

河川基金助成事業

「住宅地へ流入する土石流溪流の実態把握と 防災対策の検討」

助成番号：2018-5211-036

京都大学大学院農学研究科
助教 中谷 加奈

平成 30 年度

1. はじめに

土石流は土砂災害の中で被害の甚大度が高く、土石流被害は扇状地の住宅地で多く発生する。例えば、2014年の広島土砂災害¹⁾や2018年7月豪雨²⁾では西日本の各地で甚大な被害が発生した。土石流渓流を検討する際は、砂防施設を設置する対象となる上流の山間部に着目して、下流の住宅地の実態は殆ど考慮されてこなかった。住宅地に流入する土石流渓流は、上流の山間部と比べて断面が小さくなることが多い。中でも、対策施設として砂防堰堤や治山堰堤が設置された渓流では、施設下流からは上流側と比べて著しく小規模の流路が接続する場合がある。しかし、この傾向は専門家には経験的に知られているものの、扇状地や住宅地に流入する土石流渓流の実態について系統的な整理や検討はなく、住民には殆ど認知されていない。流路が整備された渓流でも、谷出口で暗渠化がされることで、土石流渓流が扇状地に接続することを住民が認識し難い事例も見られる。土石流が発生した際には暗渠の閉塞などにより、道路上を水・土砂が移動することで、氾濫や堆積被害の拡大が見られる場合がある。対策施設が設置される地域でも、施設が機能すれば土砂は捕捉されるが、水や土砂の一部は渓流沿いに流下する。そのため、施設が設置される渓流の下流についても、渓流の実態や危険箇所の把握することが防災上求められる。

本研究では、扇状地に流入する土石流渓流の実態を高解像度のDigital Elevation Model (DEM)やGISの活用や現地調査から把握するとともに、得られた渓流の情報や災害状況を考慮して土石流シミュレーションを行い、危険箇所や防災対策を検討することを目的とする。

2章では扇状地に流入する土石流渓流の事例について、対策施設が設置された渓流に着目して実態の把握を行うとともに、シミュレーションにより災害状況と施設配置の差を比較する際、施設の土砂捕捉だけでなく水移動までを考慮した下流への影響も検討した。3章では、2018年7月豪雨において土石流による被害が発生した2渓流を対象として、住宅地における土石流挙動や被害状況の整理を行うとともに、土地利用を考慮した新しい防災対策の提案をシミュレーションにより実施した。4章では、本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の課題や展望を示した。

2. 扇状地へ流入する土石流渓流の検討

2.1 施設下流からの渓流の断面

扇状地へ流入する土石流渓流について、土石流災害事例や、渓流の施設設置について既往検討のレビューやヒヤリング、現地調査、GISの活用により情報収集を行い、対策施設が設置された5渓流について検討した。

写真2.1は土砂災害防止法の契機となった1999年の広島土砂災害で土石流が発生した広島県広島市安佐北区亀山の太毛寺左支川の宝木迫谷川である。1999年の災害後に、不透過型砂防堰堤が設置された。堰堤の下流では断面が大きな流路が接続し、さらに下流では太毛寺川に合流する。この渓流は太毛寺川に合流するまでに、**写真2.1**中央や左に見られる小さな橋が架かっている箇所は存在したが、暗渠化されることなく、大きな断面のまま下流に連続する稀な事例だった。

写真2.2は、京都府亀岡市千歳町の中谷川に2014年度に設置された鋼製透過型の砂防堰堤である。渓流の下流は土砂災害警戒区域（土石流）に指定されている³⁾。堰堤の下流から断面が徐々に小さくなり、谷出口の下流に位置する墓地の上流から暗渠化されている。暗渠化した下流では、地上

から溪流に接続する流路や側溝は確認できない。

写真2.3は、2018年7月豪雨で土石流が発生した広島県東広島市内の溪流である。このエリアでは、1993年にも土石流が発生しており、災害後の1994年に治山施設が整備された。施設の下流から延びる流路が、道路の直上で暗渠化されている。2018年の災害時には暗渠が閉塞して、道路上にまで土砂・流木が流出したことが報告されている⁴⁾。



写真 2.1 宝木迫谷川の砂防堰堤（左：下流から望む、中央：下流の流路から望む、右：上流から望む）



写真 2.2 中谷川の砂防堰堤（左：概観、中央：下流の流路から望む、右：上流から望む）



写真 2.3 東広島市の治山施設（左：下流から望む、中央：道路までの概観、右：上流から暗渠を望む）

写真2.4は2014年8月の豪雨により、土石災害が発生した兵庫県丹波市徳尾地区の溪流である^{5),6)}。災害後に設置された不透過型砂防堰堤の下流から徐々に流路の断面が小さくなり、下流側で接続

する道路からは暗渠化されている。

写真2.5は2014年8月に土砂災害が発生した広島県安佐南区八木の県営住宅である。災害後に造られた不透過型砂防堰堤と堰堤下流の流路の概観を示す。堰堤高は14.5m、堰堤本堤の下流から堆積工設置や河川改良が行われ、更に下流では雨水渠整備が八木・緑井地区で進められている。



写真2.4 徳尾の砂防堰堤（左：下流から望む、中央：本堤を正面より撮影、右：上空から望む⁶⁾に加筆）



写真2.5 八木地区県営住宅上流の砂防堰堤（左）と下流に伸びる流路（右）

写真2.6は、2018年7月豪雨で土砂災害が発生した広島県安芸郡府中町の榎川の上流に位置する水分狭の中流部である。2018年7月10日の11時過ぎに、2018年7月豪雨災害を引き起こした降雨イベント終了から丸一日以上経過した後、住宅街を流れる榎川の下流まで段波が到達し、榎川の蛇行箇所や橋梁に流木や土砂が閉塞して、水位上昇による氾濫被害が広く発生した²⁾。榎川では住宅地に流入する支流が土石流警戒区域に指定されているが、今回の災害では榎川の上流側での崩壊や、それに伴う土砂や流木の流出が影響したと推測されることから、上流の水分狭の状況を調査やGIS等を利用して確認した。写真2.6の中流部の様子を下流側から順に左から示す、黄色矢印が本流の流下方向である。写真2.6左は下流に位置する橋で、流路断面が比較的小さく、橋の上や周辺に土砂が堆積した様子からも、閉塞したことが推測される。少し上流に位置する写真2.6中央は、断面が広く勾配も緩いため流路両岸に細かい土砂の堆積が見られるだけだが、さらに上流の写真2.6右では大きな土砂の堆積も流路幅全体で見られ、支流からの土砂流入も確認される。写真2.7は水分狭の上流部における、林道との合流箇所を示す。写真2.7左は合流部の上流側で、合流点の上流からボックスカルバートになっている。写真2.7中央は合流部の下流側を示す。写真2.7右は、ボックスカルバートを上流より望んでおり、土砂や流木によりカルバートが閉塞したことが推測される。上流では、写真2.7と同様の林道と流路の合流箇所が複数見られた。榎川で段波が遅れて

発生した原因は判明していないが、上流の状況から示されるように、谷部では林道は盛り土上に造られており、溪流との合流点ではボックスカルバートが採用される。平常時の雨量では、問題なくカルバート内を通過できても、豪雨時には流量が大きくなることに加えて、土砂や流木が流出することで閉塞し、越流や林道の決壊に繋がったことが推測される。また、支流での林道の小規模な決壊が発生することで、本流でも一時的に顕著な土砂堆積が発生して、小規模な天然ダムが形成・決壊が生じた可能性も挙げられ、これらが遅れて発生した段波の原因にもなりうる。水分狭の上流では支流に写真2.8のような治山堰堤が設置された場所も確認された。堰堤直下では流路断面が大きいものの、林道との合流点ではボックスカルバートが採用されており、カルバートでの閉塞が起こったことが推測される。

住宅地に流入する溪流の上流側において、急勾配のエリアからは土石流などの土砂や流木の流出が起こり得る。水とともに流出する土砂や流木が、そのまま流路内を流下できず、危険箇所となるのが流路断面が小さくなることや、流路上の橋で閉塞が起こること、ボックスカルバート等の暗渠が閉塞することであることを、水分狭の検討から示した。



写真 2.6 水分狭の中流部（左：下流で閉塞した橋、中央：堆積が少ない中流のエリア、右：堆積が多い上流のエリア）



写真 2.7 水分狭の上流部での林道との合流箇所（左：合流部の上流側、中央：合流部の下流側、右：ボックスカルバートを上流より望む）



写真 2.8 水分狭の上流部の支流に位置する治山堰堤

上記に挙げた6事例（水分狭は全体で1事例）の中で、水分狭を除く典型的な土石流溪流の5溪流については4溪流で施設の下流や住宅地のの上流で暗渠化されていた。暗渠化は平常時や小規模降雨時の排水には有効だが、東広島のように大規模降雨や土砂災害時には閉塞して、道路上への水・土砂の流出が起こることが推測される。今後も、引き続き情報収集とデータ整理を図る。

2.2 土石流シミュレーション

GISと連携した土石流シミュレーションシステムHyper KANAKO⁷⁾を用いて計算を行った。このシステムは抵抗則や侵食堆積速度に高橋モデル⁸⁾を採用し、山間部で流れ方向のみに拘束される一次元領域の谷部から、流れ方向だけでなく横断方向にも流れが広がる扇状地の二次元領域までを連続的に扱える結合モデル⁹⁾を採用している。一次元領域では、里深・水山が提案した不透過型砂防堰堤による堆積を考慮した計算¹⁰⁾も可能である。既往の土石流事例と比較検証を行い、住宅地における挙動や影響範囲の妥当性¹²⁾を確認している。

2.2.1 検討対象と計算条件

対象は、2.1で検討した写真2.2（京都）、写真2.5（広島）の2溪流として、土石流による影響と施設配置による差を土石流シミュレーションにより検討した。なお、土砂災害時に暗渠の多くは土砂等で閉塞することが報告されるため^{4),11)}、計算では暗渠の閉塞を想定して、暗渠化した箇所からは地面上を流動するシナリオとした。

京都の計算（Sim1）には、ピーク流量 $50\text{m}^3/\text{s}$ 、土砂濃度0.3で300秒間供給する小規模な土石流シナリオを検討した。堰堤上流の谷部（一次元領域）は国土地理院の公開する解像度5mメッシュの数値標高データを、堰堤下流の二次元領域はUAVで取得した解像度0.5mのDEMを用いた⁶⁾（図2.1）。京都府が設定した警戒区域図を参考に、谷地形を呈する範囲を一次元領域として、警戒区域を囲むように二次元領域を設定した。一次元領域は5mの計算点間隔を、二次元領域は1mの計算格子を用いた。土石流シナリオと、2014年度に造られた砂防堰堤を考慮したシナリオを計算して比較を行った。なお、堰堤有のシナリオでは、出来るだけ多くの土砂・水が上流に貯まる条件を考慮したかったため、同じ高さの不透過型砂防堰堤として扱った。

広島の計算（Sim2）では2014年の土石流を対象として妥当な計算結果を得た既往検討¹²⁾を参考にして、ハイドログラフなどの土石流シナリオを設定した。災害前に取得された解像度1mのDEM

を用いて、谷出口付近の建物は高さ6mとして地盤高を上げる処理を行った（図2.2）。上流から土砂移動が見られた範囲を一次元領域として、2014年の災害後に広島県が設定した警戒区域を囲むように二次元領域を設定した。一次元領域は5mの計算点間隔を、二次元領域は2mの計算格子を用いた。災害後に造られた堰堤の位置・高さを考慮したシナリオと、堰堤が設置されない災害シナリオを計算して、その比較を行った。



図 2.1 Sim1（京都）の計算範囲



図 2.2 Sim2（広島）の計算範囲

但し、堰堤については本堤のみを考慮して、堰堤下流の対策（堆積工設置や河川改良、雨水渠整備）までは考慮していない。

その他の計算に用いたパラメータを表2.1に示す。

表 2.1 計算パラメータ

パラメータ	数値 (単位)
計算時間	600 (s)
計算の時間間隔	0.01 (s)
粒径	0.1 (m) 京都
	0.2 (m) 広島

液相の密度	1,000 (kg/m ³)
砂礫の密度	2,650 (kg/m ³)
砂の内部摩擦角	37 (deg)
河床の容積濃度	0.60 京都 0.65 広島
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
マンニングの粗度係数	0.03 (s/m ^{1/3})

2.2.2 計算結果

得られた二次元領域の計算結果について、**図2.3**にSim1（京都）を、**図2.4**にSim2（広島）を示す。それぞれの図では、上段は砂防堰堤有り、下段は堰堤無し（土石流シナリオ）で、左は終了時の堆積厚、右は最大水位（流動深+堆積厚の最大値）を示す。

図2.3にSim1（京都）について、堰堤有りでは堰堤の上流で土砂が捕捉されて下流の二次元領域の堆積範囲や数値が堰堤無し（土石流シナリオ）と比較して大幅に減少する。しかし、土砂は捕捉されても水は流出するため、10cm以上の最大水位を示す範囲は大きく変化しない。堰堤有りでも、暗渠化した下流側の道路上で100cm以上の最大水位を示すため、堰堤が機能しても下流へ流出する水の挙動を考慮した対策の検討が必要である。**図2.4**のSim2（広島）においてもSim1と同様の結果が得られ、土砂捕捉には有効な砂防堰堤も、下流への水の流出、すなわち堰堤の流末処理を考慮した対策の検討の必要性が示された。

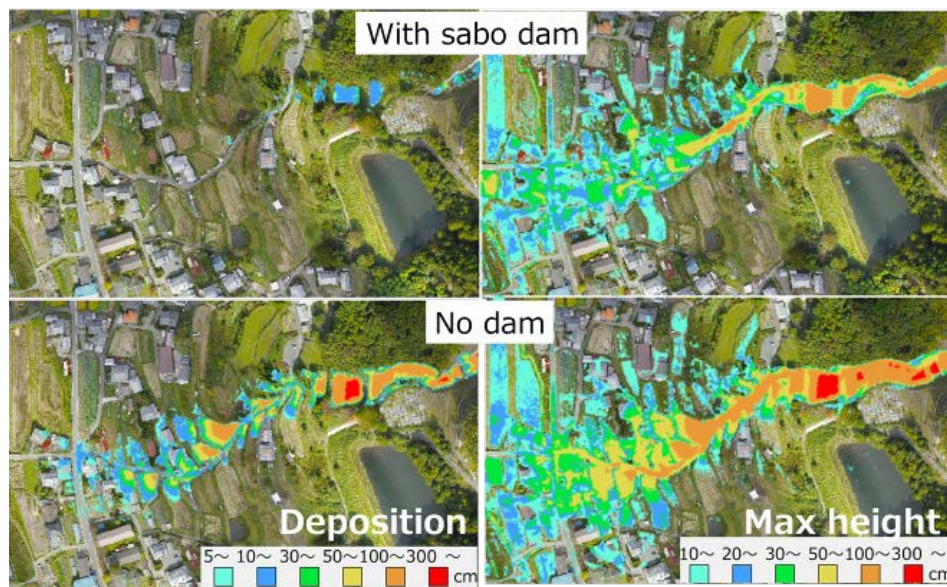


図 2.3 Sim1（京都）の計算結果（上段は堰堤有り、下段は堰堤無し、左は終了時の堆積厚、右は最大水位）

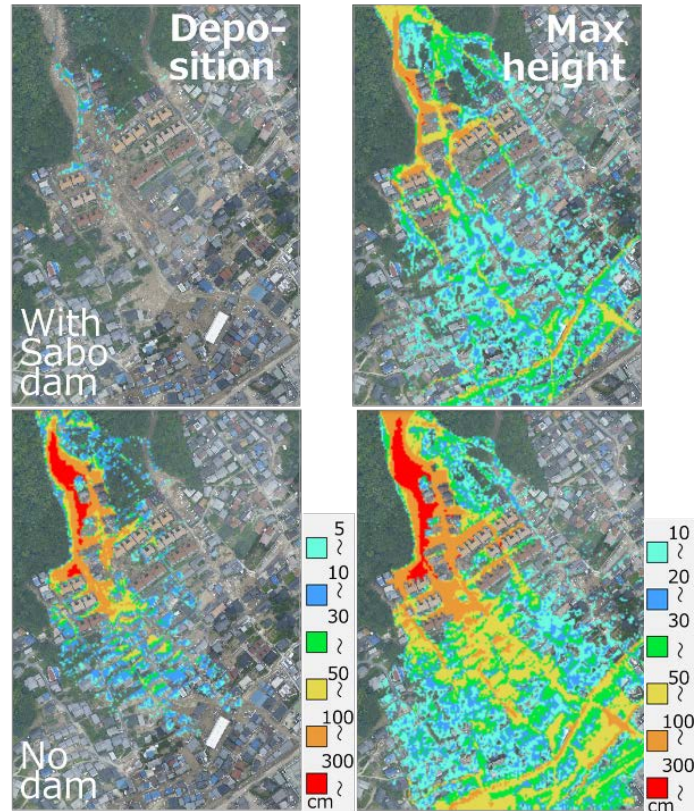


図 2.4 Sim2 (広島) の計算結果 (上段は堰堤有り、下段は堰堤無し、左は終了時の堆積厚、右は最大水位)

3. 2018 年 7 月豪雨で発生した土石流被害と谷出口の道路や暗渠の影響

3.1 概要

2018年7月豪雨では西日本各地で土砂災害が多発し、山裾まで開発が進んだ扇状地の住宅地で発生した土石流により、多くの人的・物的被害が生じた。山間部では、谷出口から延びる溪流や流路が住宅地の直上で暗渠化されることが多い。また、山地流域では谷埋め盛土により道路を設置することもあり、その場合にも暗渠で排水が行われる。一方、土砂災害が発生する降雨規模では巨礫や流木により暗渠が閉塞することがある¹¹⁾。また、流路が見えなくなることで、住民は土石流溪流が住宅地に接続することを十分認識できない場合がある。

平成30年7月豪雨により兵庫県神戸市や広島県広島市の住宅地で発生した土石流では^{2), 13)}、暗渠が土砂等で閉塞したことで、暗渠が接続した道路上を土砂・水が移動して、住宅地に広く被害を及ぼした。また、暗渠から続く住宅地の道路勾配が急だったことや、花崗岩地域に見られる細粒土砂を多く含む土石流が高い流動性を示したために、土砂移動範囲が拡大した場所もある。これらの土石流は日本で一般的な山間部の住宅地で発生したため、他のエリアでも同様の被害が発生する恐れが高い。

本章では、扇状地の道路や暗渠に着目して災害状況を整理するとともに、現地情報から得られた条件を設定した解析により住宅地内での土石流の挙動や危険な箇所を示して、解析を活用して

防災対策の検討を行うために必要な情報を示すことを目的とした。さらに、砂防堰堤や避難などの従来対策以外に住宅地内の安全な土地利用を考慮した対策例を解析で検討することにより、住民が受動的に行政からハードやソフト対策を提供されるだけでなく、その有効性の検討や新たな土地利用による防災対策などを能動的に検討する契機となることを目指した。

3.2 検討対象

3.2.1 兵庫県神戸市

2018年7月豪雨により、兵庫県神戸市灘区篠原台で被害が発生した。被災地の山頂で崩壊が発生し、自然河道を侵食しながら流下し、下流の住宅地まで流出した（図3.1）。対象地の流域面積は約0.06 km²である。六甲砂防事務所による災害前後のレーザ計測成果を用いた差分解析では崩壊土砂量は約3,900 m³だった。流下域の溪床や溪岸には、強風化花崗岩起源の土砂が厚く堆積し、この土砂が侵食されて移動した。粒度試験では、粒径2 mm以下の粘土～砂の構成比が70%だった。災害発生から10日後の調査時に、谷出口の堆積土砂の上を歩くと泥状に液相化して、足がはまることもあった。一方、溪床には数cm程度の土砂や、分布密度は小さいが径0.6～1 m程の礫も確認された。

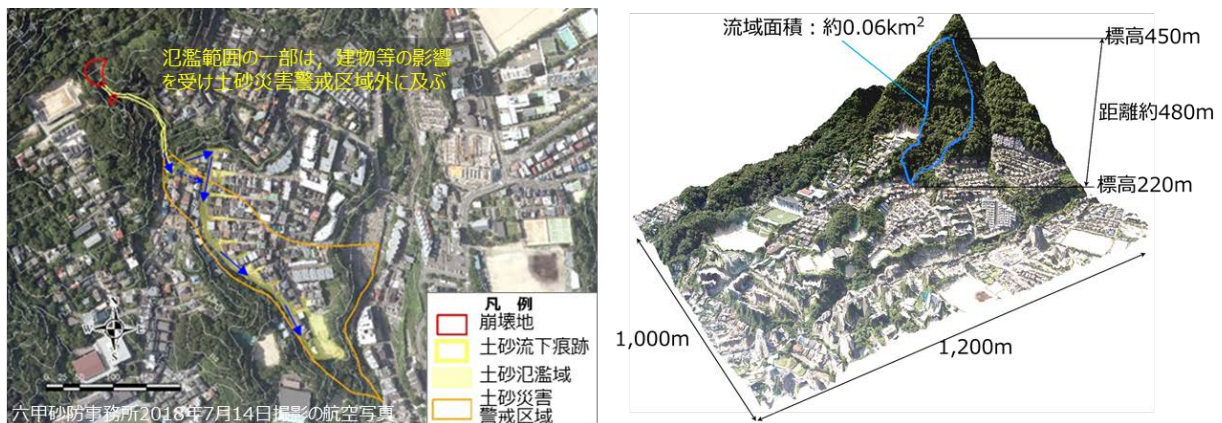


図 3.1 篠原台での土砂移動の概要（左：災害報告²⁾に一部加筆、青矢印は土砂の流出方向）と流域周辺の鳥観図（右）

流下域の下流の谷出口付近には、横断構造物が設置され（図3.2、a）、その下流側で道路下に暗渠が接続する（図3.3、図3.4）。暗渠は径0.8 mのヒューム管が2本並列で埋設されて、上流側は深さ約4 mの立坑である。関係者のヒヤリングや報告から¹⁴⁾、土砂流出時には谷出口の暗渠が土砂で埋塞した状況が確認された。そのため、土砂の流出時には、暗渠の続く流路ではなく、地上の道路（図3.2、b）を主経路として住宅地内を流下し、氾濫・堆積した。土砂が堆積した面積は痕跡から約7,400 m²に及ぶ。図3.2左には図3.1左に示される土砂氾濫域を赤色で、地理院タイルの航空写真上に示す。谷から延びて住宅地内に続く道路上で堆積が見られる。道路上を移動したことで、土砂氾濫域の一部は土砂災害警戒区域外に及んだ。



図3.2 篠原台での土石流氾濫域（左、地理院タイルの航空写真に加筆）と谷出口付近の状況（右）



図3.3 篠原台での谷出口付近の暗渠と道路の位置（調査時に撮影、左）、掘削後の立坑を上流から望む（排土復旧後に撮影、右）

住宅地での建物被害の多くは、土石流出による床上や床下浸水、土石堆積によるもので建物が倒壊する等の構造に大きく影響するものは少なかった。しかし、谷出口の土石流の直撃を受けた建物は、壁が壊れる等の礫の衝突によると推定される被害がみられた（図3.2、c）。被災した建物cの上流側に位置する道路が、勾配約1/11で東方向に傾斜する（図3.2、b）。災害後の道路の横には約0.7 mの土石流の流下痕跡が確認された。

土石流出は、7月6日15:00過ぎに小規模な流出があり、7月6日20:30頃に大規模に流出したとみられる¹⁵⁾。7月4日0:00から土石流出が発生した7月6日15:00までの総降水量は約600 mm、最大時間雨量は35 mmで、継続時間6～10時間、総降水量100～150 mm程度の雨が7月4日深夜から繰り返して発生し、3日間降り続いた²⁾。篠原台は河床勾配が3～10°の土石流堆積区間に位置する急勾配の住宅地で（図3.5）、谷出口で溪流が暗渠化して道路に接続したことで、住民は土石流溪流の存在を認識し難かったと考えられる。

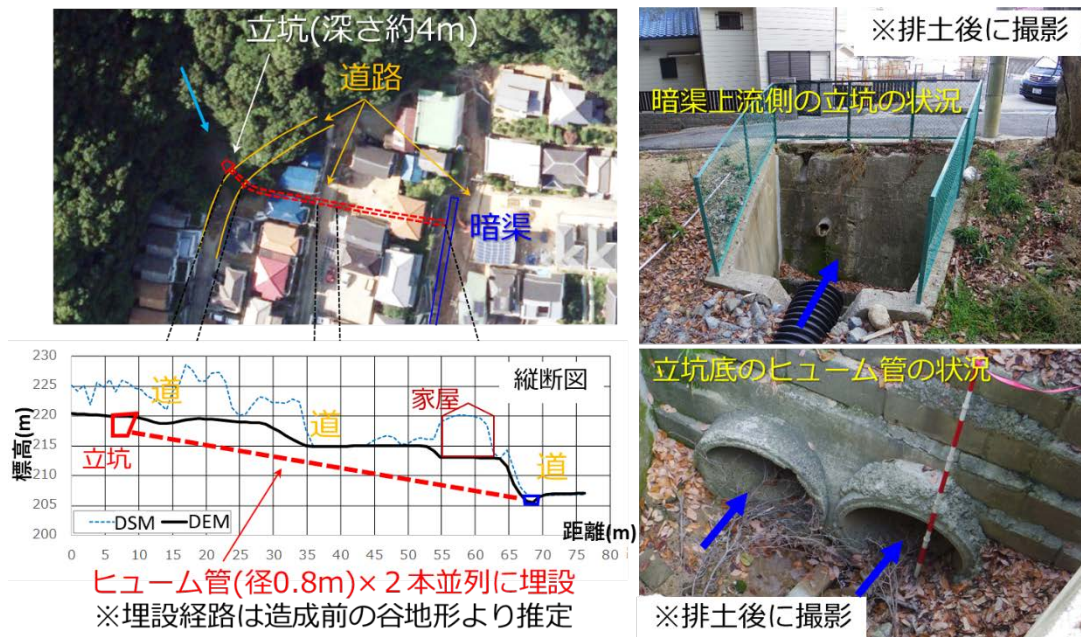


図3.4 篠原台での谷出口付近の暗渠の詳細

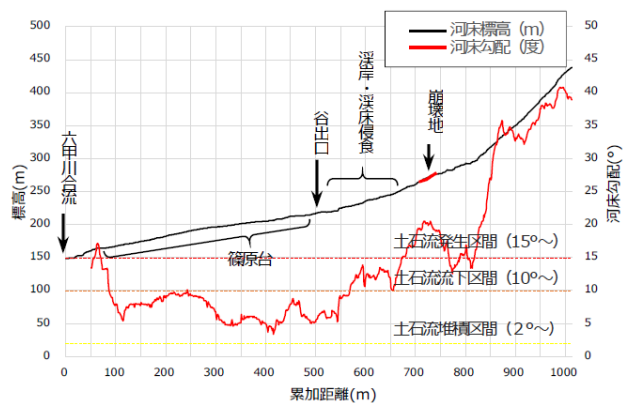


図3.5 篠原台の縦断面図（災害報告²⁾に一部加筆）

3.2.2 広島県広島市

広島県広島市安芸区の矢野東7丁目では、隣接する4溪流から崩壊や土石流が発生した。この地区で最も被害が大きかった13溪流は、流域面積0.12 km²、溪流の平均勾配22.2度、災害前後のLPの差分から推定される流出土砂量は右支川と左支川を合わせて約12,500 m³（空隙込）で、溪流内で侵食により土石流が発達したことが推測される。

谷出口には平成30年3月に竣工された有効高6.5 m、堤長25 m、天端幅2.5 mの治山堰堤が存在する。堰堤には勾配が2~3度で、LP差分から約1,700 m³の土砂が堆積し、下流には約10,800 m³の土砂量が流出した。治山堰堤上流側の各支川を見ると、治山堰堤から数十m上流では地表から20 mの高さで基岩が露出する。地質特性は大部分が花崗岩、一部が流紋岩で泥状のものは少ない。2018年8月1日の調査から堰堤直上流の堆砂域の堆積土砂の最大粒径は約50 cmで数cm程度の土砂が多く分布した（図3.6）。

災害後の土砂移動状況と警戒区域の指定状況（災害前は未指定）、建物の被害状況を図3.7左に、流域周辺の鳥観図を図3.7右に示す。警戒区域の上流側では建物被害や数mの堆積が見られ、上流で被災した建物間に位置する道路（図3.7の矢印b）やその下流で被災した建物沿いの道路（図3.7の矢印c）上を土石流が流出したことが確認される。



図3.6 矢野東13溪流の治山堰堤（左上）と堰堤上流の堆積（右上）、堰堤上流の状況（下段）

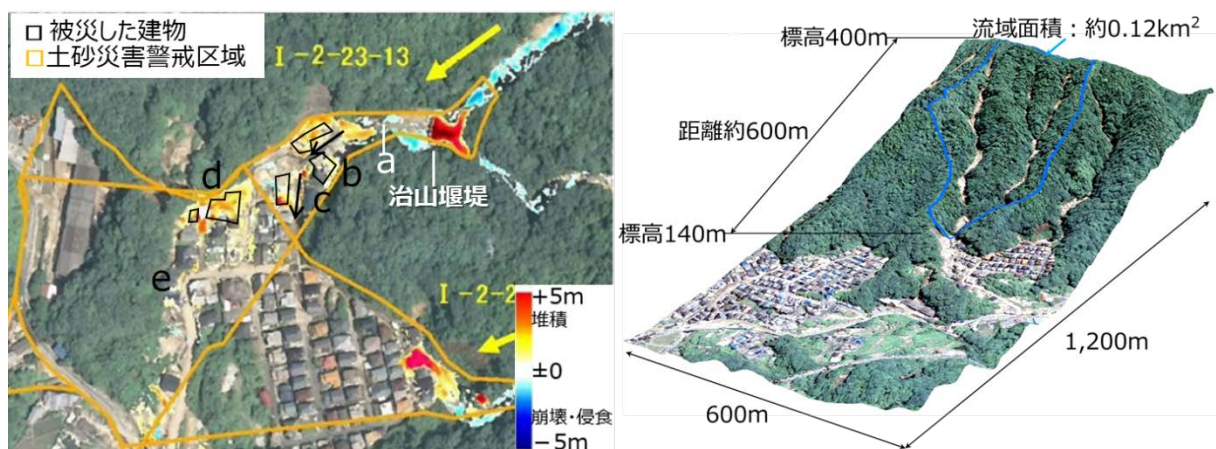


図3.7 矢野東13溪流の土砂堆積状況と谷出口の位置図（左：広島県資料¹⁶⁾を一部加筆）と流域周辺の鳥観図（右）



図3.8 矢野東溪流13下流の谷出口付近 (a-c位置は図3.7に記載)

また、下流の警戒区域外縁の北側 (図3.7のd) で建物が被災して、顕著な堆積が見られる。図3.7のeより北東の警戒区域内は、南北方向の道路全てで堆積が見られ、この範囲は全域で危険度が高いことを示す。治山堰堤の下流では、図3.8に示すグレーチングで覆われる道路の下部に地下水路が設置される流末処理が行われていた。しかし、災害時はボックスカルバート (高さ80 cm、幅140 cm) が土砂等で閉塞して (図3.8のa)、急勾配の道路上 (図3.8のb、c) を土砂・水が移動する際に、周辺の家屋を破壊、流失させるなどの被害をもたらした。

3.3 土石流シミュレーション

2.2と同様に、抵抗則や侵食堆積速度式に高橋モデル^{8), 17)}を用いたGISと連携した土石流シミュレーションシステムHyper KANAKO⁷⁾を適用して、3.2に示した神戸市篠原台と広島市矢野東13溪流の計算を実施した。計算では暗渠の閉塞を想定して、暗渠化した箇所からは地面上を流動するシナリオとした。

3.3.1 地形データ

地形データは、災害前に取得された解像度1 mメッシュのDEM (Digital Elevation Model) 並びにDSM (Digital Surface Model) を用いた。一次元領域として設定する谷部では、植生の影響が除かれたDEMを採用した。神戸の一次元領域は、図3.4の崩壊地から谷出口までの区間である。広島市安芸区矢野東7丁目の13溪流は、左支川と比べて右支川からの流出土砂量が大きかったため、右支川を計算対象とした。右支川の上流側で30度を越える急勾配領域が存在したため、それよりも緩くなる領域から警戒区域内で堆積した上流側 (図3.8のa) までを一次元領域とした。治山堰堤は固定床で地形条件として設定した。一次元領域の計算点間隔は両者とも5 mとした (図3.9、3.10)。図3.9中のR川は六甲川を示している。

谷出口から下流の住宅地の二次元領域では、DEMとDSMを用いる2ケースを実施した。DEMは植生や建物等を除いた地盤高の標高が表される。また、DEM、DSMとも、住宅地では宅地の盛土

が表現される。更に、DSMでは扇状地の建物標高が反映されることにより、建物と道路の標高差がDEMよりも顕著に表れて、土石流が建物間の道路上を集中して流下する様子が表現される。一方、DSMは建物を地盤高として表現するため、大きな流体力等が発生しても地盤高は変化しないことから、壊れない頑丈な建物を想定した計算となる。二次元領域の計算メッシュはDSMを用いた際に住宅地内の道路が表現される大きさとして、神戸で2 m×2 m、広島では1 m×1 mとした。神戸、広島の全計算ケースで二次元領域は固定床としており、侵食は発生しない。



図3.9 神戸の計算領域の設定（背景は地理院タイル、二次元領域は図3.2左の土砂氾濫域を示す赤四角の範囲と共通）



図3.10 広島市安芸区矢野東7丁目の計算領域の設定（背景は広島県提供の災害後オルソ）

3.3.2 計算条件

土石流シナリオとして、神戸では上流の崩壊土砂由来の土石流の発生、並びに溪流を流下する

際の侵食による土石流の発達を想定した。崩壊土砂は3,900 m³（空隙込）で、土砂流出が発生した7月6日15:00までに総降水量100～150mmの雨が繰り返し発生した。土石流ハイドログラフの設定において、影響する降雨の設定方法は複数考えられるが、本検討では対象地域（一次元下流端付近の谷出口よりも上流の流域面積0.06 km²）で豪雨中に繰り返し発生した100-150 mmの一波が影響したシナリオを想定した。

100 mmの降雨が、流出率0.7（山地）で流出すると（流域面積×降雨×流出率）より水の総量は4,200 m³となる。上流で発生した崩壊土砂量は前述した3,900 m³（空隙込）、C*=0.65では2,535 m³（空隙無し）、水の量と土砂量の総量は6,735 m³（空隙無し）、濃度0.37となる。土石流の規模は降雨量と線形的な関係を示さず、ピーク流量は降雨のみから推定される数値より大きくなることもある¹⁸⁾。また、水の貯留や解放機能は明確にされていないが、土石流発生前に流域に降った水や貯留された水が短時間で一気に流出することが推測されている¹²⁾。そこで、日本の土石流発生事例¹⁹⁾を参考にして、土石流の継続時間360秒（0～60秒間に0から増加、60～300秒間ピーク継続、300～360秒間に0まで減少）の台形波形を設定すると、ピーク流量22.5 m³/sとなり溪流の土石流痕跡とマニング則で求められる流量と対応した。さらに、災害後の現地調査から、主流路の河道幅は約8-11 m、侵食深は約1-3 mだったため、一次元領域の川幅10 m、溪流からの生産土砂として移動可能土砂厚2 mで設定した。

調査結果から神戸では代表粒径0.01 mを設定した。また、2 mm以下の細かい材料を多く含んだことから、液相密度を大きくした条件も設定した。高橋の土石流の平衡濃度式から^{8),17)}、液相密度が大きくなると同じ勾配で高い平衡濃度の土石流として挙動することで、より緩勾配の下流まで土砂が到達することが説明できる。一般的な土石流であれば液相密度 $\rho=1,180 \text{ kg/m}^3$ を用いることで、一部の土砂の液相化は考慮されるが、対象地域で見られた非常に多くの細粒分を含む土石流シナリオを考慮するために、既往検討²⁰⁾を参考に $\rho=1,400 \text{ kg/m}^3$ のケースも実施した。神戸の計算ケースを表3.1に、その他の計算パラメータは表3.2に示す土石流計算の一般値を用いた。

矢野東13溪流では、溪流を流下する際の侵食のみによる土石流の発達を想定した。災害後の移動土砂量や航空写真、調査状況、LP差分から溪流全体で下流に流出した土砂量10,800 m³を対象として、一次元領域に移動可能土砂を厚さ3 m、河道幅10 mで設定し、総土砂量を10,000 m³（空隙込）とした。治山堰堤の左岸側と右岸側に残された土石流痕跡から水深を推定して、堰の公式を用いて流量係数0.6からピーク流量158 m³/sを算出して、流出規模の大きい右支溪のみから流出させた。堰堤より下流の住宅地には、流出流量のピーク値が氾濫や堆積に大きく影響すると考えたためである。試行計算から上流端から水のみを45 m³/s供給すると、侵食により発達した土石流が堰堤位置で推定されたピーク流量となることを確認したため、上流端から水を45 m³/s、既往の土石流事例¹⁹⁾を参考に300秒間の台形波形（0～50秒間に0から増加、50～250秒間ピーク継続、250～300秒間に0まで減少）で通水した。現地状況から代表粒径を0.1 mとして、神戸と比較して細粒土砂は少ないことから液相密度 $\rho=1,180 \text{ kg/m}^3$ とした。広島の場合を表3.3に、その他のパラメータは表3.2に示す一般値を用いた。

表3.1 神戸の計算ケース

Case	2D 領域の地形データ	液相密度 (kg/m ³)
1	DEM	1,180

2	DEM	1,400
3	DSM	1,180
4	DSM	1,400

表3.2 計算パラメータ

パラメータ	数値 (単位)
計算時間	600 (s)
計算の時間間隔	0.02 (s)
粒径	0.01 (m) 神戸
	0.1 (m) 広島
砂礫の密度	2,650 (kg/m ³)
砂の内部摩擦角	37 (deg)
河床の容積濃度	0.60 京都
	0.65 広島
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
マンニングの粗度係数	0.03 (s/m ^{1/3})

表3.3 広島の計算ケース

Case	2D 領域の地形データ	液相密度 (kg/m ³)
5	DEM	1,180
6	DSM	1,180

3.4 結果と考察

3.4.1 兵庫県神戸市

神戸の計算終了時の堆積厚ならびに各計算点の最大水位(流動深+堆積厚の最大値)を図3.11、3.12に示す。一次元領域ではCase1-4でDEMを用いた同じ地形条件を設定したが、二次元領域にDSMを採用したCase3とCase4は谷出口となる二次元領域の上流端付近に建物が存在する影響で、DEMを採用したCase1やCase2と比較して500 cm以上の顕著な土砂堆積が建物位置の上流側で生じる。本検討で用いたHyper KANAKOでは一次元領域と二次元領域の境界部で、河床位や水位変化が相互に影響する結合モデル⁹⁾を採用している。そのため、二次元上流部の堆積により、一次元領域の下流部にも二次元上流の堆積による河床変動が生じて、上流側に影響が波及することで、二次元領域へ流出する土砂量(固相)がCase1の6,600 m³よりもCase3の3,800 m³で少なく、Case2の7,000 m³よりもCase4の5,000 m³で少なくなる(全て空隙込み)。Case1、3と2、4では液相密度の高い $\rho=1,400$ kg/m³のCase2、4の方が流出土砂量が大きい。Case2と4は土砂の流動性が高くなる影響により、DEMとDSMによる差は1.3倍で、Case1と3の差1.7倍よりも小さい。

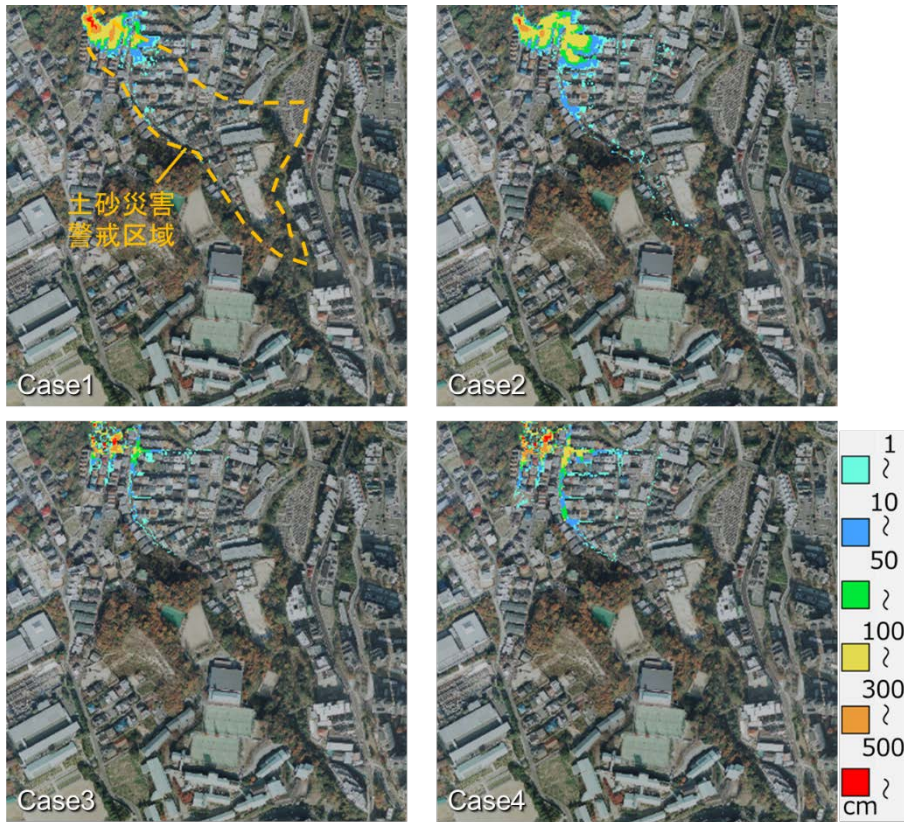


図3.11 神戸の二次元領域の計算結果（終了時の堆積厚、背景は地理院タイル）

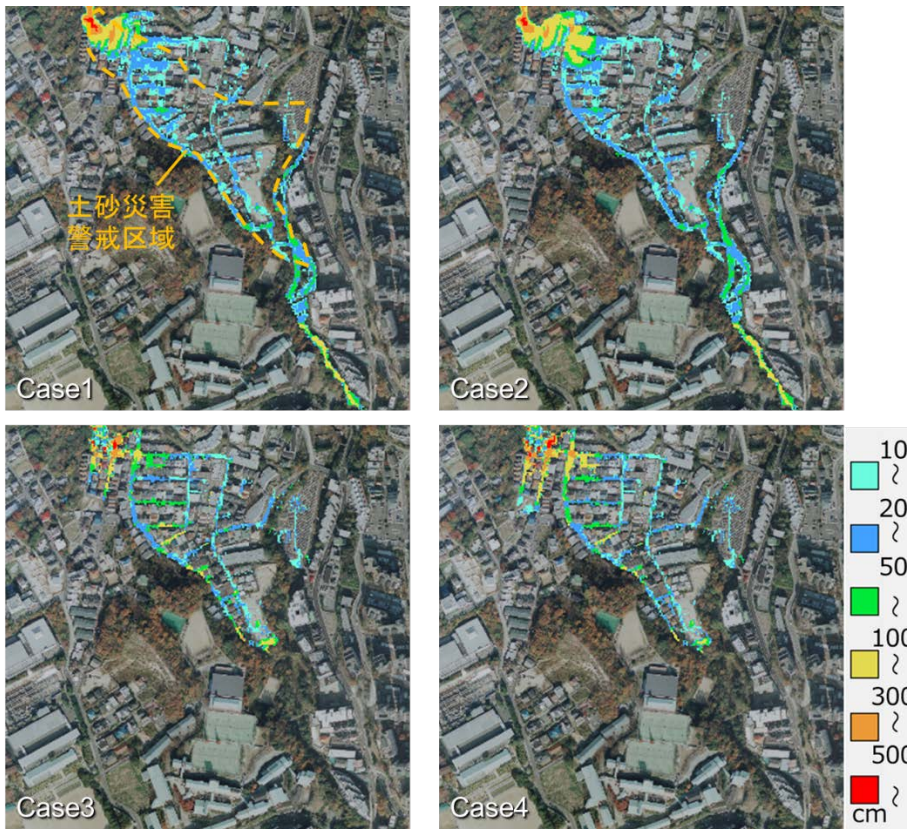


図3.12 神戸の二次元領域の計算結果（最大水位、背景は地理院タイル）

DEM の Case1、2 では谷出口付近から広い範囲で堆積や最大水位が見られる。Case1 の液相密度 $\rho=1,180 \text{ kg/m}^3$ の方が谷出口付近で 500 cm 以上の大きな数値を示す一方、Case2 の $\rho=1,400 \text{ kg/m}^3$ は 500 cm 以上の範囲は小さいが 100 cm 以上の範囲がみられ、より下流まで土砂・水が移動したことが示される。DSM の Case3、4 では、谷出口から建物間の道路に沿った堆積や最大水位が確認される。道路上を通過して警戒区域外に到達した挙動や、図 3.2 に示した土砂氾濫域は DSM の方が DEM よりも対応する。特に、道路沿いの堆積がより下流まで到達するのは $\rho=1,400 \text{ kg/m}^3$ で顕著で、災害状況を最も示すのは Case4 だと考えられる。

3.4.2 広島県広島市

広島の計算終了時の堆積厚ならびに各計算点の最大水位(流動深+堆積厚の最大値)を図 3.13、3.14 に示す。なお、広島でも Case5、6 で DEM による共通の一次元領域を用いたが、二次元領域に流出する土砂量は Case5 の DEM で $7,700 \text{ m}^3$ 、Case6 の DSM で $6,500 \text{ m}^3$ と(空隙込み)その差は 1.2 倍で、神戸と比較すると谷出口付近の二次元領域上部での堆積の影響による土砂流出量の差は小さい。

暗渠の閉塞を想定したため、谷出口からは地上の道路を土石流が移動する結果となった。特に DSM を用いた Case6 では道路上 b、c への流出・堆積が示された。DEM を用いた Case5 よりも Case6 で、谷出口付近で 500 cm 以上の堆積や最大水位を示す領域が広く、被災した建物位置や大きな堆積を示した箇所が災害状況と対応する。また、Case6 は谷出口から図 3.7、3.8 の道路 b、c に向かって 100 cm 以上の堆積厚や最大水位が確認される。Case5 でも道路位置に 100 cm 以上の堆積や最大水位は見られるが、道路の周辺の建物位置でも 100 cm 以上の数値を示し、道路上に集中する流れは確認できない。図 3.7 の警戒区域外縁の下流の北側(図 3.7 の d)の堆積や被害状況と比較しても、Case6 でこの範囲に 100 cm 以上の堆積や最大水位の分布が見られることや、図 3.7 の e より北東の警戒区域内の南北方向の道路に堆積が示される点についても、より災害状況に対応する。

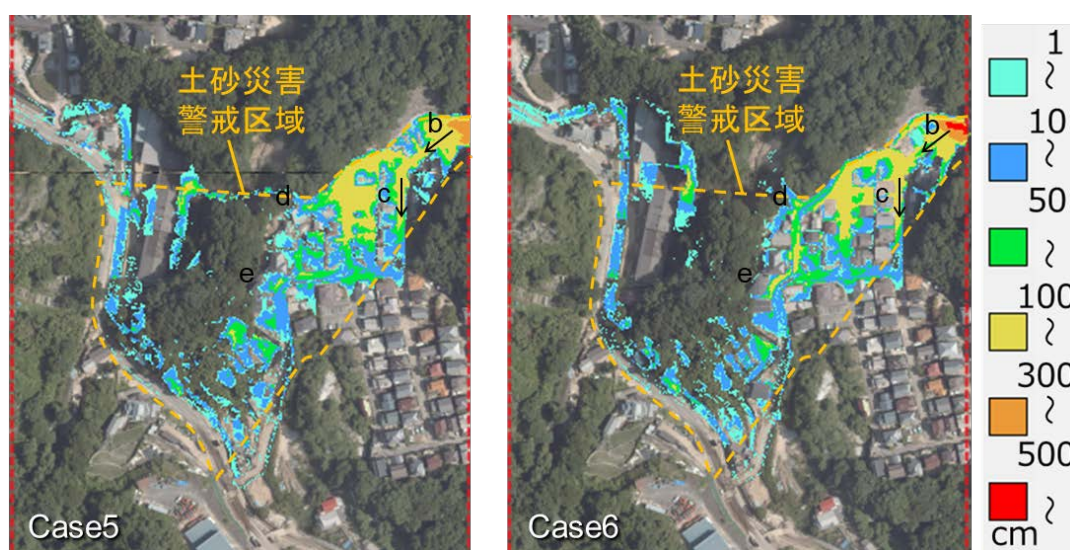


図3.13 広島の二次元領域の計算結果(終了時の堆積厚)

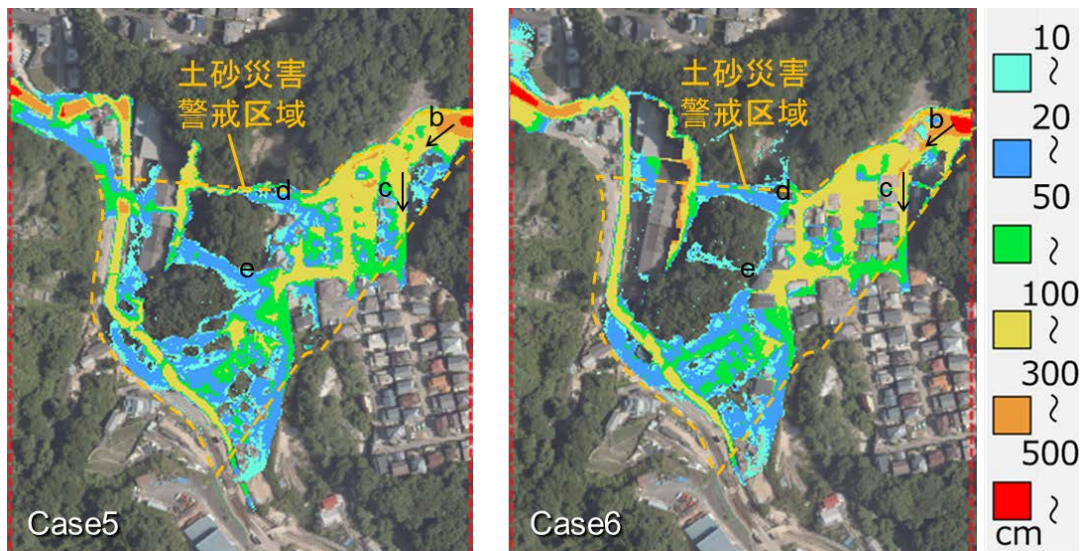


図3.14 広島の二次元領域の計算結果（最大水位）

3.5 防災対策の検討

3.5.1 防災対策への解析の有用性

3.4では、現地情報から得られた条件を設定した解析により、住宅地内での土石流の挙動や危険箇所を示した。特に、扇状地にDSMを用いると、建物と道路の標高差がDEMよりも顕著に表れて、土石流が建物間の道路上を流下する様子が表現されて、実災害状況と対応することを示した。対象とした土石流は日本で一般的な山間部の住宅地で発生したことから（図3.1、3.7右の鳥観図）、他のエリアでも同様の被害が発生する恐れが高い。災害状況や想定されるシナリオを設定して、住宅地にはDSMを用いて解析を行うと、他のエリアでも住宅地内の危険度を検討する際の有用な情報になりうる。

防災対策には、構造物によるハード対策や、ハザードマップ、避難などのソフト対策が挙げられ、行政が住民に提供する¹⁸⁾。効果的な防災にはハードとソフトの連携が必要だが、現状では個別で検討、情報提供されることが多い。解析を用いると、災害状況の検討だけでなく、効果的な構造物の検討や、構造物の土砂捕捉効果を考慮した住宅地内の詳細な危険度分布を示すこともできるため、住民が行政から提供された防災対策を検証することや、住民側から能動的にそのエリアにおける最適な防災対策を検討することも可能になる。

3.5.2 土地利用による防災対策の検討例

一般に土石流対策の構造物には砂防堰堤が挙げられ、計画規模内の土砂は堰堤上流で捕捉される。一方、堰堤より下流の流末処理は十分でなく、災害時には道路や流路などに水が流出する。近年発生する計画規模以上の場合には土砂の一部も流出する恐れがある。

そこで、堰堤の有無に関わらず谷出口より下流の住宅地内で、被害を最小限にして安全に土石流を流出させる土地利用方法を検討した。これは、現状の土地利用状況を基に、一部の土地改変による新たな防災対策の検討を解析で行う手法を提案するもので、唯一の最適解を示すものではない。

住宅地内での土石流に対して安全な土地利用を検討するために、神戸を対象として最も災害状

況と対応する Case4 (DSM、 $\rho=1,400 \text{ kg/m}^3$) で六甲川に延びる道路幅を拡大し、土石流溪流から延長させる土地利用を仮定した。対象地は、谷出口から横断方向に広がった住宅地で、災害状況から谷出口付近でも、比較的危険度が低い領域が見られることから、近隣への移転の余地があると考えた (図 3.1 右の鳥観図)。また、六甲川に延びる道路は既下流側では整備されており、土石流の直進性を活かした対策として上流側の道路の造成や既存の道路幅の拡大を提案した。

谷出口付近と六甲川直上では最大で幅約 50 m、中心は幅約 25 m として、地盤高から 10 m 下げる地形改変を行った (図 3.15 左)。この地形改変は、実際には土石流が安全に流下できる流路工の整備に相当する。計算終了時の堆積厚、最大水位を図 3.15 中央、右に示す。地形改変によって設置した流路工内に堆積、最大水位とも収まり、被害の軽減が可能となる。

一方で、矢野東の 13 溪流は、警戒区域内の上流側 (e より北東) ではほぼ全域が危険で、北側は山、南側には別の土石流溪流 (図 3.7 の 14 溪流) が延びる住宅が位置する (図 3.7 右の鳥観図)。谷出口から警戒区域外の両側にも広がって建物が位置する神戸篠原台とは立地条件が異なり、近隣に移転する余地が限られる。また、矢野東は谷出口付近から狭い範囲に建物が存在する住宅地で、警戒区域の上流側は建物に隣接する道路のほぼ全域で堆積、最大水位とも 100 cm 以上で、危険度が高い。下流には矢野川が存在するが、地形的に谷出口から矢野川まで道路を真っ直ぐ延ばすには、新たに山を切り開いて道路を造る大工事が必要で、既に整備された住宅地の土地利用を活用して、道路の拡幅や延長による流路工の整備を行うことは難しく、神戸で提案した手法は適さないと考える。

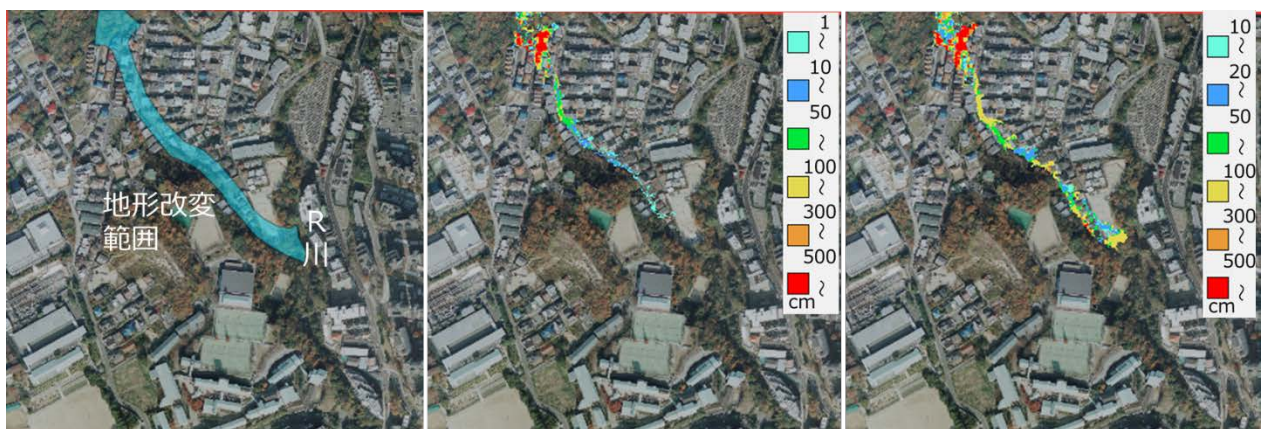


図3.15 神戸のCase4に谷出口から六甲川へ延びる道路周辺を10 m深で地形改変 (左：地形改変範囲、中央：計算結果の堆積厚、右：計算結果の最大水位、背景は地理院タイル)

3.5.3 土地利用による防災対策における課題

住宅地内の安全な土地利用を考慮した対策例の一つとして、道路の拡幅や延長による流路工の整備を提案し、神戸では解析でその効果を検討した。土地利用の変更は住民だけでなく複数の行政担当分野 (砂防、河川、道路など) が関わる事業のため、実際に行うのは簡単ではなく、課題が多数存在する。しかし、頻発化する土砂災害について全溪流に砂防堰堤等ハード対策を整備するにはコストがかかり、警戒避難等のソフト対策も限界がある。住宅地内で被害を減らすための土地利用として、災害時に土石流が可能な限り被害を及ぼさずに移動する経路を用意すること等は、今後取り組む価値のある手法である。その検討には、本検討で提案するようなシミュレーション

が有効なツールとなり得る。

しかし、一つの方法が全ての住宅地に適用できるものではなく、各地の特徴に応じた検討が必要となる。神戸で有効と考えられた流路工の整備は矢野東には適用できないことから、矢野東では区域外の安全な場所への事前の避難を行うことや、優先的な上流側でのハード対策の整備が必要だと考えられる。

4. おわりに

本研究では、扇状地に流入する土石流溪流の実態について、高解像度のDEMやGISの活用や現地調査から明らかにするとともに、得られた溪流の情報や災害状況を考慮して土石流シミュレーションを行い、危険箇所や防災対策を検討した。

2章では扇状地に流入する土石流溪流の事例について、対策施設が設置された溪流に着目して調査を行った結果、堰堤より下流側では断面が徐々に小さくなることや、さらに下流では暗渠化される事例が多いことを確認した。3章で検討した典型的な土石流溪流を合わせると、7事例中6事例で暗渠化がされていた。災害時には暗渠化された地点が閉塞して、水・土砂が道路上を流下する事例も確認した。また、砂防堰堤の影響について土石流シミュレーションを実施した。堰堤が設置されると、土砂は効果的に堰堤上流で捕捉されて、下流への土砂流出は大幅に抑制される。しかし、土砂は捕捉されても水は流出するため、下流の住宅地で10cm以上の最大水位を示す範囲は大きく変化しない。堰堤有りでも、暗渠化した下流側の道路上では100cm以上の最大水位を示すため、堰堤が機能しても下流へ流出する水の挙動を考慮した対策、すなわち堰堤の流末処理を考慮した対策の検討の必要性が示された。本章の一部は研究代表者ら²¹⁾が2019年に発表している。

3章では、平成30年7月豪雨を対象に、兵庫県神戸市灘区篠原台と広島市安芸区矢野東7丁目目で発生した土石流の被害実態を谷出口の暗渠や道路に着目して整理した。両者とも、谷出口の直下で溪流の暗渠化が見られ、災害時には土砂で閉塞したことで、暗渠地点からは勾配の急な道路上を水や土砂が流出したことが確認された。次に、土石流シミュレーションにより谷出口から下流の流出・堆積状況を確認した。シミュレーションにはDEMとDSMの二種類を用いた。神戸市では、現地調査から下流の道路まで流出した土砂の大部分が数mm程度の細粒土砂だったため、細粒土砂の液相化を想定した。一般的な土石流の液相密度 $\rho=1,180 \text{ kg/m}^3$ の方が谷出口付近で500 cm以上を示す一方、液相化を考慮した $\rho=1,400 \text{ kg/m}^3$ では500 cm以上を示す範囲は小さいが100 cm以上を示す範囲が広くみられ、より下流まで土砂・水が移動した。DSMは道路上を通過して土砂が警戒区域外まで流出して、土砂氾濫域がDEMよりも災害状況と対応する。矢野東ではDSMを用いると、谷出口付近で500 cm以上の堆積や最大水位を示す領域が広く、谷出口から下流の道路に向かって大きな堆積厚や痕跡を示し、神戸市と同様にDEMよりもDSMの方が災害状況をよく再現した。また、土地利用による防災対策の検討例として、神戸では計算で仮想的に六甲川に延びる道路幅を拡大、上流では造成して10 mの深さに地形改変した流路工を整備すると、改変した範囲内に堆積、最大水位とも収まり、被害の軽減が可能なことを示した。住民の合意や行政との取り組みが必要だが、土砂災害に強い街づくりを検討するための方法の一つを示した。一方、矢野東の立地状況では同様の手法の適用は難しく、区域外への避難や、優先的なハード対策の整備が必要だと考えられる。本章の一部は、研究代表者らが2020年²²⁾に発表予定である。

土石流が発生して住宅地に流入した場合、暗渠が整備されていても災害時には閉塞して、道路上を流動することが多い。山間部の道路は急勾配であることから、配置によっては、思いもよらない場所から道路沿いに土砂や水が移動する場合も想定される。土石流警戒区域内やその周辺では、谷出口から延びる道路や、それに接続する道路を把握して、土砂・水が流出する危険性を認識することが必要である。土石流が道路を移動経路とする現象を把握するには、DEMのみならずDSMを用いた土石流シミュレーションが有効で、住宅地内での土石流の挙動や危険な箇所を示すことができた。解析を用いることで、住民が行政が提供する防災対策を検証することや、住民側から能動的に土地利用などを含めた対策方法を検討することも可能になる。立地条件によっては、谷から延びる道路や流路を延伸・拡大することで、土石流時に被害を最小限とするための土砂・水の移動経路として備える等の土地利用による減災対策を、解析により検討するための手法を示した。今後も情報収集を行い検討を進めるとともに、研究者が住民や行政と連携して土地利用も含めた対策方法を検討・議論出来る体制としていくことが必要だと考える。

参考文献・引用文献

- 1) 海堀正博, 石川芳治, 里深好文, 松村和樹, 中谷加奈, 長谷川祐治, 松本直樹, 高原晃宙, 塚塚康三郎, 吉野弘祐, 長野英次, 福田真, 中野陽子, 島田徹, 堀大一郎, 西川友章(2014): 2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害, 砂防学会誌, Vol.67, No.4, pp.49-59.
- 2) 海堀正博, 長谷川祐治, 山下祐一, 崎田博史, 中井真司, 桑田志保, 平松晋也, 地頭蘭隆, 井良沢道也, 清水収, 今泉文寿, 中谷加奈, 柏原佳明, 加藤誠章, 鳥田英司, 平川泰之, 吉永子規, 田中健路, 林拙郎(2018): 平成30年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.71, No.4, pp.49-60.
- 3) 中谷加奈, 林聖也, 長谷川祐治, 小杉賢一朗, 里深好文(2018): 異なる地形データを用いた土石流の到達範囲の検討—扇状地の土地利用を考慮して—, 自然災害科学, Vol.37, 特別号, pp.107-117.
- 4) 三浦弘之(2018): 2018年7月豪雨による東広島市西条町下三永周辺の土砂災害に関する調査(速報) http://saigai.aij.or.jp/saigai_info/201807_w_Japan_heavy_rainfall/debrisflow_higashihiroshima.pdf, 参照 2020-4-17
- 5) 松村和樹, 長谷川祐治, 藤本将光, 中谷加奈, 西川友章, 笠原拓造, 柳崎剛, 鏡原聖史, 加藤智久, 岡野和行, 鈴木崇, 平岡伸隆(2015): 2014年8月の豪雨による兵庫県丹波市で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.68, No.1, pp.60-67
- 6) 兵庫県丹波県民局丹波土木事務所(2018): 平成26年8月 豪雨災害からの復旧・復興 公共土木施設の記録 第2章 [復旧・復興事業の歩み] .
- 7) 堀内成郎, 岩浪英二, 中谷加奈, 里深好文, 水山高久(2012): LP データを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発, 砂防学会誌, Vol.64, No.6, pp.25-31.
- 8) 高橋保, 中川一(1991): 豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌, Vol.44, No.3, pp.12-19.
- 9) 和田孝志, 里深好文, 水山高久(2008): 土石流計算における1次元・2次元シミュレーション

- モデルの結合, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.36-40.
- 10) 里深好文, 水山高久(2005): 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol.58, No.1, pp14-19.
 - 11) 土田孝, 橋本涼太(2018): 土石流・斜面災害班発表, 広島大学平成 30 年 7 月豪雨災害調査団第 2 回報告会, https://www.hiroshima-u.ac.jp/torrentialrain_research, 参照 2020-4-17
 - 12) 中谷加奈, 小杉恵, 里深好文, 水山高久(2017): 家屋や道路が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響-2014 年 8 月に発生した広島土砂災害を対象として-, 砂防学会誌, Vol.69, No.5, pp.3 -10.
 - 13) 里深好文, 小杉賢一郎, 中谷加奈, 正岡直也, 岡野和行, 笠原拓造, 柳崎剛, 山口雄一(2018): 平成 30 年 7 月豪雨による関西における災害, 砂防学会誌, Vol.71, No.4, pp.38-48.
 - 14) 石沢菜々子(2018): 西日本豪雨から三週間 灘・篠原台長引く避難指示なぜ?, 神戸新聞 2018 年 7 月 27 日 日刊 25 面.
 - 15) 神戸新聞 NEXT: 土石流 5 時間前に「前兆」神戸市, 避難指示出さず, <https://www.kobe-np.co.jp/news/sou-gou/201807/0011496786.shtml>, 参照 2019-3-22
 - 16) 広島県: 土砂災害警戒区域等における検討事項, 平成 30 年 7 月豪雨災害を踏まえた今後の水害・土砂災害対策のあり方検討会(第 1 回砂防部会)資料 4-1, <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/330358.pdf>, 参照 2020-4-17
 - 17) 高橋保(1977): 土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 20 号, B-2, pp. 405-435.
 - 18) 丸谷知己 編(2019): 砂防学, pp. 38-46, 朝倉書店.
 - 19) 池田暁彦, 門馬直一, 堀内成郎, 山田利治(1998): 滑川北股沢で発生する土石流について, 砂防学会誌, Vol. 51, No. 2, pp. 31-38.
 - 20) 中谷加奈, 古谷智彦, 長谷川祐治, 小杉賢一郎, 里深好文(2018): 細粒土砂の液相化が土石流挙動に及ぼす影響とその要因に関する検討, 砂防学会誌, Vol. 70, No. 6, pp. 3-11.
 - 21) 中谷加奈, 長谷川祐治, 里深好文(2019): 扇状地に流入する土石流溪流の実態把握と防災対策の検討, 令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, II-129.
 - 22) 中谷加奈, 長谷川祐治, 笠原拓造, 海堀正博, 里深好文(2020): 平成 30 年 7 月豪雨で発生した土石流被害と谷出口の道路の影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.1, 11pages, (Accepted 2020/3/2)

謝辞

本研究の実施にあたり、多くの方々にご協力頂いた。国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所には 2014 年災害発生前後の航空レーザ計測データを提供頂いた。国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所には、2018 年災害発生前後の航空レーザ計測データや現地写真等を提供頂いた。兵庫県砂防課、兵庫県神戸土木事務所には、土砂災害箇所での現地写真や現場情報を提供頂いた。神戸市には、土砂災害箇所に関する詳細な現地情報を提供頂いた。広島県土木建築局には 2018 年災害発生前後の航空レーザ計測データや現地写真等を提供頂いた。国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室には、全国の土砂災害の発生事例や対策施設に関する情報を提供頂いた。広島大学総合科学研究科の海堀正博教授には広島県内で発生した土砂災害の発生事例や土石流溪

流に関する情報提供や、研究の遂行にあたって多大なるご協力を頂いた。ここに記して感謝致します。

- 助成事業者紹介

中谷加奈

現職：京都大学大学院農学研究科助教（博士（農学））