

# 流木と降雨流出に留意した土砂・洪水氾濫に 対する施設配置の検討手法の提案

PROPOSAL OF EXAMINATION METHOD OF FACILITY LAYOUT TO SEDIMENT  
AND FLOOD DAMAGE CONSIDERING DRIFTWOOD AND RAINFALL-RUNOFF

小林 雄介<sup>1</sup>・玉置 秀人<sup>2</sup>・森 克味<sup>1</sup>・木村 啓祐<sup>3</sup>・越智 尊晴<sup>4</sup>・森 充弘<sup>1</sup>  
Yusuke KOBAYASHI, Hideto TAMAKI, Katsumi MORI, Keisuke KIMURA, Takaharu OCHI,  
and Mitsuhiro MORI

<sup>1</sup>いであ株式会社 名古屋支店 (〒455-0032 愛知県名古屋市港区入船 1 丁目 7 番 15 号)

E-mail:kobayashiyu@ideacon.co.jp

<sup>2</sup>兵庫県 西播磨県民局 光都土木事務所 河川砂防第 2 課 (〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 2 番 25 号)

<sup>3</sup>いであ株式会社 大阪支社 (〒559-8519 大阪府大阪市住之江区南港北 1 丁目 24 番 22 号)

<sup>4</sup>いであ株式会社 東北支店 (〒980-0012 仙台市青葉区錦町 1 丁目 1 番 11 号)

**Key Words:** *sediment and flood damage, driftwood, numerical simulation, Sabo facility layout planning*

## 1. はじめに

近年, 中山間地での複数の斜面崩壊や土石流と, これに伴う下流域での土砂・洪水氾濫の発生により, 甚大かつ広域な被害が頻発している<sup>1)</sup>. このような背景から, 土砂・洪水氾濫対策について各種の調査・研究が進められる中, 土砂・洪水氾濫の推定手法の高度化, 及びこれに基づく適正な施設配置検討が求められている<sup>2)</sup>.

国土技術政策総合研究所からは平成 30 年 11 月に「河床変動計算を用いた土砂・洪水氾濫解析に関する砂防施設配置検討の手引き(案)<sup>3)</sup>」(以下, 「手引き案」)が公表され, 現在, 多くの河川<sup>4)</sup>で「手引き案」を参考に施設配置の検討が進められている. しかしながら, 「手引き案」にて取り扱う土砂・洪水氾濫対策は, 上流土砂移動に起因するものと流木に起因するものの内, 前者を対象としている. また, 土砂や流木の流出に影響を与える降雨流出について, その解析手法は, 対象流域の高水計画における手法とすることを一例に挙げているが, 手法選定の考え方を明記するものではない. この様に, 現状, 土砂・洪水氾濫に対する施設配置計画の考え方は, 体系的な整理の途上にあり, 流木の扱いと降雨流出解析手

法の選定が課題の一つといえる. 今後は, 流木を考慮した対策の必要性, 及び降雨流出の解析手法選定における着目点を明らかにする必要がある.

著者らは, これらに留意し, 降雨流出解析, 一次元河床変動解析, 平面二次元氾濫解析から構築した土砂・洪水氾濫解析モデルを兵庫県佐用町に位置する二級河川千種川水系水根川(流域面積 2.9km<sup>2</sup>)に適用し, 対策施設の配置計画を立案した. 本稿は, 災害ポテンシャルを「災害の生じやすさ」と定義し, これを流域特性の分析により定性的, 定量的に把握した上で施設配置の検討手法を提案したものであり, 特に流木と降雨流出に留意したことに特色がある.

## 2. 施設配置検討上の留意点

施設配置検討上の留意点は, (1)土砂・洪水氾濫の発生要因(土砂, 流木)を明らかにした上で, これらの生産・抑制・被害の受け易さに影響する地形, 地質, 林相, 橋梁狭窄部, 現況施設効果量, 保全対象の縦断・比高分布といった流域特性の分析に基づき災害ポテンシャルを把握すること, (2)土砂や流木の流出に大きく影響する降雨流出について, 地形や保全対象の縦断分布といった流域特性に着目し, 施

設配置検討に適した解析手法を選定することである。

### (1) 流域特有の災害ポテンシャルの把握

#### a) 土砂・洪水氾濫の発生要因

平成 21 年の台風 9 号により、本川千種川では土石流災害等から激甚災害に指定され、水根川でも河道閉塞や山腹崩壊が生じ、橋梁による流木捕捉もみられた(図-1, 2, 図-3, 写真①)。本洪水では、上流域の水根堰堤(不透過型)による土砂捕捉(図-3, 写真②)や中流域の水根川堰堤(透過型)による流木捕

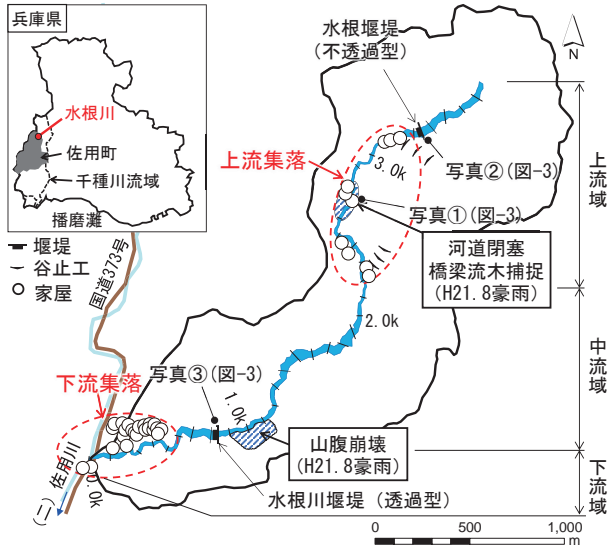


図-1 H21.8 豪雨による土砂・流木の流出状況



図-2 H21.8 (2009) 豪雨による山腹崩壊地



図-3 水根川における土砂・流木の流出実績

捉(図-3, 写真③)により、上下流の集落での家屋被害が回避されたと推察されるが、本洪水よりも規模の大きな洪水であれば、被害が生じた可能性がある。

以上より、水根川における土砂・洪水氾濫の発生要因は、土砂と流木といえる。

#### b) 流域特性の分析

大規模な土砂・洪水氾濫をもたらす流域特性は、例えば H29 九州北部豪雨(福岡県赤谷川)や H30 西日本豪雨(広島県総頭川)等の事例から、地形、地質、林相、橋梁等狭窄部、保全対象の分布等が挙げられる。これらに現況施設の効果量の観点を加えた水根川流域の流域特性の分析結果は、次の①から⑥である。

①地形の様相は、流域を横断する大原断層の上下流で大きく異なり、上流域で本川への土砂供給源である溪流が多い(図-4)。②地質は、地形と同様に断層の上下流で大きく異なるが、支配的な地質は上流域では花崗岩、下流域では流紋岩であり、共に土砂生産への寄与が大きい地質である<sup>5)</sup>。現地計測に基づく溪床堆積土砂量と崩壊可能土砂量を合算して算出した計画生産土砂量は、全流域では 84,025m<sup>3</sup>、保全対象集落の位置する上下流域については、上流域では 47,145m<sup>3</sup>、下流域では 14,333m<sup>3</sup>(内、猪ノ谷約 8,255m<sup>3</sup>)である。全流域に占める割合は、上流域 56.1%、下流域 17.1%であり、上流域が多くを占めるが下流域にも約 1 割(9.8%)の土砂生産能力を有する猪ノ谷が存する(図-4)。③林相は、単位面積あたりの材積量の大きい針葉樹が上流域に多く、流域内の溪流には倒木が多くみられる。単位面積当たりの材積量を針葉樹 1,000m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>、広葉樹 100 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>とし<sup>6)</sup>、林相面積を乗じて算出した計画流出流木量は、

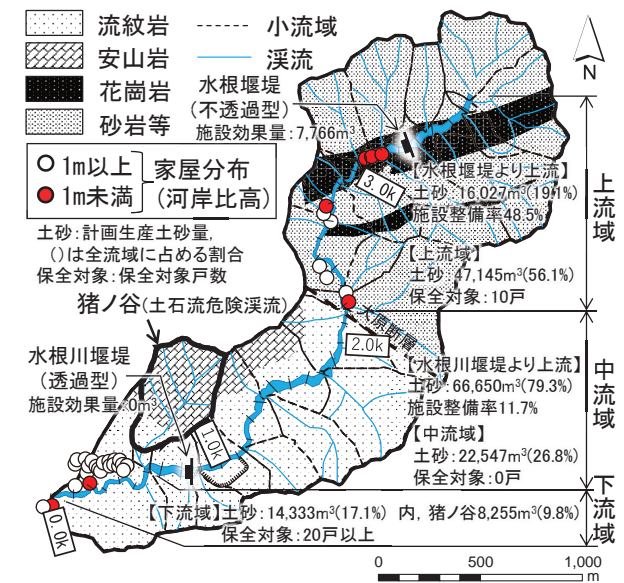


図-4 流域特性(土砂関係, 保全対象)



全流域では、 $1,324\text{m}^3$ 、上流域では  $949\text{m}^3$ 、下流域では  $164\text{m}^3$  である。全流域に占める割合は、上流域 71.7%、下流域 12.4% である (図-5)。④水根川に存する 14 橋梁の内、河床から桁下までの比高の小さい橋梁は、上流域に集中する (図-5, 6)。⑤保全対象は、上流域と下流域に分布し、浸水し易い河岸沿いで河岸比高の小さい家屋は上流域に多い (図-4, 5, 6)。⑥計画の捕捉量と抑制量を合算した施設効果量は、水根堰堤 (不透過型) では土砂  $7,766\text{m}^3$  と流木  $138\text{m}^3$ 、水根川堰堤 (透過型) では土砂  $0\text{m}^3$  と流木  $1,196\text{m}^3$  である。ここに、流木の流出係数は 0.9 である。また、堰堤上流の計画生産土砂量と計画流出流木量 (図-4, 5)、及び施設効果量から算定する施設整備率は、水根堰堤地点では土砂 48.5% と流木 25.0%、水根川堰堤地点では土砂 11.7% と流木 100.0% である。実績では、平成 21 年 8 月豪雨において生じた流木を水根川堰堤が捕捉し、下流域の家屋を保全した<sup>7)</sup>。

以上の①から⑥の分析結果より、水根川流域の災害ポテンシャルは、上流域では流木、下流域では土砂によるものが相対的に大きいといえる。

## (2) 流域特性を考慮した流出解析手法の選定

### a) 土砂・洪水氾濫解析モデルの構成

本稿で用いた土砂・洪水氾濫解析モデルは、降雨流出、一次元河床変動、平面二次元氾濫の各解析モデルから構築した (図-7)。

本稿では降雨流出解析モデルの妥当性は、再現洪水に対する流出解析結果、及び流出解析結果を入力条件とした一次元河床変動解析結果から論ずる。ここに、一次元河床変動解析モデルは、高橋ら<sup>8), 9)</sup>の土石流モデル「SERMOW」を基本に、国総研資料第 874 号「豪雨時の土砂生産にともなう土砂動態解析に関する留意点」に準じた土石流、掃流状集合流動、掃流砂・浮遊砂の各発生領域に対応可能なモデルである。また、橋梁による流木捕捉の有無は、一次元河床変動解析により桁下余裕高を閾値 (0.6m) とした洪水中の最高水位から判定・抽出し、平面二次元氾濫解析では抽出した橋梁地点を閉塞状態とすることで流木捕捉の影響を表現した。

### b) 流出解析手法の選定と解析モデルの構築

土砂生産に対しては、①地質、②流域の荒廃状況、③降雨の寄与が大きい。①地質、②流域の荒廃状況は、既存資料や現地調査により確認や推定を行う。③降雨について、降雨を入力条件とした流出解析手法には、集中型と分布型のモデルがあり、検討目的等に応じ解析手法が選定される。

水根川は複数の溪流を抱え、保全対象が縦断的に

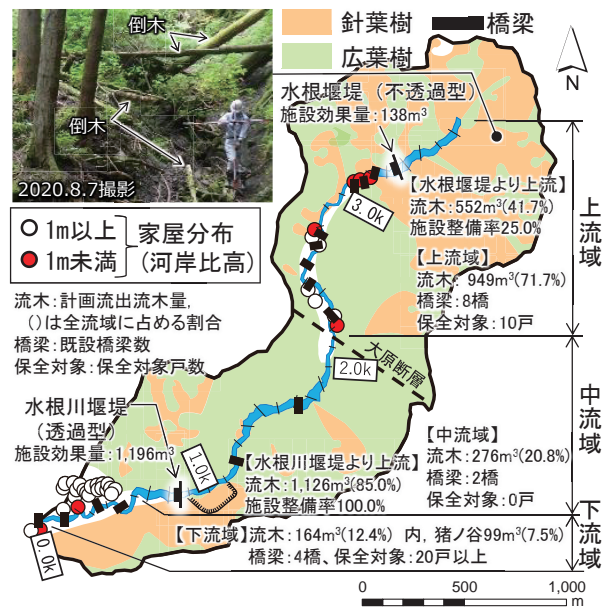


図-5 流域特性 (流木関係, 保全対象等)

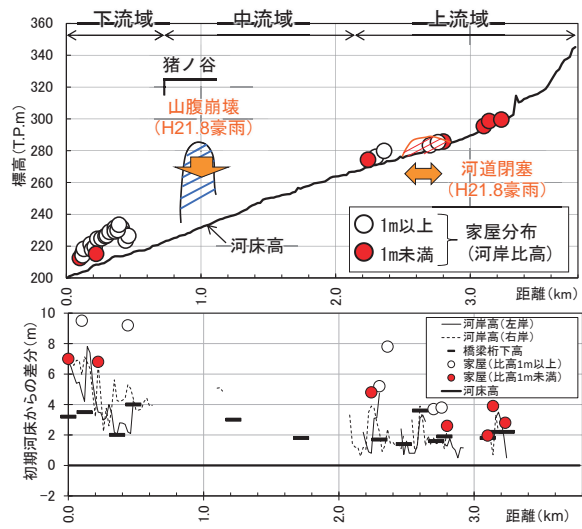


図-6 河床高等縦断図 (上), 河床高比高図 (下)

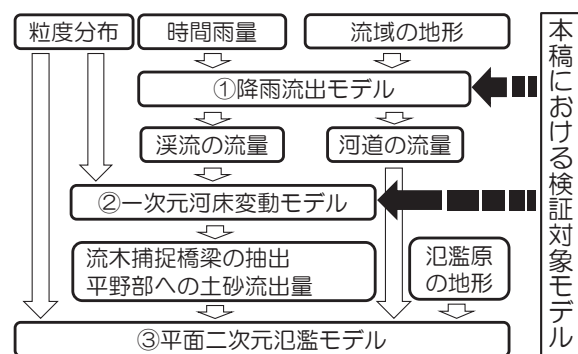


図-7 土砂・洪水氾濫解析モデルの構成

分布するため、各溪流からの降雨流出と、これに伴う土砂流出の時系列を精度良く表現する必要がある。

水根川の本川千種川における河川整備基本方針の流出解析モデルは集中型 (貯留閾数法) であり、本モデルの流出単元は水根川全流域を包絡することか

ら、流出波形が流域外の1地点でしか得られない(図-8)。このため、本モデルによる流出結果を水根川流域に適用した場合、各溪流からの流出波形や流入時刻に調整を要する可能性があり、精度上の課題が生じると想定された。

これらを踏まえ、水根川の降雨流出解析モデルは、各溪流の流出特性(流域面積や山腹の勾配等)に応じた流出波形の算定が可能であり、かつ各溪流からの流出時刻の調整を要しない分布型モデルを選定した(図-8)。構築した分布型モデルの計算法はkinematic wave法であり、斜面流出は、表層流を等流、中間流(A層、B層)と基底流(C層)の地下3層をダルシー則とし、連続式(1)から(4)、運動方程式(5)から(6)により表現する。解析メッシュサイズは、小流域単元からの流出を解析可能な50m×50mの細分メッシュを設定した。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = (r - f_s) \cos \theta \quad (1)$$

$$\lambda_e \frac{\partial h_A}{\partial t} + \frac{\partial q_A}{\partial x} = (f_s - f_A) \cos \theta \quad (2)$$

$$\lambda_e \frac{\partial h_B}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} = (f_A - f_B) \cos \theta \quad (3)$$

$$\lambda_e \frac{\partial h_C}{\partial t} + \frac{\partial q_C}{\partial x} = (f_B - f_C) \cos \theta \quad (4)$$

$$q_s \frac{1}{N} = \sqrt{\sin \theta} (h_s)^{5/3} \quad (5)$$

$$q_A = k_A h_A \sin \theta, \quad q_B = k_B h_B \sin \theta, \quad q_C = k_C h_C \sin \theta \quad (6)$$

ここに、 $r$ :時間雨量、 $h_A, h_B, h_C$ :各層の水深、 $f_s, f_A, f_B, f_C$ :各層の浸透能、 $\lambda_e$ :土壌の空隙率、 $\theta$ :斜面勾配、 $N$ :等価粗度係数、 $k_A, k_B, k_C$ :各層の透水係数である。

### c) 解析モデルの妥当性検証(再現計算)

再現洪水は、水根川で土砂・洪水氾濫が生じ、限定的ではあるが検証材料を収集できた平成21年8月洪水とした。検証材料は、降雨流出については河道流量波形であり、土砂堆積状況については、定量的な洪水後の実測地形データが存在しないため、洪水後の河道状況写真から判別した土砂堆積地点と定性的な土砂堆積厚である。解析条件は表-1に示す。

降雨流出の解析範囲は、検証地点となる水位・流量観測所が水根川流域内に存在しないため、最近傍の観測所である佐用観測所まで拡充した(図-9)。検証に用いる降雨は、水根川流域内または近傍に位置する上石井・三河・佐用観測所の実績値(図-10)を降雨流出解析で設定した斜面メッシュに与えるものとし、当該斜面メッシュに最も近い観測所雨量を与えた。なお、佐用地点では流量観測は行っておらず水位観測のみのため、HQ換算式から算定した流量を検証流量とした。ここに、HQ換算式は、佐用水位観測所の横断地形から算定した水位に応じた河積・

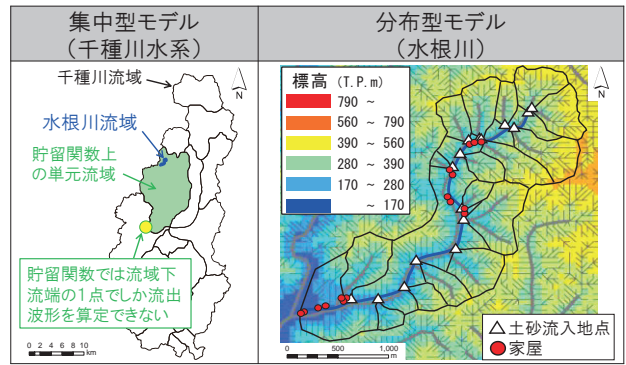


図-8 流出モデルの概要

表-1 解析条件一覧

項目		設定条件	
分布型降雨流出解析	斜面	計算法	Kinematic wave法、表層+地下3層
		メッシュサイズ	50m×50m
		メッシュ標高	砂防基盤図(LP)から作成
		落水線勾配	砂防基盤図(LP)から作成
	河道	降雨波形	平成21年8月台風9号実績雨量
		定数設定	佐用地点の流量再現による定数検討結果
		計算法	Kinematic wave法
一次元河床変動計算	河道	粗度係数	$n=0.050$ (山地流路:水理公式集)
		河道長	50m間隔で作成
	河道横断形状	LP測量横断形状を台形近似して作成	
	河床勾配	砂防基盤図(LP)から作成	
	一次元河床変動計算	計算法	京都大学防災研究所による一次元土石流河床変動モデル(モデル名:SERMOW)
		計算領域	水根川流域
		河床地形	砂防基盤図(LP)から作成
		河床材料	水根川の河床材料調査結果(4地点平均粒度、14粒径)
		粗度係数	$n=0.050$ (山地流路:水理公式集)
		移動層厚	溪流調査の堆積厚を設定 土石流区間:0.5m 掃流区間:1.0m
土砂供給		上流端平衡濃度(供給量上限:計画生産土砂量)	
侵食速度係数		一律0.0007	
堆積速度係数	一律0.05		

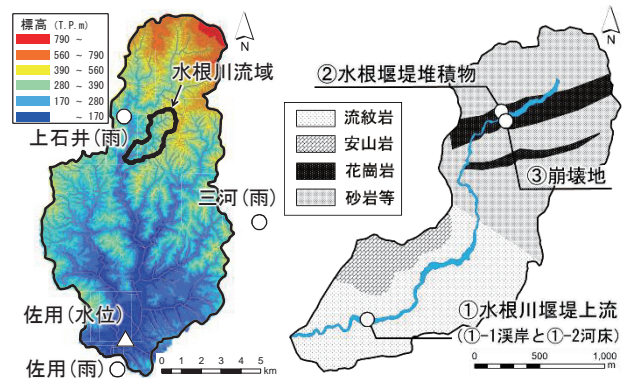


図-9 観測所位置(左)、河床材料調査地点(右)

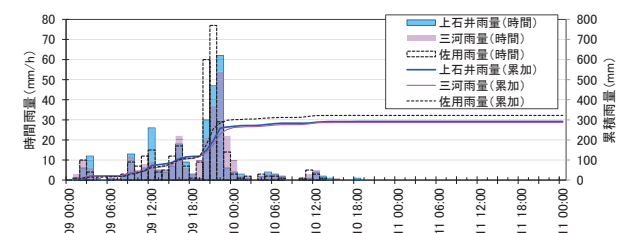


図-10 実績雨量(上石井、三河、佐用観測所)



径深、河床材料の状況から設定した粗度係数 0.040、河床勾配 1/150 を条件としたマンニングの平均流速公式により設定した。

一次元河床変動解析については、河道モデルは、本川と支川から構成される。対象となる支川は、当該支川の流域面積が本川上流端の抱える流域面積より大きい場合、かつ本川合流点から河床勾配が 10 度以下の区間である。河道横断形状は、LP 測量を基に「手引き案」に記載の台形近似の設定方法に従い設定した。供給土砂量の上限は、災害による生産土砂を推定し得る地形データ等の定量的資料が存在しないことから、ここでは生産し得る最大の土砂量である計画生産土砂量を与えた。土砂供給は、一次谷以上の溪流と山腹崩壊箇所付近のゼロ次谷から与え、供給上限は、計画生産土砂量とした。侵食速度係数と堆積速度係数は既往文献<sup>10), 11)</sup>を参考に、それぞれ 0.0007, 0.05 とした。河床材料の粒度分布は、水根川流域内の 4 地点平均を与えた (図-9, 11)。

降雨流出の検証は、複数回の試行により斜面表層及び土層のパラメータを設定した結果、流量のピークと波形について良好な再現性を得た (図-12)。

土砂堆積の検証は、平成 21 年 8 月洪水直後に撮影された 0.8k 付近、2.7k 付近、3.2k 付近の現地写真との比較により、定性的に行った。写真判読から、洪水後の 0.8k 付近と 2.7k 付近では河道閉塞がみられる。洪水後の 3.2k 付近では河道閉塞はみられないが、河岸際の耕作地には堆砂がみられるため、洪水中には河道は閉塞していたと推察される。これに対して解析値も、0.8k 付近と 2.7k 付近の洪水後の河道閉塞、3.2k 付近の洪水中の河道閉塞と洪水後の河道閉塞解消を示しており、良好な再現性を得た (図-13)。

これら降雨流出解析結果と流出解析結果を入力条件とした一次元河床変動解析結果から分布型降雨流出モデルの妥当性を確認できたといえる。

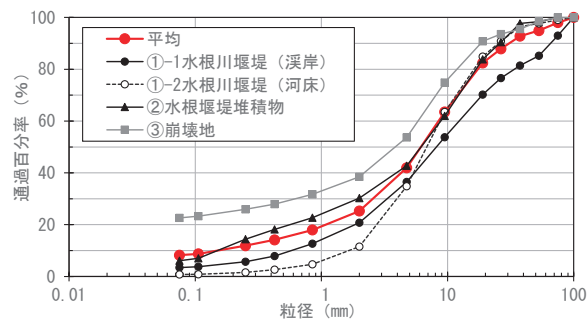


図-11 河床材料の粒度分布

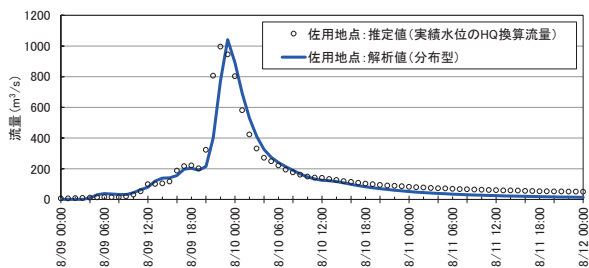


図-12 降雨流出の検証結果 (分布型流出解析)

### 3. 災害ポテンシャルを踏まえた施設配置計画

整備目標は、計画規模である 100 年超過確率雨量に対する家屋浸水解消である。計画降雨波形は、再現洪水である平成 21 年 8 月洪水と計画降雨継続時間 (24hr) 内雨量の多い平成 30 年 7 月洪水の 2 洪水を候補とし、両者の降雨を計画規模に引き伸ばして一次元河床変動解析を実施した結果、土砂堆積深のより大きくなる平成 30 年 7 月型波形としている。

上下流域の災害ポテンシャルが異なることを踏まえ、上流域と下流域に保全地区を区分し、施設機能の異なる堰堤を配置した。上流域では、既設を部分透過型 (H=11.5m) に改築することで流木捕捉機能を付加した。下流域では、本川と土砂生産能力の大きい猪ノ谷に、それぞれ不透過型堰堤 (H=8.0m, H=13.5m) を新設することで、土砂捕捉機能を設け

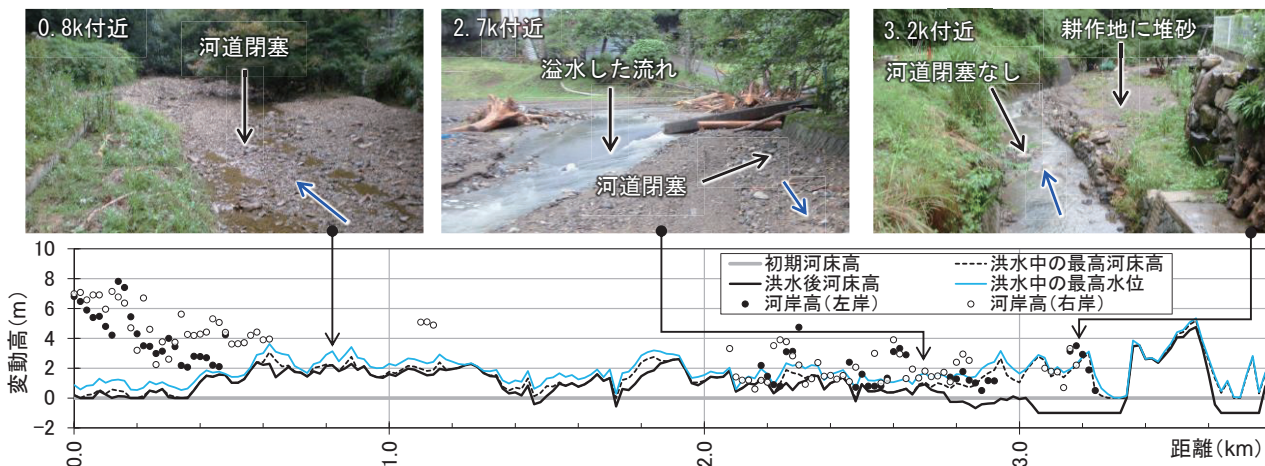


図-13 土砂堆積の検証結果 (一次元河床変動解析)

た(図-14)。流木を捕捉する橋梁数は、対策前には全14橋梁中、6橋であったが、対策により解消する(図-14)。これらの施設配置を反映した二次元河床変動解析結果を入力条件とした平面二次元氾濫解析により、整備目標を達成することを確認した(図-15)。

#### 4. 結論

土砂・洪水氾濫対策の施設配置検討にあたり、流木も含めた災害ポテンシャルの把握に留意すること、及び流出解析手法の選定に留意することの重要性を示した。また、災害ポテンシャルに基づき保全対象を区分することで、小規模な保全地区に対応した細やかな施設の配置と機能を確定できたことを示した。本稿の留意点の一部は、本事例の検討後の国土技術政策総合研究所資料「土砂・洪水氾濫により大きな被害のおそれのある流域の調査要領(案)(試行版)(R4.3)」に記載の「流木による橋梁閉塞による被害発生の可能性、保全対象分布への着目した流域抽出」に合致する。また、本計画は、令和2年度に大規模特定砂防等事業に採択された。

以上より、本稿で提案した留意点と災害ポテンシャルに基づき施設の配置と機能を確定する一連の検討手法は、今後、土砂・洪水氾濫対策において様々な流域特性を扱う中で、有効な一手法と考える。

今後は、流木捕捉橋梁の抽出にあたり、本稿で提示した垂直方向の補足条件の他、例えば流木長とスパン長の比等の横断方向の補足条件を加えること、及び流出解析では詳細な面的データの取得が可能なレーダ雨量を用いること等により、現象の解析精度の向上を図る予定である。

**謝辞：**本稿は、光都土木事務所からの委託業務成果を使用した。本稿の作成にあたり光都土木事務所には多大な協力を頂いた。また、二次元河床変動解析の条件設定について筑波大学流域管理研究室の内田太郎准教授にご助言頂いた。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：土砂・洪水氾濫対策WG資料1開催趣旨，2021。
- 2) 国土交通省：実効性のある避難を確保するための土砂災害対策のあり方について 報告書，pp.11，2019。
- 3) 国土交通省：国土技術政策総合研究所資料 第1048号 河床変動計算を用いた土砂・洪水氾濫解析に関する砂防施設配置検討の手引き(案)，2019。

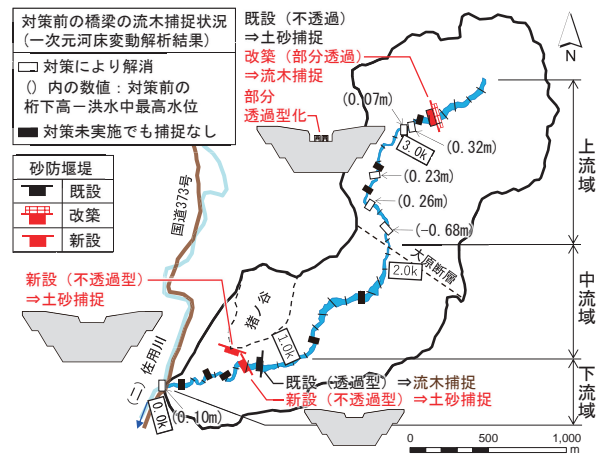


図-14 施設配置計画の概要

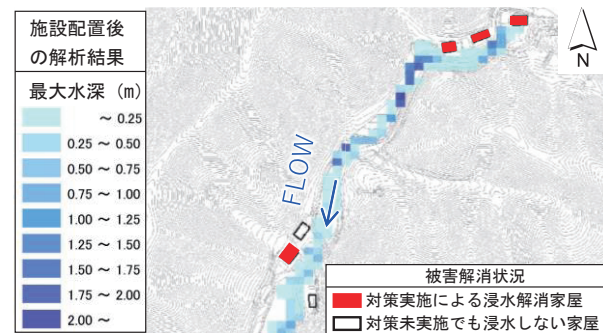


図-15 二次元氾濫解析結果(上流域 w=1/100 の例)

- 4) 国土交通省：水管理・国土保全局関係事業における事業評価について(参考)事業概要資料(新規採択事業評価【砂防事業等1】)，pp.67-69，2021。
- 5) 国土交通省：土砂・洪水氾濫対策WG資料3平成30年7月豪雨における生産土砂の実態(速報)，2021。
- 6) 国土交通省：国土技術政策総合研究所資料 第904号 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説，pp.24，2016。
- 7) 国土交通省：平成21年の土砂災害，<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h21dosha/h21doshasaigaiyou.pdf>，2022
- 8) 高橋保：土砂流出現象と土砂害対策，近未来社，pp.270-281，2006。
- 9) 中川一，高橋保，里深好文，川池健司：1999年ベネズエラのカムリグランデ流域で発生した土砂災害について-数値シミュレーションによる再現計算と砂防施設配置効果の評価-，京都大学防災研究所年報，第44号B-2，pp.207-228，2001。
- 10) 中谷加奈：GUIを実装した汎用土石流数値シミュレーションシステムの開発と適用，京都大学学位論文(博士)，pp.13，2010。
- 11) 西口幸希：深層崩壊に起因する土石流の数値シミュレーション手法に関する研究，京都大学学位論文(博士)，pp.50，2015。

(2022.5.30 受付)