

空撮画像を用いたダム貯水池の 流木捕捉量の推定手法の開発

DEVELOPMENT OF A METHOD TO ESTIMATE VOLUME OF DRIFTWOOD TRAPPED BY RESERVOIRS USING AERIAL PHOTOS

鈴木湧久¹・小林草平²・角哲也³・竹門康弘³・サメ カントシュ³

Waku SUZUKI, Sohei KOBAYASHI, Tetsuya SUMI, Yasuhiro TAKEMON, Sameh KANTOUSH

¹学生会員 京都大学工学部地球工学科土木工学コース (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²非会員 京都大学防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 京都大学防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

One of the characteristics of the severe rainfall event in north Kyushu July 2017 was damages by a huge amount of driftwood deposited inside and outside the channel. We developed a method to quickly estimate the volume of driftwood accumulated in reservoirs using aerial photos taken at the Terauchi Dam. We automatically extracted woody pieces in the images based on color and brightness by using ImageJ. Our estimate of the volume of driftwood was almost equal to an actual volume of wood, which was removed from the reservoir a few months later of the event. Size and density of driftwood tended to be greater in the upstream than the downstream. The upstream section of the reservoir was shallow and narrow, which might have promoted a trapping effect of reservoir.

Key Words : driftwood, reservoir, wood accumulation volume, wood size, image analysis, aerial images

1. はじめに

近年、局地的な豪雨が増加しており、それらに起因する大規模洪水時に大量の流木がダム貯水池に流入し、ダム管理上の大きな課題となっている。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、流出して橋脚に堆積して河道閉塞が生じ、氾濫が引き起こされるなどといった甚大な被害をもたらした。国土交通省九州地方整備局が7月28日に発表した流木発生量の速報値は、10河川の合計で 210,377m³ であり¹⁾、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解析によると、過去の災害における流木発生量は概ね 1,000m³/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 倍に達するものがあることから、過去最大級の流木災害が生じたと言えるとしている²⁾。

本豪雨の際、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、目立った被害がなかった。寺内ダムは、福岡県朝倉市に 1978 年に完成した、主に洪水調節・水道用水・灌漑用水の多目的ダムであり、独立行政法人水資源機構が管理する高さ 83.0 m、総貯水量 1,800 万m³ のロックフィルダムである。寺内ダムは下流の防災に大きく貢献したと言える。

また寺内ダムには、豪雨に伴い大量の流木が流れ込んだ。これらの流木はダム貯水池内で捕捉されたため、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がある。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、流木の処分にかかる費用が決定できない。そのため、引き上げ作業を行う前に流木捕捉量を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。そこで、本豪雨の直後に水資源機構が記録した貯水池に捕捉された流木が写るドローンによる空撮画像を用いて流木捕捉量を推定する手法の開発に取り組んだ。また、流木の長さや幹径と、貯水池内縦断分布特性についても検討した。



図-1 寺内ダムにおける流木の集積状況（上：集積範囲，下左：貯水池下流，下右：貯水池上流）

2. 流木捕捉量の推定手法

(1) 空撮画像

本豪雨から約 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、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見られたが、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り（図-1），取水ゲートに流木は到達せず被害はなかった。撮影箇所の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（図-1）。4,000×3,000 ピクセルの画像が 150 枚以上撮影された。上流側と下流側では飛行高度が異なり、空撮画像に写る長さが既知のドラム缶を利用して求めた 1 ピクセル当たりの長さは上流側が 28mm，下流側が 40mmであった。

(2) 流木の抽出

流木の長さや幹径を空撮画像から読み取るために、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³⁾。

空撮画像を色相閾値を用いて二値化することによって

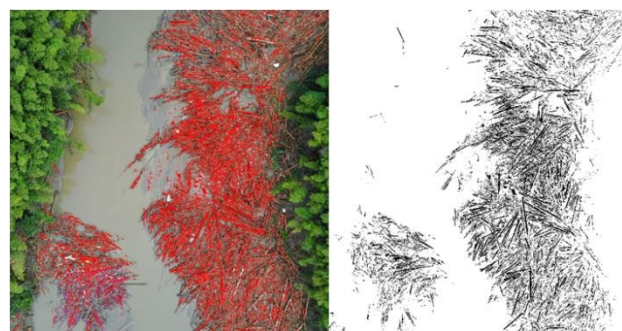


図-2 カラー二値化による流木の抽出

流木の機械的抽出を試みた。上流側の空撮画像においては色相閾値を 42° に設定すると流木だけが抽出された（図-2）。ただし、このカラー二値化法は色相閾値の決定が困難で、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。色相閾値を決定することが困難な画像は、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（図-3）。輝度閾値を用いた二値化によって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も抽出してしまった。そのためこのモノクロ二値化法で流木を抽出する場合には、予め水域を除去する必要がある。

以上の理由により、寺内ダムでは上流側にカラー二値化法、下流側にモノクロ二値化法を適用した。他のダムに適用する際は、色相閾値を決定できる場合にはカラー二値化法、色相閾値が決定できないが水域の除去が容易な場合にはモノクロ二値化法を用いることとする。

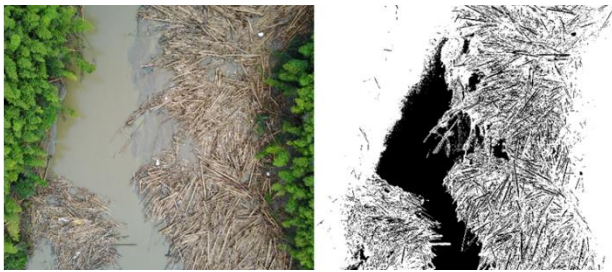


図-3 モノクロ二値化による流木の抽出

(3) 流木捕捉量推定の手順

モノクロ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長さや幹径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。その場合体積が非常に大きな値となってしまう、正確な値を求めることができない。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（図-4）。分水嶺変換とは、画像の輝度勾配を山と谷に見立て、その分水嶺で対象を分割する手法である³⁾。これにより複数の流木の重なりを分割することができたが、同時に1本の流木が複数に分割されてしまう場合があり、個々の流木の長さの推定は難しくなる。

対象に楕円をフィッティングさせる Fit Ellipse 機能を用いると、楕円の長軸と短軸の長さを自動計測できる³⁾。長軸は流木の長さ、短軸は幹径とほぼ一致するため、円柱を仮定して流木の体積を求めた。分水嶺変換では長軸が分割され短軸はそのままの場合が多く、全体の体積の推定に対する影響は小さいと考えられる。

空撮画像から二値化によって流木だけを抽出しようとすると個々が一回り小さく判定される場合が多いため、標本を抽出して流木の体積を手動で計測し、それらの補正式を求めた。また標本から得られた体積との相関から、二値化の際の輝度閾値を決定した。モノクロ二値化の場合は、輝度閾値 140～170 では、機械的抽出と目視判定による流木量の相関係数が 0.95 を超えた。また、160 以下の輝度閾値を用いると水域の抽出による過剰抽出が生じる箇所があることから、輝度閾値 170 を採用した。カラー二値化の場合は、色相閾値は 図-5 を参考に、正確に流木が抽出される値を選んだ。

それぞれの流木量を被覆面積で割った値 V （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）を比較して最小二乗法により下記の補正式が求まった。

上流側： $V_{目視} = 1.4927V_{自動} + 0.0584$ （図-6）

下流側： $V_{目視} = 0.8141V_{自動} + 0.0623$ （図-7）

なお、他のダムに適用する場合には、寺内ダムと同様にカラー二値化あるいはモノクロ二値化により、標本との相関によって色相閾値や輝度閾値を決定するが、標本が作成できない場合は寺内ダムで用いた色相閾値や輝度

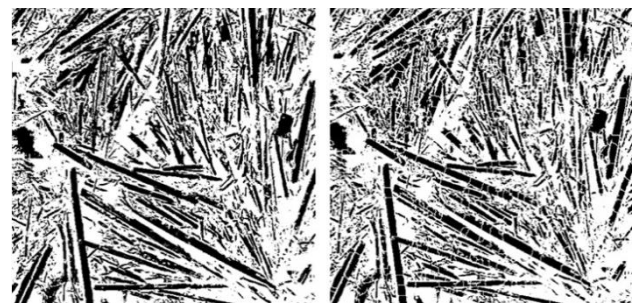
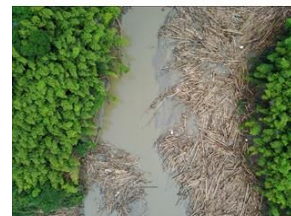


図-4 分水嶺変換前（左）と後（右）

元画像 抽出された流木（色相閾値30）



抽出不足（色相閾値15）



過剰抽出（色相閾値45）

図-5 色相閾値の決定

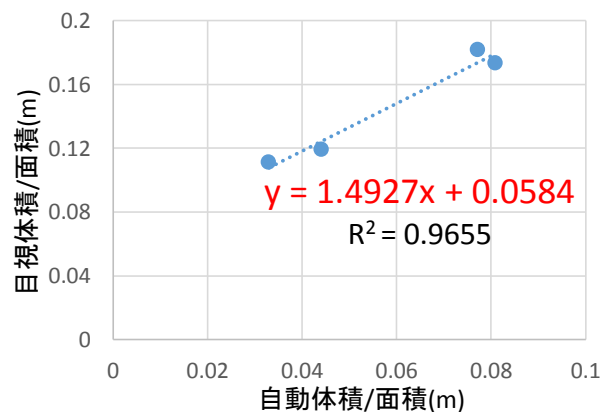


図-6 上流側の補正式

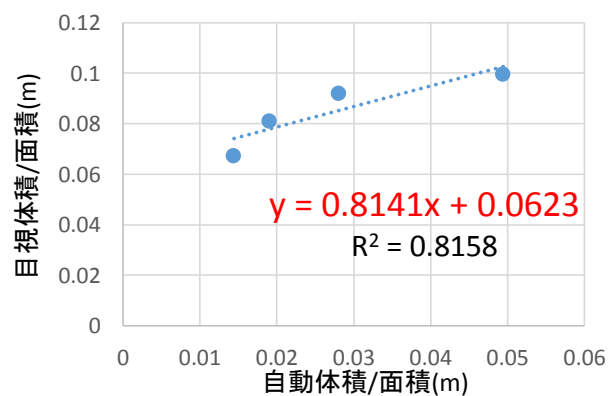


図-7 下流側の補正式

閾値とその補正式を援用する。以上の流木捕捉量推定の手法についてフローチャートを示した（図-8）。

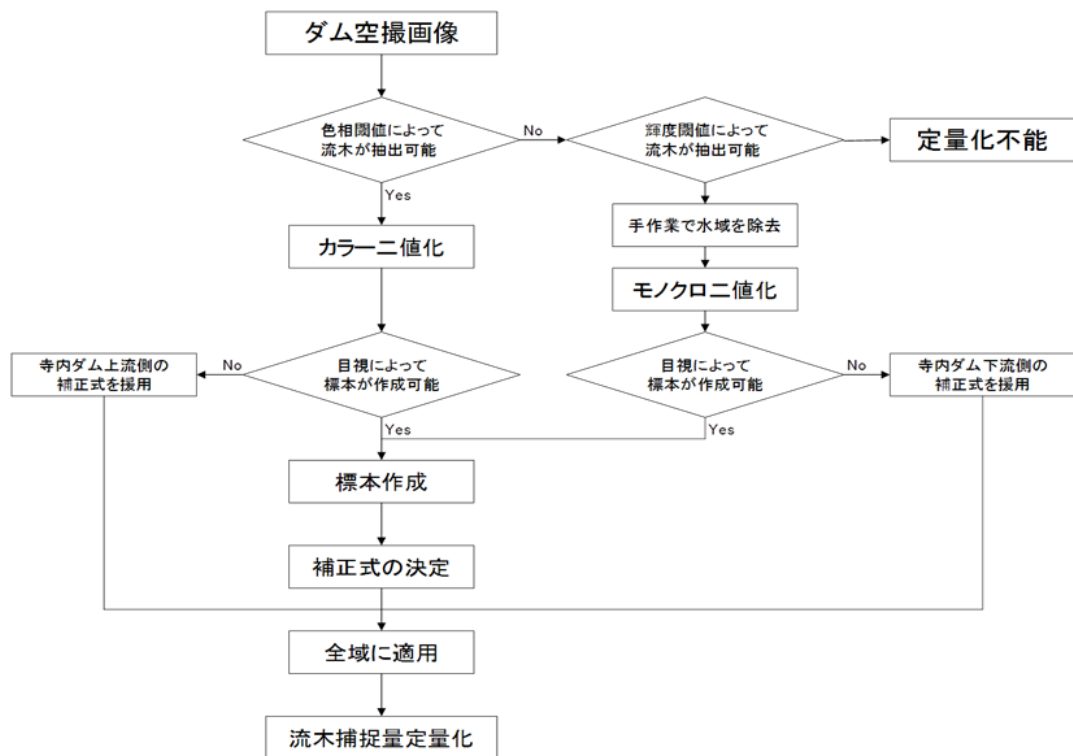


図-8 流木捕捉量推定のフローチャート

3. 流木捕捉量推定の結果

(1) 寺内ダムの流木捕捉量

2. で示した流木捕捉量の推定手法により、本豪雨時の寺内ダムの流木捕捉量を推定した。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 $2,103\text{m}^3$ であり、合計で $7,733\text{m}^3$ 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 92% と、ほぼ同等の流木量が推定できた。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¹⁾、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の河道内で捕捉されたとみられる。

なお、独立行政法人水資源機構筑後川局が 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⁴⁾。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) 寺内ダムが捕捉した流木の長さ・幹径

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・幹径の度数分布を表した(図-9、図-10)。標本から上流側は 824 本、下流側は 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、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わかった。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 または 0.3m を超える流木の割合は下流側に比べ上流側の方が大きかった。

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。この結果は、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、という南らの報告⁵⁾と一致している。

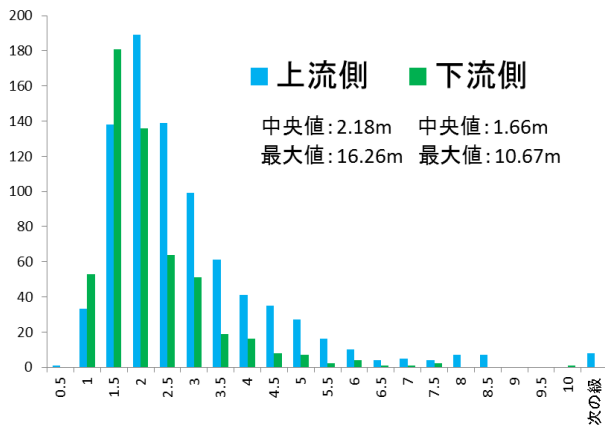


図-9 寺内ダム流木長さの度数分布

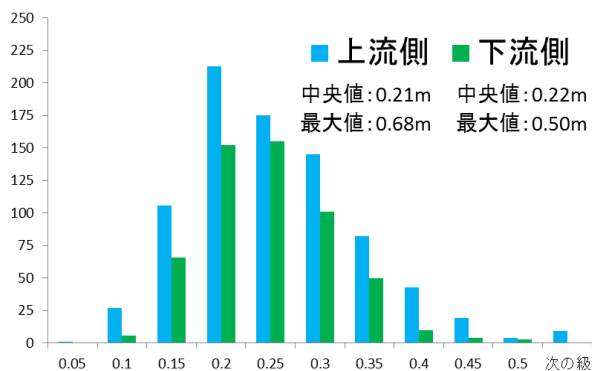


図-10 寺内ダム流木幹径の度数分布

(3) 他のダムへの適用と結果

2. で示した流木捕捉量の推定手法を、黒部川出し平ダムの空撮画像(図-11)に適用した。カラー二値化法によって流木を抽出し流木捕捉量を求めた結果、 2370m^3 となった。回収量 $2,943\text{m}^3$ の約 81% の流木捕捉が推定された。寺内ダムでの場合に比べ精度が下がってしまった原因として、画像が粗いため目視によって標本を作成する工程を行うことができず、同じくカラー二値化法を用いた寺内ダム上流側での補正式を援用せざるを得なかったことが考えられる。

4. 寺内ダムにおける流木捕捉特性

(1) 流木捕捉の縦断分布

空撮画像から 50 箇所の 100m^2 のエリアを抽出し(図-12)、それぞれ機械的抽出により流木捕捉量を求め、上流からの距離をもとに縦断分布図を作成した(図-13)。青い点線が示すように、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。この傾向は 3(2)で示した、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



図-11 出し平ダム空撮画像

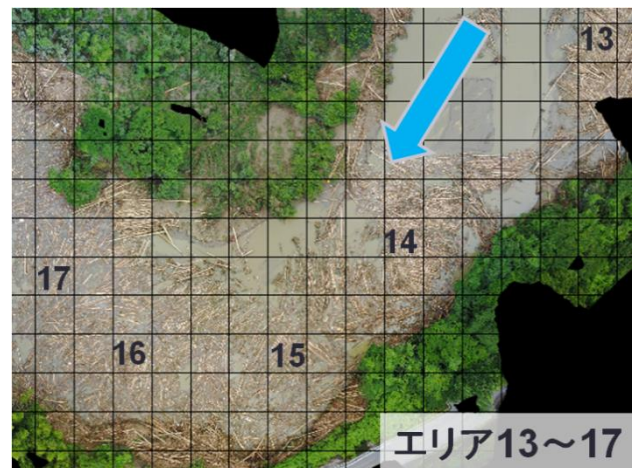


図-12 エリア抽出の例

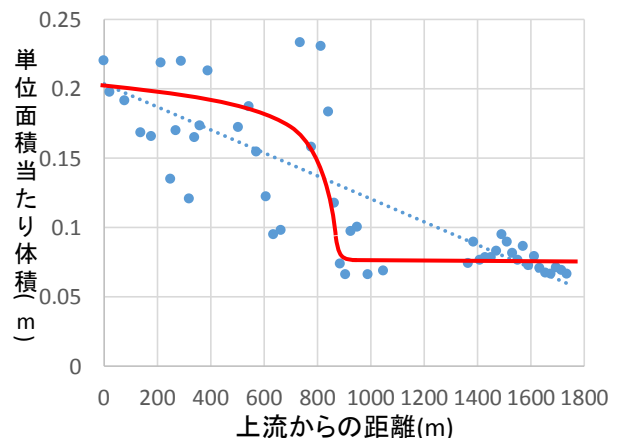


図-13 流木捕捉量の縦断分布図

イントでは、流木捕捉量のばらつきが大きくなっていて、900m 以降にあるポイントでは、流木捕捉量がほぼ一定の値を示している。これを考慮すると、流木捕捉量は図-13の赤い実線のように、上流側はポイントごとに大きな差があるもののなだらかな減少傾向にあり、上流からの距離が 900m 付近で急激に減少し、下流側はほぼ一定となると捉えることができる。

また、本研究における上流側と下流側の境目である上流からの距離が 1100~1400m 地点では、約 300m にわたってほぼ流木が捕捉されていない。

(2) 縦断分布を形作る物理的要因

エリアごとの水深、川幅、流木捕捉量を比較すると(図-14)、流木捕捉量の大きい上流は水深が小さく、また川幅も小さい傾向にあり、流木が集積して詰まりやすい条件であることがわかる。流木捕捉量が急激に減少する 900m 付近はちょうど水深が急激に増す変曲点にあたる。水深が増すことで流木が拡散しやすくなることが考えられる。

上流側におけるエリアごとの流木捕捉量のばらつきは、必ずしも水深や川幅の変化と対応するものではなかった。また、河道の屈曲点で流木が重なりやすいなどが考えられるが、上流側において河道の曲率の大きいエリアほど流木捕捉量が多いという傾向は見られなかった。

また、流木がほとんど捕捉されていない 1100~1400m は左岸側からの支流の流入部にあたる。この区間の横断測量図を見ると、左岸側よりも右岸側が深く、支流の流れの影響が強いことが示唆される。すなわち、このエリアで流木捕捉がほとんどなかったのは、支流の流入によって流木が上下流方向に流されたためと考えられる。

以上の結果を模式図として表した(図-15)。上流側の水深が浅い地点に長く太い流木が詰まり、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たと推察される。

5. おわりに

(1) 本研究の成果

本研究では寺内ダム貯水池の空撮画像を用いて、ダム貯水池に捕捉された流木の定量評価を試みた。空撮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により、貯水池全体の流木捕捉量を推定したところ、実際の流木撤去量とほぼ同等の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ものの、貯水池に流入直後に素早く流木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。

寺内ダムにおける流木捕捉特性の解析により、上流から下流に向かって流木捕捉量が減少傾向にあること、流木捕捉量に水深と川幅が影響していることが確認された。

(2) 今後の課題

本研究で提案した流木捕捉量の推定手法の適用事例を増やし信頼性を高めることと、良い推定結果を得るために必要な空撮画像の解像度を分析することが今後の課題である。

また寺内ダムにおける流木捕捉特性の解析については、今回分析した水深・川幅・曲率や支流の流入の他に、流木捕捉特性に影響を与える要因を探ることが今後の課題である。

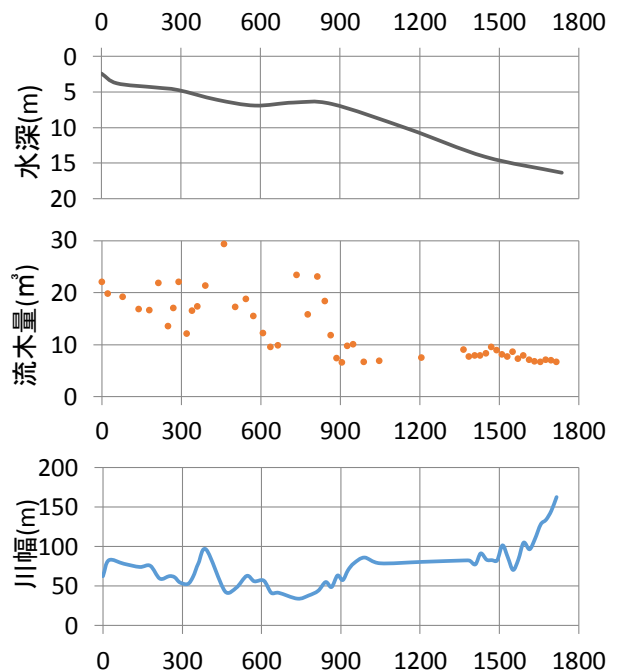


図-14 水深、川幅と流木捕捉量の関係

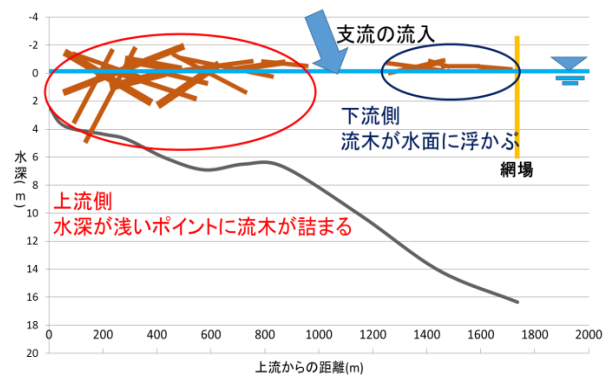


図-15 寺内ダムにおける流木捕捉の模式図

謝辞：本研究の執筆にあたって、独立行政法人水資源機構 筑後川局、関西電力より空撮画像と各種データをご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省 九州地方整備局：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、2017.
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局砂防部：平成 29 年 7 月九州北部豪雨と既往災害の発生流木量との比較、2017.
- 3) 三浦耕太，塚田祐基：ImageJ ではじめる生物画像解析，学研メディカル秀潤社，2016.
- 4) 独立行政法人水資源機構 筑後川局：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、2017.
- 5) 南まさし，二瓶泰雄，西島拓駿，片岡智哉，日向博文：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.499-504，2016.

(2018. 4. 3受付)