

## 山地小流域における土砂流出に対する危険度予測のための簡易的な流量観測について

### Flow discharge observation and rainfall-runoff model for risk forecasting of sediment discharge in a small mountainous watershed

鳥居 宣之                      笠原 拓造  
Nobuyuki Torii                Takuzo Kasahara

#### 1. はじめに

土砂災害警戒区域（土石流）や道路の事前通行規制区間等においては、流域面積が数ヘクタール程度の小流域が数多く存在する。降雨時に、これらの山地小流域からの水の流出状況を観察すると、降雨初期には河道に全く水が流れていないか小さな流れであるのに対し、降雨期間中のある時点から突発的に流量が増すような挙動がみられる。このような挙動を示す要因は、山地斜面に降った雨水は地下へ浸透し地下水となって斜面内を移動し再び地表面に湧出する過程を経た後、流出するためと考えられる。すなわち、降雨初期では雨水は地下へ浸透し表面流は発生しないが、その後遅れて地表面に湧出した水や地下に浸透しなかった雨水が集中することで急激に流出量が増すものと考えられる。地下から地表に湧出する場所や水の量、タイミングは、斜面の規模や傾斜、表土層の厚さや透水性等の山腹斜面の条件や雨の降り方で変化すると考えられ、例えば規模や波形が同じ雨が降ったとしても隣接する流域で地形や表土層の発達状況が異なれば流出特性も異なるものと推測される。

筆者らは、土砂流出に対する危険度を予測する手法として数値モデルによる方法を検討している<sup>1)</sup>。特に今回は山地小流域を対象とすることから、精度よく予測するためには、前述したような山地斜面への雨水の浸透や地下水となって斜面内を移動する過程を考慮する必要があると考えている。しかし、植生等が複雑に入り込んでいるような自然斜面を対象とする場合、地下水がどのように表土層中を移動しているのか実態を把握することは難しい。そこで、モデル化の初期段階として、表土層中の地下水の移動はブラックボックスとして扱うこととし、降雨（ハイエト）と流出（谷出口のハイドロ）の関係からモデルを検討することとした。本報告では、土砂災害警戒区域に指定されている小流域において谷出口の流量を観測した事例について述べるとともに、試験的なモデルを作成することで、今後、表土層中の地下水の移動を考慮した土砂流出に対する危険度を予測するための数値モデルの検討に際しての留意事項を整理した。

#### 2. タイムラプスカメラ・Web カメラを用いた流量観測

##### 2.1 観測の概要

神戸市北区に位置する流域面積約 0.045km<sup>2</sup> (4.5ha) の溪流をモデル流域として観測を実施した (図-1 参照)。将来的に多くの溪流で実用されることを鑑み、設置や撤去が容易で他溪流への流用が可能な比較的安価な方法として、Web カメラや乾電池で作動するタイムラプスカメラを用いることとした。

##### 1) 流況の概略的な把握 (2020 年 6 月 20 日設置～2020 年 9 月 10 日)

対象流域の流況を把握するため、乾電池で作動する安価なタイムラプスカメラ (昼光用) を設置した (図-2)。期間中の最も降水量の大きかった 2020 年 7 月 24 日～25 日にかけての降雨 (神戸市で土砂災害警戒情報が発表された降雨) の観測結果を図-3 示す。降水量については、気象庁の 1km メッシュの解析雨量 (30 分毎の 1 時間雨量データ) を収集・整理した。この観測から下記の知見が得られた。

【観測に関する知見】

- ・タイムラプスカメラを用いることで、自然河道の流況（流下幅、水深）や流水の濁りの状況を比較的安易に長期間連続して観察できることが確認できた。
- ・降雨のピークが夜間の場合、昼光用のカメラでは観測できない。
- ・流下幅や水深を計測するには、流れが滝状になったり、複数の滞筋に分かれないようなカメラ位置（直線流路、矩形に近い流下断面）を探すことや計測のための目印を設置する等の工夫が必要であることがわかった。（当初想定していた流出量よりも大きな流出が発生することがわかった）
- ・特にカメラ位置に関しては、小溪流の下流流路では、すべての条件に適合する地点がないことも想定されるので、観測はいくつかの溪流で並行して実施するのが望ましいと考えられた。



図-1 対象流域の位置図

【流況に関する知見】

- ・渓流水が流れはじめる、または急激に増加し始めるまでに、ある程度の前期降雨が必要。
- ・雨が降り止んだ後も、数日間、溪流の流量は多い状態が続く。



Brinno 社製 TLC 200  
 サイズ：125 mm×89 mm×54 mm  
 画角：59 度  
 解像度：1280×720  
 夜間の撮影は不可  
 電池単三 4 本、約 1 カ月撮影可能

図-2 タイムラプスカメラ（昼光用）の設置状況

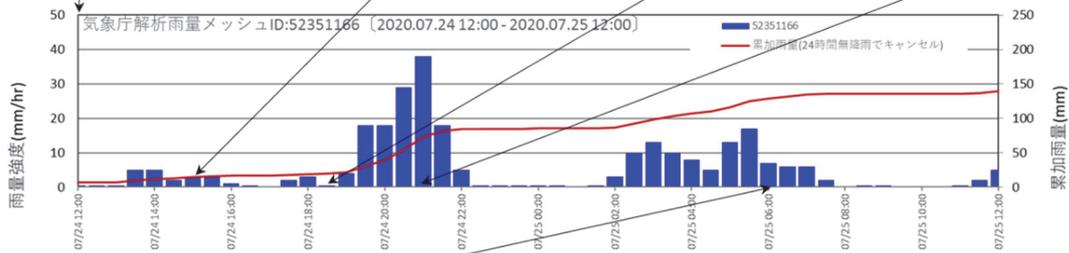


図-3 観測事例（2020年7月24-25日降雨）

## 2) タイムラプスカメラの移設 (2020年9月11日～2020年11月27日:冬期撤去)

2020年7月の観測結果をうけて、9月11日にカメラ位置を変更するとともに流下幅・水深を計測するための目印を設置した。(図-4 参照)



図-4 カメラの移設 (直線流路で流下断面形状が単純な矩形となうようにカメラを上流へ移設, 目印を設置)

## 3) 夜間対応 Web カメラの追加 (2021年3月27日～2021年10月20日:冬期撤去)

一般に普及している昼光用のタイムラプスカメラでは夜間の観測が難しい。また、タイムラプスカメラの画像からは、水位の情報は読み取れるが、流量の情報を得るためには、別途、水深から流量へ換算するH-Q曲線や流速の実測データが必要である。しかし、流速(H-Q曲線を作成するにしても流速の実測値は必要)については、特に今回のような山地の小流域では洪水継続時間が短いため、出水中に現地に行き直接流速を測ることは難しいことや、出水時に自然河道で人の手による直接観測は危険が伴うため安全管理上も問題であった。そこで、2021年3月27日に夜間の撮影やインターバル動画が撮影可能なWebカメラを追加した(図-5、図-6参照)。流速については、撮影した動画からPIV(粒子画像流速測定法)による流速計測を試みることにした。



図-5 Webカメラ(暗視)とタイムラプスカメラの設置状況



映像素子	130万画素CMOSセンサー	アラーム	動体検知、Eメール警報 電話通知
レンズ	4~12mm	OS	RTOS
撮影距離	20cm~	DSPチップ	4コア64bit
赤外線LED	15m	クラウド機能	有り
最低被写体照度	1.5Lux	動作環境	-30°~+85°
映像圧縮方式	Avi	パワー	250mA~300mA
スピーカ機能	有り	遠隔監視	有り
マイク	内蔵	電源	DC 12V2A
ネットワーク	有線LAN, Wi-Fi無線LAN 3G/4G	寸法	315mm×162mm×127mm
キャリア	au, DoCoMo, SoftBank	重さ	1.25kg

(撮影:2021.3.21 21:47)  
 【流下幅・水深】  
 夜間のインターバル撮影可能  
 【流速】  
 動画撮影可能  
 (スマートフォン等から動画撮影  
 (30コマ/秒)モードに切り替え可能)

図-6 Webカメラの諸元(暗視撮影, インターバル動画撮影可能)と取得画像

ところが、Webカメラの消費電力が想定よりも大きく、鉛蓄電池(12V100AH)で3日程度しか計測できないことがわかった。そこで、近隣の電柱から商用電源をひくこととした。商用電源の引き込みまでに、地権者への確認や電気工事の手配等に時間を要し、実際に引き込み工事が完了したのは2021年12月17日であった。

電源の引き込み工事完了までの間、夜間の赤外撮影とインターバル動画の撮影可能なタイムラプスカメラをこれまでの昼光用のタイムラプスカメラに替えて下流側から流況を撮影するものと、流れを横から撮影するもの(流速計測用)の2台設置した(図-7, 図-8参照)。



■タイムラプスカメラの諸元  
 サンワサプライセキュリティカメラ  
 CMS-SC03GY  
 サイズ: 136mm×96mm×80mm  
 画角: 105度  
 解像度: 3840×2160  
 夜間の撮影(赤外線フラッシュ最大15m)  
 電池単三8本, 約1か月撮影可能



■Webカメラの諸元  
 Mobile Cam LTE防犯カメラ屋外用  
 200万画素 2.8-12mm  
 DC12V



右岸に設置したタイムラプスカメラと取得した画像

図-7 Webカメラとタイムラプスカメラ(暗視撮影, インターバル動画撮影可能)の設置状況

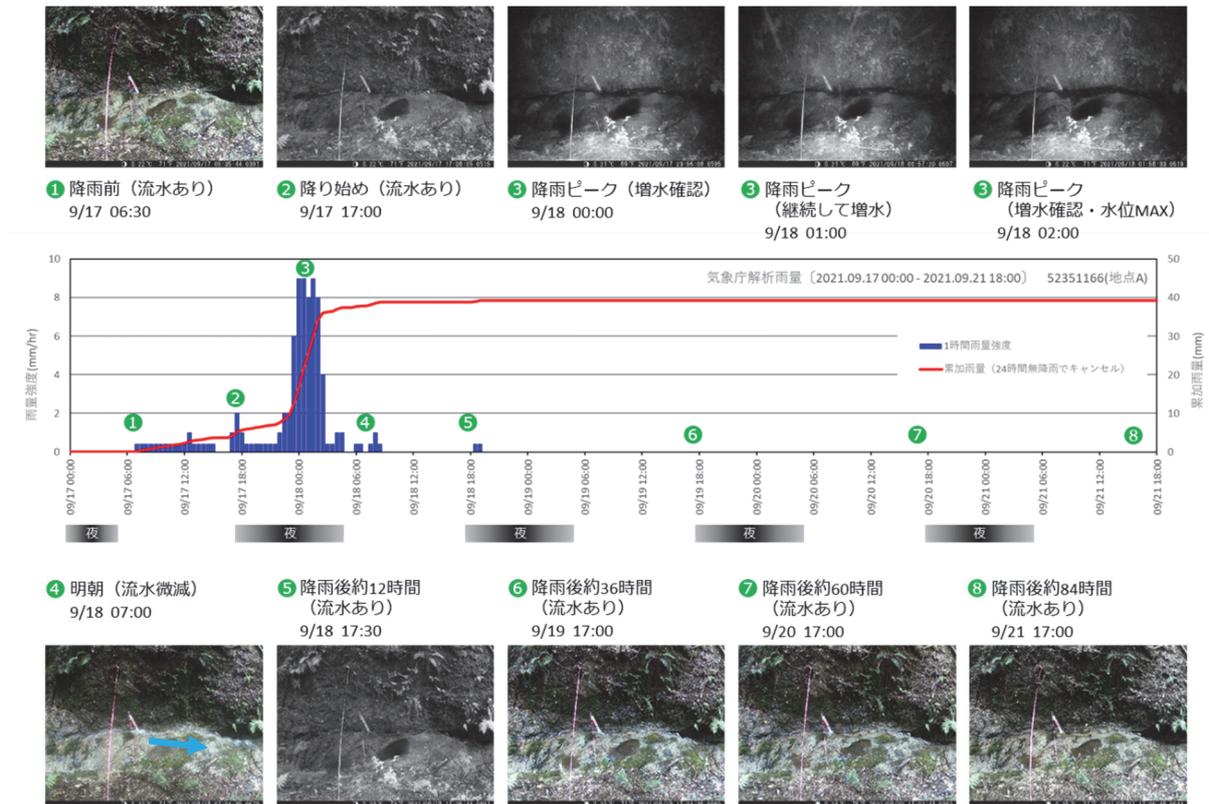


図-8 観測事例 (右岸設置のタイムラプスカメラ : 2021年9月17-18日降雨)

#### 4) 夜間対応 Web カメラ (商用電源) とタイムラプスカメラによる観測 (2022年4月30日～)

2022年4月から、1台のWebカメラ[商用電源] (遠隔地から流況と水位を確認) と2台のタイムラプスカメラ (下流側 : 水位確認用(予備)/流速計測用のインターバル動画撮影) の体制で観測を実施した。流量は、取得した静止画や動画から画像解析等により水位と流速を計測し、水位から求めた流下断面積に流速を乗じて推定した。Webカメラは現地の流況をリアルタイムで確認する目的でズームや首振り撮影が可能な機種を設置した。タイムラプスカメラは水位と流速の観測用に画角を固定し、静止画と10秒程度の動画を10分毎に撮影した。Webカメラはオンラインで遠隔からのデータの取得や管理ができたが、タイムラプスカメラは、SDカードと乾電池の交換のため1カ月に1回程度のメンテナンスを必要とした。

#### 2.2 流量の推定 (2022年7月12日の観測事例)

2022年4月以降、神戸市で最も降水量の大きかった2022年7月11日～12日にかけての降雨 (図-9 参照) について、流量を観測した事例を詳述する。水位は右岸側のタイムラプスカメラと下流のWebカメラ、タイムラプスカメラの静止画に写りこんでいる量水標の目盛を目測で読み取った (図-9 参照)。流速は流れの側面 (右岸側) のタイムラプスカメラで取得した動画を用いて市販のPIV (Particle Image Velocimetry) 解析ソフト (Flow Expert 2D カトウ光研株式会社) を用いて計測した (図-10 参照)。流量は、溪流の横断形状 (図-11 参照) から求めた水位に応じた流下断面積に流速を乗じて推定した (図-12 参照)。なお、降水量については気象庁の解析雨量 (1kmメッシュ 30分更新) を収集した。

水位は、画像処理ソフト等を用いて拡大表示して目測で読み取ったが、波や飛沫等で読み取りにくい場合があった。このため、図-12に示す時系列のグラフに整理し、前後のプロットから計測エラーのチェックを行う必要があった。2022年7月12日の観測では、流量の立ち上がり時に、水位が一時的に高くなりその後低下することがあった (図-12の赤丸内、10分間隔の撮影画像の内、1時刻のみ水位が上昇)。これは、雨の強弱が数分程度で変化しその影響が流量に現れたのか、流域内で小規模な崩落が発生したのか、水ミチのパイプが閉塞・決壊したのか等が推測されるが、実際に何が起きたのかは確認できていない。このような短時間に流量が変動する事象は、山地小流域では頻繁に起こり

うる事象ではないかと予想される。今回の様な 30 分間隔の降雨データでは降雨との関連性を比較検証できないため、今後、数分程度の解像度を有する降雨観測を検討するほか、降雨後に斜面の変状等の現地確認を別途実施する必要があるものと考えられた。

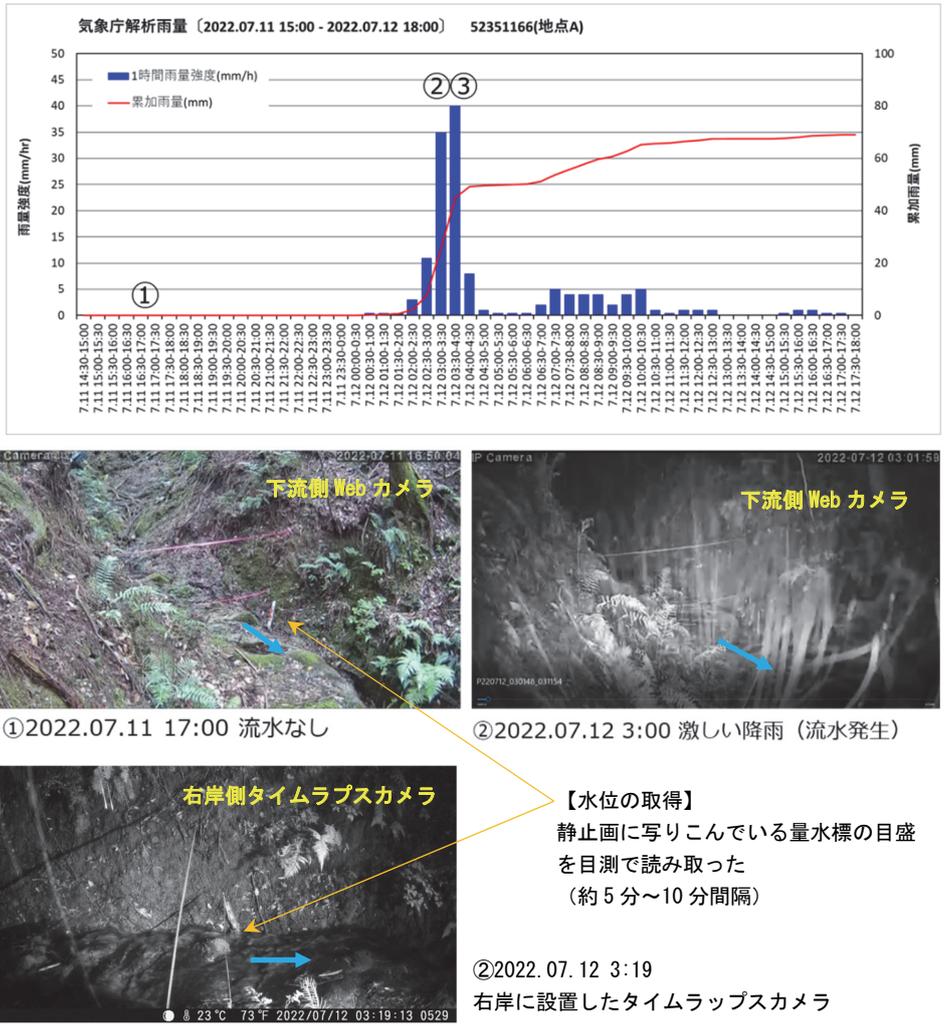


図-9 降雨状況と取得した画像の事例（2022年7月11-12日降雨）

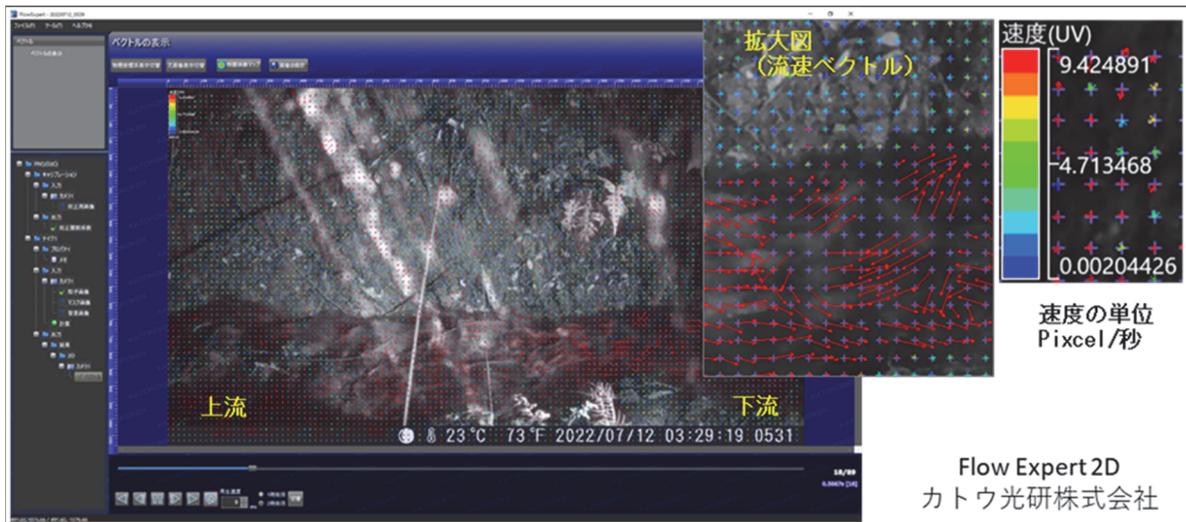


図-10 画像解析ソフト (PIV) を用いた流速計測画面 (2022/7/12 午前 3:30 右岸カメラの動画の流速ベクトル)

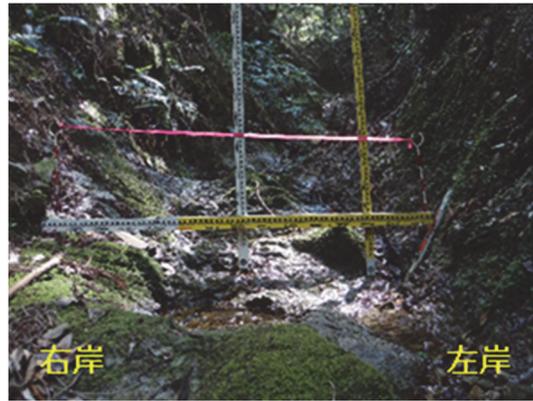


図-11 河道断面計測地点の状況

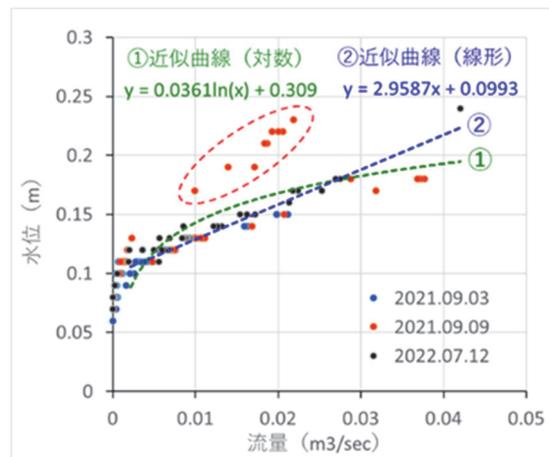


※10分間の流出量(m³/10分): 流速(m/s)×流下断面積(m²)×600秒

図-12 流量観測結果 (2022年7月12日降雨)

### 2.3 H-Q 曲線の作成

画像から計測した水位Hから流量Qを推定することを目的として、2021年～2022年に観測した3つの降雨の観測データからH-Q曲線を作成した(図-13参照)。この曲線は、今回の観測成果として当該溪流の警戒避難や事前通行規制の監視、土砂移動の影響評価等に活用できるものと考えられる。ただし、観測は2021年秋から2022年夏にかけての短期間であり、その間に規模の大きな降雨を経験することはなかった。このため、現段階では対数近似①と線形近似②の2本を設定した。今後も観測を継続し、流量の大きな実績を増やして精度を高めてゆく必要があるものと考えられる。



※図中の赤色破線内のプロットは、深夜2時～5時の強雨時の観測データであり、赤外動画には雨粒の軌道が縦筋の線として映りこんでいる。この影響でPIV解析の流速が正しく計測できていない可能性が考えられる。

図-13 今回の観測で作成したH-Q曲線

### 3. 表土層中の地下水の移動を考慮した土砂流出に対する危険度を予測するための試験的な数値モデルの作成

#### 3.1 試験的な降雨流出モデルの概要

降雨（ハイレート：気象庁解析雨量）と観測から得られた流量（ハイドロ）から、表計算ソフト Excel（MicroSoft 社）等を用いて構築できる比較的簡易な降雨流出モデルを検討した。今回作成するモデルの表土層中の地下水の移動は、当該地域を含む兵庫県下の市町で既に構築され検証を重ねている沖村ら<sup>2),3)</sup>が開発した地下1層の地下水位の解析と無限長斜面安定解析を組合せ 10m メッシュ単位で表層崩壊を予測するモデルをベースに下記の改造を加えることとした。また、モデルには表土層厚や地盤の物性値等のパラメータを必要とするが、これも同モデルの設定方法<sup>4),5)</sup>に準じ設定した。なお、10m メッシュの標高は、兵庫県のオープンデータ「兵庫県\_全域 DEM（2010 年度～2018 年度）」の 1mDEM より取得した。

- 1) 土砂洪水氾濫や土石流の発生予測等に用いる表流水の計算を加え、地下と表層を移動する水の流れを連続で計算する。
- 2) 観測された流出ピークの急激な立ち上がりや降雨終了後に長時間にわたって流出が継続する現象を再現するため、前者は早い地下水の流れ（パイプ流等）<sup>6)</sup>を、後者は山地斜面の保水性を高める（基岩への浸透等）<sup>7)</sup>を考慮し、地下を3層として計算する（図-14 参照）。
- 3) 地下水や地表流の流下経路について、計算の簡略化のため 10m メッシュを取囲む 8 メッシュのうちの 1 メッシュ（1 方向）に限定する（図-15 参照）。
- 4) 計算間隔は 10 分とする。10 分間隔では溪流を流下する表面流の早い流れを表現できないが、今回の対象流域は流域面積が小さく、計算上で表流水が湧出すると推測されるメッシュから下流端までの距離約 300m を流速 0.5m/s（今回の観測値）で流下すると仮定すると流下時間は 10 分であることから、メッシュ間の表流水の移動を計算する仕組みは組み込まずに、地表面に湧出する表流水の合計値を流出量[m<sup>3</sup>/10min]として算定する。ただし、より流域面積の大きな溪流を対象とする場合には、計算ステップを細かくし、メッシュ間の表流水の移動計算を組み込む必要があるものとする。

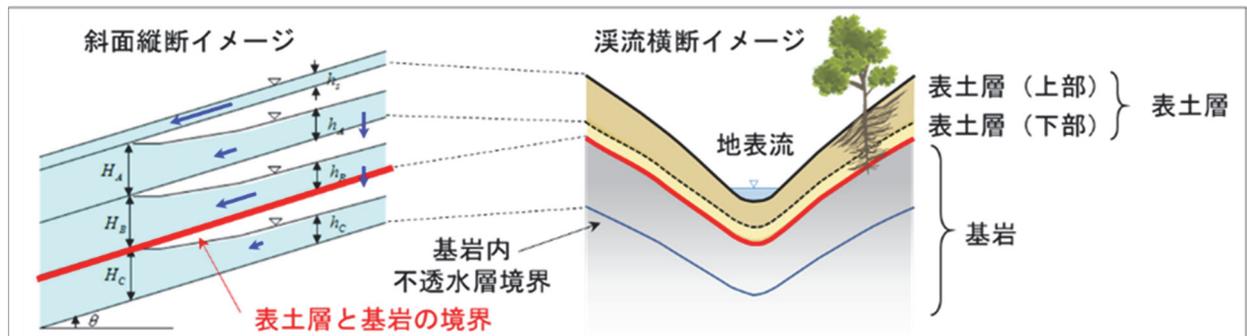


図-14 試験的なモデルの概念図

#### 3.2 表土層のパラメータの設定

新たなパラメータ（地下3層の透水係数と各層厚の比率の組合せ）については、流量の観測地点（対象流域の下流端）における実測の流出波形や流出量と計算結果が近くなるよう感度分析で適値を求めた（表-1、図-16 参照）。図-16 をみると、おおむねピーク流出量や降雨波形の再現が来ていることから、流出特性に即した降雨流出モデルとして、地下3層の透水係数と層厚の比率を調整する今回の手法が有効であることが確認できた。ただし、図-16 の降雨終了後の流出量の算定値の落ち込み（7月12日4:00-7:00）が実測に比べて大きい等、パラメータの微調整については今後の課題として残る。

今後、別の降雨事例や他流域での検証実績を増やし、感度分析で求めたパラメータの法則性や調査・設定方法の一般化について検討を進めていく予定である。また、分析の過程で上記の透水係数や層厚の比率の他に、河道にあたるメッシュの層厚が流出量や流出のタイミングに大きく影響することが分かった。なお、今回の設定では、現地の河道の露岩状況にあわせて、集水面積 2ha 以上のメッシュを河道として扱い表土層厚を 0m とした。

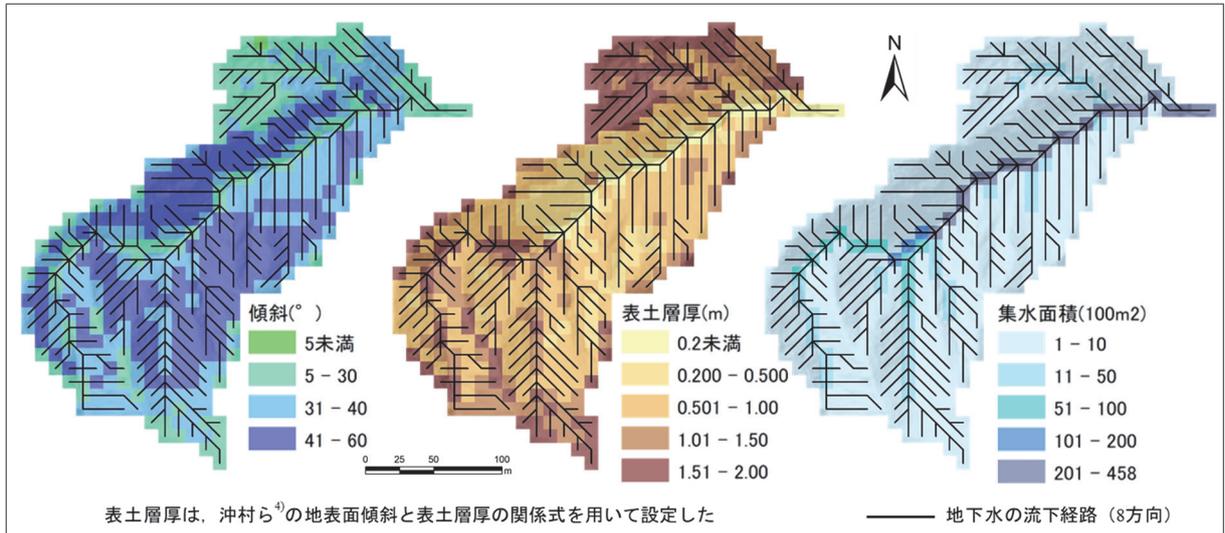


図-15 10mメッシュデータの設定状況

表-1 感度分析により求めた表土層のパラメータ

地層区分	表土層厚に対する割合	透水係数 (標準:k=0.01cm/s)		空隙率	摘要
		水平方向	鉛直方向		
表土層	上部	0.8	1倍	-	・地表に降った雨水は直ちに表土層の基底に達し、地下水位を形成すると想定(浸透過程は考慮しない)
	下部	0.2	10倍	0.1倍	・水みちを想定 ・鉛直方向の透水係数は、表土層下部から基岩への浸透を想定
基岩層 浸透を考慮する範囲	1.0	0.1倍	0倍	0.1	・基岩への浸透を想定 ・基底部からさらに深部への浸透は想定しない

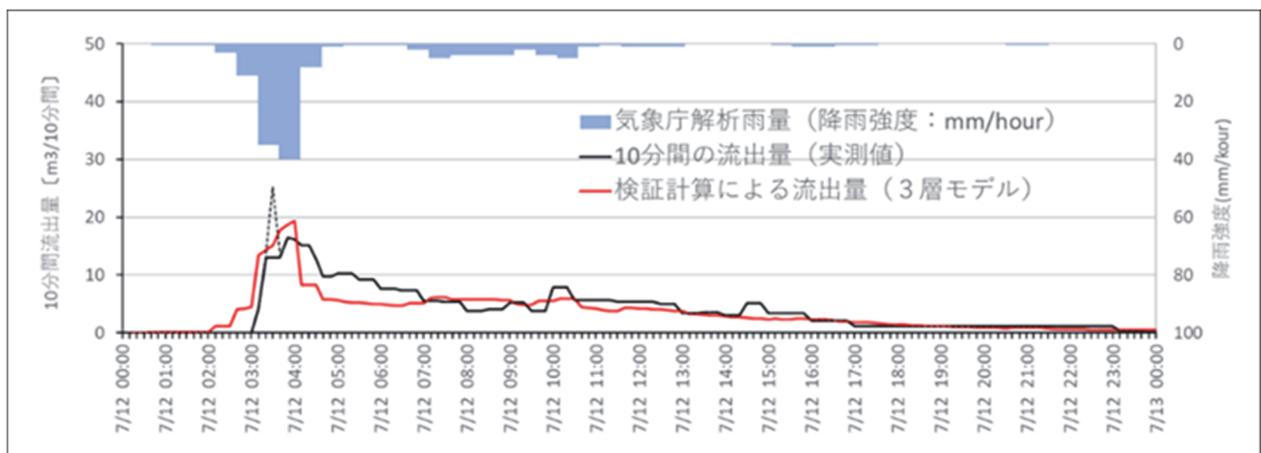


図-16 試験的なモデルによる流出ハイドロと実測の流出ハイドロの比較 (2022年7月12日降雨)

### 3.3 洪水氾濫の予測への適用について

対象溪流においては既往の災害記録はなく、災害発生事例での検証はできないが、近年で比較的規模が大きく、近隣の溪流で土砂流出のあった2014年8月降雨で検証を試みた。2014年8月の降雨（気象庁解析雨量）とモデルによる流出量の計算結果を図-17に示す。計算によるピーク流出量は、 $120\text{m}^3/10\text{min}$ であり、流量に換算すると $0.2\text{m}^3/\text{sec}$ となる。これを外挿の領域で精度は落ちるが、図-13の近似式より水位を求めると①対数近似式で $0.25\text{m}$  ②線形近似式で $0.69\text{m}$ の水深となる。この水深と下流の保全対象付近の水路の深さや道路の横過状況（管渠）と比較すると、氾濫せずに十分流下できる規模であったと推定される。当時、被災した記録はないことから、流木や土砂が混入していなかったと仮定すると、モデルにより予測された洪水の規模は妥当であると考えられる。

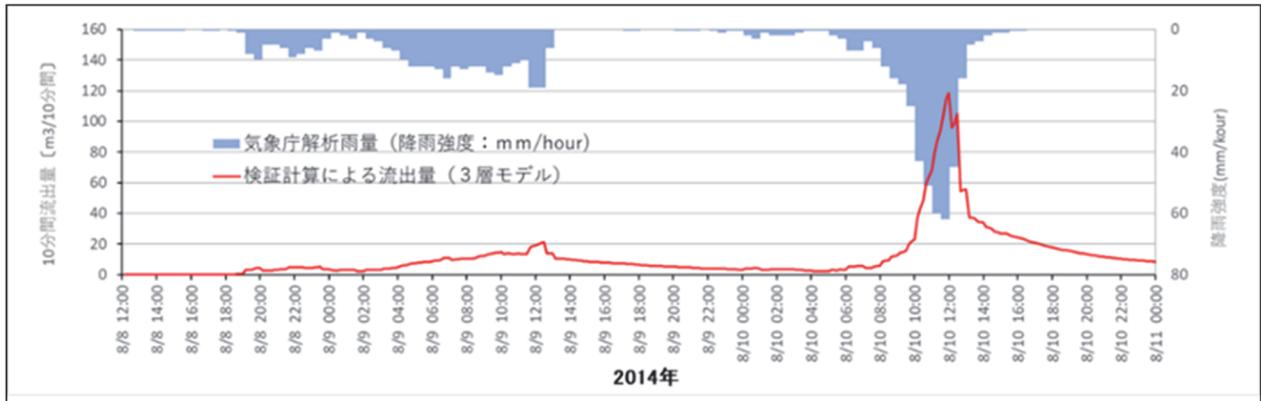


図-17 試験的なモデルによる流出量〔下流端〕の再現計算結果（2014年8月10日降雨）

### 3.4 斜面崩壊の予測への適用について

上記と同じ2014年8月降雨で、10mメッシュ毎に地下水位（表土層の上部と下部の合計）を求め、無限長斜面安定解析により安全率を算定した。その結果、31メッシュで安全率が1未満となり表層崩壊の発生が予測された（図-18参照）。当時、実際に該当メッシュの箇所が崩壊したかどうかは記録がなく検証はできないが、図-18の崩壊判定の分布をみると谷地形に多いことがわかる。現設定では、谷部の表土層厚や地盤の物性値は斜面部と同じ設定としているが、地形の形成過程や表流水や地下水にさらされる環境が谷と斜面では異なると推測されるので、このような谷と斜面等の微地形区分ごとに層厚や物性値等を設定する方法について、今後、被災実績のある他流域での検証が必要と考えられる。

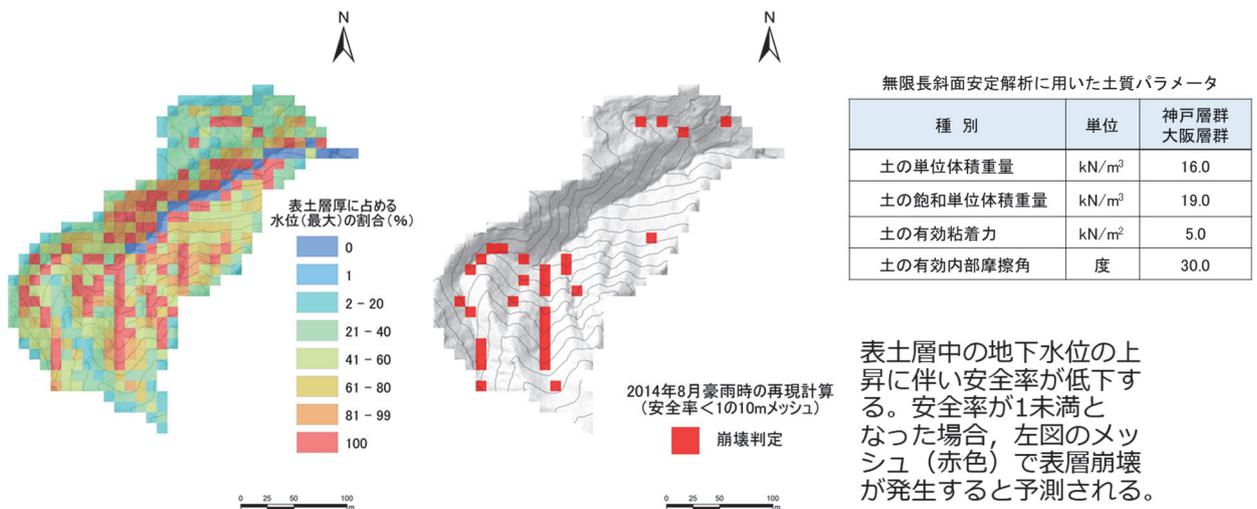
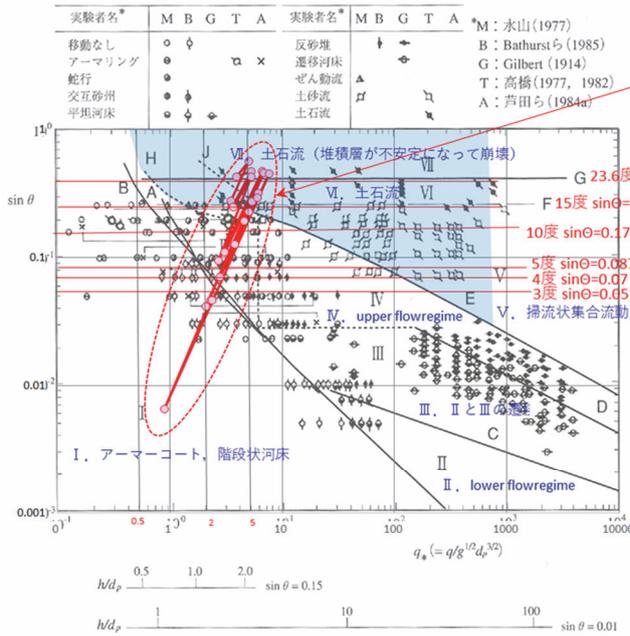


図-18 斜面崩壊の予測結果（2014年8月10日降雨）

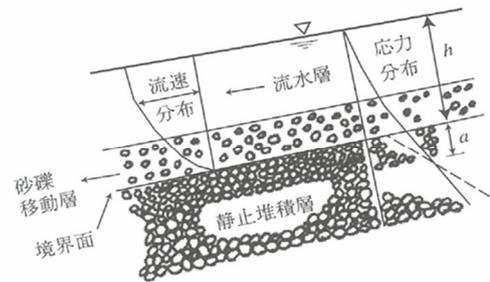
3.5 土石流の発生予測への適用について

河道部（今回は集水面積 2ha 以上のメッシュを想定）について、3.3 で算定した表面流出量と河床勾配から、高橋の式<sup>8)</sup>を用いて土砂移動層がある場合に流動化が予想される砂礫移動層の厚さを推定した。図-19 をみると、河道部で流動化が予測される砂礫移動層の厚さは 0.07~0.12m である。現在の河床の状況は、一部の緩勾配の地点に砂礫（最大礫径 20~30cm）の堆積がみられる程度で河道部はほぼ露岩している状況である。災害記録はなく、崩壊の発生や崩壊土砂の流出、河床堆積物の二次移動の実績は不明であるが、この時の流出で河床の堆積土砂はフラッシュされ現在の河道に残っていないと仮定すると、予測結果と現地状況は整合するものと考えられる。土石流の予測に関しても、今後、被災実績のある他流域での検証が必要と考えられる。

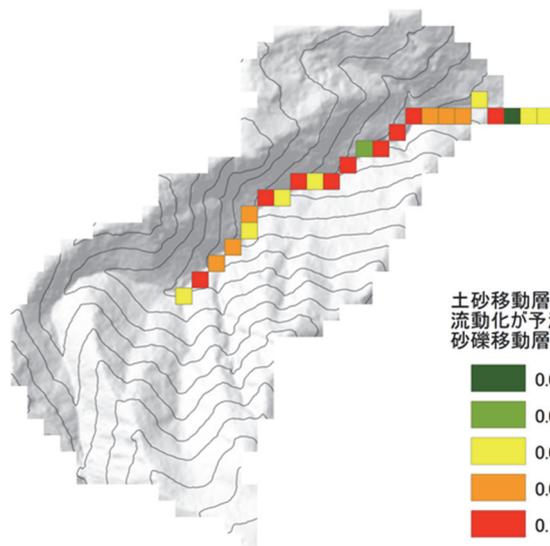


移動床の流れと河床形態の生起領域区分に加筆  
出典：高橋保（2006）：土砂流出現象と土砂災害対策，pp.208

集水面積2ha以上の河道部メッシュの $q^*$ と河床勾配の分布  
(2014年8月豪雨の洪水ピーク時の状況)  
約半数のメッシュが土石流もしくは掃流状集合流動の領域区分に属する。



土砂移動層のある場合の作業力と抵抗力  
出典：高橋保（2006）：土砂流出現象と土砂災害対策，pp.173



河道に土砂移動層がある場合（崩壊土砂の流入や砂礫の堆積がある場合），下図に示す深度まで砂礫移動層となることが予測される

土砂移動層がある場合に流動化が予測される砂礫移動層の厚さ(m)

- 0.03 - 0.04
- 0.05 - 0.06
- 0.07 - 0.08
- 0.09 - 0.10
- 0.11 - 0.12

図-19 土石流発生予測結果（2014年8月10日降雨）  
(河床に計算された厚さ以上の堆積土砂がある場合，土砂移動が発生すると考えられる)

#### 4. 山地小流域における土砂流出に対する危険度を予測のための数値モデル検討に際しての留意事項

本報告では、モデル溪流において簡易な Web カメラ等による流出観測成果から、表土層中の地下水と地表水を連続的に計算する分布型の流出モデルを試験的に作成し、表層崩壊や土石流の発生予測への適用について検討した。本報告で行ったような比較的簡易な観測装置での流量観測結果から、小流域の個々の流域特性に即した降雨流出モデルを作成し、山地小流域における土砂流出に対する危険度予測に利用できることを確認した。これは、土砂災害警戒区域や道路沿いの小溪流を対象とした警戒避難や危険度評価等のリスク管理に有効な方法のひとつであることを示唆するものである。ただし、現段階では、一つのモデル流域で規模の大きな降雨実績を経験していない短期間の観測成果による成果であるため、一般化に向けて今後も観測・検証を継続する他、他流域での実績を増やしてゆくことが必要である。他の溪流へ同手法を展開してゆく際の留意事項等について、今回の検討から得られた知見を以下に列挙する。

- ・小流域であるため、数分程度で変化する雨の強弱や小規模な崩落の発生、水ミチのパイプの閉塞・決壊等の影響が流量の観測結果にあらわれると考えられる。これらの影響が災害発生の条件にまで及ぶものなのかどうか究明する必要がある、原因の特定や影響度を把握するため、数分程度の解像度を有する雨量観測、流量観測や流域で発生した土砂移動現象を降雨後に把握する手法等を別途検討する必要がある。
- ・モデルの構築に際して、河道にあたるメッシュの層厚が流出量や流出のタイミングに大きく影響することから、斜面の透水係数や層厚の検討とあわせて、現地に即した河道条件をモデルに設定する必要がある。なお、小流域であるため通常河道幅は数 m 程度であることから、斜面から河道への連続性を考慮すると、設定するメッシュの大きさは河道と溪岸斜面部を識別できるような、例えば 2×2m メッシュぐらいが良いと考えられる。
- ・流域面積が 5ha を超える流域では、10m メッシュで 10 分間隔の計算では溪流を流下する表面流の早い流れを表現できない。その場合、メッシュ間の表流水の移動を計算する仕組みを組み込む必要がある。例えば、河道幅を考慮しメッシュサイズを 2m とする場合、流域面積 5ha で 25,000 メッシュ、計算ステップは表面流の流下速度(最大 2m/sec 程度を想定する)と 1 秒程度となる(今回の約 500 メッシュの 10 分間隔に対し、3 万倍の計算量となる)。
- ・土砂災害への適用検証を行うため、災害履歴のある溪流での実績をふやすことが必要である。

#### 【謝辞】

ヒョウ工務店には、毎月のメンテナンス時の敷地内への立ち入り等で便宜をはかっていただいた。ここに記して、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 鳥居宣之・笠原拓造 (2022) : 山地小流域における流量観測及び土砂流出に対する危険度予測のための簡易的な流出モデルの検討, 第 63 回地盤工学シンポジウム論文集 CD-ROM
- 2) 沖村孝・市川龍平 (1985) : 数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, 土木学会論文集, No. 358/III-3, p. 69-75.
- 3) 沖村孝・鳥居宣之・尾崎幸忠・南部光広・原口勝則 (2011) : 豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築, 新砂防, 63(6), pp. 4-12.
- 4) 沖村孝・中川渉・中尾直美・伊藤正美・嵯峨根朋子 (2017) : 兵庫県内の新生代第三紀堆積岩類における地形・地質的特徴とリアルタイム表層崩壊予測モデルへの適応と限界について, 建設工学研究所論文報告集第 59 号, pp. 49-71.
- 5) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則 (2015) : 表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(6), 建設工学研究所論文報告集第 57 号, pp. 17-57.
- 6) 内田太郎・小杉賢一郎・大手信人・水山高久 (1996) : パイプ流が斜面安定に与える影響, 水文・水資源学会誌, Vol. 9, No. 4, pp. 330-339.

- 7) 佐山敬洋・小杉賢一郎 (2014) : 山地基岩は不透水とみなせるか? - 基岩地下水の流動を再現する分布型流出モデルの開発, 水文・水資源学会研究発表会要旨集
- 8) 高橋保 (2006) : 土砂流出現象と土砂害対策, pp. 208.

#### 著 者

鳥居 宣之 所員(非常勤) 神戸市立工業高等専門学校教授、博士 (工学)、山地防災工学  
笠原 拓造 客員研究員 国際航業株式会社、砂防工学