

九州北部豪雨における寺内ダムへの流木流入の実態と ダム下流に対するその意義

Amount and Distribution of Drift Wood Retained in the Terauchi Dam Reservoir by a Severe Rainfall in Northern Kyushu and Its Effect on Downstream River Channel

角 哲也・鈴木湧久⁽¹⁾・小木曾友輔⁽²⁾・小林草平・竹門康弘・カントウッシュ サメ

Tetsuya SUMI, Waku SUZUKI⁽¹⁾, Yusuke OGISO⁽²⁾, Sohei KOBAYASHI, Yasuhiro TAKEMON and Sameh KANTOUSH

(1) 京都大学工学部地球工学科

(2) 京都大学工学研究科都市社会工学専攻

(1) Undergraduate School of Global Engineering, Kyoto University

(2) Department of Urban Management, Kyoto University

Synopsis

By the heavy rain in the northern part of Kyushu in July 2017, many rivers in the Chikugo River system were flooded and caused serious damage. In the Sata River located in the middle basin of the Chikugo River system, a large amount of driftwood flowed into the Terauchi dam due to the intensive flood. If driftwood had flowed into the downstream and had been clogged by the bridge piers, the Sata River might have overflowed in wide area near the bridges. Actually, there was little damage in the downstream area because Terauchi dam had effects of flood control and driftwood trapping. In this study, the quantitative estimating method was developed by using the image processing software, Image J, to estimate driftwood volume and sizes over the reservoir area. In addition, the influence of driftwood trapping by the Terauchi dam on the downstream flood damage reduction was estimated by using two-dimensional hydraulic TELEMAC-2D model.

キーワード: 流木, 貯水池, 流木捕捉量, 流木サイズ, 画像分析, TELEMAC-2D, 橋梁閉塞

Keywords: drift wood, reservoir, wood accumulation volume, wood size, image analysis, TELEMAC-2D, bridge clogging

1. はじめに

平成29年7月九州北部豪雨では、筑後川中流域右岸側の支川上流域で山腹崩壊による大量の流木が発生し、家屋や橋脚に集積することで甚大な被害をもたらされた。7月28日に発表された国土交通省九州地方整備局による流木発生量の速報値は、10河川の合計で210,377m³であり、その内訳は山林が63%、溪畔林

が28%、河畔林が6%であった。国土交通省水管理・国土保全局砂防部による本災害と過去の土砂災害との比較では、これまでの流木発生量は概ね1,000 m³/km²程度以下であるのに対し、本災害では288の溪流中、約半数にあたる134の溪流が1,000m³/km²を超え、最も多い赤谷川の溪流ではその約20倍に達した。流木は橋脚に集積するとともに、今回の豪雨では川から溢れた大量の立木が住宅に押し寄せ被害を大き

【寺内ダムによる流木捕捉状況 (H29. 7. 6 7:00頃)】



Fig. 1 Woody debris accumulation in the Terauchi Dam (upper: spatial distribution in the reservoir, lower left: downstream side of the reservoir, lower right: upstream side of the reservoir)

くした。流木は貯水池内にも滞留し、撤去、処分に多大な時間と費用を要した。

本豪雨で筑後川中流域右岸側の赤谷川や花月川などの支川では、多くの場所で浸水被害が生じたが、寺内ダム下流の佐田川では、一部で護岸損壊の被害があったものの、他の支川に比べると目立った被害がなかった。寺内ダムは1978年完成の総貯水量1,800万 m^3 、高さ83.0mのロックフィルダムで、独立行政法人水資源機構が管理する洪水調節・水道用水・灌漑用水が主の多目的ダムである。豪雨の発生前、寺内ダムは5月から渇水状態にあり、普段に比べ約10m水位が低かった。7月5日7時から6日4時までのダム上流の箸立地点の総雨量は412mmで、5日15時から16時までの時間雨量は106mmを記録した。これによって寺内ダムでは既往最大となる888 m^3/s のピーク流入量を記録した。寺内ダムは事前に低水位であったことが幸いし、ピーク流入時には約99%に当たる878 m^3/s の水を貯留し、ダム下流の河川水位を低減した。寺内ダム下流8.5km地点の金丸橋水位観測所における最高水位は3.50mで氾濫危険水位を下回った。水資源機構は、寺内ダムがなかった場合の金丸橋での最高水位は6.88mと推定しており、被害が発生した可能性

があったとしている。また寺内ダムには、豪雨に伴い大量の流木が流れ込んだ。これらの流木は貯水池内に留まったため、ダムがなかった場合には下流側に流木災害が発生していた可能性もある。貯水池に集積した流木のほとんどは10月末までに撤去されその量は8,400 m^3 に達した。

著者らは寺内ダム貯水池に集積した流木量に注目した。ダムによる流木捕捉量は、重機で実際に引き上げるまで正確には求まらず、通常は流木の処分にかかる費用を決められない。流木の流入後に捕捉量を素早く推定することができれば、災害復旧の計画も立てやすく有益である。本豪雨の直後に、水資源機構ではドローンを飛ばし貯水池全域の流木集積状況を画像に記録した。貯水池に集積した流木は水面に浮いているものが多く、空から確認しやすい。そこで、この空撮画像を用いて流木量を推定する手法の開発に取り組んだ。流木の推定量と貯水池から撤去実際の流木量を比較するとともに、流木のサイズや貯水池内空間分布について考察を行った。また、ダムが無かった場合に想定される河川水位や氾濫域を二次元水理解析モデルを用いて調べ、ダムによる洪水調節と流木貯留の効果を評価した。

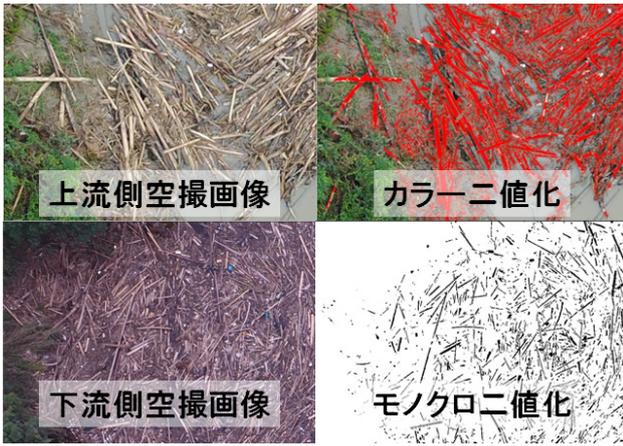


Fig. 2 Examples of automatic extraction of woody materials by color and brightness

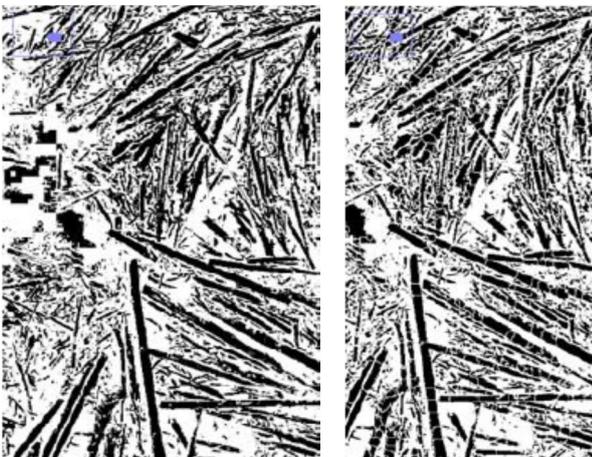


Fig. 3 An example of watershed segmentation of extracted pieces (left: before segregation, right: after segregation)

2. 空撮画像を用いた流木サイズや量の推定

2.1 使用画像

豪雨から約2週間後の平成29年7月19日に、寺内ダム貯水池上空においてドローンによる高度100m以上からの撮影が行われた。流木の大部分は貯水池の上流末端から河道域に集中しており、貯水池上流域の網場に到達した流木もみられたが、網場の下流側で流木は水面にまばらにあるか全く見られない状態であった[Fig. 1]。なお、取水ゲートに流木は到達せず被害はなかった。

貯水池上流域においても特に流木が集中していた2箇所を中心にドローンによる撮影が行われた[Fig. 1]。上流側は主に河道域で、下流側は貯水池上流末端部にあたる。上空からカメラを真下に向けた状態で4,000×3,000ピクセルの画像が計150枚以上撮影された。上流側と下流側では飛行高度が若干異なり、画像に写るドラム缶等のサイズが既知のものを利用

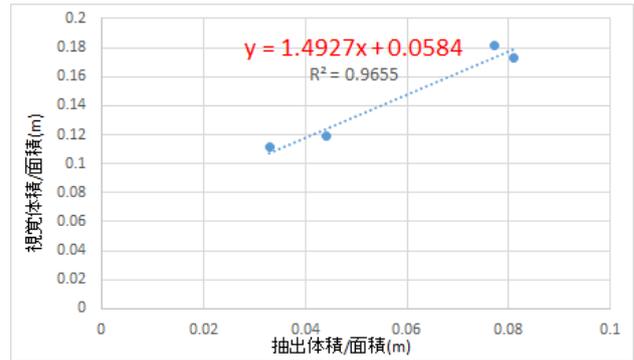


Fig. 4 Relationship in estimated LWD volume between manual (y axis) and automatic (x axis) methods

して推定された解像度は、上流側は28mm/pixel、下流側は40mm/pixelであった。

2.2 流木抽出、流木量推定の手順

パブリックドメインの画像処理ソフトウェアであるImageJを活用した。ImageJは主に生物学の分野で利用されているほか、画像処理を必要とする様々な分野のプロジェクトにおいて広く活用されている。

空撮画像を8bitのモノクロ画像に変換し、輝度閾値を用いて二値化することによって流木の機械的抽出を試みた[Fig. 2]。輝度閾値を設定することで概ね流木の抽出は可能であったが、流木と同時に水域の一部が抽出される場合があった。このモノクロ二値化法で流木を抽出するためには、予め水域を除去する必要がある。

水域を除去することが困難な範囲には、色相によって流木の機械的抽出を試みた結果、色相閾値を30に設定すると、流木だけが抽出された[Fig. 2]。ただし、このカラー二値化法は色相閾値を決定することが難しく、上流側では色相閾値30で流木の流出に成功したが、下流側ではうまくいかなかった。また現時点で下流側の流木が抽出できる色相閾値の決定には至っていない。以上の理由より、寺内ダムでは下流側にはモノクロ二値化法を適用し、上流側ではカラー二値化法を適用した。

モノクロ二値化法もしくはカラー二値化法によって抽出した流木は、個々の流木に分割しサイズの自動測定を行った。画像上で流木が重なっている箇所では、重なり合っている流木群が大きな1本の流木として判定されてしまう。そこでWatershed機能(分水嶺変換)を用いて、流木の重なりを分割した[Fig. 3]。分水嶺変換により流木の重なりを分割できたが、同時に1本の流木が複数に分割されてしまう。これにより流木の長さの推定は難しくなるが、全体の体積の推定に対する影響は少ないと考えられる。Fit Ellipse

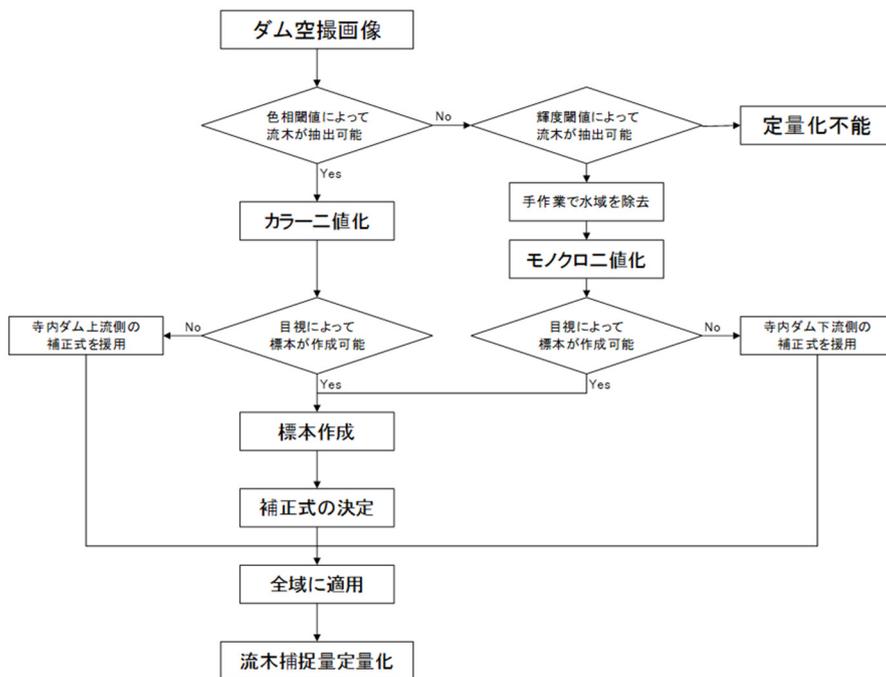


Fig. 5 Flowchart of extracting wood in image and estimating the volume

機能を用いて流木に楕円をフィッティングさせて楕円の長軸と短軸の長さから各流木の長さや幹径を推定し、円錐の形状を仮定し体積を求めた。

上記の機械的抽出では、流木の判定には幾分かのエラーがあることが画像を見て明らかであった。画像から標本を目視で抽出して流木の体積を計測し、機械的抽出による推定の補正式を求めた。画像の輝度閾値が140～170のとき、機械的抽出と目視判断による推定流木量の相関係数が0.95を超えた。当研究ではわずかに水域を抽出してしまうが、過剰抽出がなくなる輝度閾値170を採用した。抽出された流木の体積を流木による被覆面積で割った値（対象エリアに存在する流木を平滑に均した際の厚みを意味する）を物理量として補正を行った。補正式は最小二乗法により、上流側の補正式は $y=1.4927x+0.0584$ 、下流側の補正式は $y=0.5452x+0.0672$ と求められた[Fig. 4]。

画像による流木抽出と体積推定の方法についてフローチャートを示す[Fig. 5]。

2.3 推定流木量

カラー二値化法を適用して求めた上流側の流木捕捉量は $5,630\text{m}^3$ 、モノクロ二値化法を適用して求めた下流側の流木捕捉量は $2,107\text{m}^3$ であり、合計で $7,737\text{m}^3$ の流木量と推定された。平成29年10月末時点で、ダム湖から回収された流木は約 $8,400\text{m}^3$ と報告されており、回収量の約92%と、ほぼ同等の流木量が

推定された。

約 700m^3 過小評価になった原因として、空撮画像からは表面の流木しか抽出できないため、重なった流木を抽出できなかったことや、水深方向に立った流木の長さを実際よりも小さく計測してしまったことが考えられる。また、国土交通省九州地方整備局が平成29年7月28日に発表した佐田川流域の流木発生量の推定量は $19,010\text{m}^3$ であることから、佐田川流域で発生した流木の4割強が寺内ダムに到達し、残りはダム貯水池より上流側河道内で捕捉されたとみられる。

独立行政法人水資源機構筑後川局が平成29年7月28日に発表した寺内ダムの流木捕捉量の速報値は約 $10,000\text{m}^3$ であった。この速報値は流木が捕捉されている面積に、過去の出水時のデータに基づくダム貯水池による単位面積当たり流木捕捉量を掛けることによって求められた値である。回収量と比べると過大評価であるが、速報値としては良い値である。

2.4 流木サイズ

分水嶺変換を行ったために機械的抽出からは流木の正確な長さを求めることはできない。目視判定のデータより、上流側と下流側の長さや幹径の度数分布を表した。上流側は4枚の標本画像から計824本、下流側は4枚の標本画像から計547本の流木を計測した。

長さのピークは上流側が1.5-2m、下流側は1-1.5m、

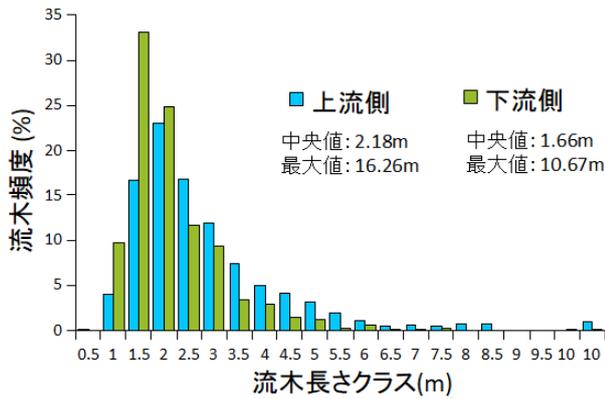


Fig. 6 Frequency distribution of length of wood accumulated in the Terauchi Dam

長さの中央値は上流側が2.18m、下流側は1.66mであることから、上流側で長い流木が多いことが分かった[Fig. 6]. 長さの最大値は上流側が16.26m、下流側は10.67mであった。長さが5mを超える流木の割合は上流側が7.4%、下流側は2.2%であり、長さが3mを超える流木の割合は上流側が27.3%、下流側は11.3%であった。

幹径は上流側も下流側も0.15-0.25mでピークを示し、幹径の中央値は上流側で0.21m、下流側で0.22mであり、上下流の大きな違いは認められなかった。一方、最大値・幹径が0.5mや0.3mを超える流木の割合は下流側に比べ上流側の方がやや大きかった。

以上をまとめると長く太い流木は上流側で捕捉されやすく、短い流木や折れた流木は下流側まで辿り着きやすいということがわかる。河川においては流木全体や幹が漂流する場合よりも、折れた枝が漂流するケースが多いという報告とも一致している。

2.5 流木の縦断分布

空撮画像から50箇所の100m³のエリアを抽出し[Fig. 7], それぞれ機械抽出により流木捕捉量を求めた。上流からの距離をもとに縦断分布図を作成した結果、上流から下流に向かって流木捕捉量が減少傾向にあった[Fig. 8]. 長く太い流木は上流側で捕捉されやすく、短い流木や折れた流木は下流側まで辿り着きやすいためと考えられる。ただし、上流からの距離が0~900mにあるポイントでは、流木捕捉量のばらつきが大きかった。

幹径<20cm, 20-40cm, >40cmの3区分に分けると、幹径が40cmより大きい流木は、全体の体積が大きいエリアに多く存在した。一方、幹径が20cm以下の流木量はエリアごとの増減が比較的小さかった。

上流側の川幅が狭まるエリアでは、流木捕捉量が

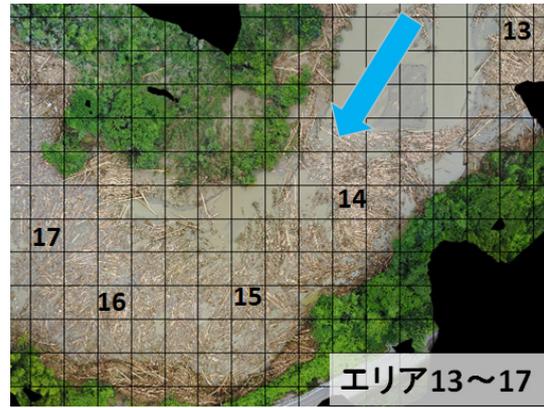


Fig. 7 Grid selection for analyzing longitudinal distribution of wood in the upper-side of reservoir

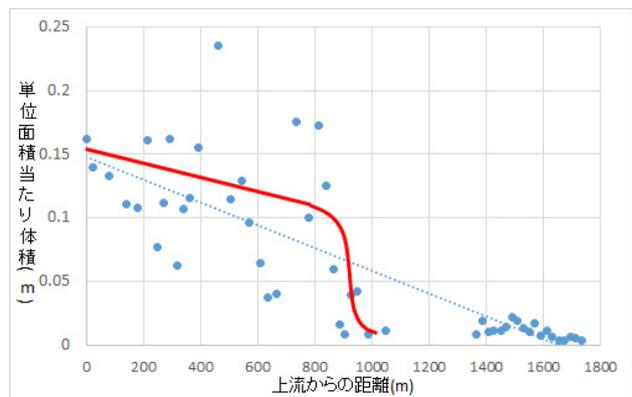


Fig. 8 Longitudinal distribution of wood

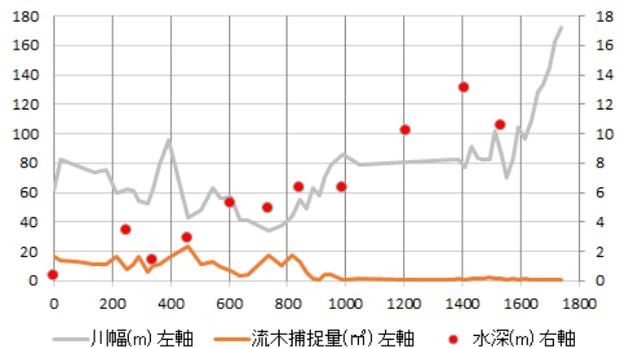


Fig. 9 Relationship between channel width, water depth, and wood volume

大きかった[Fig. 9]. ただし、川幅が狭まるにも関わらず、流木捕捉量は小さいエリアもあった。また、下流側では網場に近づくにつれ川幅が広がる傾向にあるが、下流側の流木捕捉量はほぼ一定であった。上流側の3つの大きなカーブ内に位置するエリアについて、河道の曲率を求めたが、曲率の大きいエリアの流木捕捉量は大きいという傾向は見られなかった。水深が小さいエリアほど流木捕捉量が大きい傾向に

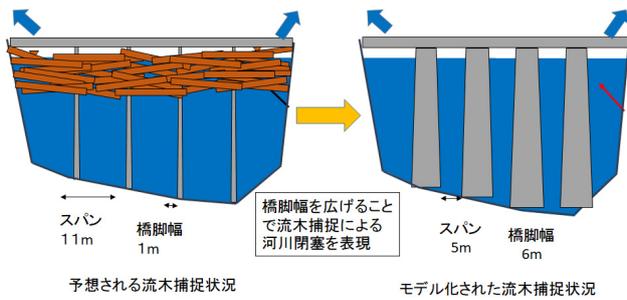


Fig. 10 Modelling of bridge clogging by wood accumulation in the numerical simulation

Main Parameters	Model
メッシュサイズ	3 m
境界条件	Open boundary
粗度係数 (Strickler coefficient)	$27 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$
計算時間	61200 sec
間隙率	0.1
透水係数	1.0×10^{-6}

あった。

また1K800地点では、流木捕捉が見られなかった。1K800地点の水深の横断測量図を見ると、左岸側に比べて右岸側の水深が大きくなっていることがわかる。これには1K800地点付近で左岸側から流入する支流の影響があると推測される。支流との合流によって流速が大きくなり、この付近に流木が捕捉されなかったと考えられる。

以上より、上流側の水深の浅い地点に長く太い流木が詰まりやすく、下流側の網場付近には短い流木や折れた流木が浮かんでいると推察される。

3. ダムによる流木捕捉効果の評価

3.1 想定した状況

本豪雨では佐田川流域では被害はほとんどなかったため、ダム貯水池による流木捕捉がどれくらいの効果があったのかは分からない。そこで、数値計算により①実際の寺内ダムによる洪水調節が行われた場合、②ダムがなく(=洪水調節が行われない)橋梁に流木の集積がない場合、③ダムがなく橋梁に流木の集積がある場合の3通りについて、水位上昇と氾濫域を比較した。なお、ダムによる流木貯留効果は、②と③の差分を主に評価した。

3.2 計算条件

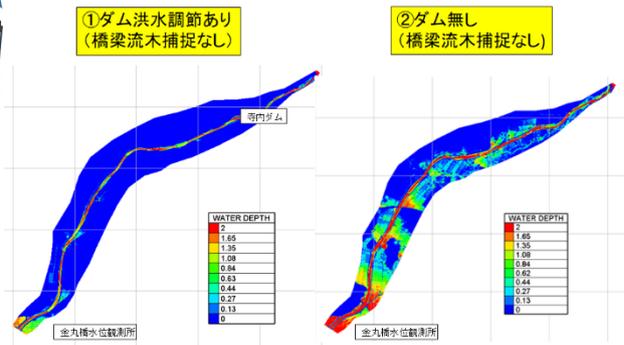


Fig. 11 Simulation results (left: with flood control, right: without control)

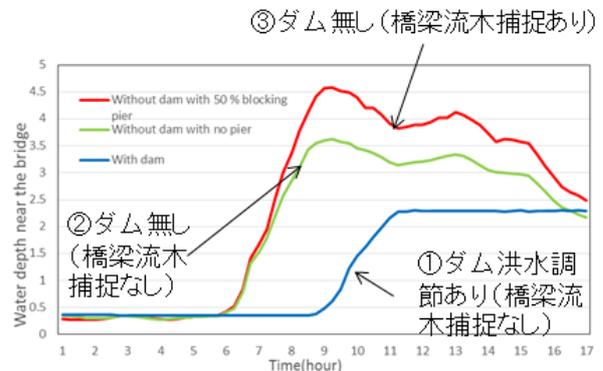


Fig. 12 Simulation results (water level change at downstream bridge in different scenarios)

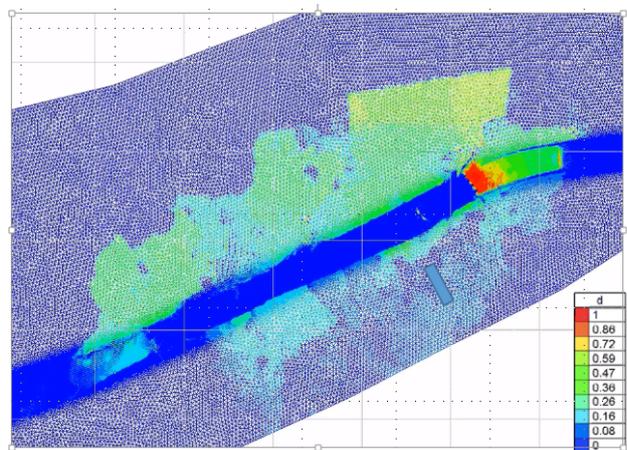


Fig. 13 Difference in inundation depth between with and without woody accumulation at the bridge

数値計算にはÉlectricité de France (EDF)が開発したTELEMAC-2Dを用いた。このモデルは、非構造格子(三角形)に基づく有限要素法を用い、浅流方程式を解き二次元のシミュレーションを行うのが特徴である。対象は寺内ダム下流の佐田川流域で、上流端はダム直下、下流端は本流筑後川との合流部とした。

地形データは、レーザープロファイラで得られた陸域のDEMと、河川横断測量のデータを組み合わせて作成した。モデルで用いた主要なパラメータをTable 1に示す。上流端における流量は、実際の寺内ダム放流量のハイドログラフ(①)、または寺内ダム流入量のハイドログラフ(②と③)を与えた。

寺内ダムから約3km下流にある屋形原橋に流木が集積することを想定した。予想される集積状況は、水面近くに流木が横に積み重なるものであるが、計算上は橋脚幅を広げることで河道の断面積を減らした。実際は橋脚幅が1mでスパンが11mのところ、集積した状況では橋脚幅を6m、スパンを5mと想定した[Fig. 10].

3.3 計算結果

洪水調節がない場合、あった場合に比べて(いずれも橋梁での流木集積なし)、屋形原橋におけるピーク水位は約1.5m高く、複数個所で越流が起こり、その結果両岸から200-300mの範囲で浸水が起こり、最大で2mの水深が生じた[Fig.11, 12].

洪水調節がなく橋梁に流木集積がある場合、流木がない場合に比べて、屋形原橋におけるピーク水位は約1m高く、浸水深が最大で1m大きくなった[Fig. 13].

以上の結果は、本豪雨において寺内ダムによる洪水調節と流木貯留の効果は大きかったことを示すものである。

4. 結論

本研究では寺内ダム貯水池の上空で撮影された画像を用いて、貯水池に集積した流木の定量評価を試みた。画像からの個々の流木の機械的抽出、短径と長径を基にした体積の推定により、貯水池全体の流木量を推定したところ、実際の流木撤去量とほぼ同じ値を得ることができた。水面下に潜った流木の部分があり、それが過小評価になった。貯水池に流入直後に素早く体積量を推定するのに本研究の手法が有効であることが示された。画像解析により流木は貯水池の上流域に集中し、さらにその中でも上流側に長い流木が多く存在した、などの流木の縦断分布も明らかとなった。

本豪雨で筑後川支流の多くが氾濫により甚大な被害を受けたが、寺内ダムを有する佐田川流域だけ目立った被害がなかった。TELEMAC-2Dの数値計算により、寺内ダムがなかった場合(洪水調節なし、流木が橋梁に集積)を想定し、河川水位や氾濫域の検討を行った。その結果、洪水調節がなかった場合河川

のピーク水位は1.5m高く、越流して両岸200-300mに渡って浸水し、流木が集積するとさらに1m水位が高まり、氾濫の度合いが増すことが示された。このことは、本豪雨において寺内ダムによる洪水調節と流木貯留の効果が高かったことを示すものである。

謝 辞

独立行政法人水資源機構寺内ダム事務所の方々には、現地を案内していただき、また画像をはじめとするデータや本豪雨の情報をいただき厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 気象庁(2017) : 平成29年7月九州北部豪雨について。
- 気象庁(2017) : 平成29年7月5日から6日に九州北部地方で発生した豪雨の命名について。
- 倉橋実・角哲也・永谷言・川村育男・石田裕哉・水野直弥(2017) : ダム貯水池における流木発生特性に関する研究, 河川技術論文集, 第23巻, pp.317-322.
- 国土交通省九州地方整備局(2017) : 平成29年7月九州北部豪雨に伴う流木発生量(速報値)について。
- 国土交通省水管理国土保全局砂防部(2017) : 平成29年7月九州北部豪雨と既往災害の発生流木量の比較。
- 小松利光・山本晃一・財団法人河川環境管理財団(2009) : 流木と災害発生から処理まで, 技法堂出版, pp.16-20.
- 総務省(2016) : ドローンの現状について。
- 手計太一・佐々木謙吾・角哲也・竹門康弘・サメカントシュ・小林草平・藤田士郎・森田賢治(2016) : 流木動態の解明手法の提案とH27年連携排砂時における黒部川下流域への適用, 河川技術論文集, 第22巻, pp.493-498.
- 独立行政法人水資源機構(2017) : 平成29年7月九州北部豪雨に対する水資源機構の対応。
- 独立行政法人水資源機構筑後川局(2017) : 平成29年7月九州北部豪雨における寺内ダムの流木処理について。
- 独立行政法人水資源機構筑後川局・国土交通省九州地方整備局筑後川ダム統合管理事務所(2017) : 平成29年7月5日・6日の記録的豪雨における寺内ダムの防災操作の効果について。
- 三浦耕太・塚田祐基(2016) : ImageJではじめる生物画像解析, 学研メディカル秀潤社, pp.8-11.

南まさし・二瓶泰雄・西島拓駿・片岡智哉・日向博文（2016）：最上川における漂流ごみ全体及び流木輸送量の把握と漂流ごみ対策技術の検討,河川技術論文集, 第22巻, pp.499-504.

吉田登（2017）：ダム流木に関する考察と流木量推

計の試み, 和歌山大学災害科学教育研究センター研究報告, 第1巻, 第1号.

（論文受理日：2018年6月13日）