

中山間地域の洪水災害レジリエンスの総合的な向上に資する技術の戦略的開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～30

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：原田大輔、伊藤弘之、南雲直子、中村要介、江頭進治

【要旨】

本研究は、山間部下流の中小河川における土砂・洪水氾濫現象のメカニズムを定式化することにより、土砂・洪水氾濫の想定等水災害リスク評価に資する技術開発を目的としたものである。例えば 2018 年の西日本豪雨では、広島県において A 川などの中小河川において、上流から供給された多量の細粒土砂が河道を埋めつくしたことから河川の容量が減少し、洪水氾濫被害を助長させたと考えられる。近年いくつかの中山間地河川で同様の災害が生じていることから、本報告書では A 川の災害に着目して、現地調査と平面二次元洪水流解析の結果を用い、このような土砂・洪水氾濫災害を評価する手法を提案し、その妥当性についての議論を行う。

キーワード：中山間地河川、土砂・洪水氾濫、細粒土砂、河床変動、平面二次元洪水流解析

1. はじめに

2018 年 7 月 5 日から 7 日にかけて発生した西日本豪雨災害では、特に広島県内において、山間部で多くの崩壊・土石流が発生した。これらの崩壊・土石流によって多量の土砂や流木が生産され、洪水流によって下流の河川に輸送された。そのことによって、下流の河川では多量の土砂が河道内に堆積し、下流に位置する住宅地での浸水被害をより甚大なものにしたと考えられる。近年の土砂・洪水氾濫災害では、同様のメカニズムによるとみられる災害がいくつか発生している。例えば 2017 年の九州北部での筑後川水系赤谷川（福岡県）の災害¹⁾や、2016 年の小本川水系小本川（岩手県）²⁾の災害などである。このような災害が発生していることを踏まえると、これらの災害の現象及び発生メカニズムについて明らかにすることは極めて重要である。

著者らは、西日本豪雨の発生直後の 7 月 22 日から 24 日及び 10 月 15 日から 17 日に、広島県内での洪水災害調査を行った。本報告書では、これらの被災地の中でも、土砂・洪水氾濫被害が顕著に見られた広島県 S 町の A 川に着目する。広島県の報告書³⁾によると、S 町の総面積は 15.6 km² であるが、その中で 39 の土砂関連災害が発生し、17 名の死者・行方不明者を出し、906 の家屋が被害を受けており、甚大な被害が生じている。本報告書では、A 川を対象として、現地調査と数値計算を用いて災害の特徴を明らかにし、またこのような土砂・洪水氾濫を数値的に解析する手法についての議論を行う。

2. A 川の災害の特徴

(1) 降雨イベントの特徴と降雨流出解析

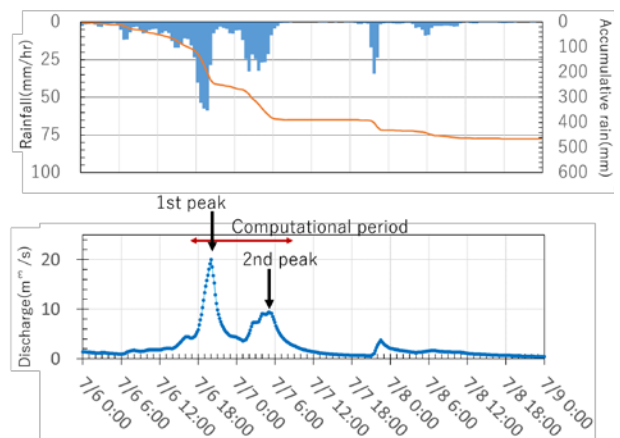


図-1 降雨条件（上）と流出解析の結果（下）

図-1 の上段は、C-band レーダーによって観測された A 川流域における災害発生時の流域平均雨量である。時間雨量の最大値は約 60mm/hour、総雨量は約 500mm に達している。この降雨データを用いて、RRI モデルによる降雨流出解析を行った。モデルの詳細及びパラメータ設定については、別報⁴⁾を参照されたい。降雨流出解析結果について、図-2 に示す流域図のうち No.3 地点の計算結果について、図-1 の下段に示している。

(2) 対象流域と災害の特徴

図-2 には、A 川流域の流域図に災害直後の航空写真が



図-3 現地調査で撮影された写真 (番号は図-2の地点番号に対応)

ら土砂移動痕跡を推定したものを加筆している。A 川の流域面積は約 5 km^2 である。上流域の標高は最も高いところで約 400m であり、河口は広島湾に注いでいる。流域の主要な地質は花崗岩により構成される。下流域は扇状地性の地形を有しており、扇状地には多くの住宅地が位置しており、河川の氾濫によってこれらの住宅の多くが浸水・土砂堆積の被害を受けていることが、図-2 から読み取れる。図-2 中の土砂移動痕跡について、特に谷の上流端では多くの崩壊・土石流が生じているように見られる。

図-3 には災害直後に行われた現地調査で撮影した写真を示している。写真 a) は、図-2 中の No.1 地点付近で撮影したものである。谷の幅はおおよそ 7m であり、基盤岩が露出していることから、この谷に堆積している土砂のほとんどが下流に流出していると見られる。写真 b) は同じ地点付近の河岸堆積物の材料について示しており、土石流によって輸送された土砂が堆積したものと推察される。その材料は、 $10\text{-}20\text{cm}$ 程度を主とし、最大で 1m 程度の岩を含んでおり、また多くの細粒土砂が含まれている。この

細粒土砂については、土砂を持ち帰り、ふるい分け及び沈降分析によって粒度分布を求めている。その土砂粒度分布について図-4 に示している。なお、土砂粒度分布は No.3 から No.7 についても求めており、No.3 と No.4 地点については画像解析とふるい分けによって粒度分布を求め、No.5~No.7 についてはふるい分けのみによって粒度分布を求めている。

写真 c) は No.2 付近に堆積している土砂の様子を UAV により撮影したものであり、 $1\sim 2\text{m}$ の巨石が多く堆積していることが分かる。No.3 地点の付近では、写真 e) に示すように、橋梁での流木の堆積に伴ってその上流に多量の土砂が堆積している。堆積した土砂の状況は写真 d) に示しており、その土砂粒度分布は図-4 に示すとおりである。砂礫を主体とし、礫の最大径は 50cm 程度である。No.2 から No.3 にかけて、土砂移動形態は掃流状態へと変化していると考えられる。

No.3 から No.4 にかけては、図-4 から明らかなように、徐々に粒度分布が小さくなっていくが、No.4 の地点ではまだ礫が分布している。No.4 地点は扇状地の扇頂部に位

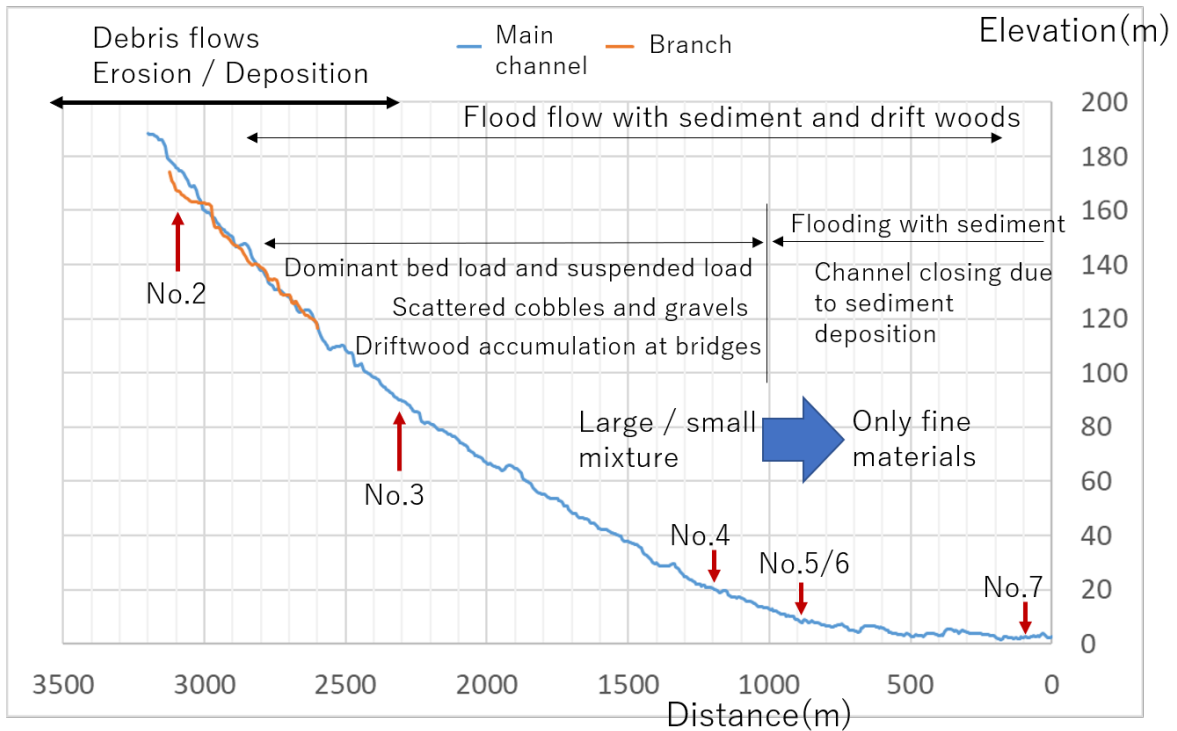


図-5 A川の縦断面図と現地河川で観測された現象（番号は図-2と対応）

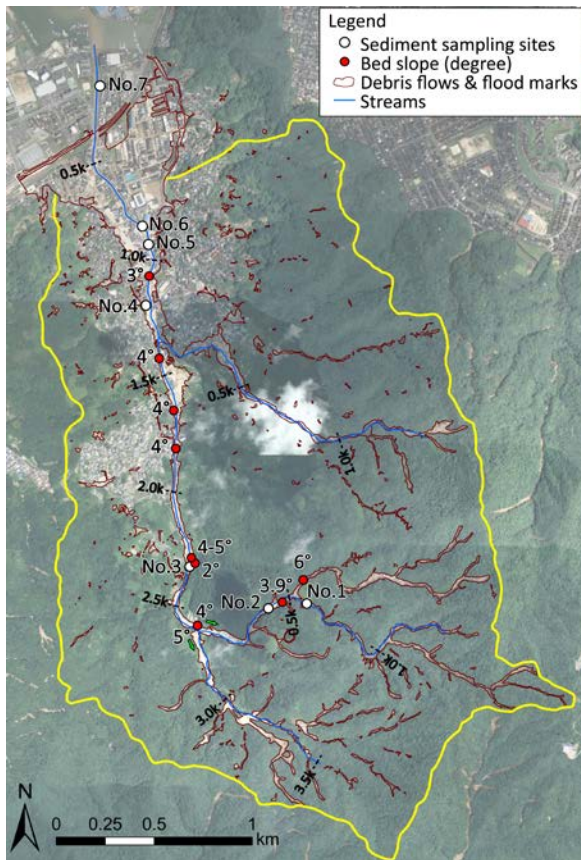


図-2 A川流域の航空写真

置しており、ここより下流側には礫はほとんど輸送されていない。このNo. 4 地点よりも下流側では、扇状地部分の全体に洪水流に伴う細粒土砂が輸送されている。

No. 5 及びNo. 6 の付近では、河道内及びその周辺の住宅地に砂が堆積している。写真 f) 及び g) から分かるように、河道は砂でほぼ埋まってしまっている。堆積している土砂の粒度分布は図-4 に示す通りである。河道の外、すなわち住宅地に堆積している土砂の堆積深は、河道に近いほど深く、写真 h) から分かるように、住宅の1階がほぼ埋まってしまうほどである。

扇状地面を流下した土砂を伴う洪水流は、扇状地面の下流端付近に位置する鉄道の盛土部分でせき止められたため、それより下流には到達していない。No. 7 は鉄道の盛土よりも下流の部分の河道であって、写真 i) 及び図-4 から分かる通り、細かい砂が堆積している。

図-4 から、No. 1 地点の細粒土砂の粒度分布とNo. 5-No. 7 付近の土砂粒度分布とはかなり近くなっていることが分かる。このことから、下流域の河道及び扇状地面の住宅地に堆積している土砂は、上流域で生産された土砂がそのまま洪水流によって流下・輸送され、ここに堆積した可能性が高いといえる。また、No. 3 からNo. 7 の土砂粒度分布をみると、このような勾配が急激に変化する中山間地河川に特徴的な土砂の縦断分級が明確に見られる。

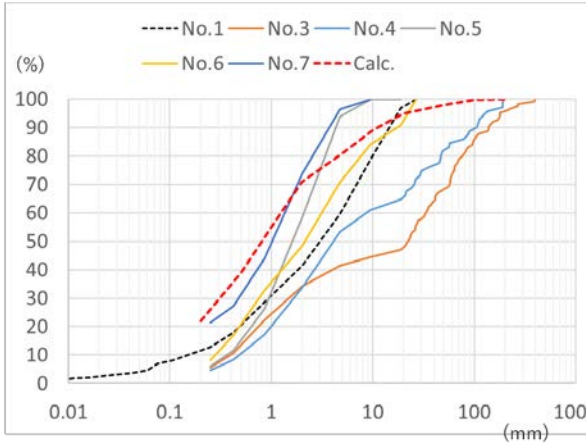


図-4 粒度分布

図-5 には、国土地理院の数値国土情報（5m メッシュ）を用いて作成された A 川の縦断図を示している。また、図-5 には土砂輸送過程の観点からみた災害の特徴を加筆している。すなわち、上流側の勾配の急な領域では、谷沿いで生じた崩壊・土石流によって多量の土砂が生産される。これらの土砂は洪水流によって中流域に輸送され、河道内及び河道沿いには礫の混じったこれらの土砂が堆積している。ここでは流木が橋梁に大量に集積して河積阻害を起し、その上流側では多量の土砂が堆積している。扇状地の上流端より下流側には礫は輸送されず砂のみが輸送されているが、これらの土砂は河道から氾濫した洪水流によって扇状地面の全体を流下しており、災害直後には多量の土砂が住宅地に堆積していた。

3. 数値シミュレーション

(1) 解析手法

A 川の土砂・洪水氾濫災害における洪水流の特徴を明らかにするために、数値シミュレーションを行った。計算は、清水らによって開発された iRIC-Nays2DH モデル^{5), 6)}を用いているが、ソースコードの一部はここで著者らの提案する手法により改変されている。

洪水流については、水深平均された以下の支配方程式によって評価される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huu}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial h\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h\sigma_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 h ：水深、 t ：時間、 u, v ： x, y 方向の水深平均流速、 g ：重力加速度、 ρ ：水の密度、 z_b ：河床位、 τ_x, τ_y ： x, y 方向の河床せん断力、 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}, \tau_{yx}$ ：水深平均のレイノルズ応力である。

河床位の時間的変化は次式で与えられる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \sum_i \left(\frac{\partial q_{bix}}{\partial x} + \frac{\partial q_{biy}}{\partial y} + E_i - D_i \right) = 0 \quad (4)$$

ここに、 λ ：空隙率、 q_{bix}, q_{biy} ： x, y 方向の i 粒径階の掃流砂量である。 E_i, D_i ：浮遊砂の侵食率及び堆積率であり、浮遊砂の浮上量式として岸・板倉の式⁷⁾を用いている。

掃流砂量の評価 (q_{bix}, q_{biy}) については、本研究のように縦断方向の急激な粒度分布の変化を評価するために、2通りの方法を用いている。1つは芦田・道上式⁸⁾を用いるもの (Case1 とする) であり、もう一つは江頭らの式⁹⁾を用いるもの (Case2 とする) である。粒度分布の評価については、交換層厚を江頭らの式⁹⁾を用いて評価する竹林らの方法¹⁰⁾を用いた。

(2) 計算条件

計算対象としたのは、2.5km 地点から 0km 地点までの約 2.5km の区間であり、図-2 に示すように、概ね No.3 の地点から河口までの領域を含んでいる。計算区間の全域で、初期の土砂粒度分布を図-4 の赤い点線のように設定している。

計算区間上流端での流量は、降雨流出解析の結果得られた流量を与えている (図-1 参照)。また、初期の河床標高データとしては、国土地理院の数値国土情報 (5m メッシュ) を用いた。マニングの粗度係数は計算区間の全域で 0.03 としている。上流端からの土砂供給条件は不確定な要素が多いものの、現時点では以下のような点を考慮して決定している。既に述べたように、洪水中は多量の細粒分を含んだ土砂が上流から供給されている。このことから、計算区間上流端では初期の河床材料の粒度分布を変化させず、常に一定の粒度分布をもつ土砂が供給されるようにしている。

(3) 計算結果及び考察

図-6 は、Case1 の解析結果 (水深の分布) について、1 回目のピーク流量時の結果 (上段) と 2 回目のピーク流量時の結果 (下段) について示している。紙面の都合により、

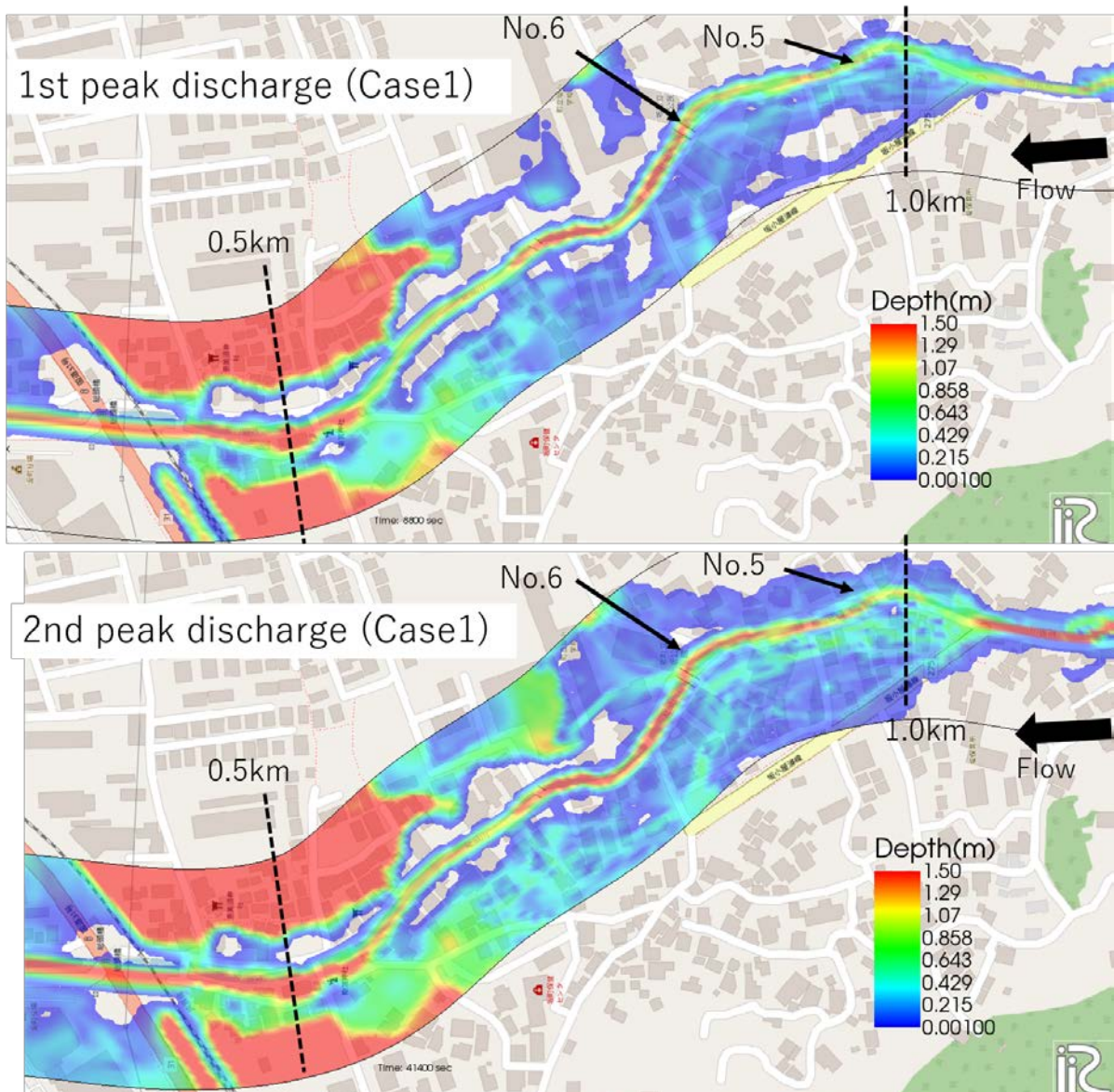


図-6 浸水深の計算結果（上：第1ピーク時、下：第2ピーク時）(Case1)

図-6には1.3kmから0.3kmの区間のみについて示している。なお、計算領域の左右岸境界付近が浸水しているものの、この境界はほぼ左右岸の山裾に沿って設定されているため、浸水範囲に対して大きな影響はない。

図-6から、1回目のピーク流量時には1.0km付近（扇状地の上流端に相当する位置）で氾濫が発生し、ここを起点としてその下流側では左岸側の氾濫が生じている。一方で右岸側では0.6km付近で氾濫が発生し、そのことによって右岸側の浸水が生じている。氾濫した洪水流は鉄道及び道路の盛土によってせき止められているため、このエリアの浸水は計算終了時まで継続している。

次に、図-6下段の2回目のピーク流量時の浸水についてみると、2回目のほうが流量としては少ないにも関わ

らず浸水域が広がっており、被害が深刻化していることが分かる。これは1回目のピーク流量時に河道内に土砂が堆積したことで河道の通水能力が低下しているために、浸水域がより広範囲に及んでいるものと考えられる。

図-7には、通水終了時のCase1及びCase2の河床高の変化について示している。両ケース共に、河道及び河道沿いを中心に土砂の堆積が生じており、この点では現地で見られた現象が再現されている。両ケース共に、1.0km地点で多くの土砂堆積がみられ、この付近の土砂堆積を起点としてその下流側の住宅地での氾濫が生じていることが分かる。Case1とCase2の土砂堆積について比較すると、Case2の方が堆積量としては少なくなっているが、これは流量量式の違いに起因するものである。すなわちCase2で

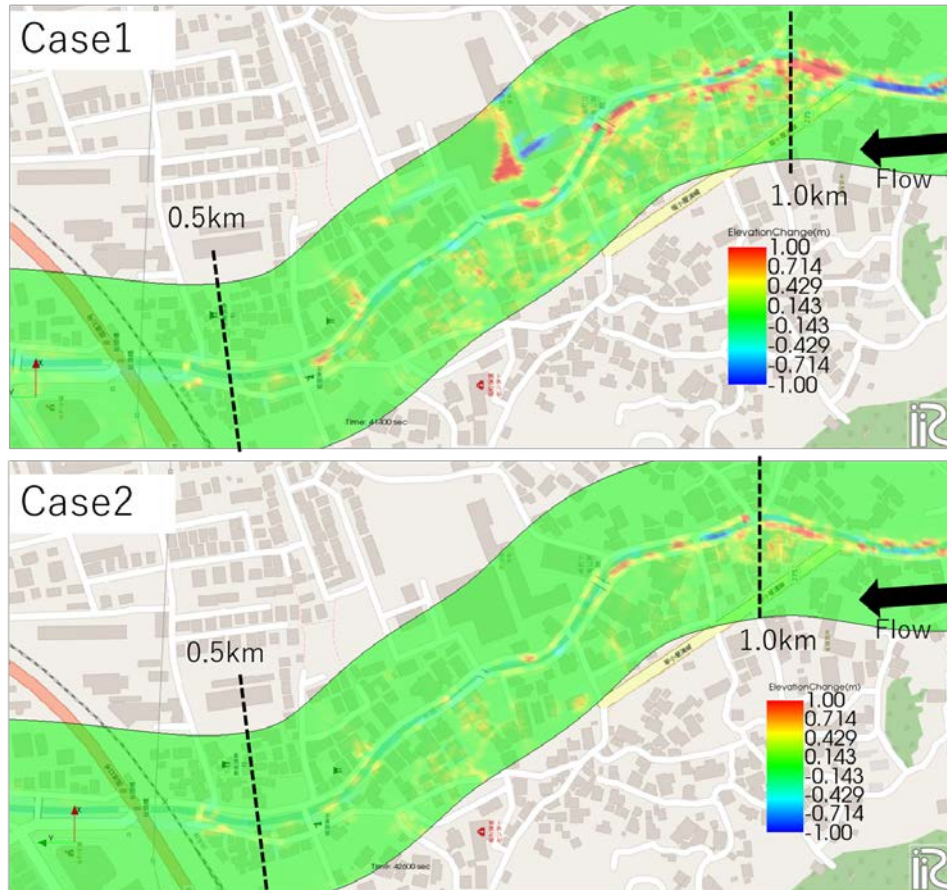


図-7 地形変化量の計算結果 (上: Case1、下: Case2)

は流砂量が無次元限界掃流力の $5/2$ 乗に比例する流砂量式を用いているため、 $3/2$ 乗の芦田・道上式と異なり粒径の細かい土砂ほど早く移動する。このことは、計算終了時の河床の粒度分布の評価に影響している。図-8 には計算結果について、粒度分布の上下流での違いを示している。Case1 の場合は、現地の河床材料 (No.4 及び No.6) と比較すると上流側で極端に粗粒化が生じ、下流側で極端に細粒化が生じている。一方 Case2 では現地河川の状況と近い粒度分布を表現できており、河床材料の粒度分布の評価という観点からは、流砂量が無次元限界掃流力の 2.5 乗に比例する流砂量式が現地の状況を良好に評価している。

4. 結論

本報告書では中山間地河川で生じる土砂・洪水氾濫災害の典型的な例として災害 2018 年の西日本豪雨における A 川の土砂・洪水氾濫災害に着目し、現地調査と数値解析によってその災害の特徴を明らかにすると共に、そのような現象を評価できる解析手法の検討を行った。

A 川の現地観測の結果、山地と住宅地の広がる扇状地面とが近いため、山地で生産された多量の土砂が下流の扇状地面まで輸送されていた。そのことによって下流の河積が現象し、住宅地に多量の土砂が堆積していた。ただし扇状地の扇頂部より下流には礫は輸送されず砂のみが輸送されており、流路延長が僅か 3.5km 程度の区間内で急激な河床材料の縦断分級が生じている。

平面二次元洪水流解析及び河床変動解析を行った結果、扇状地の上流端付近に最も多くの土砂が堆積しており、ここを起点として扇状地の全体を洪水流が流下したことで大きな被害をもたらした。計算では掃流砂量式として、流砂量が無次元限界掃流力の $3/2$ 乗に比例する芦田・道上式と $5/2$ 乗に比例する江頭らの式を用いて検討を行い、後者の結果の方が現地河川の粒度分布をより良好に再現する結果となった。

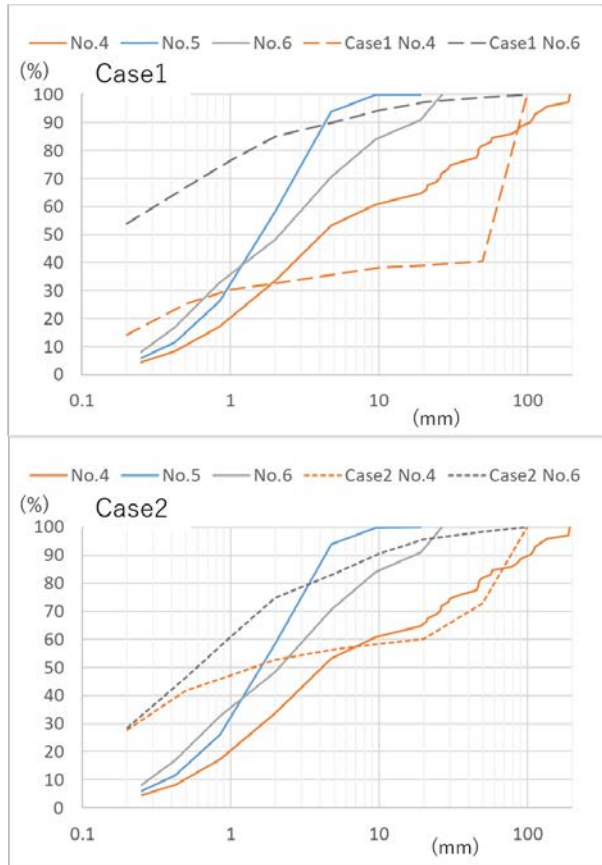


図8 粒度分布の計算結果と現地調査結果の比較

参考文献

- 1) 原田大輔, 江頭進治: 流砂・流木を伴う洪水流の解析—2017年7月九州北部豪雨による赤谷川洪水を対象として—. 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 74, No. 4, I_937-I_942, 2018.
- 2) 原田大輔, 江頭進治, 萬矢敦啓, 岩見洋一: 2016年度小本川災害における流路・河床変動を伴う洪水流の解析, 河川技術論文集 第23巻, 土木学会, 2017年6月.
- 3) 広島県: 平成30年度西日本豪雨災害報告書, 第46報, 2018年7月.
- 4) Sayama T., Ozawa G., Kawakami T., Nabesaka S. and Fukami K.: Rainfall runoff inundation analysis of the 2011 Pakistan flood in the Kabul river basin, Hydrological Sciences Journal, 298-312, 2011.
- 5) Shimizu, Y.: A method for simultaneous computation of bed and bank deformation of a river, River Flow 2002, Int'l Conf. on Fluvial Hydraulics Louvain-la-Neuve, Belgium, 2002.
- 6) iRIC software: <https://i-ric.org/en/>
- 7) Itakura, T. and Kishi, T. : Open channel flow with suspended sediments. Proc. of ASCE, HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 8) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究. 土木学会論文報告集, No.206,

pp.59-69., 1972.

9) 江頭進治, 宮本邦明, 伊藤隆郭: 掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集, 第41巻, pp.789-794, 1997.

10) 竹林洋史: 河川中・下流域の河道地形. 日本流体力学会誌 「ながれ」, 24.1: 27-36, 2005.

A STUDY ON AUTOMATIC STEERING SUPPORT SYSTEM FOR SNOW REMOVERS

Research Period : FY

Research Team : Water-related Hazard Research Group (ICHARM)

Author : HARADA Daisuke

ITO Hiroyuki

KIKUMORI Yoshito

NAGUMO Naoko

NAKAMURA Yosuke

EGASHIRA Shinji

Abstract : This study reveals the characteristics of flood flow with active sediment transportation which caused flood disaster in the A River located in the Hiroshima prefecture in July, 2018. The results of field surveys and two-dimensional numerical simulations for flood flow with sediment transportation found that the basin contains steep mountains and flat areas, and thus sediment produced in the mountains was rapidly transported to downstream areas during the disaster, which accelerated the flood disaster.

Key words : Flood flow with sediment, Fine sediment deposition, Channel closing, 2-D flood flow model