

平成 28 年度
大規模土砂災害対策研究機構年報

大規模土砂災害対策研究機構

目 次

1. 研究機構の概要	1
1.1 構成機関	1
1.2 研究機構の取り組む課題	1
1.3 研究機構の果たす役割	1
2. 研究課題	4
2.1 国土交通省近畿地方整備局（大規模土砂災害対策技術センター）	4
・河道閉塞対策箇所における緊急時の現地調査への UAV の活用について	
・那智川流域における土石流発生後の土砂動態観測	
2.2 国土交通省国土技術政策総合研究所	9
・地震時斜面崩壊危険度評価手法の改良および地域防災への適用	
2.3 和歌山県	12
・深層崩壊危険斜面における水文・水質特性に関する研究	
・平成 23 年台風 12 号の那智川流域の水文・水質特性と崩壊メカニズムに関する研究	
・ヒアリング調査を基にした平成 23 年那智川災害の避難行動に関する研究	
・荒木川における流砂観測の紹介	
・UAV を活用した河道閉塞箇所の計測手法に関する研究	
・UAV を活用した山地災害後の初期対応及び計測手法について	
・災害時の流木の流出率に着目した治山堰堤の効果的な配置手法に関する検討	
2.4 国立研究開発法人土木研究所	40
・雨の降り方の違いが斜面の水文過程と表層崩壊規模に及ぼす影響	
・近年発生した表層崩壊の発生規模と降雨・地質特性との関係に関する研究	
・球状風化を呈した地質帯における表層崩壊発生場の特性と土層厚推定手法の検討	
・平成 23 年台風 12 号により発生した深層崩壊地の湧水の水質形成過程に関する研究	
2.5 北海道大学	63
・和歌山県那智川流域における斜面崩壊面積と土石流規模の推定	
2.5 三重大学	66
・土石流によって運搬される大径流木が木製耐力壁に作用する衝撃力	
・降雨指標を用いた溪床堆積物再移動型土石流発生過程における各水文現象の発生限界評価	

2.6	京都大学	73
	・物理水文モデルを用いた山体地下水位変動の検討	
2.7	和歌山大学	75
	・土壌雨量指数による平成 23 年台風 12 号の土砂災害の誘因解析	
	・地域防災研究成果の地元住民への還元	
	・ダム流木と降水量に関する考察と流木量推計の試み	
	・土砂災害対応小型 UGV の開発	
	・円柱鉄鋼部材の応力測定に対する表面 SH 波音弾性法の適用	
	・漫画表現を用いた防災知識の提示による防災意識向上手法	
	・災害時における情報配信手段に関する研究開発	
3.	学会活動	100
3.1	学会誌掲載	100
3.2	学会発表	101
4.	広報・啓発活動	105
4.1	イベント	105
4.2	講演	107
4.3	啓発活動	107
5.	研修活動	108
5.1	職員向け研修	108
5.2	学生研修の受け入れ	109
6.	平成 28 年度の主な活動	110

1. 研究機構の概要

大規模土砂災害対策研究機構は、平成 23 年紀伊半島大水害において多数発生した大規模な土砂災害を契機として、大規模土砂災害への対応技術の高度化に対して行政・大学・研究機関が連携して取り組むために平成 26 年度に設立され、様々な取り組みを進めている。

1.1 構成機関

大規模土砂災害対策研究機構は下記の 9 機関により構成される。

- ・ 国土交通省近畿地方整備局（大規模土砂災害対策技術センター）
- ・ 国土交通省国土技術政策総合研究所
- ・ 和歌山県
- ・ 那智勝浦町
- ・ 国立研究開発法人土木研究所
- ・ 北海道大学
- ・ 三重大学
- ・ 京都大学
- ・ 和歌山大学

1.2 研究機構の取り組む課題

研究機構では、主として下記の課題に対して取り組みを行う。

- ・ 大規模土砂災害に係る危険箇所の抽出・評価
- ・ 中山間地域の危機管理対策
- ・ 国土監視及び国土管理の強化
- ・ 次世代災害対応技術の開発・導入

1.3 研究機構の果たす役割

上記の取り組みに加え、地域に根ざした研究機関として、研究機構は下記の役割を果たすことを目指す。

- ・ 土砂災害防止に関わる人材育成支援
- ・ 地域防災力の充実・強化支援
- ・ 防災知識普及のための広報
- ・ 諸外国に向けての技術の発信

2. 研究課題

研究機構における研究として、大規模土砂災害対策技術センターが主体となり、構成機関の助言を受けながら実施する研究と、センターを含め構成機関相互の連携により共同で実施する研究を実施している。

平成 28 年度は下記のテーマについて研究を行った。

2.1 国土交通省近畿地方整備局（大規模土砂災害対策技術センター）

- ・ 河道閉塞対策箇所における緊急時の現地調査への UAV の活用について
- ・ 那智川流域における土石流発生後の土砂動態観測

2.2 国土交通省国土技術政策総合研究所

- ・ 地震時斜面崩壊危険度評価手法の改良および地域防災への適用

2.3 和歌山県

- ・ 深層崩壊危険斜面における水文・水質特性に関する研究
- ・ 平成 23 年台風 12 号の那智川流域の水文・水質特性と崩壊メカニズムに関する研究
- ・ ヒアリング調査を基にした平成 23 年那智川災害の避難行動に関する研究
- ・ 荒木川における流砂観測の紹介
- ・ UAV を活用した河道閉塞箇所の計測手法に関する研究
- ・ UAV を活用した山地災害後の初期対応及び計測手法について
- ・ 災害時の流木の流出率に着目した治山堰堤の効果的な配置手法に関する検討

2.4 国立研究開発法人土木研究所

- ・ 雨の降り方の違いが斜面の水文過程と表層崩壊規模に及ぼす影響
- ・ 近年発生した表層崩壊の発生規模と降雨・地質特性との関係に関する研究
- ・ 球状風化を呈した地質帯における表層崩壊発生場の特性と土層厚推定手法の検討
- ・ 平成 23 年台風 12 号により発生した深層崩壊地の湧水の水質形成過程に関する研究

2.5 北海道大学

- ・ 和歌山県那智川流域における斜面崩壊面積と土石流規模の推定

2.6 三重大学

- ・ 土石流によって運搬される大径流木が木製耐力壁に作用する衝撃力
- ・ 降雨指標を用いた溪床堆積物再移動型土石流発生過程における各水文現象の発生限界評価

2.7 京都大学

- ・ 物理水文モデルを用いた山体地下水位変動の検討

2.8 和歌山大学

- ・ 土壌雨量指数による平成 23 年台風 12 号の土砂災害の誘因解析
- ・ 地域防災研究成果の地元住民への還元
- ・ ダム流木と降水量に関する考察と流木量推計の試み
- ・ 土砂災害対応小型 UGV の開発
- ・ 円柱鉄鋼部材の応力測定に対する表面 SH 波音弾性法の適用
- ・ 漫画表現を用いた防災知識の提示による防災意識向上手法
- ・ 災害時における情報配信手段に関する研究開発

河道閉塞対策箇所における緊急時の現地調査への UAV の活用について

国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所

吉村元吾・今森直樹・奥山悠木

1. はじめに

近年、無人航空機（Unmanned aerial vehicle, 以下、UAV と呼ぶ。）の低価格化、軽量化やバッテリーの性能向上による飛行時間の長時間化、GPS を利用した自律航行が可能となったこと等から、各分野への活用が試みられている¹⁾。これまでに、砂防分野への活用事例として、河床材料の調査²⁾や土砂災害の発生した箇所の調査や立入が困難な深層崩壊斜面の状況調査等への報告事例³⁾があるが、いずれの事例も UAV の操縦者が現地を見通すことができ、また、UAV の機体も視認可能な箇所の調査事例である。

今回、2011 年台風 12 号により河道閉塞が発生した赤谷地区（奈良県五條市大塔町清水）、栗平地区（奈良県吉野郡十津川村内原）の 2 箇所を対象に、2014 年台風 11 号通過直後の現地調査を緊急的に実施するため、機体の視認が不可能な箇所から、UAV を使用して速やかに現地調査を行ったので、その概要を報告する。

2. 調査地の概要および調査時の状況

平成 23 年台風 12 号は紀伊半島に多量の降雨をもたらした。河道閉塞を含む土砂災害が多発した。紀伊半島は山岳地帯が大半を占め、今回調査を実施した赤谷地区および栗平地区においても、集落や幹線道路から離れ現場への接近困難な箇所でも河道閉塞が発生している。

赤谷地区および栗平地区は、国土交通省が 2011 年に対策工事を着手し、砂防堰堤等の整備を進めている。2014 年台風 11 号が接近した際は、赤谷地区では砂防堰堤が整備中であり、栗平地区では前年（2013 年）に被災した河道閉塞部の仮排水路の復旧作業中であった。

2014 年台風 11 号は、紀伊山地に多量の雨をもたらした。赤谷地区と栗平地区では、2011 年台風 12 号による災害発生後から 2014 年末までの 3 年間で、最大の降雨量を記録した。この降雨により、赤谷、栗平の 2 地区で河道閉塞部を越流する出水が発生している。

この際、赤谷地区で斜面の再崩壊が発生し、崩壊土砂が対岸に設置した CCTV を直撃し、被災した。

このため、河道閉塞部の状況を確認することが出来なくなったが、河道閉塞下流側に設置した CCTV の映像では、降雨が継続しているにもかかわらず、赤谷川の水位が著しく低下する様子が確認され、河道の再閉塞発生が懸念された。

また、栗平地区においても湛水池に設置した水位計で急激な水位低下を記録し、その後、河道閉塞下流の保全対象付近に設置した CCTV の映像で水位の急上昇を記録し、その後 20 分程度で水位が低下した。このため、仮排水路が流失し、河道閉塞が越流により侵食され、不安定化していることが懸念された。

このため、現地状況を速やかに調査し、下流地区への影響を調査・検討する必要があったが、両地区では出水が継続し、工事用道路も流出したことや、紀伊半島にはほぼ全域にわたって雲がかかっており、有人ヘリコプターの飛行は極めて困難な状況であった（図-1）。このため、両地区において車両で通行可能な地点まで接近し、UAV を用いて現地の状況を調査した。

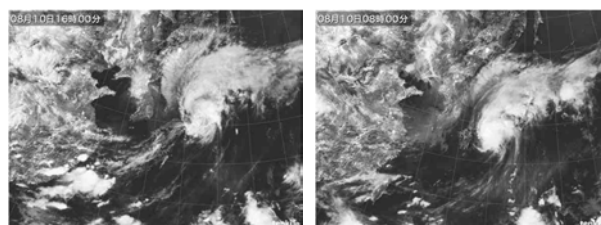


図-1 2014 年 8 月 10 日 8・16 時の気象衛星画像⁴⁾

3. 調査の概要と結果について

(1) 調査の概要

赤谷地区については、河道閉塞の可能性が懸念されたことから、調査を優先し、8 月 10 日 16 時頃行った。当時は図-1 のとおり、紀伊半島全域に雲がかかっている状況ではあったが、降雨のピークは過ぎている状況であり、UAV による調査を実施した。赤谷地区では、図-2 に示す飛行経路（撮影経路約 1.9km）で調査を行った。

栗平地区については、8 月 11 日 13 時頃より調査を実施した。進入路として利用可能な林道の終点を起点として、図-3 に示す飛行経路（撮影経路約 4.4km）で調査を行った。

いずれも現地の状況を速やかに確認することを目的とし、デジタルビデオカメラによる映像記録を行った。

調査に用いた UAV は ZionQC630 (4 枚羽タイプ) であり (写真-1)、カメラは GoproHero3 を搭載し、撮影された動画の解像度は 1,920×1,080 ピクセルである。



写真-1 調査に使用した UAV



図-2 赤谷地区の飛行ルート



図-3 栗平地区の飛行ルート

(2) 調査結果

記録できた映像からは、調査時点で赤谷地区においては発生が懸念された新たな河道閉塞は認められ

なかったが、整備中の砂防堰堤の被災状況が確認された。

また、栗平地区では仮排水路が被災し、河道閉塞が侵食され、直下流で土砂が厚く堆積している状況が確認できた。しかし、いずれも河道閉塞が不安定化している状況には無いことが確認され、得られた情報は地元自治体に速やかに提供した。



写真-2 赤谷地区において確認できた映像



写真-3 栗平地区において確認できた映像

カメラで撮影した映像の画素数は正方形比率ピクセルにおいて 1,920×1,080 ピクセルであり、約 207 万画素の動画であった。今回の飛行高度では、1 画素あたりの地上での大きさは約 90mm である。

なお、赤谷、栗平の両地区では、8 日後 (8 月 18 日) に航空レーザ測量を実施しており、同時に垂直写真も撮影している。有人飛行機に搭載されたデジタルカメラの画素数は 7,228×5,428 ピクセル (約 3,923 万画素) の静止画であり、1 画素あたりの地上での大きさは約 73mm であることから、地上分解能の観点ではほぼ遜色ない調査結果が得られている。

4. まとめ

調査を実施した際の気象状況は図-1 に示したとおりであるが、有視界飛行方式による飛行が主流である有人ヘリコプターの飛行は困難な状況下にあった。赤谷地区での調査のように、悪天候下かつ現地へのアプローチが困難な状況化においては、雨量や風速等の面で限界はあるものの、緊急時の土砂災害

発生現場における調査手法として、その有用性と有効性が確認された。

一方で、天候が回復していたものの、往復約 5km の距離を飛行せざるを得なかった栗平地区では 2 度目の飛行調査後帰還目前に UAV が墜落している。直接的な原因は不明ではあるものの、原因として単純な操作ミスその他、UAV が山間においては GPS の受信精度が平地と比べて著しく劣ること等が想定され、調査の確実性という点では課題が残る結果となった。

なお、今回の調査は航空法改正前に実施したものであり、災害発生直後に機動的な対応を行う事ができた。現在は法律改正により、150m 以上の高さの空域における飛行や目視範囲外での飛行はあらかじめ許可を受ける必要があるため、ここに補足して記す。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 27 年度次世代社会インフラ用ロボット現場検証,
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000026.html, 参照 2016-3-9
- 2) 梅津健一・戸松修：低高度空中写真による河床礫調査方法の精度検証と実用性について, 砂防学会誌, Vol.60, No.1, p.19-28, 2007
- 3) 木下篤彦・島田徹・笠原拓造・林栄明・名草一成・小山内良人・村木広和：回転翼型マイクロ UAV を用いた深層崩壊箇所への災害調査, 砂防学会誌 Vol.66, p.51-54, 2013
- 4) 気象協会：過去の天気,
http://www.tenki.jp/past/2014/08/10/satellite/japan_near/,
参照 2016-3-9

那智川流域における土石流発生後の土砂動態観測

国土交通省近畿地方整備局

吉村元吾・今森直樹・奥山悠木

1. はじめに

和歌山県那智勝浦町を流れる二級河川的那智川では、2011年9月の台風12号に伴う豪雨により10箇所の支川から同時多発的に土石流が発生し、本川へ流入した土砂が急激な河床上昇を引き起こして広範囲にわたり氾濫被害を生じた。

那智川流域では、支川の崩壊地で毎年のように拡大崩壊が生じるなど、災害から4年以上が経過した現在でも土砂移動の活発な状態が継続している。

一方で、那智川流域では災害後様々な調査・観測が行われ、経年的な土砂動態データが蓄積されてきている。このようなデータは、山間地における土石流発生後数年間の土砂移動特性を解明する上で貴重な情報となる。

そこで本研究では、那智川における土砂動態観測結果から、崩壊・土石流発生後数年間の土砂移動特性を把握することを目的とする。

2. 対象地の概要

那智川は、流域面積24.5km²、延長約8.5kmで平均勾配約1/10の急流河川である。

本川沿いの低標高地域は砂岩・泥岩からなる堆積層、山地中腹から尾根部までの高標高地域は花崗斑岩が分布しており、多くの崩壊がこれら地質境界付近で発生している。

最大の支川である金山谷川は、上流域で2つの支溪流が合流する形となっており、右支溪ではほとんど崩壊が見られないのに対し、左支溪流では2011年当時那智川流域で最大規模の崩壊が発生、土石流化し多大な被害を生じた。

3. 観測方法

流域各地点において水位計および濁度計による観測を行うとともに、出水時にはバケツ採水を行い、濁度成分の分析を実施した。

特に金山谷川では、左支溪、右支溪およびそれぞれの合流点下流で水位・濁度計測およびバケツ採水を行うとともに、左支溪の崩壊地周辺でボーリング地下水観測、土壌水分計による水分観測、および地上設置型レーザースキャナーによる地形計測を実施している。

4. 観測結果

(1) 崩壊地における土砂動態観測

金山谷川上流崩壊地において、崩壊後毎年出水時に崩壊地肩部で拡大崩壊が発生している。例として2015年7月の台風11号前後のレーザースキャナー地形差分による土砂移動状況を図-2に示す。拡大崩壊は毎年ほぼ同一箇所で発生しており、何らかの崩壊に寄与する素因・誘因が存在するものと想定される。

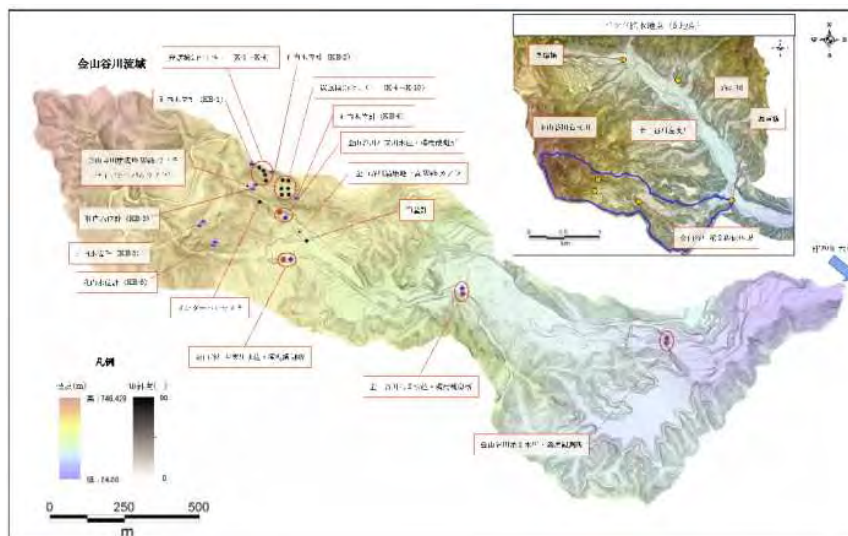


図-1 那智川流域（主に金山谷川）における観測機器配置

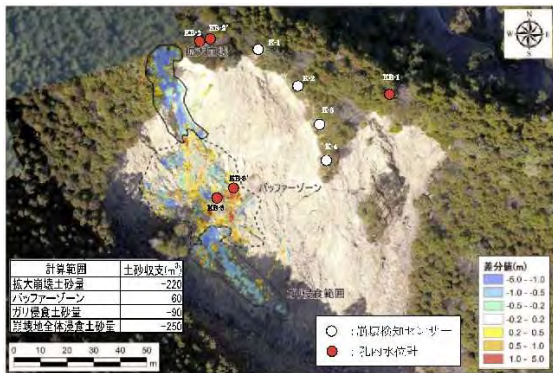


図-2 金山谷川崩壊地の拡大崩壊 (2015年7月)

例として、拡大崩壊箇所近傍のボーリング地下水を図-3に示す。降雨に伴って深部地下水が比較的緩やかに上昇するとともに、浅部地下水が鋭敏に反応しており、これら地下水応答が拡大崩壊の誘因となっていると考えられる。

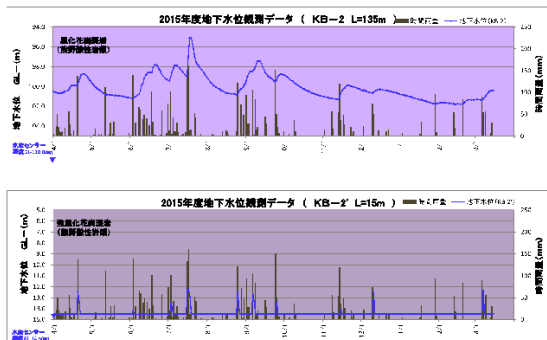


図-3 ボーリング地下水 (上: KB-2、L=135m)
(下: KB-2'、L=15m) (2015年度)

これまでに観測されている拡大崩壊ごとの崩壊・堆積・流出土砂量を図-4に示す。2011年の崩壊発生翌年には崩壊土砂量2,800m³の拡大崩壊が発生しているが、その後は徐々に崩壊・流出土砂量が小さくなっている。この結果より、崩壊発生後数年間は土砂移動が活発化するが、次第に移動量が減少し、沈静化に向かう傾向が経年的な観測から明らかとなった。

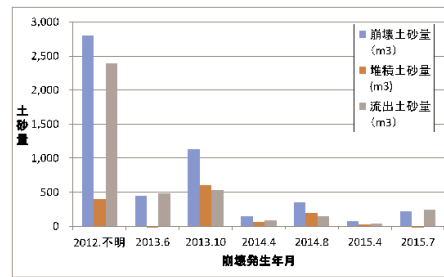


図-4 金山谷川崩壊地の拡大崩壊土砂量

(2) 崩壊地における土砂動態観測

金山谷川上流の左支溪・右支溪・支溪合流点における出水時のバケツ採水による濁水観測結果を図-5および図-6に示す。これらの結果より、大きな崩壊地を有し、荒廃している左支溪では雨量の増加に伴い濁水が発生しているのに対し、荒廃度の低い右支溪ではほとんど濁水が発生していないことが分かる。

さらに、両支溪の合流点では左支溪と同様の反応を示すことから、崩壊・土石流から数年の荒廃渓流においては、崩壊地由来の濁水が下流へほぼ時間差なく伝播することが確かめられた。

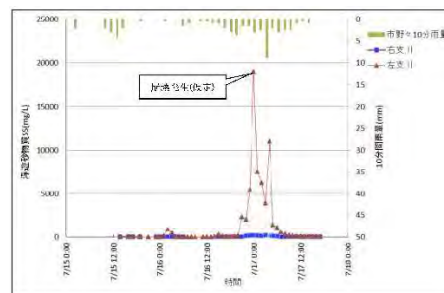


図-4 金山谷川崩壊地の拡大崩壊土砂量

5. まとめ

那智川における土砂動態観測より、崩壊・土石流発生から数年の土砂移動特性を把握することができた。このようなデータは、今後の崩壊・土石流発生後の警戒避難対策を検討する上で貴重な情報となるため、今後は継続的な観測によりデータを蓄積し、土砂移動の早期発生検知技術の開発が求められる。

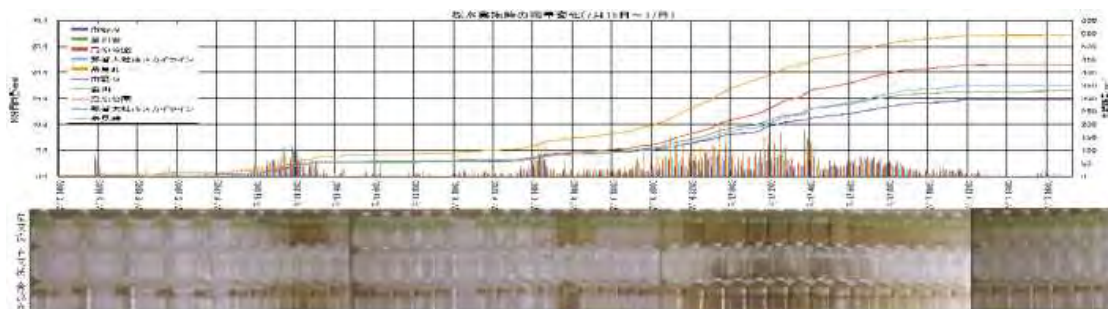


図-6 降雨(上)と採水による濁水発生状況(下)の経時変化 (2015年7月)

地震時斜面崩壊危険度評価手法の改良及び地域防災への適用検証

国土技術政策総合研究所

萬徳昌昭・桜井亘・内田太郎・松本直紀

1. はじめに

これまで中山間地を震源とした内陸直下型の地震が発生すると、多数の崩壊が発生し深刻な被害が引き起こされており、平成 28 年熊本地震においても、阿蘇カルデラ内を中心に多数の斜面崩壊が発生した。国土技術政策総合研究所では、地震による山腹斜面の崩壊危険度を評価するため、平成 7 年兵庫県南部地震時における斜面崩壊の事例から、地震時の斜面崩壊危険度を評価できる「斜面崩壊危険度評価式」を提案した¹⁾。

$$F = 0.075\alpha + 8.9C + 0.0056a - 3.2 \dots (1)$$

ここに、 F : 斜面崩壊危険度、 α : 斜面勾配($^\circ$)、 C : 平均曲率、 a : 最大加速度(m/sec²)とする。

一方、評価式の提案以降、平成 16 年新潟県中越地震や平成 20 年岩手・宮城内陸地震等兵庫県南部地震と比較して、格段に大きい最大加速度の観測値が入手でき、山間地域において大規模な崩壊が多発している。また、現評価式では、判別得点による崩壊・非崩壊の相対評価であるため、崩壊発生状況(崩壊規模、崩土の影響等)を直接判断できないという課題がある。

そこで、地震による斜面崩壊危険度評価の精度向上のため、既往の地震と斜面崩壊の関係を分析し、地震加速度が地盤へ与える影響に関する評価手法を見直し、崩壊面積率による評価が可能となるように、地震時斜面崩壊危険度評価を改良し、その有効性に関して検証した。

2. 最大加速度が斜面崩壊に及ぼす影響

平成 16 年中越地震(対象面積 740km²)、平成 20 年岩手宮城内陸地震(対象面積 590km²)、平成 28 年熊本地震(対象面積 700km²)を対象として、斜面勾配と崩壊面積率の関係から、最大加速度が地震時斜面崩壊に及ぼす影響を検討し、定式化した。

なお、斜面勾配は、10m メッシュ毎に算出し、崩壊・非崩壊メッシュの判定は、10m メッシュ毎に、メッシュの重心が崩壊ポリゴンに含まれるメッシュを崩壊メッシュポリゴンとした。また、最大加速度は、防災科学技術研究所が公表している、強震観測網²⁾K-NET 及び KiK-net から入手した強震観測記録と表層地盤の増幅率を考慮して算出した。

定式化した手順を下記に示す。既往の検討³⁾から、斜面勾配と崩壊面積率の変化率(傾き)は、加速度の区分によらず概ね一定であることが示されていることから、まず、10m メッシュごとに、斜面勾配ごとの最大加速度と崩壊面積率の関係から、式(2)の k と m を最適化した。

$$\log(P) = kI + m \dots (2)$$

ここに、 P : 崩壊面積率、 I : 斜面勾配、 m : 最大加速度と崩壊面積率の関数、 k : 係数とする。

(2)式の斜面傾斜角 I の係数 k は、対象領域の全データを用いて斜面傾斜角と崩壊面積率の関係を整理して決定した(図-1)。その結果、例えば、H16 中越地震における係数 k は、 $k=0.0325$ となった。続いて、斜面傾斜角 I の係数 k を $k=0.0325$ に固定し、最大加速度 50gal ごとに斜面傾斜角と崩壊面積率の関係を整理し、加速度の項 m の定式化を行った。その結果、最大加速度と崩壊面積率の関係から整理した各加速度帯の加速度の項 m は、図-2 のとおりとなり、最大加速度と崩壊面積率を最適化すると式(3)で表すことができた。

$$\begin{cases} f(a) = 0.0022a - 4.644 (a \leq 900) \dots (3) \\ f(a) = -2.554 (900 < a) \end{cases}$$

ここに、 a : 最大加速度とする。同様に、平成 28 年熊本地震、平成 20 年岩手宮城内陸地震に関しても定式化した。

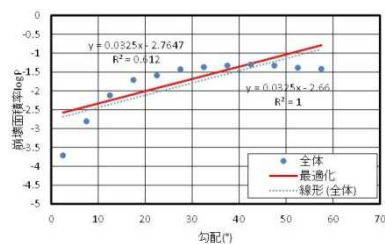


図-1 平成 16 年中越地震の斜面勾配と崩壊面積率の関係

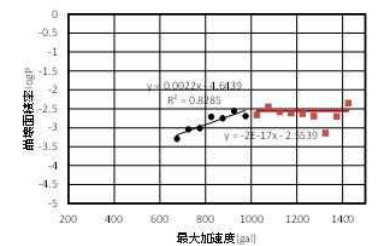


図-2 平成 16 年中越地震における最大加速度と崩壊面積率の関係

3. 新たな斜面崩壊危険度評価手法の作成

2.までの検討に基づき、斜面崩壊危険度評価手法を作成した。作成した斜面崩壊危険度評価手法は以下のとおり行った。

- ・評価は 10m メッシュ単位で行う
- ・評価は、斜面勾配(I)、平均曲率(C)、最大加速度(a)により行う。
- ・評価式は、(4)式を基本とする。

$$\log(P) = \alpha I + f(a) + \beta C \dots(4)$$

ここに、 α 、 β ：係数、 $f(a)$ ：2.で求めた最大加速度と崩壊面積率の関数 m とする。なお、 α 、 β の比は既存の六甲山地の検討を元に、斜面勾配と平均曲率の係数の比より決定した。対象地震毎に決定した新たな危険度評価式を表-1 に示す。

表-1 新たな危険度評価式

対象地震動	評価式
平成28年熊本地震 (熊本式)	$\log(P) = 0.0503 I + f(a) - 5.97 C$ $f(a) = 0.0006a - 4.130$
平成16年中越地震 (中越式)	$\log(P) = 0.0325 I + f(a) - 3.86 C$ $f(a) = \begin{cases} 0.0022a - 4.644(a \leq 900) \\ -2.554(900 < a) \end{cases}$
平成20年岩手・宮城内陸地震 (岩手・宮城式)	$\log(P) = 0.0465 I + f(a) - 5.52 C$ $f(a) = 0.0065a - 10.189$

ここで、作成した3つの評価式のうち、データ数が最も多く、幅広い加速度帯をカバーするとともにバラツキの少なかった中越式を新たな地震時斜面崩壊危険度評価式として選定し、平成28年熊本地震に適用した結果が図-3 である。崩壊面積率 ($\log P$) と崩壊地のメッシュ数を分類した表-2 から崩壊面積率 ($\log P$) が-2.25 より大きい範囲では全体の70%を占めており崩壊しやすいと分類できる。一方で、崩壊面積率 ($\log P$) が-3 以下でも、15%あることからやや誤判定が多い結果となった。中越式を、平成16年中越地震及び平成20年岩手・宮城内陸地震に適用した場合においては、崩壊面積率 ($\log P$) が-2.25 より大きい範囲では、全体の90%以上を占め、崩壊面積率 ($\log P$) が-3 以下の範囲では、全体の1%未満となったことから、他の地域でも適用可能であるといえる。

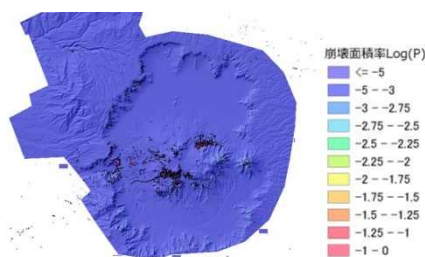


図-3 新たな斜面崩壊危険度評価手法を平成28年熊本地震適用した結果

表-2 崩壊地のメッシュ数と崩壊面積率

崩壊面積率 logP	崩壊 メッシュ数	崩壊面積率 logP	崩壊 メッシュ数	崩壊面積率 logP	崩壊 メッシュ数
-1.25以上	9821	-1.75~-2.00	3304	-2.50~-2.75	457
-1.25~-1.50	2195	-2.00~-2.25	6406	-2.75~-3.00	4620
-1.50~-1.75	4629	-2.25~-2.50	40	-3.00以下	5860
崩壊地のメッシュ数					37333

4. 斜面崩壊危険度評価手法を活用した事前対策、危機管理等への活用法の検討

3.で新たに作成した地震時斜面崩壊危険度評価手法を用いて、那智勝浦町、近畿地整大規模土砂災害対策技術センターと連携し、地震時土砂災害ハザードマップの作成や避難経路の選定等、地域防災への適用に向けて検討を開始した (図-4)。



図-4 那智勝浦町と大規模土砂災害対策技術センターとの打合せ

まず、那智勝浦町で想定される地震(東海・東南海・南海地震や南海トラフ巨大地震)や最大加速度を一定に与えた場合の、斜面崩壊危険度評価を実施し、避難所の上部にある崩壊メッシュを抽出し、崩壊土砂量と到達距離を推測し、集落・避難所・道路への影響を検証した (図-5)。

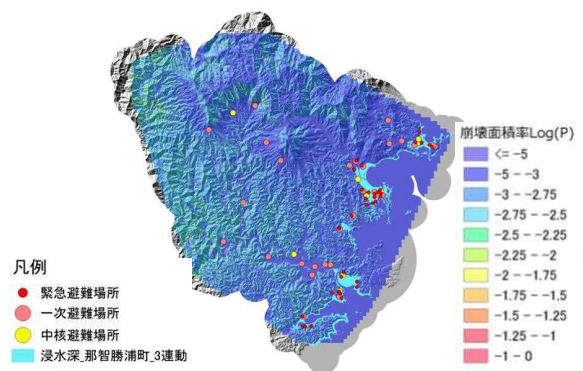


図-5 地震時斜面崩壊危険度評価結果と避難所の位置関係

5. おわりに

本研究では、大規模地震による斜面崩壊危険度評価のために、地震加速度が地盤へ与える影響に関する評価手法を見直し、崩壊面積率による評価が可能な地震時斜面崩壊危険度評価式を提案した。

今後は、大規模斜面崩壊発生危険度への適用検証を実施し、引き続き、近畿地整、地方自治体（和歌山県、那智勝浦町等）と共同で、手法の適用性、活用方法を検討するとともに、成果の普及に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室：地震による斜面危険度評価秀穂に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第 204 号、2004 年
- 2) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET、KiK-net）
(<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)
- 3) 松田昌之ら：強震域における地震の最大加速度が斜面崩壊発生危険度に及ぼす影響、平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集、A-288-289、2016 年

深層崩壊危険斜面における水文・水質特性に関する研究

和歌山県
国立研究開発法人土木研究所

西岡恒志・筒井和男・福田和寿
木下篤彦・森加代子・高原晃宙・水野秀明

1. はじめに

平成23年9月の台風12号により発生した紀伊半島大水害では、和歌山県田辺市熊野地区などで深層崩壊および、それに伴い発生した河道閉塞・土石流により甚大な被害となった。また、和歌山県では明治22年の右会津川流域や昭和28年の有田川流域などでも深層崩壊が発生している。深層崩壊の発生頻度は少ないものの、ひとたび発生すれば甚大な被害が生じることから、深層崩壊が発生する恐れのある斜面を事前に抽出しておくことは重要な課題である。

近年、深層崩壊発生跡地では多量の湧水が存在すること、これら湧水の電気伝導度(EC)が高いことが報告されている。さらに、深層崩壊発生地でECが高くなることを利用した深層崩壊危険箇所を予測する手法の1つとして湧水や渓流水のECに着目した手法が提案されている¹⁾³⁾。

一方、既往研究では深層崩壊跡地で任意の時期にECを計測した事例が多く、季節的にいつの時期が危険斜面抽出に適しているのか、降雨の影響の有無、人家や畑の影響、など実際に危険斜面を抽出する上での課題は多い。

そこで本研究ではまず、崩壊の危険性の高い箇所はいつもEC値が高くなるのかを検証するため、過去に大規模崩壊が多数発生した流域内でECを面的に調査した。次に、降雨時や降雨後、季節変化などの変動によるECの計測条件を検証するため、岩盤クリープ斜面から湧出する湧水と、湧水が流入する河川のECを継続的に調査し、湧水と河川のECの相対比較を行った。

最後に、人家や畑などECへの人為的影響を検証するため、それらに隣接した河川においてECの継続的な計測を行った。

調査場所として、面的な調査は過去に大規模な崩壊が多数発生した有田川上流流域で、岩盤クリープ斜面と人為的影響の継続調査は、岩盤クリープ斜面周辺に湧水と河川、さらに大規模な果樹園が存在する条件に合う右会津川流域でそれぞれ実施した。

2. 試験の概要

調査地を図-1に示す。有田川上流流域の旧花園村

(現かつらぎ町)の金剛寺地区や北寺地区などでは昭和28年に発生した深層崩壊とそれに伴い発生した河道閉塞および決壊により、死者111名・行方不明者85名となる甚大な被害が生じた⁴⁾。右会津川流域の上秋津村(現田辺市)では明治22年に発生した深層崩壊(長さ720m,幅540m)とそれに伴い発生した河道閉塞(高さ15m,湛水量19万m³程度)および決壊により甚大な被害が生じた⁵⁾。地質は有田川流域が日高川帯,右会津川流域が牟婁帯で、四万十帯と呼ばれる堆積岩地域(付加体)に分類され、深層崩壊の発生頻度が高い地質および地形とされている⁶⁾。

有田川上流流域内で実施した面的なECの計測の調査範囲を図-2に示す。調査範囲は、有田川本川とその4支川であり、流域面積は約20km²である。昭和28年に本川沿いに3箇所、支川の有中谷川流域内で3箇所の大規模崩壊が発生しているほか、多数の崩壊が発生している⁷⁾。

右会津川流域で実施した岩盤クリープ斜面から湧出する湧水と右会津川本川における継続的な調査範囲を図-3に示す。岩盤クリープ斜面は明治22年に深層崩壊が発生した崩壊跡地斜面に隣接して北側に2箇所(斜面Aと斜面B)存在している(図-4)。斜面Aからは豊富な湧水が湧出し、本川に流入している。斜面Bからの湧水は確認できないが斜面下部には果樹園(梅林および柑橘系)が広がっており、施肥時期や降雨時などには肥料成分を含む排水が本川に流入する可能性がある。



図-1 調査箇所位置図

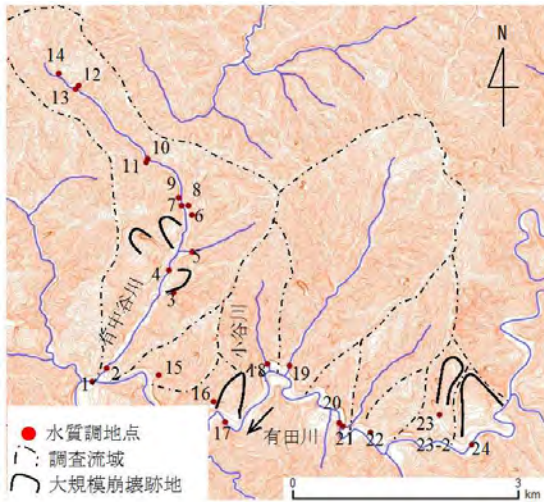


図-2 有田川上流流域水質調査箇所

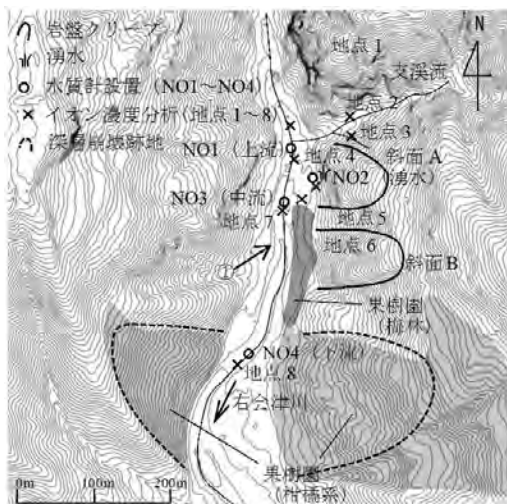


図-3 右会津川水質調査箇所



図-4 (上) 図-3 中①から見る岩盤クリープ斜面
(下) 岩盤クリープ斜面 A の下部から湧出する湧水

3. 試験手法

(1) EC 計測を面的に実施する調査手法

流域内で面的に EC を計測するため、有田川上流流域で次の手順で調査を行った。

- ① まず EC が比較的計測し易い有田川本川と支川との合流点に着目し、本川においては合流点の直上・下流で EC を計測、支川においては合流点直上流で EC の計測を行う。計測は複数回行う。支川の出口で EC を計測することで支川流域の EC が高い傾向にあるのか低い傾向にあるのかを確認し、EC の常に高い支川を選定する。
- ② 手順①で選定した EC が常に高い支川の詳細調査を行う。手順①と同様に支川とさらにその支溪流に着目して EC の計測を行う。支川の中で EC が高い支溪流が相対的に深層崩壊発生のおそれが最も高い流域と判断し、支溪流流域内の現地調査を実施する。

調査における留意事項として、河川などの EC は雨水 (EC は概ね 0mS/m) の影響を受けて変化することが考えられる。このため降雨時や降雨直後の調査は実施しないこととした。また、EC は水温が高くなると併せて増加する相関関係にあるため、同じ調査箇所であっても観測日が異なると観測条件が異なり EC に変化が生じる可能性があることから、1 回の調査は全て同一日に完了させることとした。また、EC は水中に溶存するイオンの総量であるため、人家や田畑等から流入する排水によっても EC が増減する可能性がある。

(2) EC 計測を継続的に実施する調査手法

継続的に岩盤クリープ斜面の湧水を計測するため、右会津川流域において EC 計測は次の手順で行った。

- ① 季節変化や降雨による影響を継続的に調べるため、データロガー付水質計を用いる。
- ② 水質計を斜面 A の湧水の湧出箇所 (図-3 中の NO2) に設置する。また、湧水が右会津川本川に流入することによる本川の影響を調査するため、本川の湧水合流部の上下流 (図-3 中の NO1, NO3) に水質計を設置する。
- ③ 本川に隣接する湧水が存在しない岩盤クリープ斜面及び果樹園が本川の水質に与える影響を調査するため、斜面 B と果樹園の上下流 (図-3 中の NO3, NO4) にそれぞれ水質計を設置する。
- ④ 岩盤クリープ斜面から湧出する湧水は、斜面深部の岩盤内を流動してくる過程で岩石からイオンを取り込んでいる。このため、電気伝導度に関連

性のあるイオン濃度分析(調査項目:Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, HCO₃⁻, 調査箇所: 図-3 中地点1~8)を行うことで岩盤クリープ斜面の湧水の水質の傾向を把握する。分析結果はヘキサダイアグラムにとりまとめる。

⑤ 調査時期は河川の EC の変化が少ない渇水期に実施(10月下旬~翌年2月上旬)する。

4. 崩壊斜面とその周辺において面的に EC 計測した水質調査結果

(1) EC の高い支川の抽出

有田川上流流域において平成26年8月から10月に同じ箇所です計3回の EC を計測し、常に EC が高い支川を5支川確認した(図-5)。このうち3支川(調査地点3, 18-2, 23)では昭和28年に大規模な崩壊が発生した下流および近辺であり、大規模崩壊跡地近辺では EC が高くなることが再確認された。この結果は地頭菌らりの研究と同様である。1箇所(調査地点20)の流域は小さく、過去に大規模崩壊は確認されていないが、上流に住居が多数存在している。残り1箇所(調査地点16)は小谷川という支川で、こちらも過去に大規模崩壊は確認されていないほか、上流に住居も存在していない。

これらの結果より、過去に大規模崩壊跡が確認されておらず、上流に住居や畑がなく人為的影響の可能性が少ないと考えられる小谷川において詳細調査を行うこととした。

(2) EC の高い支川における詳細調査

小谷川では昭和28年に大規模崩壊が確認されておらず、また住居や畑などが存在しないにもかかわらず EC が高いことから、支川内に確認されていない大規模崩壊跡地が存在するか、深層崩壊発生のおそれのある危険斜面が存在する可能性が考えられた。図-6に小谷川の詳細調査箇所を、図-7に詳細調査結果を示す。小谷川は有田川本川との合流点から上流に向かって EC が上昇していく。途中で分流する支溪流1の EC は低いが、支溪流2と支溪流3の EC は小谷川より高い値を示していた。また支溪流2と3が分流すると分流後の小谷川の EC は大きく低下した。このことから小谷川の流域の中では支溪流2と3が最も EC の高い流域であるといえる。支溪流3において現地調査を実施したところ、流域内では過去に発生したと思われる崩壊跡地や土石流堆積物、崖錐などを確認された(図-8)。

このことより、支溪流2と3は将来、再度の崩壊や土石流堆積物が流出すること可能性が考えられる

危険流域と判別することができる。

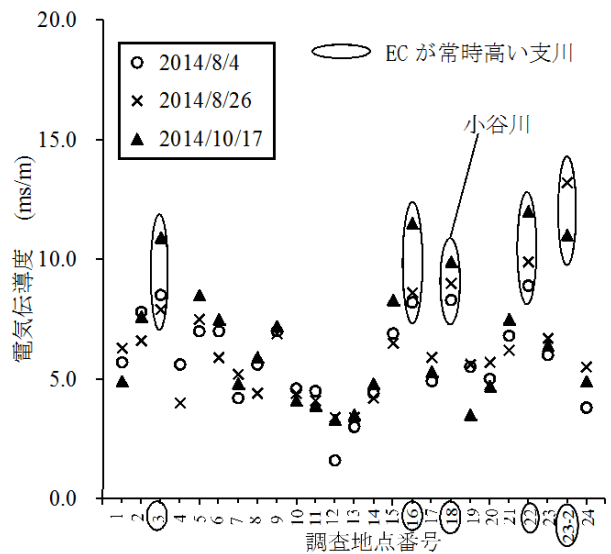


図-5 EC の高い支川抽出結果

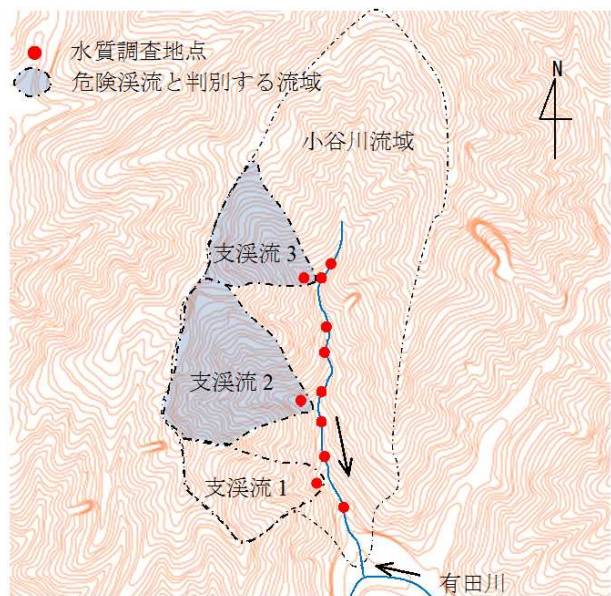


図-6 小谷川詳細調査箇所図

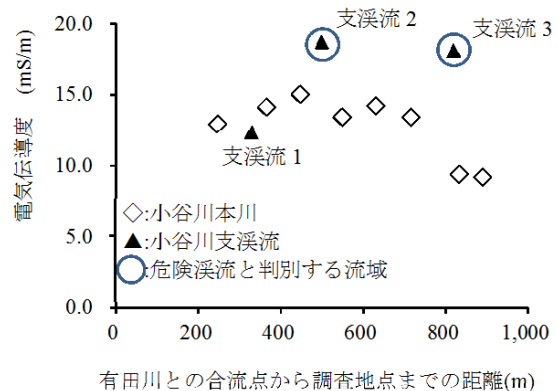


図-7 危険渓流の抽出結果



図-8 支溪流3に存在する崩壊跡地形

5. 岩盤クリープ斜面とその周辺において継

続的に EC 計測した水質調査結果

(1) 湧水・右会津川本川の雨量と EC の関係

平成 27 年 10 月から平成 28 年 2 月まで観測した結果を図-9, 10 に示す。岩盤クリープ斜面(斜面 A)から湧出する湧水 (NO2) の EC は、本川 (NO1,NO3,NO4) の約 2 倍と高い値を示している。降雨時には湧水、本川の EC はともに大きく低下した後、降雨前の値まで回復する。降雨の EC は概ね 0mS/m であることから、EC の低下は降雨の影響を受けたと判断できる。降雨時以外の湧水の EC は概ね一定の値であるが、本川はややバラつきがある。また、観測期間中の最大降雨 (11 月 14 日、最大時間雨量 37.0mm、累計雨量 128.5mm) 時において EC が低下した後は降雨前の値まで回復していないことが確認できる。

本川の中流 (NO3) と下流 (NO4) の EC に着目すると、上流 (NO1) の値より常時 0.5mS/m 程度高いことが確認できる。EC は水中の溶存イオンの総量と対応することから、EC の高い湧水が本川に流入したことにより湧水合流後の本川の EC が高くなったと考えられる。なお、降雨時 (12 月 11 日、累計雨量 50.5mm) には NO1 と NO3・4 の EC の差は最小で 0.2mS/m まで縮まるが、その後約 3 日でその差の 0.5mS/m まで戻る。これは本川の流量が降雨で増加したことが原因と考えられるが、降雨時でもその差を確認することはできる。また、本川の NO3 と NO4 の EC は概ね一致しているが、時期によって NO4 (下流) の EC が高くなったり低くなったりと変動している。途中で EC の高い湧水や地下水の流入があれば斜面 A と同様に常時の差が確認できると考えられるため、この変動は斜面 B からの湧水や地下水の流入によるものではなく、隣接する

梅林からの排水や地下水の流入により変動した可能性が考えられる。

図-9, 10 より本川の EC の縦断変化は、上流より $NO1 < NO3 \approx NO4$ であり、岩盤クリープから湧出する湧水の流入を捉えたものといえる。この結果より、河川の EC の縦断変化を捉えることはその箇所に EC の高い湧水や地下水などが流入している可能性があることを示唆している。また、複数ある岩盤クリープ斜面の中で相対的に崩壊危険度の高い斜面を判定できる可能性がある。

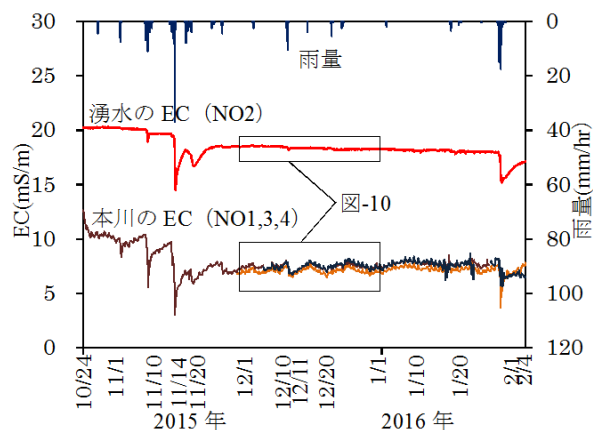


図-9 降雨と本川・湧水の EC との関係

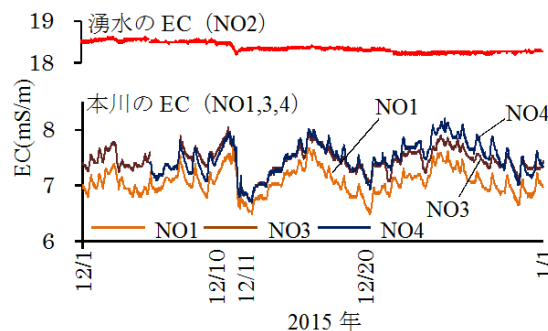


図-10 図-9 中の 内の拡大

(2) 湧水・右会津川本川の雨量と水温の関係

水温の変化を図-11 に示す。湧水の水温は約 17°C と概ね一定であるが、本川の水温は気温と連動していることが確認できる。なお、本川の上流 (NO1) と中流 (NO3) の水温に差はない。なお、湧水の水温が常に一定であることを考えると、湧水と本川の水温に差が生じている季節に調査をすることで危険斜面を抽出できる可能性がある。

(3) 湧水・本川のイオン濃度分析結果

平成 27 年 10 月 24 日と平成 28 年 1 月 27 日にそれぞれ採水を行い、イオン濃度分析を実施してヘキサダイアグラムを作成した (図-12)。本川と渓流水

の形状は（地点 1,2,3,4,7,8）は概ね同じであるが、湧水（地点 5,6）では特定のイオン濃度（ Ca^{2+} , HCO_3^- ）が高くなっていることが確認できる。これらの結果は、深層崩壊発生場付近では湧水や渓流水に溶存している特定のイオン濃度（ Ca^{2+} , HCO_3^- ）が高くなるという高橋ら⁸⁾や木下ら⁹⁾による報告と一致している。また、イオン濃度を計測することは岩石崩壊を予知する上で有効な手段であるという北野ら¹⁰⁾の報告とも一致している。このことから、崩壊発生前の岩盤クリープ斜面において湧出する湧水のイオン濃度を分析することは、深層崩壊発生危険箇所を抽出するための手法の一つとして活用できる可能性がある。

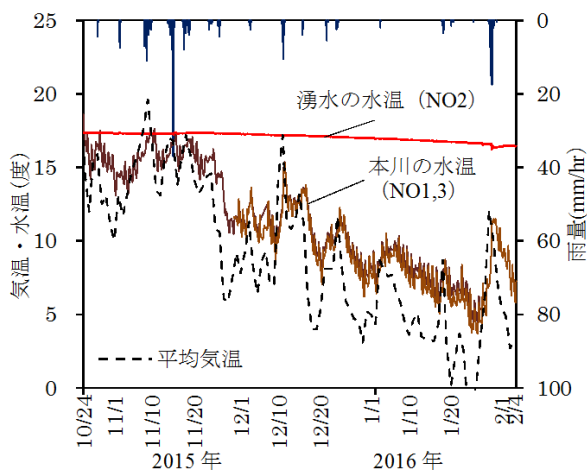


図-11 降雨・気温と本川・湧水の水温との関係

6. おわりに

本研究では、過去に大規模崩壊が発生した流域内を面的に EC の調査を実施することで、崩壊の危険性のある箇所では EC が高くなるのかどうか、および降雨や季節変化に伴う湧水と河川の EC の相対変化を継続的に調査することで深層崩壊危険箇所抽出に必要な計測条件について研究を行った。

得られた結論は以下の通りである。

- 流域内を面的に調査した結果から、EC が常に高い箇所や支川の流域内には大規模崩壊跡地が存在する可能性がある。
 - 岩盤クリープから湧出する EC の高い湧水は、流入する本川の EC に影響を与え、湧水が流入する本川の上下流では EC に差が生じる。また、その差は降雨時には小さくなる。
 - 湧水の水温は一定であり、計測時期によっては EC と同様に本川の水温に影響を与える可能性がある。
 - 調査地の岩盤クリープ斜面から湧出する湧水は、特定のイオン濃度（ Ca^{2+} , HCO_3^- ）が高い。
- 今回得られた結果より、河川の EC を計測することで深層崩壊危険斜面を抽出できる可能性が示された。

今後の課題として、EC と本川・湧水の流量との関係や EC と岩盤クリープ斜面の崩壊危険度の関係などがあるため、引き続き観測を続けていきたい。

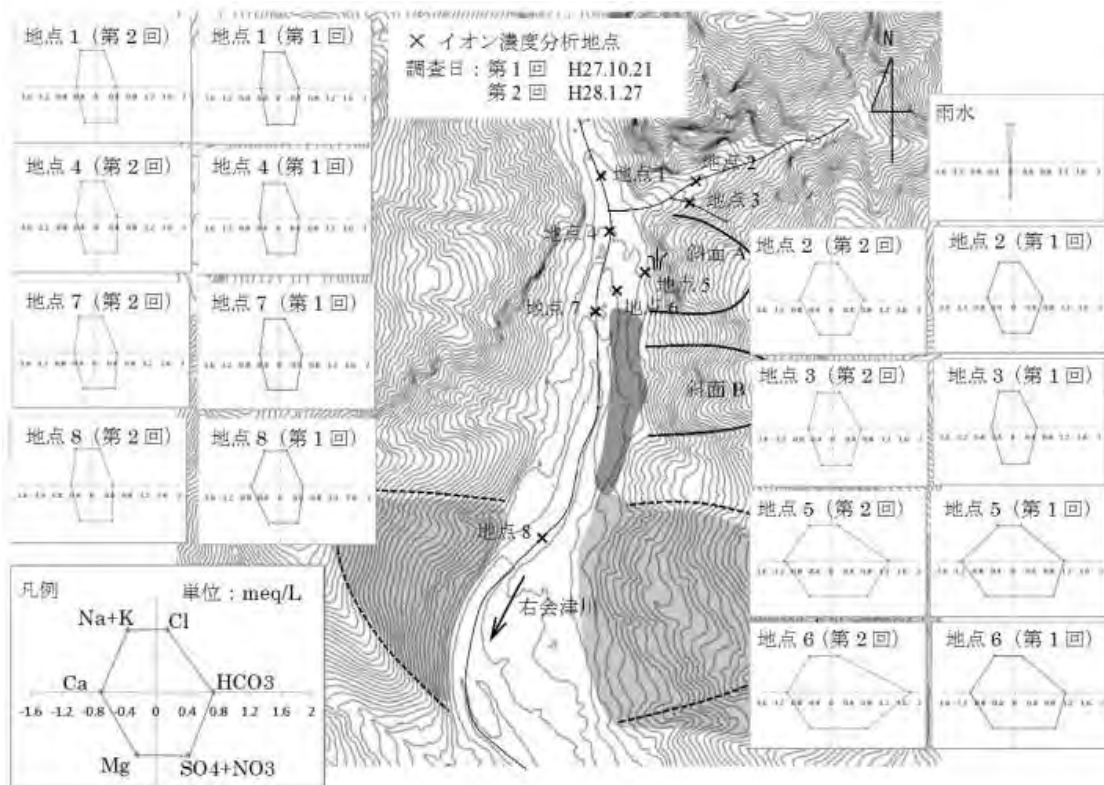


図-12 湧水・本川のイオン濃度分析結果（ヘキサダイアグラム）

参考文献

- 1) 地頭菌隆・下川悦朗・寺本行芳：深層崩壊発生場予測法の提案 - 鹿児島県出水市矢筈岳を例にして -, 砂防学会誌, Vol.59, NO.2, pp.5-12, 2006
- 2) 地頭菌隆・下川悦朗・寺本行芳・和田大祐・田淵陽介：深層崩壊発生予測に関する調査法の提案, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, 2012
- 3) 田淵陽介・地頭菌隆・和田大祐・中島希：深層崩壊発生予測に関する調査法の開発, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, 2013
- 4) 和歌山県花園村：水害記録誌よみがえった郷土-昭和 28 年大水害をふりかえって-, p.51, 1982
- 5) 森俊勇・坂口哲夫・井上公夫：日本の天然ダムとその対応策, 古今書院, pp.89-92, 2011
- 6) 独立行政法人土木研究所：深層崩壊推定頻度マップ
- 7) 和歌山県土木部砂防課：7・18 水害写真集（主として有田川上流域） pp.34-35, 1992
- 8) 高橋真哉・恩田裕一・馬場茂彰・田中健太・内田太郎・地頭菌隆・浅野友子・戸田博康：宮崎県鰐塚山における深層崩壊発生場と渓流水の水質の関係, 平成 22 年度砂防学会概要集, 2010
- 9) 木下篤彦・北川真一・大山誠・小杉賢一朗・内田太郎・小川内良人・横山修：平成 23 年台風 12 号で深層崩壊が発生した赤谷地区斜面の水文特性に関する研究, 平成 25 年度砂防学会概要集, 2013
- 10) 北野康・加藤喜久雄・金森悟・金森暢子・吉岡龍馬：水質調査による岩石崩壊の予知の可能性, 京大防災研究年報第 10 号 A, pp.577-587, 1967

2.3 和歌山県 テーマ2

平成 23 年台風 12 号の那智川流域の水文・水質特性と崩壊メカニズムに関する研究

和歌山県
国立研究開発法人土木研究所
国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所

千東圭雄・西岡恒志・筒井和男・福田和寿
木下篤彦
今森直樹

1. はじめに

那智川流域では、平成 23 年 8 月 30 日から 9 月 4 日にかけて降り続いた台風 12 号に伴う記録的な降雨で大規模な表層崩壊及びそれに伴う土石流が発生し、大きな被害が発生している¹⁾。降り始めからの連続雨量 821mm で、9 月 4 日には最大時間雨量 123mm (県：市野々観測局) が記録され、斜面崩壊はこの時間帯に発生したと考えられている。

那智川流域の崩壊は、短時間の急激な雨量の増加と関係性が高いこと木下ら²⁾、北ら³⁾によって報告されている。

本研究では、崩壊の要因とされる雨量と地下水や渓流水の水文・水質特性の整理を行うことで崩壊メカニズム解明の検討を行った。

2. 流域の概要と崩壊発生状況

流域の概要図を図-1 に示す。那智川流域の地質的特徴は熊野層群 (砂岩泥岩互層) の上に貫入岩である熊野酸性岩 (花崗斑岩) が覆う 2 層構造で、地層境界付近には湧水が多く見られる⁴⁾。

平成 23 年に発生した崩壊の殆どが熊野酸性岩の分布する溪流で発生しており、地質境界から一定の高さに揃う傾向にある。

平成 23 年以前に発生した崩壊地も熊野酸性岩の地区に判読でき、溪床部には古期土石流堆積物が分布していることから、繰り返し崩壊が発生していたと考えられる。

3. 地層境界に着目した水質調査

崩壊発生の原因の一つと考えられる地層境界付近の水文・水質特性を調査するため、崩壊発生地及びその周辺の溪流において次の調査を実施した。

(1) ボーリング観測孔における地下水位観測

金山谷川の崩壊地及びその周辺に設置した観測孔の水位変化から地表付近の地下水 (浅層地下水) と地層境界付近の地下水 (深層地下水) の存在が示唆されたため、浅層観測孔と深層観測孔の 2 孔で地下水位変動を調査した。

(2) 崩壊地・溪流における水質調査

崩壊地及び各溪流においてイオン濃度分析 (調査項目: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^-) を実施してヘキサダイアグラムを作成し、地層境界付近における水質の変化を調査した。



図-1 那智川流域の概要

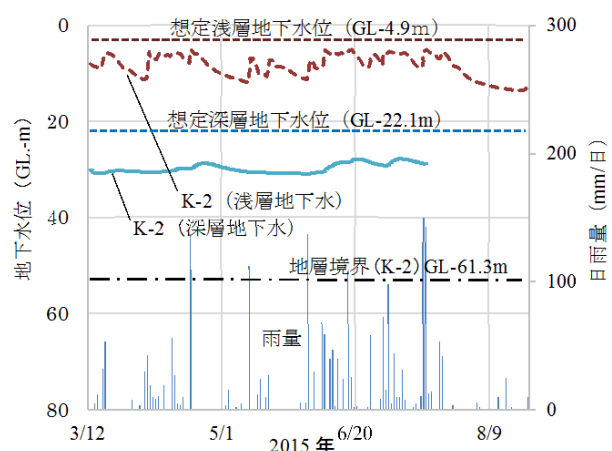


図-2 地下水位観測結果と観測結果から想定する平成 23 年台風 12 号時の地下水位

4. 地下水位観測結果から想定する崩壊メカニズム

那智川流域で最も大きな崩壊が発生した金山谷川の地下水位の観測結果と想定する平成 23 年台風 12 号の地下水位を図-2 に示す。なお、想定地下水位は観測結果から得られた雨量と地下水位の関係式から算定している。地表面付近には浅層地下水と地層境界付近の深層地下水の 2 種類の地下水の存在が確認された。浅層地下水は降雨後 1 日程度で水位が上昇するなど降雨の影響が大きい。深層地下水は降雨後の上昇幅は少なく、また上昇に要する時間も長い傾向にある。地下水位上昇と雨量の関係から崩壊時の浅層地下水は崩壊発生面付近にあり、深層地下水は地表部から湧出していたと考えられる (図-3)。

これらより金山谷川の崩壊は長時間の降雨で浅層・深層地下水が上昇及び、浅層・深層地下水が地表付近で合流して湧水量が増加しているところに時間雨量 100mm を越える猛烈な雨が降り、崩壊した可能性が考えられる。

5. 水質調査結果

イオン濃度分析結果 (図-4) より熊野酸性岩からの湧水は Na^+ , K^+ , HCO_3^- の溶存イオンが多い傾向にあり、風化が深部まで発達していることを反映していると考えられる。

熊野層群は相対的に溶存イオンが少ない傾向にあり、透水性が悪い特徴を示していると考えられる。

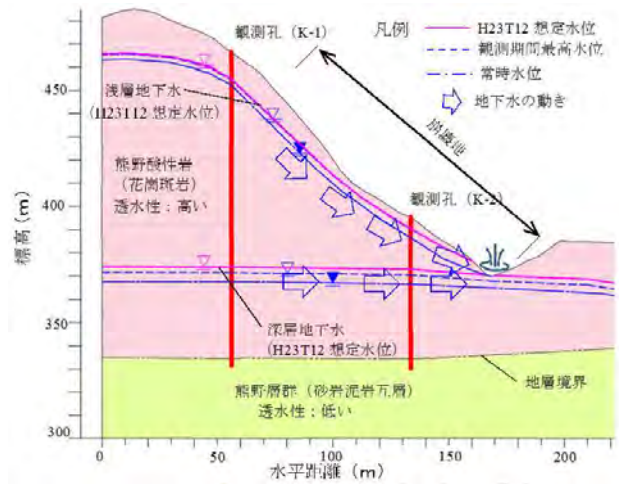


図-3 図-1 中 AB 区間での地下水の動きの模式図

6. おわりに

那智川流域の崩壊箇所には表層付近の浅層地下水と地層境界付近の深層地下水が存在し、浅層・深層地下水の上昇により崩壊した可能性が示された。

今後は、地下水の広域分布の把握が可能な空中電磁探査結果との関係を明らかにし、那智川流域で崩壊発生のおそれのある箇所について検討していきたい。

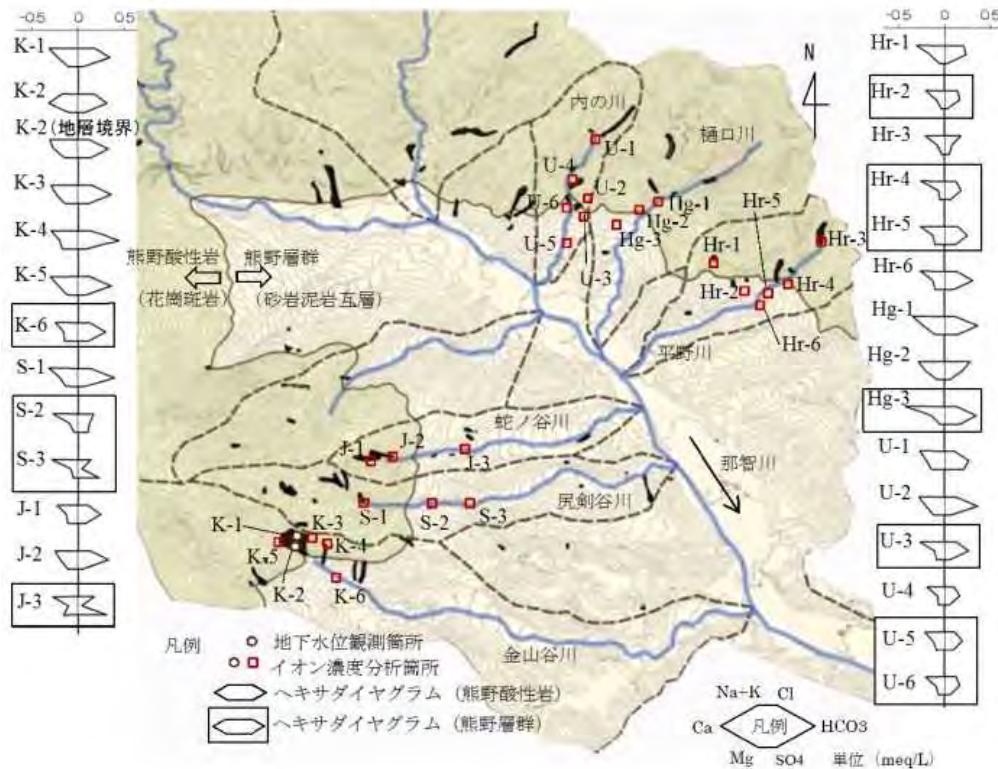


図-4 那智川流域のイオン濃度分析結果

参考文献

- 1)松村ら:2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害,砂防学会誌,Vol.64,No.5,p.43-53,2012.
- 2)木下ら:過去の表層崩壊の崩壊特性と降雨分布との比較,平成27年度砂防学会概要集,2015
- 3)北ら:那智川流域での平成23年台風12号時の崩壊特性と水文特性,平成27年度砂防学会概要集,2015
- 4)木下ら:平成23年台風12号で崩壊した金山谷川・鳴子谷川における斜面崩壊発生機構について,平成25年度砂防学会概要集,2013

ヒアリング調査を基にした平成23年那智川災害の避難行動に関する研究

和歌山県
 国立研究開発法人土木研究所
 国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所

北勝也・筒井和男・福田和寿
 木下篤彦
 今森直樹・奥山悠木

1. はじめに

近年、各地で予測困難な集中豪雨による土砂災害が原因となり、人的被害が多く発生している。土砂災害による被害の特徴として屋内での被災が多いと指摘されている¹⁾。以前より、土砂災害時に避難しない理由として、累積的に進む現象に対し心理的な慣れが生じるとされる²⁾。災害調査においても、そのような報告事例³⁾⁶⁾や、心理学的プロセスによる避難行動について調べた事例⁷⁾は多い。

土砂災害による被害軽減のためには、早期の避難が有効であり、分かりやすい土砂災害情報やリアルタイムな情報提供に向けた取り組み⁸⁾⁹⁾や、警戒避難情報の充実化¹⁰⁾が進められている。一方で、最近になり、中山間地域での土砂災害時の住民避難率の分析が整理され始めたところであり¹¹⁾、避難状況等詳細な検証は進められていない。行政機関が提供する情報が充実化しただけで受け手に正確に伝わらなければ、効果が期待できない。受け手の状況を踏まえた情報伝達について調べた事例は少ない。本研究の目的は、土砂災害における警戒避難情報に関して、どのような情報が避難行動に影響を与えるかを明らかにすることである。

本研究では、まず、土砂災害により多数の人的被害が発生した平成23年那智川災害の被災地域で、住民や自治体関係者にヒアリングを実施し、行政からの情報提供について検証した。次に、情報の受け手の属性の違いによる警戒避難情報の確認状況や入手手段の検討を行った。最後に、土砂災害の危険性は、地震や津波などによる災害と異なり、空間的に均質に存在しないことから、住民意識や避難行動の空間的な違いに着目し、分析を行った。このような情報の受け手の属性や意識の空間的な偏在性を考慮することは、効果的な避難計画の立案にも重要である。以上から土砂災害による被害軽減のための情報提供について提案する。

2. 調査地と調査方法

(1) 調査地の概要

紀伊半島にある那智川流域では、平成23年8月30日から9月4日にかけて台風12号による記録的

な豪雨により、大規模な表層崩壊とそれに伴う土石流や、支川からの土石流の流入による河川氾濫により多くの人的被害が発生した(死者28人、行方不明者1人)。那智川流域の位置を図-1に示す。特に、9月4日の未明には、和歌山県が設置する市野々観測所において最大時間雨量123mm、0時から4時に341mmを観測した。時間雨量および積算雨量の時系列を図-2に示す。

なお、当該地には9月1日13時50分に大雨注意報、9月2日4時15分に大雨・洪水警報、9月2日の21時55分に土砂災害警戒情報が発表されている。

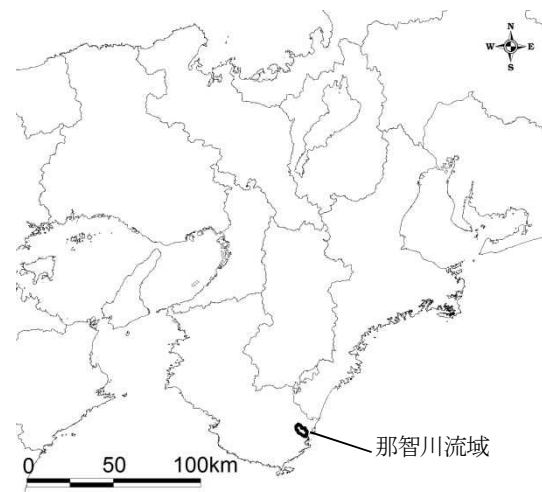


図-1 那智川流域の位置図
 「統計GIS」(総務省)をもとに作成

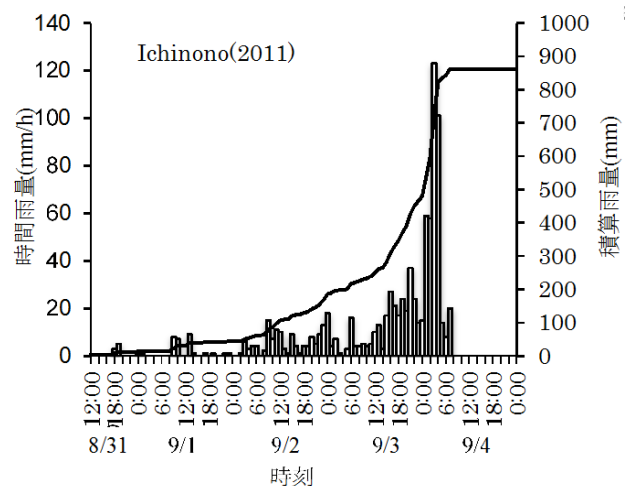


図-2 災害時の時間雨量と積算雨量

(2) 調査方法の概要

行政による警戒避難情報の提供状況の検証および、土砂災害発生時の状況把握のため、那智勝浦町役場防災担当者、消防関係者、地区区長にもヒアリングを実施した。

表-1にその概要を示す。併せて、土石流により被害の発生した市野々地区および隣接する其他地区の一部において、住民ヒアリング調査を実施した。表-2にその概要を示す。ヒアリングが実施できた家屋、土砂災害危険区域および人的被害の発生した区域を図-3に示す。なお、災害発生当時は、土砂災害防止法による土砂災害警戒区域等の指定はなく、土砂災害危険区域が公表されていた。主な質問項目は、年齢・性別・居住歴の属性情報、土砂移動現象・警戒避難情報の確認の有無、情報収集方法、避難の有無とその理由、近隣住民間の情報伝達や助け合い状況、避難ルートの設定や家族の話し合い等の日頃の備え等である。

また、平成27年に市野々地区で開催された「自然災害から命を守る！ワークショップ」(内閣府主催)や、和歌山県土砂災害啓発センターにおいて、地域住民からヒアリング(以下、追加ヒアリングとする)を行っており、これらで得られた意見も含めて考察を行う。



図-3 住民ヒアリング調査対象家屋

表-1 土砂災害状況調査概要

調査対象	那智勝浦町役場防災担当者 消防団長, 自治会長
調査機関	平成24年3月9,21日
調査方法	個別訪問し用紙に沿った聞き取り

表-2 住民ヒアリング調査概要

調査対象地域	市野々地区 井関地区(一部), 那智地区(一部)
調査機関	平成24年3月10~11日
調査方法	個別訪問し用紙に沿った聞き取り 不在の場合、郵送回収
訪問戸数	288戸
回答数	220票(聞き取り210票, 郵送回収10票)

3. 土砂災害状況調査

防災担当者等のヒアリングにより取りまとめた、多数の土砂災害が発生した9月3日から9月4日の事象の時系列を表-3に示す。

住民ヒアリング調査を実施した市野々地区において、避難勧告・避難指示は発令されていないものの、9月3日の22時30分には市野々小学校を避難所として開設している。市野々小学校の1階には土砂や流木が流れ込んだが、事前に2階以上に移動していたため、大きな被害は免れた。最も大規模な土石流が発生した金山谷川では、土石流発生時刻が9月4日3時頃と判明した。那智勝浦町役場からは、大雨・洪水警報の発表や、那智川における水位状況等の情報提供が防災行政無線により行われていた。また、消防団や地元地区による警戒や避難誘導の呼びかけが行われていた。

表-3 平成23年9月3日~4日の時系列

日時	事象
9/2 4:15	大雨・洪水警報発表
9/3 16:10	那智川下流の川関観測所の水位が3.14m(氾濫注意水位 2.60m)
9/3 16:15	那智川氾濫注意情報の防災行政無線放送
9/3 20:30	井関保育所避難所開設
9/3 22:00頃	那智川本川水位上昇, 転石が流れる音
9/3 22:30	市野々小学校避難所開設
9/4 1:00頃	那智川本川での堤防決壊により浸水が発生 井関保育所避難者が市野々小学校に移動 消防団員による避難の呼びかけや誘導
9/4 2:30	支川(金山谷川を除く)で土石流発生 市野々小学校の1階が浸水
9/4 3:05	金山谷川で土石流発生 20分程土石流の流れる音が聞こえる

4. 住民ヒアリング調査

調査対象 288 戸に対し、220 戸でヒアリングを行った。

まず、住民ヒアリング調査の信頼性を評価する。有限集団における必要標本数は、一般的に、式(1)で評価される。

$$n \geq \frac{N}{\left(\frac{e}{p}\right)^2 \frac{N-1}{p(1-p)} + 1} \dots (1)$$

ここで n：必要標本数、N：母集団の大きさ、e：最大誤差、z：信頼率に対する正規分布数、p：予想される母集団の比率。

これに母集団の大きさを 288、また最も安全側となる母集団の比率を 0.5 として式(1)に代入すると必要標本数は 164.85 となる。したがって、ヒアリング調査数 220 は信頼性が得られたと判断できる。

住民ヒアリング調査結果の概要を表-4 に示す。対象地には、災害発生の 2 日前に大雨・洪水警報、土砂災害警戒情報が発表されていた。それぞれの認知度は、48.2%および 8.6%に止まった。避難行動については、66.4%が避難を試みたが、そのうち半数は実際に避難できなかった。逃げ遅れが多く発生したことを示している。一方、24.1%の人が避難しなかったが、その理由として、「自宅の方が安全」や「危険を感じなかった」と答える意見が多数を占めた。

(1) クロス集計による分析

属性別のクロス集計の結果を以下に示す。

大雨・洪水警報の認識について、男性は 61.6%が「知っていた」と答え、一方、女性では 37.2%であった(図-4)。これはχ²乗検定により、有意な差が確認できた(有意水準 5%)。

また、情報収集の手段(複数回答)について、「目視」による情報収集を答えた人が、どちらも最も多かったが、男性は 69.4%、女性は 47.9%となり、男性は、直接状況を確認する傾向があることが分かった。一方で、「何もしなかった」という回答が、男性の 9.7%に対し、女性は 20.5%と高かった(図-5)。

地区内での情報収集源について、回答のあった 67 人(男性 27 人・女性 40 人)の結果を図-6 に示す。男性では「隣人」の割合が 66.7%と高い傾向にあった。しかし、避難した人の判断理由を整理すると女性に「近所の人から危ないと電話があった」、「周りの家と相談した結果」、「娘が呼びに来たから」、「消防団の指示」等の直接のコミュニケーションを挙げる回答が多かった。男性は浸水状況から自ら判断していることを示す回答が多かった。

近年、女性は周囲との協調性が高く、男性は論理性があるといった性別による思考パターンの違いが明らかとなっており、これを踏まえた行動様式への配慮が必要とされている^{12)・13)}。土砂災害に関する情報伝達においても、行政機関はこの点に配慮した情報伝達が必要である。

表-4 住民ヒアリング調査結果の概要

項目		件数	比率	
属性	性別	男性	99	45.0%
		女性	121	55.0%
	年齢	60 代未満	87	39.5%
		60 代以上	133	60.5%
	居住年数	10 年以下	61	27.7%
		11 年以上	159	72.3%
土砂移動	認識	確認した	184	83.6%
		確認していない	19	8.6%
		不在その他	17	9.8%
警戒避難	大雨・洪水警報	知っていた	106	48.2%
		知らない、その他	104	51.8%
	土砂警戒情報	知っていた	19	8.6%
		知らない、その他	201	91.4%
避難行動	避難した	80	36.4%	
	避難しようとしたができなかった	66	30.0%	
	避難しようとしなかった	53	24.1%	
避難先 ※有効回答中	避難所	4	5.0%	
	家族・知人宅	29	36.3%	
	自宅の 2 階	21	26.3%	
日頃の備え	災害履歴の把握	土砂災害	27	12.3%
		洪水	69	31.3%

また、洪水避難時における世帯の行動特性として、世帯員で役割分担があると指摘されている¹⁴⁾が、クロス集計による結果から、避難行動において性別による行動パターンが異なる傾向が示唆されている。追加ヒアリングでは、男性が屋外等で情報収集し、女性が避難準備を進めていたとの意見もあった。

以上から、女性に対しては、近隣地区において率先避難者を設定し、直接的な呼びかけや地区外に住む家族からの直接の情報伝達、男性に対しては切迫性の伝わる情報提供が早期の避難に有効と考えられる。

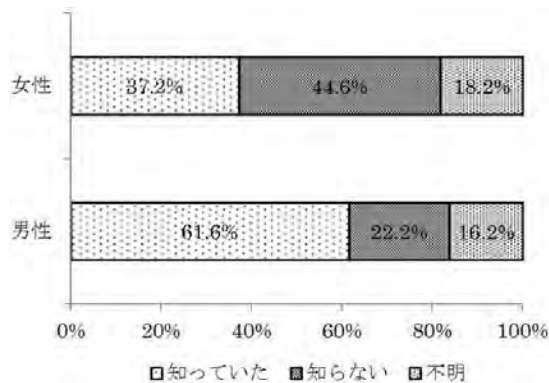


図-4 性別による大雨洪水警報の認識

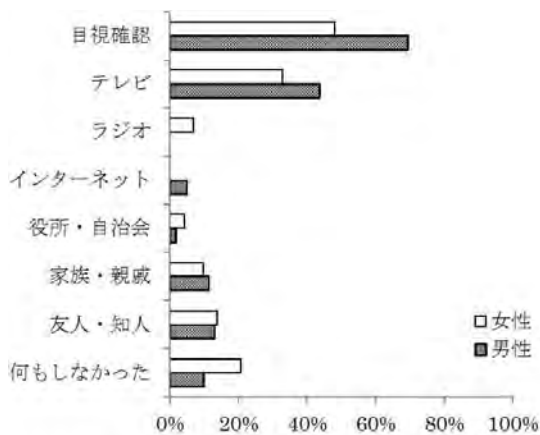


図-5 性別による情報収集の手段（複数回答）

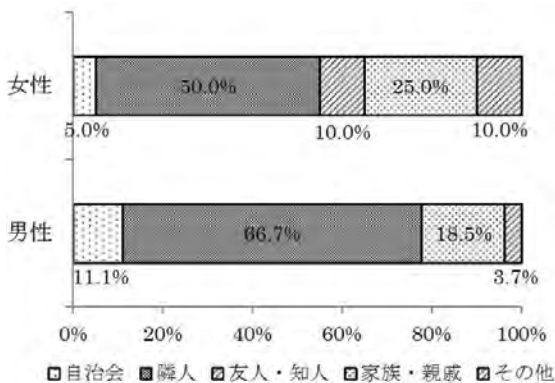


図-6 性別による地区内での情報収集先

(2) 空間分布の分析

土砂災害の危険性の偏在を踏まえ、住民の意識や災害発生時の避難行動に関して平面的な空間分布について分析する。

まず、住民の居住年数は、11年以上の人が72.3%を占めることが判明している（表-4）が、空間分布を図-7に示す。新規に宅地開発された区域には居住年数が少ない人が集中している。これにより、地域での土砂災害への知識に偏在が生じ、避難行動に影響がある可能性がある。ただ、この宅地開発区域に近年引っ越した住民に対する追加ヒアリングでは、入居にあたり、土砂災害危険箇所の情報収集を町役場にて行ったとの回答があった。生まれ育った場所で長く生活している人に比べて、新規で居住している人の方が、行政が提供する地域の防災に関する情報への関心が高い可能性がある。



図-7 居住年数の分布

次に、「土のにおい」や「木が倒れるような大きな音」、「石のぶつかり合う音」等の前兆現象を確認したとの意見があった。前兆現象の確認状況を図-8に示す。土石流が発生した鳴子谷川の下流部で「土のにおい」を確認した回答が多かった。また、これらの現象は、土石流が発生した直前の9月4日の1時から2時にかけて確認されていた。土石流発生直前の現象のため、追加ヒアリングにおいて、これらによる早期避難は確認できなかった。

避難行動について、平面分布を図-9に示す。上に示したとおり、全体の30.0%の人が「避難したかったが避難できなかった」と回答したが、一部区域に集中していることが分かる（図-9中aの区域）。この区域は、災害当時に公表されていた土砂災害危険区域（急傾斜地）にあたり、土砂災害が想定されていた区域で、逃げ遅れが発生していた。その理由として「避難できる状況でも川に近い小学校には行かない」、「道路が冠水して移動できなかった」と答え

ている。土砂災害危険区域の公表が避難行動に有効に働いていなかった。



図-8 前兆現象の確認状況の分布



図-9 避難行動の分布

また、ヒアリングで確認できた避難行動の開始時刻の分布を図-10に示す。土砂災害が発生した9月4日の未明に集中しており、危険が切迫した状況で避難を開始したことが分かる。

避難途中に被災した人もあり、避難所への移動についても早期の避難でなければ危険をとまなう。ただ、少数ながら、9月3日以前の早期に避難している人もあり、河川に隣接もしくは谷部に住んでいる人であった。追加ヒアリングでは、早期避難の理由として「地区外の家族からの早期避難が求めに応じた」、「以前から台風接近が予想される際は避難していた」との意見があった。

那智川災害後の対策として、「地区が提携する宿泊施設」が住民の早期避難を誘導していることも分かった。安全かつ安心できる環境があれば、早期に避難が行われる。地区外に安価に泊まれる宿泊施設との提携が有効であることを示している。

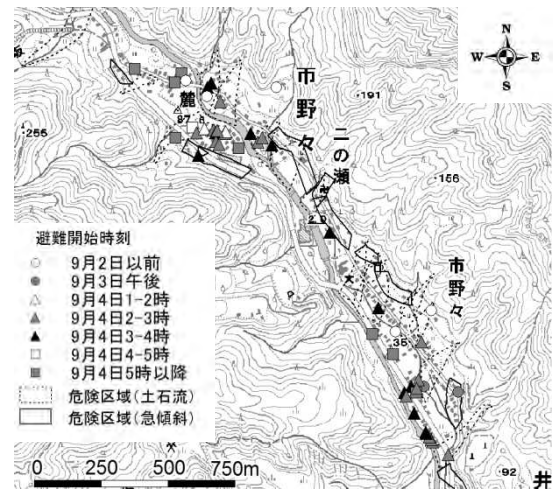


図-10 避難開始時刻の分布

5. おわりに

本研究では、平成23年に土砂災害により、多数の人的被害が発生した那智川流域におけるヒアリング調査を実施した。警戒避難に関する情報提供について整理した。また、住民の属性や防災意識の空間分布に着目し、性別による情報収集手法及び前兆現象の確認、避難行動の有無、避難開始時刻の空間分布の特徴を分析した。次の点が明らかとなった。

- 1) 性別により、警戒避難情報の認識に差があることが分かった。また情報収集においても、手法や地域内でのコミュニケーションにおいても、男女間で異なる傾向があった。行政機関はこの点に配慮した情報伝達を行う必要がある。
- 2) 住民の避難行動には、空間的な偏在性があり、一部区域に「逃げ遅れ」が集中していたことが分かった。その理由は、油断による警戒意識の欠如と避難所の方が危険と考えたことであった。
- 3) 住民への追加ヒアリングの結果、台風が来る前での地区外の安全な避難場所の提供が早期避難に有効であることが分かった。

今後の課題として、切迫性の伝わる情報提供等、有効な情報提供の検討を進めたい。

謝辞：ヒアリング調査に那智勝浦町の住民の方々、那智勝浦町役場、消防団、自治会長にご協力をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 牛山素行・横幕早季：発生場所別に見た近年の豪雨災害による犠牲者の特徴，災害情報，No.11，pp.81-89，2013.
- 2) 廣井脩：土砂災害と避難行動，砂防学会誌，Vol.51，No.5，pp.64-71，1999.
- 3) 近藤観慈・金田明香里・林拙郎：山間地域における豪

- 雨災害時の住民避難—2004年9月台風21号三重県宮川村災害の事例—, 砂防学会誌, Vol.59, No.4, pp.32-42, 2006.
- 4) 菊井稔宏・佐野寿聰: 土砂災害における住民等の意識と警戒避難対応について, 砂防学会誌, Vol.60, No.6, pp.48-51, 2008.
 - 5) 安永文香・林博徳・大槻順朗・佐藤辰郎・立道大伸・島谷幸宏: 2010年10月奄美大島豪雨時の氾濫特性と住民行動, 河川技術論文集, 第18巻, pp.511-516, 2012.
 - 6) 宮瀬将之・菊井稔宏: 土砂災害における避難要因について, 砂防学会誌, Vol.62, No.3, pp.55-61, 2009.
 - 7) 木下猛・青柳泰夫・伊藤孝司・平川了治・伊藤誠記・安仁屋勉・山本晶: 風水害における避難行動に関する心理学的プロセスについての一考察, 砂防学会誌, Vol.63, No.4, pp.4-15, 2010.
 - 8) 山越隆雄・栗原淳一・田村圭司・麿島直樹・大谷忠夫・臼杵伸浩・佐口治: 分かりやすい土砂災害情報に関する社会実験について, 砂防学会誌, Vol.60, No.6, pp.20-27, 2008.
 - 9) 木下篤彦・神野忠広・岡本敦・一言正之・小野寺勝・桜庭雅明・杉山実: 六甲山系におけるリアルタイムハザードマップシステムの構築, 砂防学会誌, Vol.66, No.1, pp.15-22, 2013.
 - 10) 富田陽子・秋山怜子・岡本敦: 「土砂災害警戒情報」及び「土砂災害警戒情報を補足する情報」の運用実態, 砂防学会誌, Vol.66, No.1, pp.53-57, 2013.
 - 11) 水野正樹・富田陽子・桂真也・小山内信智・花田良太・安田武道: 災害情報を用いた土砂災害時の住民の避難率の分析, 砂防学会誌, Vol.65, No.3, pp.29-34, 2012.
 - 12) 三田雅敏・伊藤知佳・指宿明星: 男女の思考パターンに違いはあるか? 男脳・女脳の分析, 東京学芸大学紀要, 自然科学系 59, pp.37-41, 2007.
 - 13) Hedges, L.V., and Nowell, A.: Sex differences in mental test scores, variability, and numbers of high-scoring individuals, *Science*, 269, pp.41-45, 1995.
 - 14) 及川康・片田敏孝・浅田純作・岡島大介: 洪水避難時における世帯行動特性と世帯員の役割分担に関する研究, 水工学論文集, 第44巻, pp.319-324, 2000.
 - 15) 石塚久幸・和田滉平・宮島昌克: 被災地域へのアンケートに基づく土砂災害における避難を促進する情報に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.69, No.2, pp.I_127-I_134, 2013.

荒木川における流砂観測の紹介

和歌山県
国立研究開発法人土木研究所
国土技術政策総合研究所

筒井和男・西岡恒志・福田和寿
木下篤彦
内田太郎・田中健貴

1. はじめに

現在、土砂災害に対する警戒情報の指標として、雨量情報により算定された土壌雨量指数が用いられている。しかし、予測精度が必ずしも高いものでなく、切迫性が伝わりにくい、などの課題が指摘されている。下流域での流砂観測による切迫性のある情報提供を目指し、国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人土木研究所、大規模土砂災害対策技術センターおよび和歌山県が連携し、研究を平成 27 年度より開始した。

濁度計等による流砂観測が各地で行われている例えば 1)。流量と浮遊土砂濃度の時間的変化が示すヒステリシスと、浮遊土砂供給機構との関係はある程度説明されている 2)。しかし、土砂流出と濁度発生タイミングの把握による緊急対応に着目した事例は少ない。また、浮遊砂の流下過程における堰堤の影響については明らかとなっていない。

そこで、山地河川における斜面崩壊や堆積土砂の二次移動ともなう濁りの伝播特性に関するデータの蓄積および解析を目的として、荒木川流域において流砂観測を行っている。本稿は、その取り組みを紹介するものである。

2. 荒木川流域の概要

流砂観測の調査場所として、和歌山県新宮市を流れる二級河川佐野川の支川荒木川流域を選定した(図-1)。選定の理由は、上流域に斜面崩壊により生産された土砂が大量に堆積していること、崩壊斜面に不安定な土砂が残存していること、砂防堰堤が設置されていることである。荒木川は、流域面積は 3.2km²。主な地質は、下流域は熊野層群、上流域は熊野酸性岩類である。平成 23 年紀伊半島大水害の際には、上流域および支川において多数の表層崩壊が発生した。写真-1 に平成 23 年の水害後に撮影した航空写真を示す。崩壊土砂の一部は土石流となって流下したが、砂防堰堤により下流域への土砂流出は免れた。一方、流木は下流の市街地にまで到達した。流木の一部は河道を閉塞し、近隣住宅に浸水被害を及ぼした。その後、和歌山県により透過型堰堤が 2 基設置された。現在、荒木川流域には不透過型堰堤が 2 基、透過型堰堤が 2 基設置されている。



図-1 調査場所

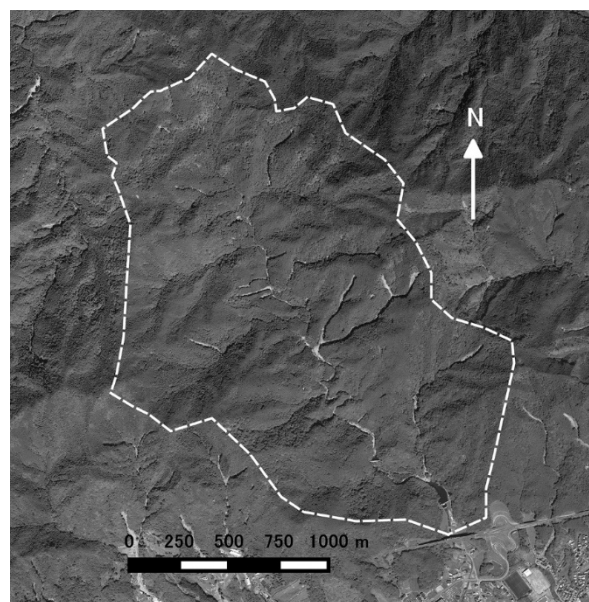


写真-1 平成 23 年 10 月の航空写真(和歌山県撮影)
(破線は流域界を示す)

3. 流砂水文観測の概要

荒木川流域において、流砂水文観測を平成 27 年 7 月より開始している。図-2 に観測機器の設置箇所を示す。濁度・水位観測を上下流 2 地点で実施することとした。

下流側の観測箇所は、流域出口に設置されている不透過型堰堤の下流側に設定した。上流側の観測箇所は、下流側の観測箇所より 2 基の不透過型堰堤よりも上流にあたる地点に設定した(写真-2)。

この箇所には土砂の堆積はなく、露岩している。

両地点の距離は、河道に沿って約1kmである。観測は「山地河道の流砂水文観測の手引き（案）」（国総研資料 第686号）および「山地河道の流砂水文観測における濁度計観測実施マニュアル（案）」（国総研資料 第792号）に従い実施している。

水位計（Campbell社製CS451）、濁度計（Campbell社製OBS3+）、浮遊砂サンプラーを設置している（写真-3、4）。いずれの箇所もソーラーパネルと接続したバッテリーを電源としている。併せて、下流側の観測箇所では、出水時にバケツによる表面採水および流速観測を1時間間隔で実施している。上流側の観測箇所は出水時の接近が困難なため、表面採水を目的に自動採水器（ISCO社製6712）を設置している。

本流域の上流部における河床への土砂の堆積状況を写真-4に、崩壊斜面の残存する不安定土砂の状況を写真-5に示す。これら堆積土砂および不安定土砂の移動状況を、インターバルカメラおよび土砂移動時刻記録ロガー³⁾を用いて観測している。上流域の土砂移動と下流域の流砂量の変動の関連性が直接観測できることを期待している。

4. 平成27年台風11号の観測状況

台風11号の接近に伴い7月16～17日に累計187mmの降雨があった（AMeDAS新宮観測所）。下流側の観測箇所では測定した水位と濁度のデータ、および時間雨量を図-3に示す。降雨にともない水位および濁度が変化する状況が良好に観測されている。

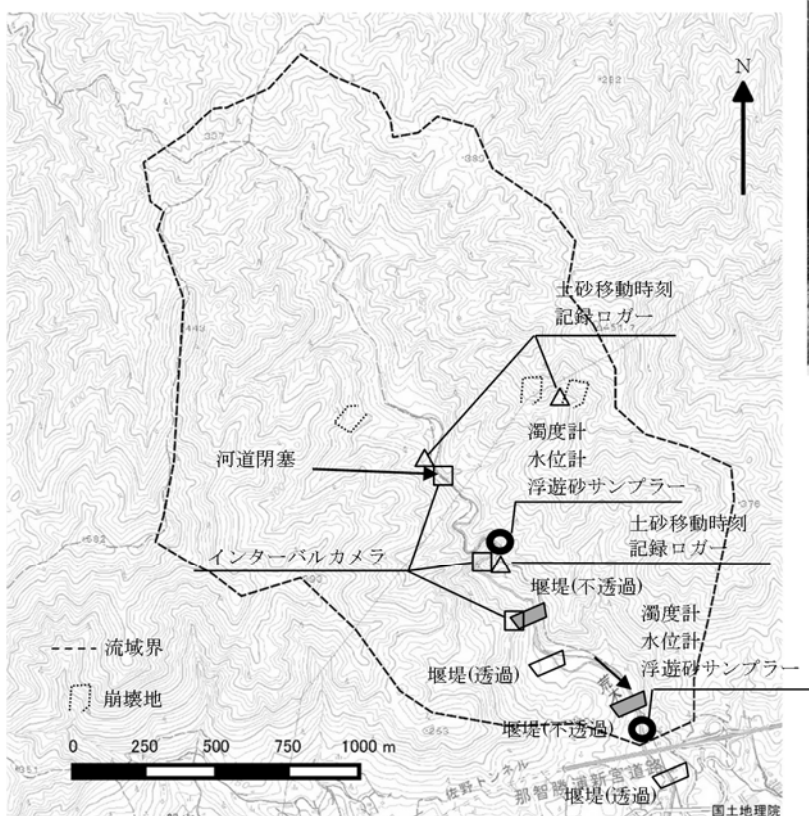


図-2 観測機器の配置図



写真-2 上流側の観測箇所
（矢印は流下方向を示す）



写真-3 下流側の観測箇所



写真-4 下流側の観測箇所の機器設置状況



写真-5 支川からの土砂流入により本川が河床上昇している様子（矢印は流下方向）



写真-6 崩壊地の様子

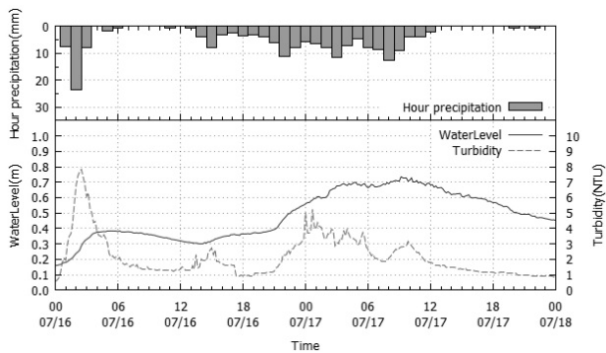


図-3 台風 11 号時の時間雨量と水位・濁度の観測データ

5. おわりに

和歌山県新宮市にある荒木川流域における流砂水文観測について紹介した。現在、濁度・水位観測、浮遊砂サンプラーによる遊砂観測、インターバルカメラ・土砂移動時刻記録ロガーによる土砂移動観測、出水時採水等を実施している。今後、音響式の掃流砂量計の設置など、観測体制の強化をしていく予定である。濁りの伝播に関する堰堤の影響の検証や、流域監視体制の構築に資するデータの蓄積、解析を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 田村ら：六甲山系における比較的大きな出水時の浮遊砂の特徴,平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集
- 2) Kurashige : Mechanism of suspended sediment supply to headwater ,Transactions ,Japanese Geomorphological Union,15A,p.109-129,1994
- 3) 水谷ら：安価かつ簡素な土砂移動時刻記録装置の開発と土石流発生時刻の検知事例 ,砂防学会誌,Vol.67,No.5,p.49-54,2015

UAVを活用した河道閉塞箇所の計測手法に関する研究

和歌山県
国立研究開発法人土木研究所

大橋和也・西岡恒志・筒井和男・福田和寿
木下篤彦・藤村直樹・赤澤史顕

1. はじめに

和歌山県はこれまで多数の土砂災害が発生している。近年では、平成23年台風12号の豪雨により土砂災害並びに河川氾濫が各地で発生した¹⁾。また、山間地で河道閉塞が発生した場合、天然ダムが越流し下流域に大きな被害をもたらす危険性があり災害直後の現地調査は迅速な対応が求められている。しかし、災害直後は天候・現地条件により有人ヘリコプターが飛行できない可能性もあり、今後の災害直後の現地調査においては、安全かつ迅速に調査可能な手法の開発が望まれる。また、近年では無人飛行機（以下、UAVと呼ぶ）の性能向上により災害調査でも活用され始めている²⁾。

本研究では、平成23年台風12号で流木被害が発生した佐野川水系荒木川流域において、河道閉塞した箇所（写真-1）を選定しUAVを活用した河道閉塞箇所の計測手法について検討を行った。

2. 調査場所の概要

図-1に調査場所を示す。

流域内では多数の斜面崩壊が発生し土砂・流木が流下した場所である。また、本川上流で支川から流出した土石流により河道閉塞が発生し、流木においては全てが堰堤で捕捉できず下流域へ流出し甚大な被害となった⁴⁾。



写真-1 平成23年台風12号による荒木川流域内での河道閉塞の状況
（点線は左支川からの土石流で対岸へ乗上げた流木を示す）



図-1 調査箇所位置図

3. UAVの活用及び特徴・性能

土砂災害が発生した場合、被害規模の状況把握や復旧工法の検討は重要である。特に災害初期においては、現地までの交通手段が無い場合や有人ヘリコプターがすぐに飛行できない場合が想定されUAVの活用が期待される。

また、航空法の一部を改正する法律（平成27年法律第67号）の施行により昨年12月10日に無人航空機に係る飛行空域・飛行方法が一部高度規制などの制限がされたところである⁵⁾。これにより山間地でのUAVの活用範囲は目視確認が可能な範囲とし、障害物（立木など）の影響を受けないように高度設定をする必要がある。

今回使用した UAV (写真-2) の特徴及び性能について表-1 に示す。また、低空飛行による撮影のため鮮明な写真が取得でき小スペースで発着が可能などの利点がある。しかし、小型であるため飛行中の目視が困難・風の影響を受けやすいなど欠点も兼ねており操縦技術はもちろん安全面を考え操縦者以外に1~2名補助者が必要と考える。



写真-2 UAV 本体 (Phantom2Vision+) と送信機

表-1 UAV の特徴・性能

機体	特徴・性能
<ul style="list-style-type: none"> UAV 本体 Phantom2Vision+ (DJI 社製) 	<ul style="list-style-type: none"> 機体重量: 1,242g 機体幅: 350mm(プロペラを除く) 飛行時間: 約 20 分(1 回あたり) 最大飛行速度: 15m/秒 最大上昇速度: 6m/秒 最大下降速度: 3m/秒 GPS 機能搭載
<ul style="list-style-type: none"> カメラ 	<ul style="list-style-type: none"> 動作環境: 0° ~ 40° ピクセル: 14 メガピクセル 解像度: 4,384 × 3,288 HD 録画: 1,080 枚/30 秒
<ul style="list-style-type: none"> 送信機 	<ul style="list-style-type: none"> 操作範囲: 700m(オープンエリア時)
<ul style="list-style-type: none"> その他 スマートフォン 	<ul style="list-style-type: none"> アプリによるコース設定が可能 アプリによる飛行状況の確認が可能

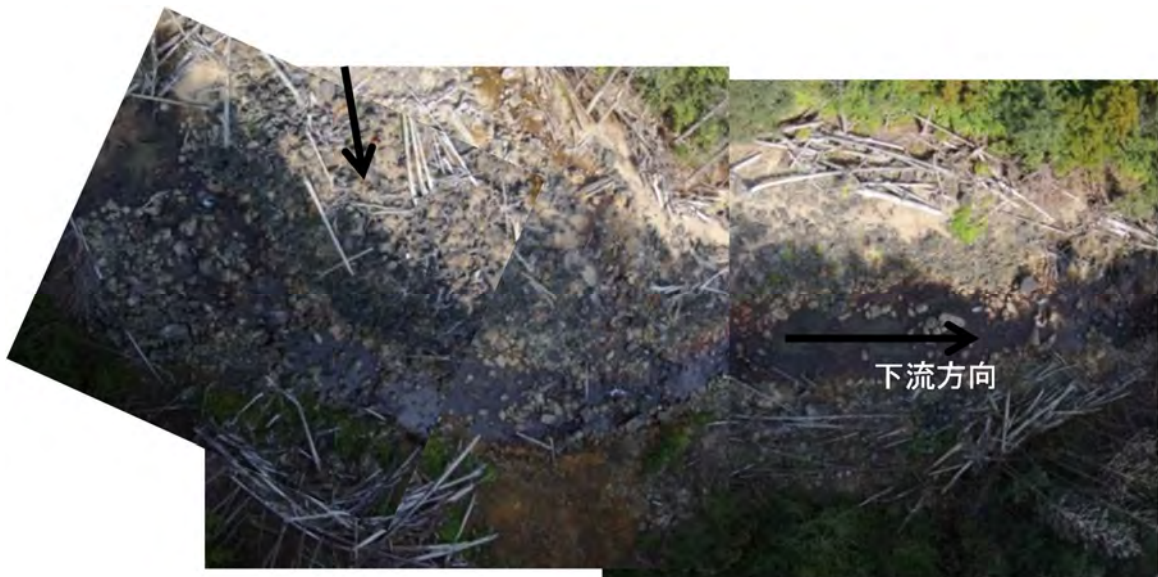


写真-3 高度 25m で撮影した河道閉塞箇所 (UAV で撮影)



図-1 オルソモザイク画像

4. 調査内容

最初に河道閉塞箇所が判断出来るかが重要であったため今回の調査では、精度の確認を行う必要があった。そのため、現地で基準点を設け距離計で水平距離・高低を計測し GPS 機器で緯度・経度の計測を行った。

また、撮影範囲は河道閉塞発生箇所上流部から末端部までの区間としカメラの向きは垂直固定とした(写真-3)。なお、カメラの設定は自動で3秒間隔に1枚の撮影とし飛行高度については梅津ら⁶⁾による研究を参考にしながら現地の障害物及び立木の状況を考え低い高度でも有効か検討を行った。

また、これにより得られた写真データを用いて3D解析ソフト(PhotoScanを使用)で3次元地形図の作成を行った(図-1)。

5. 調査結果

現地での撮影飛行は2日間実施した。1日目に基準点測量・離着陸地点の選定・テスト飛行及び本撮影2回(約15分/回)を実施し、2日目は情報の不足していた箇所を含めて本撮影2回(約15分/回)を実施した。今回の作業時間は片付けを含め1日1時間30分程度であった。

今回撮影した写真を3D解析ソフトで3次元地形図の作成を行った結果、高度25mと高度50mで撮影したものを比較すると25mの方がより鮮明に地形データの再現をすることができた。転石では直径1m程度、流木では直径30cm程度の大きさであれば識別が可能であった。また、河道閉塞の幅や高さなどの形状寸法を実測結果と比較すると概ね誤差1m程度で計測することができ災害直後においては十分な精度があると判断できた。

6. まとめと今後の課題

今回の調査で UAV を活用した際に感じた点は、短時間で撮影ができ高解像度の画像が容易に取得できる利点がある反面、天候による影響や GPS の取得に時間を要するなど課題も確認することができたので表-2に示す。また、今回の調査結果から、精度誤差も小さいことが確認でき今後の災害直後における現地調査で UAV の活用は有効な手段と考えられる。今後、これらの調査手法によって簡易にデータを取得し、シミュレーションの実施が可能になると期待される。

今後はこれらの点に留意し UAV の活用出来る現地条件を整理し、災害直後の現地調査における計測

手法を開発することで今後の災害復旧の初期対応に貢献できると考えられる。

表-2 UAV の利点と課題

利点	課題
・短時間での撮影が可能	・撮影状況(天候・光)
・低コスト	・GPSの取得
・低高度による高解像度画像の取得が可能	・飛行時間(バッテリー)
・自動と手動の切り替えが容易	・安全対応
	・墜落の危険性
	・操縦者の技術修練

参考文献

- 1) 松村ら：2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.64，No.5，p.43-53，2012.
- 2) 湯本ら：水窪町で発生した土砂ダムの調査，解析の事例について，第53回治山研究発表会論文集，p.81-86，2013.
- 3) 木下ら：回転翼型マイクロ UAV を用いた深層崩壊箇所の災害調査，砂防学会誌，Vol.66，No.3，p.51-54，2013.
- 4) 福田ら：災害時の流木の流出率に着目した治山堰堤の効果的な配置手法に関する検討，第55回治山研究発表会概要，p.19-20，2015.
- 5) 国土交通省：無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行ルール，<http://www.mlit.go.jp/koku/koku.tk10.000003.html>.
- 6) 梅津ら：低高度空中写真による河床礫調査法の精度検証と実用性について，砂防学会誌，Vol.60，No.1，p.19-28，2007.
- 7) 神野ら：LADOF モデルによる河道閉塞の長期的な越流侵食予測結果の応急対策計画への反映について，砂防学会概要集，Pb-31，2012

UAVを活用した山地災害後の初期対応及び計測手法について

和歌山県
国立研究開発法人土木研究所

福田和寿・坂口武弘・西岡恒志・筒井和男
木下篤彦

1. はじめに

和歌山県ではこれまで多数の土砂災害が発生している。平成23年台風12号に伴う豪雨で山腹崩壊や河川氾濫が各地で発生した¹⁾²⁾。

被害状況の把握や災害復旧を実施するための調査では、山腹崩壊現場など再崩落の恐れのある危険箇所二次被害の発生が想定され、安全を確保し、慎重に作業を行う必要があり多くの時間や労力を要した。

このため、災害直後の現地調査では、安全かつ迅速な調査を可能とする手法の開発が望まれる。近年、無人航空機（以下、UAVと呼ぶ）の性能が向上し、災害調査の分野でも活用され始めている³⁾。

本研究では、平成23年台風12号で多くの山腹崩壊や流木被害が発生した荒木川流域において、UAVを活用した山地災害後の初期対応及び計測手法の検討を行った。

2. UAVの特徴・性能

UAV（写真-1）の特徴及び性能について表-1に示す。航空法の一部を改正する法律（平成27年法律第67号）の施行により平成27年12月に無人航空機に係る飛行空域・飛行方法が義務化されたところであり⁴⁾、山間地でのUAVの活用範囲は目視確認が可能な範囲とし、障害物（立木など）の影響を受けないように高度設定をする必要がある。



写真-1 UAV本体（Phantom2Vision+）と送信機

3. 調査内容

今回の調査では、UAVを活用した写真測量を行い、その精度の確認を行った。図-1に調査場所を示す。

表-1 UAVの特徴・性能

機体	特徴・性能
・UAV本体 Phantom2Vision+ (DJI社製)	<ul style="list-style-type: none"> ・機体重量:1,242g ・機体幅:350mm(プロペラを除く) ・飛行時間:約20分(1回あたり) ・最大飛行速度:15m/秒 ・最大上昇速度:6m/秒 ・最大下降速度:3m/秒 ・GPS機能搭載
・カメラ	<ul style="list-style-type: none"> ・動作環境:0°~40° ・ピクセル:14メガピクセル ・解像度:4,384×3,288 ・HD録画:1,080枚/30秒
・送信機	<ul style="list-style-type: none"> ・操作範囲:700m(オープンエリア時)
・その他 スマートフォン	<ul style="list-style-type: none"> ・アプリによるコース設定が可能 ・アプリによる飛行状況の確認が可能



図-1 調査箇所位置図

流域内では、平成23年台風12号により山腹崩壊や本川と支川の合流部で河道閉塞した箇所が確認できる（写真-2・3）。山腹崩壊箇所は斜面勾配が急な所が多く足場が悪くなり落石や転落の危険性がある。河道閉塞箇所では足場が悪く越流など危険なため現地に立ち入った調査は困難であるため、今回の検討を行う調査地とした。次に各箇所の計測手法を示す。

(1) 河道閉塞箇所の計測手法

調査範囲は河道閉塞発生箇所の上流部から末端部までの範囲(縦断延長約200m×横断延長約50m)とした。カメラの向きは下向きに固定し飛行高度は堆積箇所の土石や流木状況を把握するため、低空飛

行と高空飛行の2回に分け撮影を行った。高度は周辺の樹高と梅津ら⁵⁾の研究を参考に25mと50mとした。



写真-2 平成23年台風12号による荒木川流域内での河道閉塞の状況



写真-3 平成23年台風12号による荒木川流域内での山腹崩壊の状況

(2) 山腹崩壊箇所の計測手法

調査範囲は崩壊状況の全容を把握するため崩壊地の上部から下部の範囲としカメラの向きは斜め下向き(約45°)とした。飛行高度は周辺の樹高を考慮し、崩壊地上部まで撮影するため100mで検討を行った。そのほか、写真測量において必要となる対空標識を現地に設置しGPS機器(Trimble GNSS)で現地測量を行った。

4. 調査結果

(1) UAVの調査結果

今回の現地調査ではUAVによる撮影を合計3回実施した。1回あたりの飛行時間は約15分で準備から片づけまで含め1箇所あたり1時間以内で完了した。作業時間について表-2に示す。

表-2 UAV撮影の作業時間

調査箇所	作業内容	所要時間
河道閉塞箇所	準備	10分
	撮影 (1回あたり15分)	30分
	片付け	10分
山腹崩壊箇所	準備	10分
	撮影 (1回あたり15分)	15分
	片付け	10分

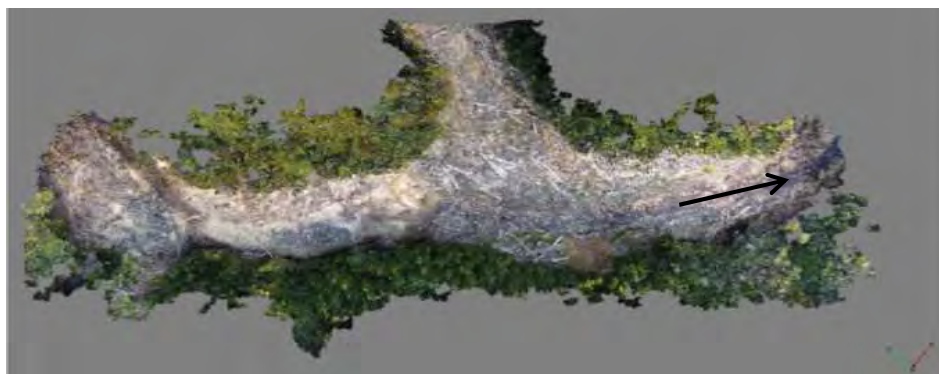


図-2 河道閉塞箇所のオルソモザイク画像(矢印は流下方向を示す)

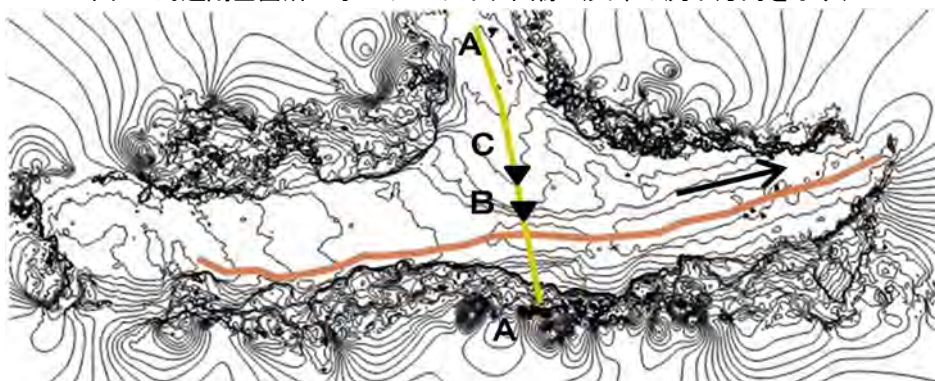


図-3 DEMデータから作成した等高線図(矢印は下流方向を示す)

(2) 解析結果

今回得た写真データを 3D 解析ソフト (Agisoft Photo scan) で 3 次元地形図の作成を行ったので、結果を以下に示す。

①河道閉塞箇所

高度による精度比較を行うため、河床から高さ 25m と 50m で検討を行った結果、50m では直径 1m の転石や直径 30cm の流木を確認するのは困難であった。

このことから、精度が高かった 25m の写真データを用いて河道閉塞の形状寸法を現地測量の成果と比較した。3D 解析ソフトで再現した成果を図-2 に示す。得られたデータを GIS ソフトを使用し、平面図 (図-3) や横断面図 (図-4) を作成した。BC 間の精度誤差を距離計の値と比較すると水平距離 10cm、垂直距離 60cm であった。

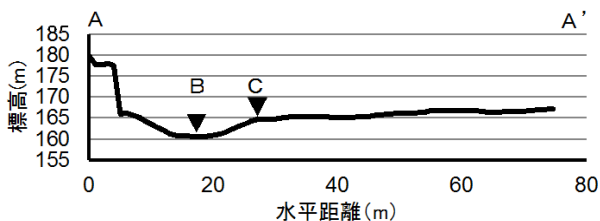


図-4 図-3 中の A-A' 横断面図

②山腹崩壊箇所

崩壊状況 (縦断延長約 250m × 横断延長約 100m) の全容を把握することができ、3D 解析ソフトにより再現できることが分かった (図-5)。山地災害後の初期対応で全容把握をする分には十分の成果が得られると考えられる。



図-5 山腹崩壊箇所のオルソモザイク画像 (矢印は下流方向を示す)

5. まとめ

調査結果より、UAV を活用することで効率的に災害被害状況を把握することが確認できた。このため、災害後の初期対応や所有者説明・災害査定など説明

資料として UAV の活用は有効な手段と考えられる。しかし、山間部での GPS 電波の確保、測量の精度誤差、立木・構造物に遮断される場所での測量手法の検討、など課題もあり今後はこれらに留意し、UAV を活用した災害初期対応と災害箇所の計測手法について検討していきたい。

参考文献

- 1) 宮崎徳生・久保学:平成 23 年 9 月台風 12 号 (紀伊半島大水害) における和歌山県の対応について, 第 53 回治山研究発表会論文集, 2013.
- 2) 湯本仁・高島誠:氷窪町で発生した土砂ダムの調査, 解析の事例について, 第 53 回治山研究発表会論文集, 2013.
- 3) 木下篤彦・島田徹・笠原拓造・林栄明・名草一成・小川内良人・村木広和:回転翼型マイクロ UAV を用いた深層崩壊箇所の災害調査, 砂防学会誌, 2013.
- 4) 国土交通省:無人飛行機 (ドローン・ラジコン機等) の飛行ルール, <http://www.mlit.go.jp/koku/koku.tk10.000003.html>.
- 5) 梅津健一・戸松修:低高度空中写真による河床礫調査の精度検証と実用性について, 砂防学会誌, 2007.

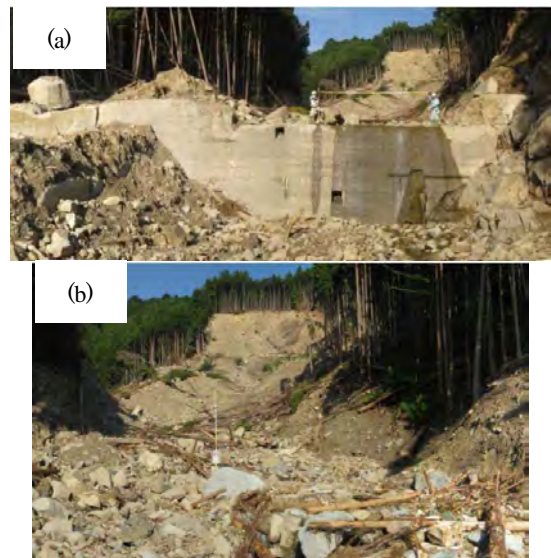


写真-4 平成 23 年台風 12 号による被災箇所の様子 (a) ポールとリボンテープにより測量している様子 (b) 上流の被災状況の様子

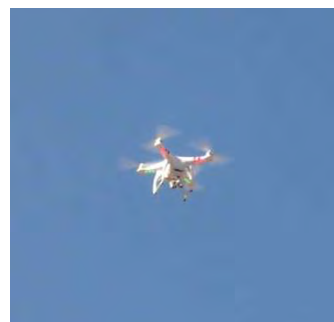


写真-5 地上から撮影した UAV 本体の様子



写真-6 荒木川流域の河道閉塞箇所の様子



写真-7 河道閉塞箇所の対空標識設置の様子
(○印は対空標識の位置を、矢印は下流方向を示す)

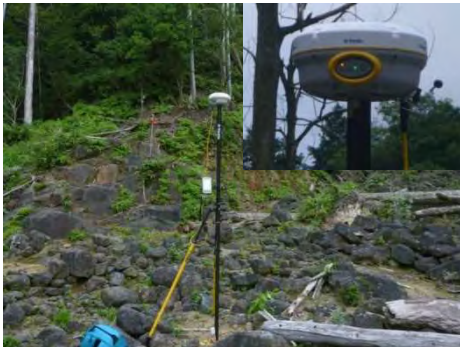


写真-8 GPS 機器 (Trimble GNSS) を用いた
測量計測の様子



写真-9 UAV で撮影した河道閉塞箇所の様子
(高度 25m, 矢印は下流方向を示す)



写真-10 UAV で撮影した河道閉塞箇所の様子
(高度 50m, 矢印は下流方向を示す)

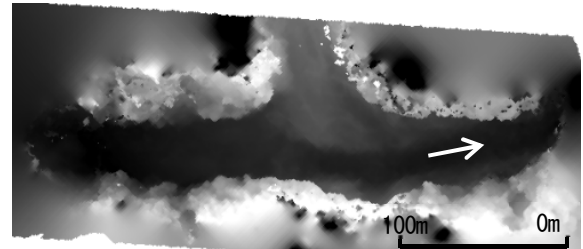


図-6 河道閉塞箇所の DEM (デジタル標高モデル)

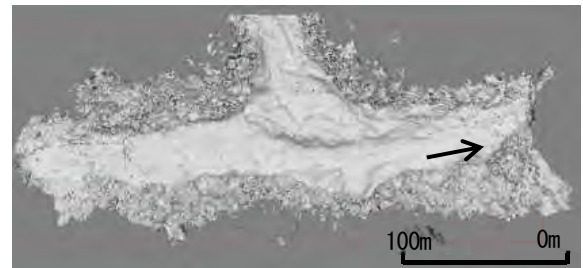


図-7 河道閉塞箇所のポイントクラウド



図-8 山腹崩壊箇所の 3D 画像解析モデル

2.3 和歌山県 テーマ7

災害時の流木の流出率に着目した治山堰堤の効果的な配置手法に関する検討

和歌山県
国立研究開発法人土木研究所

福田和寿・西岡恒志・筒井和男
木下篤彦

1. はじめに

和歌山県ではこれまで多数の流木被害が発生している¹⁾。このため、効果的な流木対策が求められている。これまで、流木の河道内への堆積については、宮縁ら²⁾・水山ら³⁾の研究、狭窄部における流木捕捉率については石川ら⁴⁾の研究があるが、河道条件と流木の流出率との関係は明らかになっていない。

そこで本研究では、平成23年台風12号で流木被害が発生した佐野川水系荒木川流域において、流木の河道内への堆積状況や立木状況について調査を行い、併せて航空写真により流木の発生量を推定し、流出率の算出を行った。さらに、流木の流出要因となる河道条件について検討を行った。



図-1 調査箇所位置図

2. 調査場所の概要及び調査方法

(1) 調査場所の概要

図-1に調査場所を示す。流域内では多数の山腹崩壊が発生し土砂は既設の不透過型堰堤3基によって捕捉されたが、流木が下流へ流出して甚大な被害となった(写真-1・2)。

(2) 調査方法

荒木川の本川と3支川で以下の3項目を調査し、それらに基づいて流出率を求めた(図-2)。

①河道内堆積流木量調査

堆積箇所の流木長・直径・樹種・本数を調査し堆積流木量を算出した。なお、材積は空隙を含んだ体積で算出した。

②溪流形状調査

堆積箇所の川幅を調査し、流木長と溪流幅の関係を調査した。また、溪床勾配・溪流の形状についても調査した。

③コドラート調査

流域内の立木の密度を把握するため、堆積箇所付近及び上流数カ所でコドラート調査を行い胸高直径・本数・樹種を調査した。



写真-1 平成23年台風12号による
荒木川下流域での流木被害



写真-2 山腹崩壊(左支川1)の事例

(3) 流木の流出率について

被災前後の航空写真から算出した山腹崩壊面積に(2)③で調査した流木密度を掛けて流木の発生量を算出し、(2)①で調査した河道内堆積量から、以下の式(1)、(2)により流出率を算出した。

$$\text{流出量} = \text{発生量} - \text{河道内堆積量} \dots (1)$$

$$\text{流出率 (\%)} = \text{流出量} / \text{発生量} \times 100 \dots (2)$$

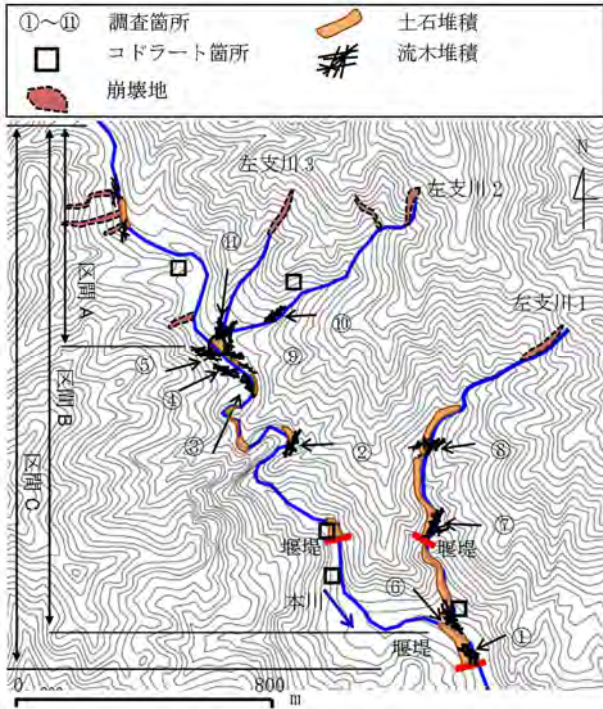


図-2 荒木川の平面図及び流木の堆積箇所

3. 調査結果

(1) 流木の堆積状況

土石流フロントの流木長が溪流幅より狭い箇所では閉塞し、土石流及び流木の流下を防いだ箇所が存在した(調査箇所⑧)。溪流幅より流木長が短いものは堰堤(調査箇所①、⑦)や河畔林(調査箇所④、⑥)に捕捉されたもののほか、流水が当たらない部分への堆積(調査箇所③、⑩)なども確認された。

また、流木長が溪流幅より短い場合であっても溪流幅に変化が生じている箇所に流木が堆積(調査箇所③、④、⑥、⑦)していることが確認された。

(2) 流木堆積箇所の平面・縦断条件

図-2、3に流木の堆積箇所を平面図及び縦断図に示す。平面図から、溪流の合流点・湾曲部・堰堤の堆砂敷に堆積が確認された。

また、縦断図から勾配の変化点に堆積が確認された。

(3) 河道条件と流出率の関係

区間A~C及び本川・支川の流木流出率を表-1に示す。土石流発生区間では殆ど土砂・流木の堆積は見られず、土石流流下区間では堰堤設置箇所では堆積が確認された(調査箇所⑦)。

そのほかは殆ど堆積区間から掃流区間で堆積(調査箇所⑦以外)が確認された。流出率は勾配の急な支川では高くなり、緩い本川では低くなる傾向にあった。

表-1 区間A~C及び本川・支川の流木流出率

項目		崩壊面積 (m ²)	立木密度 (m ³ /m ²)	流木発生量 (m ³)	堆積箇所毎の流木堆積量 (m ³)	流木流出量 (m ³)	流木流出率 (%)	調査箇所	流木堆積箇所の河道特徴	溪床勾配 (°)
		A	B	C = A × B	D	E = C - D	F = E / C × 100			
区間毎の流出率	区間 A	4,114	0.032	132	132	0	0.0	—	—	—
	区間 B	15,628	0.038	594	390	204	34.3	—	—	—
	区間 C	19,147	0.040	766	495	271	35.3	—	—	—
本川・左支川の流出率	本川	—	—	—	47	—	—	①	直線区間	3
					54			②	湾曲区間	2~3
					48			③	湾曲区間	2
					60			④	直線区間	2
					70			⑤	河道閉塞箇所	2
	支川1	3,519	0.051	179	18	121	67.5	⑥	直線区間	3~11
					8			⑦	湾曲区間	12
					32			⑧	河道閉塞箇所	12
	支川2	8,086	0.052	420	1	416	99.0	⑨	直線区間	12
					3			⑩	直線区間	12
	支川3	3,428	0.052	178	22	156	87.6	⑪	直線区間	12

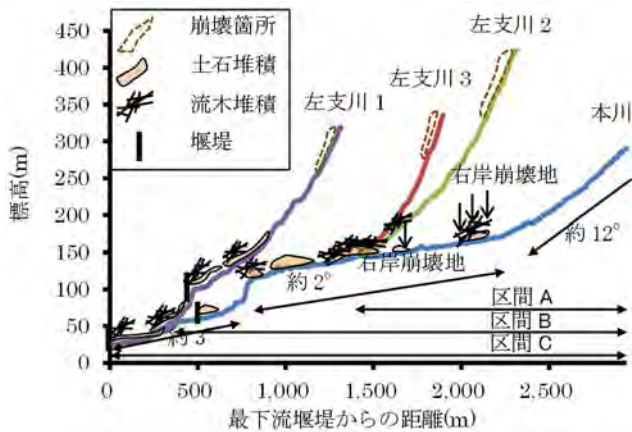


図-3 荒木川の縦断図及び流木の堆積箇所

4. 治山堰堤の設置位置の決定手法

本川では、支川との合流点直上流の流域区間で流出率を比較し、区間Cが35.3%と最も流出率が高かった。また左支川1～3においては、左支川2が99%と最も流出率が高かった。左支川2は、急勾配の直線区間からなり河畔林も未発達で、河道内への堆積が現地調査においても確認されなかった。

このことによって、溪床勾配、河畔林・堰堤等の状況、湾曲部等の溪流平面形状からなる河道条件が流木の流出に影響すると考えられる。

このことによって、左支川2のような直線区間の多い河道は流木の流出率が高く、堰堤の設置により溪間の安定を図ることで流域全体の流木の流出対策において有効であると考えられる。

5. おわりに

今回の調査により。河道条件によって流木の流出率が異なることが分かった。今後は事例を増やし、河道条件から流木の流出率を推定する手法を開発し、流木対策としての堰堤の有効な配置手法を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 松村ら：2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.64，No.5，p.43-53，2012.
- 2) 宮縁ら：九州北部の山地河川に堆積する倒・流木と土砂，砂防学会誌，Vol.52，No.1，p.21-27，1999.
- 3) 水山ら：土石流発生に伴う流木の生産，流出事例と対策，新砂防，Vol.38，No.1(138)p.1-6，1985.
- 4) 石川ら：土石流に伴う流木の発生及び流下機構，新砂防，Vol.42，No.3(164)p.4-10.1989

雨の降り方の違いが斜面の水文過程と表層崩壊規模に及ぼす影響

国立研究開発法人土木研究所

木下篤彦・野池耕平

1. はじめに

近年、2014年の広島災害、2011年の那智川災害など大規模な表層崩壊が発生している¹⁾²⁾。これらの災害による被害を軽減するには、予想される降雨分布から、斜面での水文過程を推定し、崩壊発生の有無や規模を予測することが重要である。

これまで、斜面での水文観測事例³⁾⁵⁾や降水量から斜面の水文過程を予測する研究⁶⁾¹⁰⁾は多数ある。これらの研究によって、およそ斜面の水文過程は推定できるようになっている。その他、表層崩壊の予測手法としては六甲山のハチース谷でのタンクモデルを用いた手法が鈴木ら¹¹⁾によって提案されており、各段のタンクの貯留高から災害の発生の有無を予測できる可能性があることが分かっている。本研究の目的は、近年の複数の災害の降雨特性と実際に発生した表層崩壊の規模を比較するとともに、その水文過程を再現することで、簡易的な崩壊規模の予測に役立てることである。

本研究では、まず、2014年の広島災害、2011年の那智川災害、2009年の防府災害、1999年の広島災害を例に挙げ、災害時の降雨分布や崩壊状況を調査し、比較検討を行った。次に、それぞれの災害についてタンクモデルによって災害時の水文過程の再現を行った。これらの結果と崩壊規模を比較することにより、水文過程が崩壊規模に及ぼす影響について検討した。最後にこれらの計算結果を検証する目的で、1999年の広島災害により表層崩壊が発生した箇所、雨の降り方による水文過程の違いについて現地観測結果から検証した。

2. 各災害の降雨特性と崩壊規模について

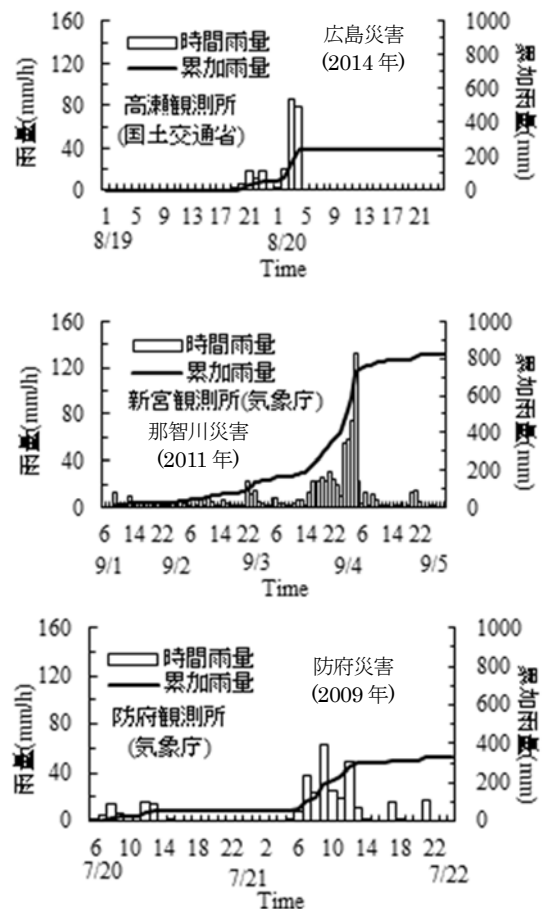
(1) 各災害の降雨特性について

図-1に4つの災害の発生箇所を示す。図-2に4つの災害の時間雨量と累加雨量を示す。これらの降雨の特徴をまとめると表-1のようになる。なお、総雨量とは、災害発生時の降雨で前後に24時間以上の無降雨時間のある一連の降雨の合計である。また、先行雨量とは、上記の一連の降雨が始まる時点より前の30日間の雨量の合計値である。総雨量では、那智川災害が833mmと圧倒的に多い。一方、1999年の広島災害は総雨量が234mmと少ない。最大1

時間雨量で見ると那智川災害が132mm/hと最も多く、防府災害が64mm/hと最も少ない。先行雨量で見ると那智川災害は388mmと圧倒的に多く、防府災害が56mmと最も小さい。時間雨量で見ると那智川災害が132mm/hと最も多く、防府災害が64mm/hと最も少ない。



図-1 4つの災害の発生箇所(数字:災害発生年)



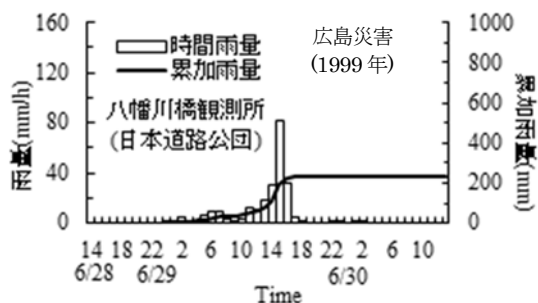


図-2 災害の災害時の時間雨量の変化

(2) 各災害の崩壊面積・規模について

表-2 に各災害発生箇所における崩壊規模を示す。なお、崩壊面積率とは、崩壊発生箇所を 1km メッシュで囲った場合、メッシュ内全ての崩壊面積の合計値を全てのメッシュの合計面積で除した値である。2014 年の広島災害は、花崗岩・泥岩で平均崩壊面積・崩壊密度に大きな差があるのが特徴である。また、他地域の災害と比較して、崩壊面積率が大きいのが特徴である。2011 年那智川災害は、総雨量・継続時間・最大 1 時間雨量・先行雨量とも他の災害より大きかったが、崩壊密度・崩壊面積率は最小であった。その一方で、平均崩壊深は最大であり、平均崩壊面積も大きい。2009 年防府災害については、平均崩壊面積は小さいものの、崩壊密度・崩壊面積率が大きくなっている。1999 年の広島災害については、いずれの指標についても中間的な値となっている。

表-1 各災害発生箇所の地質及び降雨特性

災害名	広島災害(2014年)	那智川災害(2011年)	防府災害(2009年)	広島災害(1999年)
災害発生推定時刻	8月20日 3:30~4:00頃	9月4日 1:30~3:00頃	7月21日 11:30~12:00頃	6月29日 15:30~16:00頃
地質	花崗岩・泥岩	花崗斑岩・泥岩	花崗岩	花崗岩
本研究での検討対象エリア	八木・緑井地区	那智川流域	剣川流域	荒谷川流域
近隣の雨量観測所	高瀬観測所 (国土交通省)	新宮観測所 (気象庁)	防府観測所 (気象庁)	八幡川橋観測所 (日本道路公団)
総雨量(mm)	247	833	332	234
継続時間(hr)	10	88	21	23
最大1時間雨量(mm/h)	87	132	64	81
先行雨量(mm)	301	388	56	157
一連降雨前の無降雨日数(日)	3	6	2	3

表-2 各災害発生箇所における表層崩壊の規模

災害名	広島災害 (2014年)		那智川災害 (2011年)	防府災害 (2009年)	広島災害 (1999年)
本研究での検討対象エリア	八木・緑井地区		那智川流域	剣川流域	荒谷川流域
地質	花崗岩	泥岩	花崗斑岩・泥岩	花崗岩	花崗岩
流域面積(km ²)	1.7	1.8	13.4	1.8	4.0
崩壊個数(個)	111	64	71	138	85
崩壊面積(km ²)	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
平均崩壊面積(m ² /個)	541	938	873	362	588
崩壊密度(個/km ²)	65	35	5	77	21
崩壊面積率(%)	3.5	3.6	0.5	2.8	1.2
平均崩壊深(m)	1.1	1.2	2.1	1.0	1.1

3. 水文過程と崩壊規模の関係について

表-1 の各災害の崩壊規模は、雨の降り方やそれに伴う斜面での水文過程が密接に関連していると考えられる。そこで本研究では、タンクモデルを用いた水文過程の再現計算を行った。表-1、2 の 4 つの災害と谷出口に設置したパーシャルフリュームによる害のうち、1999 年の広島災害については、図-3 に示すように 2005 年より災害発生箇所において雨量観流量観測を行っている。このため、花崗岩地質の溪流における雨量・流量観測データに基づいたパラメータ設定が可能である。なお、観測点上流の流域面積は 0.09km² である。

また、2011 年那智川災害についても、図-4 に示すように、2012 年より雨量観測と那智川支川の金山谷流域の 3 箇所で水位観測（本研究では金山谷川左支川のデータを使用）を行っており、同様にパラメータ設定が可能である。なお、観測点上流の流域面積は 0.62km² である。本研究では、パラメータ同定について、大域的探索手法としてその有効性が示されている最適化手法の一つである Shuffled Complex Evolution Method developed at the University of Arizona (以下、SCE-UA 法^{12)・13)} を用いてタンクモデルを構築した。図-5 にタンクモデルのパラメータを示す。

これらのパラメータを用いて、それぞれ花崗岩のパラメータについては、2014年広島災害(花崗岩エリアのみ)・2009年防府災害・1999年の広島災害の再現計算を、花崗斑岩・泥岩のパラメータについては、2011年の那智川災害の再現計算を行った。

図-6 に計算結果を示す。2014年広島災害について降雨強度の急激な上昇により1段目タンクの貯留高が急激に上昇している。2011年那智川災害について、3段目タンクの貯留高が災害発生前から高く、降雨によってさらに高くなっていることが分かる。2009年防府災害について、降雨強度の上昇に伴い1段目タンクとともに2段目タンクの貯留高の上昇が見られる。1999年広島災害について、3段目タンクの貯留高が災害発生前から高く、降雨によってさらに高くなっていることが分かる。これらの結果を表-2の崩壊規模の結果と合わせて考察すると、2014年広島災害、2009年防府災害の特徴としては、崩壊密度・崩壊面積率が高いことが挙げられる。1・2段目タンクは、表面流に寄与すると考えられることから、崩壊密度・崩壊面積率が高くなったと考えられる。2011年の那智川災害は、崩壊密度・崩壊面積率は小さかったものの、平均崩壊深・平均崩壊面積が大きかったことが挙げられる。3段目タンクは地下浸透に寄与すると考えられることから、地下水位の上昇が崩壊深や崩壊面積の大きな崩壊につながったと考えられる。1999年広島災害は、平均崩壊面積が大きいものの崩壊密度・崩壊面積率が低いことが挙げられる。降雨前から3段目タンクの貯留高すなわち地下水位が高かったことが考えられ、全体の崩壊個数や崩壊面積率は小さかったものの、1個の崩壊の大きさは大きかったと考えられる。以上から、1・2段目タンクの貯留高が大きいと表面流により崩壊密度や崩壊面積率が大きくなること、3段目タンクの貯留高が大きいと地下水位の上昇により崩壊深や崩壊面積が大きくなると考えられる。

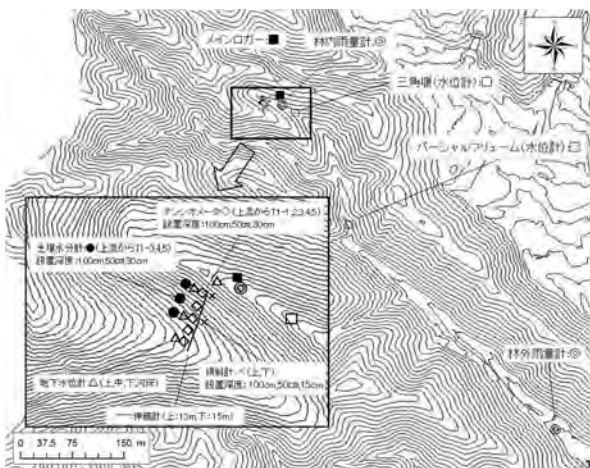


図-3 宮内地区での水文観測状況

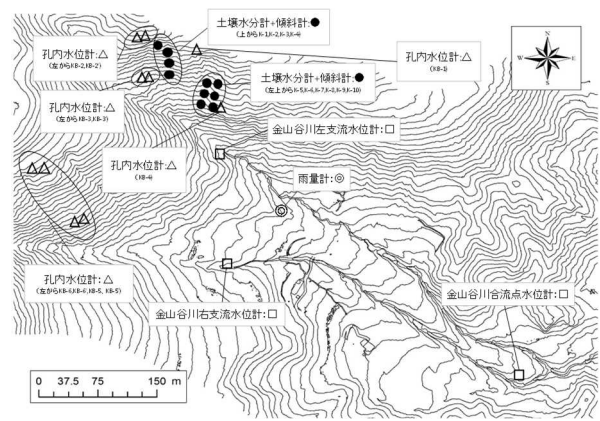


図-4 那智川流域金山谷での水文観測状況

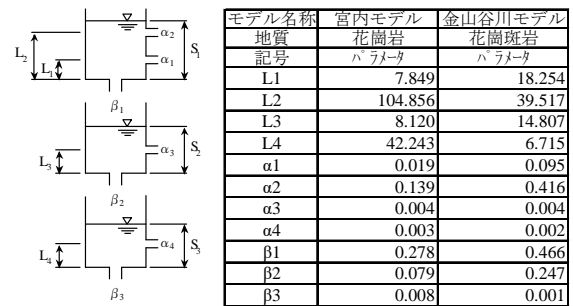


図-5 タンクモデルのパラメータ

4. 雨の降り方が水文過程に及ぼす影響の検証

短期的かつ集中的な降雨、長期的な雨が水文過程に及ぼす影響を調査する目的で、宮内地区での水文観測データを基に3章のタンクモデルの計算結果の検証を行った。本研究では、2011年の那智川災害・1999年の広島災害のような長期的な降雨の影響を調査する目的で、観測中最も総雨量の多かった2013年10月23日～25日の降雨(総雨量239mm、最大1時間雨量17mm、継続時間54時間)、2014年広島災害・2009年の防府災害のような短期的かつ集中的な降雨の影響を調査する目的で、最も、最大1時間雨量の多かった2014年8月19～20日の降雨(総雨量106mm、最大1時間雨量56mm、継続時間6時間)の水文データを整理した。

図-7に2013年10月23日～25日の、図-8に2014年8月19日～20日の水文観測結果を示す。図-7(b)・(c)より、降雨により水は深さ100cmまで浸透していることが分かる。また、(b)より、テンシオメータの値が定常状態となり、深さ50cm、100cmの体積含水率が上昇しながら流量が増加している。このことは地下深くまで水が十分浸透しながら谷出口に水が流出していることを示している。図-8(b)より、降雨は短時間であったため、深さ30cm付近では水

が浸透しているものの、50cm、100cm と深くなるにつれて土壌水分吸引水頭の低下が小さくなっている。また、(c)から、深さ 50cm での体積含水率の上昇は深さ 30cm での上昇に比べ 1 時間程度遅れている。(d)から、パーシャルフリュームでの流量の増加は降雨量の増加や深さ 30cm の土壌水分吸引水頭や

体積含水率の増加とほぼ同時刻であり、流量のピーク時には深さ 50cm にはほとんど水が浸透していなかったと考えられる。

以上から、短時間の急激な雨と長時間かつ総雨量の大きい雨では水の浸透過程に違いがあることが分かった。このことが、表-2 の崩壊規模に影響していると考えられる。

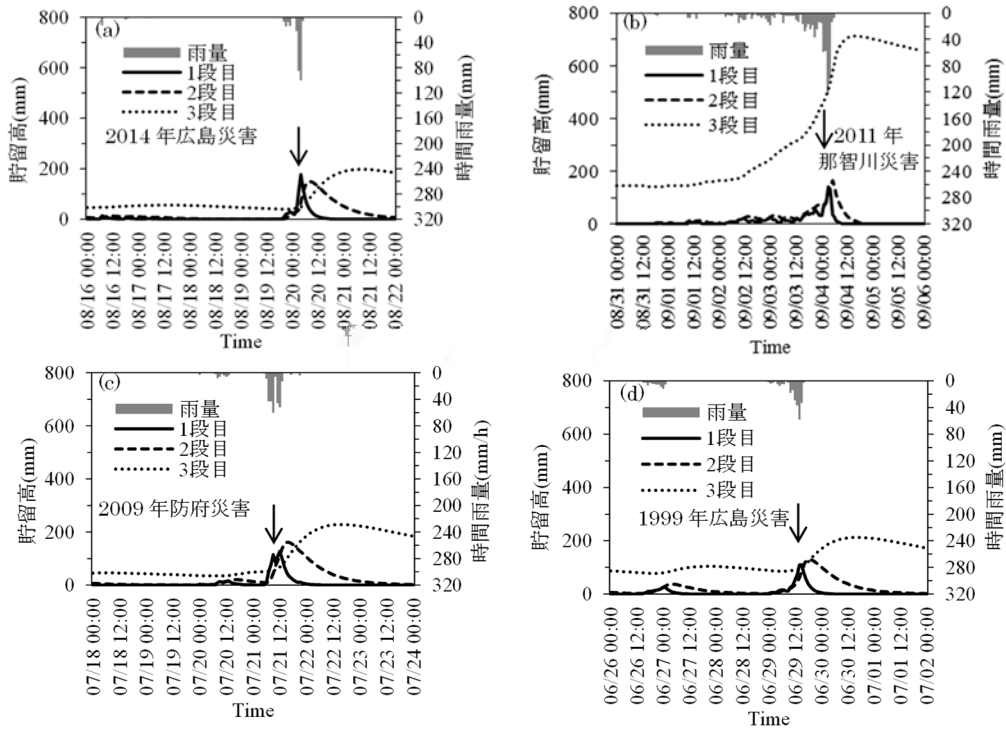


図-6 各災害発生箇所の地質及び降雨特性 タンクモデルによる水文過程の再現計算結果

(a) 2014 年広島災害, (b) 2011 年那智川災害, (c) 2009 年防府災害, (d) 1999 年広島災害 図中矢印はおよその災害発生時刻を示す。

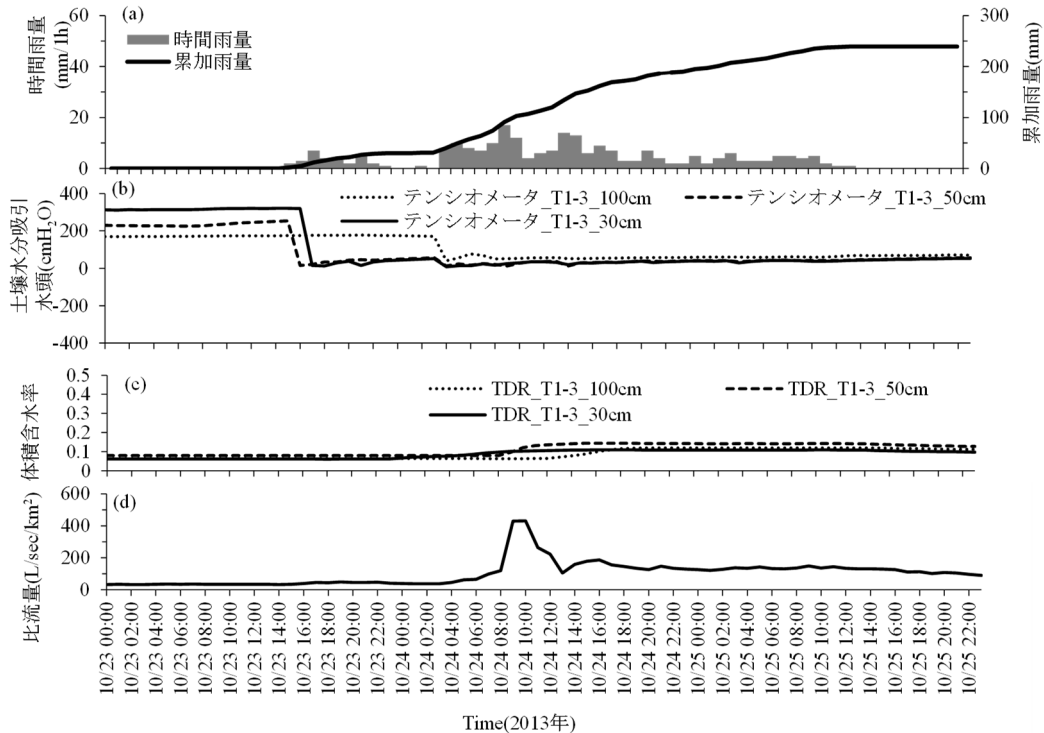


図-7 2013 年 10 月 23 日～25 日の宮内地区での水文観測結果

(a) 時間雨量(林外)の変化, (b) テンシオメータによる観測結果, (c) TDR による観測結果, (d) パーシャルフリュームによる溪流末端での流量変化。災害発生箇所の地質及び降雨特性 タンクモデルによる水文過程の再現計算結果

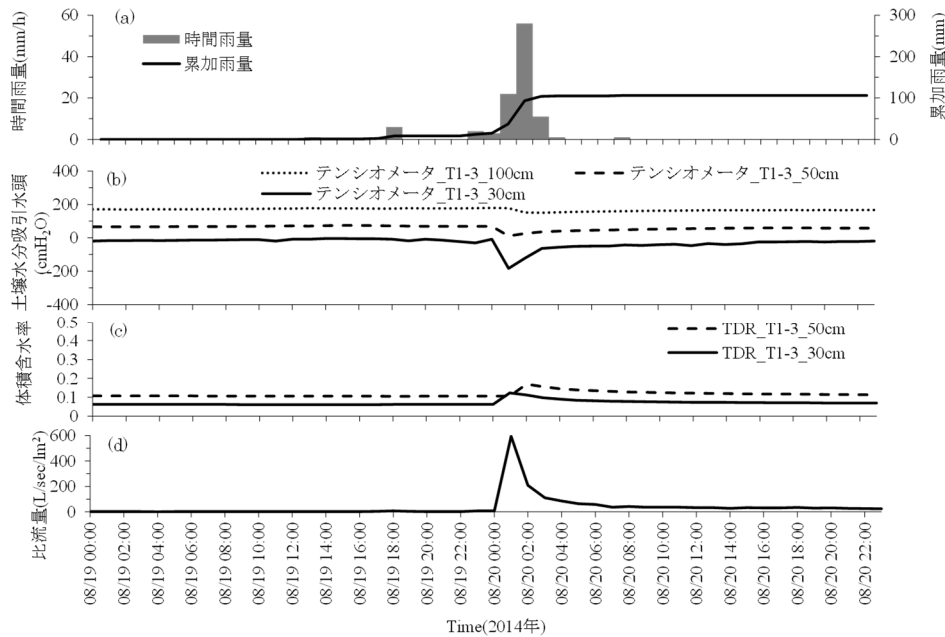


図-8 2014年8月19日～20日の宮内地区での水文観測結果 (a)時間雨量(林外)の変化, (b)テンシオメータによる観測結果, (c)TDRによる観測結果, (d)パーシャルフリュームによる斜面末端での流量変化 なお、(c)についてはTDRの100cmのデータは欠測であった。

5. おわりに

本研究では、近年の複数の表層崩壊による災害の降雨特性・崩壊規模を比較するとともに、タンクモデルによるタンクの貯留高と崩壊規模の関係性、現地での水文観測による雨の降り方の違いによる水文過程の違いについて検証した。得られた成果は以下の通りである。

- 1) 4つの災害の雨の降り方や崩壊規模の結果から、雨の降り方の違いにより、崩壊面積・崩壊密度・崩壊深に違いが出ることが分かった。
- 2) タンクモデルを用いた再現計算の結果、1・2段目タンクの貯留高が大きいと表面流により崩壊密度や崩壊面積率が大きくなること、3段目タンクの貯留高が大きいと高い地下水位により、崩壊深が大きくなる、もしくは1個1個の崩壊面積が大きくなる可能性があることが分かった。
- 3) 長時間の総雨量の大きい雨と短時間の急激な雨について斜面での水文過程を比較すると、長時間の雨の場合は鉛直方向に水が浸透した上で下流に流出する。一方、短時間の雨の場合は鉛直方向への水の浸透が十分進まずに表面流によって水が下流に流出することが分かった。これらのことから、雨の降り方が崩壊規模に影響を及ぼすことが示唆された。

参考文献

- 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, 福塚康三郎, 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, 2014.

- 2) 松村和樹, 藤田正治, 山田孝, 権田豊, 沼本晋也, 堤大三, 中谷加奈, 今泉文寿, 島田徹, 海堀正博, 鈴木浩二, 徳永博, 柏原佳明, 長野英次, 横山修, 鈴木拓郎, 武澤永純, 大野亮一, 長山孝彦, 池島剛, 土屋智: 2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.64, No.5, pp.43-53, 2012.
- 3) 岩田直樹, 中井真司, 片山弘憲, 柳崎剛, 笹原克夫: 平成26年8月の広島県廿日市市において観測された降雨浸透と斜面の変形, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.623-634, 2015.
- 4) 岩田直樹, 荒木義則, 笹原克夫: 現地計測に基づく降雨に伴うまさ土斜面のせん断変形挙動の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.141-151, 2014.
- 5) 瀧口茂隆, 内田太郎, 盛伸行, 田村圭司: 広島西部山系における斜面観測, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.52-56, 2008.
- 6) 平松晋也, 水山高久, 石川芳治: 山腹斜面における雨水の挙動と数値モデルによる再現性に関する研究, 新砂防, Vol.44, No.1(174), pp.21-30, 1991.
- 7) 平松晋也, 水山高久, 小川滋, 石川芳治: 降雨波形の山腹表層崩壊現象に及ぼす影響, 新砂防, Vol.44, No.5(178), pp.3-13, 1992.
- 8) 小杉賢一朗, 水山高久, 藤田正治: 表層崩壊発生予測モデルによる地下水位の再現精度の検討, 砂防学会誌, Vol.55, No.3, pp.21-32, 2002.
- 9) 小杉賢一朗: 斜面における雨水の浸透・流出過程のモデル化, 砂防学会誌, Vol.57, No.3, pp.71-79, 2004.
- 10) 小杉賢一朗, 木下篤彦, 藤本将光, 水山高久, 三浦義己: 地形に依存した雨水流動追跡に基づく表層崩壊発生予測の問題点, 砂防学会誌, Vol.65, No.1, pp.27-38, 2012.
- 11) 鈴木雅一, 福嶋義宏, 武居有恒, 小橋澄治: 土砂災害発生の危険雨量, 砂防学会誌, Vol.31, No.3, pp.1-7, 1979.
- 12) 杉原成満, 福田慎哉, 倉本和正, 荒木義則, 朝位孝二, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定, 土木学会論文集F6(安全問題), Vol.67, No.1, pp.1-13, 2011.
- 13) 杉原成満, 朝位孝二, 倉本和正, 荒木義則, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの最適構造構築に関する一考察, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.70, No.1, pp.12-17, 2014.

近年発生した表層崩壊の発生規模と降雨・地質特性との関係に関する研究

国立研究開発法人土木研究所

木下篤彦・野池耕平

1. はじめに

近年、2014年の広島災害、2011年の那智川災害など大規模な表層崩壊が発生している¹⁾⁶⁾。これらの災害による被害を軽減するには、予想される降雨分布や地質特性から崩壊発生を予測し、およその崩壊規模や分布を推定し住民避難につなげることが重要である。これまで表層崩壊による災害を個別に調査・研究した事例はいくつかある⁷⁾⁸⁾。一方、災害の予測技術の向上には複数の災害を比較し、雨の降り方と表層崩壊の発生の特徴を検証することで予測精度の向上につなげることが重要であるが、研究事例は少ない。また、H-SLIDER法などで雨量や地形データを用いて表層崩壊の発生を予測する技術が開発されているが⁹⁾¹⁰⁾、土層厚などのパラメータの設定方法などに課題も多い。その他、表層崩壊の予測手法としては六甲山のハチース谷でのタンクモデルを用いた手法が鈴木ら¹¹⁾によって提案されており、各段のタンクの貯留高から災害の発生の有無を予測できる可能性があることが分かっている。本研究の目的は、複数の災害の降雨・地質特性と実際に発生した表層崩壊の特徴を比較することで簡易的な崩壊規模の予測に役立てることである。

本研究では、まず、2014年の広島災害、2013年の萩・津和野災害、2011年の那智川災害、2010年の庄原災害、2009年の防府災害、1999年の広島災害を例に挙げ、災害時の降雨分布や崩壊状況、地質特性を調査し比較検討を行った。次に、それぞれの災害について、最大時間雨量と崩壊密度との関係を整理し、短時間雨量もしくは長時間雨量のどちらが表層崩壊に強く寄与しているかを検討した。最後に、流量観測の成果から、タンクモデルのパラメータ設定が可能な花崗岩エリア（2014年の広島災害・2009年の防府災害・1999年の広島災害）について、災害時の雨から再現計算を行い、計算結果と実際の崩壊規模を比較することでタンクモデルにより崩壊規模を予測する手法を提案する。

2. 各災害の降雨特性について

図-1に6つの災害の発生箇所を示す。図-2に6つの災害の時間雨量と累加雨量を示す。これらの降雨の特徴をまとめると表-1のようになる。なお、総雨量とは、災害発生時の降雨で前後に24時間以上の

無降雨時間のある一連の降雨の合計である。また、先行雨量とは、上記の一連の降雨が始まる時点より前の30日間の雨量の合計値である。総雨量では、那智川災害が833mmと圧倒的に多い。一方、庄原災害は総雨量が174mmと少ない。最大1時間雨量で見ると萩・津和野災害が138mm/hと最も多く、庄原災害が72mm/hと最も少ない。先行雨量で見ると庄原災害は552mmと圧倒的に多く、防府災害が56mmと最も小さい。また、萩・津和野災害について、一連降雨前の無降雨日数が多いのが特徴として挙げられる。

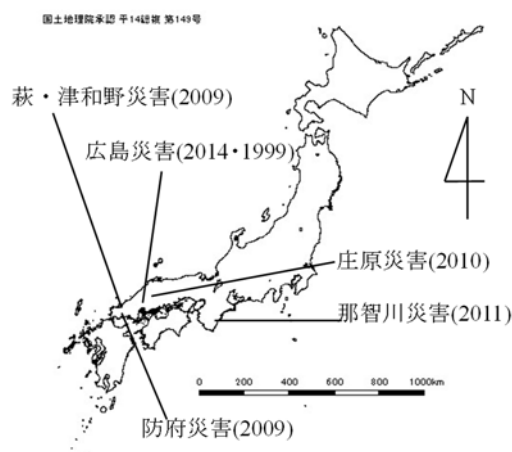


図-1 6つの災害の発生箇所（数字は災害発生年を表す）

3. 各災害の崩壊特性について

表-2に各災害発生箇所における表層崩壊の崩壊規模を示す。まず、総雨量が最も多かった那智川災害について、平均崩壊面積、平均崩壊深は最も大きかったが、崩壊密度、崩壊面積率は最も小さい。この災害では降雨は4日間にわたり降り続いていたことから、雨水が広い範囲で地下深くまで浸透したため、崩壊深が大きくなるとともに1個1個の崩壊規模も大きくなったと考えられる。総雨量は少なかったものの先行雨量の多かった庄原災害については、崩壊密度や崩壊面積率が最も大きくなっている。平均崩壊深が1.0m程度、平均崩壊面積が273m²/個とそれほど大きくなかったことと合わせると、先行降雨が多かったものの、災害時は3時間程度の降雨だったことから、雨水が地下深くまで浸透せず、崩壊深がそれほど大きくならなかったと考えられる。このため、崩壊個数が多くなり崩壊面積は大きくなっ

たものの、1個1個の崩壊規模は小さかった。萩・津和野災害については平均崩壊面積、平均崩壊深が最も小さい。これについても短時間の集中的な降雨により地下に雨水が十分浸透しなかったことが考えられる。

は小さくなっている。この災害は約3.5km²の狭いエリアであったため雨の降り方は概ね同様であり、地質や地形条件の違いが崩壊規模の違いにつながっていると考えられる。

表-1 各災害発生箇所地の地質及び降雨特性

災害名	広島災害 (2014年)	萩・津和野災害 (2013年)	那智川災害 (2011年)	庄原災害 (2010年)	防府災害 (2009年)	広島災害 (1999年)
災害発生 推定時刻	8月20日 3:30~4:00頃	7月28日 12:00頃	9月4日 1:30~3:00頃	7月16日 17:00頃	7月21日 11:30~12:00頃	6月29日 15:30~16:00頃
地質	花崗岩・泥岩	流紋岩質凝灰岩	花崗斑岩・泥岩	流紋岩質凝灰岩	花崗岩	花崗岩
本研究での検討対象エリア	八木・緑井地区	須佐川流域	那智川流域	篠堂川流域	剣川流域	荒谷川流域
近隣の雨量観測所	高瀬観測所 (国土交通省)	須佐観測所 (気象庁)	新宮観測所 (気象庁)	大戸観測所 (広島県)	防府観測所 (気象庁)	八幡川橋観測所 (日本道路公団)
総雨量(mm)	247	351	833	174	332	234
継続時間(hr)	10	11	88	4	21	23
最大1時間雨量(mm/h)	87	138	132	72	64	81
先行雨量(mm)	301	216	388	552	56	157
一連降雨前の無降雨日数(日)	3	20	6	1	2	3

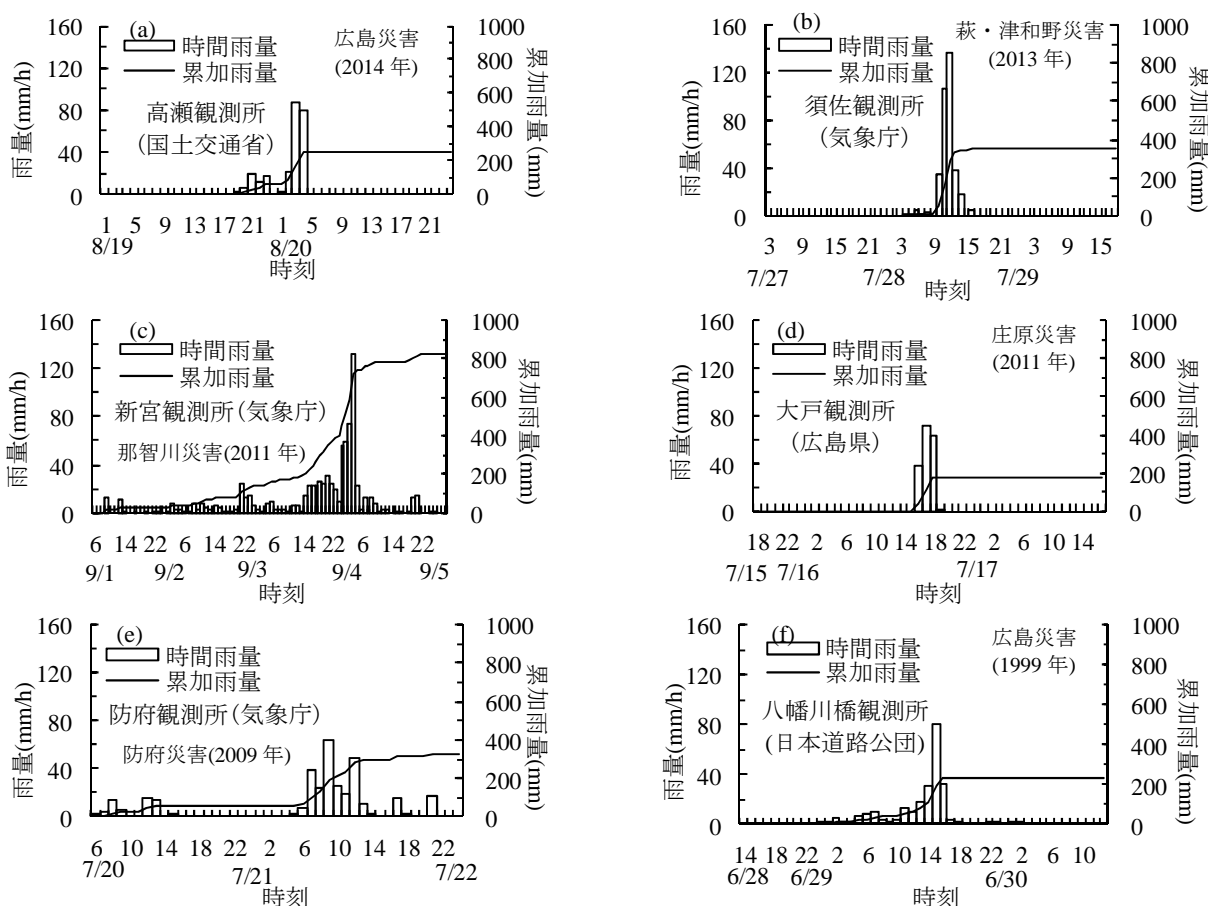


図-2 6 災害の災害時の時間雨量の変化

(a) 2014年広島災害, (b) 2013年萩・津和野災害, (c) 2011年那智川災害, (d) 2010年庄原災害, (e) 2009年防府災害, (f) 1999年広島災害

その他、2014年の広島災害については花崗岩の方が泥岩に比べ崩壊密度が大きいものの平均崩壊面積

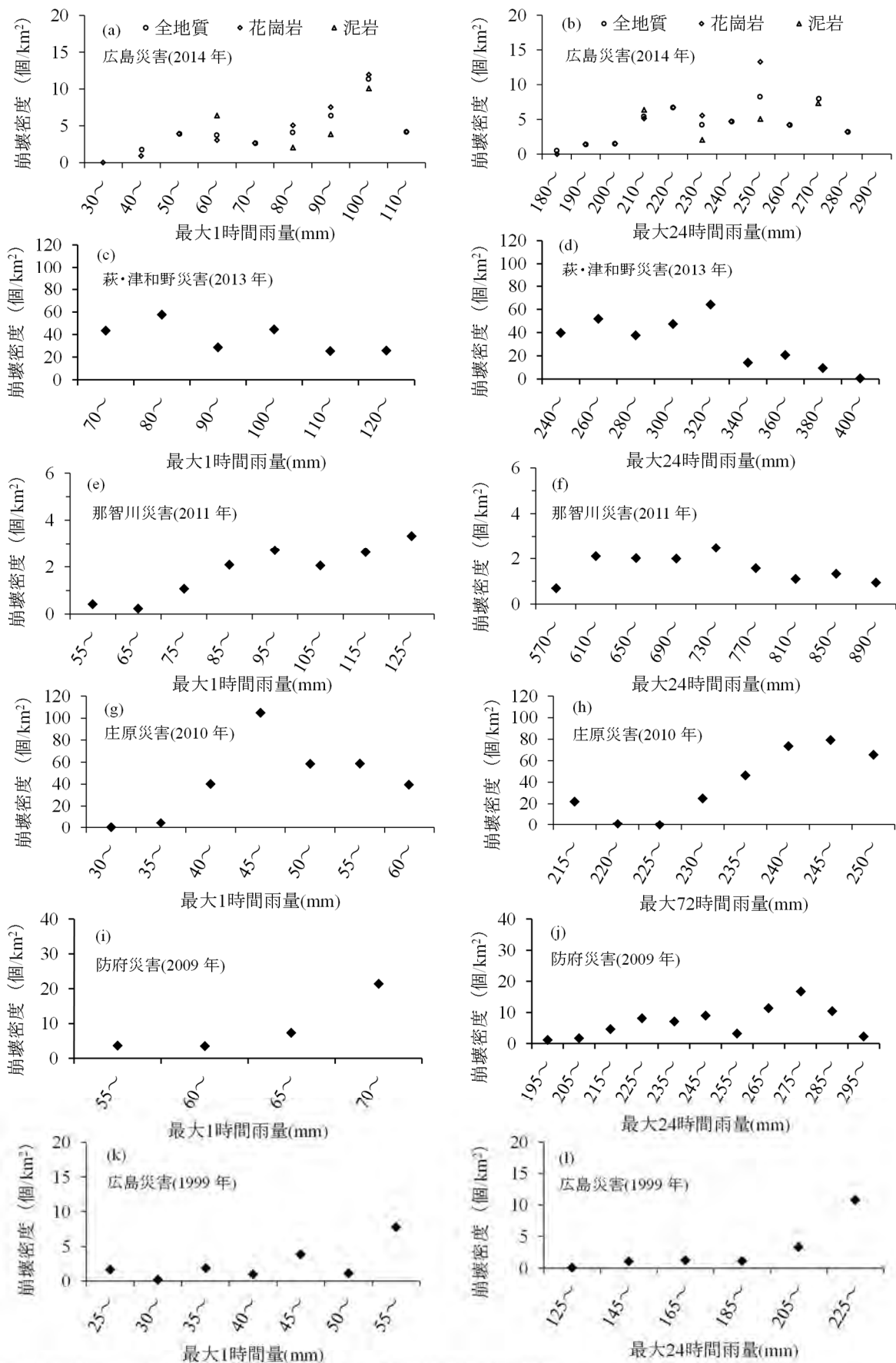


図-3 6 災害の短時間雨量もしくは長時間雨量と崩壊密度との関係 2014年広島災害の(a)最大1時間雨量、(b)最大24時間雨量、2013年萩・津和野災害の(c)最大1時間雨量、(d)最大24時間雨量、2011年那智川災害の(e)最大1時間雨量、(f)最大24時間雨量、2010年庄原災害の(g)最大1時間雨量、(h)最大72時間雨量、2009年防府災害の(i)最大1時間雨量、(j)最大24時間雨量、1999年広島災害の(k)最大1時間雨量、(l)最大24時間雨量

4. 降雨と崩壊密度との関係について

図-2, 表-1 に示す通り、表層崩壊は短時間降雨、長時間降雨、先行降雨など様々な要因により発生している。このため、どの要因が最も寄与しているかは表層崩壊の発生場所ごとにいくつかの最大時間雨量について時間雨量と平均崩壊密度との関係を整理し、雨量と崩壊密度との関係が比例関係にある場合その最大時間雨量が崩壊に寄与していると考えることができる。本研究では、表-1 の6つの災害について気象庁の解析雨量を用いて 1km メッシュごとに 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72 時間の最大雨量について雨量と平均崩壊密度との関係を整理した。図-3 に結果の一例を示す。なお、どの災害も最大 1, 24 時間最大雨量を例示しているが、庄原災害については 1~48 時間最大雨量の結果が同様であったため、1, 72 時間最大雨量の結果を例示している。

2014 年広島災害、那智川災害と防府災害は 1 時間雨量と崩壊密度との関係性が強く 24 時間雨量との関係性が低い。特に那智川災害は 4 日間にも及ぶ長期の雨であったが、短時間雨量が崩壊に寄与している。萩・津和野災害については 1, 24 時間雨量ともに崩壊密度と関係性が低い。無降雨日数が 20 日と長く短時間に強い雨が降ったことから、ある一定量の雨量を超えた箇所でもまんべんなく崩壊が発生したと考えられる。庄原災害については 1~48 時間までは最大時間雨量と崩壊密度との関係性が低かったが、72 時間では関係性が高くなった。先行雨量が多かったこと災害時の総雨量が 174mm と他の災害に比べて小さかったことから先行雨量が災害の発生に寄与している。1999 年広島災害は 1, 24 時間雨量ともに崩壊密度と比例関係にある。短時間・長時間降雨の両方が崩壊に寄与している。

5. 水文条件と崩壊密度との関係について

崩壊が発生するには短期降雨、長期降雨、先行雨量などが関係している。このため、図-3 の短・長時間雨量と崩壊密度との関係を説明するためには降雨による水文過程を考える必要がある。そこで本研究では、タンクモデルを用いた水文過程の再現計算を行った。表-1 の6つの災害のうち 1999 年の広島災害については災害後発生箇所において林外雨量計による雨量観測と小規模溪流（地質：花崗岩、流域面積：0.09km²）の谷出口部に設置したパーシャルフリュームによる流量観測（2005 年～2014 年）を行っている。このため、花崗岩地質の小規模溪流における雨量・流量観測データに基づいたタンクモデルのパラメータの設定が可能である。そこで本研究では、タンクモデルのパラメータ同定について、大域的探索手法としてその有効性が示されている最適化手法の一つである Shuffled Complex Evolution Method developed at the University of Arizona（以下、SCE-UA 法^{12)・13)}）を用いてタンクモデルを構築した。図-4 に花崗岩タンクモデルのパラメータを示す。なお、計算は 1km²のメッシュごとに行った。次に、このパラメータを用いて地質が花崗岩である 2014 年広島災害、2009 年防府災害、1999 年の広島災害の水文過程の再現計算を行った。

図-5 に計算結果を示す。2014 年広島災害について、降雨強度の急激な上昇により 1 段目タンクの貯留高も急激に上昇している。2009 年防府災害について、降雨強度の上昇に伴い 1 段目タンクとともに 2 段目タンクの貯留高の上昇が見られる。1999 年広島災害について、3 段目タンクの貯留高が災害発生前から高く、降雨によってさらに高くなっていることが分かる。

表-2 各災害発生箇所における表層崩壊の崩壊規模

災害名	広島災害 (2014年)		萩・津和野災害 (2013年)	那智川災害 (2011年)	庄原災害 (2010年)	防府災害 (2009年)	広島災害 (1999年)
本研究での 検討対象エリア	八木・緑井地区		須佐川流域	那智川流域	篠堂川流域	剣川流域	荒谷川流域
地質	花崗岩	泥岩	流紋岩質凝灰岩	花崗斑岩・泥岩	流紋岩質凝灰岩	花崗岩	花崗岩
流域面積(km ²)	1.7	1.8	6.5	13.4	4.1	1.8	4.0
崩壊個数(個)	111	64	371	71	587	138	85
崩壊面積(km ²)	0.06	0.06	0.09	0.06	0.16	0.05	0.05
平均崩壊面積(m ² /個)	541	938	243	873	273	362	588
崩壊密度(個/km ²)	65	35	57	5	142	77	21
崩壊面積率(%)	3.5	3.6	1.4	0.5	4.0	2.8	1.2
平均崩壊深(m)	1.1	1.2	0.8	2.1	1.0	1.0	1.1

災害発生時のタンク貯留高を見ると、2014年広島災害は1段目タンク貯留高が突出していることが分かる。2009年防府災害は1段目タンクに加え、2段目タンク貯留高が高くなっていることが分かる。1999年広島災害は、1段目タンク貯留高に加え、3段目タンク貯留高も高くなっていることが分かる。

これらの結果を表-2の表層崩壊の崩壊規模、図-3の短・長時間雨量と崩壊密度との関係の結果と合わせて考察すると、2014年広島災害、2009年防府災害の特徴としては、短時間雨量と崩壊密度の相関が良いこと、崩壊密度・崩壊面積率が高いことが挙げられる。

1・2段目タンクは、表面流に寄与すると考えられることから、崩壊密度・崩壊面積率が高くなった。1999年広島災害の特徴としては、短時間降雨・長時間降雨の両方と崩壊密度の相関が良いこと、平均崩壊面積が大きいものの崩壊密度・崩壊面積率が低いことが挙げられる。

3段目タンクは地下水に寄与すると考えられ、そもそも降雨前から3段目タンクの貯留高すなわち地下水水位が高かったことが考えられ、全体の崩壊個数や面積は小さかったものの、1個1個の崩壊の大きさは大きかったと考えられる。以上から、1・2段目タンクの貯留高が大きいと表面流により崩壊密度や面積が大きくなること、3段目タンクの貯留高が大きいと高い地下水水位により1個1個の崩壊の大きさは大きくなると考えられる。

6. おわりに

本研究では、近年の複数の表層崩壊による災害の降雨・崩壊特性を比較するとともにタンクモデルによりタンクの貯留高と崩壊密度・面積や崩壊規模との関係性について検討した。得られた成果は以下の通りである。

- 1) 6つの災害の崩壊特性から、雨の降り方や地質の違いにより崩壊面積・崩壊密度・崩壊深に違いが出るようになった。
- 2) 降雨と崩壊密度との関係については、短時間降雨と相関のある災害、長時間降雨と相関のある災害、両方と相関のある災害、両方とも相関性の低い災害があり、これらは災害時の雨の降り方や先行降雨と関係のあることが分かった。
- 3) タンクモデルを用いた再現計算の結果、1・2段目タンクの貯留高が大きいと表面流により崩壊密度や面積が大きくなること、3段目タンクの貯留高が大きいと高い地下水水位により1個1個の崩壊の大きさは大きくなる可能性があることが分かった。ただし、タンクモデルを用いた崩壊規模

の推定にはさらなる水文観測やタンクモデルの精度向上、実際の災害での妥当性の検証が欠かせない。

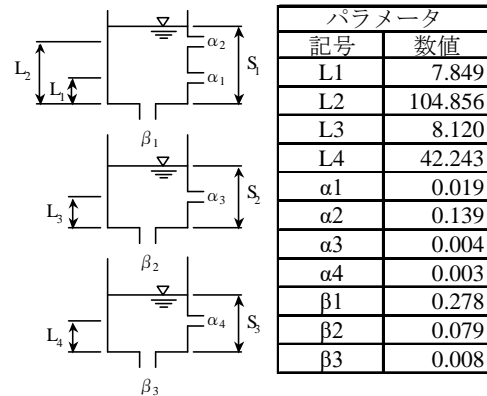


図-4 SCE-UA法により同定した花崗岩タンクモデル

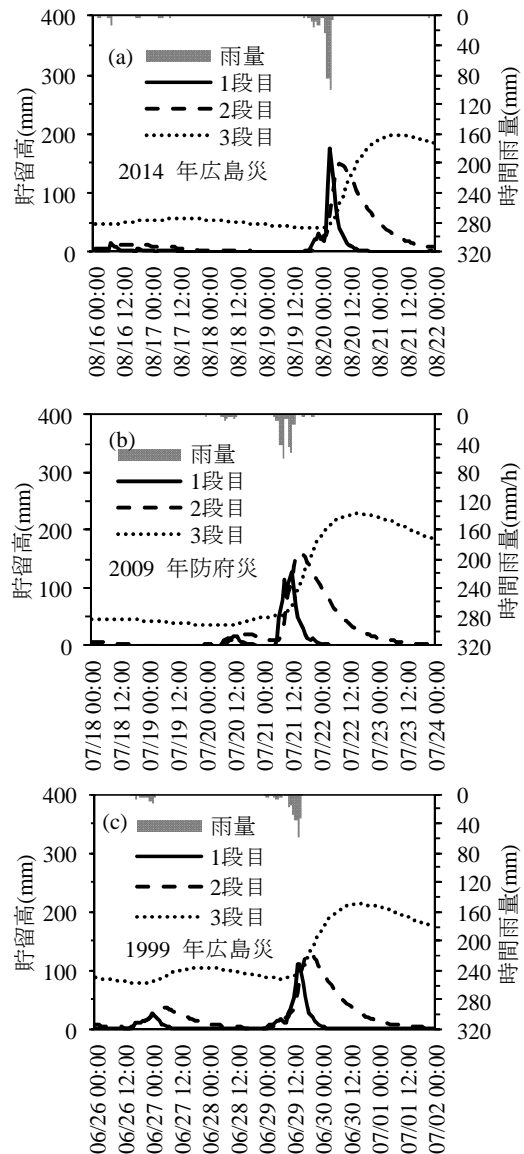


図-5 (a) 2014年広島災害, (b) 2009年防府災害, (c) 1999年広島災害のタンクモデルによる再現計算結果

参考文献

- 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, 福塚康三郎, 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, 2014.
- 2) 海堀正博, 木下篤彦, 高原晃宙, 多田泰之, 長野英次, 馬場茂彰, 荒木義則, 杉原成満, 島田徹, 堀大一郎, 小泉和也: 2013年7月28日に山口県東部および島根県西部で発生した局地的集中豪雨による土砂災害, 砂防学会誌, Vol.66, No.4, pp.48-55, 2013.
- 3) 松村和樹, 藤田正治, 山田孝, 権田豊, 沼本晋也, 堤大三, 中谷加奈, 今泉文寿, 島田徹, 海堀正博, 鈴木浩二, 徳永博, 柏原佳明, 長野英次, 横山修, 鈴木拓郎, 武澤永純, 大野亮一, 長山孝彦, 池島剛, 土屋智: 2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.64, No.5, pp.43-53, 2012.
- 4) 海堀正博, 杉原成満, 中井真司, 荒木義則, 山越隆雄, 林真一郎, 山下祐一: 2010年7月16日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告, 砂防学会誌, Vol.63, No.4, pp.30-37, 2010.
- 5) 古川浩平, 海堀正博, 久保田哲也, 地頭菌隆, 権田豊, 杉原成満, 林真一郎, 池田暁彦, 荒木義則, 柏原佳明: 2009年7月21日山口県防府市での土砂災害緊急調査報告, 砂防学会誌, Vol.62, No.3, pp.62-73, 2009.
- 6) 海堀正博, 石川芳治, 牛山素行, 久保田哲也, 平松晋也, 藤田正治, 三好岩生, 山下祐一: 1999年6月29日広島土砂災害に関する緊急調査報告(速報), 砂防学会誌, Vol.52, No.3, pp.34-43, 1999.
- 7) 瀬尾克美, 平川泰之, 天野篤, 小橋澄治, 菊井稔宏, 川満一史: 1998年8月末福島県南部災害における崩壊と降雨の関係, 砂防学会誌, Vol.53, No.5, pp.17-25, 2001.
- 8) 大石博之, 八木俊夫, 竹本大昭, 荒木義則, 榊原弘之, 古川浩平, 浦真: 統計手法を利用した1999年6月29日広島県西部における土砂災害発生状況と降雨・地形要因の関連についての考察, 砂防学会誌, Vol.58, No.6, pp.3-10, 2006.
- 9) 秋山怜子, 木下篤彦, 内田太郎, 高原晃宙, 石塚忠範: 簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法, 砂防学会誌, Vol.68, No.2, pp.3-13, 2015.
- 10) 内田太郎, 盛伸行, 田村圭司, 寺田秀樹, 瀧口茂隆, 亀江幸二: 場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響, 砂防学会誌, Vol.62, No.1, pp.23-31, 2009.
- 11) 鈴木雅一, 福冨義宏, 武居有恒, 小橋澄治: 土砂災害発生危険雨量, 砂防学会誌, Vol.31, No.3, pp.1-7, 1979.
- 12) 杉原成満, 福田慎哉, 倉本和正, 荒木義則, 朝位孝二, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.67, No.1, pp.1-13, 2011.
- 13) 杉原成満, 朝位孝二, 倉本和正, 荒木義則, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの最適構造構築に関する一考察, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.70, No.1, pp.12-17, 2014.

球状風化を呈した地質帯における表層崩壊発生場の特性と土層厚推定手法の検討

国立研究開発法人土木研究所
和歌山県
国土技術政策総合研究所

野池耕平・木下篤彦・高原晃宙・清水孝一・石塚忠範
西岡恒志
桜井亘

1. はじめに

2011年8月～9月に、連続した降雨によって紀伊半島などでは表層崩壊・深層崩壊などの土砂災害が多発した。和歌山県那智川流域およびその周辺の山域では表層崩壊が発生し、これに伴い土石流が那智川に流入し、下流域に甚大な被害をもたらされた。

また、那智川流域に分布する花崗斑岩は、球状を呈した硬質な風化残留物であるコアストーンを含む風化形態を示しており、この流出が下流域への被害をより大きくさせた要因のひとつとして考えられている²⁾。コアストーンを伴わないマサ化した花崗岩分布域では地形や土層構造によって表層崩壊の発生形態が異なることが明らかとなりつつあり、たとえば山地の開析状況に応じて土層構造および表層崩壊の発生形態が異なることが指摘されている³⁾。しかし、球状風化を呈した那智川流域に分布する花崗斑岩は、これとは異なる風化形態を持っていることから、土層構造もこれとは異なり、それによって表層崩壊の発生形態も異なる可能性がある。

また、このような土質構造を持つ地質帯では、表層部に硬質なコアストーンが含まれることによって、土層厚を推定する上で用いられていた簡易貫入試験など直接的な計測手法では正確に推測できない場合がある⁴⁾。そこで、物理探査を用いた間接的な手法による推測を行う必要がある。

本研究では、那智川流域の花崗斑岩分布域における土層厚をより高精度に推定することを目的として、表層崩壊発生場における地形・地質的特性を明らかにするとともに、簡易貫入試験および物理探査を用いて土層厚の推定を行った。

ここでは、土石流が発生した溪流のうち、8溪流（鳴子谷川、尻剣谷川、蛇ノ谷川、金山谷川、陰陽川、内の川、樋口川、平野川）を対象として検討を行った（図-1）。

2. 地域概要

(1) 地形地質概要

那智川流域は、図-1に示すように下位より順に下部～中部中新統熊野層群、熊野酸性火成岩類（以降岩石名である花崗斑岩と呼ぶ）が分布し、熊野層群

は花崗斑岩によって貫入されている⁵⁾⁷⁾。熊野層群は泥岩優勢砂岩泥岩互層および成層泥岩から成り、東～北方向に10～20°程度傾斜している。この地質分布は現在の地形を形成する重要な要素として考えられ、主に下流側に分布する熊野層群は風化によってなだらかな地形を形成し、上流側に分布する花崗斑岩分布域では急峻な地形が発達している。

また、那智山は800-900mほどの山地から構成されており、尾根の高度がそろっている状況および花崗斑岩に柱状節理が発達していることから、花崗斑岩は平坦地形を形成した噴出岩として考えられ、これが現在の山頂緩斜面を構成しているものと想定される⁸⁾。

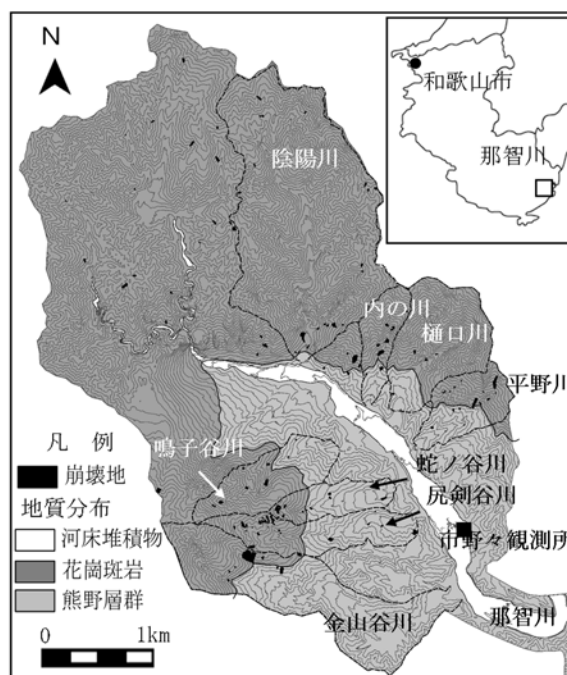


図-1 那智川流域の地質分布状況

(2) 降雨特性

2011年9月1日から9月4日までの降雨状況を図-2に示す。2011年に発生した台風12号は、紀伊半島、四国、中国地方などに大雨をもたらし、紀伊半島を始め各地で表層崩壊、深層崩壊、およびそれらに起因する土石流が各地で発生した。

那智川流域は、9月4日0～4時で341mm、最大時間雨量123mm（市野々観測所）が記録され、その未明に土石流が発生したと考えられる。

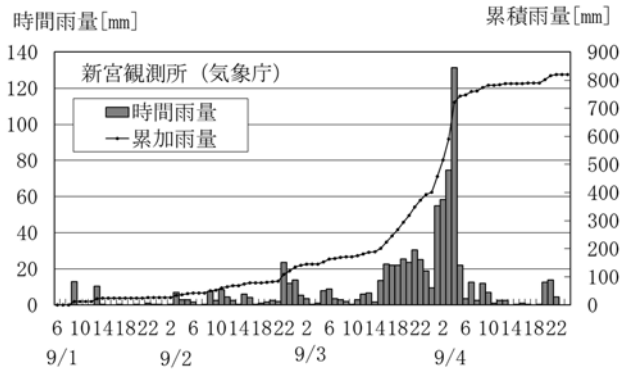


図-2 2011年9月1日～4日の降雨状況

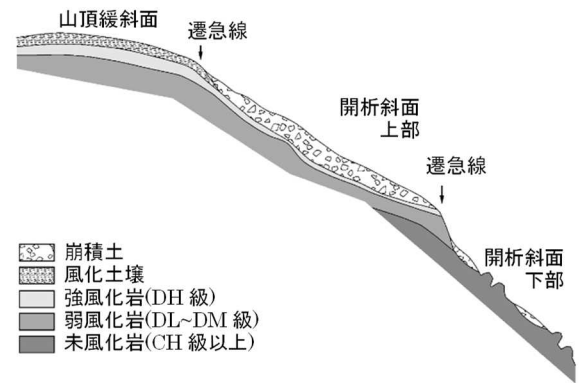


図-3 災害時の降水量の時間変化地形開析区分概念図

3)

3. 調査方法

(1) 地形調査

対象溪流における山地の開析状況を把握するため、地形調査を実施した。調査は、現地調査による地形観察、および災害後の航空レーザ測量による1mメッシュのDEMより作成した等高線図や傾斜図を用いて実施した。開析状況は、2009年における防府災害の際に用いられた事例³⁾を参考に作成した表-1を基準とし、山頂緩斜面、開析斜面上部、開析斜面下部、および溪床、人工改変地に分類した。各開析区分の概念図を図-3に示す。

(2) 崩壊地調査

調査対象とした8溪流の花崗斑岩分布域において、災害直後に撮影された空中写真およびDEMを用いて、表層崩壊が発生した場所の抽出作業を行い、その中で代表的な崩壊地において現地調査を実施した。現地では、崩壊地の規模や形状や、滑落崖・崩壊面およびその周辺における地形・地質の分布状況を把握した。その結果より、崩壊発生状況を類型化し、それぞれの崩壊発生特性を整理した。また、地形開析区分ごとの崩壊面積率(%), 崩壊地密度(個/km²)を算出した。

表-1 地形開析区分の指標

名称	地形的特徴
山頂緩斜面	遷急線より上位にあり、斜面の凹凸が小さい滑らかな地表面を呈している。地表部には硬質な露岩はほとんど認められない。
開析斜面上部	山頂緩斜面・開析斜面下部の中間的な特徴を有する。ガリー浸食や凹地形、崩壊跡地など、山地の開析が進行途中である様子が見受けられるが、その発達は未熟であり、凹凸が小さく、露岩の分布が少ない傾向がある。
開析斜面下部	やせ尾根や尖峰が分布し、硬質な露岩が点在するため斜面の凹凸が激しく、勾配が急となる。地表には土層が分布するもの。開析斜面上部と比べると連続性に乏しい。山地の開析は完熟方向に向かっている。

(3) 土層厚調査

球状風化を呈する花崗斑岩分布域における土層厚を推定するため、電気探査を実施した。ここでは、比抵抗分布の地質の評価を行うため、崩壊跡地を縦横断する位置に測線を設定し、滑落崖において地質分布を把握した。また、表層における雨水の浸透状況を評価するため、平常時および降雨直後の表層部が湿潤状態になっている時期において電気探査を実施し、その変化率を算出した。測線が交差する地点や崩壊地周辺では簡易貫入試験を実施し、その貫入深度との比較を行った。

測線は、各地形開析区分を網羅できるように設置した。また、電気探査では表層部の比抵抗分布状況をより詳細に解析する必要があるため、電極間隔を基本的に1mとした。調査時期と当時の降雨状況を図-4に、電気探査実施位置図、および測線位置を図-5に示す。

4. 山地の開析と崩壊特性

(1) 那智川流域の地形開析状況

那智川流域の地形開析斜面は、溪床、人工改変地を除き、山頂緩斜面、開析斜面上部、開析斜面下部に区分される。その区分図を図-6、分布面積を図-7に示す。

山地の開析状況は左岸・右岸で異なる。右岸側では、山頂緩斜面が22.2%を占め、山頂・尾根部付近に広く分布している。また、開析斜面上部が47.6%、開析斜面下部が30.2%占めている。一方左岸側では、山頂緩斜面が10%と右岸側より少なく、山頂・尾根部付近に帯状に分布しており、限定的である。開析斜面下部は35.5%を占めており、右岸側よりやや広い程度であるが、その分布範囲は下流域から山頂緩斜面直下、尾根部付近まで広く分布しており、浸食前線が右岸側に比べて上流側へ移動している様子が見受けられる。そのため、左岸側は右岸側より相対的に山地の開析が進行していることが想定できる。

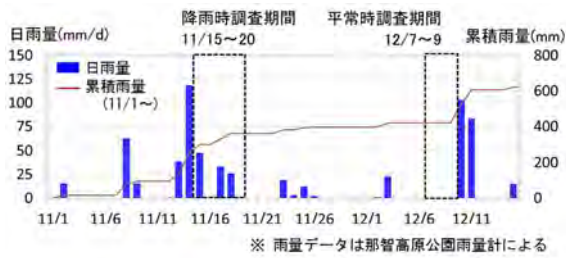


図-4 電気探査実施期間の降雨状況 (2015年)

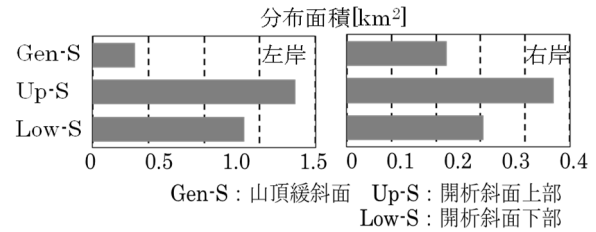


図-7 地形開析区分ごとの分布面積

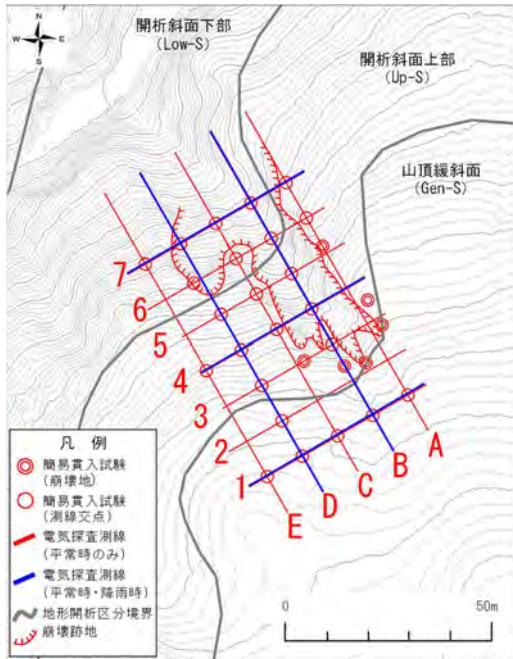


図-5 電気探査実施位置図

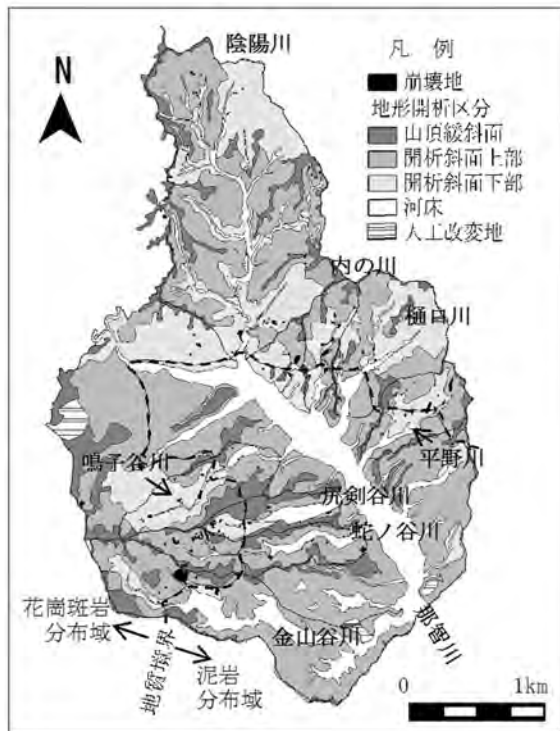


図-6 地形開析区分図

(2) 表層崩壊発生場の特性

1) 崩壊地特性

2011年の災害時、調査対象とした8溪流の花崗斑岩分布域では、空中写真判読の結果からおおよそ89箇所において表層崩壊の発生が確認された。本研究では、これらのうち61箇所にて現地調査を実施し、崩壊地の規模や形状、地形・地質状況の記載を行った。これより、那智川流域で発生した表層崩壊の崩壊特性は主に3つに区分することが出来る。それぞれの崩壊地の概念図を表-2にまとめる。なお、平均崩壊深とは、崩壊地の頭部及び側部(右側・左側)の3箇所における深さの平均的な値を指す。

表-2 那智川流域における表層崩壊発生形態

発生形態	地形開析区分	模式図
① 風化残積土の崩壊	山頂緩斜面	平均崩壊深 : 2.0m/1箇所
② 風化残積土および崩積土の崩壊	開析斜面上部	平均崩壊深 : 2.0m/24箇所
③ 落石を伴う崩積土の崩壊	開析斜面下部	平均崩壊深 : 2.1m/33箇所

風化残積土の崩壊は山頂緩斜面で見受けられた崩壊のタイプである。山頂緩斜面における崩壊地は2箇所あり、うち1箇所を確認された崩壊深は2.0m程度であった。崩壊面には締まりが良好な粘土質マサが分布し、コアストーンや岩屑を含んでいるものの、その含有率はほかの崩壊地と比べると低い。崩壊面には弱風化花崗斑岩が露出する。

風化残積土および崩積土の崩壊は主に開析斜面上部において見受けられる。地表部にある岩屑を含んだ崩積土、およびその下部にある球状風化を呈した風化残積土のうち脆弱部が崩壊したものである。崩壊面においてもコアストーンおよび節理が発達した強～弱風化岩露頭が確認できる場合がある。平均崩壊深は2.0mであった。

崩積土の崩壊は主に開析斜面下部で見受けられ、これと同時に崩積土直下に分布する、ゆるみが発達した花崗斑岩から落石状の崩壊を伴うことがあり、滑落崖には流入粘土を伴った節理の分布が確認された。平均崩壊深は2.1mであるが、落石を伴った崩壊も多く見受けられるため、土層は前述した2種類の崩壊よりも浅く分布していることが想定される。

また、一部では柱状節理など節理構造が発達した地域があり、これらが節理沿いに崩壊し、地表部にある風化残積土、崩積土と共に下流域へ流出した事例が見受けられた。そのため崩壊深は深く、崩壊頭部の最大崩壊深は18mになる。主に開析斜面下部で見受けられる。本研究では、表層崩壊の発生場を対象としているため、この崩壊形態は検討対象外として扱うこととする。

2) 花崗斑岩中に分布する節理構造

崩積土に伴って発生する落石状の崩壊は、花崗斑岩中に見られる節理構造によって規制されているものと考えることが出来る。そこで、本流域の花崗斑岩分布域から61箇所における節理の走向傾斜を計測し、コンターダイアグラムで整理した。その結果を図-8に示す。これより、本流域の花崗斑岩分布域は、主に南傾斜節理、北傾斜節理、南北方向の高角度節理が発達している様子がわかる。

開析斜面下部における崩壊地の滑落崖では、流入粘土を伴った開口節理を確認することができるため、表層崩壊に伴って発生した落石は、これらの節理が風化を受け、くさび状に緩んだ状態にある部分が崩壊したものと想定できる。

3) 崩壊地の地形的特徴

表層崩壊発生場の斜面形状を斜面型⁹⁾に分類した結果を図-9, 10に示す。表層崩壊が発生した地形は、開析斜面上部および下部に関わらず共に直線・谷型等斉斜面で多く発生している様子が見受けられた。

一方で左岸・右岸別に分類すると、左岸側では谷型等斉斜面で表層崩壊が多く発生している傾向が見られ、右岸側では直線等斉斜面の傾向が最も高く、次いで谷型等斉斜面での事例が多い。

そのため、表層崩壊発生場の斜面型は左岸・右岸で傾向が異なり、左岸側では集水地形において多くの表層崩壊が発生する傾向があるのに対し、右岸側では集水地形に限らずに表層崩壊が発生している状況が確認された。

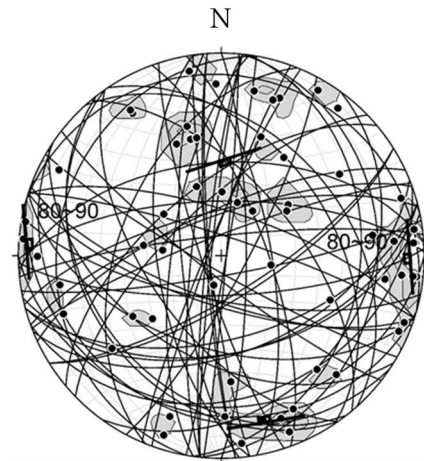


図-8 ステレオネットによる花崗岩斑岩分布域の割れ目系解析結果

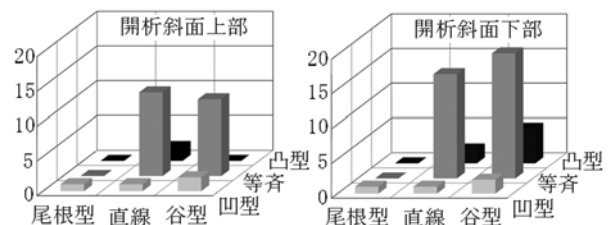


図-9 崩壊地の斜面型（開析区分別）

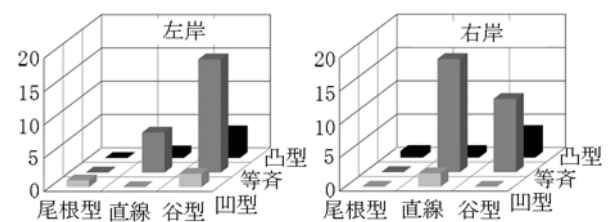


図-10 崩壊地の斜面型（左岸・右岸別）

(3) 地形開析区分と崩壊地分布

花崗斑岩分布域において分類した崩壊パターンは、山地の開析状況と概ね対比できる関係性があり、防府市剣川流域周辺と同様に、土層構造及び崩壊形態は山地の開析状況に規制されて発生しているものと考えられる。

図-11 に、調査対象とした 8 溪流における崩壊地密度 (個/km²) および崩壊面積率 (%) を地形区分別に示す。開析の進行度が相対的に低い右岸側では、開析斜面上部・下部での崩壊地密度・崩壊面積率共に同程度に多く、山頂緩斜面では著しく低い傾向が見受けられた。

一方、開析の進行度が高い左岸側では、開析斜面下部での崩壊地が最も多く、山頂緩斜面では崩壊地は分布しなかった。そのため、山地の開析進行状況が異なる左右岸では、表層崩壊発生場が異なる傾向を示していることが明らかとなった。

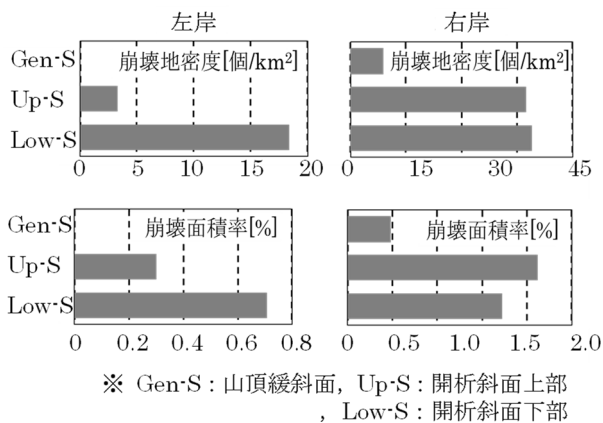


図-11 崩壊面積率と崩壊地密度

5. 土層厚の推定

(1) 平常時電気探査

測線 B・D の断面における比抵抗分布図を図-12 に示す。表層より 1m 程度下部には 2500~4000Ω・m 程度の比抵抗帯が分布する。開析斜面下部ではこの比抵抗帯は薄い、もしくは分布しない傾向が見られ、現地では露頭が広く分布し、土層が薄い状況が確認された。

山頂緩斜面から開析斜面上部にかけて、この比抵抗帯直下には高比抵抗部がレンズ状・帯状に分布する傾向が見られ、滑落崖周辺の地質状況を観察した結果、この高比抵抗部には土層厚に相当するコアストーンや巨礫を含む風化残積土、崩積土が分布していることが確認された。地表から高比抵抗部の下端までの厚さは、尾根周辺では 3~5m 程度である。その深部には低比抵抗帯が分布し、これは弱風化~未風化岩盤を指すものと考えられる。

(2) 比抵抗変化率と土層厚の推定

平常時と降雨時の比抵抗分布状況から、比抵抗変化率を(1)式により算出した。

$$\text{比抵抗変化率} [\%] = \frac{(\text{降雨時の比抵抗値})}{(\text{平常時の比抵抗値})} \times 100 - 100 \quad \dots(1)$$

降雨時と通常時の比抵抗値に変化が見られた場合、その要因は土層中に含まれる水分量にあることが想定される。このため、変化率が負の値となった表層部は雨水が浸透した範囲と判断できる。一方、深部で変化率が正の値となった範囲は、平常時電気探査を実施する前に行った降雨時電気探査実施直前の降雨が影響している可能性が考えられる。ここでは、崩壊跡地の崩壊深と概ね一致する比抵抗変化率 -10%以下の範囲を雨水浸透部、下部との境界を雨水浸透境界と呼ぶこととする。雨水浸透境界および簡易貫入試験による貫入深度の分布を図-12 に示す。雨水浸透部は、風化残積土や崩積土が分布すると考えられる高比抵抗帯の分布と概ね一致している。

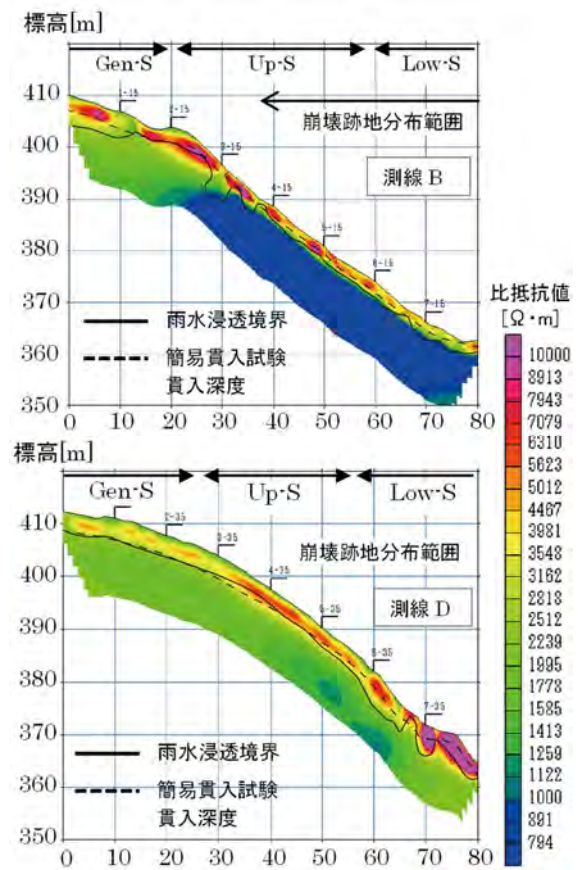


図-12 平常時電気探査結果および雨水浸透境界・簡易貫入試験貫入深度の分布

崩壊地調査の結果、那智川流域の表層崩壊の発生領域は、落石による崩壊を除けば、高比抵抗部に分布する風化残積土や崩積土で発生している。この範囲は雨水浸透部と概ね一致することから、降雨時に雨水が浸透しやすいと判断することができるため、土層厚に相当する領域であると想定される。

山頂緩斜面および開析斜面上部の一部では、電気探査で推定した土層分布は簡易貫入試験結果による土層分布と調和的な結果が見られた。これは、山頂緩斜面の土層中にはコアストーンや巨礫が多く含ま

れておらず、簡易貫入試験結果にばらつきが少なかったためと考えられる。

一方、開析斜面上部から開析斜面下部にかけては、高比抵抗帯、および雨水浸透境界より浅部で簡易貫入試験が貫入不能となっている地点が見られた。これはコアストーンや巨礫などの分布によって貫入不能となったためと考えられる。

以上より、球状風化を呈する地質帯や、礫などを多く含む土層では、電気探査を行うことにより、より高精度な土層厚を推定することが出来ると考えられる。

6. まとめ

本研究では、那智川流域の花崗斑岩分布域において、表層崩壊発生場の地形・地質的特性を考慮した上で土層厚の推定手法について検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- ・ 那智川流域は左右岸で山地の開析進行状況に違いが見受けられ、開析がより進行した左岸側では、山頂緩斜面は尾根沿いに細く分布し、開析斜面上部・下部の境界を成す浸食前線は上流側（山頂緩斜面直下）へ移動している様子が見受けられた。
- ・ 表層崩壊発生場の斜面型は、開析が進行した左岸側では集水地形で多く発生する傾向があるのに対し、右岸側では集水地形に関係なく、直線～谷型地形で多くの表層崩壊が発生する傾向が見られた。
- ・ 那智川流域の球状風化を呈する花崗斑岩分布域では、地形の開析程度に応じて土層構造および表層崩壊の発生形態が規制されていることが明らかとなった。
- ・ コアストーンが分布する地質帯の開析斜面上部・開析斜面下部では、土層厚調査に電気探査を併用することによって、その推定精度を向上させることが出来る。

参考文献

- 1) 松村和樹, 藤田正治, 山田孝, 権田豊, 沼本晋也, 堤大三, 中谷加奈, 今泉文寿, 島田徹, 海堀正博, 鈴木浩二, 徳永博, 柏原佳明, 長野英次, 横山修, 鈴木拓郎, 武澤永純, 大野亮一, 長山孝彦, 池島剛, 土屋智: 2011年台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.64, No.5, pp.43-53, 2012.
- 2) 宇都秀幸, 木下篤彦, 北川眞一, 大山誠, 小杉賢一朗, 内田太郎, 東原純, 矢野晴彦, 山下大輔, 加藤智久: 平成23年台風12号により発生した那智川流域における崩壊斜面の地質・水文的特性に関する研究, 平成25年度砂防学会研究発表会概要集, pp.A-80-81, 2013.
- 3) 松澤真, 木下篤彦, 高原晃宙, 石塚忠範: 花崗岩地域における土層構造と表層崩壊形状に与える山地の開析程度の影響, 地形, 36巻, 1号, pp.23-48, 2015.
- 4) 棚井敏雄・水野篤行: 紀伊半島東南, 熊野炭田附近の地質構造について: 紀伊半島南部の地史學的研究その1, 地質学雑誌, 60巻, 700号, pp.28-39, 1954.
- 5) 荒牧重雄, 羽田忍: 熊野酸性火成岩類の中部および南部の地質, 地質学雑誌, Vol.71, No.841, pp.494-512, 1965.
- 6) 久富邦彦: 紀伊半島東南部の熊野層群の地質と堆積, 地質学雑誌, Vol. 87, No.3, pp.157-174, 1981.
- 7) 荒牧重雄: 熊野酸性火成岩類の噴出様式, 地質学雑誌, Vol.71, No.842, pp.525-540, 1965.
- 8) 鈴木隆介: 現場技術者のための地形図読図入門 (3), 測量, 7月号, pp.43-52, 1977.

平成 23 年台風 12 号により発生した深層崩壊地の湧水の水質形成過程に関する研究

国立研究開発法人土木研究所
国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所

森加代子・林幸一郎・木下篤彦・水野秀明
今森直紀・田中建貴

1. はじめに

近年台風などがもたらす豪雨によって、深層崩壊が発生している。深層崩壊は天然ダムを形成し、その決壊などにより甚大な被害を引き起こす恐れがある。平成 23 年台風 12 号では、紀伊半島南部に甚大な被害を引き起こし、奈良県では深層崩壊とみなされる大規模崩壊が 54 箇所発生した。

深層崩壊は他の土砂災害と比べて発生頻度は少ないが、一度発生すると甚大な被害を引き起こす恐れがあるため、発生危険箇所の予測が求められる。深層崩壊発生危険箇所の予測手法として、渓流水及び湧水の電気伝導度に着目した手法が提案されている¹⁾。多くの深層崩壊地では多量の湧水が報告されており、非出水時ではこの湧水の流入により渓流水の電気伝導度が高くなると考えられている¹⁾。しかし、湧水、つまり、斜面から流出する地下水の電気伝導度が高くなるメカニズムについては、十分な研究がなされていない。そこで、本研究では、湧水の電気伝導度に変動を与える要因として、地下水が流動する過程で岩石から取り込むイオンに着目する。

そして、崩壊の起因となる岩石の破碎²⁾や地下水の影響³⁾による岩石からのイオン溶出特性について、平成 23 年台風 12 号のもたらした豪雨により深層崩壊が発生した奈良県赤谷地区及び栗平地区のボーリングコアを用いた溶出試験により明らかにするとともに、深層崩壊地の湧水の電気伝導度が高くなる条件と、電気伝導度の変動に関係するイオンの種類を明らかにする。

2. 試験の概要

(1) 試験対象地

試験対象地の位置を図-1 に示す。赤谷地区は、奈良県五條市大塔町に位置し、深層崩壊の規模は、崩壊長約 1,060m、幅最大約 350m、比高約 610m、崩壊深最大約 130m であった。地質は、白亜系四万十帯日高層群美山層 my2 ユニットと my3 ユニットに区分され、崩壊地は下位に頁岩優勢互層、上位に砂岩頁岩互層、砂岩優勢互層が分布する。冠頭部付近では、凝灰質頁岩が分布する。

栗平地区は、奈良県十津川村に位置し、深層崩壊

の規模は、崩壊長約 720m、幅最大約 600m、比高約 340m、崩壊深最大約 110m であった。地質は、白亜系四万十帯日高層群美山層 my4 ユニットに区分され、下位に頁岩、頁岩優勢互層、上位に砂岩優勢互層、砂岩が分布する。

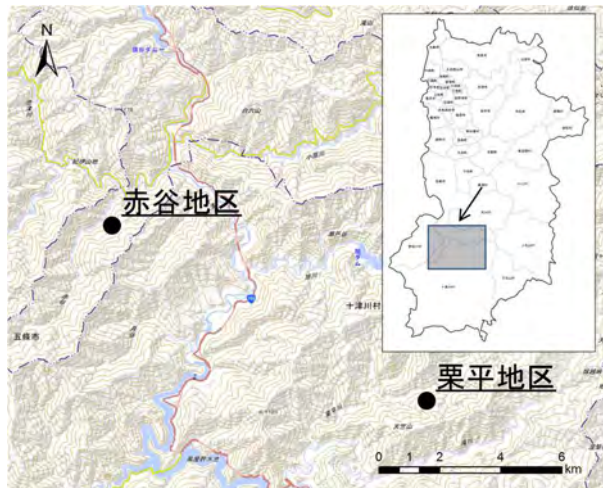


図-1 試験地位置図

(2) 試験試料

今回の試験では、図-2 に示す赤谷地区 3 箇所、栗平地区 2 箇所のボーリング孔のコアを用いた。ボーリング孔は、既往のボーリング調査結果及び地下水位観測で得られた水位上昇開始時間の遅延から想定される地下水流動経路において、赤谷地区では上・中・下流、栗平地区では上・下流に位置するものを選択した。

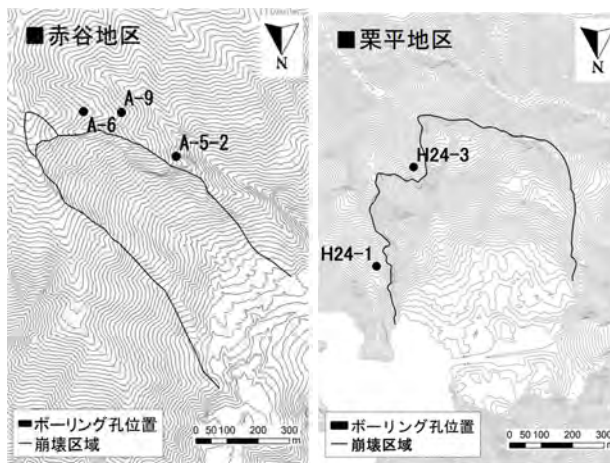


図-2 ボーリング孔位置図

試験に用いた試料の一覧を表-1に示す。破碎度は、脇坂ら⁴⁾の方法により区分を行った。岩石の破碎による比較は、破碎状試料とその周辺の塊状試料を対象に、地下水の存在による比較は、地下水形成区間と地下水変動区間の試料を対象に実施する。

地下水形成区間は地下水が常時形成されている区間を、地下水変動区間は豪雨によって地下水位の変動が見られる区間を意味する。また、地下水の有無については、観測結果による最低地下水位近くまたは以深に位置するかで決定している。今回用いた地下水位の観測結果は、出水期から渇水期にわたる長期的な観測であるため、地下水形成区間では地下水位の季節性変動を加味しても地下水が常時形成されている。

表-1 試験試料一覧

ボーリング孔	試料No	岩種	採取深度	試料状態	地下水	破碎度	溶出期間	
赤谷	A-5-2	A-5①-1	砂岩	72.8m	破碎	無	Cr3	28日
		A-5①-2	砂岩	72.2m	塊	無	-	5日
		A-5②-1	砂岩	80.5m	破碎	有	Cr1b	28日
		A-5②-2	砂岩	81.5m	塊	有	-	5日
	A-6	A-6①-1	砂岩	45.1m	破碎	無	Cr1b	28日
		A-6①-2	砂岩	45.4m	塊	無	-	5日
		A-6②-1	砂岩	72.8m	破碎	有	Cr1b	28日
		A-6②-2	砂岩	73.9m	塊	有	-	5日
	A-9	A-9①-1	砂岩	49.5m	破碎	無	Cr2	28日
		A-9①-2	砂岩	48.1m	塊	無	-	5日
		A-9②-1	砂岩	63.8m	破碎	有	Cr1b	28日
		A-9②-2	砂岩	62.7m	塊	有	-	5日
A-9③-1		頁岩	60.7m	破碎	無	Cr1a	28日	
A-9③-2		頁岩	62.4m	破碎	有	Cr1b	28日	
栗平	H24-1	K-1①-1	頁岩	47.6m	破碎	無	Cr1a	28日
		K-1①-2	頁岩	47.8m	塊	無	-	28日
		K-1②-1	砂岩	50.1m	破碎	無	Cr1a	28日
		K-1②-2	砂岩	50.3m	塊	無	-	5日
	H24-3	K-1③-1	砂岩	66.9m	破碎	有	Cr1a	28日
		K-1③-2	砂岩	66.5m	塊	有	-	28日
		K-3①-1	砂岩	60.5m	破碎	無	Cr2	28日
		K-3①-2	砂岩	61.7m	塊	無	-	5日
		K-3②-1	砂岩	83.9m	破碎	有	Cr1a	28日
		K-3②-2	砂岩	83.3m	塊	有	-	5日

表-2 溶出試験内容

試験項目	溶出試験
分析項目	ナトリウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、塩化物イオン、炭酸水素イオン、硫酸イオン、イオン状シリカ、pH試験、電気伝導度試験
溶媒水	pH6.0の純水。 試料と溶媒水の液固比は1:10。
溶出期間	破碎状コア: 1, 3, 5, 14, 28日後に採水して分析。 塊状コア: 1, 3, 5日後に採水して分析。溶出量の多い試料(砂岩・頁岩1つずつ)は、14, 28日後も採水して分析。
溶出方法	1~5日目は溶媒水を1回/分の頻度で攪拌。 5日目以降は攪拌を行わず、試料を静置。

(3) 試験内容

溶出試験の内容を表-2に示す。溶出期間1~5日では、実際の地下水の流れと地盤状況を考慮するた

め、通常の短期溶出試験とは異なる攪拌頻度を設定し、試料の粉碎は行わない。その後、溶出期間5~28日では、溶出量と経過時間の関係を見るため、通常のタンクリーチング試験よりも多い採水回数を設定した。また、岩石に含まれる物質を定性的に評価し、溶出の基本特性を把握するため、底質調査方法による含有量試験を実施する。

3. 試験結果

(1) 溶出試験

1) 現地調査結果との比較

ボーリング孔から採取した地下水(以下、孔内水という。)の水質分析結果と今回の溶出試験結果について図-3に示す。ボーリング孔A-6、A-9、K-1では、孔内水と溶出試験結果のイオン濃度の相関性が特に高く、イオンの量比に類似性が見られた。このことから、この試験地の地下水の水質は岩石から溶出したイオンによって形成された可能性が高い。今回の試験地において、溶出試験によるイオン溶出特性の把握は妥当であると言える。

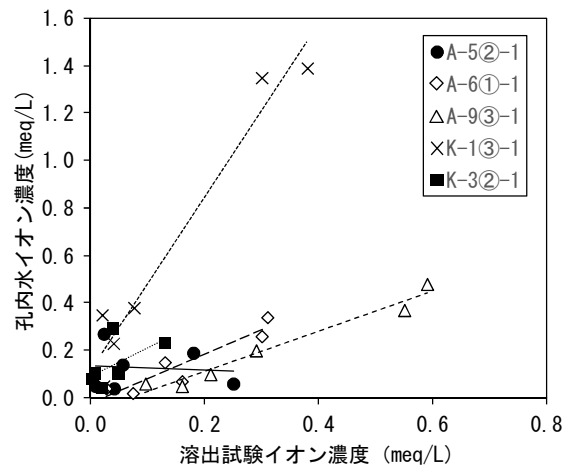


図-3 孔内水と溶出試験の水質比較

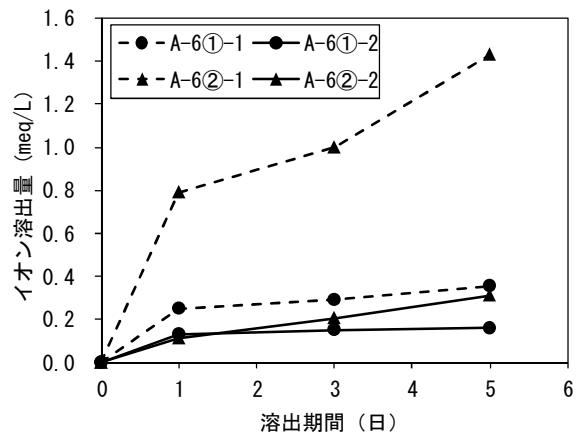


図-4 溶出期間とイオン溶出量の関係の例

2) 溶出期間によるイオン溶出量の傾向

例として、ボーリングコア A-6 の試料における溶出期間とイオン溶出量の関係を図-4 に示す。イオン溶出量は Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} の濃度の和である。(以下、すべてのイオン溶出量はこの和を示す。) イオンの溶出は 4 試料とも 1 日目が最も多く、その後の溶出速度は緩やかとなるが、経過時間に比例してイオン溶出量は増加する。今回用いたどの試料においても、同様の傾向が見られたことから、岩石からのイオン溶出は溶出期間に伴い多くなることがわかった。

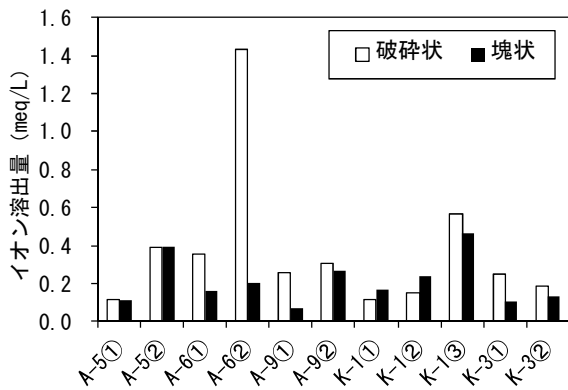


図-5 試料形状による比較 (イオン溶出量)

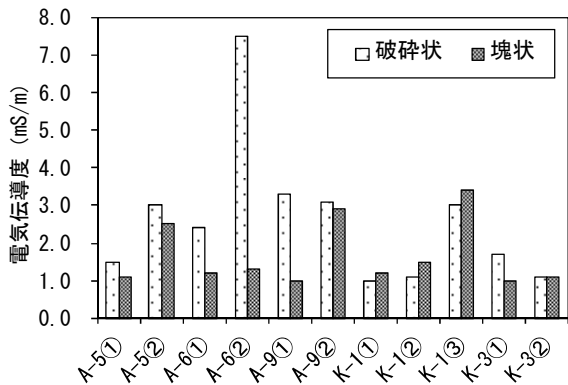


図-6 試料形状による比較 (電気伝導度)

3) 試料形状によるイオン溶出量の傾向

試料形状の違いによるイオン溶出量の関係を図-5 に示す。試験結果は 5 日時点のものである。破砕状試料は塊状試料と比較して、イオンが溶出しやすい傾向にあることがわかった。図-6 に示すとおり、電気伝導度についても同様の傾向が得られた。

一方で、試料 K-1①と K-1②は塊状試料がより溶出しやすい結果となった。また、K-1③についても 28 日時点のイオン溶出量は、破砕状試料で 0.83meq/L、塊状試料で 2.00meq/L となり、最終的には塊状試料の溶出量が上回る結果となった。ボーリング孔 H24-1 の塊状試料には、他の試料とは異

なり、表面に白色脈が多く存在し、ボーリング調査結果より、この白色脈は方解石脈であることがわかっていて、方解石といった炭酸塩は、水による溶出が非常に進行しやすい鉱物であるため⁸⁾、この方解石脈の影響により、塊状試料の溶出が破砕状試料を上回る結果となったと考えられる。岩石に方解石が多く存在する場合は溶出特性に影響を及ぼすことがわかった。

4) 地下水の存在によるイオン溶出量の傾向

地下水の有無によるイオン溶出量の関係を図-7 に示す。試験結果は 28 日時点のもので、試料形状は破砕状である。地下水が存在する箇所の岩石は存在しない場合と比較して、イオンが溶出しやすい傾向にあることがわかった。図-8 に示すとおり、電気伝導度についても同様の傾向が得られた。

一方で、ボーリング孔 A-9 の A-9③及び H24-3 の試料においては、その他のボーリング孔の結果と逆転している。これらの試料には、亀裂に方解石や褐鉄鉱、シリカなどの鉱物及び岩片・粘土などからなる充填物を挟むものと挟まないものがあり、充填物を挟む試料において溶出量が多い結果であった。亀裂の充填物は溶出特性に影響を及ぼすことがわかった。

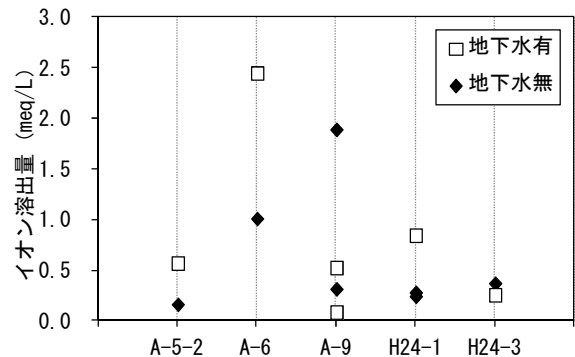


図-7 地下水の有無による比較 (イオン溶出量)

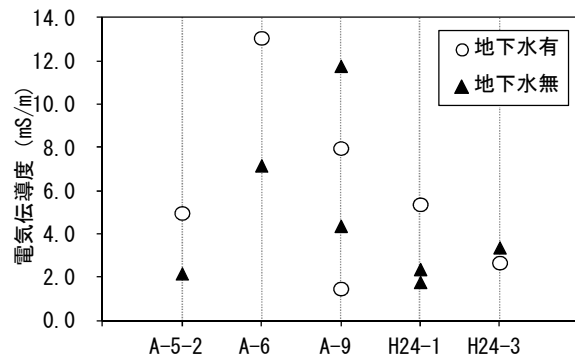


図-8 地下水の有無による比較 (電気伝導度)

(2) 含有量試験

破砕状試料の含有量試験結果について、赤谷地区を図-9に、栗平地区を図-10に示す。結果から、赤谷地区ではシリカ>Na>K>Mg>Caの順に、栗平地区ではシリカ>Na及びK>Mg>Caの順に多く、含有成分は同様の傾向を示した。ただし、ほとんどはシリカが占めている。

含有量と溶出量の比をとると、溶出のしやすさは $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > Ca^{2+}$ の順であり、含有量の最も多いシリカはほとんど溶出していないことがわかった。このことから、岩石からの溶出は含有量と比例を示すような、一様な溶出特性にはないことがわかった。

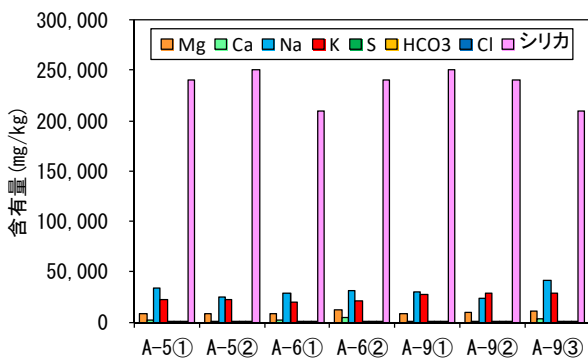


図-9 含有量試験結果（赤谷地区）

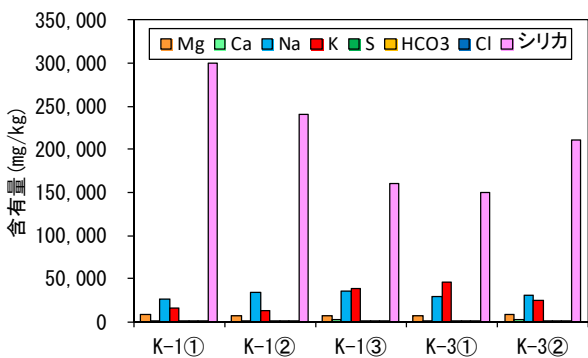


図-10 含有量試験結果（栗平地区）

(3) 試験結果まとめ

今回実施した溶出試験の結果、①岩石が水に接する時間が長い、②岩石が塊状ではなく破砕状である、③岩石が常時地下水位以下に存在する場合に、イオン溶出量が多くなる傾向にあることがわかった。電気伝導度についても同様の傾向が見られ、図-11に示すとおり、イオン溶出量と電気伝導度は比例を示すことから、イオン溶出量が多くなる場合は電気伝導度が高くなることがわかる。したがって、地下水の流動過程で接する岩石と①～③のような条件を満たす場合に、電気伝導度は高くなる可能性が高い。

また、含有量試験結果から、含有量の大小と各イオンの溶出しやすさは関係しないことがわかった。各イオンの溶出量が含有量に対して一様でないことから、電気伝導度の変動に大きく影響を与えるものと、そうでないイオンが存在すると考えられる。そこで、各イオンと電気伝導度の相関性について考察し、電気伝導度の変動を把握する際の指標として有効なイオンを明らかにする。

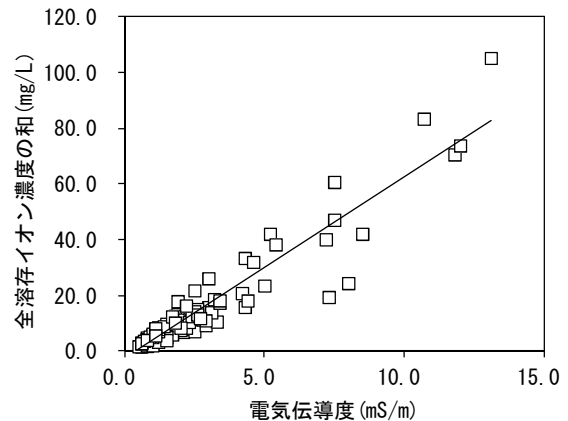


図-11 イオン溶出量と電気伝導度の関係

4. 溶存イオンと電気伝導度の関係

各イオンと電気伝導度との関係について、赤谷地区を図-12に、栗平地区を図-13に示す。

赤谷地区では $Mg^{2+} > Ca^{2+} > HCO_3^- > Na^+ > K^+ > Cl^- >$ イオン状シリカ $> SO_4^{2-}$ の順に、栗平地区では $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > SO_4^{2-} > HCO_3^- > Na^+ > Cl^- >$ イオン状シリカの順に電気伝導度との相関が高い。この結果から、陽イオンは陰イオンに比べて電気伝導度との相関が高いことがわかった。一般的に、陽イオンである Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} は水と二酸化炭素との反応によって岩石から溶出するが、陰イオンである Cl^- と SO_4^{2-} は岩石にほとんど含まれないため、岩石以外の起源からの由来が多い⁹⁾。したがって、 Cl^- と SO_4^{2-} の溶出量は Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} に比べて少量となることから、電気伝導度との相関が低くなると予想される。今回の結果についても、含有量の影響により電気伝導度との相関が低くなったと考えられる。また、 HCO_3^- は、陽イオンが溶出する際の水と二酸化炭素の反応により溶出するため、電気伝導度との相関が高いと考えられる。イオン状シリカについては、含有量は非常に多いが溶出しにくいいため、電気伝導度との相関が低いと考えられる。

溶出試験及び含有量試験結果より、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} は溶出しやすいことがわかっていて、含有量の関係から Cl^- と SO_4^{2-} の溶出量は少なく、 HCO_3^- と Ca^{2+} の溶出量は多くなると言える。

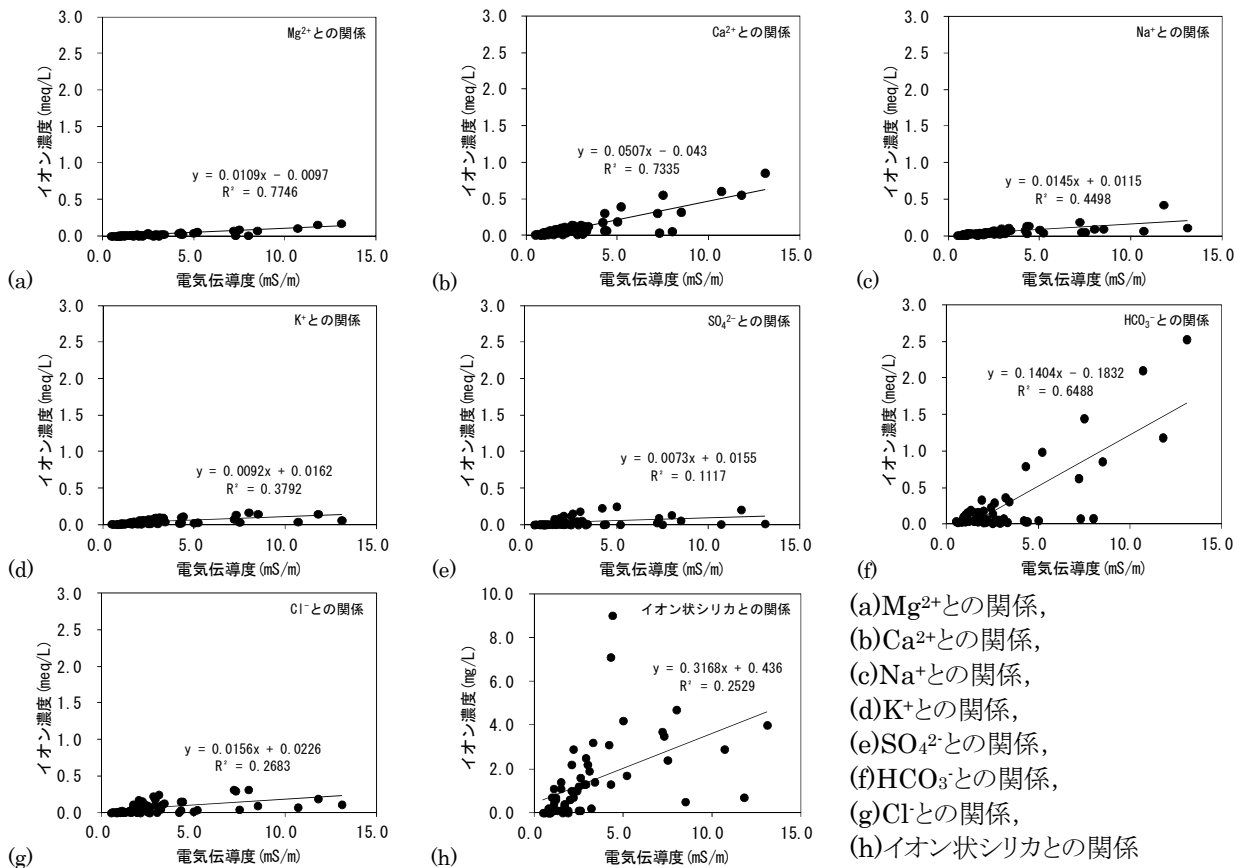


図-12 各溶存イオンと電気伝導度の関係（赤谷地区）

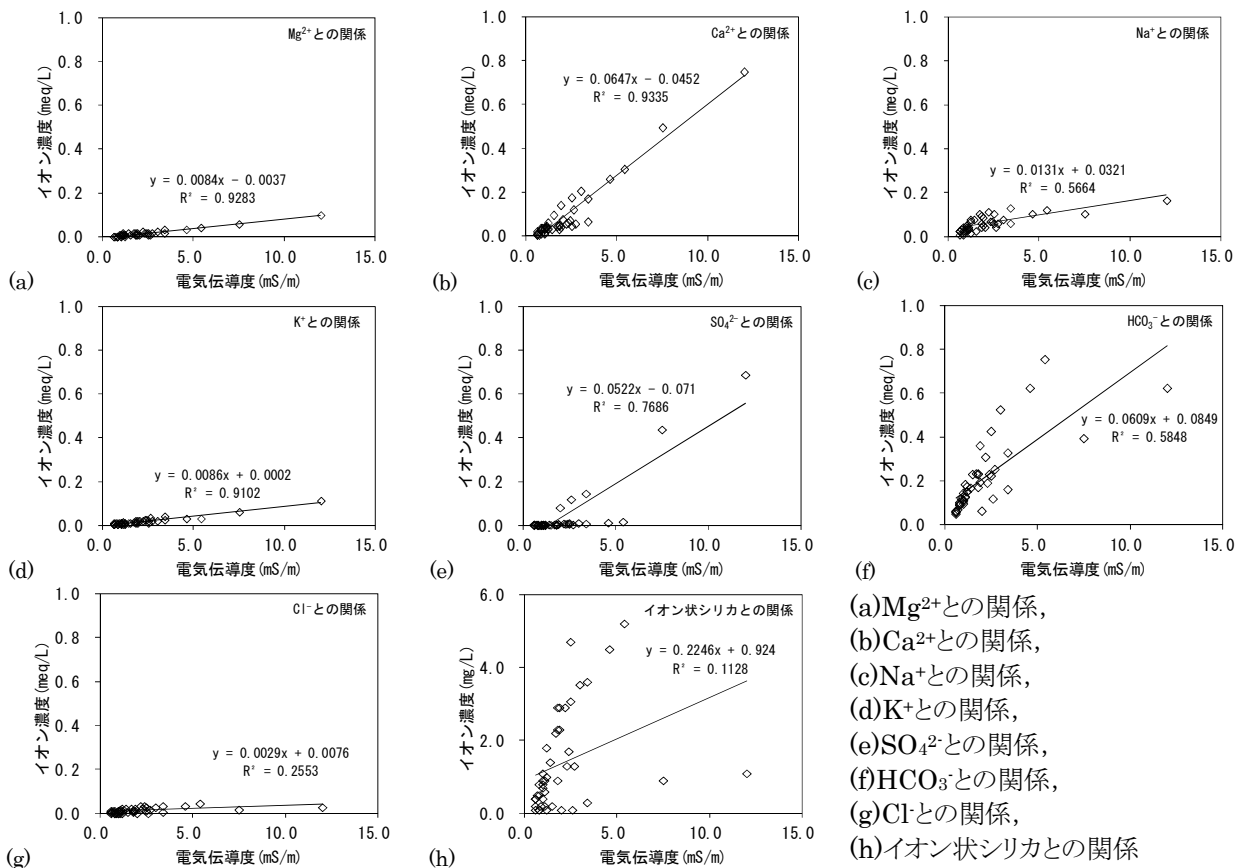


図-13 各溶存イオンと電気伝導度の関係（栗平地区）

イオン溶出量が多くなると電気伝導度が高くなることから、 HCO_3^- と Ca^{2+} は電気伝導度との関係性が高いと考えられる。

以上より、電気伝導度との相関が高く、イオン溶出量が多くなると考えられるイオンは、 HCO_3^- と Ca^{2+} であることがわかった。今回の試験結果では、栗平地区の SO_4^{2-} についても溶出量が多く、電気伝導度との相関が高い。ただし、赤谷地区では溶出量も少なく、電気伝導度との相関も低い。2つの地区において同様の傾向を示さなかったことから、 SO_4^{2-} が指標として有効であると判断するのは難しいと考える。

したがって、電気伝導度の変動を把握する際には、 HCO_3^- と Ca^{2+} が指標として有効となる可能性が高い。

5. まとめ

本研究では、深層崩壊地のボーリングコアを用いた溶出試験を実施し、岩石からのイオン溶出特性の把握を行った。

その結果から、深層崩壊地の湧水の電気伝導度が高くなる条件と、電気伝導度の変動に関するイオンを明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- 溶出試験結果から、①岩石が水に接する時間が長い、②岩石が塊状ではなく破砕状である、③岩石が常時地下水位以下に存在する場合に、岩石からのイオン溶出量が多くなる。また、イオン溶出量が多くなる場合は電気伝導度が高くなることから、地下水流動過程で接する岩石と上記①～③の条件を満たす場合に、地下水の電気伝導度が高くなる可能性が高い。
- 電気伝導度の変動を把握する際の指標として有効となる可能性の高いイオンは HCO_3^- と Ca^{2+} である。

今回得られた結果より、岩石の破砕などによって地下水の電気伝導度に変動することがわかった。岩石の破砕程度による電気伝導度の特性を把握することにより、斜面の重力性変形を引き起こす破砕の進行レベルを判断できる可能性がある。しかし、地形地質などの要因によって電気伝導度の特性は多様であることが予想される。

今後は検証事例を増やし、電気伝導度の特性に関する知見の蓄積を図りたい。

参考文献

- 1)地頭菌隆, 下川悦郎, 寺本行芳: 深層崩壊発生場予測法の提案—鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして—, 砂防学会誌, Vol.59, No.2, pp.5-12, 2006.
- 2)北野康, 加藤喜久雄, 金森悟, 金森暢子, 吉岡龍馬: 水質調査による岩石崩壊の予知の可能性, 京都大学防災研究所年報, No.10 A, pp.557-587, 1967.
- 3)中川鮮, 奥西一夫: 高知県繁藤地区の大規模崩壊について(その1)—崩壊地の地盤構造の特徴—, 京都大学防災研究所年報, No.20 B-1, pp.209-222, 1977.
- 4)脇坂安彦, 上妻睦男, 綿谷博之, 豊口佳之: 地すべり移動体の特徴づける破砕岩—四万十帯の地すべりを例として—, 応用地質, 第52巻, 第6号, pp.231-247, 2012.
- 5)田中芳則: 方解石の溶出に伴う泥岩の組織と物性の変化, 応用地質, 26巻, 3号, 1985.
- 6)北野康, 中村誠佑: 日本の主要河川流域において1年間に風化変質する鉱物および生成する粘土の量—河川水の化学組成に基づいた推定—, 自然災害科学資料解析研究, vol.2, pp.11-29, 1975.

和歌山県那智川流域における斜面崩壊面積と土石流規模の推定

北海道大学

笠井美青・柳井一希

1. はじめに

近年、土石流により多数の死者が出る災害が頻発している。土石流の発生の一因として豪雨に伴い発生した崩壊から土砂が溪流へ流入がある。特に崩壊からの生産土砂量が多い場合には、土石流の量も大きくなり、被害が甚大になる傾向にある。そのため、土石流のトリガーとなる崩壊危険斜面の分布及び面積の予測を行い、起こりうる災害に対してあらかじめ何等かの対策を講じることが、土砂災害の防止もしくは軽減のために重要となる。現在、崩壊危険斜面の分布を示した landslide susceptibility map (以下 LSM) の作成は、崩壊や地すべりが発生しやすい地域では一般的に行われているが、斜面からの生産土砂量や、土石流量まで推定を行っている例は稀である。

そこで本研究では、平成 23 年 9 月の豪雨により表層崩壊が多発し、土石流災害が発生した和歌山県那智川流域を対象に、まず LSM を作成する。そして、LSM 上で示された危険度の高い斜面について、発生しうる崩壊の最大面積を予測し、大規模な土石流災害が今後起こりうる溪流を抽出することを目的とした。

2. 研究対象地

和歌山県那智川流域は流域面積 24.8km² であり、流域内の最高点は 937m である。地質は上流域に花崗斑岩域、下流域に堆積岩域が存在する。1981 年から 2010 年までの新宮観測所での年平均降水量は 3,127mm である。

平成 23 年 9 月に、台風から流れ込んだ雨雲により 3 日間の総降水量が 1,000mm を超え、地質の境界付近で表層崩壊が多発した。この崩壊に起因して、少なくとも 8 支流流域 (金山谷川、尻剣谷川、蛇の谷川、鳴子谷川、平野川、樋口川、内の川、陰陽川) で土石流が発生し、那智川本川に流入・氾濫することで、死者行方不明者 28 名の犠牲者が出た。この時、ほとんどが土石流によるものと考えられる、各流域からの発生土砂量は、樹木が伐採されたことで裸地が多かった鳴子谷川と尻剣谷川以外では、最大崩壊面積と比例していた (図-1、国土交通省近畿地方整備局資料より作成)。発生土砂量が最も多かった

金山谷川流域での最大崩壊面積は約 6,000m² であった。

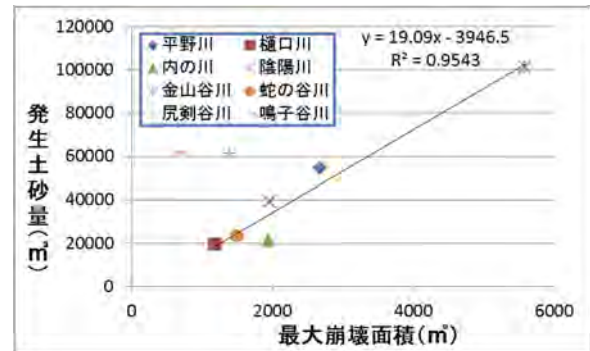


図-1 最大崩壊面積と流域からの発生土砂量との関係

3. 方法

LSM の作成には、崩壊を引き起こす要因をまず選択する必要がある。ここでは災害報告 (北川・大山 2013、国土交通省近畿地方整備局資料) や現地での観察をもとに、地質境界からの水平距離・流路からの水平距離・勾配・曲率・斜面方位を用いた。それぞれの値は、平成 24 年計測 4 月取得の航空レーザー測量データから作成した 10m セルサイズの DEM を用い GIS 上で算出した。これらの値と崩壊地の位置との関係は WOE (Weight of Evidence) 法から求めた。崩壊地は平成 24 年度に撮影されたオルソ写真および上述の航空レーザー測量データより作成した 1m セルサイズの勾配図から判読した。この関係から求められた各斜面の崩壊危険度を very high、high、medium、low、very low の 5 段階で評価し、各カテゴリーのセル数が同じになるよう区分した。各斜面の危険度は、ROC 曲線を作成し、AUC 値を求めて検証を行った。また崩壊面積については、流水による脚部の浸食による影響を考慮した。これは、崩壊しやすい素因を持つ斜面が流路に接している場合に、大面積の崩壊が発生することが現地で観察されたからである。ここでは流水の浸食力の指標として unit stream power (USP, Bagnold, 1966) を簡易的に表した $\Omega' = AS/W$ (A: 流域面積 S: 勾配 W: 川幅) を用いた。ここで流域面積と勾配は 10m セルサイズの DEM を用いて算出した。また、川幅の測定には 1m セルサイズの DEM から算出した勾配図を用いて GIS 上において、崩壊地の直上流部が

発生前の川幅であると仮定して計測した。崩壊危険度が高い斜面の USP と崩壊面積との関係を求めるにあたり、標本数を増やすため、平成 23 年 9 月以前に発生した陰陽川の崩壊跡地も加えた。崩壊跡地は 1m セルサイズの DEM から作成した勾配図から抽出した。崩壊跡地は、昭和 22 年撮影の空中写真では植生が繁茂していたため、それより古い時代の崩壊であると判断した。

4. 結果

LSM では地質の境界付近に加え、境界以外の範囲で起こった崩壊箇所も抽出できていた (図-2)。後者の斜面では、急勾配かつ集水地形といった危険箇所を示す特徴が反映されていた。危険度評価については、AUC 値が 0.895 と高い値を示し、推定精度は高いと考えられる。一方、崩壊危険度が very high および high と評価された、流路沿いの斜面を対象に USP と崩壊面積の関係を調べたところ、USP が大きいほど発生する崩壊の面積が大きくなった (図-3)。ここで図-1 と図-3 で示した関係を組み合わせると、USP が 0.02 以上の箇所では発生土砂量 70,000 m³以上、USP が 0.008 から 0.02 の箇所では発生土砂量 30,000 から 70,000m³、USP が 0.008 以下の箇所では発生土砂量 30,000 m³以下と推定される (図-4、図-5)。樋口川・内の川・陰陽川・那智川本流域では、発生土砂量の推定値が災害時の流域からの発生土砂量よりも大きかった。

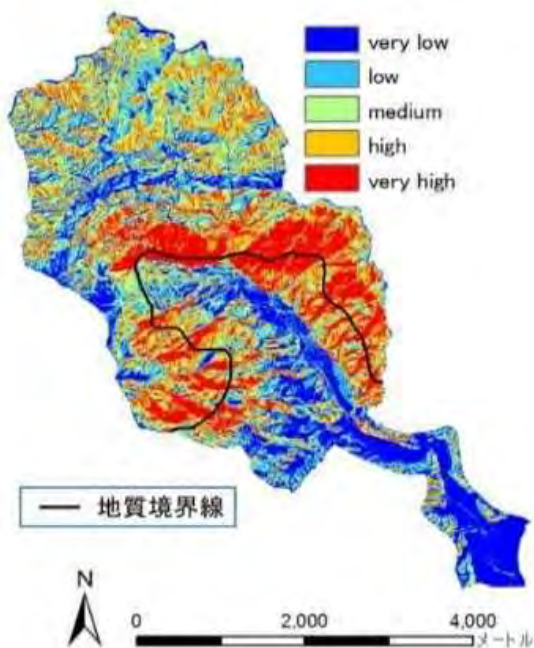


図-2 那智川流域の LSM

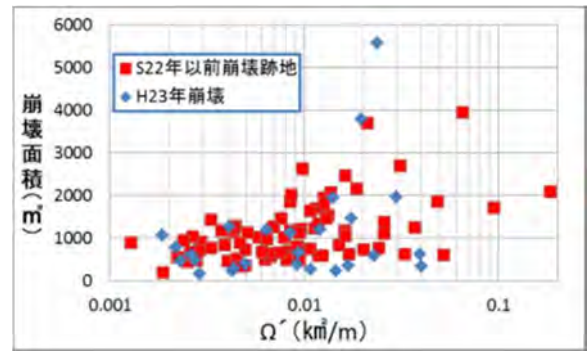


図-3 USP と崩壊面積との関係

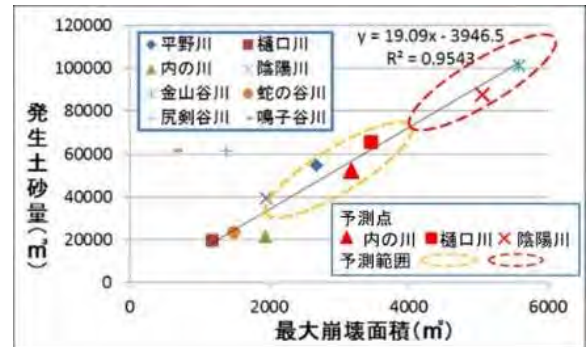


図-4 各支流の推定最大崩壊面積と発生



図-5 推定最大崩壊面積から予測される各支流からの発生土砂量の分布

5. 考察

本研究手法を那智川流域で適用できた理由としては、地形が急峻、かつ花崗斑岩の風化も進んでいることから、崩壊しやすい素因を有する箇所が多く存在することが挙げられる。それにより、斜面脚部の浸食によって崩壊を誘発されると崩れやすくなる斜面が多く出現し、一度崩れだしてしまうと連鎖的に崩れることで大面積での崩壊が発生したと思われる。

る。そのため那智川流域では斜面脚部の浸食力によって崩壊規模（面積）が規定されやすくなっていることが考えられた。

発生土砂量の推定値が災害時の値より大きい支流域は、昔の崩壊跡は確認されるものの、災害時には花崗斑岩の風化があまり進んでいなかったことで大規模な崩壊が発生しなかったことも考えられる。

また、裸地面積の大きい尻剣谷川と鳴子谷川は災害時の大雨の表面浸食による土砂生産に加えて、災害前の降雨で裸地から土砂生産が行われ、他流域と比べて河床に多くの不安定土砂が堆積し、それらを土石流が巻き込んだことで崩壊規模が小さくても、土石流が大規模化したと考えられる。そのような流域に対しては裸地の表面浸食の影響を考慮して生産土砂量の推測を行った上で、流域からの発生土砂量の推定をすることが望ましい。

土石流によって運搬される大径流木が木製耐力壁に作用する衝撃力

三重大学大学院生物資源学研究所
前三重大学生物資源学部

西山良樹・山田孝
内田康太

1. はじめに

近年の土砂災害では、大径流木が木造家屋の耐力壁に衝突し、土砂災害警戒区域において、被害を拡大したと見られる事例が報告されている（吉留ら、2015）。しかしながら、現在の土砂災害警戒区域の設定には流木の衝撃力は考慮されていない。流木が砂防堰堤や鋼管部に衝突する時の衝撃力に関する研究成果（鈴木ら、1987, 石川ら、1990）や津波によって運搬される流木の衝撃力の実験的・理論的研究成果（松富ら、1999）はあるが、木造家屋に衝突する時の衝撃力に関する研究事例は報告されていない。

本研究では、昨年度の実験（内田ら、2016）に引き続き、フルスケールの木製耐力壁への原木丸太衝撃実験（自由落下試験）を実施し、木製耐力壁の破壊形態と破壊限界を調べた。さらに、ロードセルと変位センサーから得られた波形データや衝撃時間、変位などから、原木丸太が木製耐力壁に衝突した際の無次元衝撃力算定式を提案した。

本研究の実施にあたり、平成 28 年度国土交通省河川技術研究開発制度指定課題分野（砂防）「火山地域における流木を伴う山腹崩壊の発生と流動」（研究代表者：北海道大学大学院農学研究院 丸谷知己）による助成を受けた。

2. 研究方法

三重大学平倉演習林第二土場において、原木丸太（杉）を木製耐力壁に動的載荷、衝突（自由落下）させる実験を行った（図-1）。

使用した丸太は直径 0.3m、長さ 4m 程度、質量約 220kg であり、木製耐力壁（幅 182cm、長さ 298cm）は標準タイプの圧縮筋交耐力壁（木造建築研究フォーラム編、1995）を制作した。動的載荷重と衝撃荷重の測定は、ゲージ式ロードセル（最大耐荷重 200kN（株）昭和測器）、変位センサーは、キーエンス社の製品を用いた。

はじめに、実験Ⅰ（木製耐力壁への丸太衝撃実験自由落下高 $h=10\sim 50\text{cm}$ ）を行い、木製耐力壁の破壊限界自由落下高と壁の破壊形態を調べた。次に実験Ⅱ（ $h=2.5\sim 40\text{cm}$ ）では、予備実験（地面に設置したロードセルへの丸太衝撃実験）からロードセル

受板と台座の構造・材質を決定し、ロードセルを木製耐力壁に設置して、丸太衝撃実験を行った。木製耐力壁直下の地盤に変位センサーを設置し、壁の変位の時間的な変化を計測した。

このようにして得られた波形データ、衝撃応答時間、変位などから、力積と運動量の変化の比較や衝撃エネルギー吸収能の算出などを行い、原木丸太が木製耐力壁に衝突した際の無次元衝撃力算定式を提案した。

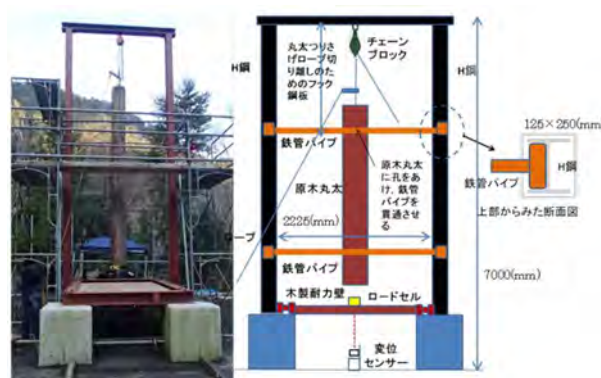


図-1 実験施設の概要

3. 結果と考察

実験Ⅰから、自由落下高の増加により、壁の変形は、たわみ→亀裂→局部的曲げ破壊→貫入といった破壊形態を呈することが分かった。 $h=10\text{cm}$ では破壊が起こらず、 $h=15, 20\text{cm}$ では、壁の横材に最大で長さ 110cm、幅 6mm の亀裂が見られた。 $h=30, 40\text{cm}$ では、横材が局部的に曲げ破壊され、室内側へ最大 5cm 変形した。 $h=50\text{cm}$ では、丸太が壁を突き破って貫入し、室内側へ最大 41cm 変形した。以上の結果より、 $h=10\sim 15\text{cm}$ の間に破壊限界自由落下高が存在することが分かった（破壊限界速度 1.40～1.71 (m/s) の間）。

実験Ⅱでは、得られた荷重の波形データの形には違いが見られ、 $h=2.5\text{cm}$ では波形のピークが二山になっており、 $h=5\sim 40\text{cm}$ では台形となった（図-2）。変位の波形データは三角形を呈し、変位の波が立ち上がり始めてから半周期の終わりまでを「変位応答時間」、ピークまでを「最大変位応答時間」とした。また荷重の波が立ち上がり始めてから半周期の終わ

りまでを「衝撃荷重応答時間」、最初に現れるピークまでを「最大衝撃荷重応答時間」とした。自由落下高と最大衝撃荷重等との関係を図-3 に示す。グラフから、最大衝撃荷重は自由落下高 h の増加に伴って増加していき、 $h=20\text{cm}$ から増加の程度が小さくなるのが分かった。

これは $h=20\text{cm}$ から壁の破壊領域が、たわみ領域から亀裂・曲げ破壊領域になったことで、衝撃エネルギーの、曲げ破壊に消費されるエネルギーとして散逸する程度が増大したためと考えられる。また最大衝撃荷重は最大で約 14kN ($h=40\text{cm}$) となり、動的载荷の約 5.7 倍であることが分かった。最大変位についても、自由落下高の増加に伴って増加することが分かった。計測された最大変位は $7.6\sim 125\text{mm}$ となった。衝撃载荷における最大衝撃荷重応答時間は $0.04\sim 0.06$ 秒、衝撃荷重応答時間は 0.02 秒、最大変位応答時間は $0.08\sim 0.1$ 秒、変位応答時間は $0.2\sim 0.3$ 秒となり、変位の応答時間は衝撃荷重よりも $0.03\sim 0.1$ 秒遅れることが分かった。

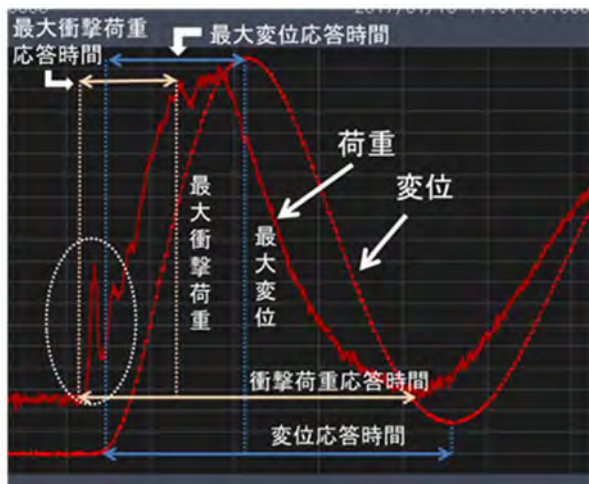


図-2 得られた波形データ ($h=5\text{cm}$)

図-3 (図内の数字は自由落下高を表す) に力積と運動量の変化を比較した結果を示す。力積の算出に使用した Δt は「最大衝撃荷重応答時間」とした。 $h=20\text{cm}$ 以降から値の差が比較的大きくなり始めることから、 $h=20\text{cm}$ から木製耐力壁の破壊形態の影響が大きく関わるようになって考えられる。

本研究では、弾性応答領域に近い領域では、原木丸太の衝撃荷重が作用することによる木製耐力壁の応答を 1 質点系モデルで表せるとし、最大衝撃荷重が作用した時の最大変位を 1 質点系モデルによって算出し、実験で計測された最大変位 δ を比較した。モデルによる最大変位の算出には (6) 式を使用した (石川ら、2008)。固有振動数 ω は壁の固有周期 T (実験で得られた衝撃荷重の減衰波形から算出) から算出した。

$$u = \frac{P_{\max}}{M\omega^2} \left(\frac{t}{t_0} - \frac{1}{\omega t_0} \sin \omega t \right) \quad \dots (6)$$

$$(0 \leq t \leq t_0)$$

ここに、

P_{\max} : 最大衝撃荷重 (kN)、 M : 質量 (kg)、

ω : 固有振動数 (s⁻¹)、 t : 任意の時間 (s)

t_0 : 最大衝撃荷重応答時間 (s)

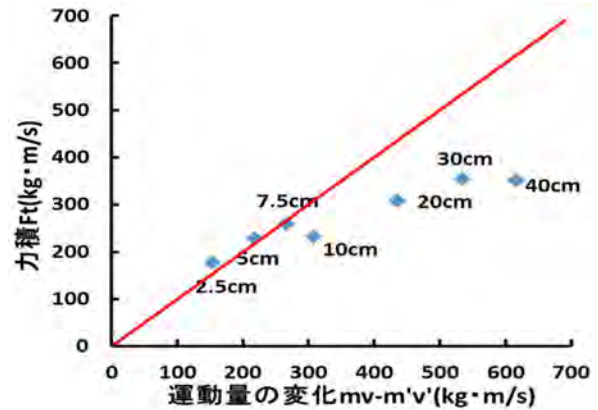


図-3 力積と運動量の変化の比較

(6) 式によって求めた最大変位 u と実験で計測された最大変位 δ との比較結果を図-4 に示す (図中の数字は自由落下高を表す)。 $h=2.5\sim 10\text{cm}$ では両者の値は比較的近いものとなったが、 $h=20\text{cm}$ から両者の差が大きくなった。これは $h=20\text{cm}$ から壁の破壊により、弾性応答変位領域から外れ、衝撃エネルギーの内、曲げ破壊や貫入といった破壊エネルギーに散逸する程度が増大したためだと考えられる。したがって、今回の 1 質点系モデルによる最大変位の算出の妥当性は $h=10\text{cm}$ くらいまでが限界と考えられる。次いで、鈴木らの研究成果 (鈴木ら、1987, 1989) を参考にして最大変位までの壁の衝撃エネルギー吸収能 E_p を算出し (変位と衝撃荷重の積を最大変位発生時刻まで時間積分)、衝突前の丸太の運動エネルギーと比較すると、運動エネルギーの約 $8\sim 17\%$ に相当することが分かった。また亀裂・曲げ破壊領域では、約 $8\sim 10\%$ とほぼ一定値となった。

図-5 に、松富らの研究成果 (松富ら、1999) を参考にして求めた無次元衝撃力 $F/(\gamma D^2 L)$ と無次元衝突速度 $V/(gD)^{0.5}$ の関係を示す (F : 衝撃力、 V : 流速、 γ : 流木の単位体積重量、 D : 流木直径、 L : 流木長)。この図から無次元衝突速度の増加に伴って、無次元衝撃力も増加することが分かる。 $h=2.5\sim 10\text{cm}$ の範囲と $h=20\sim 30\text{cm}$ の範囲では壁の破壊形態に違いが見られることを考慮し、それぞれの範囲に適応した衝撃力算定式を求めた (図中の二つの式)。

亀裂・曲げ破壊領域での無次元衝撃力と無次元衝突速度の関係式と 2014 年 8 月の広島土砂災害調査

事例（吉留ら、2015、内田ら、2016）を基に、直径 0.3m、長さ 4m、の流木が単木状態・流速 5~10m/s（無次元衝突速度 $V/(gD)^{0.5}$ の値が 2.0 以上の領域に外挿）、衝撃力は約 19~31kN と計算された。ただし、図-4 で示すように（青点線は得られた亀裂・曲げ破壊領域での衝撃力算定式を表す）、本実験では計測できなかった貫通領域では、衝撃力の値は頭打ち（赤点線）になると考えられるため、実際の衝撃力の値はより小さいと考えられる。

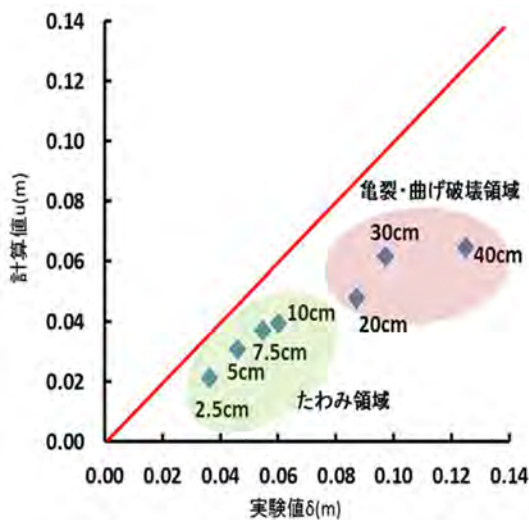


図-4 最大変位の実験値と計算値の比較

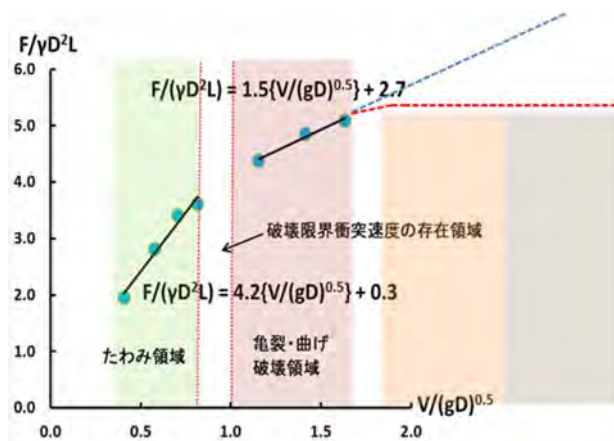


図-5 無次元衝撃力と無次元衝突速度の関係

5. 結論

- ①木製耐力壁は、原木丸太の衝突荷重に応じて、たわみ→亀裂→曲げ破壊→貫入といった破壊形態を呈する。その破壊限界自由落下高は 10cm と 15cm の間である。
- ②原木丸太が木製耐力壁に衝突した時の衝撃荷重は

最大で約 14kN となり、動的荷重の約 5.7 倍である。また最大衝撃荷重は自由落下高の増加に伴って増加するが、破壊形態が亀裂・曲げ破壊領域に変わる $h=20\text{cm}$ 以降では、値が徐々に一定値(約 12~14kN)に近づく。

- ③力積と運動量の変化を比較した結果、自由落下高 $h=20\text{cm}$ から両者の値の差が大きくなった。
- ④1 質点系モデルから算出した壁の最大変位と実験で計測した最大変位を比較した結果、 $h=2.5\sim 10\text{cm}$ では両者の値は比較的近くなったが、 $h=20\sim 40\text{cm}$ では差が大きくなった。
- ⑤壁の衝撃エネルギー吸収能を算出した結果、丸太が壁に衝突する前の運動エネルギーの約 8~17% に相当することが分かった。亀裂・曲げ破壊領域では、その値は、約 8~10% とほぼ一定値となった。
- ⑥木製耐力壁の破壊形態を考慮した無次元衝撃力算定式を提案した。この式を用いて、2014 年 8 月に広島県広島市で発生した土石流を事例に流木の衝撃力を試算した結果、約 19~31kN となった。ただし、貫通領域では、衝撃力の値は頭打ちになると考えられるため、実際の衝撃力の値はより小さいと考えられる。

参考文献

- 1) 石川信隆,大野友則,藤掛一典,別府万寿博(2008):基礎からの衝撃工学 - 構造物の衝撃設計の基礎 -, 森北出版株式会社, p.1-234,
- 2) 石川芳治,水山高久,浅井信秀(1990):流木の衝突による鋼材の変形に関する実験的研究,新砂防,Vol.42,No.5,p.11-20
- 3) 内田康太ら(2016):大径流木が木造耐力壁に衝突する時の衝撃力-大径流木の運搬形態モデルとフルスケールでの基礎実験-,平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集
- 4) 鈴木浩之,水山高久(1987):樹木の衝撃エネルギー吸収能,昭和 62 年度砂防学会研究発表会概要集,p.250-253
- 5) 鈴木浩之,水山高久,栗原淳一(1989):立木の土石流衝撃緩衝効果,平成元年度砂防学会研究発表会概要集,p.291-294
- 6) 松富英夫(1999):流木衝突力の実用的な評価式と変化特性,土木学会論文集,No.621/II-47,p.111-127
- 7) 木造建築研究フォーラム編(1995):図説 木造建築辞典「基礎編」,学芸出版社,p.65
- 8) 吉留慧ら(2015):土石流によって流出した大径流木の木造家屋への衝突-2014 年 8 月 20 日の広島県広島市安佐南区での事例-,平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集

降雨指標を用いた溪床堆積物再移動型土石流発生過程における各水文現象の発生限界評価
—三重県いなべ市藤原町西之貝戸川の事例—

三重大学

佐藤泰志・山田孝

1. はじめに

土石流の発生およびその規模の予測を行うにあたって、土石流の発生限界条件を明らかにすることは極めて重要である。土石流の発生限界の評価は降雨指標を用いた方法が提案されてきた（例えば、寺田ら、2001；藤原岳周辺流域土石流発生基準雨量検討委員会、2003 など）が、土石流の発生の実態を踏まえた発生限界の評価は行われていない。

三重県いなべ市藤原町西之貝戸川では 1999 年から 2012 年までに計 11 回の溪床堆積物再移動型土石流が発生した。三重大学では土石流発生およびその規模の予測の手法提案に向け、2008 年から西之貝戸川において溪床堆積物中の伏流水の流出状況等の観測を行っている。これまでの観測の結果、西之貝戸川で発生する土石流は雨量強度の大きな降雨に伴うパイプ孔からの伏流水の噴き出し（以降、パイプ流発生）やパイプ孔の閉塞などの各水文現象を経て発生すると考えられている（山田ら、2009）。しかし、土石流発生過程における各水文現象の発生限界の評価は西之貝戸川に適した方法で行われていない。

本研究では土石流発生とその規模の予測手法の提案のため、雨量強度とタンクモデルの貯留高の推移特性に最も類似した半減期の実効雨量を用いて、各時間スケール（10 分間、1 時間）の土石流発生過程の各水文現象（パイプ流発生、パイプ孔閉塞、土石流発生）の発生限界雨量を算出し、10 分間スケールでの発生限界の評価を行った。

2. 研究方法

研究対象地は三重県いなべ市藤原町西之貝戸川の第 6 号砂防堰堤より上流（図-1 の緑の破線）である。流域面積は 0.75km²、平均勾配は 24.3°、地質は主に中古生層の石灰岩である。第 6 号砂防堰堤では堰堤の水抜き孔を利用し、超音波水位計による伏流水の流量観測を行った。第 6 号砂防堰堤上流の溪床区間には定点カメラを設置し、土砂移動やパイプ流の発生状況を定点観測した。2015 年 8 月からは第 6 号砂防堰堤側部に夜間監視用カメラを設置し、夜間の伏流水流出状況の把握を試みている。

本研究ではまず 2008 年以降の現地調査・観測の

結果を踏まえ、土石流発生過程における各水文現象と降雨イベントの実態を整理した。本研究で対象とする土石流発生過程における各水文現象はパイプ流発生、パイプ孔閉塞、土石流発生とした。降雨イベントは 2002 年 1 月 1 日～2016 年 9 月 30 日までに藤原岳観測所で観測された累積雨量 1mm 以上の降雨とし、これまでの現地観測体制で各水文現象が観測された降雨をそれぞれの「発生降雨」とした。

次に発生限界雨量の降雨指標として用いる実効雨量を選定した。実効雨量は式 (1) から算出した。

$$R_w = \sum a_{1i} \times R_{1i} \quad \dots (1)$$

ここで、

R_w : 実効雨量

R_{1i} : i 時間前の 1 時間雨量 ($i = 1, 2, 3 \dots$)

a_{1i} : i 時間前の減少係数

$$a_{1i} = 0.5^{i/T} ,$$

T : 半減期（時間）である。



図-1 研究対象地

本研究では半減期をタンクモデルの各タンク貯留高の推移特性に実効雨量の推移特性が最も類似するときの値とした。また、発生限界雨量の降雨指標として用いる実効雨量は、西之貝戸川での土石流発生に関与すると考えられる溪床堆積物表層と中間層の水分量を表すタンクの貯留高に相当する実効雨量とした。タンクモデルは、1 時間スケールでは先行研究等で提案されたタンクモデルのうち、モデルの構造が比較的単純で、豪雨時の流量の再現性が最も良い 2 段タンクモデル（佐野ら、2015；以降、提案

2 段モデル) を用いた (図-2)。

各流出孔の高さは、1 段上孔 : 160mm, 1 段中孔 : 60mm, 1 段下孔 : 28mm, 2 段 : 5mm であり、各流出孔の流出係数は、1 段上孔 : 0.062, 1 段中孔 : 0.024, 1 段下孔 : 0.007, 2 段 : 0.003 であり、各浸透係数は 1 段 : 0.110, 2 段 : 0.087 である。10 分間スケールでは 1 時間スケールと同様の構造を持ち、流出係数と浸透係数のみ 1/6 倍の値にした 2 段タンクモデルを用いた。

最後に雨量強度 (10 分間雨量, 時間雨量) と実効雨量を用いて各時間スケールの土石流発生過程における各水文現象の発生限界雨量を算出し、その発生限界の評価を行った。

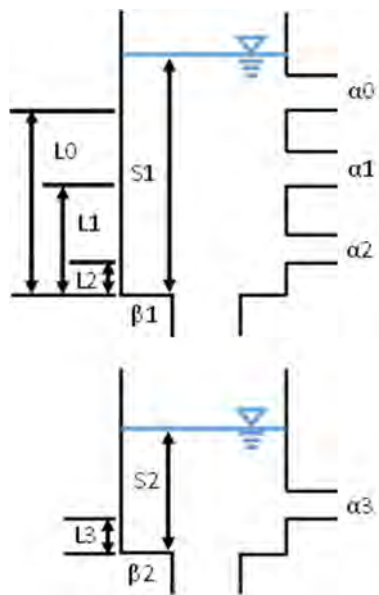


図-2 提案 2 段モデルの模式図

3. 結果・考察

(1) タンクモデルの各タンクの貯留高と実効雨量の対応

各時間スケールにおける提案 2 段モデルの各タンクの貯留高の推移変化に相当する実効雨量の半減期は、各タンク貯留高と各半減期の実効雨量の波形の類似性と絶対誤差の平均値から判断した。

その結果、10 分間スケールではタンク 1 段目の貯留高の推移変化に相当する実効雨量の半減期は 360 分、タンク 1 段目+2 段目の貯留高の推移変化に相当する実効雨量の半減期は 720 分であった。1 時間スケールではタンク 1 段目の貯留高の推移変化に相当する実効雨量の半減期は 5 時間、タンク 1 段目+2 段目の貯留高の推移変化に相当する実効雨量の半減期は 11 時間であった (図-3)。

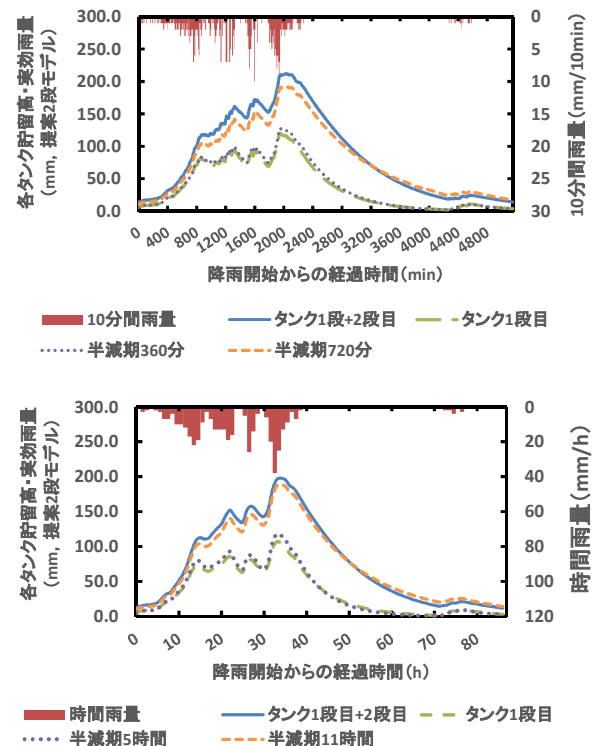


図-3 提案 2 段モデルの各タンク貯留高と各半減期の実効雨量の対応

(2014/8/10 の事例 上図が 10 分間スケールにおける対応 下図が 1 時間スケールにおける対応)

(2) 土石流発生過程における各水文現象の発生限界雨量の算出とその評価

1 時間スケールにおける実効雨量 (半減期 5 時間) と時間雨量によって全ての水文現象の発生限界雨量を算出した結果を図-4 に示す。2002 年以降の全水文現象を対象とした場合、各水文現象の実効雨量はほぼ同程度の値を示したが、時間雨量は土石流発生がパイプ流発生約 3 倍の値を示した。

ここで、パイプ流発生やパイプ孔閉塞は全て 2009 年以降に現地で観測された現象である。また 2008 年以降には第 6 号砂防堰堤や床固めの施工により、第 6 号砂防堰堤上流域の河道の地形 (特に溪床堆積物厚や溪床勾配) は大きく変化し、それに伴い第 6 号砂防堰堤上流域の降雨流出応答特性と土石流発生過程も変化した可能性が考えられる。そこで土石流発生降雨を 2008 年以降の事例のみに限定し、各水文現象の発生限界雨量を算出した。

その結果、パイプ流発生・土石流非発生降雨の発生限界雨量は実効雨量 38.0mm かつ時間雨量 12mm、パイプ孔閉塞・土石流非発生降雨の発生限界雨量は実効雨量 120.7mm かつ時間雨量 31mm、土石流発生降雨の発生限界雨量は実効雨量 130.3mm かつ時間雨量 44mm となった (図-5)。

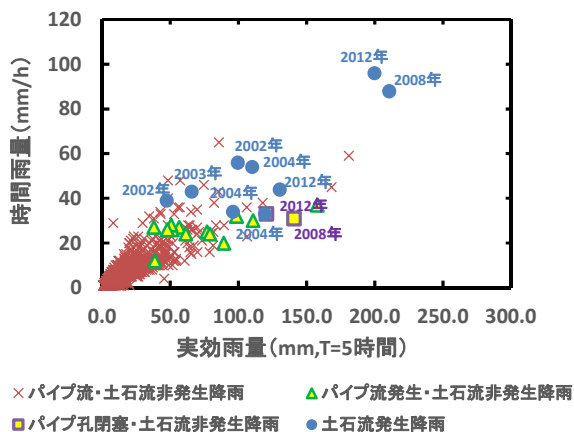


図-4 実効雨量（半減期5時間）と時間雨量による各水文現象の発生限界雨量
 (図中の西暦は各パイプ孔閉塞・土石流非発生降雨や土石流発生降雨の発生年を示す。)

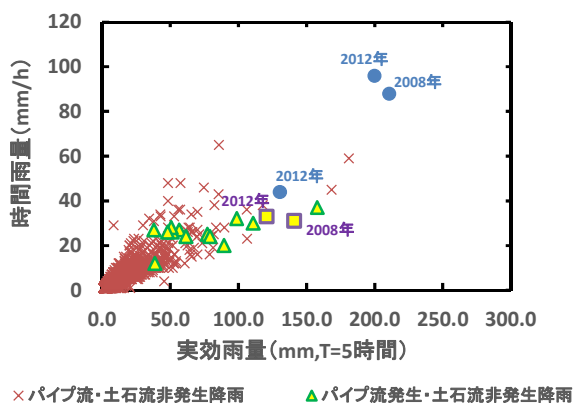


図-5 実効雨量（半減期5時間）と時間雨量による2008年以降の各水文現象の発生限界雨量

10分間スケールにおける実効雨量(半減期360分)と10分間雨量によって全水文現象の発生限界雨量を算出した結果を図-6に示す。2002年以降の全水文現象を対象とした場合、各水文現象の発生限界雨量は10分間雨量も実効雨量もほぼ同程度であった。10分間雨量スケールにおいても1時間スケールと同様の理由から、土石流発生降雨を2008年以降の事例に限定し、各水文現象の発生限界雨量を算出した。その結果、パイプ流発生・土石流非発生降雨の発生限界雨量は実効雨量41.2mmかつ10分間雨量6mm、パイプ孔閉塞・土石流非発生降雨の発生限界雨量は実効雨量129.1mmかつ10分間雨量8mm、土石流発生降雨の発生限界雨量は実効雨量126.8mmかつ10分間雨量19mmとなった(図-7)。

パイプ流発生時の発生限界雨量は土石流発生に対しては両降雨指標とも約1/3倍であった。パイプ流

発生と土石流発生時の発生限界雨量は大きく離れており、パイプ流発生段階では土石流発生時の危険性は低いと考えられる。パイプ孔閉塞に対しては、10分間雨量は同程度であるが、実効雨量は土石流と同様に約1/3倍であった。実効雨量はその時点までの累積雨量によって大きく左右される。

よって、パイプ流発生からパイプ孔閉塞に至るには、パイプ流発生後にパイプ流発生と同程度の10分間雨量強度を含む累積雨量90mm以上の降雨が必要であると考えられる。土石流発生時の発生限界雨量は、実効雨量はパイプ孔閉塞と同程度の値だが、10分間雨量はパイプ孔閉塞の約2.5倍の値であった。よって、パイプ孔閉塞時には土石流の発生に必要な溪床堆積物内の貯留水量の条件は満たされており、その後の10分間雨量19mm以上の降雨によって土石流の発生時の危険性が高まると考えられる。

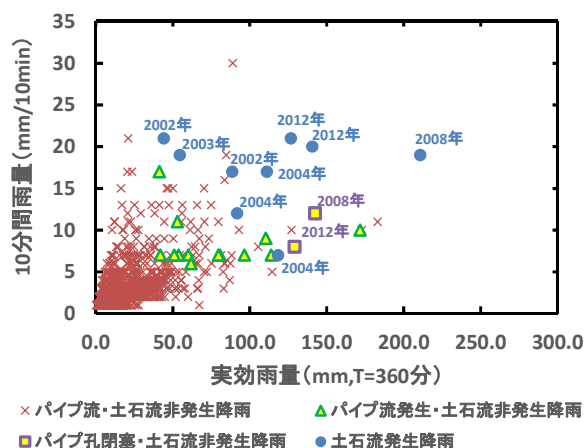


図-6 実効雨量（半減期360分）と10分間雨量による各水文現象の発生限界雨量
 (図中の西暦は各パイプ孔閉塞・土石流非発生降雨や土石流発生降雨の発生年を示す。)

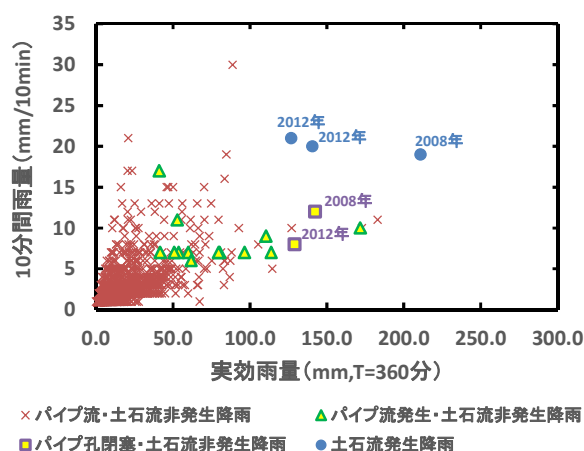


図-7 実効雨量（半減期360分）と10分間雨量による2008年以降の各水文現象の発生限界雨量

4. 結論

- ①提案 2 段モデルのタンク 1 段目とタンク 1 段+2 段目の貯留高の変化は、10 分間スケールの場合、半減期 360 分と半減期 720 分の実効雨量の推移特性に、1 時間スケールの場合、半減期 5 時間と半減期 11 時間の実効雨量の推移特性にそれぞれ類似している。
- ②2008 年以降の降雨を対象に土石流発生過程における各水文現象の発生限界雨量を算出した結果、パイプ流発生・土石流非発生降雨の発生限界雨量は実効雨量 41.2mm かつ 10 分間雨量 6mm、パイプ孔閉塞・土石流非発生降雨の発生限界雨量は実効雨量 129.1mm かつ 10 分間雨量 8mm、土石流発生降雨は実効雨量 126.8mm かつ 10 分間雨量 19mm となった。
- ③西之貝戸川では、パイプ流発生段階では土石流発生の危険性は低く、パイプ孔閉塞後の 10 分間雨量 19mm 以上の降雨によって土石流の発生の危険性が高まると考えられる。

参考文献

- 1) 寺田秀樹ら(2001)：土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法，国土技術政策総合研究所資料，第 5 号，p.1-58；
- 2) 藤原岳周辺流域土石流発生基準雨量等検討委員会(2003)：第 2 回 藤原岳周辺流域土石流発生基準雨量等検討委員会 討議資料
- 3) 山田孝ら(2009)：砂防えん堤施工時の溪床堆積横断面を活用した土石流発生直前までの伏流水流出変化，表面流発生プロセスの観測 - 三重県いなべ市藤原岳西之貝戸川での事例 - ，砂防学会誌，Vol.62，No.3，p.30-38；
- 4) 佐野泰志ら(2015)：豪雨時の伏流水の流出特性とそのモデル化 - 三重県いなべ市藤原町西之貝戸川の事例 - ，平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集 B，B-252-253

物理水文モデルを用いた山体地下水位変動の検討

京都大学

小杉賢一朗

1. はじめに

紀伊山地の多くの地区は、付加体と呼ばれる地質構造を持つ。これは、海洋プレートが沈み込むときに、その上に乗った堆積物や火山噴出物を陸地に次々と付加していくことによって形成された地質だといわれている。岩石的には、主として砂岩・泥岩の互層構造を示し、部分的にチャートや火山岩やそれらの変成岩を含んでいることが多い。

本研究では、付加体の地質構造を持つ山地における水文プロセスを解析するために、物理水文モデルの開発を行っている。このモデルは、有限要素法に基づき三次元のリチャーズ式を陰解法で解くものである。

ここでは、風化岩盤内に形成される地下水位が、深層崩壊を引き起こすような豪雨の際にどのような挙動を示すかについて試算を行い、地下水位上昇が誘因となる深層崩壊の発生プロセスを推察した。

2. 計算ならびに解析の対象地区

平成 23 年紀伊半島大被害時に深層崩壊が発生した熊野地区および赤谷地区を対象として計算を行った。それぞれの地区の深層崩壊滑り面の深度を参照し、透水性を持つ風化岩盤の厚さを 40m と仮定した。赤谷地区については、崩壊発生以前の地形データを用いて計算を行い、地下水流動と崩壊発生との関連について考察を加えた。

一方、熊野地区については、崩壊発生以前の詳細な地形データが存在しないため、崩壊発生後の地形データを用いて計算を行い、現状での地下水流動を解析することによって崩壊発生メカニズムを考察した。

3. 計算の詳細と改良点

風化岩盤の飽和・不飽和透水特性ならびに保水特性を表すパラメータには、Katsura et al.1) を参考に、DL 級岩盤の値を設定した。使用した飽和透水係数の値は 12.24 mm/h である。

初めに、豪雨発生前の間隙水圧（通常時間隙水圧）分布を推定するために、平均降雨強度 (0.19mm/h) を地表面から供給し続けて、圧力水頭の時間変動量

が小さく動的平衡状態が達成されたと見なせるまで計算を行った。ここで平均降雨強度は、気象庁アメダス風屋の 1996～2015 年の平均年雨量から年蒸発散量 (800mm と仮定) を差し引くことで推定している。

これに続いて、紀伊半島大被害時の降雨イベントを模した計算を行った。大規模降雨を与えた数値シミュレーションの場合は、土層と風化基岩の境界における飽和地下水帯の発生や表面流の発生などの複雑な現象を解く必要が生ずるため、計算が不安定になりやすい。

そこで本研究では、この問題を解決できる新たな計算方法を試みた。紀伊半島大被害時には、風化基岩の飽和透水係数を超える強度の降雨が、およそ 3 日間継続したと考えられる。このような雨が降る場合、基岩に浸透しきれなくなった雨水が土層と基岩の境界面において飽和帯を形成する。このことから本研究では、豪雨の継続中に土層－基岩境界面の圧力水頭をゼロに固定する簡便な計算を試行した。

これによって、土層内の側方流や表面流の発生を計算する必要がなくなるため、実流域規模の三次元飽和・不飽和浸透計算をスムーズに行うことができることを確認した。実際の計算では豪雨の継続時間を 72h と仮定して、72h 後の基岩底面の圧力水頭を出力し、降雨開始前の値からの増加量を間隙水圧上昇量と見なして解析した。この際、現地における地下水位観測結果を参照して、基岩の有効孔隙率の分布を推定することによって、間隙水圧上昇量の空間分布の再現を試みた。

4. 計算結果と崩壊発生プロセス

図-1 は、熊野地区における通常時間隙水圧分布の計算結果である。間隙水圧は、崩土堆積地において高くなっている。また崩壊地東側の斜面では、斜面中腹にある窪地において高い水位が計算されている。

図-2 には、熊野地区における間隙水圧上昇量の計算結果を示した。崩壊斜面直上の稜線において高い間隙水圧上昇が計算されている。また、崩壊地東側の斜面では、上部において水位上昇量が小さく、中腹～下部において水位上昇量が大きい。これらの計算結果は、現地における実測地下水位の変動傾向をある程度再現できていることが確認された。図-2 に

示した計算結果に基づく、熊野地区では、崩壊地内部とその周辺に向かう地下水流動経路が存在し、豪雨時にこれらのエリアで集中的な間隙水圧上昇が発生したことが、崩壊発生の一因となった可能性が推察される。

次に図-3は、赤谷地区における通常時間隙水圧分布の計算結果である。間隙水圧は、谷筋で高くなる傾向がある。ただし深層崩壊が発生した斜面では、末端部（標高 570 m 以下）を除くと、高水位の地下水分布は算定されなかった。

図-4には、赤谷地区における間隙水圧上昇量の計算結果を示した。崩壊斜面上部の南側にある尾根で大きな間隙水圧上昇が算定されているが、これは実測値の傾向を概ね再現していることが確認された。加えて、崩壊斜面上部でも大きな間隙水圧上昇が計算されている。図-4に示した結果から、赤谷地区においては、地形上の尾根部において豪雨時に非常に大きな間隙水圧上昇が起き、これに伴う斜面安全率の低下が、深層崩壊の一因となった可能性が推察される。

5. おわりに

本研究では、有限要素法に基づき三次元のリチャーズ式を陰解法で解く物理水文モデルを用いて、付加体の地質構造を持つ紀伊山地の水文プロセスを解析し、深層崩壊発生メカニズムを考察した。

なお本稿は、河川砂防技術研究開発 (H25～27「紀伊山地付加体における深層崩壊対策に資する水文調査・解析手法の構築」代表：小杉賢一朗) の成果に基づき、加筆・拡充を行ったものである。研究開発の実施にあたり、国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所には貴重な資料を提供戴いた。

参考文献

- 1) Katsura, S., K. Kosugi, T. Mizutani, and T. Mizuyama, Hydraulic Properties of Various Weathered Granitic Bedrock in Headwater Catchments, Vadose Zone J., 8, 557-573, doi:10.2136/vzj2008.0142, 2009.

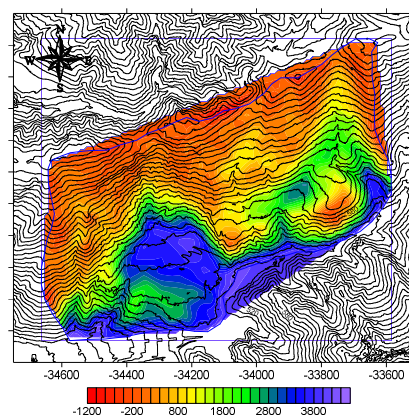


図-1 通常時間隙水圧 (cm) の分布 (熊野)

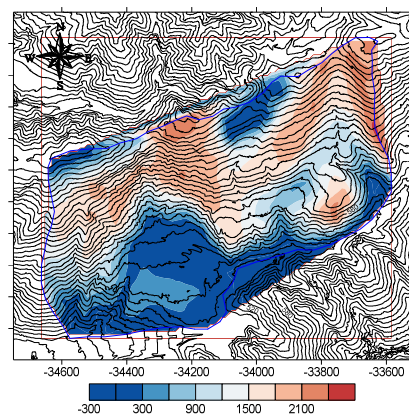


図-2 間隙水圧上昇量 (cm) の分布 (熊野)

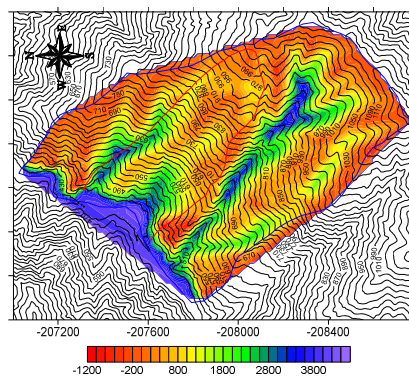


図-3 通常時間隙水圧 (cm) の分布 (赤谷)

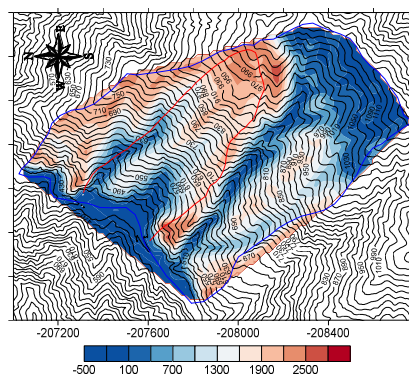


図-4 間隙水圧上昇量 (cm) の分布 (赤谷)

土壌雨量指数による平成 23 年台風 12 号の土砂災害の誘因解析

和歌山大学

田内裕人・江種伸之

1. はじめに

平成 23 年 8 月 25 日に発生した台風 12 号は、紀伊半島に豪雨と甚大な洪水や土砂災害をもたらした（紀伊半島大水害）。豪雨による被害は紀伊半島に集中し、和歌山県内では日高・西牟婁地域で深層崩壊を含む大規模斜面崩壊、東牟婁地域で表層崩壊・土石流が多発した。こうした土砂災害のメカニズム解明と予測精度の向上を目的とした研究が数多く行われてきた。平成 23 年台風 12 号の土砂災害を対象とする研究には、崩壊時の降雨パターンや積算雨量、実効雨量、土壌雨量指数などの降雨指標（誘因）に着目した研究や、崩壊地の地質、傾斜角、傾斜方位および植生などの素因に着目した研究がある^{1)~6)}。特に土壌雨量指数⁷⁾については、表層崩壊・土石流発生の指標として開発され、日本全国の警報発令基準として利用されており、土壌雨量指数と土砂災害発生の関係性を明確にすることにより、土砂災害発生予測の精度向上に資すると考えられる。

土壌雨量指数は基岩よりも上層の水分量を示す指標であり、基岩が崩壊する深層崩壊を予測するものではないとされている。一方、土壌雨量指数算出に用いる第 2 段タンクの貯留高と深層崩壊の発生に関連性がみられるとの記述⁸⁾もあり、土壌雨量指数を活用した深層崩壊の評価を試みることで有益な知見が得られる可能性がある。また土壌雨量指数を活用した研究事例では、崩壊発生時の土壌雨量指数に着目したものがほとんどであり、これらの時系列変動特性を詳細に解析した事例は見られない。

そこで本研究では、平成 23 年台風 12 号の土砂災害発生現場（以下、崩壊地）を対象に、土壌雨量指数の時系列変化に着目した解析を行い、崩壊の形態との関係について考察を行った。

2. 紀伊半島の地質と土砂災害の概要

図-1 に紀伊半島南部の地質と主な崩壊地（調査地のみ）を示す。大規模な斜面崩壊が発生した日高・西牟婁地域の地質は、海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む際に海洋プレート上の堆積体が大陸側に付加され形成された付加体（四万十帯）である。四万十帯には、低角度の逆断層（スラスト）が数多くあり、またスラストに伴う破碎帯が多数存在する。スラストは海洋プレートに押された方向、すなわち紀伊半島では北側に向かって傾いているのが一般的である。このため、山の北側斜面では、山腹斜面の傾きとスラストの傾きが同じ方向の流れ盤になっている。このような地質構造から、日高・西牟婁地域では、スラストや破碎帯、流れ盤、およびその近傍を中心に深層崩壊を含む大規模な斜面崩壊が数多く発生した。

一方、東牟婁地域では主に熊野酸性火成岩類分布域で表層崩壊と土石流が多発した。熊野酸性火成岩類の母岩となる花崗斑岩は柱状節理が発達し、この節理の割れ目に沿って風化が進みやすい。また、花崗斑岩は後述する基盤岩の熊野層群に比して急峻な地形であるのに対し、熊野層群はやや緩斜面をなしている。

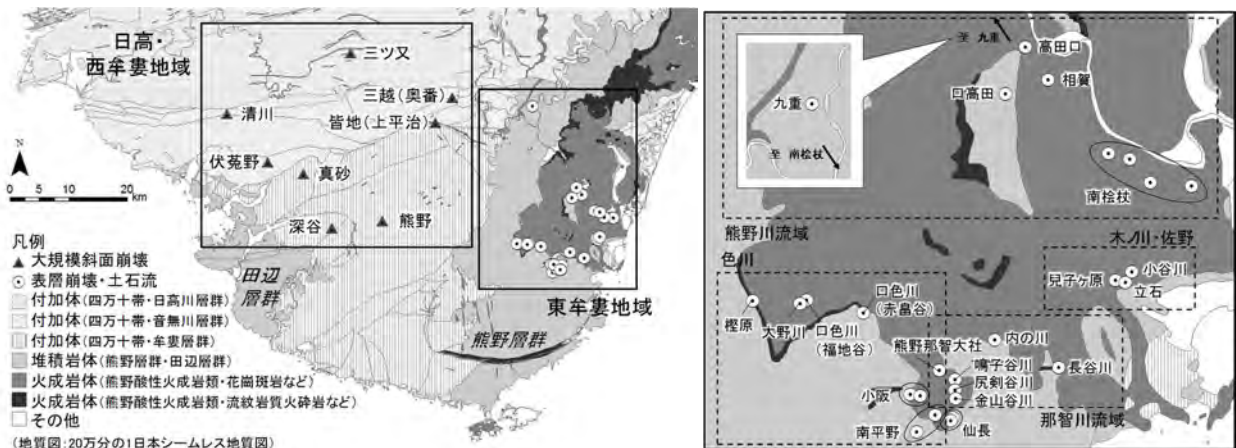


図-1 和歌山県南部（紀南地方）の地質と崩壊地（調査地点のみ）

このような地形と地質により、表層崩壊の多くは熊野酸性火成岩類の花崗斑岩分布域で発生した。また、これらの崩壊地の多くでは谷筋の緩傾斜部分に崩積土(旧土石流堆積物)が堆積しており、これが崩壊土砂とともに土石流化していた。その他、谷筋に残る崩積土が再び流動化して土石流になった例(溪床不安定土砂の流動化)もみられる。

そのほか、熊野層群が分布する熊野川流域の九重などでも表層崩壊や土石流が少数ながら発生した。熊野層群は、大陸棚から陸棚斜面に堆積した礫岩、砂岩、泥岩からできた堆積体が陸化したものである(前弧海盆堆積体)。泥ダイアピルによってできた泥質角礫岩などがみられるが、全体として付加体のような著しい堆積体の乱れはない。このため、熊野層群における表層崩壊・土石流の発生数は熊野酸性火成岩類と比べると非常に少なく、かつ小規模である。

3. 降雨特性

図-2 に土砂災害発生時(以下、崩壊時)における積算雨量と時間雨量の関係を示す。ここで、積算雨量は台風12号による雨が降り始めた8月30日もしくは31日から崩壊時刻までの総雨量、時間雨量は崩壊時刻を含む1時間雨量と定義する。また、積算雨量、時間雨量および後述する土壌雨量指数の算出にはレーダーアメダス解析雨量を使用した。日高・西牟婁地域における崩壊時の時間雨量は2~40mm/h、積算雨量は760~1450mm、東牟婁地域における崩壊時の時間雨量は40~120mm/h、積算雨量は720~1330mmであった。東牟婁地域の時間雨量は日高・西牟婁地域より多いが、積算雨量については両者の間に大きな違いはない。ただし、東牟婁地域の九重、口色川・福地谷、大野川、檜原の降雨特性は他の東牟婁地域における崩壊地とは異なり、積算雨量は1000mm以上と大きい一方、時間雨量は40mm/h程度と他の東牟婁地域の崩壊地よりも小さい。そこで、この4地点を除いて考えると、東牟婁地域の時間雨量は70~120mm/h、積算雨量は720~1130mmとなる。すなわち、東牟婁地域の多くの現場では、崩壊に至るまでの積算雨量は日高・西牟婁地域よりも少ないが、崩壊時には非常に強い雨が降っていたことになる。

一般に、深層崩壊を含む大規模斜面崩壊は降雨継続時間が長く合計降水量が多い場合に、表層崩壊は短時間の雨量が多い場合に、また土石流は合計降水量が多くなった後に短時間の雨量も多くなった場合に発生する。このことは、東牟婁地域の九重などの4地点を除けば、土砂災害の形態と雨量の関係は、両地域ともに一般的な傾向とよく一致することを示

している。すなわち、深層崩壊を含む大規模斜面崩壊を起こしやすい四万十帯の分布する日高・西牟婁地域に、深層崩壊を起こしやすい積算雨量の多い長雨が降ったこと、また表層崩壊・土石流を引き起こしやすい熊野酸性火成岩類が分布する東牟婁地域に、土石流を引き起こす積算雨量増大後の強雨があったことが、甚大な被害を生じた要因と推察される。

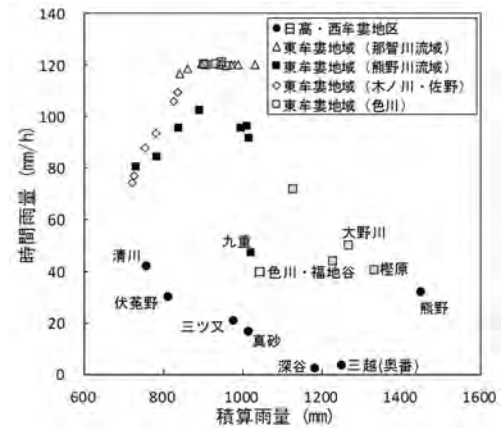


図-2 崩壊時の積算雨量と時間雨量

4. 土壌雨量指数を用いた誘因解析

図-3 は崩壊時の土壌雨量指数と時間雨量の関係を示している。崩壊時の土壌雨量指数は、日高・西牟婁地域と東牟婁地域の双方で370~480mmとなっており、図-2の積算雨量と時間雨量の関係と比較すると、各崩壊地との間で差が小さい。

本結果は、崩壊に寄与した地中の水分量が地形・地質特性、降雨特性、およびこれらの組み合わせで決まる土砂災害の形態に関係なく、同程度であったことを示しており、土砂災害の発生予測に長期降雨指標として土壌雨量指数を用いることで、素因、誘因、および土砂災害の形態の影響を相対的に小さくできる可能性を示唆している。

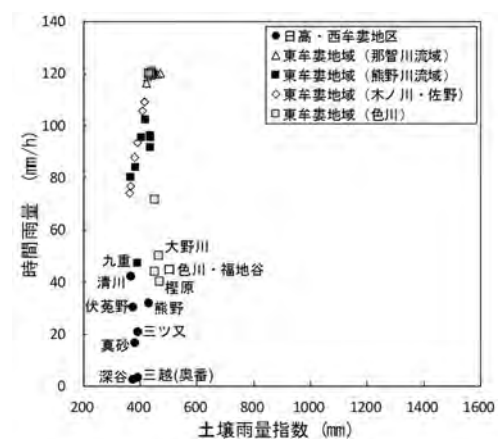


図-3 崩壊時の時間雨量と土壌雨量指数

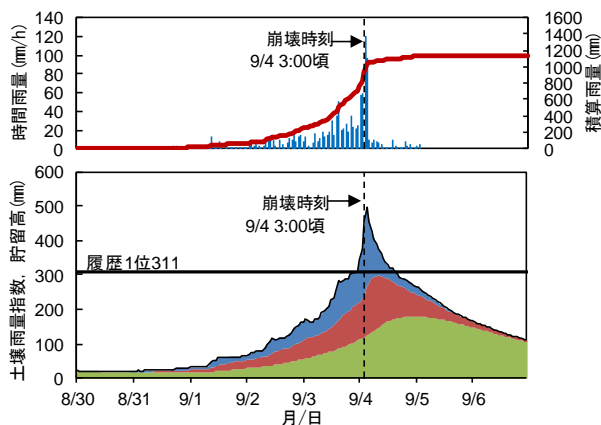


図-4 金山谷川の時間雨量，積算雨量
および土壌雨量指数の時系列変化

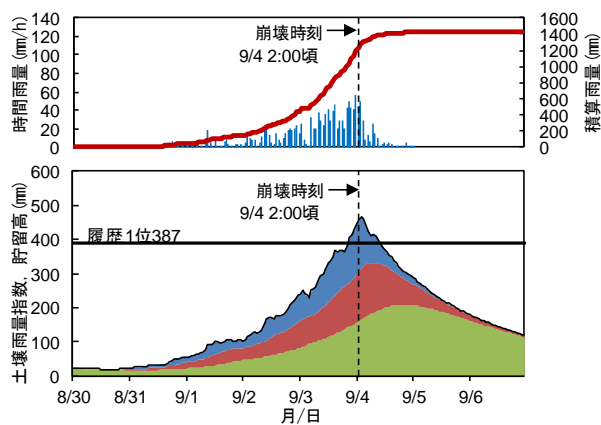


図-5 口色川・福地谷の時間雨量，積算雨量
および土壌雨量指数の時系列変化

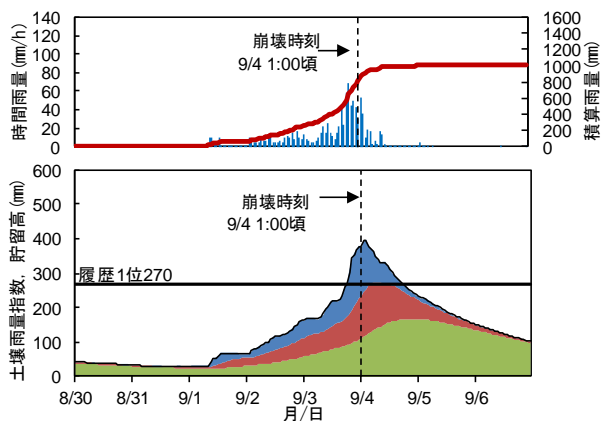


図-6 伏菟野の時間雨量，積算雨量
および土壌雨量指数の時系列変化

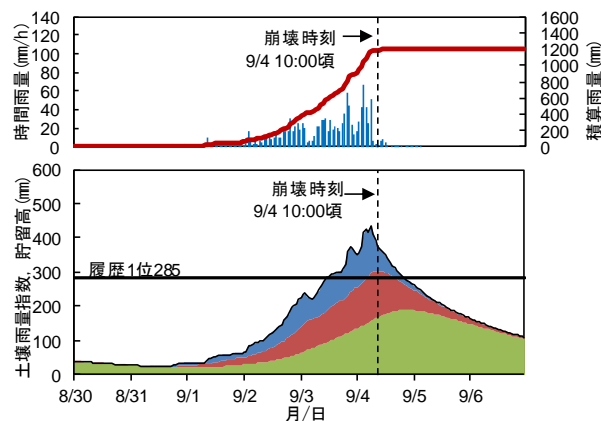


図-7 深谷の時間雨量，積算雨量
および土壌雨量指数の時系列変化

また図-4、5は、東牟婁地域の代表的な表層崩壊・土石流発生現場である金山谷川と積算雨量の増大により土石流が発生した口色川・福地谷での時間雨量、積算雨量、土壌雨量指数の時系列変化を示し、参考として気象庁の2011年台風12号以前における履歴1位の土壌雨量指数を併記したものである。

なお、気象庁の履歴1位土壌雨量指数は、空間解像度が5kmとなっているものの、本研究と同じくレーダーアメダス解析雨量から算出されているため、本研究にて算出したものと同じとして比較を行うこととする。

まず図-4により、金山谷川では崩壊時刻の3時間程度前に履歴1位を超えた後、80~120mm/hの雨が継続することで土壌雨量指数が100mm程度、急激に増大していることがわかる。また各タンクについては、特に第1段タンクの貯留高が急激に増えており、土壌雨量指数増大への寄与が大きいことがわかる。

このことは東牟婁地域において、土中水分量が過去にない状態にまで高まった後、さらなる強雨により、特に地表付近で雨水が流出・浸透する時間もなく急激に貯留され崩壊に至ったことを示している。

本結果は、継続する強雨により土壌雨量指数が履歴1位を超えた直後、3時間で200mmを超えるような非常に激しい雨を受けて急激に増大する場合を予測できれば、表層崩壊・土石流の発生を予測できる可能性を示唆している。次いで図-5によると、口色川・福地谷の土壌雨量指数は土石流発生6時間ほど前に履歴1位を上回り、その後ピークを迎え、崩壊が発生している。崩壊前数時間の降雨は50mm/h程度となっており、金山谷川と比較すると弱いものの、その前から継続する豪雨によって土壌雨量指数は上昇を続けたことがわかる。こうした傾向は、日高・西牟婁地域の一般的な土壌雨量指数の時系列変化傾向と一致する。

以上により、土壌雨量指数が履歴1位を上回る場合には、猛烈な雨とならない場合においても表層崩壊・土石流が発生しうるため、崩壊の危険性は金山谷川の降雨パターンほどは大きくないものの、土壌雨量指数の上昇に注意を要するといえる。

続いて図-6、7は日高・西牟婁地域の大規模斜面崩壊発生現場のうち、伏菟野と深谷における時間雨量、積算雨量、土壌雨量指数の時系列変化を示している。図-6から、伏菟野では崩壊発生6時間ほど

前に土壌雨量指数が履歴 1 位を超え、さらに 60mm/h 程度の降雨の継続により土壌雨量指数が上昇し、ピーク付近で崩壊が発生した。また各タンク貯留高の時系列変化に着目すると、土壌雨量指数がピークとなる時刻では、特に第 2、3 段タンクの合計貯留高が急激に上昇していることが確認できる。また、土壌雨量指数がピークを越えた時刻においても第 2、3 段タンクの合計貯留高は増大を続けており、この時刻に崩壊が発生したことがわかる。

対して図-7 に着目すると、深谷では 20~60mm/h 程度の時間雨量が継続したため土壌雨量指数が崩壊の 24 時間程度前に履歴 1 位を超えており、崩壊の 4 時間前には 430mm に達したことがわかる。また、その後は降雨が弱まったことにより土壌雨量指数が低下したため、崩壊時の土壌雨量指数は 370mm 程度となっていた。しかし第 2、3 段タンクの合計貯留高に着目すると、降雨が弱まった後も上昇を続けており、崩壊時にはピークとなっていたことがわかる。本結果は、降雨が弱まった後も岩盤内・不透水上面付近の土中水分量が増大し深部の間隙水圧が上昇し続けたことを示唆しており、土壌雨量指数がピークを越えた後においても、第 2、3 段タンクの合計貯留高がピークとなるまでは深層崩壊が発生しうることを示している。

以上により、日高・西牟婁地域の崩壊地では、土壌雨量指数のピーク付近から第 2、3 段タンクの合計貯留高のピークを迎えるまでの間に深層崩壊が発生していた。本結果から、深層崩壊が発生しうる地域では、土壌雨量指数がピークとなる時刻から第 2、3 段タンクの合計貯留高のピークとなる時刻の間が最も崩壊の危険性が高いと考えられる。よって、土壌雨量指数に加えて第 2、3 段タンクの合計貯留高を指標とする手法を構築することで、深層崩壊の発生をより正確に予期できる可能性がある。

5. おわりに

本研究では、平成 23 年台風 12 号により和歌山県南部で発生した土砂災害を対象に、土壌雨量指数を用いた誘因解析を行い、土砂災害の形態との関係について考察し、以下の知見を得た。まず、表層崩壊・土石流が多発した東牟婁地域と深層崩壊が発生した日高・西牟婁地域では、土壌雨量指数は双方で 370~480 mm と概ね同じ程度の値となった。

この結果から、長期降雨指標として土壌雨量指数を用いることで素因、誘因、および土砂災害の形態の影響を相対的に小さくできることを確認した。また土壌雨量指数の時系列変化に着目すると、表層崩壊・土石流発生現場では崩壊の数時間前に履歴 1 位

の土壌雨量指数を上回り、その後の短時間豪雨で急激に上昇することが確認された。

このことは、東牟婁地域の熊野酸性火成岩分布域においては、土壌雨量指数が履歴 1 位を超えた直後に時間雨量 70mm/h を超えるような非常に強い雨が数時間継続すると予測される場合には、表層崩壊・土石流の危険性が極めて高くなることを示している。また日高・西牟婁地域の深層崩壊については、土壌雨量指数が履歴 1 位を超えピークを迎えた後から第 2、3 段タンクの合計貯留高がピークを迎えるまでの間に崩壊が発生していた。本結果により、土壌雨量指数と第 2、3 段タンクの合計貯留高を用いることにより深層崩壊の予期が可能であることが示唆された。

なお、本稿の内容は土木学会論文集 B1 (水工学) 第 73 巻 4 号および第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集で発表したものである。

参考文献

- 1) 種伸之, 辻野裕之, 谷垣勝久, 泉並良二, 矢野晴彦, 加藤智久, 岩瀬信行, 石田優子, 藤本将光, 岩佐直人, 後誠介: 平成 23 年台風 12 号による和歌山県東牟婁地域における土石流災害, Kansai Geo-Symposium 2014 論文集, pp.179-184, 2014.
- 2) 辻野裕之, 江種伸之, 後誠介, 谷垣勝久, 岩瀬信行: 和歌山県東牟婁地域の熊野層群分布域における崩壊・土石流の実態と地形的特徴について, Kansai Geo-Symposium 2015 論文集, pp.147-150, 2015.
- 3) 江種伸之: 平成 23 年台風 12 号による和歌山県の土砂災害, 土と岩, 第 63 号, pp.26-34, 2015.
- 4) 江種伸之, 矢野晴彦, 辻野裕之, 中西典明, 石田優子, 鍋島康之: 平成 23 年度紀伊半島大水害の実態と教訓 - 「想定外」豪雨による地盤災害の軽減に向けた提言 - 4. 和歌山地域の実態, 地盤工学会誌, 第 64 巻, 第 6 号, pp.41-48, 2016.
- 5) 田内裕人, 江種伸之, 平田健正: 実効雨量および土壌雨量指数から見た平成 23 年台風 12 号による土砂災害現場の水文地質特性, 第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.19-24, 2016.
- 6) 中村誠, 田内裕人, 江種伸之, 藤井翔太郎, 石田優子, 後誠介: 平成 23 年台風 12 号により和歌山県東牟婁地域で発生した土砂災害の地理的特徴, Kansai Geo-Symposium 2016 論文集, pp.37-42, 2016.
- 7) Ishihara, Y. and S. Kobatake: Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ., 29, pp. 27-43, 1979.
- 8) 岡田憲治, 牧原康隆, 新保明彦, 永田和彦, 国次雅司, 斉藤清: 土壌雨量指数, 天気, Vol.48, No.5, pp.59-66, 2001.

地域防災研究成果の地元住民への還元 -紀伊半島における地域防災教育手法としてのジオツーリズムの検討-

和歌山大学

木塚智貴

1. はじめに

防災教育に関する既往研究では、伝承や学校教育などによって防災意識が向上すること¹⁾、災害時のイメージを喚起させる事が対策行動を誘発することに有効であること²⁾、普及を考える上で効果を損なわない範囲での参加障壁の軽減が課題であるといった指摘がなされてきた³⁾。

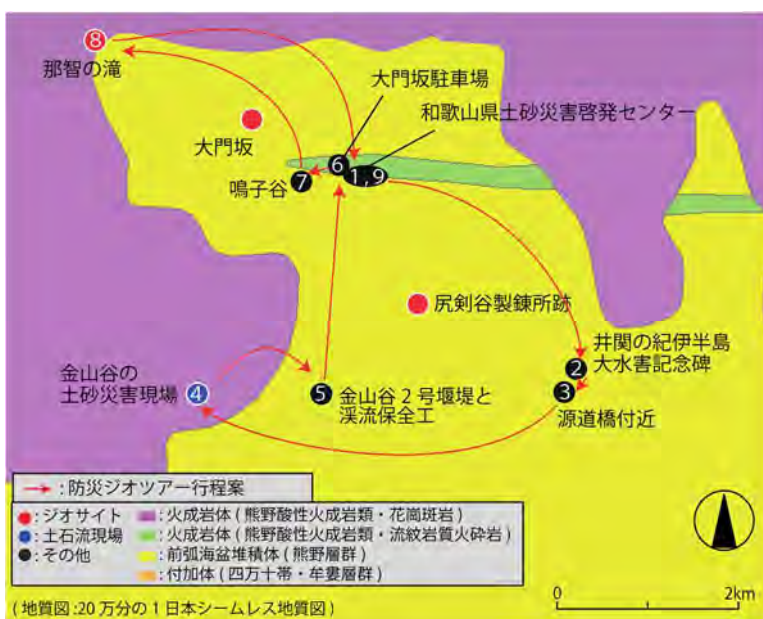
本研究では、防災教育への参加のハードルを下げる試みとして“防災情報の観光利用”の可能性を探っており、その中で、災害の現場を直接訪れる“ジオツーリズム”に着目している。2011年に発生した、紀伊半島大水害で甚大な被害を受けた紀伊半島南部では復旧・復興が急ピッチで進められているが、その爪痕は至る所に残されている。一方、この地域の9自治体にまたがる南紀熊野ジオパークが2014年8月26日に日本ジオパークに認定され、ジオツーリズムを通じた地域活性化への期待で盛り上がりを見せている。

本研究では、地域防災教育の場として南紀熊野ジオパークに注目し、災害調査研究で得られた成果をベースとして、地域資源であるジオ（地球）と災害現場を組み合わせた“防災ジオツアー”を検討し、防災教育手法としての可能性を考察している。

2. モニターツアーによる実証実験

2016年度は、和歌山県が土砂災害に関する研究および啓発の拠点となる施設として那智勝浦町に設置した土砂災害啓発センターを起点としたモニターツアーを2016年12月11日に実施した。ツアーでは、「イシ（石・意志・遺史）」と「イジ（維持）」をテーマとして、和歌山大学災害科学教育研究センターと「想定外」豪雨による地盤災害への対応を考える調査研究委員会（地盤工学会，日本応用地質学会，関西地質調査業協会，中部地質調査業協会合同研究委員会）の調査研究によって得られた成果や国土交通省近畿地方整備局の防災対策（砂防堰堤）について担当者から直接現場で解説を聞き、質疑応答を通じて共同で学ぶ場とした。一般参加者22名と関係者13名、見学者1名が参加した。

行程は図-1に示すように、土砂災害啓発センターに集合し、2011年に発生した紀伊半島大水害について学んだのち、井関の紀伊半島大水害記念碑、源道橋、金山谷の土砂災害現場、金山谷2号堰堤と溪流保全工、鳴子谷堰堤、那智の滝（ジオサイト）を巡るコースを設定した。参加者からは、普段見ることのできない災害の現場や砂防堰堤を見学し、専門家から丁寧な解説を聞くことで自然の脅威だけでなく



時間	行程
09:30	土砂災害啓発センター駐車場 受付開始
09:50	① 土砂災害啓発センター
10:15	② 井関の紀伊半島大水害記念碑
10:20	③ 源道橋付近
10:35	④ 金山谷の土砂災害現場
10:55	⑤ 金山谷2号堰堤と溪流保全工
11:35	⑥ 大門坂駐車場
12:15	(昼食・トイレ休憩)
13:10	⑦ 鳴子谷堰堤
13:15	⑧ ジオサイト「那智の滝」
14:10	⑨ 土砂災害啓発センターでまとめ
15:00	解散

図-1 防災ジオツアー イシ・イジ -石・意志・遺史・維持-の行程

土地の成り立ちや備えについても同時に学び、災害や地域の歴史を正しく理解することができたと好評であった。

3. モニターツアーの比較検証

これまでに実証実験として太地町を舞台とした『アルコラ太地』(2015年6月13日:日常の防災)、那智勝浦町を舞台とした『防災ジオツアー・自然の恩恵・脅威と備え、その土地の暮らしの軌跡を知る-』(2015年12月12日:土砂災害)、『防災ジオツアー イシ・イジ・石・意志・遺史・維持-』(2016年12月11日)の3つのモニターツアーを実施してきた。

(1) 参加者の属性

図-2 はこれまでに実施したモデルツアーの参加者の属性を比較したものである。2015年に実施したモニターツアーでは女性や子供の参加が比較的多く見られたが、2016年のツアーでは60代の男性が中心となっている。また、モニターツアーには夫婦や親子での参加が一定数あり(アルコラ太地:4組11人、防災ジオツアー:4組8人、防災ジオツアー イシ・イジ:3組6人)、アルコラ太地では3世代での参加も見られた。ツーリズムという手法を利用することによって、家族で防災を考えるきっかけとなる効果があると考えられる。

(2) 妥当なツアー金額

防災ジオツアーを継続していくためには、ツアーに掛かる経費を参加者から回収できるようになることが重要であると考えられる。1日を利用したツアーを想定した場合、昼食費・保険代・資料代・ガイド代(2名分)で参加者1人当たり約3,000円が必要となってくる。これまでに参加者に実施したアンケートでは、ツアーとして提供した場合の妥当な金

額として、アルコラ太地(半日)で平均約1,300円、防災ジオツアー(1日)で平均約2,000円、防災ジオツアー イシ・イジ(1日)で平均約2,000円となっており、約1,000円の開きがある。これ以外にもバス代金やガソリン代、事前準備にかかる経費等も必要である。

(3) 防災ジオツアーの効果

防災ジオツアー参加者のアンケートからは、「普段立ち入ることのできない場所へ入ることができること」や「実際の現場で専門家や研究者に質問し、答えてもらえること」が参加者の満足度につながっていることが読み取れる。また、主催者側のアンケートからは、他分野の視点から解説することで参加者の理解につながる、広報の機会になるなど取り組みに協力することのメリットがあげられた。

4. おわりに

今後は、防災ジオツアーによる地域防災教育の継続を視野に入れ、持続可能な運営体制の構築とコンテンツの充実によるツアーの魅力向上に取り組み、他地域への展開可能性についても検討していく。

参考文献

- 1) 片田敏孝, 浅田純作, 及川康: 過去の洪水に関する学校教育と伝承が住民の災害意識と対応行動に与える影響, 土木学会水工学論文集, 第44巻, pp.325-330, 2000.
- 2) 倉田和己, 福和伸夫: 仮想現実ソフトウェアと震動体感環境の融合による効果的な減災啓発ツールの開発, 日本災害情報学会誌(14), pp.83-92, 2016.
- 3) 森玲奈, 池尻良平, 濱口麻莉, 北村智: 大雨対策への知識・意識向上を目的としたワークショップのデザインと実践, 科学技術コミュニケーション 19, pp.3-15, 2016.

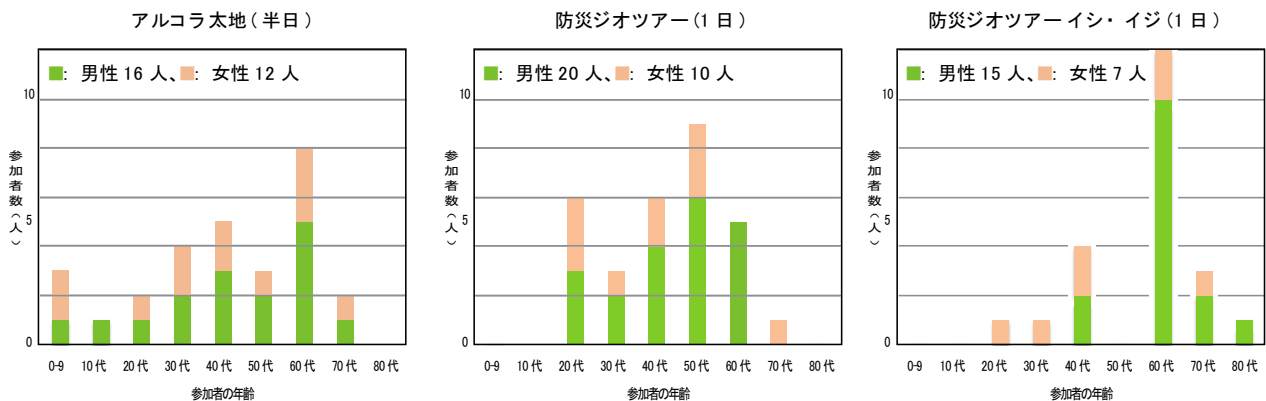


図-2 これまでに実施したモデルツアーの参加者属性

ダム流木と降水量に関する考察と流木量推計の試み

和歌山大学

吉田登

1. はじめに

近年、台風や集中豪雨が多発し、土石流や地すべり等とともに流下した樹木が橋梁等の構造物に集積して洪水氾濫の拡大を招き、海に流出して漁業活動に被害を与えるなどの影響が生じている。ダムは、河川の氾濫を防ぐ治水、電力や生活用水を確保する利水など、我々の生活にとって重要な役割を果たしているが、これらの気候変動に伴う堆砂物や流木などの漂流物がダム貯水池に流入し、ダム管理上の障害となるため、適宜引き上げられ、一般廃棄物として焼却等により処分されている。

2011年には台風12号による集中豪雨が紀伊半島を襲い、人命損失や様々な構造物等の被害とともに大量の流木が発生した。このような集中豪雨はその後毎年のように全国各地で発生している。この集中豪雨では約18,600tの流木が発生し、和歌山県ではその一部を資源として有効利用する無償提供に取り組んだことが報告されている¹⁾。和歌山県以外でもこのように流木の有効利用を図る取り組みはみられるものの、まだ一部に限定されているのが実情である。

こうした発生流木の有効活用を図るためには、各地での優れた有効利用事例の知見を共有し、利活用の組織、制度や利活用可能な技術、対象工法、仕様等を含めたしくみを整備することが社会的な課題である。同時に、今後も増大すると思われる集中豪雨をふまえ、流木を安定的に活用してゆくためには、まず基礎となる情報として、ダム流木の発生機構や発生状況を把握することが重要であると考えられる。和歌山大学では和歌山県の協力を得て、ダム流木の定点観測を行うとともに、統計解析を用いた降雨量と流木量とのモデル化や画像解析を用いたダム湖面画像からの流木抽出に関する研究に取り組んでいる。本稿では、これらの研究について紹介する。

2. ダム流木と降水量に関する考察

(1) 既往研究に関する考察

ダム流木の直接的な原因は土砂災害や洪水氾濫であり、これらは降水量と密接な関係がある。これまで牧ら²⁾はダム貯水池で捕捉されている流木量と利用実態を調査し、流木量に影響を及ぼす要因につ

いて分析をおこなっているが、流木量を説明する変数として年間降水量を用いたため、集中豪雨などの影響をうまく反映できず、ダムごとの流木発生量を推計するには至っていない。そこで、日降水量を用いて年間流木発生量を推計するための分析を試みた。

(2) 分析対象とするダム

ダム管理事務所のホームページにおいて経年的に年間流木発生量が掲載されている事例を収集し、結果として15のダム(寒河江ダム・四十四田ダム・新豊根ダム・真名川ダム・石手川ダム・滝里ダム・長井ダム・鶴田ダム・定山溪ダム・二瀬ダム・白川ダム・美和ダム・豊平峡ダム・野村ダム・弥栄ダム)におけるデータを得た。

(3) 年間流木発生量を決定するパラメータの推計

年間流木発生量 y を、日降水量 Q_i の関数である日流木発生量の年間の累計値として設定する。日流木発生量の関数には線形、指数、対数、累乗等の代表的な近似式を設定してモデル化することを考える。

本来、日降水量に対応する日流木発生量のデータがあれば、両者の関係を散布図等で表現してあてはまりのよい近似式を設定できるが、一般に日流木発生量のデータを調査しているダムは殆どないと思われるため、近似式を予め想定することとする。これまでの知見³⁾から、年降水量と年流木発生量には相関がないことが分かっているから線形近似は除き、また降水量が0の場合に流木量も0であると考えて指数近似も除く。対数近似ではデータの変化率が急速に増加した後横ばいになるため集中豪雨時に流木の発生量が甚大になる状況にはそぐわないと考え、ここでは降水量の増大とともに流木発生量が加速度的に増大する累乗近似によるモデル化を考え、パラメータ a 、 b を用いて下式のように定義する。

$$y = \sum_{i=1}^n a * Q_i^b$$

すなわち、あるダムにおける各年の年間流木発生量に対して、パラメータ a 、 b を与えた場合にその年の日降水量データから計算される日流木発生量推計値の年間累計としての年間流木発生量の推計値と

実績値との残差が最小となるときの a, b の値を、Excel ソルバーを用いて求める。なお、ダムでの日降水量の測定値が得られなかったため、ここではダム近傍に所在するアメダス観測点のデータを用いた。

(4) パラメータの推定結果

累乗近似により実績値との誤差を 0.1%未満として降水量と流木発生量との関係を定式化することができた。推計されるパラメータ a, b は同じダムであっても、年によって値は変化する。ここでは、図-1~2 に各ダムにおけるパラメータ a, b の最大値、最小値、平均値の分布を示す。グラフの横軸で、左側に位置するダムほど流域内の年間降水量が大きい。係数 a は累乗近似式を対数変換した場合の定数項に相当するが、その平均値は 0.5~2.0 の間に分布しており、ダムの降水量規模とはほぼ無関係にばらついている。一方、係数 b は、累乗近似式を対数変換した場合の降水量に対する比例係数に相当し、図-4 をみると降水量規模の大きいダムでは相対的にその値が大きい様子が見受けられるが、事例数が 15 と少ないため、より多くのダム事例について確認を行うことが課題と考えられる。

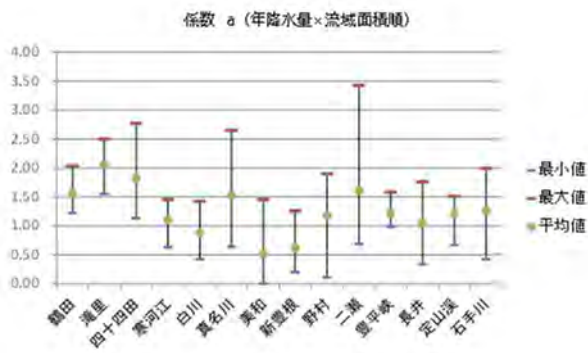


図-1 係数 a の分布

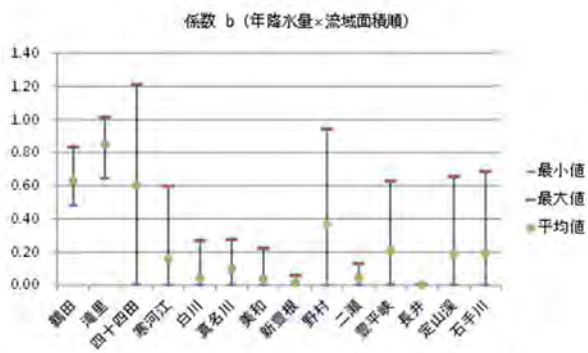


図-2 係数 b の分布

(5) 個々のダムにおけるパラメータの分布

個々のダムにおけるパラメータの分布について、係数 b を例としてダム流域の降水量規模との関係を図-3 に示す。降水量規模と b とが概ね比例するプロットもみられるが、一方で同じダムで同規模の降水量であっても、b の値は年によって大きく異なるプロットもみられる。例えば寒河江ダムで 1999 年は 3,159mm、2000 年は 3,293mm であったが流木量は 209m³、1,440m³であり、このような降水量パターン等が影響している可能性も考えられる。

この分析では、15 のダムを対象として累乗近似式にもとづく降水量と流木発生量との関係について考察を行い、実績値との誤差を 0.1%未満として降水量と流木発生量との関係を定式化することができた。対数変換時に定数項となるパラメータ a はダムの降水量規模によらず変動し、降水量の係数となるパラメータ b は降水量規模との関係が伺われた。より詳細には、個々のダムでの降水パターン等の影響等が考えられる。

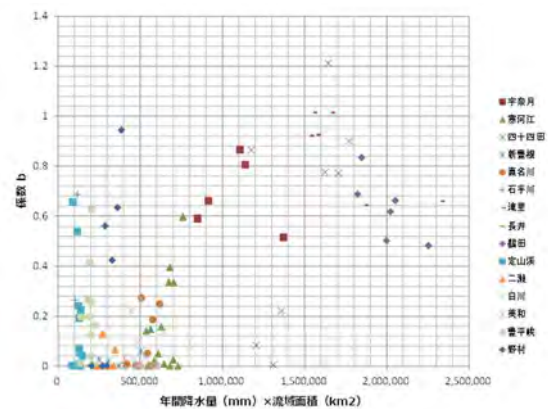


図-3 ダム降水量規模とパラメータ b との関係

3. 画像解析によるダム流木量の推計の試み

(1) 画像解析による流木量推計

降水量とダム流木との関係を詳細に調べるためには、降水量データに対応するダム流木量を定量的に把握することが重要となる。和歌山大学では、椿山ダムをフィールドとして、流木量を監視するための定点観測を継続している(図-4)が、画像解析により観測画像から流木を自動検出することができれば、ダム流木処理業務の支援はもとより、前述の降水量とダム流木量との関係といった流木発生機構を解明することにも繋がるのが期待される。現在、和田³⁾による最近傍識別器を用いた色ターゲット検出の技法をダム流木検出に適用する技術開発に取り組んでいる。



図-4 椿山ダムでの流木定点観測

川や海岸での漂流ゴミに対して、RGB の関数値（合計値や空間勾配）を算出して漂流ゴミを判別する閾値として用いる手法⁴⁾や、RGB 値を空間内の色差が均等になるように補正された色空間値（CIELUV 色空間値）に変換してその発生頻度をもとに閾値を求める手法⁵⁾等が開発されてきた。これらは一般に情報統合を行って「ターゲット色らしさ」を判断するスカラー値をもとに識別する手法であり、情報統合のための前提となる環境条件が変化する、あるいは成り立たない場合への対処等が課題とされている。これに対して、事例にもとづく学習（Case Based Learning, Instance Based Learning）手法の1つである最近傍識別器（図-5）は、従来法のような「らしさ」を示すスカラー値への縮約を行わず、色空間内で直接、識別面を設定することで、これらの課題への対処を可能とするものである。

な「らしさ」を示すスカラー値への縮約を行わず、色空間内で直接、識別面を設定することで、これらの課題への対処を可能とするものである。

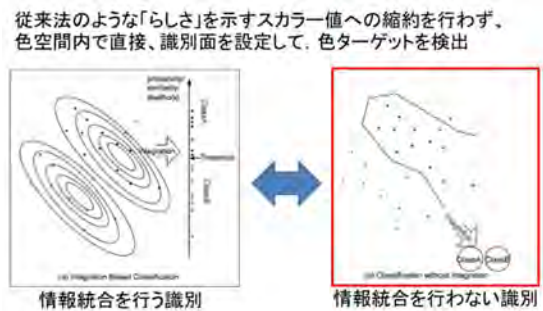


図-5 最近傍識別器の原理（和田³⁾）

(2) ダム流木画像への適用

和歌山大学システム工学研究科和田教授の開発による、最近傍識別器を用いた色ターゲット検出プログラム（Puppy Linux 上に実装したもの）を、定点観測用の Time Lapse カメラ（Brinno 社製 TLC200, レンズ画角 59 度（対角）、焦点距離 $f=3.81\text{mm}$ （35mm フィルム換算 約 36mm 相当）、記録画素数 $1,280 \times 720\text{pixel}$, 電源持続時間約 2.5 カ月（1 時間に 1 回の撮影）により撮影されたダム流木動画（AVI 形式）に適用し、ダム流木の抽出を試みる。

本プログラムは、元々、ジェスチャや顔認識などへの適用を目的として、和田により開発された技法を、ダム流木画像用に実装したものである。

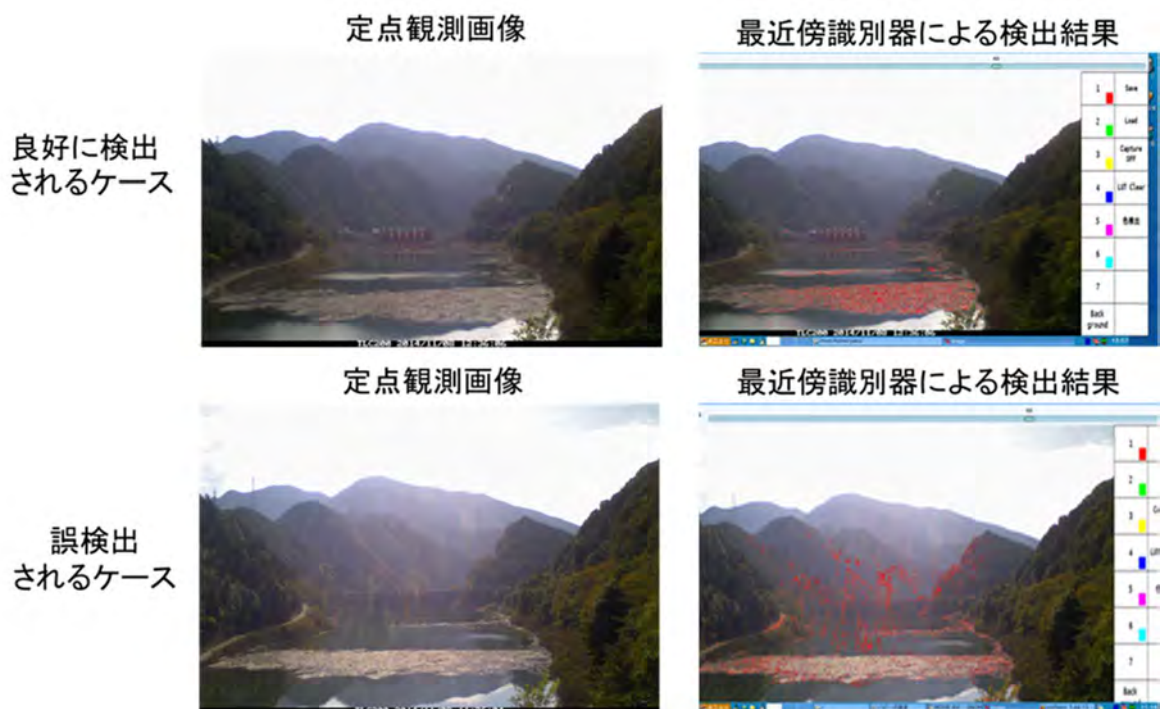


図-6 最近傍識別器によるダム流木の検出結果

ダム流木画像（2014年11月8日6時～16時撮影）に対して、最近傍識別器を用いた色ターゲットを適用した結果を図-6に示す。ダム湖面に堆積する流木については、湖面中央に集積する流木、湖岸に散積する流木を含めて、概ね良好に検出することができた。ダム湖周辺の山々に誤検出が見られるが、これらに対しては、検出対象空間の境界をダム湖面に限定すること等により対処可能と考えられる。一方で、特定時間帯の画像での学習にもとづいて他の時間帯での流木検出を行うと、時間経過とともに、湖面内においても流木の誤検出が顕著になる。これは、日射量や太陽高度、湖面の波立ち状況に起因するものと考えられる。今後、誤検出の要因に関する分析を進め、対処方法について検討を進めていく。

4. おわりに

本稿では、ダム流木の直接的な原因である土砂災害や洪水氾濫と密接な関係にある、降水量を対象にダム流木との関係について分析を試みた。さらに、現在取り組んでいる、画像解析を用いたダム流木量の推計技法の開発について紹介した。分析の結果、日降水量の関数により年間の流木発生量との関係を定式化できることを確認したが、個々の降雨イベントごとの流木発生量をモデル化するには、個々の降雨後における流木発生量の観測データの蓄積が必要であり、そのためにも現在の画像解析手法による流木抽出の手法開発を進める必要がある。

また今後は、現在あまり有効利用のしくみが整っていない、県所管のダム流木の有効利用策について検討を進めることが課題である。

なお本稿は和歌山大学災害科学教育研究センター研究報告 1(1)に発表したものをまとめ直したものである。

参考文献

- 1) 小羽根則光・的場康彦：平成23年台風12号により発生した流木の無償提供について，平成24年度近畿地方整備局研究発表会論文集，施工・安全管理対策部門：No.16, pp.1-6, 2012
- 2) 牧孝憲・高橋正人・落修一・三宅且仁・尾崎正明：全国のダム流木発生量調査，土木学会論文集 G, Vol.63, No.3, pp.22-29, 2007.
- 3) 和田俊和：最近傍識別器を用いた色ターゲット検出，情報処理学会論文誌，Vol.44，情報処理学会論文誌，No.SIG17 (CVIM8) ,pp.126-135,2003
- 4) 尾ノ井龍仁・二瓶泰雄・片岡智哉：河川漂流ゴミ輸送量に関する自動モニタリング技術の検討，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol. 69, No. 4 p. I_769-I_774,2013
- 5) 片岡智哉・日向博文・加古真一郎：Web カメラ画像解析によるプラスチックゴミ漂着量の多地点連続観測，土

土砂災害対応小型 UGV の開発

和歌山大学

徳田 献一

1. はじめに

日本における自然災害に対応するためのさまざまな救助ロボットシステムの提案がされている¹⁾。自然災害のうち土砂災害は和歌山県下においては頻繁に発生しており、我々は土砂災害に対応するための救助ロボットについての調査研究を行ってきた²⁾。自然災害の中でも土砂災害は、その原因となる集中豪雨と平時の大雨との区切りがあいまいなため、災害用に備えたロボットを使用するタイミングをはかることが困難である。そのため、平時から簡便に使用することのできるシステムとすることが望ましい。

災害用ロボットには、空中を飛翔するドローンと呼ばれる UAV(Unmanned Aerial Vehicle)や地上を走行する UGV(unmanned ground vehicle)があるが、土砂災害が発生する危険性が高い暴風下では空中を飛翔することは困難である上、訓練を受けた操作者の確保が容易ではない。一方、地上を走行する車両であれば暴風下での運用が可能であり操作も容易である。

平時の大雨強風の状況から土砂災害発生の原因となる暴風雨の状況は連続しているため、土砂災害に対応するロボット機器は平時から利用可能なものとし、災害発生時には平時から連続して運用されることが望ましい。このような平時から災害発生時まで連続的に運用する機器システムを構成するために、提案する小型 UGV においては平時における運用と災害時における運用の2つの状況に対して次のように想定する。まず、平時においては、田畑の見回りや暗い夜道での道案内を目的とするロボットとして手軽に利用できるものとし、そして暴風雨時には土砂災害発生危険性の高い地点のカメラによる探索に用いることを考える。このような利用シーンにおいては、災害発生時に小型 UGV が備えなければならない機能は次の2つに絞られる。その機能は、(1)人間操作者が指示した災害発生の危険性の高い箇所を小型 UGV の移動・観測目的地として設定できることと、(2)人間操作者によって指示された目的地までの悪路を踏破することである。

この2つの機能実現に対して、我々は(1)レーザポインタによる目的地指示システムの実装と(2)泥濘地踏破のための周期操舵システムの有効性の確認を行ってきた。

本稿では、土砂災害に対応するための小型 UGV の提案を行い、開発コンセプトの紹介およびその課題であるレーザポインタによる誘導方法と泥濘地踏破のための周期操舵システムの検討について報告する。

2. レーザポインタによる誘導手法

自動運転車である小型 UGV はレーダー、LIDAR、GPS、カメラなどにより周囲の環境を認識して、指定された行き先までの経路を自律的に探索し走行する性能が期待される。整備された道路や予め与えられた地図に従って走行する UGV とは異なり、災害時に運用される UGV では目的地を人間が指定するための技術を実装しなければならない。そこで、平時から連続的に利用できる簡便なシステムとして図-1 の概念図のようなレーザポインタによる目的地指示システムの導入を行った。

(1) レーザポインタによる指示取得

レーザポインタの位置の取得はカメラを用いて行う。カメラを用いた移動ロボットの制御は近年盛んにおこなわれており、その手法は、位置にもとづく方法と画像にもとづく方法の2つに大別することができる。このうち、画像にもとづく方法は状態変数や制御目的を画面上に直接定義するため、周囲環境の3次元モデルを必要とせず、動的な災害環境下で有効な手法であると考えられる。その反面、一般にシステムの状態方程式は非線形性が強く、制御モデルの構築は困難がともなう。

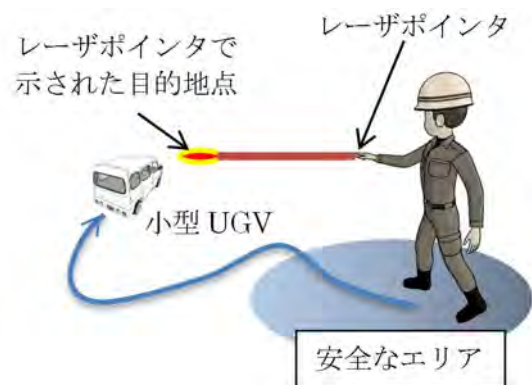


図-1 レーザポインタ目的地指示システム

従来研究ではファジィ制御を用いることで、複雑な制御モデルを考慮することなく、モデルフリーで車輪型ロボットの画像にもとづく制御を実現した。だが、この手法は地面に描かれた軌道への追従が目的であったため、カメラの視界は前方のみに限定され、ロボットの速度も正の値（前進方向）のみとされていた。

しかし、ロボットを誘導しようとしたときに、カメラの視界が前方のみであると不都合が多い。周囲のどこを目標地点として指定されても対応するためには、より画角の広いカメラを用いる必要がある。また、目標地点が後方や最小旋回半径よりも内側にある場合、前進のみでは移動することは困難であり、後退・切り返し動作を適宜駆使する必要があると考えられる。

そこで本研究では、従来研究の手法を拡張し、より画角の広い全方位カメラを用いることで、目標地点が周囲360度のどの方向であっても画面内にとらえられるようにした（図-2）。また、目標地点が最小旋回半径よりも内側であるなど前進動作のみで移動できないような場所に存在したとしても、後退や切り返し動作を必要に応じておこなうことで、目標地点へ車輪型移動ロボットを移動させられるような制御法を構築することを目的とし、制御システムの構築をおこなった。

この制御システムにおいて、制御対象である小型UVGを前輪操舵型の車輪型移動ロボットモデルとして定義し、全方位画像中においてレーザポインタで指示した目標点を画像中心点に一致させる制御則を設計することとした。しかし、前述の通りモデルベースの制御をおこなうことは困難であるため、ファジィ制御器の開発をおこなった。

(2) 全方位画像にもとづくファジィ制御手法

実際に取得した全方位画像を図-3に示す。全方位画像にもとづくファジィ制御器を開発するために、まず予備実験として数名に実際にロボットを操作してもらった。そのときの画像上の目標点とロボットの挙動を記録し、その結果をもとに大まかなファジィルールを作成した。

入出力の変数は、 $(\alpha, \lambda, s, \phi)$ の4種類とし、これらの変数は図-4に示すメンバシップ関数によって、実数の適合度を有する言語表現（ファジィ集合）へと変換される。

$$\tilde{\alpha} = \{\text{NB, NS, ZO, PS, PB}\}$$

$$\tilde{\lambda} = \{\text{ZO, PS, PB}\}$$

$$\tilde{s} = \{\text{N, ZO, P}\}$$

$$\tilde{\phi} = \{\text{N, ZO, P}\}$$



図-2 全方位カメラを搭載した小型UGV

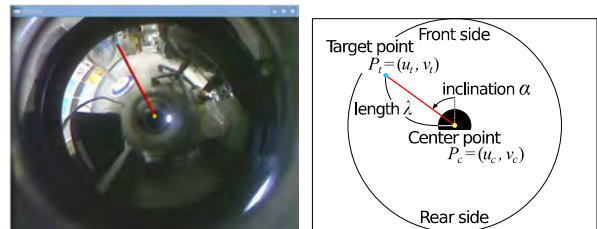


図-3 全方位カメラ画像上でのレーザポインタ像

ただし、NB, NS, ZO, PS, PB はそれぞれ Negative Big, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Big を意味するラベルである。提案した制御則によって正しく目標位置へロボットを制御できるかシミュレーションによって確かめた。次に、図-5にシミュレーション結果の一つを示す。このシミュレーションでは、目標地点がロボットの最小旋回半径よりも内側の場合 $(x_t, y_t) = (50\text{cm}, 50\text{cm})$ としている。この時の画像座標の動きは図-6のようになり、ロボットが後退・切り返し動作をおこないつつながら目標地点付近へ移動していることが分かる。この結果からロボットは目標地点へ到達しており、本手法の有効性を示すことができたと考えられる。

3. 泥濘地踏破のための周期操舵の試み

砂漠などの乾燥した砂地では泥濘地と同様に車輪の沈下が大きな問題となる。この沈下を低減するための手法として、周期操舵走行がある。周期操舵とは車両が周期的に操舵しながら走行する方法でスタックを解決する手法の一つとして注目されている。この手法では、砂地上での周期操舵走行が直進走行に比べて車輪の沈下を低減することが報告されている³⁾。そこで、砂地での効果が確認された周期操舵

走行を泥濘地に適用し、新たに製作した単輪実験装置を用いて車輪の沈下低減に対しての有効性の確認と検証を行った。

(1) 単輪実験装置

単輪実験装置の実験装置は車輪部分とセンサ部分に分かれており、上下方向のスライダのみで接続されているため前進することはできない。車輪部分は直径 140[mm]のタイヤ、タイヤを回転させるための DC サーボモータ、タイヤの向きを変えて操舵を模擬する RC サーボモータと Arduino Uno で構成し、センサ部分は超音波センサモジュールと Arduino Uno で構成した。超音波センサモジュールは車輪部分に水平に取り付けられた板に超音波を当てて沈下量を計測している。

(2) 沈下実験

まず、乾燥した砂地において周期操舵の操舵角ごとにそれぞれ 10 回ずつ計測を行った。計測結果により、操舵角が増加することにより乾燥した砂地において沈下が低減できることを確認した。次に、泥濘地における周期操舵の有効性の確認するために含水率 15%の泥濘地を作製し、操舵の有無による車輪の沈下量を計測した。振幅を 0[deg]~50[deg]まで変化させ、角周波数を $\omega=1$ に固定し、それぞれの振幅で 10 回ずつ計測を行った。車輪の周速度は 201.6[mm/s]である。

その実験の結果、周期が 0[deg]の時に比べ 10[deg], 20[deg], 30[deg], 40[deg], 50[deg]全ての場合において周期操舵した場合の方が沈下を低減できるという結果を得た。また、振幅を大きくするにつれ、沈下量も減少するという結果が得られた。

(3) 轍による評価

周期操舵の有効性検証のため、沈下実験後の轍を比較した。各周期の沈下実験終了時の轍を撮影し、0[deg]~50[deg]の轍の後を赤線で囲い比較を行った(図-7)。検証のため 0[deg]と 50[deg]の轍の画像を得た(図-8)。

検証の結果、周期が大きくなるにつれて轍は扇型に近づくことが分かった。この結果から、周期操舵は車輪の前方から砂を掻き集め、車輪の後方へ砂を排土することで沈下を低減しており、周期が大きくなるにつれ砂を掻き集める範囲が大きくなるため、より沈下が低減できたと考えられる。

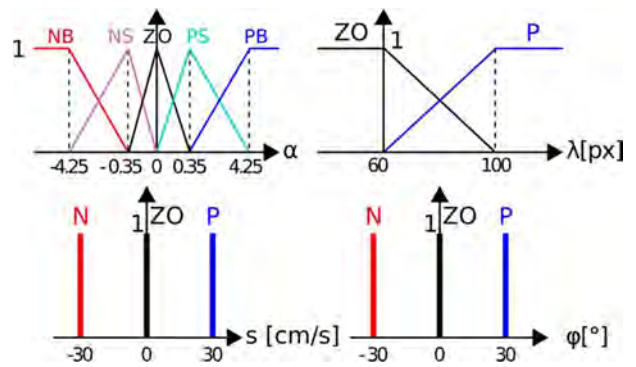


図-4 作成したメンバシップ関数

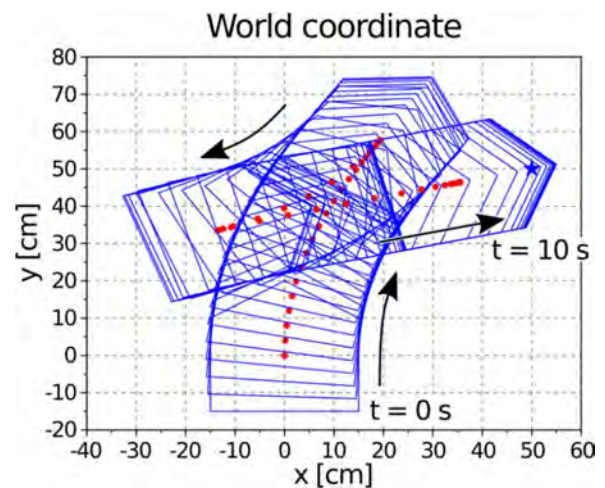


図-5 シミュレーション例

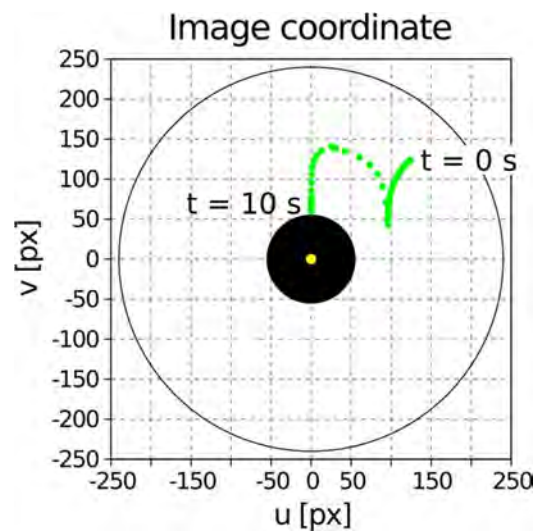


図-6 全方位カメラ画像上のレーザポインタ

(4) PIV 計測による評価

轍の比較による検証で得た考察が正しいかを確かめるため、PIV 計測により車輪周りの流れの解析を行った。実験は、水を含ませた吸水性ポリマーが入ったポリカーボネートの容器の中に単輪実験装置を入れ、車輪を回転させ、その様子を容器の底から

撮影した。そして、MATLAB toolbox として提供されている PIV lab を用いて、撮影した画像の解析を行った。

車輪をそのまま回転させた場合 (0[deg]) と 30[deg] で周期操舵しながら回転させた場合の車輪下の流れをビデオカメラで撮影し、PIV 計測による解析を行った結果を図-9 および図-10 に示す。緑の線が吸水性ポリマーの流速を表しており、赤で囲われた範囲が車輪を表している。

PIV 計測による解析の結果、0[deg] の場合 (図-9) は車輪前方や両側面で流れが強くなっているのに対し、30[deg] の場合 (図-10) は周期の弧の外側で流れが強くなっていることが分かる。このことから、轍での検証で考察したように、周期操舵は周期の弧の外側から砂を掻き集めることで沈下を低減していると言える。

4. おわりに

土砂災害に対応する小型 UGV の開発について、平時から簡便に利用できるシステムとして、レーザポインタによる目的地指示システムの実装と泥濘地踏破のために周期操舵の有効性の確認を行った研究を行った。

災害時に初めて利用するロボットシステムのために訓練などを行うと同時にロボットの維持を続けるのではなく、平時においては身近な田畑の見回りや夜道の案内などに利用できるものとするにより集中豪雨の発生の早期から利用できるものとする事が期待できる。そのためには、日常的に利用可能なロボットシステムとしての問題点を整理し、課題解決を今後もつづけていく計画である。

参考文献

- 1) 大須賀公一：災害対応の記録 - 災害関係記録作成分科会からの報告，日本ロボット学会誌，Vol.32，No.1，pp.10-18，2014
- 2) Kenichi Tokuda: The Application of Robot Technologies to Disasters from Torrential Rains on Japan's Kii Peninsula, Journal of Robotics and Mechatronics, No. 26, Vol. 4, pp. 449-453, 2014.
- 3) 山川淳也：“周期操舵走行における砂地とタイヤの相互作用に関する研究”，日本機械学会第 17 会交通・物流部門大会講演論文集，pp.211-212，2008



図-7 単輪実験時における轍の形成



図-8 単輪実験時における操舵角による轍の違い

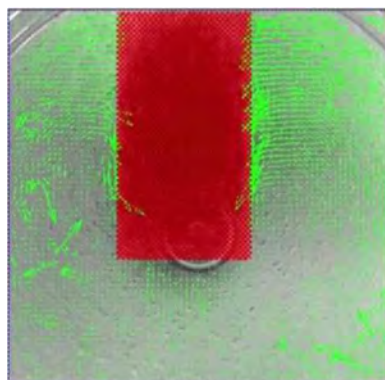


図-9 PIV 解析による車輪周辺流速 (0 [deg])

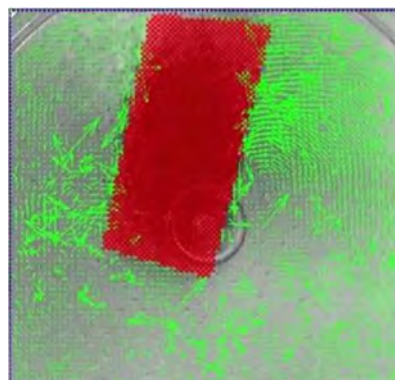


図-10 PIV 解析による車輪周辺流速 (30 [deg])

円柱鉄鋼部材の応力測定に対する表面SH波音弾性法の適用

和歌山大学

村田頼信

1. はじめに

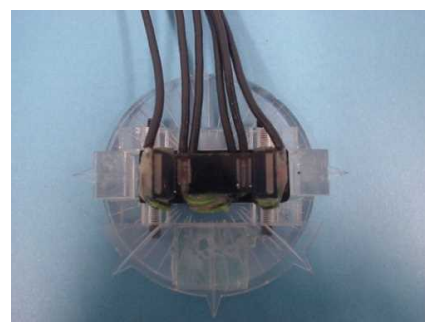
現在、我々の生活は、道路や鉄道などの交通、発電や送電、それにトンネルやビルといった社会基盤構造物（いわゆるインフラ構造物）と大きく関わっている。これらの構造物は、適切な管理が行われないうまま過酷に供用されると、設計当初で想定していた以上の負荷がかかることによって劣化が進行し、崩壊や破損といった事故につながる可能性がある。日本国内のインフラ構造物は、1960年代から1980年代にかけてのいわゆる高度経済成長期に集中的に建設された。これらの構造物の寿命は一般的に50年と言われており、この年数を超えるインフラ構造物の数は今後加速的に増えることになる。国土交通省は、表-1に示すように、これを裏付ける代表的なインフラ構造物の老朽化についての最新の調査結果を平成26年度国土交通白書で公表している。これらは、最近になってようやく点検が進んできたものの、自治体の予算不足や維持管理の知識の欠如で管理が十分に行き届いていないのが現状である。このような状況を鑑みると、より簡便な検査技術の開発が急務であり、このような技術によって普段からインフラ構造物の健全性が維持されれば、災害時でも倒壊を未然に防ぐことができ被害を最小限にできると考える。したがって、現存の構造物を安全に供用する必要があることから、在姿状態（供用中のそのままの姿）での非破壊応力評価による構造物の保守管理技術の確立が求められている。

表-1 社会資本の老朽化の現状

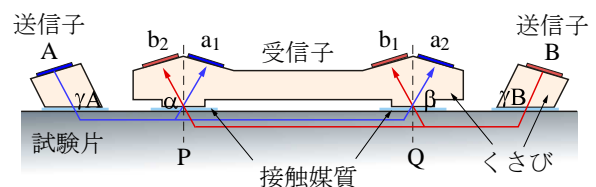
	平成25年3月	35年3月	45年3月
道路橋 (橋長2m以上)	約18%	約43%	約67%
トンネル	約20%	約34%	約50%
河川管理施設 (国管理の水門等)	約25%	約43%	約64%
下水道管きよ	約2%	約9%	約24%
港湾岸壁 (水深4.5m以深)	約8%	約32%	約58%

2. 表面SH波音弾性

我々はこれまで、鉄鋼部材内の実体応力を非破壊で計測するために、表面SH波音弾性法について研究を重ねてきた。表面SH波音弾性法は、製造時に生じる集合組織の影響を受けず、建造時の応力状態が未知な高経年鉄鋼構造物であっても現在の応力を非破壊で計測できる特徴を持っている。しかしながら、表面SH波は開口面に平行に振動する横波を直接試料に入射させなければならないために粘性の高い接触媒質を用いる必要があり、接触媒質の厚みや試料表面の粗さ等の影響を受けやすいという問題があった。このため、高精度音速測定が難しく、応力測定の実用化には至っていなかった。そこで、接触媒質の厚みの影響を軽減可能なT形表面SH波センサ(図-1参照)を開発した。そして、図-2に示すような、ダム洪水吐ゲートの応力管理や鉄道ロングレールの軸力管理に適用することを試みてきた。このようにこれまで、表面SH波音弾性法を適用できるのは、平面鉄鋼部材に限られていた。そこで、ここでは、適用できる形状範囲を拡大するために、表面SH波音弾性法を送電鉄塔や配管に多く使われる円柱鉄鋼部材に対して適用すること試みた結果について報告する。



(a) センサ部の写真



(b) センサ断面の概略図

図-1 T形表面SH波センサ



(a) ダムの洪水吐ゲートにおける応力管理



(b) 鉄道ロングレールの軸力管理

図-2 表面 SH 波音弾性の適用例

3. 円柱鉄鋼部材への適用

まず、曲面における表面 SH 波の伝搬特性をシミュレーションおよび実験で検証した。そして、これを基に、大型配管の応力測定を目的に、図-3 に示す曲面対応 T 形表面 SH 波センサを設計・試作した。このセンサの特徴は、送信子と受信子を従来使用してきたアルミ板はなく柔軟な材料であるゴム板で連結しており、センサが測定面の曲率に応じて変形するように工夫されている。しかし、このセンサは、測定曲面に合わせて曲がる構造ゆえ、センサを設置する際に接触状態が変化することがわかった。そのことにより、測定精度の不足が問題点として挙げられた。

そこで、図-4 に示す接触面を測定対象に合わせた形状のクロス T 形表面 SH 波センサを設計・試作した。このクロス T 形表面 SH 波センサの構造は、2 つの T 形表面 SH 波センサをクロスに配置したセンサとなっており、さらに、接触面を凸曲面 R1000mm の円柱面に合わせたものとなっている。このセンサの特徴は、平面用の T 形表面 SH 波センサと同様、各素子のずれが発生しないこと、またセンサを回転させることなく主応力差測定を行えることである。ただし、測定対象物は凸曲面 R1000mm の円柱面に限定される。クロス T 形表面 SH 波センサの性能を、

凸曲面 R1000mm の円柱状の鉄鋼試験片の残留応力測定により評価した。その結果を図-5 に示します。このように、クロス T 形表面 SH 波センサを用いることで測定精度が大幅に向上することが実証された。

今後は更なる精度向上を目指して研究を行う計画である。

参考文献

- 1) 北野勝彦, 浦部友孝, 村田頼信, 藤垣元治: クロス T 形表面 SH 波センサを用いた曲面鉄鋼部材の主応力差測定に関する研究, 電気学会 第 21 回メカトロニクスワークショップ, pp.170-173 (2016)

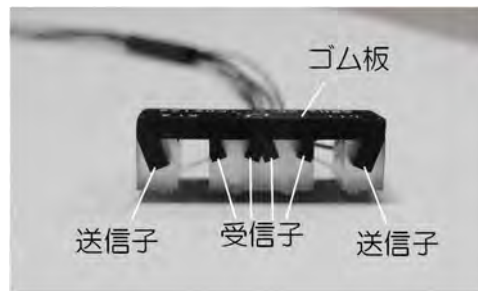


図-3 曲面対応 T 形表面 SH 波センサ

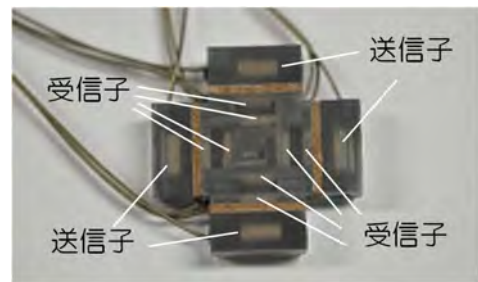


図-4 クロス T 形表面 SH 波センサ

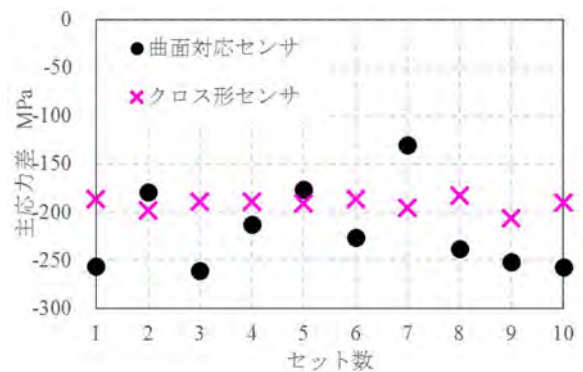


図-5 凸曲面 R1000mm に対する残留応力測定結果

漫画表現を用いた防災知識の提示による防災意識向上手法

和歌山大学

榎田宗丈・吉野孝

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災後、人々の防災意識は高まりを見せた。2013年の「防災意識に関する調査」(WEB調査)¹では、「大震災がまた近いうちに必ず起こる」と半数近くが回答しているが、東日本大震災後の防災意識については、約半数が「大震災直後は意識が高まったが、徐々に薄れてきている」と回答している。東日本大震災以降にも、日本では2014年9月27日の御嶽山噴火、2015年9月の関東・東北豪雨、2016年4月14日に平成28年(2016年)熊本地震(以下、熊本地震)などの災害による被害を受けている。しかし、一般に、災害発生直後は防災意識が高まるものの、時間が経つごとに人々の防災意識は低下していく²。今後、首都直下地震や南海トラフ巨大地震も危惧されており、人々の防災意識の継続、向上は必要不可欠である。

我々は漫画表現を用いて防災知識を提示する「防災4コマ漫画」をTwitterから配信した。単にTwitterを介して防災知識を提供するのではなく、漫画表現を用いることで学習効果の向上を図る。防災4コマ漫画は日常的に利用されているTwitterを介して配信することで、ユーザが日常生活の中で防災知識を獲得し、ユーザの防災意識が向上することを狙っており、災害の対策における自助のための手助けとなる可能性がある。

本報告では、日常的に活用されているTwitterと学習効果の高い漫画を組み合わせることにより、ユーザの防災意識を向上させる可能性について述べる。

2. 関連研究

(1) Twitterと災害

東日本大震災時のTwitterの利用動向、ツイートの情報の伝搬や拡散について分析した研究は多くある³⁻⁵。Sakakiら³とMiyabeら⁴は、震災時のツイートを地域間で比較している。Lizaら⁵は、ニュージーランドの地震と東日本大震災の事例をあげ、

震災時のツイートをハッシュタグの視点から分析している。Adamら⁶は、震災時のツイートの拡散を分析して、リツイートされた情報の信憑性についての問題点をあげている。

東日本大震災以外の災害とTwitterについて分析した研究も数多く存在する^{6,7}。Sarahら⁶は、レッドリバー川の洪水とオクラホマの火災とTwitterの利用傾向について分析し、災害によってTwitterの利用形態が異なるとしている。石川ら⁷は、一般ユーザによるハッシュタグの利用呼びかけの効果を検証している。

本報告では、一般的にTwitterの分析で用いられているハッシュタグ、リツイートやネットワークではなく、ツイートアクティビティを用いて分析する。

(2) SNSと防災

池尻らは、Facebookを利用した防災学習手法の提案をしている⁸。このシステムでは、首都直下地震の想定シナリオを描いたアニメ「東京マグニチュード8.0」をもとに現実的な災害発生場の場面の提示を行っている。この研究ではFacebookを使った参加者同士のコミュニケーションによって、首都直下地震の災害想定や防災対策の観点を増やすことに効果があるとしている。防災4コマ漫画は、ツイートを閲覧することで防災意識を高めることを目的としており、防災知識に触れることに重点を置いている。池尻らのシステムとは、ユーザのコミュニケーションに重点を置いていないところが異なる。

(3) 漫画による学習効果

向後らは、漫画による表現が学習内容の理解と保持に及ぼす効果を検証している⁹。漫画表現を用いることで、文章だけの表現よりも長期の記憶保持を図り、漫画の内容にストーリー性を持たせることによって、ユーザの理解を促進できる。漫画表現の持つ面白さや新奇性の効果は、ユーザの注意を引くといった効果が期待できる。向後らは、漫画とシナリオ形式のストーリーを組み合わせることで実験協力者に提示し、提示された資料を読んだ後に、その内容についてのテストを行うことを伝えて実験を行っている。漫画と文章による学習の違いを見ることに重点が置かれており、学習の後にテストを行うという実験手順は教育現場を想定していると考えられる。防災4

¹ Panasonic Newsroom Japan : パナソニックが防災意識調査を実施～2人に1人が「東日本大震災後、防災意識が徐々に薄れている」、7割以上の人が「災害への備えが不十分」と回答、
<<http://news.panasonic.com/jp/topics/2013/38104.html>> , 2016年12月10日アクセス。

コマ漫画は Twitter を介して配信しており、教育現場のような場ではなく、ユーザが日常生活の中で防災知識を獲得することを目的としている。Twitter では、アカウントをフォローする、もしくは他のユーザのリツイートされることによりタイムラインにツイートが表示されるが、ユーザはそのツイートを読み飛ばすことができるため、ツイートを閲覧するかどうかはユーザの意思によって変わる。これは、Facebook など、Twitter 以外の SNS でも同様のことがいえる。向後は実験的および教育現場を想定した環境のなかで漫画の効果を検証しているが、SNS のような日常的に使われているサービスのなかでの検証はなされていない。

3. 防災 4 コマ漫画

防災 4 コマ漫画および防災 4 コマ漫画を配信しているあかりマップ bot の各機能について説明する。

(1) Twitter と災害

防災4コマ漫画は、災害、防災、減災に関する知識を学習できる4コマ漫画である。防災4コマ漫画は Twitter を介して提示することで、多くのユーザに防災知識が共有され、かつユーザの防災意識が向上することを狙う。

向後の漫画による学習効果の検証より¹⁰⁾、防災4コマ漫画は、防災知識の提示に漫画表現を用いることで、ユーザの理解を促進し、漫画表現の持つ面白さや新奇性の効果からユーザの注意を引くといった効果が期待できる。

防災4コマ漫画は、2016年12月12日までに86話の配信をしている。防災4コマ漫画3話（4月3日配信）以降は、3日に1回の頻度で配信している。図-1に防災4コマ漫画74話「なんで11月5日が『津波防災の日』？」（11月2日配信）を防災4コマ漫画の一例として示す。

防災4コマ漫画の内容は、3.11からの学びデータベース²⁾、内閣府の防災情報のページ³⁾、内閣府政策統括官（防災担当）のTEAM防災ジャパン⁴⁾など、行政や大学が出している確実性の高い情報をもとに作成している。防災4コマ漫画は、時節の話題、災害や防災に関するニュースなどに合わせて配信している。

²⁾ 3.11 からの学びデータベース：IRIDEs から発信する東日本大震災の教訓空間、<<http://311manabi.irides.tohoku.ac.jp/>>, 2016年12月12日アクセス。

³⁾ 内閣府：防災情報のページ、<<http://www.bousai.go.jp/index.html>>, 2016年12月12日アクセス。

⁴⁾ 内閣府政策統括官（防災担当）：TEAM防災ジャパン、<<https://bosaijapan.jp/>>, 2016年12月12日アクセス。



図-1 防災 4 コマ漫画 74 話「なんで 11 月 5 日が『津波防災の日』？」（11 月 2 日配信）



図-2 あかりマップ bot のシステム概要

(2) あかりマップ bot

①防災情報の提供機能

あかりマップbotのシステム構成を図-2に示す。本システムは、平常時から継続的に防災情報を提供するために、Twitter上で動作する10)。ユーザがTwitter上に発信したツイートから移動を検出し、検出されたツイートから位置の抽出を行う。ここで「位置」とは、地名やランドマークなどのユーザの現在地が分かる情報を指し、位置表現が含まれるツイートを「位置ツイート」とする。抽出した位置周辺の防災情報を取得し、その結果を位置ツイートの発信ユーザに提供する。ここで提供する「防災情報」とは、避難所、AED、コンビニエンスストア、自動販売機の情報のことを指す。本拠地から半径10km以内の範囲は、ユーザの普段の行動範囲内と考えられるため、ユーザに情報は提供されない。本拠地から10kmという距離は、一市区町村の面積のおよその半径として設定した数値である⁶。また、詳細な防災情報を閲覧可能なWebページを設けており、避難所の収容人数や備蓄などの防災情報や、周辺の他の防災情報などを閲覧できる。

②ランキング機能

ランキング機能は、ツイートに含まれる位置をもとに、ユーザおよびスポットの2種類のランキングを提供している。ユーザランキングは、ツイートされた位置とユーザの本拠地との直線距離を合計した値をもとに順位付けしている。スポットランキングは、全ユーザのツイートの中で各位置（スポット）が発信された合計回数をもとに順位付けしている。なお、Twitterにおいてツイートを非公開にしているユーザのランキング情報は、公開していない。図-3に、ランキング機能の画面例を示す。

③行動アルバム機能

行動アルバム機能は、ユーザの過去のツイートに含まれていた位置をもとに、過去に訪れた場所をヒートマップで地図上に表示している。このWebページでは、システムに誤認識された位置の削除を行うことができる。図-4に、行動アルバム機能の画面例を示す。

④気象警報・注意報の通知機能

気象庁は、気象庁防災情報XMLフォーマット(以下、気象XML)を公開している⁷。この気象XML

では、気象庁が気象警報・注意報のデータをXML(汎用的に使える仕様)で公開している。気象警報・注意報の通知機能は、気象XMLおよびユーザが登録している本拠地情報をもとに、ユーザに合わせて提供している。気象警報・注意報の通知機能は、2016年9月3日より運用している。図-5に、気象警報・注意報のツイート例を示す。



図-3 ランキング機能の画面例



図-4 行動アルバム機能の画面例



図-5 気象警報・注意報の通知機能のツイート例

4. ツイートの分析

(1) 防災 4 コマ漫画におけるツイートアクティビティの分析結果

Twitterが提供しているツイートアクティビティ⁸では、インプレッションやエンゲージメントが提供されている。インプレッションは、ユーザのタイムラインまたは検索結果にツイートが表示された回数である。エンゲージメントは、ユーザがツイートに反応した合計回数である⁹。インプレッション、エンゲージメントの回数は、公開アカウント、非公開アカウント関係なくカウントされるため、ツイートに対するユーザの興味関心を詳細に分析することがで

⁵ 「本拠地」は、ユーザがあかりマップbotをフォローしたときに設定した自宅や職場などの普段いる場所を指す。

⁶ 都道府県データランキング：自治体規模、<http://uub.jp/pdr/jr_3.html>, 2016年12月12日アクセス。

⁷ 気象庁：気象庁防災情報XMLフォーマット、<<http://xml.kishou.go.jp/>>, 2016年12月12日アクセス。

⁸ Twitterヘルプセンター、ツイートアクティビティ管理画面、<<https://support.twitter.com/articles/20171994>>, 2016年12月12日アクセス。

⁹ ツイート内の任意の箇所(リツイート、返信、フォロー、いいね、リンク、カード、ハッシュタグ、埋め込みメディア、ユーザ名、プロフィール画像、ツイートの詳細表示など)をクリックした回数である。

表-1 防災知識テストの問題内容

問題番号	防災4コマ漫画の配信	問題文	正解例
問3	○	東日本大震災後の調査で、津波経験や居住環境が変化した子供にみられた症状とは何か？	アトピー性皮膚炎 (アトピー)
問8	○	被災地の自治体職員は、現場で過重労働を行う上に、被災地住民のバッシングの対象となることもある。これを避けるためには、自治体職員さんと住民がお互いに同じ何であることを理解しなければならないか？	同じ被災者である
問9		感染症の大規模な流行を指す言葉は何か？	パンデミック

きる。

防災4コマ漫画のツイートアクティビティを取得し、防災4コマ漫画1話から30話までのインプレッションとエンゲージメントの分析した。1話から30話の配信期間中に熊本地震が発生したため、熊本地震に合わせた内容を8話(4月18日)以降に配信をした。22話(5月30日)以降は、梅雨の到来に合わせて水害に関する配信も行った。

防災4コマ漫画のツイートアクティビティの分析の結果、以下の2点を明らかにした¹⁰⁾。

- ・ 震災直後、平常時よりもユーザの災害への関心は高まるものの、少しずつ関心は薄れていく可能性がある。
- ・ 梅雨時期に水害の内容を配信といった時節に合わせての配信は、ユーザの関心の低下を防ぐ可能性がある。

(2) シナリオと定期ツイートとの比較によるツイートアクティビティの分析結果

あかりマップbotでは、防災4コマ漫画だけではなく、防災4コマ漫画内の会話のやり取りを文字にしたシナリオの配信を行っている。このシナリオは、防災4コマ漫画の各話に対応しており、防災4コマ漫画7話以降から配信している。また、あかりマップbotでは機能の紹介をするために、一定時間ごとに配信されるツイート(定期ツイート)の配信を行っている。

防災4コマ漫画、シナリオ、および定期ツイートのツイートアクティビティを比較した結果、以下の2点を明らかにした¹⁰⁾。

防災4コマ漫画は、漫画表現の持つ新奇性や面白さの効果からユーザの注意を引きやすい。

Twitterのような日常的に使うSNSと、漫画表現を組み合わせることにより、日常生活の中に学習を取り込むことができる可能性がある。

上したかを調べるために、アンケート調査および防災知識テストを10話配信後に行った。

アンケートおよび防災知識テストは、紙面およびGoogleフォーム¹⁰⁾を用いて行った。回答者は、あかりマップbotをフォローしている28名(10代1名、20代26名、30代1名)、フォローしていない20名(10代3名、20代13名、30代1名、50代2名、不明1名)、計48名である。

(1) 防災4コマ漫画におけるツイートアクティビティの分析結果

防災4コマ漫画が、ユーザに防災の意識を持たせるきっかけになったのかを確認するためにアンケートを行った。アンケート回答者は、防災4コマ漫画を配信しているあかりマップbotをフォローしている28名である。

「あかりマップbotから配信されている防災4コマ漫画を見たことがありますか？」という質問に対して、「毎話みている」3名、「ときどき見ている」23名、「全く見たことがない」2名であった。以降のアンケート結果では、防災4コマ漫画を「全く見たことがない」2名は、回答の信頼性に欠けるため結果から除外している。

「防災4コマ漫画を見ることで、防災に関する知識が身に付いた」という質問項目については、中央値4、最頻値4であった。評価が高かった実験協力者の自由記述では、「防災の知識が入っているから」といった防災知識が身に付いたという記述が多かった。防災知識を漫画で提供することに関して、以下のような回答が得られた。

- ・ 「活字だけの長い文章よりも目につきやすく、情報に触れる頻度が増えた」
- ・ 「対話形式で学べるため分かりやすい」
- ・ 「防災に関することがダラダラと書いてあってもなかなか読む気になれないが、漫画があること

5. アンケート調査および防災知識テスト

防災4コマ漫画によって、ユーザの防災意識が向

¹⁰⁾ Googleフォーム, アンケートを作成, 分析できる無料サービス, <https://www.google.com/intl/ja_jp/forms/about/>, 2016年12月12日アクセス.

で興味を持って読むことができた。分かりやすく、知識がスッと頭に入った」

また、「よく見る Twitter でこういう情報を出してくれると助かる」という Twitter で防災知識を提供することに関する回答が得られた。一方、「同意しない」と回答した回答者の自由記述では、「すでに知っている内容が多い」「情報量、文章量が多かった」という記述があった。

「防災 4 コマ漫画を見ることは、防災に対して意識を持つきっかけになった」という質問項目については、最頻値 3、中央値 4 であった。「同意する」という回答者の自由記述では、「熊本地震などタイムリーな話題に関する話もあったため意識が働いた」といった回答が得られた。また、「漫画なのでとっつきやすかった」といった漫画表現を用いたことによる気軽さを評価する回答者もいた。一方、「強く同意しない」という回答者の自由記述では、「読んで直ぐに活かせる対策や知識であれば意識が変わるかもしれないが、災害時についての知識が多かったため、漫画を見たことがきっかけにならなかった」といった回答が得られた。「どちらともいえない」という回答者の自由記述でも、「自分に当てはまる内容がなく、危機感を持ちづらいため」といった意見が得られた。

これらの 2 つの質問より、防災 4 コマ漫画は、漫画表現を用いることで学習者の注意を引き、防災知識の理解を促進でき、防災意識を高める可能性があることが分かった。

(2) 防災意識と行動に関するアンケート結果

意識付けから実際に行動したかを確認するために「防災 4 コマ漫画を見たことで、何か防災対策をしましたか」という質問項目を自由記述で回答してもらった。「何もしていない」もしくは無記入の回答者が 22 名いた。一方で、防災対策をした回答者 4 名の自由記述は以下の通りである。

- ・「旅行先でも避難所を確認するようになった」
- ・「漫画内の解説で分からないところを調べたり、被災時の行動ルールなどについて発展して知りたいと感じ、様々なサイトを見回るきっかけになった」
- ・「住まい付近の避難所を調べた」
- ・「熊本地震の様子を知ろうとした。地震のときに流れてくる防災情報の真偽を確かめるようにした」

避難所の確認の動機付けにつながったのは、防災 4 コマ漫画を提供している Twitter アカウントであるあかりマップ bot が、防災情報として避難所を提供しているためだと考えられる。

実際に防災行動している回答者もいることから、

防災 4 コマ漫画は防災意識を継続できる可能性がある。

(3) 防災意識テスト

増本らは、津波防災知識から避難意思発生までの仮説モデルを示している¹²⁾。ここで、津波防災知識を得ることで避難意識が向上し、避難意思が発生するという流れが、避難開始に最も影響するとしている。同様に防災意識を向上させるためには、防災や災害に関する知識を学ぶことが必要不可欠である。そこで、ユーザが防災 4 コマ漫画によって防災知識を学習したかを問うために、「防災知識テスト」を行った。

防災 4 コマ漫画は、日常的に Twitter を利用している中で防災知識を獲得することを目的としているため、防災知識テストを行うことを事前に伝えていない。

表-1 に一部抜粋した防災知識テストの問題内容を示す。「防災 4 コマ漫画の配信」において、「○」が防災 4 コマ漫画で配信を行った問題である。防災 4 コマ漫画で配信したものと、配信していないものとを混在させることで、防災 4 コマ漫画を通して新しく防災知識が身についたかを調査する。問題は全部で 14 問あり、そのうち防災 4 コマ漫画で配信した内容をもとに作成した問題が 7 問、配信していない内容をもとに作成した問題が 7 問である。表-1 に正解例を示しているが、協力者の解答が異なる場合でも、問題文に適した解答の場合は正解としている。解答欄には、その場の思いつきによる解答を避けるために「分からない」という欄を設けた。また、各問題の解答欄には「情報源」という項目を設け、記入した解答の情報の入手先がどこであるかを明らかにできるようにした。「情報源」においても、同様の理由で「分からない」という欄を設けた。「その他」の項目を選択した場合は自由記述で解答できるようにした。

問 3 では、あかりマップ bot をフォローしている協力者の多くが「アトピー性皮膚炎 (アトピー)」と解答していた。情報源としては「防災 4 コマ漫画」が多かった。また、あかりマップ bot をフォローしていない協力者の中にも、情報源を「防災 4 コマ漫画」としていたものがいた。この協力者は、リツイートを通して防災 4 コマ漫画を読んでいたと考えられる。しかし、情報源が防災 4 コマ漫画の協力者は「アトピー性皮膚炎 (アトピー)」としか解答していなかった。対して、情報源が防災 4 コマ漫画ではない協力者は、精神病など様々な症状を解答していた。これより、問 3 への解答は複数考えられるが、防災 4 コマ漫画によって知識に偏りが生じ、協力者が複

数の選択肢を考慮できなくなった可能性がある。

問 8 では、過半数の 30 名の協力者が「被災者」と解答しており、「防災 4 コマ漫画」としている協力者が 13 名いたが、それ以外の協力者も正解していた。情報源を「その他」にしている協力者には、「今考えた」「考えてみた」と記入しているものがあることから、問 8 は、問題文の文脈から解答を推測できる問題であったために、正解数が多かったと考えられる。

防災知識テスト全体を通して、情報源を「防災 4 コマ漫画」としている協力者の正解率が高かった。また、防災 4 コマ漫画によってユーザが新しく防災知識を獲得できるため、ユーザの防災意識を向上させることができる可能性があることが分かった。

6. おわりに

本報告では、Twitter および漫画表現を用いて防災知識を提示する防災 4 コマ漫画の配信を行った。ユーザの防災意識が向上したかを検証するために、ツイートの分析、アンケート調査および防災知識テストを行い、その結果を述べた。

今後は、継続して防災 4 コマ漫画の配信を行い、ユーザの防災意識が向上したか長期的な調査を行う。

本報告は和歌山大学災害科学教育研究センター研究報告 1(1)をまとめなおしたものである。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究(A)(25242037)および和歌山大学平成 24-27 年度独創的研究支援プロジェクトの補助を受けた。

参考文献

- 1) 及川康, 片田敏孝, 石井雄輔: 時間経過に伴う住民の防災意識と防災対応行動の変遷過程に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 71, No.1, pp.58-72, 2015.
- 2) Sakaki Takeshi, Fujio Toriumi, Yutaka Matsuo: Tweet trend analysis in an emergency situation, Proceedings of the Special Workshop on Internet and Disasters, pp.3:1-3:8, 2011.
- 3) Mai Miyabe, Asako Miura, Eiji Aramaki: Use trend analysis of twitter after the great east japan earthquake, Proceedings of the ACM 2012 conference on Computer Supported Cooperative Work Companion, pp.175-178, 2012.
- 4) Liza Potts, Joyce Seitzinger, Dave Jone, Angela Harrison: Tweeting disaster: hashtag constructions and collisions, Proceedings of the 29th ACM international conference on Design of communication, pp.235-240, 2011.
- 5) Adam Acar, Yuya Muraki: Twitter for crisis communication: lessons learned from Japan's tsunami disaster, International Journal of Web

- Based Communities, Vol.7, No.3, pp.392-402, 2011.
- 6) Sarah Vieweg, Amanda L. Hughes, Kate Starbird, Leysia Palen: Microblogging During Two Natural Hazards Events: What Twitter May Contribute to Situational Awareness In Proceedings of ACM Conference on Computer Human Interaction(CHI), pp.1079-1088, 2010.
- 7) 石川哲也, 川崎昭如, 目黒公郎: 山陰地方豪雪災害時の Twitter ユーザによる情報発信行動に関する分析と考察, 地域安全学会論文集, No.17, pp.135-143, 2012.
- 8) 池尻良平, 小林秀行, 黄欣悦, 地引泰人, 大原美保, 田中淳, 吉川肇子, 藤本徹, 山内祐平: Facebook を利用した防災学習手法の提案, 地域安全学会論文集 25, No.4, pp.1-10, 2015.
- 9) 向後智子, 向後千春: マンガによる表現が学習内容の理解と保持に及ぼす効果, 日本教育工学論文誌, Vol.22, No.2, pp.87-94, 1998.
- 10) 榎田宗丈, 吉野孝, 本塚智貴, 江種伸之: 防災情報提供 bot, における気象警報・注意報の通知機能の検証, ワークショップ 2016 (GN Workshop 2016) 論文集, pp.1-8, 2016.
- 11) 榎田宗丈, 福島拓, 吉野孝, 本塚智貴, 江種伸之: 漫画表現を用いた防災知識の提示による防災意識向上手法の提案, 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2016) シンポジウム, pp.504-515, 2016.
- 12) 増本憲司, 川中龍児, 石垣泰輔, 島田広昭: 観光地海岸利用者の津波に対する避難行動と避難意思決定に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.1316-1320, 2010.

災害時における情報配信手段に関する研究開発

和歌山大学

塚田晃司

1. はじめに

災害時に交通・通信が遮断され、外部から孤立する危険性のある集落が全国で約2万箇所存在するといわれている。そのため、いざという時に外部と連絡を取るための情報通信手段の確保が重要な課題となっている。そこで、災害に強い情報配信手段に関する研究開発に取り組んでいる。

2. 森林内ネットワーク基盤の研究開発

2011年の紀伊半島豪雨災害では、紀南地域で多くの孤立地域が発生した。その中で、過去の台風災害で実際に孤立した経験がある和歌山県東牟婁郡古座川町平井をモデル地区として、当該地区に活動拠点を有する北海道大学和歌山研究林の協力のもと、実用性の実証実験を2011年から実施している。2017年3月現在、モデル地区に実験用の無線局(集落局、尾根局、展望台局)を設置している(図-1参照)。太陽光発電による電力インフラの実証評価は2012年11月より、無線LANによる通信インフラの実証評価は2013年12月より本格的に開始している。

現状のネットワーク構成図を図-2に示す。この構成でのネットワーク通信性能を測定した。集落局と尾根局との距離は見通し2km超の距離があるが、10~20Mbpsの帯域があることが確認できた。通信インフラ未整備の地域で良く利用されている衛星インターネットアクセスの多くが1~8Mbpsの帯域でサービス提供していることを踏まえると、十分実用となる通信性能である。また、衛星インターネットアクセスの場合は静止軌道上の衛星と通信するためにRTT(Round Trip Time, 往復遅延時間)が非常に長くなってしまいが、集落局~尾根局で平均約1ms、集落局~展望台局(尾根局経由)が平均約2msと短い。そのため、長大なRTTによる通信性能低下を意識せずに各種ネットワークアプリケーションを利用することが可能である。

尾根局と展望台局は、山林地内で通常の電力インフラがない場所であるため、太陽光発電パネルと蓄電池によるオフグリッド環境を構築している。山林内であるため、必ずしも日照条件において最適な場所に設置されていない。尾根局は自然林、展望台局は人工林に設置してあり、周辺の植生による日陰

が生じている。また、設置場所の標高よりも高い尾根が周囲にあり、尾根の影による日照時間の減少もある。そのため、冬至前後は日中5時間程度しか太陽光発電パネルに直射日光があたらない。夏期と冬期の日射量の時間変化のグラフを図-3に示す¹⁾。条件不利地における太陽光発電の実用性について、長期運用の中で継続して検証していく計画である。



集落局



尾根局



展望台局

図-1 実験設備の設置状況

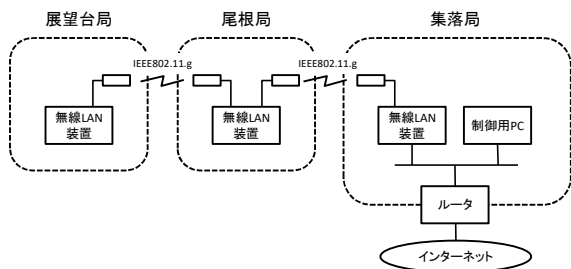


図-2 ネットワーク構成図

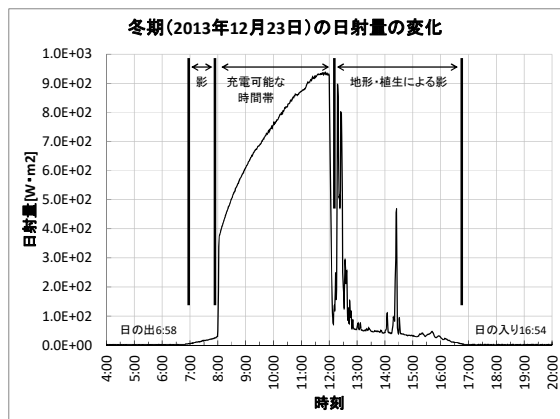
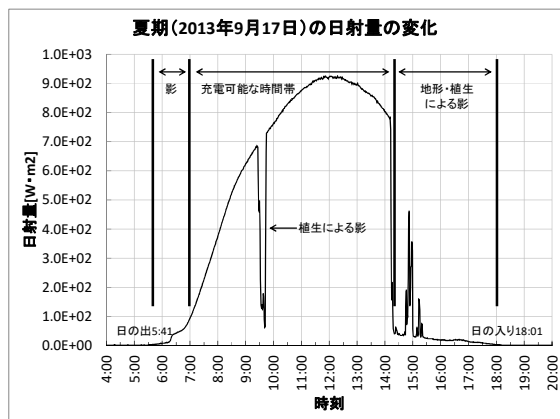


図-3 山林中での日射量の変化

3. 非常時可視光通信の研究開発

大規模災害が発生した場合、発災後しばらくの間、携帯電話など、有線・無線を問わず既存の通信インフラの使用が困難となることが予想される。そのため、被災地の状況を伝え、救援を要請するためには、既存通信手段の代替となる通信手段の確保が重要課題である。衛星携帯電話、防災行政無線による対応も取られているが、システムの導入コスト、運用コストが大きく、すべての自治体で対応することは難しい。また、長距離通信可能な無線通信には免許が必要な場合が多く、被災地の住民がいざという時に使うことが困難である。

また、広く普及している携帯電話網は、東海・東南海・南海地震の広域連動災害では、輻輳やケーブル

ル切断だけでなく、長期停電にともなう通信設備の機能停止により利用不能になることが予想される。

そこで、発災直後にも利用可能な代替通信手段として、免許不要で手軽に利用できる可視光を用いた光無線通信に着目した。そして、可視光の色変化パターンにより情報を伝達する CSK (Color Shift Keying) 方式を基盤とした可視光通信システムを開発した。RGB の 3 色の LED 光源のみを使用し、LED の加法混色により生成される 7 色の発光色変化によりデータ変調を行う。現在、実用化に向けた研究開発に取り組んでいる。災害時の利用を想定した場合、被災地上空を飛行するヘリコプターに対して、広範囲の視野の中から救援を求めていることに気付いてもらうことが重要である。特に夜間においては、被災地のどこで救援を要請しているかを把握することが困難であった。可視光の特性を活かすことで、これらの課題の解決が可能になると考えられる。

図-4 は我々の研究室で提案しているシステムのコンセプトである。夜間、地上に照明がなく目視による被災地の被害把握が困難な状況において、被災地の孤立集落の住民が地上から上空の消防・警察・自衛隊などのヘリコプターに救援要請のメッセージを伝える。地上に多色 LED ライトによる送信機を設置し、ヘリコプターにカメラを備えた受信機を搭載している。そして、カメラで撮影した画像に映る多色 LED ライトの発光色から、救援要請のメッセージを読み取るしくみになっている。



図-4 提案システムのコンセプト

我々のシステムでは、多色 LED の発光色の変化をデータ変調に使用している。これは、人間の目でも色の変化として認識でき、上空からの視認性も高いことが期待できる。災害時の利用を想定した場合、上空から気づいてもらうことが重要である。

送信側は送りたいメッセージを入力し、入力した情報に対応する多色 LED を発光させることにより情報を送信している。赤、緑、青、シアン、マゼンタ、イエロー、白の 7 色を使用する。これらは、R、G、B の LED の単純な ON-OFF 制御により加法混色できるため、実装が容易である。LED の ON-OFF 状態 S とカメラの出力する色ベクトル V をモデル化している (図-5 参照)。

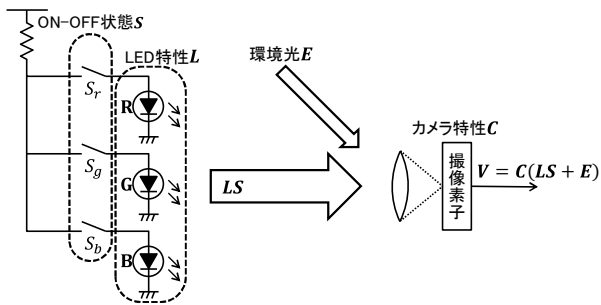


図-5 LED の ON-OFF 状態とカメラ出力の関係

試作システムは、キーボードなどの文字を入力することが可能な装置と多色 LED ライトを備える送信側装置 (図-6 参照) と、送信側装置の光を撮像できるカメラを備え、受信した信号を復調する受信側装置 (図-7 参照) から構成されている。



図-6 送信側装置



図-7 受信側装置

上空を飛行するヘリコプターに対して地上から情報を発信することの実用可能性を確認するために、夜間に屋外において通信性能を測定した。送信機と受信機との間の距離を約 350m 確保して実験した。発光色の変化周期を 75ms~800ms の範囲で変化

(周期が短いほど高ビットレート) させて受信誤り率を測定した結果、一般的なビデオカメラ (フレームレート 30fps) を使用して 175ms (約 10bps に相当) の変化周期まで誤り率 10%以下を達成した²⁾³⁾。ビットレートは 10bps と低速だが、救援要請に必要な短文は十分利用可能である。雲や火災による煙などによる遮蔽、減衰が考えられるが、今後、各種気象条件のもとで通信性能に与える影響を評価していく予定である。

参考文献

- 1) 塚田晃司, 中山間地域の災害時孤立集落を想定した情報通信システム開発の試み, 計測と制御, 53 巻, 6 号, pp.494-498, 2014 年 6 月
- 2) 塚田晃司, 岡 裕大, RGB3 色 LED の加法混色を用いた色変調可視光通信の提案と非常時通信への適用, 情報処理学会論文誌, 57 巻, 1 号, pp.134-144, 2016 年 1 月
- 3) 岡崎匡紀, 塚田晃司, 発光色の色変化を利用した災害時可視光通信手法の提案, 情報処理学会研究報告, 2015-GN-93(36), pp.1-8, 2015 年 1 月

3. 学会活動

3.1 学会誌掲載

	タイトル	執筆者(連名含む)	雑誌名	巻号	論文種別	発行年月
1	近年発生した表層崩壊の発生規模と降雨・地質特性との関係に関する研究	木下篤彦・野池耕平・西岡恒志・筒井和男・福田和寿・村田雄一・今森直紀・荒木義則	河川技術論文集	Vol.22	論文	2016.6
2	平成23年台風12号により発生した深層崩壊地の湧水の水質形成過程に関する研究	森加代子・木下篤彦・西岡恒志・筒井和男・福田和寿・今森直紀・奥山悠木・小川内良人・松村法行・加藤智久	河川技術論文集	Vol.22	論文	2016.6
3	雨の降り方の違いが斜面の水文過程と表層崩壊規模に及ぼす影響	木下篤彦・野池耕平・西岡恒志・筒井和男・福田和寿・村田雄一・今森直紀・荒木義則・倉本和正・島田徹	土砂災害に関するシンポジウム論文集	Vol.8	論文	2016.9
4	球状風化を呈した地質帯における表層崩壊発生場の特性と土層厚推定手法の検討	野池耕平・木下篤彦・水野秀明・今森直紀・西岡恒志・島田徹	土砂災害に関するシンポジウム論文集	Vol.8	論文	2016.9
5	ヒアリング調査を基にした平成23年那智川災害の避難行動に関する研究	筒井和男・西岡恒志・福田和寿・坂口武弘・木下篤彦・今森直紀・田中健貴・島田徹	土砂災害に関するシンポジウム論文集	Vol.8	論文	2016.9
6	深層崩壊危険斜面における水文・水質特性に関する研究	西岡恒志・筒井和男・福田和寿・坂口武弘・木下篤彦・森加代子・高原晃宙	土砂災害に関するシンポジウム論文集	Vol.8	論文	2016.9
7	鉄道ロングレールの軸応力測定に対する表面SH波音弾性の適用	村田頼信・宮崎秀史・松丸和貴・千代誠・藤垣元治	実験力学	Vol.16No.1	論文	2016.4
8	平成23年度紀伊半島大水害の実態と教訓 -「想定外」豪雨による地盤災害の軽減に向けた提言- 4. 和歌山地域の災害の実態	江種伸之・石田優子・辻野裕之・中西典明・矢野晴彦・鍋島康之	地盤工学会誌	Vol.64No.4	解説	2016.6
9	Shredded Image Combination Method for Robot-cameras Mounted inside the Crawler	Kenichi Tokuda・Atsushi Hirata・Tetsuya Kinugasa・Takafumi Haji・Hisanori Amano	Proceedings of MECHATRONICS - REM 2016	—	論文	2016.6
10	平成23年度紀伊半島大水害の実態と教訓 -「想定外」豪雨による地盤災害の軽減に向けた提言- 6. 紀伊半島大水害以降の防災・減災の取り組み	日置和昭・小林泰三・後誠介・岡島賢治・根川竜夫・小泉圭吾・泉並良二	地盤工学会誌	Vol.64No.8	解説	2016.6
11	スペックル干渉法を用いた超音波ホログラフ画像撮像システムの構築	山口論人・村田頼信・藤垣元治	電気学会論文誌C	Vol.136No.8	論文	2016.8
12	都市部の不透透域を考慮したHYPERモデルの適用に関する検討	田内裕人・河村明・天口英雄・OLSSON Jonas	土木学会論文集G	Vol.72No.5	論文	2016.9
13	実効雨量および土壌雨量指数から見た平成23年台風12号による土砂災害現場の水文地質特性	田内裕人・江種伸之・平田健正	第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集	—	論文	2016.9
14	Development of a GeoTour Support System Using a Microblog	Shogo Taniguchi and Takashi Yoshino	Proceedings of 8th International Conference CollabTech 2016	—	論文	2016.9
15	平成23年台風12号による和歌山県東牟婁地域の土砂災害の地理的特性	中村誠・田内裕人・江種伸之・石田優子・後誠介	Kansai Geo-Symposium 2016論文集	—	論文	2016.11
16	災害時支援システム“あかりマップ”の地域住民による防災マップ作成への適用	吉野孝・濱村朱里・福島拓・江種伸之	情報処理学会論文誌	Vol.58No.1	論文	2017.1
17	ダム流木に関する考察と流木量推計の試み	吉田登	和歌山大学災害科学教育研究センター研究報告	Vol.1No.1	報告	2017.2
18	漫画表現を用いた防災知識の提示による防災意識向上手法の効果	榎田宗丈・吉野孝・福島拓・本塚智貴・江種伸之	和歌山大学災害科学教育研究センター研究報告	Vol.1No.1	報告	2017.2
19	土砂災害対応小型UGVの開発	徳田献一・福山航	和歌山大学災害科学教育研究センター研究報告	Vol.1No.1	報告	2017.2
20	降雨パターンと土壌雨量指数に着目した平成23年台風12号の土砂災害の誘因解析	田内裕人・中村誠・江種伸之・平田健正	土木学会論文集B1(水工学)	Vol.73No.4	論文	2017.3

3.2 学会発表

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
1	北海道駒ヶ岳における空中電磁探査の比抵抗急変パターンが示す山体内部構造の検討	旭峰雄, 竹原隆博, 栗本茂季, 木下篤彦, 高原晃宙, 瀬戸秀治, 清野耕史, 河戸克志, 阿部征輝, 細川亮介	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
2	有限体積法による湾曲部及び合流点における水面形の再現	江藤雅佳子, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
3	振動センサ設置深度とノイズ低減率の関係	高原晃宙, 木下篤彦, 水野秀明, 長谷川真英, 梅田ハルミ, 海原荘一, 浅原裕	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
4	和歌山県那智川流域における平成23年台風12号による流木の流出実態	黒岩知恵, 藤村直樹, 木下篤彦, 水野秀明, 福田和寿	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
5	十勝岳火山の比抵抗構造と土砂移動特性に関する考察	諸橋雅幸, 近藤雄一, 小森康平, 木下篤彦, 高原晃宙, 瀬戸秀治, 岸本博志, 中島達也, 藤田浩司	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
6	災害対応に関する作業能率の推定モデル	照沼利浩, 水野秀明, 西本晴男	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
7	インターバルカメラを用いた出水時集中撮影装置の開発	水谷佑, 高橋佑弥, 泉山寛明, 高原晃宙, 藤村直樹, 木下篤彦, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
8	深層崩壊危険斜面から湧出する湧水の水文・水質特性に関する研究	西岡恒志, 筒井和男, 福田和寿, 木下篤彦, 森加代子, 高原晃宙, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
9	焼岳火山における崩壊のおそれのある箇所抽出および崩壊土砂量の推定	千葉伸一, 清水豊, 一色弘充, 本間宏樹, 田中健吾, 浅井誠二, 甚田隆光, 北川正良, 木下篤彦, 高原晃宙, 瀬戸秀治	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
10	蒸発熱発生を考慮した火砕物による融雪量シミュレーション	泉山寛明, 堤大三, 野池耕平, 藤村直樹, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
11	UAVを活用した河道閉塞箇所の計測手法に関する研究	大橋和也, 西岡恒志, 筒井和男, 福田和寿, 赤澤史顕, 藤村直樹, 木下篤彦	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
12	火砕流の発生様式と火砕堆積物の到達範囲に関する考察	藤村直樹, 泉山寛明, 高橋佑弥, 水野秀明, 佐伯馨一, 大坪隆三	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
13	災害時の流木の流出率に着目した治山堰堤の効果的な配置手法に関する検討	福田和寿, 西岡恒志, 筒井和男, 木下篤彦	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
14	ヒアリング調査を基にした平成23年那智川災害の避難行動に関する研究	北勝也, 筒井和男, 西岡恒志, 福田和寿, 木下篤彦, 今森直紀, 奥山悠木	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
15	振動センサーによる地盤振動の到達範囲と地盤構造の関係	木下篤彦, 高原晃宙, 長谷川真英, 梅田ハルミ, 海原荘一, 只熊典子, 高田隆行, 浅原裕	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
16	土砂移動現象に伴い発生する地盤振動の特徴	木下篤彦, 高原晃宙, 長谷川真英, 梅田ハルミ, 浅原裕, 嶋大尚, 海原荘一	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
17	過去の表層崩壊発生時の降雨特性と崩壊深・崩壊規模との関係について	木下篤彦, 野池耕平, 水野秀明, 西岡恒志, 筒井和男, 福田和寿, 村田雄一, 今森直紀, 荒木義則, 秦雅之, 島田徹	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
18	平成26年8月口永良部島で発生した火砕流の到達範囲に関する基礎的研究	高橋佑弥, 泉山寛明, 野池耕平, 藤村直樹, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
19	越美山系における深層崩壊の発生のおそれのある斜面の抽出検討事例	伊藤誠記, 山村真司, 高井徹, 松原和哉, 木下篤彦, 高原晃宙, 瀬戸秀治, 野池耕平, 森加代子, 江口友章, 坂口宏	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
20	画像解析による動体追跡技術の土砂移動検知への適用	井深真治, 福田昌宏, 水谷佑, 高原晃宙, 木下篤彦, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
21	姫川流域における深層崩壊のおそれのある斜面での崩壊規模推定手法に関する検討	五十嵐祥二, 渡邊剛, 柳沢信繁, 木下篤彦, 高原晃宙, 瀬戸秀治, 野池耕平, 森加代子, 中野真帆, 松原智生, 田中智, 西口幸希	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
22	岩盤クリープ斜面で実施された空中電磁探査による比抵抗構造と弾性波探査及びボーリング結果との比較	高原晃宙, 瀬戸秀治, 野池耕平, 森加代子, 木下篤彦, 水野秀明, 河戸克志, 奥村稔, 影浦亮太, 阿部征輝	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
23	大規模土砂移動の影響範囲の予測と対策手法の整理	今泉文寿, 逢坂興宏, 堤大三, 宮田秀介, 中谷加奈, 権田豊, 福山泰治郎, 篠原慶規, 水野秀明, 原田紹臣, 水野正樹	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
24	平成23年台風12号で発生した深層崩壊地の岩石からのイオン溶出特性	森加代子, 木下篤彦, 水野秀明, 西岡恒志, 今森直紀, 奥山悠木, 小川内良人, 松村法行, 加藤智久	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
25	ラフ集合による深層崩壊発生の重要要因と発生・非発生条件の抽出	森川智, 西岡恒志, 筒井和男, 福田和寿, 木下篤彦, 森加代子, 今森直紀, 海原荘一, 竹本大昭, 只熊典子	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
26	深層崩壊の発生する恐れのある斜面におけるリスク評価手法に関する研究	瀬戸秀治, 高原晃宙, 木下篤彦, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
27	空中電磁探査を活用した崩壊するおそれのある斜面における崩壊深度の推定手法に関する検討	瀬戸秀治, 高原晃宙, 木下篤彦, 水野秀明, 奥村稔, 河戸克志, 影浦亮太, 阿部征輝	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
28	大型土のうで作成された仮設構造物に作用する荷重に関する研究	赤澤史顕, 藤村直樹, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
29	熊野地区における崩壊土砂の流下・堆積過程に関する研究	赤澤史顕, 藤村直樹, 木下篤彦, 水野秀明, 三木康義, 西岡恒志, 筒井和男, 福田和寿, 里深好文, 今森直紀, 奥山悠木	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
30	平成23年台風12号の那智川流域の水文・水質特性と崩壊メカニズムに関する研究	千東圭央, 西岡恒志, 筒井和男, 福田和寿, 木下篤彦, 今森直紀, 加藤智久, 横山修, 松村法行	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
31	GISを用いた土石流危険渓流の開析状況の調査手法について	潮見礼也, 家田泰弘, 水野秀明, 藤村直樹, 泉山寛明, 高橋佑弥	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
32	荒木川における流砂観測の紹介	筒井和男, 西岡恒志, 福田和寿, 木下篤彦, 内田太郎, 田中健貴	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
33	インターバルカメラの画像解析による山地渓流における水位・濁水計測	福田昌宏, 井深真治, 水谷佑, 高原晃宙, 木下篤彦, 水野秀明	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
34	タンクモデルを用いた太田川流域八木地区と那智川流域における災害時の水文過程に関する研究	木下篤彦, 野池耕平, 水野秀明, 西岡恒志, 筒井和男, 福田和寿, 村田雄一, 今森直紀, 荒木義則, 秦雅之	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
35	球状風化を呈した地質帯における, 電気探査を用いた土層厚の推定	野池耕平, 木下篤彦, 水野秀明, 今森直紀, 奥山悠木, 西岡恒志, 島田徹, 小野山裕治, 江本聡志	平成28年度砂防学会研究発表会	2016.5
36	周波数領域型空中電磁探査による比抵抗の深度情報に関する研究	奥村稔, 影浦亮太, 河戸克志, 高原晃宙, 瀬戸秀治, 木下篤彦	日本地球惑星科学連合大会2016年大会	2016.5
37	深層崩壊斜面で実施された空中電磁探査による比抵抗構造と地盤内部構造の関係	高原晃宙, 瀬戸秀治, 野池耕平, 森加代子, 木下篤彦, 水野秀明, 河戸克志, 奥村稔, 影浦亮太	日本地球惑星科学連合大会2016年大会	2016.5
38	空中電磁探査を活用した崩壊深度の推定に関する研究	瀬戸秀治, 高原晃宙, 木下篤彦, 水野秀明, 河戸克志, 奥村稔, 影浦亮太	日本地球惑星科学連合大会2016年大会	2016.5
39	空中電磁探査技術及び水文・水質調査を活用した大規模表層崩壊予測技術に関する研究	木下篤彦, 瀬戸秀治, 高原晃宙, 水野秀明, 西岡恒志, 今森直紀, 河戸克志, 奥村稔, 影浦亮太	日本地球惑星科学連合大会2016年大会	2016.5
40	Relationships among precipitation distribution, hydrological properties, and collapse density in areas where large-scale shallow landslides occurred	Atsuhiko Kinoshita, Tsuneshi Nishioka, Kohei Noike, Teruyoshi Takahara, Wataru Sakurai, Yuichi Murata, Yoshikazu Shimizu, Tadanori Ishizuka, Yoshinori Araki, Masayuki Hata, Toru Shimada	Interpraevent2016	2016
41	Influence of water content on velocity of snowmelt due to pyroclastic material	Hiroaki IZUMIYAMA, Takeshi SHIMIZU, Tasuku MIZUTANI, Naoki FUJIMURA, Tadanori ISHIZUKA	Interpraevent2016	2016
42	Field measurement of debris flow using the force plate and a laser profile scanner	Naoki FUJIMURA, Takeshi SHIMIZU, Shiki YOSHINAGA, Tadanori ISHIZUKA, Hitoshi KATOH, Takahisa MIZUYAMA	Interpraevent2016	2016
43	Study of debris-flow flooding area in the low-gradient zone	Teruyoshi TAKAHARA, Takeshi SHIMIZU, Atsuhiko KINOSHITA, Tadanori ISHIZUKA, Yoshikazu UCHISHIBA, Takami OTSUBO, Kohei TAGAWA	Interpraevent2016	2016

(1) 砂防学会研究発表会

富山県富山市で開催された砂防学会研究発表会に参加し、研究発表を行った。

期 間：平成 28 年 5 月 18 日（水）～20 日（金）

会 場：富山県民会館（富山市）

参加機関：国土交通省近畿地方整備局、和歌山県、国土技術政策総合研究所、土木研究所、北海道大学、三重大学、京都大学、和歌山大学

(2) 日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会

千葉県千葉市で開催された日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会に参加し、研究発表を行った。

期 間：平成 28 年 5 月 22 日（日）～26 日（木）

会 場：幕張メッセ国際会議場（千葉市）

参加機関：近畿地方整備局、京都大学

(3) Interpraevent2016

スイス国ルツェルンで開催された Interpraevent2016 に参加し、研究発表を行った。

期 間：平成 28 年 5 月 30 日（土）～6 月 2 日（木）

会 場：KKL Luzern（ルツェルン）

参加機関：土木研究所、国土技術政策総合研究所

(4) 第 8 回土砂災害に関するシンポジウム

福岡県福岡市で開催された第 8 回土砂災害に関するシンポジウムに参加し、研究発表を行った。

期 間：平成 28 年 9 月 16 日（金）～17 日（土）

会 場：福岡リーセントホテル（福岡市）

参加機関：和歌山県、土木研究所

(5) 第 56 回治山研究発表会

東京都渋谷区で開催された第 56 回治山研究発表会に参加し、研究発表を行った。

期 間：平成 28 年 9 月 26 日（月）～27 日（火）

会 場：国立オリンピック記念青少年総合センター（渋谷区）

参加機関：和歌山県、土木研究所

(6) 平成 28 年度日本応用地質学会研究発表会

宮城県仙台市で開催された平成 28 年度日本応用地質学会研究発表会に参加し、研究発表を行った。

期 間：平成 28 年 10 月 26 日（水）～27 日（木）

会 場：日立システムズホール仙台（仙台市）

参加機関：土木研究所、京都大学

4. 広報・啓発活動

4.1 イベント

(1) ワダイの防災カフェ

紀北（和歌山市）と紀南（那智勝浦町）の2会場において、「防災教育」「防災計画」「避難支援システム」「救助ロボット」「災害事例」等をテーマとし、防災分野の専門家と一般市民が飲み物を片手に気軽に語り合う、防災カフェを開催した。

テーマ：①⑧防災教育「皆さんの地域ではどのような災害リスクがあるかな～これからの災害への備えについて考えよう～」

②⑦災害時避難支援システム「情報通信技術を用いた災害時支援システム」

③防災計画「伝統的民家の特色から見た自然災害への備え」

④⑨災害救助ロボット「土砂災害のための小型探索ロボットシステム」

⑤地震災害「南海トラフ巨大地震」

⑥防災ジオツアー「観光+防災=防災ジオツアー～ジオパークを利用した地域防災の担い手育成～」

⑩豪雨災害「紀伊半島大水害」

日 時：＜紀北会場＞

①平成28年9月14日（水）、②10月12日（水）、③11月9日（水）、

④12月8日（木）、⑤平成29年1月11日（水）

＜紀南会場＞

⑥平成28年9月10日（土）、⑦10月15日（土）、⑧11月19日（土）

⑨12月10日（土）、⑩平成29年1月21日（土）

会 場：＜紀北会場＞

①～⑤ 和歌山県民文化会館（和歌山市）

＜紀南会場＞

⑥～⑩和歌山県土砂災害啓発センター（和歌山県那智勝浦町）

主 催：和歌山大学災害科学教育研究センター、近畿地方整備局

参加機関：和歌山大学、近畿地方整備局、和歌山県

参加者：約180名（全回合計）

(2) ワダイの防災ジオツアー

那智勝浦町において、模型実験を用いた土石流の仕組みについての紹介や、和歌山県整備の砂防堰堤や過去の土砂災害痕跡などを見学するワダイの防災ジオツアーを開催した。

日 時：平成 28 年 12 月 11 日（日），平成 29 年 3 月 4 日（土）

会 場：和歌山県土砂災害啓発センター、金山谷川、鳴子谷川、色川地区（和歌山県那智勝浦町）

主 催：和歌山大学災害科学教育研究センター、近畿地方整備局

参加機関：和歌山大学、近畿地方整備局、和歌山県、那智勝浦町、和歌山県教育委員会、那智勝浦町教育委員会、南紀熊野ジオパーク推進協議会、南紀熊野ジオパークガイドの会

参加者：約 50 名（全回合計）

4.2 講演

(1) 防災講演会地域講演会「考える、土砂災害」

那智勝浦町において、「歴史から学び改めて土砂災害について考える」をテーマに、地域住民が土砂災害についての知識を深め、安全迅速な避難につなげることを目指す講演会を開催した。

日 時：平成 29 年 2 月 16 日（水）

会 場：那智勝浦町体育文化会館（和歌山県那智勝浦町）

主 催：和歌山県

参加機関：和歌山県、近畿地方整備局、那智勝浦町

参加者：約 150 名

4.3 啓発活動

(1) 防災教育への取組

土砂災害に関する防災教育への取組として、那智勝浦町において、那智勝浦町市野々小学校の小学校 5 年生、6 年生を対象に、大型実験模型を用いた土砂災害の形態や砂防堰堤の効果などについての説明などを実施した。

日 時：平成 29 年 1 月 19 日（木）

会 場：土砂災害啓発センター（和歌山県那智勝浦町）

5. 研修活動

5.1 職員向け研修

(1) 土砂災害対策に関する研修会①

那智勝浦町（和歌山県土砂災害啓発センター）において、和歌山県自由民主党県議団砂防事業推進議員連盟を対象とした土砂災害対策に関する研修会を実施した。

日 時：平成 28 年 9 月 6 日

場 所：和歌山県土砂災害啓発センター（那智勝浦町市野々）

実施機関：近畿地方整備局、和歌山県

(2) 土砂災害対策に関する研修会②

那智勝浦町（和歌山県土砂災害啓発センター）において、和歌山県建設技術協会を対象とした土砂災害対策に関する研修会を実施した。

日 時：平成 28 年 10 月 7 日

場 所：和歌山県土砂災害啓発センター（那智勝浦町市野々）

実施機関：近畿地方整備局、和歌山県

(3) 土砂災害対策に関する研修会③

那智勝浦町（和歌山県土砂災害啓発センター）において、全国がけ崩れ対策協議会による地すべり現地検討会を対象とした土砂災害対策に関する研修会を実施した。

日 時：平成 28 年 10 月 26 日

場 所：和歌山県土砂災害啓発センター（那智勝浦町市野々）

実施機関：近畿地方整備局、和歌山県

5.2 学生研修の受け入れ

(1) 学生研修の受け入れ・研究指導

土砂災害に関する研究を行う大学生の現地研修の受け入れを行うとともに、土砂災害の専門家による研究指導を行った。

実施機関：国土交通省近畿地方整備局、土木研究所、和歌山県

研修実績：キャンプ砂防（東京大学・信州大学学生）

・・・平成 28 年 7 月 28 日～29 日

北海道大学学生（現地調査）

・・・平成 28 年 10 月 18 日～20 日

6. 平成28年度の主な活動

実施日	活動内容	場所	参加機関
平成28年			
4/24	大規模土砂災害対策技術センター入所・和歌山県土砂災害啓発センター竣工記念式典	那智勝浦町	近畿地方整備局・国土技術政策総合研究所・和歌山県・那智勝浦町・土木研究所・三重大学・和歌山大学
4/27～28	研究協議	那智勝浦町	近畿地方整備局・和歌山県・土木研究所
5/18～20	砂防学会研究発表会	富山市	近畿地方整備局・和歌山県・国土技術政策総合研究所・土木研究所・北海道大学・三重大学・京都大学
5/22～26	日本地球惑星科学連合大会2016年大会	千葉市	近畿地方整備局・京都大学
5/31～6/3	合同現地調査	那智勝浦町	近畿地方整備局・寒地土木研究所
6/7～8	合同現地調査	那智勝浦町	近畿地方整備局・国土技術政策総合研究所
6/27～28	近畿地方整備局研究発表会	大阪市	近畿地方整備局
7/28～29	キャンプ砂防(東京大学・信州大学学生)	那智勝浦町	近畿地方整備局・和歌山県
8/1～2	合同現地調査	那智勝浦町	近畿地方整備局・土木研究所
9/10	土砂災害対策に関する研修会	那智勝浦町	近畿地方整備局・和歌山県
9/10	ワダイのカフェ	那智勝浦町	和歌山大学・近畿地方整備局・和歌山県・那智勝浦町
9/28～29	研究協議	那智勝浦町	近畿地方整備局・国土技術政策総合研究所・土木研究所
10/7	土砂災害対策に関する研修会	那智勝浦町	近畿地方整備局・和歌山県
10/18～20	合同現地調査	那智勝浦町	近畿地方整備局・北海道大学
10/26	土砂災害対策に関する研修会	那智勝浦町	近畿地方整備局・和歌山県
11/8	「世界津波の日」本邦招聘視察団 中南米防災人材育成拠点支援プロジェクト (KIZUNAプロジェクト) 受け入れ	那智勝浦町	近畿地方整備局・和歌山県
12/6～8	合同現地調査	那智勝浦町	近畿地方整備局・北海道大学
12/10	2016年度JICA国別研修(トルコ)視察団 リスク評価に基づく効果的な災害リスク管理のための 能力強化プロジェクト 受け入れ	那智勝浦町	和歌山県
12/11	ワダイの防災ジオツアー	那智勝浦町	近畿地方整備局・和歌山県・那智勝浦町・和歌山大学
12/20～22	合同現地調査・研究協議	那智勝浦町・五條市	近畿地方整備局・土木研究所
平成29年			
1/19	土砂災害に関する防災教育	那智勝浦町	近畿地方整備局
1/20	研究協議	宇治市	近畿地方整備局・京都大学
2/1	流砂観測担当者会議	東京都	近畿地方整備局
2/16	防災講演会地域講演会「考える、土砂災害」	那智勝浦町	和歌山県・近畿地方整備局・那智勝浦町
3/4	ワダイの防災ジオツアー	那智勝浦町	近畿地方整備局・和歌山県・那智勝浦町・和歌山大学
3/14	研究成果報告会	五條市	近畿地方整備局・和歌山県・土木研究所
3/15	研究成果報告会	五條市	近畿地方整備局・和歌山県・土木研究所
3/16	研究成果報告会	五條市	近畿地方整備局・和歌山大学
3/17	平成28年度機構会議	那智勝浦町	近畿地方整備局・国土技術政策総合研究所・和歌山県・那智勝浦町・土木研究所・京都大学・和歌山大学・北海道大学・三重大学

平成 28 年度 大規模土砂災害対策研究機構年報

発 行	平成 29 年 4 月
編集・発行	国土交通省 近畿地方整備局
住 所	大阪府大阪市中央区大手前 1-5-44
連絡先	河川部 河川計画課 TEL 06-6942-1141 (代表)
機 構 H P	http://www.kkr.mlit.go.jp/kiisanchi/kikou/