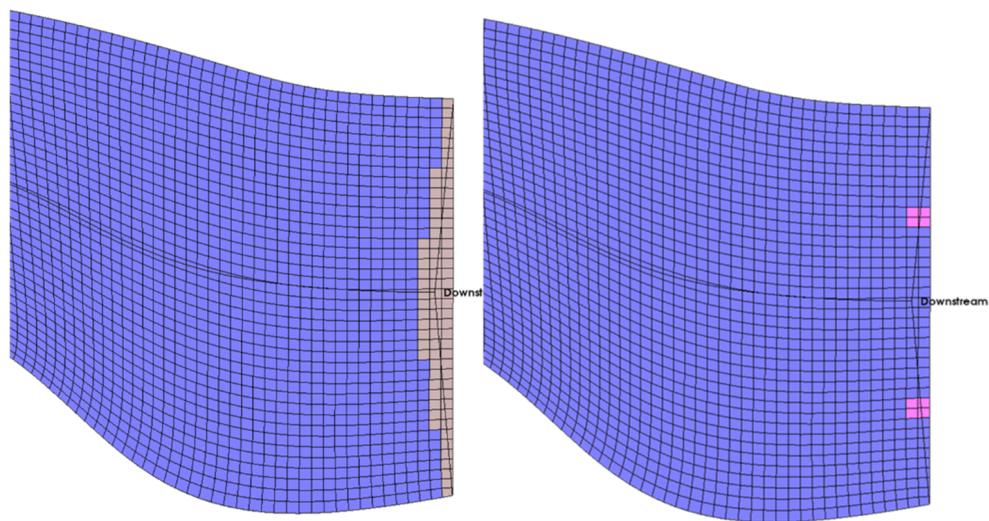


図13 計算格子下流部におけるダム堤体と洪水調整用ゲートの設定
(左：障害物の設定（灰色のメッシュ）、右：アンダーパスの設定（ピンク色のメッシュ）)

・ 計算格子

図12に水平面内の格子分割を示す。計算セル数は主流方向が80、横断方向は20に設定し、鉛直方向の格子分割数は計算時間等を考慮して10層として。一方、図13は下流端におけるダム堤体と洪水調整用ゲートの設定の様子を示している。まず、図13の左図のようにダム堤体を非越流の障害物セルとして設定し、その次に図13の右図のように、ゲートの部分をアンダーパスとして設定し、障害物に穴をあけることでゲートの効果を持たせる。

・流量および粗度係数

ゲートからの流出流量は、裾花ダムの現況を考慮して、合計200[t/s]（一定値）に設定した。底面のマニングの粗度係数は0.02とした。

・計算時間等

計算時間（総計算時間）は7200[sec]とし、20[sec]ごとに計算結果のファイルを出力した。計算時間ステップは、CFL条件を動的に考慮した可変時間ステップとし、この際のクーラン数については、デフォルトの0.13としている。

・流木の条件設定

流木のスケールは、現地調査結果を参考に、長さ15m、直径は0.2mに設定し、流木密度についても現地の樹木の状況を反映して1050[kg/m³]に設定した（沈木条件）。また、比較のため、流木密度を900[kg/m³]としたケース（浮遊条件）でもシミュレーションを実施することとした。また、流木は、計算領域の上流端付近に、空中から一気に投入する方法で設定した。また、1ケースにつき、流木の計算本数は50に設定した。

■シミュレーション結果と考察

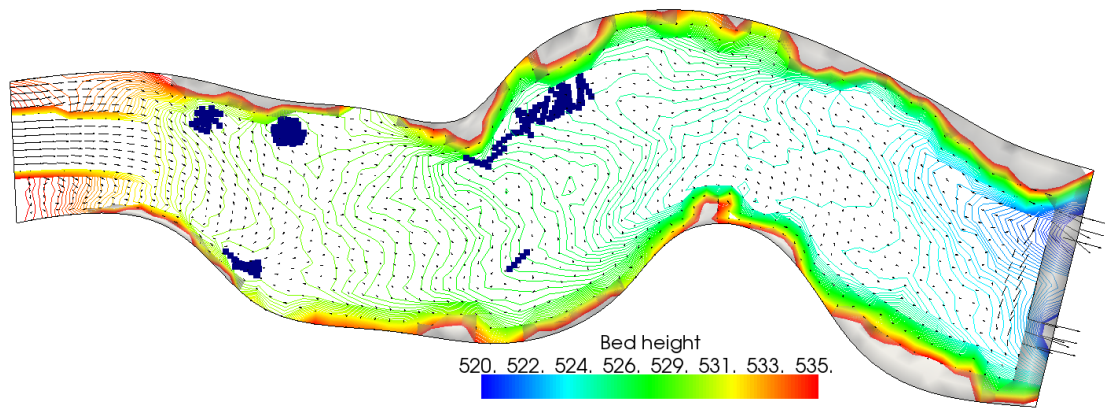
図14は、流木密度が1050[kg/m³]（沈木条件）のケースの数値シミュレーション結果において、木の挙動（瞬間的な位置）と、底面付近の流速ベクトルを、3つの時刻（ $t = 200$ [sec], $t = 1200$ [sec], $t = 4000$ [sec], および $t = 4800$ [sec]）で示したものである。なお、図中のカラーコンターは、河床面地形の標高を表している。

計算結果でまず気づくのは、ダム湖上流部に投入された流木は、ある程度の塊（クラスター）を形成しながら、下流に進行する様子が見て取れる。このような沈木クラスターを形成する理由については、沈木が浮遊して移動する流木に比べて流れの乱れの影響を受けにくく、移動経路がラグランジェ型運動方程式の各項のつり合いにより決定論的に選定されるためと考えられる。また、選定された進行ルートは概ねダム湖の曲がりの内岸側に沿っている様子もわかる。これは、第一種二次流の影響が考えられる。すなわち、遠心力の不均衡により発生するプラントルの第一種二次流は、底面付近の流れの方向を内岸側に偏向させることが知られており、これにより沈木が曲がり部の内岸側を進行しやすくなると推測される。

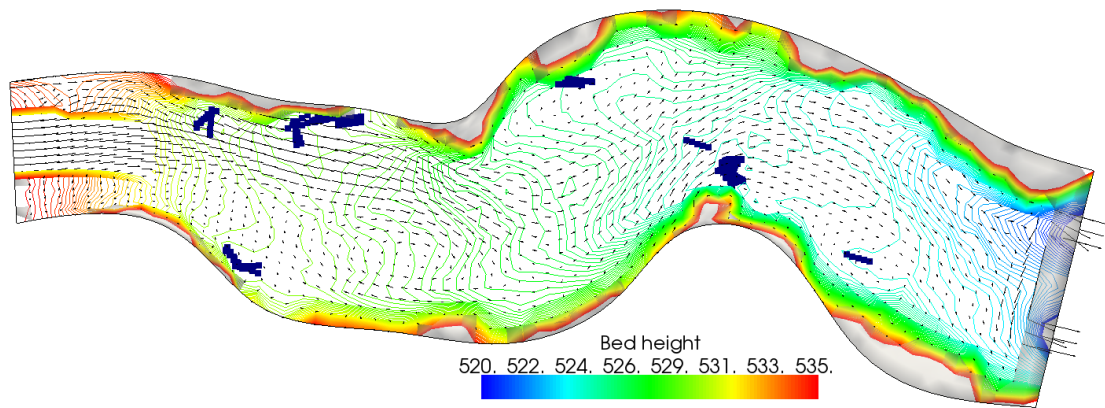
$t = 4000$ [sec]では、一部の沈木が洪水調整用ゲートに到達しており、ゲート付近で捕捉されていく様子が見られる。興味深いのは、沈木の到達するゲートは、左岸側のゲートに偏っているという点である。この理由としては、ゲート付近の堆砂の形状に依存していると考えられる。すなわち、左岸側のゲートの方が堆砂の排出がより進行しており、ゲート付近の洗堀孔が大きく、また、ゲート付近の河床勾配も急になっている。このため、沈木がこの洗堀孔の斜面に沿ってゲート付近に到達しやすいことが一因と考えられる。

$t = 4800$ [sec]まで進むと、一部の沈木がゲートを通過して、ダムの下流側に排出されていく様子もシミュレートされている。その一方で、ゲートまで到達しない沈木も一定数存在し、これらはある程度位置が固定している。このことから、ダム湖内の沈木の一部は、長期間にわたりダム湖内に堆積し続けることが予想される。

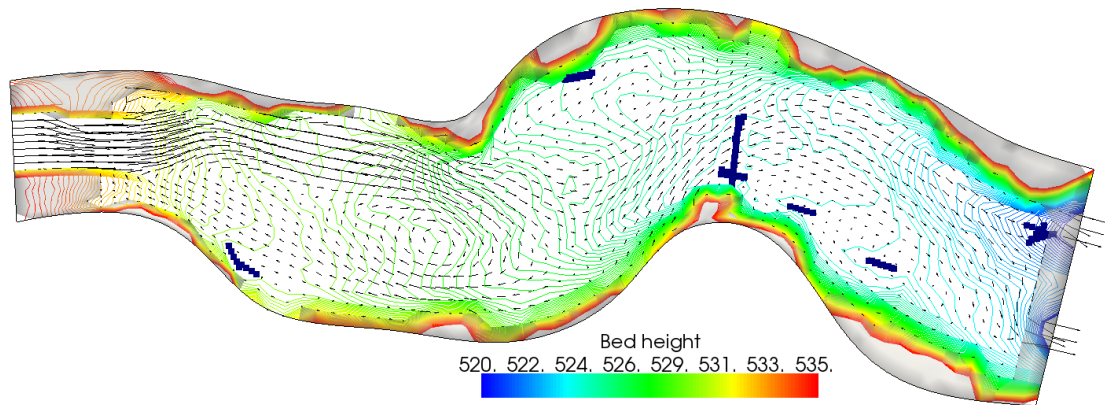
以上のような特性は、裾花ダムにおける沈木の観測結果と矛盾しない結果となっていると考えられるが、観測結果自体が限定的であり、詳細なシミュレーション結果の精度を検証するまでには至っていない。今後、数値シミュレーションモデルの精度の向上のためには、ダム湖内の沈木の観測技術の確立が不可欠となってくると考えられる。



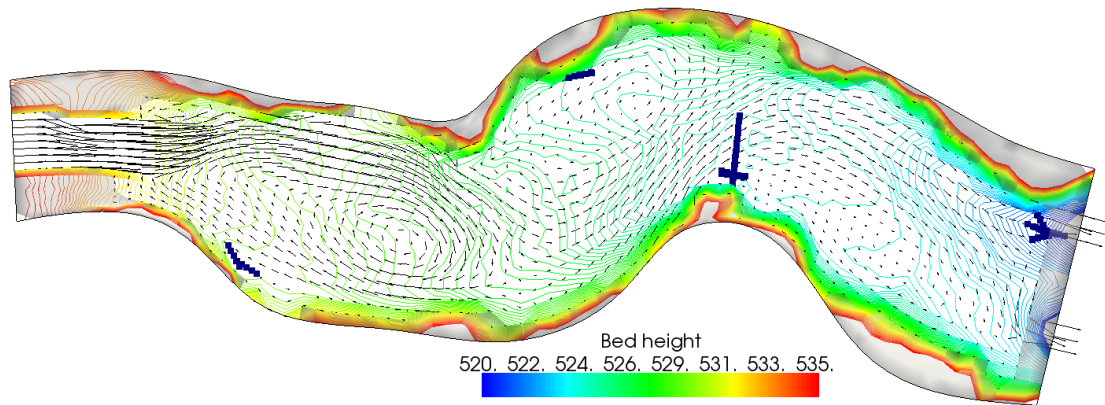
(a) $t = 200[\text{sec}]$



(b) $t = 1200[\text{sec}]$



(c) $t = 4000[\text{sec}]$



(d) $t = 4800[\text{sec}]$

図14 シミュレーション結果の沈木挙動と流速ベクトル（コンターは河床地形を表す，上から $t=200[\text{s}]$, $t=1200[\text{s}]$, $t=4000[\text{s}]$, $t=4800[\text{s}]$ ）

(5) 本章のまとめ

本章では、まずダム貯水池内における沈木の挙動を再現する数値シミュレーションモデルをiRIC NaysCUBEをベースとして実施した。特に、ダムゲートの機能の追加、底面と沈木との摩擦力の再検討、河床勾配の重力の考慮の3つの点について改良を実施し、iRICのGUI上で稼働する改良型NaysCUBEモデルとした。

このモデルを、まずは単純化した矩形領域、一様勾配、単一ゲートの貯水池モデルに適用し、浮遊状態、中立状態、沈木状態の3つ異なる流木密度の下で、流動と流木の動的挙動のシミュレーションを試みた。この結果、沈木状態の流木は、貯水池底面を低速で移動し、浮遊状態あるいは中立状態の流木挙動とは大きく異なる動態となることが確認された。

次に、このモデルを長野県裾花ダムに適用し、沈木の挙動の再現計算を試みた。沈木は現地観測が非常に困難であり、限られた情報のみでの検証ではあったが、本モデルで再現された沈木のシミュレーション結果は、既往の知見と矛盾しない結果となった。

今後、ダム湖内の沈木の研究をさらに発展する上で避けて通れないのは、沈木の観測技術の確立である。今回は、既往のナローマルチビームソナー(NMB)を用いた観測結果との比較を実施した。NMBは流木の状態を捕捉するには十分な解像度を有するが、出水時の動態や常時観測には向かないため、今後の新たな観測技術が待たれる。今回開発した数値解析モデルの実務へ応用を可能にするには、精度の検証が不可欠である。今後登場する新たな観測手法、さらにそれを用いた観測結果の公表を期待し、これらとの照合を行うことで、検証と改良を繰り返し、精度向上を図っていくことが必要と考えられる。

謝辞

本研究の遂行に当たり、京都大学防災研究所教授、角哲也先生、および土木研究所水工研究グループ水理チーム研究員、高田翔也様より、多くのご助言をいただくとともに、資料のご提供をいただきました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：ダム貯水池土砂管理の手引き(案), 2018.
- 2) 高田翔也, 角哲也: 既存ダム水理構造物の信頼性向上のためのリスク評価手法に関する研究, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol.74, No.5, I_1339-I_1344, 2018.
- 3) 高田翔也・小柴孝太・村上桂山・角哲也: ダム貯水池のNMB測量による沈木探査および1沈木発生過程に関する基礎的検討, 河川技術論文集第27巻, 661-666, 2021.
- 4) Kang, T.; Kimura, I. Computational modeling for large wood dynamics with root wad and anisotropic bed friction in shallow flows. *Adv. Water Resour.* **2018**, *121*, 419-431.
- 5) Kang, T.; Kimura, I.; Onda, S. Application of Computational Modeling for Large Wood Dynamics with Collisions on Moveable Channel Beds. *Adv. Water Resour.* **2021**, *152*, 103912. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103912>.
- 6) Kang, T.; Kimura, I.; Shimizu, Y. Numerical simulation of large wood deposition patterns and responses of bed morphology in a braided river using large wood dynamics model. *Earth Surf. Process. Landf.* **2020**, *45*, 962-977. <https://doi.org/10.1002/esp.4789>.