

令和元年6月25日現在

機関番号：52301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18160

研究課題名（和文）次世代型リアルタイム土石流予警報・被害予測システムの基盤構築

研究課題名（英文）Development of a Next-Generation Real-time Forecast-Alarm-Estimate System for Debris Flow Disasters

研究代表者

永野 博之（Nagano, Hiroyuki）

群馬工業高等専門学校・環境都市工学科・講師

研究者番号：20595425

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：土石流災害について空中写真判読、現地調査、数値解析を通じて土石流の被害状況と規模を評価した。その上で、被害予測の精度向上には流木の影響を適切に評価する必要があることを示した。水理実験より得られた土石流流下時の振動特性について検討を行い、振動波形の特性と土石流の流動性との関係を表わした実験式を提案した。予警報システム発令に用いられている土壌雨量指数の算出法について検討を行い、カルマンフィルタを導入したモデルが時々刻々と変化する流域危険度のリアルタイム更新に有効であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土石流発生時の振動を検知し、その結果を活用した確度の高い予警報技術と被害予測技術の確立を目的として実施した。災害調査を通じて、流木の堆積により土石流の氾濫状況が変わることを明らかにし、被害予測の高精度化には流木の考慮が重要となることを示した。これまでどのような土石流によりどのような振動波形が得られるか不明瞭であったことについて、水路実験より計測した土石流時の振動波形を用いて検討を行い、両者の関係を示した。さらに、現行の土砂災害警戒情報の発令に用いられる土壌雨量指数の算定について、リアルタイムに修正可能なモデルを開発した。開発したモデルを実流域へ適用し、有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：In this study, debris flow disaster investigation was conducted using aerial photo analysis, field survey and numerical simulation. The results showed that the estimation of woody debris behavior is essential to perform a debris flow damage prediction with high accuracy. Hydraulic experiments were carried out to assess the vibrational characteristics due to a debris flow. An empirical equation that relates vibrational characteristics and flow characteristics is proposed. Calculation model of soil water index using Kalman filter was developed and applied to actual fields. Results indicated that the model is valid for real-time risk estimate system of debris flow disaster.

研究分野：水工水理学

キーワード：土石流 警戒避難 地盤振動 予警報システム 豪雨災害 土砂災害 減災 自然現象観測・予測

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年の集中豪雨の増加に伴い、土砂災害のリスクは増大しており、警戒避難体制の整備などのソフト対策の強化が求められている。甚大な被害をもたらした平成 25 年伊豆大島や平成 26 年広島土流災害では、適切な避難勧告・指示が出されなかったことが被害拡大の主要因として挙げられ、空振りを恐れず土流災害の予報・警報を出すことが政府方針となった。それには、土流災害に対して確度の高い予警報および被害予測技術の確立が不可欠であり、土流の発生予測と土流の流動・氾濫を評価可能な解析モデルを組み合わせたシステムが求められる。

現行では概ね 5km 四方のメッシュに対し、降雨指標から算出される危険基準を超過した場合に、土流災害（土流および集中的に発生するがけ崩れ）についての警戒情報が発令される。降雨データの実測値は近年の技術の進展により高精度であるが、土流を引き起こすような局所・短時間豪雨の数時間後の予報値の精度には、改善の余地が残されている。加えて、現行基準は過去の降雨時の土流災害の発生・非発生の統計処理に基づいている。実際に発生したか否かは判断が難しく、基準設定に用いるデータに曖昧さが含まれる。また、災害に至らずとも溪流の土流生産状況は変化するため、過去のデータのみからの評価には限界がある。すなわち、降雨に基づく評価では予測できない土流が当該あるいは近傍流域で発生した際にそれを検知し、危険度を更新する機能を組み込んだ、さらなる確度の高い予警報システムの開発が求められていた。

土流の検知については、振動センサを用いた土流検知システムの開発が進んできており、施工現場などでは実用化されている段階にある。しかしながら、発生時刻や位置、規模を評価するものではないため、計測される振動から土流の規模を評価する手法は確立しておらず、土流の予警報・被害評価システムに組み込むには、大きな課題が存在していた。

2. 研究の目的

本研究は、土流の予警報や迅速な被害予測を行う上でボトルネックとなっている土流発生状況の簡易推定法を振動波形の計測結果に基づいて開発するとともに、振動・降雨情報と土流解析モデルを用いた次世代型リアルタイム土流予警報・被害予測システムを構築することを目的とする。特に、現地での振動情報については、土流が流下する地点からセンサ設置箇所までの間の地盤減衰の影響もあり、土流による振動の特性と土流の流動特性との間の関係には不明瞭なところが多く、土流の発生はもとより、どの程度の規模の土流が流下するかを評価できるには至っていないことから、土流発生に伴う振動について複数地点の地震計データからの収集を試みるとともに、室内実験により土流に伴う振動の基本特性を把握した上で、土流の流動規模等、発生状況推定に結びつけるための評価手法を検討し、既存の土流解析モデルと結びつけた被害評価システムの構築を目指した。

3. 研究の方法

(1) 直近における土流災害状況の調査・検討

広範囲にわたり大規模な被害をもたらした土流災害のうち直近で発生したものについて、航空写真、降雨・流量データ、土砂の流下・堆積・氾濫データ、被害状況および対象地域近傍の地震計の整備状況等の情報を収集・整理した。また、研究期間中の平成 29 年（2017 年）7 月には、九州北部豪雨による大規模な土流災害が発生したため、同災害の現地調査を実施し、その調査結果に基づいて土流の流動解析による検討を行った。その他、平成 21 年（2009 年）山口県防府市、平成 26 年（2014 年）広島県広島市、平成 26 年（2014 年）長野県南木曾町、平成 28 年（2016 年）群馬県沼田市で発生した土流など限局的な災害も含めて情報収集を行った。

(2) 水路実験に基づく振動波形の特性検討

土流による振動の基本的特性を明らかにすることを目的として水路実験を実施した。水路実験では、計測される振動データには極力土流以外の要因による振動を除外することに加え、水路自体の振動が抑制されないようにする必要がある。このため、大規模な電動ポンプを用いた給水や、鋼製フレームで基礎地盤に剛結された施設を用いることができないことから、新たに製作した幅 40cm、高さ 40cm、水路長 4m のアクリル素材で木製フレームの

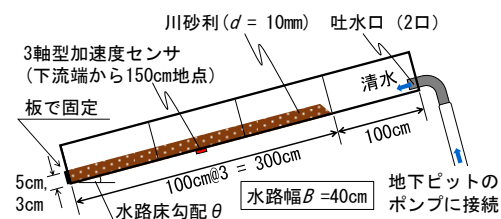


図1 実験水路の模式図

実験水路を用いた（図1）。実験より得た振動波形について、パワ・スペクトルおよび自己相関関数の特性について検討を行った。また、スペクトルの卓越周波数と流下する土流の水理量との関係を調べ、振動波形と土流の流動特性とを結びつける評価手法を検討した。

(3) 時系列的な危険度状況変化を反映する評価手法の検討

時々刻々変化する流域の危険度状況をリアルタイムに修正可能な手法の構築が可能であるか検討するため、本研究では現行の土壌雨量指数の算出モデルにカルマンフィルタ（KF）を導入し、実流量を観測値として予測値をフィルタリングするモデル（KFありモデル）を用いた場合と導入しないモデル（KFなしモデル）を用いた場合の土壌雨量指数の結果を比較し、流域の危険度評価のリアルタイム更新を行う上での課題について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 広範囲にわたり発生した直近における土石流災害状況の調査・検討

平成26年(2014年)8月に広島県広島市上山川(安佐南区)で発生した土石流災害と、平成29年(2017年)7月九州北部豪雨により福岡県朝倉市白木谷川で発生した土石流災害を対象に、土砂・流木の流出状況、被害状況について調査・検討を行った。

上山川では、災害後の空中写真から、谷出口直下の住宅地(勾配約 8°)に流出した土石流による巨礫の多くは、流路沿いだけでなく駐車場などの平坦な土地や樹林に堆積し、災害後の流路痕跡にほぼ一致した。一方、流木の多くは流下方向に対して、横断方向に分布する特徴を有することが明らかとなった。

白木谷川流域(図2)では、流域面積 3.9km^2 のうち崩壊・溪岸侵食箇所を図上計測した面積は約 0.31km^2 (流域面積の約8%)であり、生産土砂量は約 $62\text{万}\text{m}^3$ と推定された。また、土砂氾濫範囲の図上計測値と現地調査の結果から、溪流区間(勾配約 $7.2^\circ\sim 10^\circ$)から住宅が位置する最上流域(勾配約 3.6°)に流出・堆積した土砂量は約 $17\text{万}\text{m}^3$ と見積もられた。正射画像からの判読では、白木谷川流域の東側で流下痕跡が途中で途切れるものが多く、それらは主流路に到達する前に堆積し、流域内に残存していることが推測された。両災害とも、氾濫範囲や土砂の分布等、流木による影響が被害拡大に関わっていることが示唆された。

白木谷川流域で発生した流木を伴う土石流の1次元流動シミュレーションを行った。解析モデルは、Nagano et al.(2013)に基づき、土砂・水混相流(土石流)である主流層と流木・土砂・水混相流である表層の2層構造モデルとして、流木は主流層の上を流下するものとした。計算の結果(図3)、溪流区間から下流に流出した土砂量は、約 $16\text{万}\text{m}^3$ と評価され、現地調査結果とほぼ一致した。また、溪流区間の上流で流路床の縦侵食が、その下流および氾濫区間の上流(区間II)で堆砂が著しい結果を得た。流路幅の計算結果については、溪流区間の中下流で横侵食が顕著で、最大約 20m まで流路幅を拡大させる結果となった。これらの計算結果は、概ね実際現象を説明する。一方で、氾濫区間の中流($x \approx 1250\text{m}$)では顕著な堆積が認められず、実際現象と一致しない結果となった。この地点では、大量の流木による橋梁部の河道閉塞とそれより上流における大量の土砂堆積を現地調査で確認している。本研究で用いた計算モデルでは、橋梁による流木捕捉を考慮していないことが原因と考えられた。

以上より、今後精度の高い被害推定を行うには流木の考慮が不可欠と考えられた。

また、広域で同時多発的に発生する土石流による地盤振動の特性と地震計による検知の有無を調べるため、福岡県朝倉市の近傍に整備されている地震計の平成29年7月九州北部豪雨時の観測記録を調べた。調査対象は、朝倉市周辺に整備されている小石原(KIWH)、大刀洗(TARH)、浮羽(UKHH)、山国(YGNH)の4つのHi-net観測点とした(図4)。対象期間は、2017年7月5日16:00~17:59とした。これらの観測点における加速度時刻歴波形からは、振動状況の顕著な変化を確認することができず、同データを用いたスペクトル解析結果からも特徴的な傾向は確認できなかったため、災害地点から 10km 以上離れた観測点での検知は困難なことが示唆された。

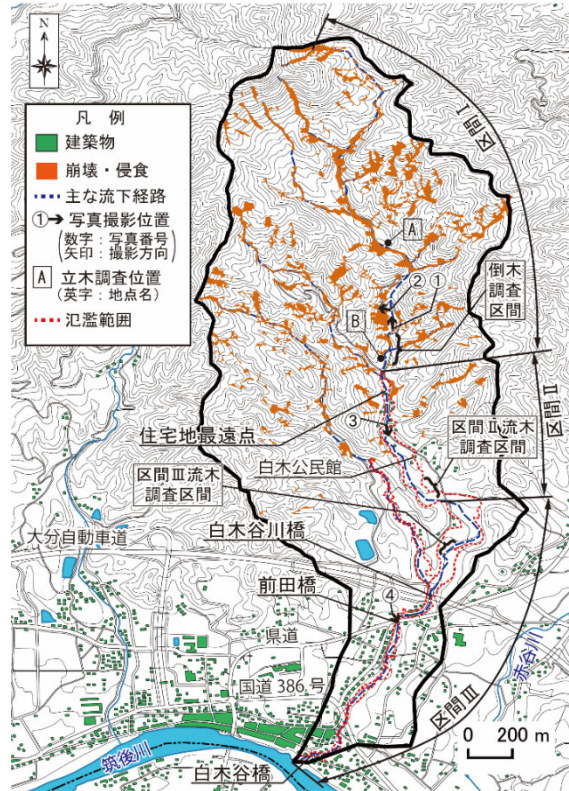


図2 白木谷川流域

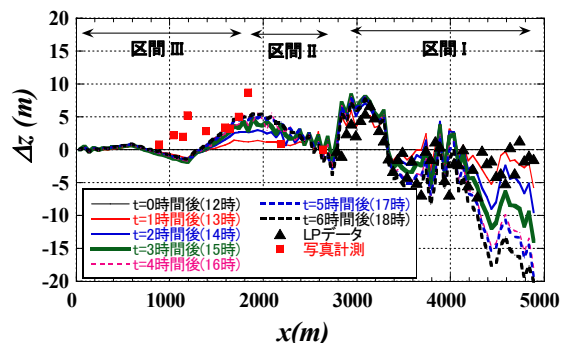


図3 流路床変動高の計算結果

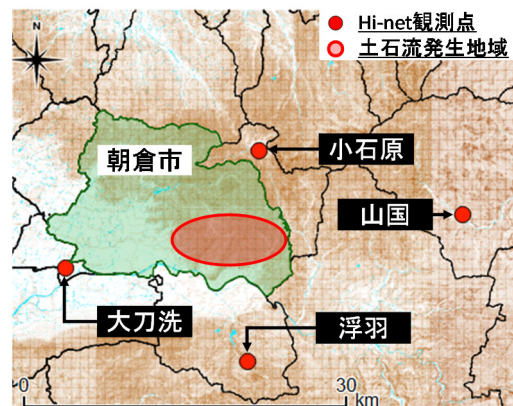


図4 福岡県朝倉市の土石流発生地域とHi-net観測点との位置関係

(2) 水路実験に基づく振動波形の特性検討

水路実験により得られる振動波形を解析し、土石流による振動の基本的特性を検討した上で、土砂流動特性と振動波形の特性との関係について検討を行った。

図1に示したように、水路床に土砂を敷き詰め、下流端は敷き詰めた土砂の上面と高さを一致させた板で固定した。下流端から150cm地点では、圧電型3軸加速度センサ(TEAC製7.0ZT)を水路底面の裏側に貼り付け、流下方向、横断方向、水路床に垂直な方向をそれぞれx, y, z方向として通水時の水路振動による加速度を計測した(サンプリング周波数240Hz)。水路側方からデジカメ1台とビデオカメラ2台を用いて、下流端から0~1m, 1m~2m, 2~3mの区間の流下状況を撮影した。水路側面にはテープ尺を貼り、実験終了後に撮影動画から土石流流下時の水深と平均的な流速を判読した。なお、流路床を飽和させるため実験前に通水した。流量の供給は、水路内に設置した堰板を引き上げて流下させるケースも予備実験として行ったが、堰板のスムーズな引き上げが困難であったため、小規模なポンプを用いて上流端の2つの吐水口から清水を放流した。実験ケースは表1に示すように、勾配、粒径、土砂の敷厚を変化させるとともに、10mmの川砂利を貼った板を水路床に敷設し、その上から土砂を敷設した(粗度付け有り)ケースについても調べた。これは、予備実験時に、敷設した土砂がアクリルの流路床上を滑るように流下するケースもあったためである。また、比較のため清水の場合の実験(ケース名にpwが付くもの)も行った。ポンプ稼働時刻を検討対象時刻($t = 0\text{sec}$)とし、下流端での流量捕捉が終了する時刻($t = 11 \sim 17\text{sec}$)を解析に用いる終了時刻とした。

実験より得られた検討対象時間全体の振動波形(z方向)では、粒径が同一である場合、勾配が急なほど加速度振幅が大きい傾向にあったが、粒径10mmに比べ粒径2mmの場合はその傾向は小さくなり、清水の場合は、さらに小さくなった。同波形についてFFT解析を行った結果、土砂濃度が大きいほど卓越周波数帯が広範囲に分布するようであったが、統一した傾向は見いだせなかった。このことから、流れのフロント部が、加速度センサ地点を通過する前後での振動特性の変化を確認する必要があると考え、検討対象時間の加速度時刻歴を1秒刻みで区分したFFT解析よりランニングスペクトルを得た(図5)。

ランニングスペクトルの結果から、CASE1-1, CASE1-2, CASE5に共通して、通水開始直後に狭い周波数領域で卓越周波数帯が出現した後、卓越性が不明瞭になり、その後、広範囲に卓越周波数帯が出現した。例えば図5に示したCASE1-1では、通水後7~8秒の間にフロントが加速度センサ直上地点を通過する。一方、清水のケースでは、通水直後は狭い領域に卓越性が見られるが、その後、高周波領域で卓越周波数帯が点在する傾向にあった。これより、フロントがセンサ直上地点を通過する前後で振動の特性が変化していることが考えられた。

また、図6のように、フロントが加速度センサの直上を通過する時刻が含まれる1秒間の各軸方向の加速度波形についてパワースペクトルと自己相関関数を検討した。その結果、土砂ありのケースと清水のケースを比較すると、前者では20~30Hz, 40~50Hz付近が卓越し、後者では30~40Hz, 60~80Hz付近が卓越する結果となった。流下(x軸)方向の自己相関関数は、ノイズ成分が少なく滑らかな周期性を持ち、自己相関関数の値も比較的高い値となった。横断(y軸)方向でも同様の結果を得たが、流下方向ほどの周期性と自己相関関数の高さは得られなかった。水路床に対して垂直(z軸)方向では、ノイズ状を呈し、自己相関関数も小さい値となった。これらは、全てのケースで共通する傾向であった。このことから、流動に伴う振動特性を明らかにする上では、3軸方向についてより詳細な検討を行う必要があると考えられた。

表1 実験条件

CASE※	勾配 θ (度)	粒径 d (mm)	敷厚 D (cm)	粗度付け
1-1	15	10	5	無し
1-2	15	10	5	無し
2	15	2	5	無し
3	6	10	5	無し
4-1	6	2	5	無し
4-2	6	2	5	無し
5	10	10	5	無し
6	10	2	5	無し
7	10	10	5	有り
8	10	2	5	有り
9-1	15	10	5	有り
9-2	15	10	5	有り
10	15	2	5	有り
11	15	10	3	有り
12	15	2	3	有り
pw1-1	15	-	-	無し
pw1-2	15	-	-	無し
pw2-1	6	-	-	無し
pw2-2	6	-	-	無し
pw3-1	10	-	-	無し
pw3-2	10	-	-	無し
pw4-1	10	-	-	有り
pw4-2	10	-	-	有り
pw5-1	15	-	-	有り
pw5-2	15	-	-	有り

※枝番号は、確認のため2回実施を意味する。

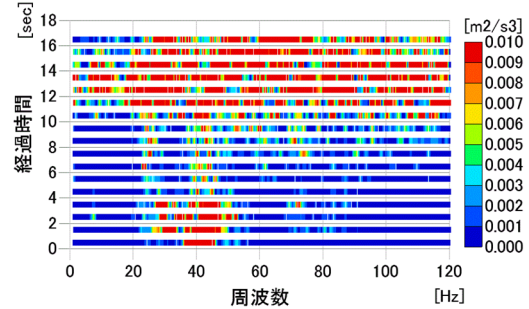


図5 ランニングスペクトル (CASE1-1, z軸)

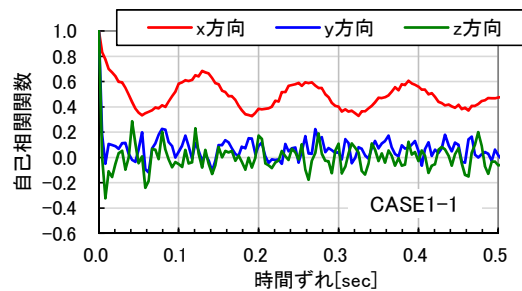


図6 自己相関関数(CASE1-1)

振動波形より得られる特性から土石流の流動特性の評価へと結びつけるため、フロントが加速度センサ直上地点を通過する時刻が含まれる1秒間の波形における卓越周波数 f を流動深 h と流速 v を用いて無次元化した卓越周波数 $f \times h / v$ と橋本(2010)の提案する無次元パラメータとの関係を調べた。橋本(2010)の無次元パラメータは、土石流などの高速・高濃度の固液混相流を規定するものとして提案されているものである。その結果、ある程度の傾向は示唆されたものの、データのバラつきが大きく、統一した結果は得られなかった。これは、無次元パラメータを算出する際に用いる土砂濃度や土石流密度について、フロント通過時の値を得ることが困難であるため、下流端での流量捕捉結果より算定した平均的な値を用いて計算したことによると考えられる。このため、同様に流れを規定するパラメータとして流速係数 ϕ を用いて再整理した(図7)。その結果、実験結果に対する累乗近似式は、 $f \times h / v = 4.9488 \times \phi^{-1.441}$ 、相関係数 $R^2 = 0.86$ であった。無次元化した卓越周波数が、流速係数の関数であると仮定し、より実用的な形に改めた式、 $f \times h / v = 5.0 \times \phi^{-1.5}$ を提案した。図7には、この式による計算値も点線で示すとともに、大角ら(2004)による水無沢川の研究より算出した結果も併せて示した。この結果からは、流速係数が概ね5以下では無次元化した卓越周波数の値に違いが生じるが、流速係数が5以上では違いが不明瞭となることが考えられる。すなわち、粒子間の衝突効果が卓越するような流れを評価する場合に、本研究により得られた提案式が有効であることが示唆された。今後、既往研究の現地観測データと比較し、この式の適用性を検証することが課題と考えられる。

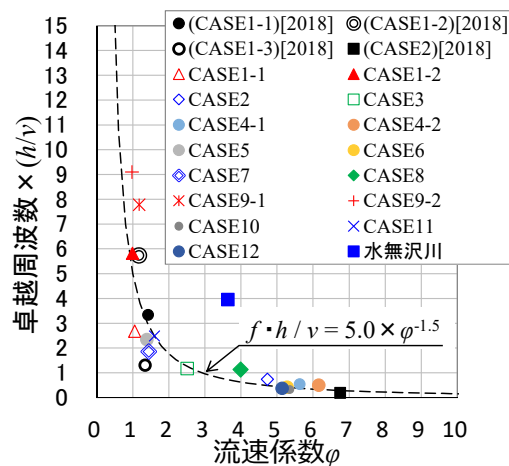


図7 流速係数と無次元卓越周波数の関係

(3) 時系列的な危険度状況変化を反映する評価手法の検討

現行の土壌雨量指数の算出で用いられる直列3段タンクモデルを作成した上で、実流量を用いて予測値をフィルタリングするカルマンフィルタ(KF)を導入し、時々刻々変化する流域の危険度状況をリアルタイムに修正可能な手法の構築について検討した。対象地域は、平成28年9月7日午前4時頃に土石流災害が発生した群馬県沼田市柿平地区と平成21年7月21日午後12時頃に土石流災害が発生した山口県防府市の佐波川流域を対象とした。パラメータは、気象庁で採用されている全国一律のパラメータを使用し、国土交通省水文水質データベースおよび気象庁Webサイトから得た60分間積算雨量と1時間ごとの流量を入力データとした。ただし、柿平地区の近傍には流量観測所がないため、約5km離れた位置にある菌原ダム流域に本モデルを適用し、菌原観測所の流量から比流量を算出し、柿平地区の流量を推定した。これは、実流量が得られない流域での適用性を検討することを考慮したためである。

柿平地区と佐波川における土壌雨量指数の計算結果を図8および図9にそれぞれ示す。柿平地区では、KFありとKFなしとは、上昇開始時刻に差はないが、立ち上がりについては、KFありの方が大きい結果を得た。佐波川では、7月20日13時~19時の間でKFなしの

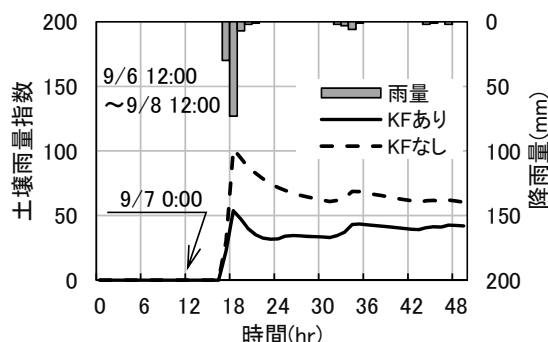


図8 土壌雨量指数の推移(柿平地区)

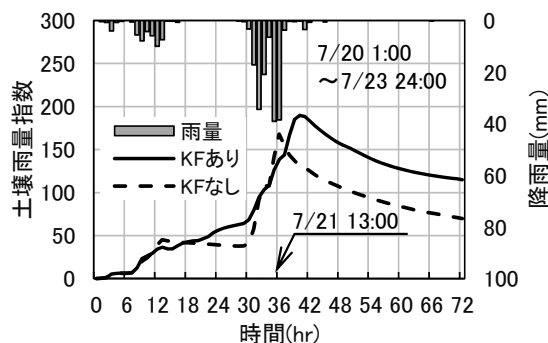


図9 土壌雨量指数の推移(佐波川)

土壌雨量指数の値がKFありを上回るが、その後逆転し、災害発生時刻である7月21日12時頃までKFありの土壌雨量指数がKFなしを上回る。その後、再び逆転を繰り返した後、7月21日18時以降はKFありの方が高い土壌雨量指数値を継続する。佐波川では、KFありの方がKFなしに比べて流量波形の解析値と実績値との適合が良い結果を得ており、KFありモデルの方がより適切に実現象を表わしていると考えられる。これらの結果から、フィルタリング手法を用いることで、より適切に流域の危険度を評価することが可能と考えられるとともに、流量観測所がない地域でも直近で入手可能な観測値を活用した危険度評価を行える可能性が示唆された。今後は、実流量のデータがない流域での適用限界と妥当性について詳細に検討することが必要と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ①永野博之, 福岡尚樹, 橋本晴行, 2017年九州北部豪雨により発生した朝倉市白木谷川流域の流木・土砂・水混相流の流出規模に関する研究, 河川技術論文集, 第24巻, 査読有, 2018, pp. 487-492
- ②福岡尚樹, 永野博之, 橋本晴行, 2014年8月広島土石流災害における流木の発生と流動・堆積に関する研究, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 査読有, 2016, pp. 139-144

〔学会発表〕(計6件)

- ①永野博之, 塩谷晴, 高田光, 急勾配水路の土砂流動による振動特性の評価に関する研究, 2019年度砂防学会研究発表会, 2019
- ②永野博之, 高田光, 加速度センサを用いて計測した土石流流下時の水路振動の特性について, 2019年度砂防学会研究発表会, 2019
- ③塩谷晴, 永野博之, 加速度センサによる集合流動の振動計測と流れの特性評価に関する研究, 土木学会第46回関東支部技術研究発表会, 2019
- ④永野博之, 高田光, 加速度センサを用いた土石流の流動特性の評価に関する実験的研究, 平成30年度砂防学会研究発表会, 2018
- ⑤永野博之, 須藤怜華, 加速度センサを用いて計測した急勾配水路における土石流の振動とその特性に関する研究, 平成29年度砂防学会研究発表会, 2017
- ⑥Naoki FUKUOKA, Hiroyuki NAGANO and Haruyuki HASHIMOTO, Behavior of Sediment and Driftwood in the 2014 Hiroshima Debris Flow Event, Joint Workshop of 2016 International Debris-Flow Workshop (ANDF Workshop) and 6th International Workshop of Multimodal Sediment Disasters, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。