

**令和2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

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
- ・ 国立研究開発法人土木研究所
- ・ 和歌山県
- ・ 那智勝浦町
- ・ 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。

令和2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）

- ・ 栗平地区における断層の分布と地下水の挙動に着目した 2011 年の深層崩壊発生原因の検討
- ・ 2011 年に深層崩壊が発生した奈良県十津川村栗平地区における比抵抗探査を用いた断層沿いの地下水流入過程の検討

2.2 国土交通省国土技術政策総合研究所

- ・ 国総研における河道閉塞等の大規模土砂災害発生時の緊急対応方法に関する研究開発

2.3 国立研究開発法人土木研究所

- ・ 深層崩壊の発生するおそれのある斜面抽出及びリスク評価手法の改良に向けた検討

2.4 和歌山県

- ・ 昭和 28 年日高川流域での土砂災害教訓伝承の取組み
- ・ 人工衛星「しきさい」を活用した那智の滝上流域の水源涵養機能に関する研究
- ・ 地質境界付近の水文挙動が表層崩壊の発生に与える影響
- ・ 日置川水系、新宮川水系における放射性炭素年代測定結果を用いた深層崩壊発生頻度推定方法の検討
- ・ 和歌山県土砂災害啓発センターにおける防災教育の取組みについて
- ・ 和歌山県における山地災害教訓伝承の取組みについて
- ・ 人工衛星「しきさい」を活用した那智の滝上流域の森林活性度と可能蒸発散量に関する研究
- ・ 水路実験による土砂移動時の地盤振動スペクトルと距離減衰に関する考察
- ・ 和歌山県土砂災害啓発センターにおける土砂災害に関する防災教育とその効果につ

いて

- ・ 紀伊半島大水害の被災体験の研修プログラムとその生徒への効果について
- ・ 土砂移動時の地盤振動の再現 - 模型実験からの考察 -
- ・ 地すべり対策工の効果の簡易的な検証方法の提案
- ・ コアストーンが分布する斜面の水分特性に関する研究

2.5 北海道大学

- ・ **Can Repeat LiDAR Surveys Locate Future Massive Landslides?**
- ・ 奈良県赤谷西地区の重力変形斜面における降雨時のイオン濃度変化
- ・ 重力変形斜面における地下水の水質変化に岩盤からの溶出イオンが与える影響

2.6 三重大学

- ・ 電気的手法を用いた新たな掃流砂計測法の開発

2.7 京都大学

- ・ 紀伊山地における空中電磁探査結果と基岩内地下水位の関係性
- ・ 亀裂のある急峻な山体の基岩の不飽和水文特性が雨水浸透に及ぼす影響

2.1 大規模土砂災害対策技術センター テーマ1

栗平地区における断層の分布と地下水の挙動に着目した2011年の深層崩壊発生原因の検討

国土交通省国土技術政策総合研究所(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
 中央開発株式会社
 大日本コンサルタント株式会社
 大阪市立大学
 大阪大学

○木下篤彦
 柴田俊
 山越隆雄・中谷洋明
 加藤智久
 河戸克志・奥村稔
 三田村宗樹
 松井保

1. はじめに

2011年9月の台風12号により、紀伊半島では多数の深層崩壊が発生したり、著者らはこれまで地形・地質・水文等様々な観点から深層崩壊箇所の調査を行ってきた²⁾。また、他にも多くの研究者が多様な角度から深層崩壊箇所の研究を行い、成果を残している³⁾。一方で、検討が十分なされていないのは、誘因である降雨とそれが崩壊に至るまでに斜面の水文過程に及ぼした影響である。本研究では、栗平地区を対象に、断層沿いの地下水の流入に着目して、深層崩壊発生原因を分析する。

2. 栗平地区で発生した深層崩壊の概要と実施した調査について

栗平地区は、熊野川上流の栗平川流域に位置している(写真-1)。地質は、白亜系四万十帯である日高川層群が分布している。2011年台風12号では、7日間の総降水量が紀伊半島の広い範囲で1,000mmを超え、栗平地区で深層崩壊が発生した。その規模は、幅600m、高さ450m、長さ650mで、約2,385万m³にのぼり、崩壊土砂が河道を閉塞し、現在も湛水池を形成している。特筆すべきは、写真-1に示すように、崩壊斜面周辺に多数の断層が分布していることである。また、断層周辺では地下水の湧出が常時見られる。

著者らは、災害直後から、深層崩壊のメカニズム分析を目的として様々な調査を実施してきた。崩壊斜面周辺でボーリング調査を行うとともに、図-1に示すようにボーリング孔を用いた地下水位の長期的な観測を行っている。また、災害の翌年の2012年11月には、大まかに地下の断層分布や歪み、地下水位の分布を探查する目的で、空中電磁探查を実施した。さらに、2019年には、崩壊斜面に流入する地下水と断層との関係を詳細に調査する目的で、斜面の断層が集中する場所で出水期の8月と乾燥期の12月に電気探查を実施した。

3. 空中電磁探查による比抵抗分布から推定される地下水位の大まかな分布について

図-2に空中電磁探查による、周波数140kHz(地下約10m)の比抵抗の平面分布を示す。崩壊斜面下部の広い範囲で低比抵抗となっていることが分かる。低比抵抗となるのは、主に粒径の細かい粘土を多く含む、もしくは地下水位が高い、のどちらかである⁴⁾。図-3に図-1中の5つのボーリング孔での約5年間の孔内水位の変化を示す。唯一崩壊斜面内にある主-3W孔は他の4孔と比べて孔内水位が高いことが分かる。この結果と図-2の比抵抗分布から、崩壊斜面下部は広く地下水位が高いエリアが分布していると考えられる。

4. 電気探查による豪雨時の斜面への地下水流入経路について

断層に沿って斜面に流入する地下水の状況を把握する目的で、出水期(2019年8月)と乾燥期(2019年12月)の2時期に電気探查を実施した。なお、8月の電気探查については、2019年8



写真-1 崩壊斜面周辺の断層の分布。撮影日は2011年9月10日である。白い点線は図-4での電気探查の測線を表す。矢印は流向を示す。

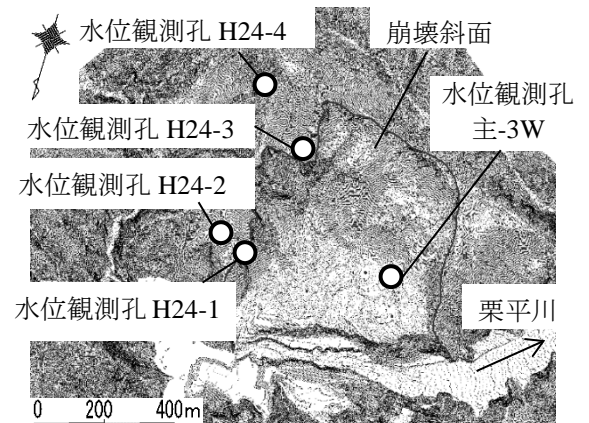


図-1 栗平地区の災害後の地形図と水位観測孔の配置図。矢印は流向を示す。

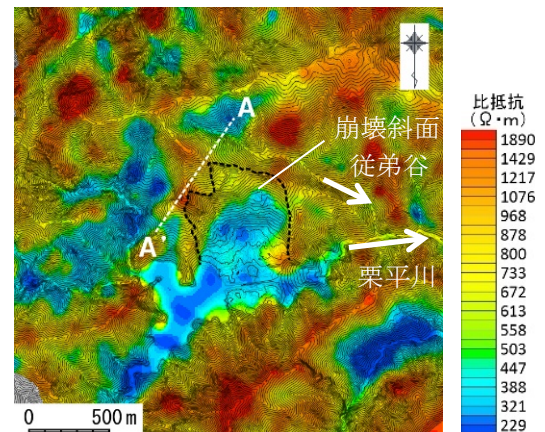


図-2 栗平地区の空中電磁探查結果。2012年11月19日実施。140kHz(地下約10m)での比抵抗平面分布。白点線は図-4での電気探查実施位置。矢印は流向を示す。

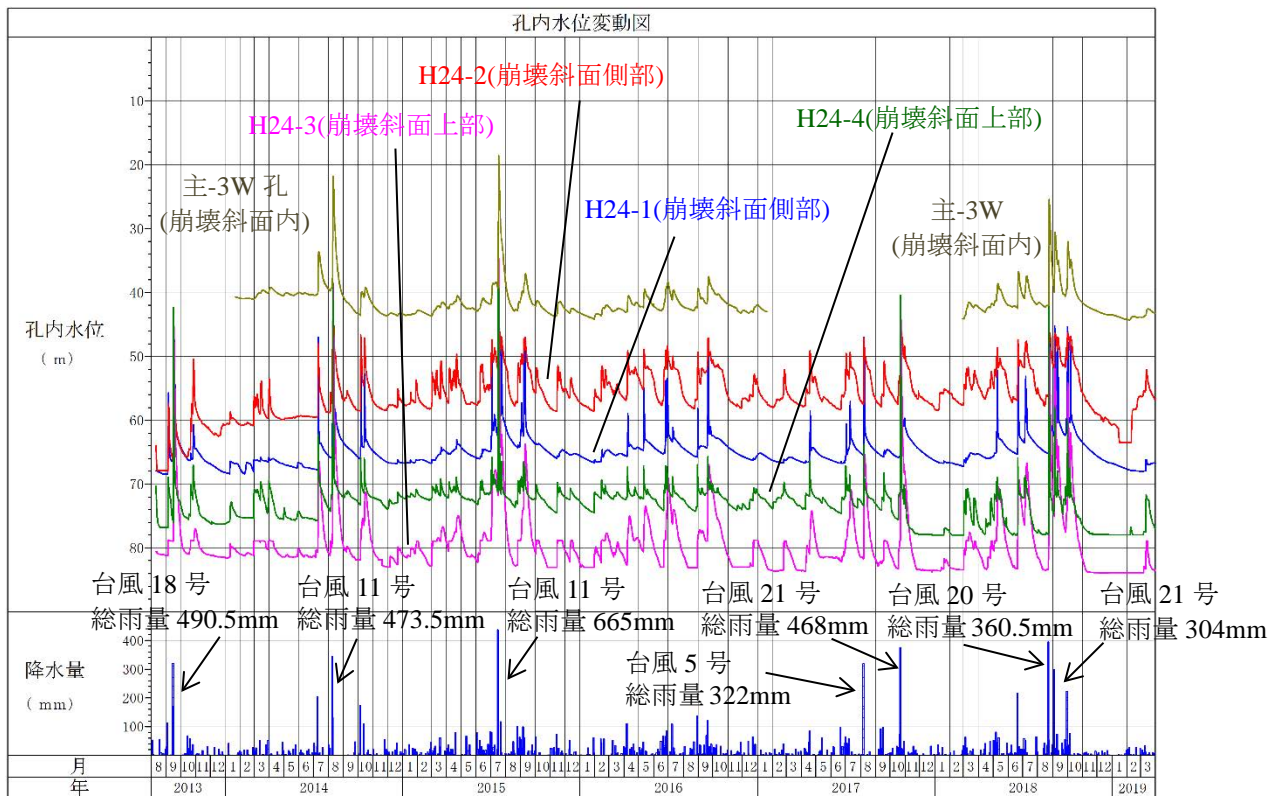


図-3 栗平地区の5つのボーリング孔の地下水位の変動(2013年8月～2019年3月). 降水量は、栗平地区に設置した雨量計のデータである.

月12～16日の台風10号(積算雨量901mm)のおよそ4日後に実施している. 図-4(a)・(b)の線で囲ったエリアのうち、実線で囲ったエリアについて、乾燥期には高比抵抗ゾーンが広く見られるが、出水期には、広く地下水の通り道となっている. 点線で囲ったエリアについては、断層が集中しているゾーンであり、断層により亀裂が集中している箇所が豪雨時に地下水の通り道になったと考えられる. このように、断層等に伴う亀裂による高比抵抗ゾーンが豪雨時に地下水の通り道となり、深層崩壊につながった可能性があることが分かった.

5. おわりに

本研究から、断層等の亀裂が豪雨時に地下水の通り道となり、深層崩壊につながったと考えられる. 今後、深層崩壊リスク評価の一手法として、比抵抗分布から危険度を評価する手法を確立していきたい.

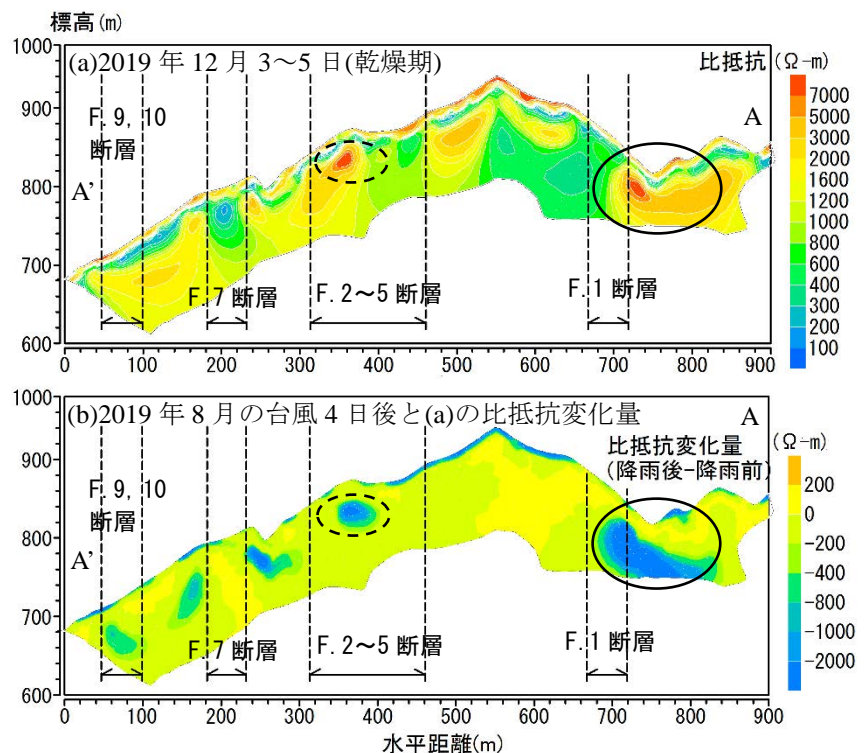


図-4 (a)2019年12月の乾燥期の電気探査結果. (b)2019年8月の台風4日後の電気探査結果と(a)との比抵抗比. 点線及び実線で囲まれたエリアは出水期に大きく比抵抗が下がったエリア.

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，pp. 43-53，2012，2) 木下ら：平成23年台風12号で発生した深層崩壊の地質的素因と崩壊面の土質特性，砂防学会誌，Vol.66，No.3，pp.3-12，2013，3) Chigiraら：Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas，Geomorphology，201，pp. 479 - 493，2013，4) 公益社団法人物理探査学会：物理探査ハンドブック増補改訂版，pp. 497-503，2016.

2011年に深層崩壊が発生した奈良県十津川村栗平地区における
比抵抗探査を用いた断層沿いの地下水流入過程の検討

Analysis of groundwater inflow process along faults by resistivity surveys at the 2011
deep-seated landslide in Kuridaira, Totsukawa village, Nara prefecture

木下篤彦^{a)・b)*}, 柴田 俊^{b)}, 山越隆雄^{a)}, 中谷洋明^{a)}, 加藤智久^{c)}, 河戸克志^{d)}, 奥村 稔^{d)},
三田村宗樹^{e)}, 松井 保^{f)}

Atsuhiko KINOSHITA, Suguru SHIBATA, Takao YAMAKOSHI, Hiroaki NAKAYA, Tomohisa KATO, Katsushi KAWATO,
Minoru OKUMURA, Muneki MITAMURA and Tamotsu MATSUI

Key words: deep-seated landslide, electrical survey, airborne electromagnetic survey, hydrological process, fault
キーワード: 深層崩壊、電気探査、空中電磁探査、水文プロセス、断層

1. はじめに

2011年9月の台風12号により、紀伊半島では多数の深層崩壊が発生した^{1)~3)}。今後、同様の雨が降った場合に、どのような斜面で深層崩壊が発生するか、という観点から、著者らはこれまで地形・地質・水文等様々な点から2011年の深層崩壊発生箇所を調査を行ってきた^{4)~6)}。また、他にも多くの研究者が多様な角度から2011年の深層崩壊発生箇所周辺で研究を行い、多くの成果を残している^{7)・8)}。

例えば、木下ほか⁴⁾は、Cバンドレーダー雨量計のメッシュ毎の雨量と深層崩壊の発生・非発生との関係を調査した結果から、48時間雨量や累積雨量のような長期雨量指標の超過確率年の大きいメッシュと深層崩壊発生箇所との相関性が高いことを示している。海原ほか⁵⁾は統計的手法の一つであるラフ集合を用いて、深層崩壊の発生・非発生を決定する要因を分析した結果、斜面方位、微地形該当数、累積雨量の超過確率年、標高差、接峰面差、断層からの距離が重要であると結論づけている。木下ほか⁶⁾は、リングせん断試験の結果などから、深層崩

壊のメカニズムとして、上部斜面が地すべり変動を生じて下部斜面上に乗り上げたことで岩盤内部に圧縮変形が生じ、大きな正の過剰間隙水圧を生じた可能性があるという指摘している。Chigira *et al.*⁷⁾は、2011年の台風12号によって紀伊半島に発生した深層崩壊について、1mメッシュのDEMから作成した傾斜図と地形断面図から、崩壊発生前に既に斜面の重力変形が発生していたことを示している。Arai and Chigira⁸⁾は、2011年の台風12号によって紀伊半島に発生した2つの大規模岩盤すべりについて、地すべりを支配していたのは衝上断層と破碎帯を含む山体の河川侵食であったと結論づけている。これらのように、既往研究から、2011年に紀伊半島で発生した深層崩壊に関する多くの要因が明らかになっている。一方で、検討が十分なされていないのは、降雨に伴う斜面の水文プロセスとそれが崩壊に及ぼした影響である。

これまで、地すべり斜面の水文プロセスに関する研究成果は多数ある^{9)~14)}。これらの中で断層が多く存在する地質である紀伊半島の深層崩壊を議論する上で注目すべきは、断層と地下水との関係を議論している研究があることである^{9)~11)}。特に、茂木ほか⁹⁾は秋田県の荒瀬川地すべりを対象に、電気探査の結果などから、断層には高透水性を示す断層と難透水性を示す断層があり、これらが地下水流動及び地すべり活動に大きな影響を及ぼすことを示している。また、山崎ほか¹⁰⁾、川上¹¹⁾は、それぞれ断層による地下水の堰き止めが地すべりの原因である事例を示している。これらの成果から、紀伊半島での深層崩壊においては、断層が地下水流動に及ぼす影響を調査することで、深層崩壊発生原因の一因を突き止めることができる可能性がある。

そこで、本研究では、2011年の紀伊半島の深層崩壊で規模が最大であった栗平地区を対象に、水文プロセスの点から、特に断層沿いの地下水の挙動に着目して、深層崩壊が発生した原因を分析する。著者らは、2011年の災害以降、栗平地区の崩壊斜面周辺で、ボーリング調査及びボーリング孔での水位観測、空中電磁探査を実施した。

* 連絡著者 / corresponding author

a) 国土交通省国土技術政策総合研究所
National Institute for Land and Infrastructure Management
〒649-5302 和歌山県東牟婁郡智勝浦町市野々3027-6
3027-6, Ichinono, Nachikatsu-ura Town, Higashimuro-gun,
Wakayama Prefecture, 649-5302, Japan

b) 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
Sediment Disaster Prevention Technology Center

c) 中央開発株式会社
Chuo Kaihatsu Corporation.

d) 大日本コンサルタント株式会社
NIPPON ENGINEERING CONSULTANTS CO., LTD.

e) 大阪市立大学
Osaka City University

f) 大阪大学
Osaka University



図-1 栗平地区の位置図

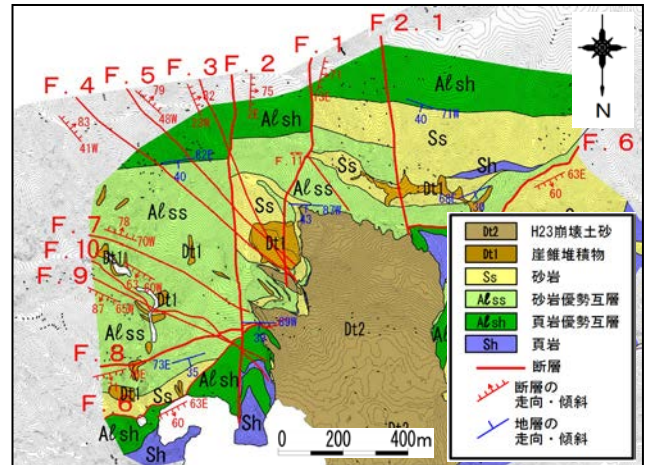


図-2 栗平地区の地質図及び断層の分布図

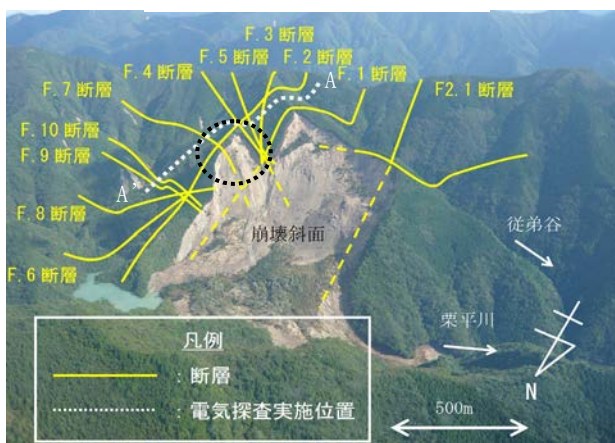


写真-1 崩壊斜面周辺の断層の分布。撮影日は2011年9月10日である。白い点線は図-9・10での電気探査の測線を表す。黒い点線で囲まれたエリアは写真-2の位置を示す。矢印は流向を示す。



写真-2 崩壊斜面の断層とその周辺の状況。撮影日は2019年10月28日である。断層周辺で地下水の湧出が見られる。

また、新たに断層の分布に着目して、その周辺の地下水の挙動について、乾燥期と出水期に電気探査により検討したので、その結果を速報として紹介する。

2. 2011年に栗平地区で発生した深層崩壊の概要と実施した調査について

栗平地区は、奈良県十津川村にあり、熊野川の上流域に位置している(図-1・写真-1)。地質は、四万十帯白亜系である日高川層群が分布する。日高川層群は主にチャート、緑色岩類、砂岩頁岩互層で構成されている。また、栗平地区においては、図-2に示すように砂岩、頁岩、砂岩頁岩互層が分布している。2011年9月の台風12号では、総降水量が紀伊半島の広い範囲で1,000mmを超え、栗平地区で深層崩壊が発生した。深層崩壊の規模は、幅600m、高さ450m、長さ650mで、約2,385万 m^3 にのぼる崩壊土砂が河道を閉塞し、現在も湛水池を形成している。特筆すべきは、写真-1・図-2に示すように、崩壊斜面周辺に多数の断層が分布していることであ

る。これらは露頭観察により、いずれも細礫～砂礫状に破碎された岩相を呈する破碎帯を伴うことが確認されている。断層の傾斜はいずれも 60° 以上だった。また、写真-2に示すように、崩壊斜面に現れた断層周辺で地下水の湧出が常時見られる。著者らは、2011年9月4日の災害後に、深層崩壊のメカニズムの分析を目的として様々な調査を実施してきた。まずは、崩壊斜面周辺でボーリング調査を行うとともに、翌年の2012年11月には、3次元的な比抵抗分布を取得し、地下の亀裂の分布と地下水の状況を探査する目的で、空中電磁探査を実施した。さらに、2019年8月と12月には、断層に伴う亀裂と地下水の挙動との関係を調査する目的で、電気探査を実施した。

3. 災害後に栗平地区で実施してきた調査の結果について

3.1 ボーリング調査の結果について

栗平地区では、深層崩壊のメカニズムの分析や工事の安全対策を目的として、2012年までに5孔のボーリングを掘っている。図-3にその位置を示す。ボーリング調

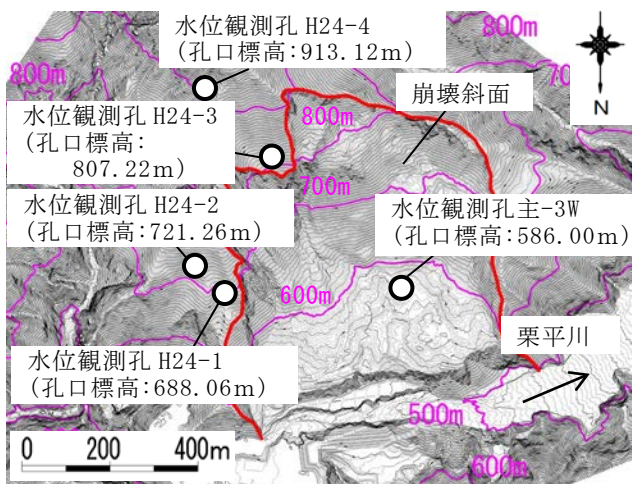


図-3 栗平地区の災害後の地形図と水位観測孔の配置図。矢印は流向を示す。赤い太線は崩壊斜面の縁を示す。



写真-3 ボーリング調査の結果得られた、断層によるとみられる亀裂(ボーリング孔 H24-1)。黄色で囲まれたコアは、F.9断層であり、主に固結砂礫状を呈し、亀裂に富んでいる。

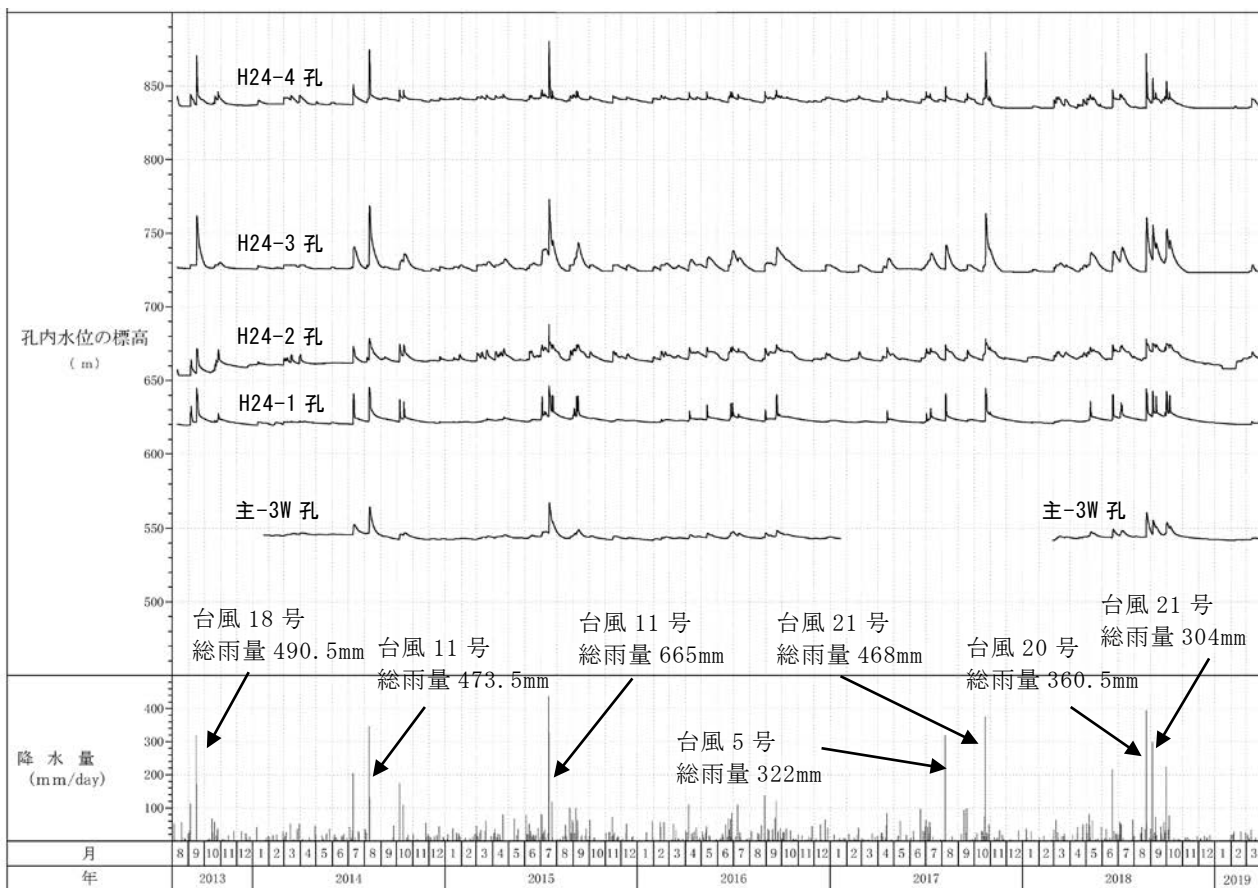


図-4 栗平地区の5つのボーリング孔の地下水位の変動(2013年8月～2019年3月)。地下水位のデータは1時間おきに取得している。降水量は、栗平地区に設置した雨量計のデータである。

査の結果から、全孔で写真-3に示すような亀裂に富んだ岩盤が深度60～80m付近まで分布し、それ以深には亀裂の少ない岩盤が分布することが分かった。また、崩壊地内で掘削した主-3W孔においては、深度58mまで崩壊土砂が分布することを確認した。断層破砕帯は主に固結砂礫状を呈し、その上下数m程度の岩盤が破碎を受けて

いる。孔内水位は各観測孔とも電表のすぐ上石盤の上田付近に確認された。なお、ボーリング孔は水位観測孔として仕上げ、その後、孔内水位の観測を実施している。水位観測孔は深度10mまでを遮水区間とし、それ以深をオールストレーナーとした。

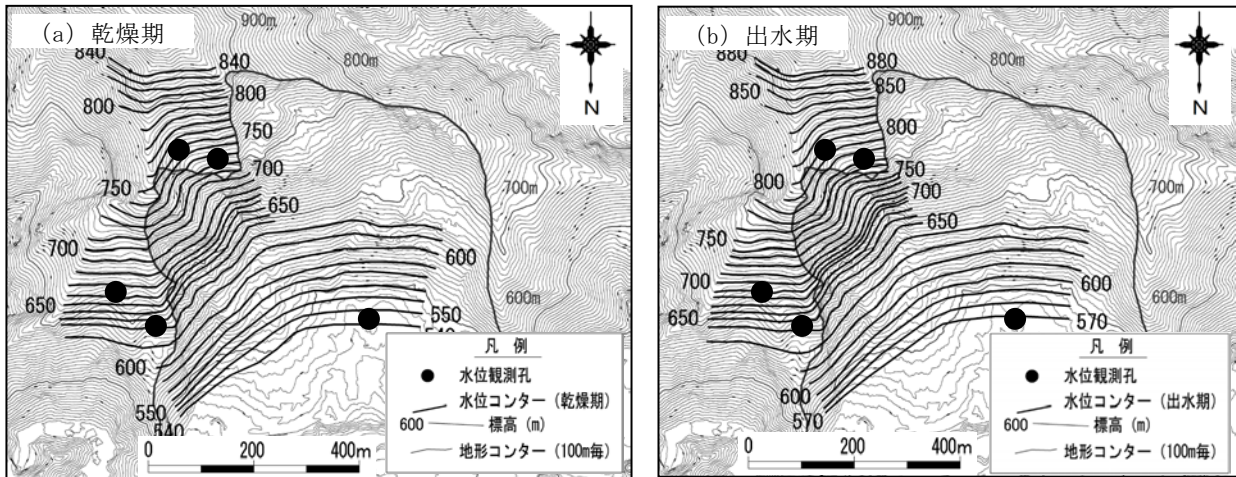


図-5 乾燥期及び出水期の水頭分布図。(a)乾燥期(2016年1月17日、直近の23日間無降雨)、(b)出水期(2015年7月17日、総雨量665mmの降雨時)

3.2 ボーリング孔を用いた地下水観測について

図-4に栗平地区の水位観測の結果を示す。これまで総雨量300mmを超える降雨がいずれも台風により7回あったが、いずれのイベントでも孔内水位が大きく上昇した。これらを基に、図-5に乾燥期(2016年1月17日)と出水期(2015年7月17日)の水頭分布図を示す。なお、乾燥期は無降雨日数が23日の時、出水期は総雨量665mmの降雨時の水頭分布図である。水頭分布図は水位観測孔の孔内水位の他、地形データを参考にして作成している。観測孔が少ないため詳細な水頭分布は不明だが、出水期は標高700~800mで動水勾配が大きくなっている。図-6に5孔について、図-4を基にして求めた、連続雨量と水位上昇量との関係を示す。なお、水位上昇量は、一回の降雨による最高水位とその降雨により水位が上がり始めた瞬間の水位との差で定義する。また、対象としたイベントは、簡易的に前後24時間降雨が無い時間がある総雨量50mm以上のものとした。崩壊斜面よりも上流の(a)H24-1孔・(b)H24-2孔、崩壊斜面内の(e)主-3W孔は、それぞれ連続雨量200、660、520mm程度で水位上昇量が約20mに達する。一方、崩壊斜面よりもさらに上部に位置する(c)H24-3孔、(d)H24-4孔はそれぞれ連続雨量560、660mm程度で水位上昇量が約40mと(a)・(b)・(e)の約2倍となる。このため、連続雨量が増えるほど崩壊斜面よりもさらに上部と崩壊斜面内で水頭差が大きくなるため、崩壊斜面に地下水が流れ込みやすくなる可能性がある。このことも2011年に深層崩壊が発生した一因と考えられる。

図-7にH24-1~4の水位観測孔での地下水の流向・流速試験の結果を示す。流向及び流速は、単孔式加熱型流向流速計で計測した。2013年7月23~24日に実施されたもので、計測当日の天候は晴れていたが、梅雨明け直後であり、地下水位は比較的高い状態であった。また、測定深度は事前に実施した地下水検層により判明した地下水流動層の位置で実施した。なお、断層については、著者らの踏査結果を図示しており、いずれも破碎帯であ

傾斜方向ではなく、むしろ、概ね水位観測孔近傍の断層に沿って地下水の移動が見られることが分かる。ただし、本研究では、地下の断層の分布や地下水の水利構造に関して詳細に調査している訳ではないため、断層分布と地下水の流向との関係については今後も精査が必要である。

3.3 空中電磁探査の実施について

地下の亀裂分布と地下水状況を探査する目的で、2012年11月19日に空中電磁探査を実施した。なお、本研究での空中電磁探査は、周波数領域タイプのRESOLVE測定システムを使用し、計測・解析は、物理探査学会の手法¹⁵⁾にしたがって実施した。測定に使用した電磁波の周波数は5つ(140kHz・31kHz, 6900Hz, 1500Hz, 340Hz)である。これらにより、地表面付近から深さ約100mまでの見かけの比抵抗情報が得られる。

なお、間隙率が大きく地下水で飽和した地質ほど、あるいは粘土が多い地質ほど比抵抗は低く、新鮮で間隙が少ないか、間隙率が大きくても地下水が不飽和な地質ほど比抵抗は高くなる¹⁶⁾。

図-8に測定周波数140kHzの電磁波により得られた深度約10mの見かけ比抵抗分布を示す。地表地質踏査及びボーリング調査に基づく、崩壊地内において、見かけ比抵抗の低い分布域は崩壊土砂の堆積エリアに、見かけ比抵抗の高い分布域は滑落崖や非崩壊斜面の多亀裂の基岩の分布に対応する。斜面中腹から下部の見かけ比抵抗が特に低いエリアにおいては、粘土分を含む崩壊土砂や複数の箇所湧水が確認されており、これらにより見かけ比抵抗が小さくなっていると考えられる。なお、天然ダムや湛水池はせき止められた水や天然ダム内部での浸透の影響で見かけの比抵抗は低くなっている。

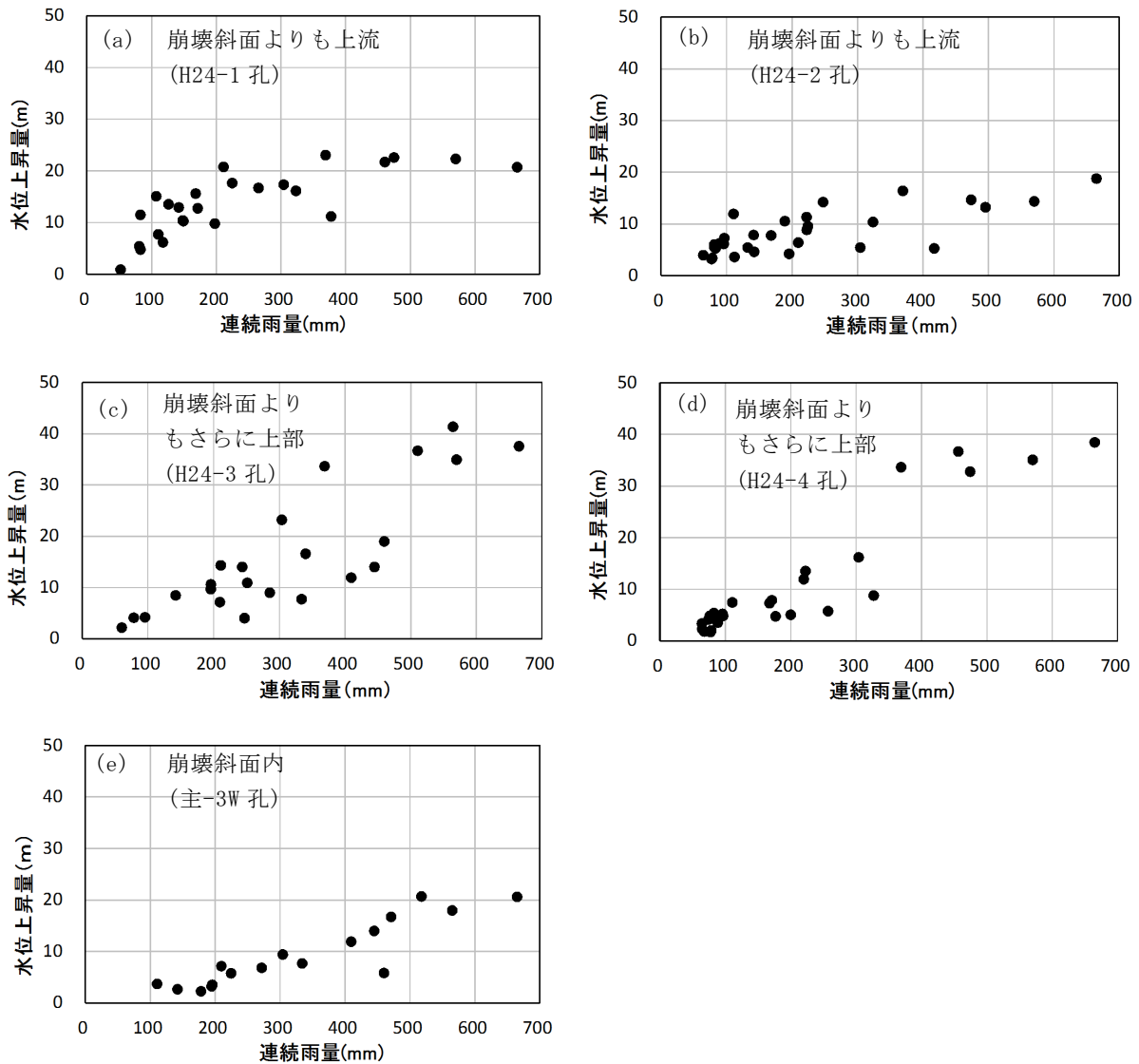


図-6 各水位観測孔の連続雨量と水位上昇量との関係。(a)H24-1 孔, (b)H24-2 孔, (c)H24-3 孔, (d)H24-4 孔, (e)主-3W 孔。

4. 断層からの地下水の流入に着目した電気探査の実施について

3章から, 崩壊地上部で地下水位が上昇しやすいこと, また, 崩壊斜面中腹から下部にかけて湧水による見かけの比抵抗が低いエリアが広がっていることが分かった。一方で, これらのデータだけでは豪雨時に断層がどのように地下水の挙動に寄与しているか不明である。このため, 写真-1・図-7・図-8のように断層をまたぐような測線で乾燥期及び出水期に電気探査を実施した。なお, 電極間隔は5m, 電極配置は2極法とした。

図-9・図-10にそれぞれ乾燥期・出水期の電気探査による比抵抗分布を示す。比抵抗分布は逆解析により推定している。図-9について, 電気探査は, 2019年12月3~5日に実施している。降雨については, 探査を開始した12月3日時点で14日降雨が無い状況であった。

お, 測線上に分布する地質は砂岩優勢砂岩頁岩互層及び砂岩であり, 概ね均質な地質である。地層の傾斜は斜面に対して30~50°程度の流れ盤をなすため, 高角度の比抵抗構造は断層破碎帯を反映しているものと考えられる。区間Bに断層に伴うとみられる低比抵抗ゾーンが存在している。写真-2のような断層付近に湧水も観察されていることから, このゾーンでは乾燥期でありながら地下水が流れていると考えられる。その他のゾーンについては, いずれも高比抵抗を示す領域が確認できる。特に, 区間CとGに比抵抗が特に高いゾーンが確認できる。これらは, いずれも断層付近に見られ, 断層に伴う亀裂が多く入った箇所と考えられる。

図-10について, 電気探査は2019年8月20~23日に行った。なお, この直前の8月12~16日に台風10号(総雨量901mm)が紀伊半島周辺に多量の雨を降らせてい

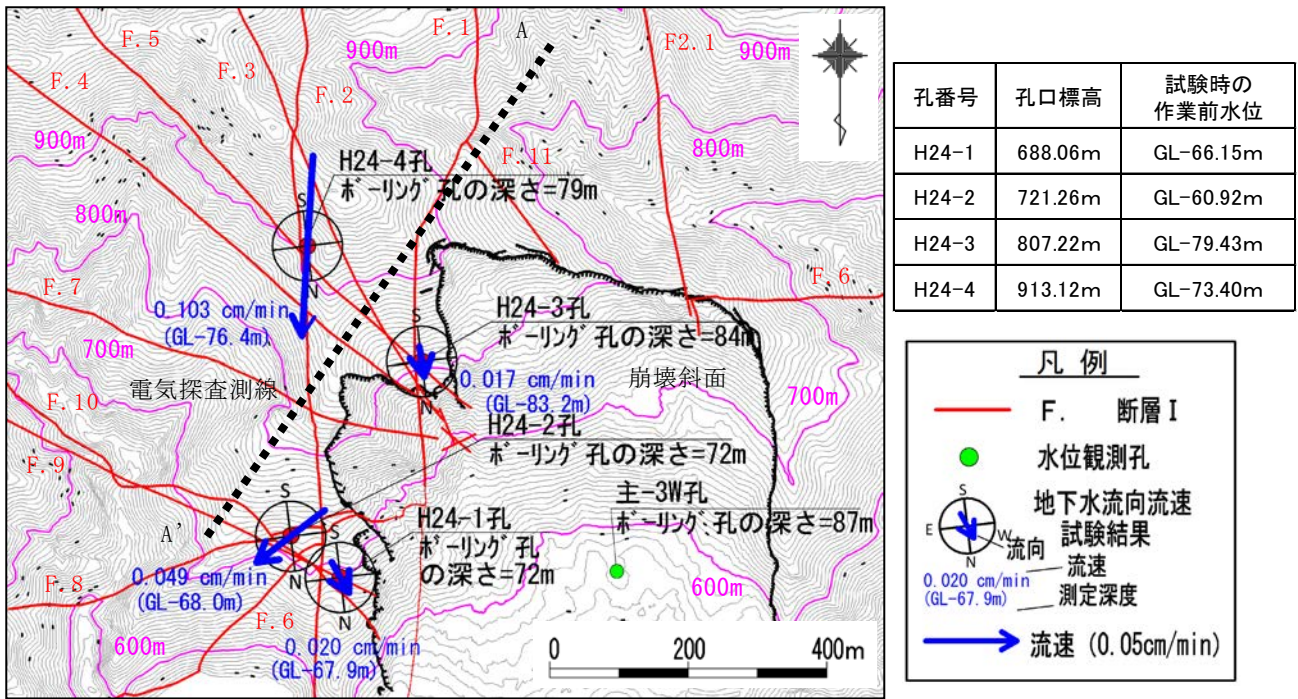


図-7 崩壊斜面周辺の断層の分布と地下水の流向・流速試験の結果。H24-1～4の4孔で実施し、2013年7月23・24日に実施した。点線は図-9・図-10での電気探査実施位置を示す。

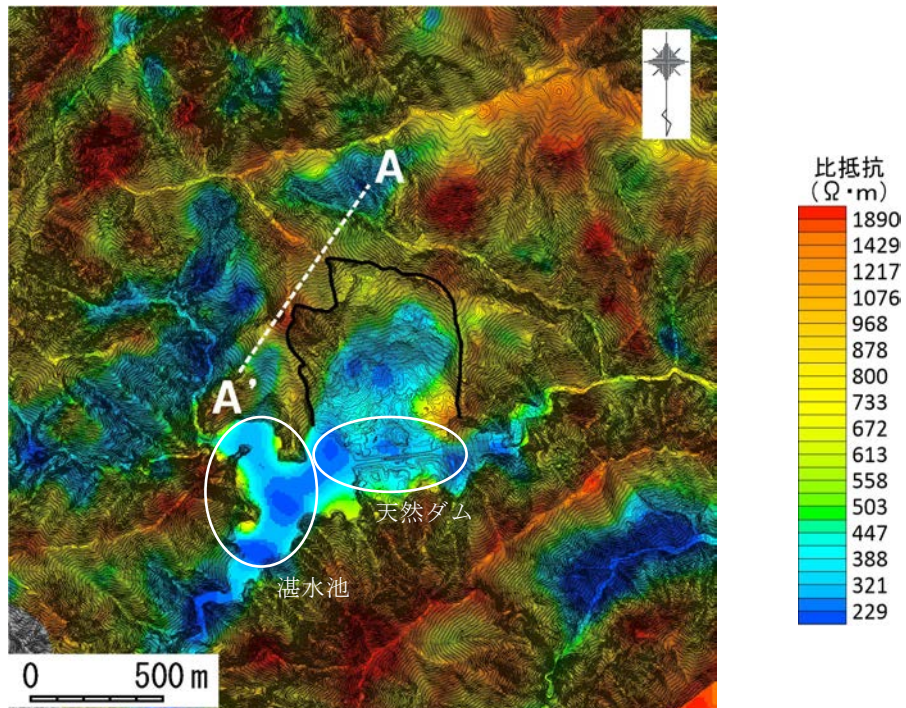


図-8 栗平地区における空中電磁探査の結果。測定周波数 140kHz (地下約 10m) での見かけ比抵抗の平面分布である。黒い実線は 2011 年崩壊斜面の範囲を、白い点線は図-9・図-10での電気探査実施位置を示す。

る。図-9と比較すると、区間Bにおいては、大きな変化がないことが分かる。区間C・Gの特に比抵抗が高いゾーンにおいては、比抵抗値が下がっていることが分かる。図-11に出水期(図-10)と乾燥期(図-9)の比抵抗値の差の分布を示す。比抵抗値が大きく低下したのは区間BとCの境界付近、区間CとDの境界付近、区間Gの3箇所である。区間CとDの境界と区間Gは図-9で

所に地下水が流れこんだと考えられる。区間BとCの境界付近は図-9で谷地形となっており、これによる地下水の流入があったと考えられる。実際、図-9においてもこの付近はやや低比抵抗となっており、乾燥期でも地下水の流入があるゾーンと考えられる。なお、区間Bにおいては、図-11で比抵抗値の低下は見られない。こ

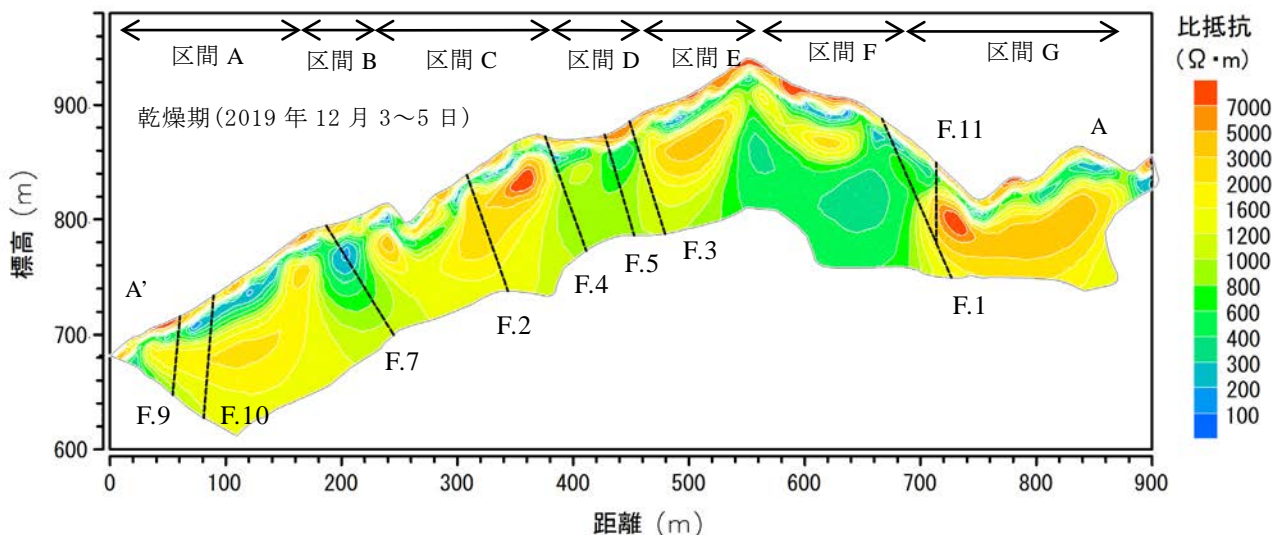


図-9 図-8中の測線 A-A' における 2019 年 12 月 3～5 日に実施した電気探査の結果。点線は探査及び踏査の結果から想定される断層位置を表す。

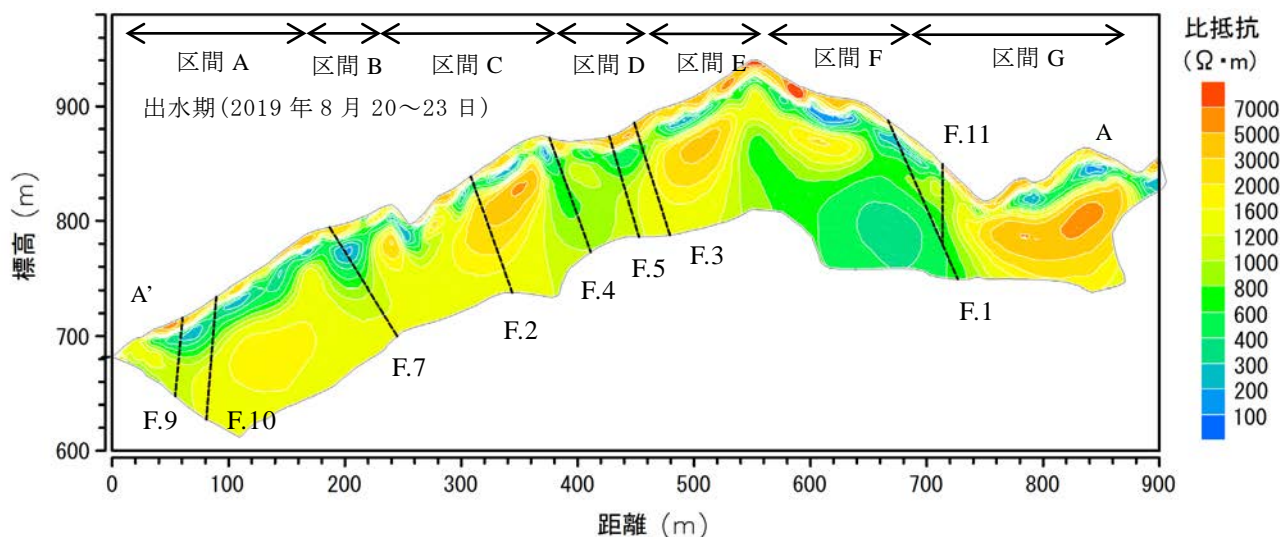


図-10 図-8中の測線 A-A' における 2019 年 8 月 20～23 日に実施した電気探査の結果。2019 年 8 月 12～16 日に台風 10 号により積算雨量 901mm の雨が降った。点線は図-9 で想定された断層位置を示す。

ことから、区間 B については、出水期・乾燥期関係なく地下水が流れているエリアと考えられる。

5. おわりに

本研究では、2011 年の台風 12 号以降に栗平地区で実施した調査と最近新たに実施した電気探査の結果を速報として紹介した。得られた成果は以下の通りである。

- 1) ボーリング孔での地下水位等の観測・調査結果から、崩壊斜面より上部で降雨に応答した地下水位の上昇量が多いこと、流向・流速試験の結果から、地下水は表面地形に応じた方向ではなく、むしろ概ね断層に沿って流動していることが明らかになった。降雨時には、斜面上部と斜面内の間で水頭差が大きく

なり、地下水が流れ込み易くなる可能性が考えられる。

- 2) 乾燥期に実施された空中電磁探査の結果から、崩壊斜面下部の表層付近に崩壊地周辺斜面に比べて低い見かけ比抵抗域が分布する。これは粘土分を含む崩壊土砂や湧水などが原因と考えられる。
- 3) 出水期と乾燥期の電気探査による比抵抗値の比較から、崩壊斜面への出水期の地下水の流入経路としては、断層沿いの亀裂が考えられることが分かった。

以上より、栗平地区の崩壊地では、豪雨時に周辺斜面から崩壊地に地下水が流入しやすい水理地質特性を有しており、特に、断層沿いに地下水が崩壊斜面に流入して

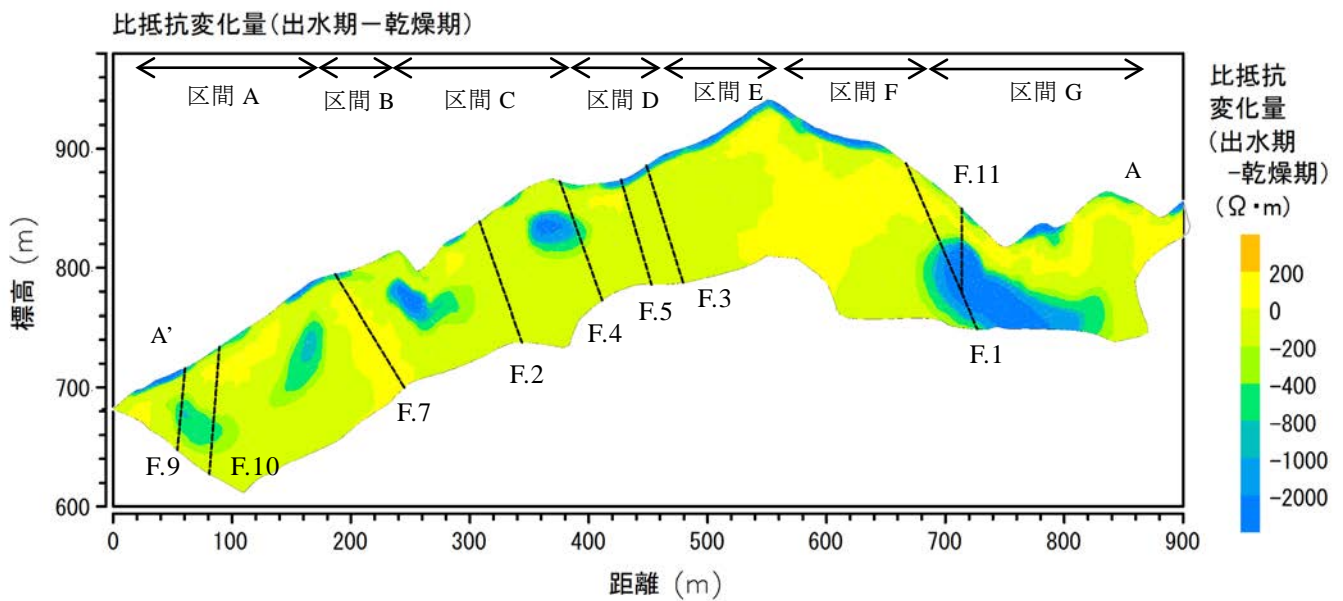


図-1 1 乾燥期(図-9)と出水期(図-10)の比抵抗値の差の分布。青に近いほど出水期に抵抗値が大きく下がったことを示す。点線は図-9で想定された断層位置を示す。

いることが推測された。このことが、2011年にこの斜面で深層崩壊が発生した一因になったものと考えられる。

謝辞

本原稿の作成に当たっては、編集委員及び匿名の査読者に適切なご助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 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(2012)：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.
- 2) 藤田正治(2012)：2011年台風12号による大規模土砂災害，第6回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 35-40.
- 3) 竹林洋史・藤田正治・宮田秀介・堤大三(2011)：2011年9月紀伊半島豪雨災害調査速報，自然災害科学，Vol. 30，No. 3，pp. 369-379.
- 4) 木下篤彦・北川眞一・内田太郎・海原荘一・竹本大昭・只熊典子(2013)：深層崩壊が集中的に発生する降雨条件—平成23年台風12号の降雨分析—，砂防学会誌，Vol. 66，No. 3，pp. 24-31.
- 5) 海原荘一・木下篤彦・今森直紀・竹本大昭・只熊典子(2017)：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，砂防学会誌，Vol. 70，No. 1，pp. 10-19.
- 6) 木下篤彦・小川内良人・眞弓孝之・柴崎達也(2013)：平成23年台風12号で発生した深層崩壊の地質的素因と崩壊面の土質特性，砂防学会誌，Vol. 66，No. 3，pp. 3-12.
- 7) Chigira, M., Tsou, C., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and

structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, *Geomorphology*, 201, pp. 479 - 493.

- 8) Arai, N. and Chigira, M. (2018) : Rain-induced deep-seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan, *Island Arc*.2018 ; 27 : e12245.
- 9) 茂木俊・古谷尊彦・河戸貴善・田村宏一・工藤信仁・平塚賢二郎(2018)：物理探査を併用した地質構造と地下水流動システムの推定—秋田県荒瀬川地すべりの事例—，日本地すべり学会誌，Vol. 55，No. 3，pp. 3-16.
- 10) 山崎孝成・山田春男・大石武彦・金沢雄一(2003)：大規模地すべりの水文地質構造を考慮した立体排水工，日本地すべり学会誌，Vol. 40，No. 3，pp. 29-36.
- 11) 川上浩(2007)：断層によるせき止め地下水を原因とする地すべり2例，日本地すべり学会誌，Vol. 44，No. 4，pp. 33-36.
- 12) 森屋洋・荻田茂・山田孝雄・阿部真郎(2007)：東北地方における断層周辺の第三紀層地すべり，日本地すべり学会誌，Vol. 44，No. 4，pp. 44-49.
- 13) 今泉眞之・奥山武彦・備前信之(1995)：第三紀層泥岩地すべり斜面の水文地質構造と地下水流動脈の関係—新潟県板倉町の大池地すべりを例として—，応用地質，Vol. 36，No. 4，pp. 2-16.
- 14) 竹内篤雄(1975)：地すべり活動に対する地下水流脈の役割について，応用地質，Vol. 16，No. 3，pp. 1-11.
- 15) 公益社団法人物理探査学会(2016)：物理探査ハンドブック増補改訂版，pp. 497-503.
- 16) 坂井佑介・河戸克志・佐渡耕一郎・平川泰之(2016)：阿蘇西麓地熱地帯における空中電磁探査を用いた水理地質構造の推定，砂防学会誌，Vol. 69，No. 1，pp.20-29.

国総研における河道閉塞等の大規模土砂災害発生時の緊急対応方法に関する研究開発

国土技術政策総合研究所 水野正樹
山越隆雄

1. はじめに

2004年、2008年、2011年と地震や豪雨により深層崩壊・天然ダムによる土砂災害が相次いで発生し、そのような大規模土砂災害への対応と危機管理の必要性が強く再認識された。

国総研土砂災害研究部は、それらの災害に砂防研究者を派遣して現地の対応を支援するとともに、対応を通じて得られた知見に基づく技術開発と対応マニュアルの作成、また、集中的な調査研究および天然ダム災害等に対応できる人材の育成を継続的に行っている。

2. 大規模河道閉塞対応技術指針類の

整備

2007年3月「大規模土砂災害危機管理検討委員会」¹⁾は、大規模土砂災害への危機管理体制整備の必要性について提言した。併せて、砂防研究者派遣等の国の支援のあり方、新たな資機材開発の必要性等について指摘があった。後の2008年岩手・宮城内陸地震の際(図-1)には、国立研究開発法人土木



図-1 2008年岩手・宮城内陸地震で発生した湯ノ倉の河道閉塞(天然ダム)

研究所(以下「土研」という。)土砂管理研究グループによって新たに開発された資機材が活用された一方で、大規模土砂災害への対応技術に関する課題が改めて浮き彫りとなった。

これら明らかになった課題を踏まえて、迅速かつ効果的な天然ダム対応を行うことを目的に、近年の地震を起因とした土砂災害への対応を通じて蓄積された知見等に基づいて天然ダム対応技術の基本的な考え方を整理して既存の対応マニュアルを更新し、東北地方整備局や土研土砂管理研究グループと共に、天然ダム対応の技術指針として、「天然ダム形成時対応の基本的考え方(案)」、「天然ダム監視技術マニュアル(案)」²⁾、「天然ダム対策工事マニュアル(施工編)」等を取りまとめた。

3. 土砂災害防止法に基づく緊急調査のための技術開発と人材育成(2009～)

2010年改正前の土砂災害防止法は、天然ダムのような進行性の現象に対応する高度な技術を要する特殊な土砂災害を念頭においた内容ではなかった。また、市町村長が避難指示の発令等を行うに当たって、国等が市町村長を支援するための規定がないこと等が指摘されたこと等から、国土交通省は土砂災害防



図-2 2011年台風第12号による豪雨で発生した河道閉塞(天然ダム)(熊野川流域五條市 赤谷 2011.9.6 土研土砂管理研究グループ撮影)

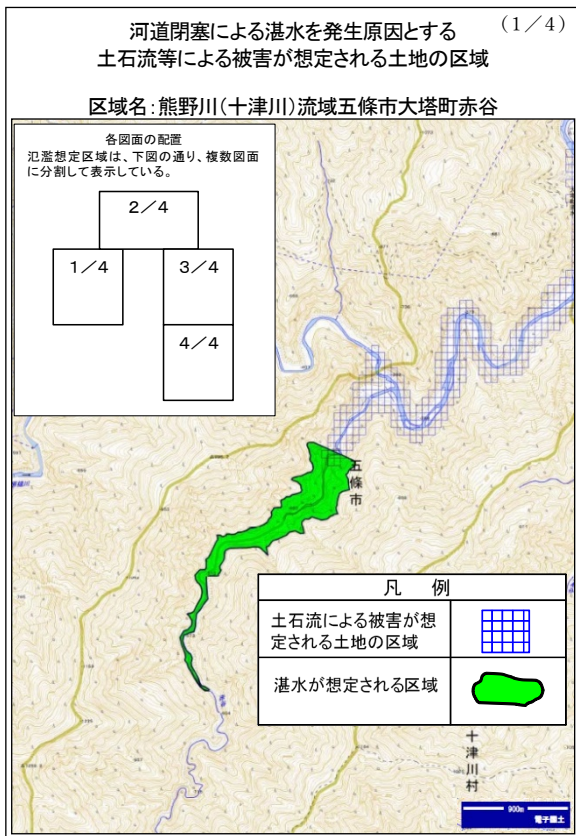


図-3 緊急調査の結果の例（河道閉塞による湛水を発生原因とする土石流等による被害が想定される土地の区域）（近畿地方整備局 2011 年 9 月熊野川流域五條市赤谷）

止法を改正し、天然ダム等の特殊な土砂災害時において、市町村長を支援するための国による緊急調査や土砂災害緊急情報の提供等を法的に位置付けた。これを受けて、国土交通省砂防部、国総研土砂災害研究部、土研土砂管理研究グループは、土砂災害緊急調査の手引き、及び河道閉塞（天然ダム）等を原因とする土石流による被害範囲を推定するための数値計算プログラムを作成した。



図-4 土砂災害研究部及び TEC-FORCE による河道閉塞（天然ダム）箇所の詳細調査

改正土砂災害防止法の施行（2011 年 5 月）直後の同年 9 月に台風 12 号により紀伊半島で深層崩壊による河道閉塞（図-2）が発生したために、5 箇所天然ダムを対象として土砂災害防止法に基づく国の緊急調査が初めて実施され、近畿地方整備局長から地元県知事と首長へ土砂災害緊急情報が通知された（図-3）。この際に、国総研土砂災害研究部等で作成した手引きやプログラムが実際に活用された。この災害においても、国総研土砂災害研究部・土研土砂管理研究グループは砂防研究者を数多く派遣し（図-4）、近畿地方整備局の対応を技術的に支援した。

一方で、大規模な天然ダムが複数発生する等、災害の規模が大きい場合には、被災地を管轄する地方整備局だけでは緊急調査に精通した職員が不足している状況も明らかになった。そこで、緊急調査の内容、実施手法等に精通した地方整備局職員を増やすため、その育成を支援することを目的に、土研土砂管理研究グループの協力を得て、「高度な土砂災害対策に従事する地方整備局職員の育成支援プログラム」（図-5）を 2013 年度から開始し、筑波山での実地研修も含めた研修を行っている。2018 年からは砂防担当者に加えて道路担当者も参加して研修を行っている。

4. 深層崩壊対策（平常時と緊急時）に関する研究

天然ダムは、多くの場合、地震あるいは豪雨時に深層崩壊と呼ばれる大規模な斜面崩壊が発生することによって生じる。深層崩壊は、発生頻度は通常の土砂災害に比べて小さいものの、規模が非常に大きく、被害は甚大になる。そこで、国総研土砂災害研究部では、深層崩壊対策技術に関する研究を進め、2014 年に「深層崩壊対策技術に関する基本的事項」

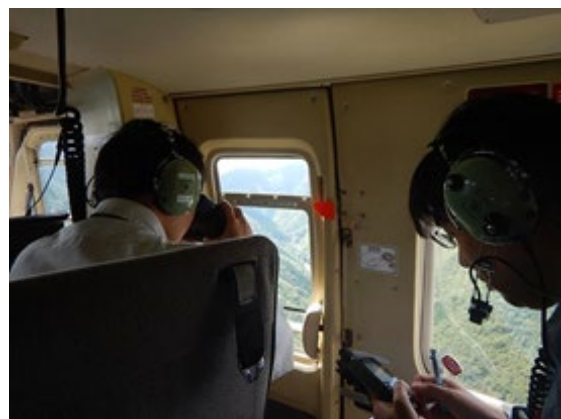


図-5 「高度な土砂災害対策に従事する地方整備局職員の育成支援プログラム」の実施状況（ヘリの機内からレーザー距離計で天然ダムの高さを計測する様子）

3)として、技術的な基本事項についてとりまとめるとともに、深層崩壊による被害予測に関してもさらに研究を進め「深層崩壊に起因する大規模土砂災害被害想定に関する手法」4)をとりまとめた。

現在、これらの技術資料に基づいて、全国の直轄砂防事業区域において、設定したモデル地区において地方整備局等が災害シナリオの検討等を進めている。

5. 大規模土砂災害対策技術センターの設置及び研究の実施（2014～）

2011年台風12号では、紀伊半島の72箇所で大規模土砂災害が発生した。この地域では過去にも同様の災害が発生している。また、深層崩壊に伴う土砂動態は未解明であり、綿密かつ継続的に、地形変化計測、



図-6 大規模土砂災害対策技術センター（写真は和歌山県土砂災害啓発センター。同センター内に設置）

河川流量、地下水、湧水等の水文観測、降雨毎の土砂移動現象の把握を実施する必要がある。このため、近畿地方整備局は、大規模土砂災害対策技術センター（図-6）を2014年和歌山県那智勝浦町に設置した。国総研土砂災害研究部は、2017年から研究者（主任研究官）を一名常駐させ、深層崩壊の発生メカニズム等の研究を行っている。

6. 衛星 SAR 観測を利用した調査に関する研究

日本の陸域観測技術衛星「だいち（ALOS）」が2006年に打ち上げられたことから、「だいち（ALOS）」等の観測データを砂防流域モニタリングに活用する研究を行った。また、特に夜間や悪天候時にも観測可能で位相情報が含まれる合成開口レーダ（以下、「SAR」という。）によるデータが、大規模な斜面崩壊が発生した場所を把握する情報として有効であったことから、豪雨時や地震発生時に迅速な初動対応を可能にするため、「だいち2号（ALOS-2、2014年打ち上げ）」等の衛星SARの強度画像や

干渉画像を用いて、土砂災害の発生地域等を特定する方法について研究開発を行った。これらの研究成果を基に国総研資料5) 6) 7) 8)を取りまとめた。

並行して、JAXA（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）との共同研究及び、JAXAとの「土砂WG会合」への参加により、衛星SAR画像等の利用に関する研究の進捗を図った

7. おわりに

国総研土砂災害研究部は、土砂災害の発生状況や今後の国土交通省の施策の動向等を踏まえ、豪雨、地震等に起因した土砂災害による被害を防止・軽減する研究を担務しており、引き続き、土砂災害の発生メカニズムの解明、効果的な砂防施設整備のあり方、また警戒避難や監視体制等ソフト対策に関する研究等を推進する。

特に、以下については、今後重点的に取り組んでいきたい。

(1)気候変動に伴う土砂災害への対応

2020年6月の気候変動を踏まえた砂防技術検討会中間取りまとめ（座長：藤田正治京都大学防災研究所教授）での指摘を踏まえ、降雨特性の変化が土砂災害に及ぼす影響の評価手法の構築、顕在化する土砂・洪水氾濫や深層崩壊等大規模土砂災害の危険性評価手法の構築を進めていく。

(2)土砂・洪水氾濫対策の推進

2019年3月の河川砂防技術基準（計画編）の改定に伴い、土砂・洪水氾濫対策計画における土砂処理計画は、河床変動計算、氾濫解析等に基づき策定するように、砂防計画の立て方が大きく変化した。この改定を契機として、現在、土砂・洪水氾濫対策計画のうち、中期（土砂流出活発期）土砂流出対策検討については、昨年度発刊された国総研資料に基づき、全国の直轄事務所で見直しが進められている。国総研土砂災害研究部は、この新しい技術基準による計画立案の考え方に適した生産土砂量の想定手法や、施設配置計画の立て方等について、必要な技術開発を進めていきたい。また、土砂・洪水氾濫の主な発生要因の類型化を進めるとともに、氾濫開始地点の地形・氾濫形態と土砂・洪水氾濫にともなう土砂・泥水等の流出によって生じた家屋被害の被害形態等の実態把握を進め、数値計算に基づく被害想定手法の研究開発を進めていく。

参考文献

1) 大規模土砂災害危機管理検討委員会、国土交通省：大規模土砂災害に対する危機管理のあり方について（提言）、2007.3

https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/link_dai

kibo.html

- 2) 土木研究所火山・土石流チーム：天然ダム監視技術マニュアル（案）、土木研究所資料第4121号、2008.12
- 3) 蒲原潤一、内田太郎：深層崩壊対策技術に関する基本的事項、国総研資料、No.807、2014
- 4) 内田太郎、桜井亘、鈴木清敬、萬徳昌明：深層崩壊に起因する大規模土砂災害被害想定手法、国総研資料、No.983、2017
- 5) 水野正樹、神山嬢子、江川真史、佐藤匠、蒲原潤一、林真一郎：単偏波の高分解能SAR画像による河道閉塞箇所判読調査手法（案）、国総研資料、No.760、2013
- 6) 水野正樹、神山嬢子、江川真史、佐藤匠、蒲原潤一：2偏波SAR画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法（案）、国総研資料、No.791、2014
- 7) 鈴木大和、松田昌之、瀧口茂隆、野村康裕、山下久美子、中谷洋明：合成開口レーダ（SAR）画像による土砂災害判読の手引き、国総研資料、No.1110、2020
- 8) 鈴木大和、松田昌之、中谷洋明：災害時における合成開口レーダ（SAR）の散乱変化事例解説集、国総研資料、No.1159、2021

深層崩壊の発生するおそれのある斜面抽出及びリスク評価手法の改良に向けた検討

国立研究開発法人土木研究所

1. はじめに

2011年の紀伊半島大水害では、深層崩壊が多数発生し、甚大な被害が生じた。この災害に前後して、国土交通省および土木研究所では、深層崩壊推定頻度マップおよび溪流レベル評価マップの公表を行うなど、深層崩壊に関する調査および公表を進めてきた。また、一連の調査研究で得られた知見を土木研究所資料「深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究」¹⁾ (以下、「現行資料」という)として取りまとめ、2016年3月に発行した。この資料を参考に、国土交通省の各地方整備局等では、深層崩壊のおそれのある斜面抽出等具体の調査が進められてきた。

この間、調査の進捗に伴い、いくつかの課題が明らかとなってきた。例えば、現行資料では危険斜面の抽出手法は示されているものの、その危険度を評価するための具体的な指標については提案できていない、調査すべき斜面の優先順位について保全対象に想定される被害の程度も考慮する必要がある、リスク評価結果の活用方法が示されていないといった課題がある。また、現行資料の発行以降も、リスク評価に関する新たな手法²⁾が提案されている。

以上の背景を踏まえ、各種課題に対する改良の検討を行った。

2. 調査の進捗により顕在した課題

調査の進捗とともに顕在してきた課題について、直轄砂防事業を実施するいくつかの事務所に聞き取り調査を行った。主な課題について以下に示す。

① 危険斜面抽出のための各種指標について

2011年の紀伊半島大水害で発生した事例を除けば、近年の深層崩壊の発生事例は少なく、現行資料で示している抽出手法（特に水文地形特性、重力変形地形特性）に関して、危険度を判定するための指標となる基準値を示すことは現段階では困難である。

また、現行資料では作業ごとに使用する数値標高モデルの精度が示されておらず、抽出された危険斜面の評価結果の精度にはある程度のばらつきがあるものと推定される。

このため、対象地域における深層崩壊に関する調

査事例が活用できる場合に、こうした手法を用いることができるよう、また、地域の特性に応じた手法を選択することができるよう、考え方を示すことが望ましい。

② 社会的条件を踏まえた調査優先度の設定方法

詳細に調査すべき斜面の絞り込みにあたり、保全対象の重要度のみならず、保全対象に想定される被害の程度も考慮する必要がある。

③ リスク評価結果の活用方法

現行資料では、推定した崩壊土砂量が具体的にどのように活用されるか明示されていない。監視観測だけではなく、評価結果の活用方法を示す必要がある。

3. 改良の方向性の検討

前述の課題を踏まえ、以下の通り改良の方向性を検討した。

① 危険斜面抽出のための各種指標について

一次抽出と二次抽出に分かれていた危険斜面の抽出を「危険箇所の抽出」とする。その上で、深層崩壊の発生事例等を有する場合等に、地形特性の分析を行うことも有効であると明示するとともに、危険度を評価する際に参考となる文献を明示する。

② 社会的条件を踏まえた調査優先度の設定方法

保全対象等の社会的条件による斜面の絞り込みを危険度評価とは切り分けた具体の手法として、国土技術政策総合研究所の提案する「被害発生の可能性の観点」³⁾から斜面の絞り込みを行うことが出来るよう明示する。

③ リスク評価結果の活用方法

崩壊土砂量算出後、シミュレーション等による詳細な影響評価が可能となる旨を明示する。また、リスク評価後の対応として、ハード、ソフトによる対策の検討を行う旨を明示する。

以上の内容を踏まえ、現行資料の手法に関する調査フローの改良案を図-1に示す。

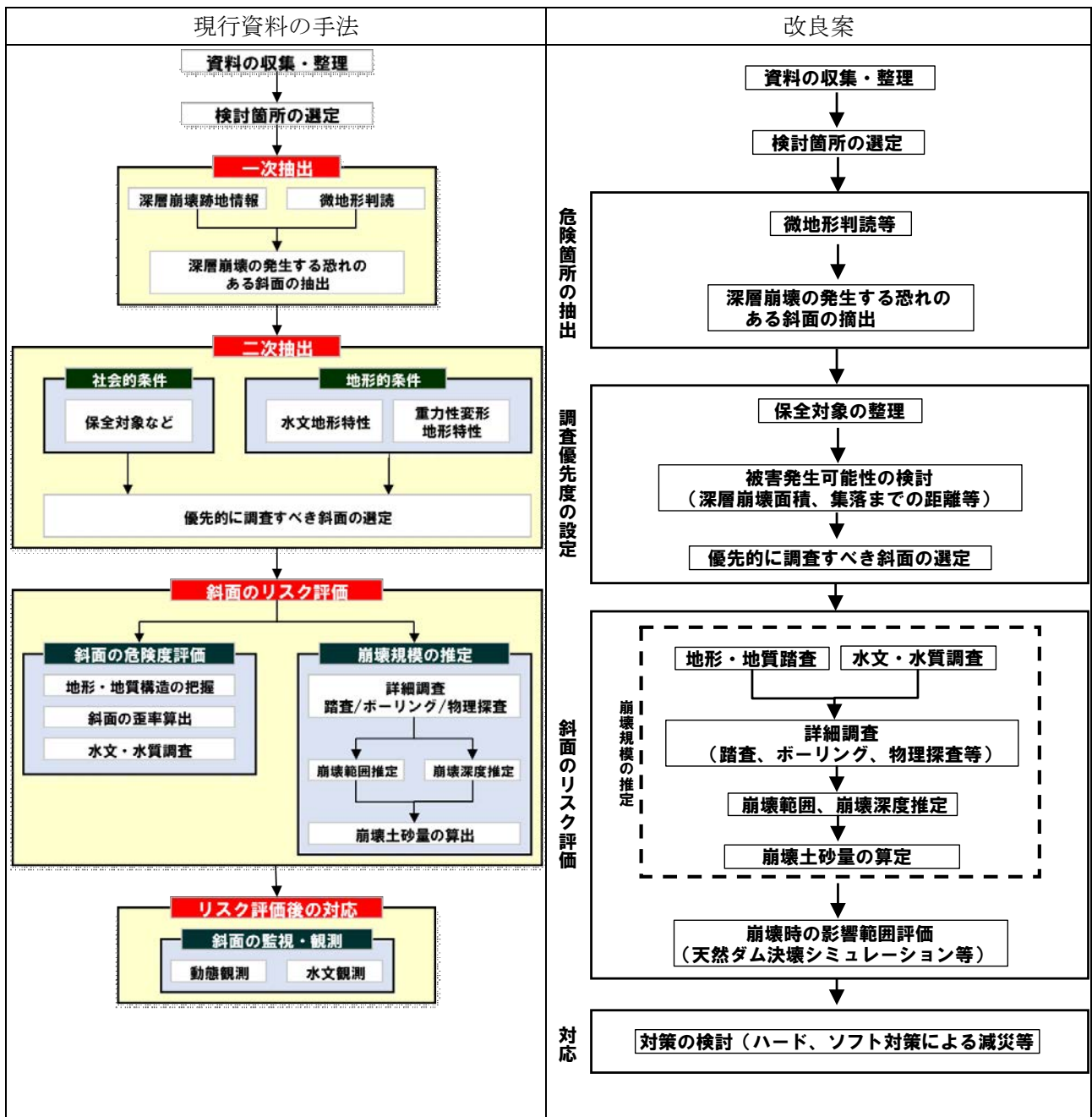


図-1 現行資料の手法と改良案の対比

4. おわりに

現行資料に基づく抽出及び評価手法に関する改良の方向性について検討を行った。気候変動に伴う降雨の形態変化が指摘される中、降雨量の増加に伴う深層崩壊の発生も懸念される。このため、引き続き対策に資する継続的な技術開発が必要である。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム：深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究，土木研究所資料，2016
- 2) 国土技術政策総合研究所：深層崩壊に起因する大規模土砂災害被害想定手法，国土技術政策総合研究所資料，2017

昭和 28 年日高川流域での土砂災害教訓伝承の取組み

和歌山県県土整備部砂防課
和歌山県土砂災害啓発センター
日高川町防災センター
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

○森川 智
崎山朋紀・宮崎徳生・榎原伴樹・岸畑明宏・坂口隆紀
伊奈高司・谷本展也
木下篤彦

1. はじめに

昨年の東日本を縦断した台風 19 号による土砂・洪水氾濫等、近年、大規模な土砂災害が頻発している。和歌山県でも毎年土砂災害が発生しているが、幸いにして被害はそれほど深刻ではない。

しかし、平成 23 年のような大規模土砂災害への備えを平常時から行うことは災害を軽減するためにも非常に重要である。本県における大規模土砂災害としては、明治 22 年、昭和 28 年、平成 23 年と約 60 年周期で発生しており、これは一生に一度程度遭遇する間隔である。このため、土砂災害に備えるためには、「過去の災害に学び・生かす」取り組みが大切であり、全国的な事例については井上 3) が調査を行っている。

本研究では、日高川町において昭和 28 年に発生した災害に関する写真、自然災害伝承碑、ヒアリングの成果を用いて講演することで、災害の教訓が聴講者に与える影響について検証を行ったので報告する。

2. 昭和 28 年水害の教訓伝承のための準備

昭和 28 年水害の教訓伝承を試みるにあたり、以下の調査を実施し成果をとりまとめた。

2.1. 昭和 28 年水害当時の写真と現在の比較

比較写真の撮影は、入手した当時の写真を基に、船津から川原河周辺エリアで実施した(図-1)。代表的な比較写真を写真-1~3 に示す。当時被災したところに家や道路が再建されているところが多い。

2.2. 自然災害伝承碑に関する調査

文献 2) , 住民への聞き取り調査に基づき現地を確認したところ、明治 22 年水害、昭和 28 年水害、平成 23 年紀伊半島大水害に関する伝承碑を確認できた。平成 23 年以降に建立された伝承碑の中には昭和 28 年と平成 23 年の 2 つ水位を示したものもあった。代表的なものを写真-4~7 に示す。

2.3. 当時の様子を知る住民へのヒアリング調査

昭和 28 年水害当時の様子を知る住民 2 人のヒアリング調査を実施した。

2.3.1. 弥谷の山津波に関する証言 (T 氏)

美山村史 3) によると、被害が大きかった弥谷地区では幅 150m 高さ 400m の山津波が発生し、人も家も田

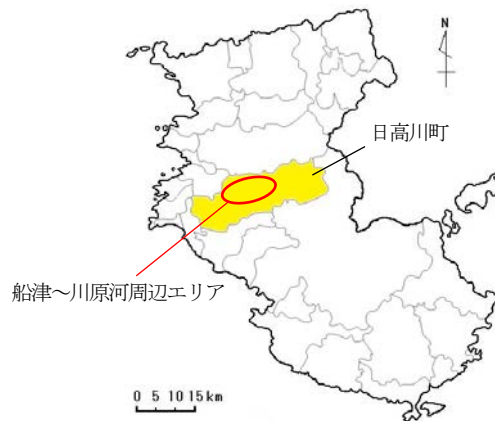


図-1 船津〜川原河周辺エリアの位置図。



写真-1 昭和 28 年水害当時の写真と現在の比較。日高川町船津地内。(左) S28 年水害時。(右) 2019. 12. 24 撮影。



写真-2 昭和 28 年水害当時の写真と現在の比較。日高川町船津地内。(左) S28 年水害時。(右) 2019. 12. 24 撮影。



写真-3 昭和 28 年水害当時の写真と現在の比較。日高川町原日浦地内。(左) S28 年水害時。(右) 2019. 12. 25 撮影。

畑のみ込んでしまった。この山津波で 23 戸が全滅、82 名が生き埋めになったとある。

今回、当時の様子を知る T 氏 (当時 24 歳) に慰霊碑の前でお話を聞いた(写真-8)。当日は、山津波(水

害) 昭和 28 年 7 月 18 日当時迄の弥谷部落のイラストマップをご持参頂いた。弥谷出身のデザイナーが作成し、裏側にはこの惨禍に関する作者の手記が貼付されている(写真-9)。ご同席頂いた弥谷区長の藤本憲一氏によると、弥谷地区ではこのイラストマップを災害教訓の伝承に活用している。

T 氏の主な証言は次のとおりである。

- ・山津波は複数回発生した。初回の山津波の後、偵察・救援に向かった T 氏の弟達が犠牲になった。
- ・対岸の人家は山津波の前に川の増水で流された。住人は増水前に裏山に避難し助かった。
- ・昭和 21 年昭和南海地震を境に、普段洗濯などに利用していた谷水が透明から米のとぎ汁の様な色に変わった。

2.3.2. 佐井地区における災害体験者の証言 (S 氏)

役場職員として昭和 28 年水害後の復旧業務に携わった経歴をお持ちの S 氏(当時高校生)の主な証言は次のとおりである(写真-10)。

- ・昭和 28 年水害当時、床下浸水した自宅の 2 階に避難していた。
- ・雨が強く降り始めたので、飼っていた牛の避難にかけ、その帰り道に家に着く頃には膝上まで水嵩が上がっていた。その後、米を運び出せと言われ、きつい作業をした。
- ・近所の 2 人は、対岸の田の様子を見に出かけ、その帰り道でつり橋を渡っている時に橋が壊れて流された。
- ・避難しようとは思わなかった。
- ・当時は、戦後の食糧難の時代であり、米、牛を避難させた。

3. 講演会における災害教訓の伝承とその効果の検証

講演会は、令和元年 5 月に完成した日高川町防災センターにおいて実施した(写真-11)。講演会では、昭和 28 年水害当時の写真と現在を比較した画像、自然災害伝承碑、昭和 28 年水害に関する証言により災害教訓の伝承を試みた。

昭和 28 年水害に関する講演内容について聴講者のアンケート調査を実施した結果、全体の 88% の人が災害に対する意識向上や避難の参考になったと回答した(図-2)。また、全体の 88% の人が、家族・友人など誰かに話したいと思うと回答した(図-3)。

4. おわりに

本研究では、昭和 28 年水害の被害実態、当時の警戒避難意識や行動実態を把握できた。昭和 28 年水害から 66 年が経過し、当時の様子を知る方々が高齢化しているが、貴重な画像・証言記録を収集できた。また、地域の災害教訓により講演会を実施した結果、警戒避難意識の向上、災害教訓の伝承について一定の効果が確認できた。地震の分野では歴史地震研究会⁴⁾が活動しているように、減災のため土砂災害の歴史を研究することも大切であると考える。

参考文献



写真-4 旧高津尾小学校南側の畔にある明治 22 年水害水位標。



写真-5 下阿田木神社階段横にある昭和 28 年水害水位標。



写真-6 高津尾バス停付近にある昭和 28 年水害水位標。



写真-7 坂野川集会場前に建てられた昭和 28 年水害と平成 23 年の水害 2 つの水位を示すモニュメント。



写真-8 弥谷の山津波に関するヒアリング状況。



写真-9 イラストマップの裏側に貼付された手記。



写真-10 昭和 28 年水害に関するヒアリング状況。



写真-11 講演会の様子。

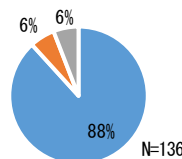


図 2. アンケート結果。昭和 28 年水害の講演内容について、災害に対する意識向上や避難の参考になったか。

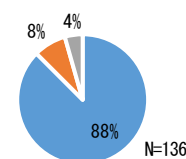


図 3. アンケート結果。昭和 28 年水害の講演内容について、家族・友人など誰かに話したいと思ったか。

- 1) 井上公夫：歴史的大規模土砂災害地点を歩く，丸源書店，2018。
- 2) 清水長一郎：日高路の石碑巡礼，御坊文化財研究会，1998。
- 3) 美山村史編纂委員会：美山村史通史編下巻，美山村，p1414，1997。
- 4) 磯田道史：天災から日本史を読みなおす，中公新書，2014。

人工衛星「しきさい」を活用した那智の滝上流域の水源涵養機能に関する研究

和歌山県土砂災害啓発センター

○崎山朋紀・宮崎徳生・榎原伴樹・岸畑宏宏・坂口隆紀

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

柴田俊・木下篤彦

株式会社パスコ

鈴木清敬

国土交通省国土技術政策総合研究所

鈴木大和・中谷洋明

1. はじめに

本研究の目的は、流域の流量を年間通して恒常的に安定させるための方策の検討に役立てるため、森林施業の有無が流域の水収支に及ぼす影響を把握することである。

既往文献^{1)から}、間伐等の森林施業は森林の水源涵養機能に影響を及ぼすことが推察される。また、流域の水文状態の把握に流域スケールを定期的に観測可能な人工衛星を活用できれば効率的であり、人の立ち入りが困難な場所でも対応できるなど利点がある。そこで本研究では、森林施業の有無と森林活性度や土壌水分量を示す衛星画像データの関係性を検討し、水源涵養機能を示す指標が得られるか検討を行う。さらに、それらの結果を用いて蒸発散量を推定するなどにより流域の水収支を算出し、森林施業の有無が流域の水収支に及ぼす影響を検討する。

今回、気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C)の取得データから算出した森林活性度と森林施業の関連性を検討したので報告する。

2. 調査方法

2.1. 調査地の概要

調査地は、和歌山県東牟婁郡那智勝浦町内にある那智の滝上流域である(図-1)。二級河川那智川(流域面積 24.5 km²、幹線流路延長約 8.5km)の上流部に位置し、流域面積は概ね 4.7 km²、地質は熊野酸性岩、植生の大部分はスギ・ヒノキ植林である。

2.2. 間伐の有無と森林活性度の関係性の検討

対象範囲を森林簿、造林施業履歴などを参考に、林班内の2017年間伐箇所内外と林班外(構造物及び植生を含む)の3つの領域に分割し、間伐の有無と森林活性度の関係性を検討した。森林活性度には正規化植生指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)を用いた。NDVIは次式から算出できる(式1)。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \dots (式1)$$

ここで、NIR(Near Infra-Red)は近赤外バンドであり、R(Red)は赤バンドである。

NDVIの算出には、GCOM-C(分解能 250m、画像取得周期 2~3日)の取得データ、プロダクト: Level-2、陸: 植生指数を用いた。比較のため、GCOM-Cよりメッシュサイズが小さいLandsat-8(分解能 30m、画像取得周期 16日)の取得データ(Band4(Red), Band5(NIR))を併用した。データの取得時期は2018年4月~2019年3月、画像枚数を表-1に示す。なお、被雲画像は対象外とした。

3. 調査結果と考察

3.1. GCOM-CとLandsat-8の比較(GCOM-C 1セル当たり)



図-1 調査地位置図。

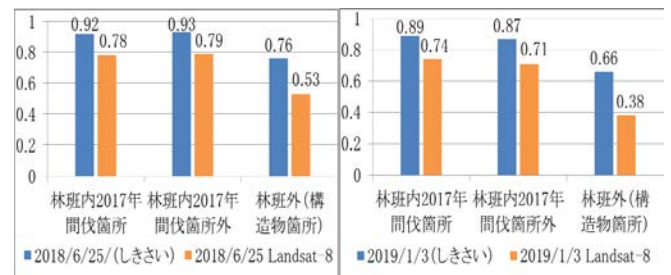


図-2 GCOM-CとLandsat-8の1セル当たりのNDVI平均値の比較。

衛星間の分解能等仕様の相違によるNDVI値への影響を把握するため、各領域においてGCOM-Cの1セルのNDVI値とそのセル内のLandsat-8のNDVI平均値を比較した(図-2)。その結果、林班内において、GCOM-Cと比較しLandsat-8のNDVI平均値が0.15程度低いことが確認された。これはメッシュサイズの違いによりLandsat-8は、山影や道等GCOM-Cでは分割できないNDVI値の低い箇所を観測するためだと考えられる。また、この傾向は夏季(2018年6月25日)と冬季(2019年1月3日)で大きな差がないことが確認された。林班外は植生以外の構造物を含むためNDVI値は低かった。

表-1 検討に使用した衛星画像枚数。

撮影月	GCOM-C	Landsat-8
2018.4月	5	1
2018.5月	2	1
2018.6月	2	1
2018.7月	2	0
2018.8月	5	0
2018.9月	0	0
2018.10月	3	0
2018.11月	6	0
2018.12月	5	0
2019.1月	12	2
2019.2月	6	1
2019.3月	8	1
合計	56	7

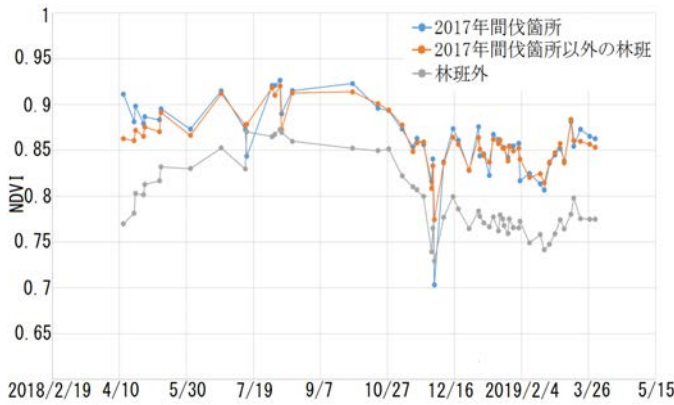


図-3 GCOM-C から算出した NDVI 平均値の経年変化

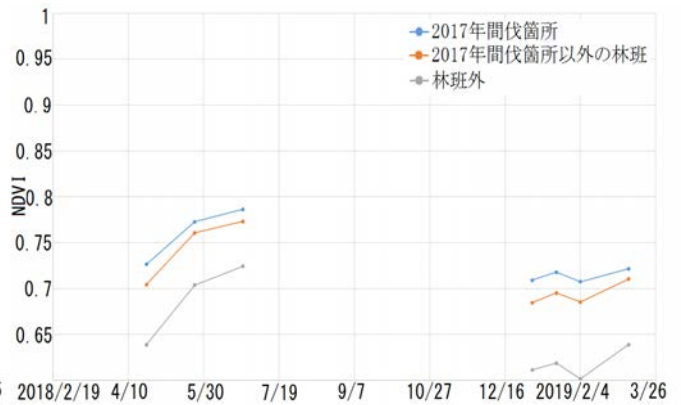


図-4 Landsat-8 から算出した NDVI 平均値の経年変化

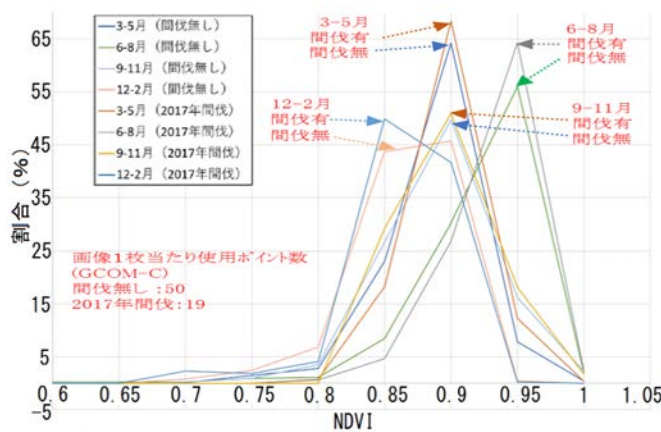


図-5 GCOM-C から算出した間伐の有無による NDVI のヒストグラムの比較図

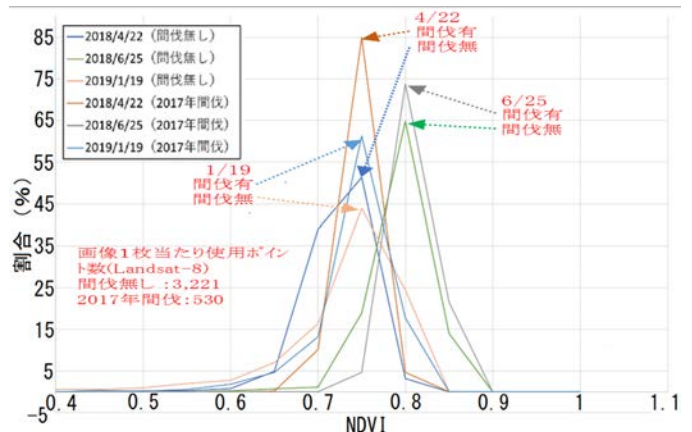


図-6 Landsat-8 から算出した間伐の有無による NDVI のヒストグラムの比較図

3.2. NDVI 平均値の経年変化の比較

各領域の NDVI 平均値の経年変化を比較した。その結果、GCOM-C を用いて算出した NDVI 平均値の経年変化では、林班内の 2017 年間伐箇所内外において大きな差が算出されなかった(図-3)。一方、Landsat-8 を用いて算出した NDVI 平均値の経年変化では、林班内の 2017 年間伐箇所内外において、GCOM-C と比較した場合、差があると考えられる。差は最大で 0.024 程度であり、2017 年間伐箇所内の方が高い値を示した(図-4)。また、各領域の GCOM-C の 1 セル当たりの NDVI 平均値の経年変化を比較したところ、両衛星ともに前述の結果と大きな差はなかった。

3.3. NDVI のヒストグラムの比較

林班内の 2017 年間伐箇所内外の NDVI をヒストグラムにより比較した。その結果、GCOM-C では、NDVI 値は夏季(6-8 月)に高く、冬季(12-2 月)に低いことが読み取れる。夏季に植生が活性化することが確認できた。また、図より間伐を行った範囲の方が間伐を行っていない範囲よりも森林の活性度が高い範囲が広いことが確認された(図-5)。一方 Landsat-8 では、NDVI 値は 4 月と 6 月は 1 月より高い。また、間伐を行った範囲の方が間伐を行っていない範囲よりも森林の活性度が高い範囲が広いことが示唆された(図-6)。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- ・「しきさい」を用いて算出した NDVI 平均値の経年変化では、2017 年間伐箇所内外の森林において大きな差が算出されなかった。

- ・Landsat-8 を用いて算出した NDVI 平均値の経年変化では、2017 年間伐箇所内外の森林において、「しきさい」と比較した場合、差があると考えられる。差は最大で 0.024 程度であり、間伐箇所内の方が高い値を示した。

- ・NDVI ヒストグラムの比較を行った結果、「しきさい」と Landsat-8 の両方で、間伐を行った範囲の方が間伐を行っていない範囲よりも森林の活性度が高い範囲が広いことが示唆された。

5. 今後の検討事項

森林活性度から那智の滝上流域の年間蒸発散量を推定し、これを用いて那智の滝上流域の水収支(降雨-流出-蒸発散の関係)を算出する。

参考文献

- 1) 川崎ら：強間伐施業が森林源流域の流出に及ぼす影響，水文・水資源学会 2017 年度研究発表会概要集，2017.
- 2) 篠原ら：スギ人工林における強度間伐が雨水配分に与える影響，水文・水資源学会 2013 年度研究発表会，2013.
- 3) 武田ら：間伐遅れの針葉樹人工林における水文流出の特徴とその長期変動，農業農村工学会論文集，No.263 pp.41-48，2009.
- 4) 小松：ヒノキ林における間伐区と無間伐区の遮断蒸発量の比較，九大演報，89，1-12，2008.
- 5) 小松：日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係，日林誌，89，pp.217-220，2007.

地質境界付近の水文挙動が表層崩壊の発生に与える影響

和歌山県土砂災害啓発センター

○榎原伴樹・筒井和男・崎山朋紀・岸畑明宏・坂口隆紀

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

木下篤彦・柴田俊

パンフィックコンサルタンツ株式会社

松澤真

北海道大学広域複合災害研究センター

田中健貴

1. はじめに

平成 23 年 9 月の台風 12 号に伴う豪雨により、和歌山県那智川流域では斜面崩壊や土石流が多発し、大きな被害を受けた¹⁾。那智川流域では堆積岩である熊野層群(砂岩泥岩互層)に熊野酸性岩(花崗斑岩)が貫入しており、特異な地質構造や水理構造が崩壊発生の原因となった可能性が報告されている²⁾。このような流域では従来の危険斜面評価手法³⁾では適正に評価されない恐れがある。これまで地質境界が存在する斜面での表層崩壊危険斜面の抽出手法を提案することを目的に、斜面の地下水の排水性と空中電磁探査の結果に着目した検討がなされている⁴⁾。また、崩壊のメカニズムを検討するための地質境界付近の表層土層内の水文挙動に関する検討は、観測期間が短く、十分にされていない。本研究では、表層土層内の水文観測結果と斜面の地下水位の観測結果を元に、表層崩壊危険斜面の特性の把握を行った。

2. 調査箇所と調査方法の概要

那智川流域の左岸支溪の平野川を対象として調査を行った。那智川流域では崩壊の多くが地質境界付近の熊野酸性岩分布域で発生しており⁵⁾、平野川もその特徴を有する。右岸側の崩壊が多数確認できる斜面(以下、崩壊斜面)においてテンシオメータ等による地質境界付近の表層土層内の水文挙動の観測を実施し、崩壊斜面および左岸側の崩壊の発生が確認できない斜面(以下、非崩壊斜面)のそれぞれにおいて地質境界を貫入した観測孔で斜面の地下水位の観測を行った。平野川流域の概要図と観測点を図-1、2に示す。

表層土層内の水文観測は、斜面上部から花崗斑岩分布域(TH-1)、地質境界付近(TH-2)、泥岩分布域(TH-3)の3箇所で行った。それぞれの観測点において図-3に示すようにテンシオメータと土壌水分計を表層土層の中間部(40cm)と下部(80cm)に、地下水位計を下部(80cm付近)に設置し観測を行った。また、地下水位の観測は、それぞれの観測点で、上位の花崗斑岩層に2深度、地質境界付近と下位の熊野層群の泥岩層にそれぞれ1深度の合計4深度で行った。

3. 調査結果

図-4に崩壊斜面および非崩壊斜面の地下水位の観測結果を示す。崩壊斜面では深度の異なる複数の地下水頭が確認され、非崩壊斜面と異なり浅層部の地下水観測孔において地下水位が上昇しやすい傾向が見られた。

図-5に表層土層内の水文観測結果の内、観測期間中の最大降雨イベント時(2019年10月17日~26日、総雨量629mm、最大時間雨量50mm/h)の結果を示す。全ての観測点で降雨に伴い体積含水率の上昇が確認できるが、地質境界付近のTH-2のみ最大29cm程度の地下水位が観測された。また、全間隙圧についてはTH-2では高くなっている期間が比較的長い傾向があることが確認できた。

上記の降雨イベントの降雨前とピーク時の観測結果を基に作成した、水理水頭線および水分フラックスの状況を図-6に示す。降雨イベント前は全層が不飽和の状態蒸発が生じているため水分フラックスは深部から地表面の方向となっている。一方、ピーク時には全層が飽和の状態となり、斜面の上方では上向きのフラックスが、斜面の下方では斜面と並行のフラックスが生じている状況が確認できた。このことから、斜面の下方では地表面に沿って斜面方向に流下しているが、斜面の上方では地質境界により地下水の動きが制御され、上向きの地下水の動きが発生している可能性が考えられる。

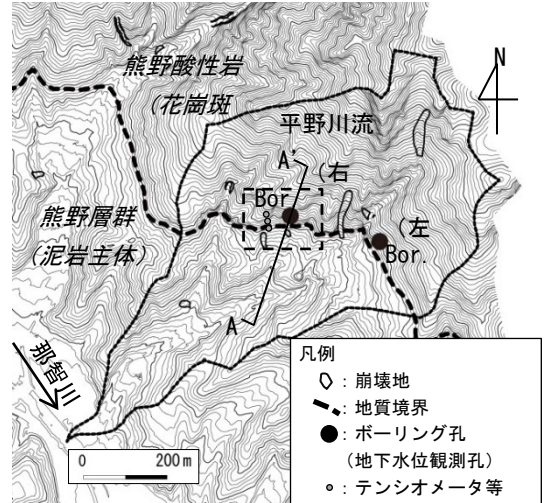


図-1 平野川流域の概要。四角(点線)で囲ったエリアは図-2に拡大図で示す。矢印は流向を表す。

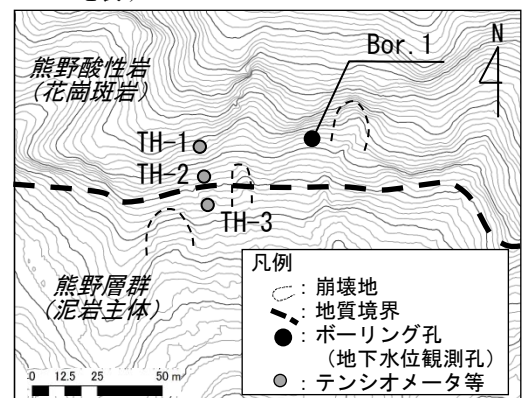


図-2 テンシオメータの配置図
(図-1 中四角で囲ったエリアの拡大図)

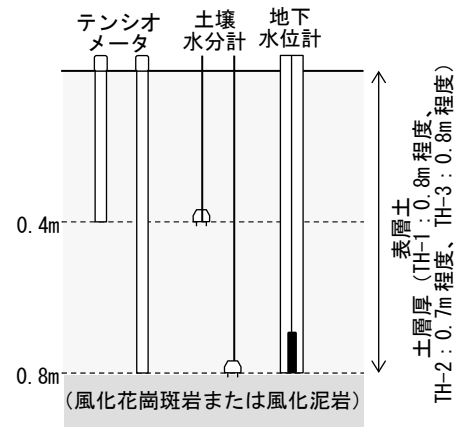


図-3 表層土層の観測機器設置概要図

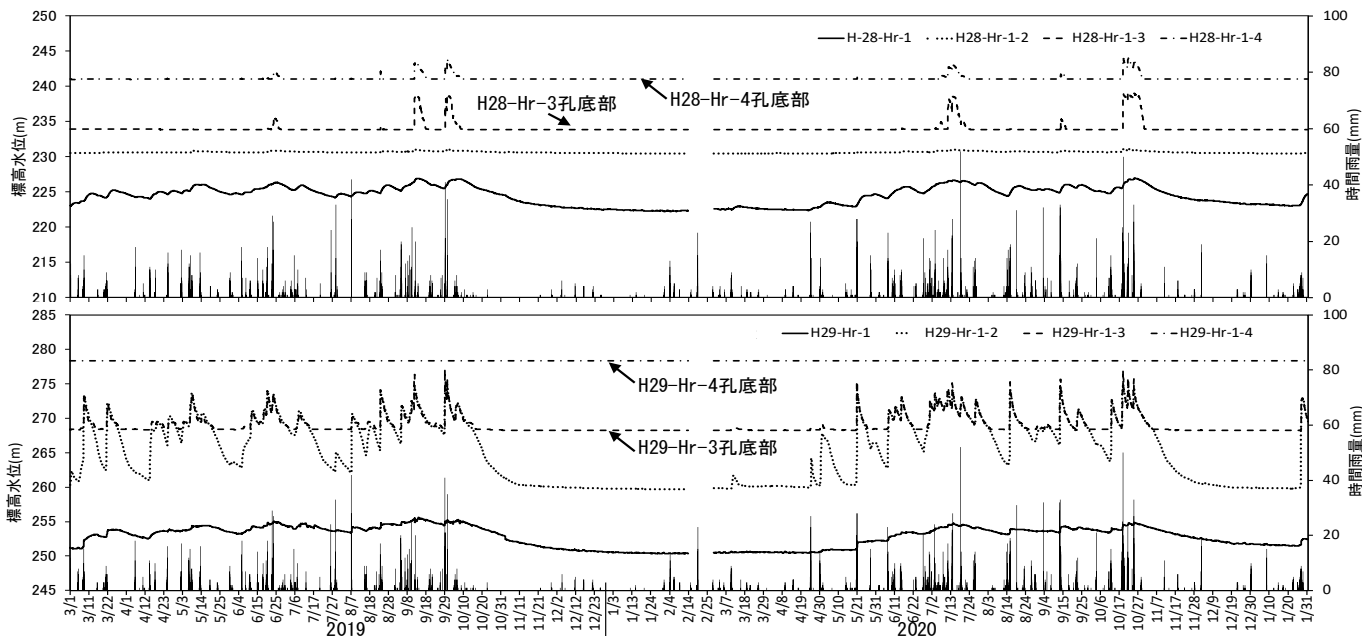


図-4 斜面地下水位観測結果（上：右岸崩壊斜面、下：左岸非崩壊斜面）

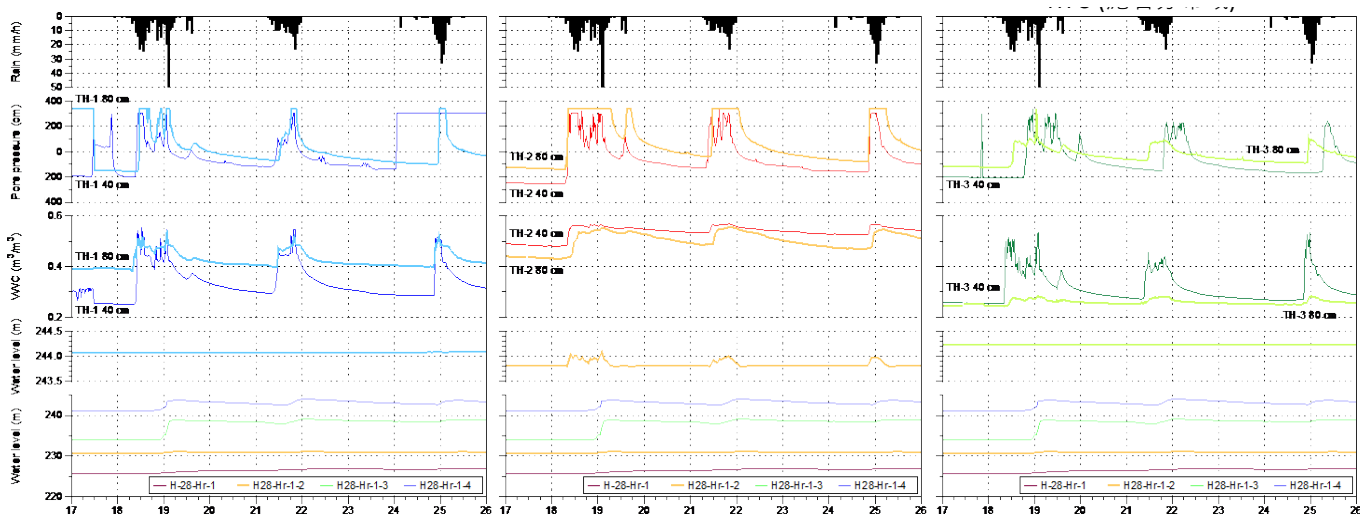


図-5 豪雨イベント時（2019年10月17日～26日）の各種水文観測結果の比較。上段から、時間雨量、全間隙圧、体積含水率、表層土層内地下水位、深層地下水位。

4. おわりに

本研究で得られた結果を下記に示す。

- ・崩壊斜面の表層土層内において、降雨の際に地質境界付近では斜面の方向と異なる上向きの水の動きが発生している可能性がある。
- ・斜面の地下水位の観測結果から、崩壊斜面では非崩壊斜面と比べて浅層部の地下水位が上がりやすい傾向がある。

これらのことが斜面崩壊の大きな原因になっていると考えられる。今後も観測を継続し、斜面崩壊を誘発する水文プロセスの把握に努めたい。

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，pp.43-53，2012。
- 2) 田村ら：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，砂防学会概要集，2013。
- 3) 独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム：表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル（案），土木研究所資料，2009。
- 4) 榎原ら：表層崩壊危険斜面における空中電磁探査解析と地下水位の変動に関する研究，第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.43-48，2018。
- 5) 千東ら：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，砂防学会概要集，2015。

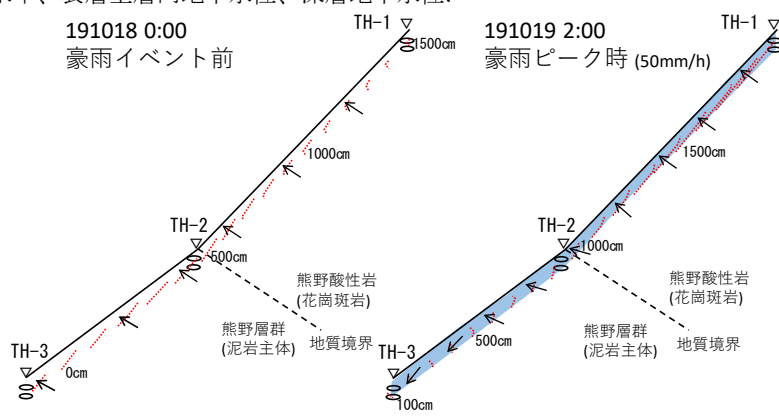


図-6 水理水頭線図（左：豪雨イベント前、右：ピーク時。赤破線は等ポテンシャル線、→はフラックスの方向、青色ハッチは飽和領域）

日置川水系、新宮川水系における放射性炭素年代測定結果を用いた深層崩壊発生頻度推定方法の検討

和歌山県土砂災害啓発センター
 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
 国土防災技術株式会社
 北海道大学広域複合災害研究センター

○岸畑明宏・坂口隆紀・崎山朋紀・榎原伴樹
 木下篤彦・柴田俊
 小川内良人・横山修
 田中健貴

1. はじめに

平成 23 年台風第 12 号での豪雨により、和歌山県の日置川水系、新宮川水系においては深層崩壊による被害が発生し、現在も熊野地区、三越地区で国土交通省による対策事業が行われている。両水系には、対策事業箇所と同じ古第三紀の付加体が分布しており、深層崩壊跡地が複数存在しているが、明治 22 年の水害以前の記録は少ない。近年の豪雨発生回数の増加に起因する土砂災害発生頻度増加が懸念されており、両水系における深層崩壊発生頻度を算定することは、深層崩壊発生リスクの評価や水系での砂防事業の計画策定を行う上で重要であり、明治 22 年以前の深層崩壊箇所においても放射性炭素年代測定を行うことで、文献調査が対象とする期間以前における深層崩壊発生年代を踏まえた深層崩壊発生頻度の評価を行う。

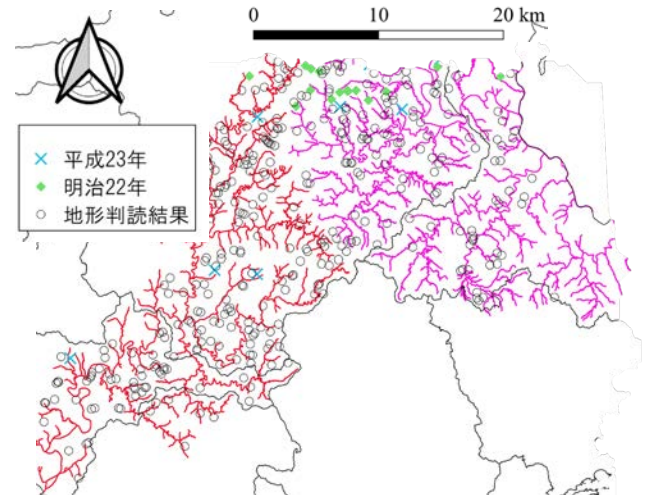


図-1 平成 23 年、明治 22 年、地形判読結果による崩壊跡地の分布

2. 調査対象地と年代測定箇所の設定と試料採取

2.1. 深層崩壊跡地の判読

対象範囲において航空レーザ測量データを用いて深層崩壊跡地の判読を行った。その際に、1889 年の明治十津川水害、2011 年の紀伊山地大水害の崩壊地については既往の崩壊跡地判読結果を用いた。また、新たにこれらの崩壊地を除外した上で対象範囲の地形判読を行い、その他の深層崩壊跡地を抽出した(図-1)。なお、判読基図には地形表現図(SL3DMap)を使用した。

2.2. 崩壊跡地の分類

既往文献²⁾から、斜面崩壊発生頻度が風化速度や土層成長速度の影響を受けることが示唆されており、本研究では滑落崖輪郭の明瞭さが崩壊跡地の風化・浸食・堆積作用の影響度に関連するものと想定し、崩壊跡地の滑落崖輪郭の明瞭さを判読結果である GIS データの属性(明瞭・不明瞭)として保存し、明瞭・不明瞭それぞれにおける崩壊年代推定を行った。

2.3. 放射性炭素年代測定対象箇所の設定と試料採取

放射性炭素年代測定の対象箇所には、年代測定用試料として炭化物、木片及び花粉のうちのいずれかが採取できる必要があり、試料が採取可能であることを示す崩壊跡地の状況としては、炭化物や木片では立木を含む崩壊土砂で、河道閉塞跡地の堆積物が、花粉については土壌中に含まれ、河道閉塞跡地の堆積物が望ましい。以上を考慮した上で、放射性炭素年代測定対象箇所を以下の 3 点から選定し、現地での試料採取を行った。

- ①崩壊土砂末端が開析され、露頭が確認できる。
- ②崩壊跡地の対岸に河道閉塞跡地が残っている。

③崩壊跡地の上流側に、河道閉塞時に堆積したと考えられる土砂が確認できる。

3. 放射性炭素年代測定方法

放射性炭素年代測定には AMS 法を採用し、IntCal13 データベース、OxCalv4.2 較正プログラムに基づく暦年較正年代を算定した³⁾⁴⁾。また、算定された暦年較正年代のうち 2σ 暦年較正年代の年代を参照し、その中で最古の年代と最新の年代の平均値を概略年代とし、これを崩壊発生の推定年代とした。なお、炭化物を漏れなく採取するために同一崩壊跡地で複数の試料を採取し、それぞれの概略年代を算定した場合には、近似した複数の測定年代がある範囲を対象とし、その上で、新しい方の年代を概略年代とした。

4. 放射性炭素年代測定結果

新宮川水系では、炭化物を採取できた 3 か所で放射性炭素年代測定を行った。そのうち 1 か所では、採取した炭化物が比較的近年に混入したものと判明した。その他 2 か所は滑落崖輪郭が明瞭な箇所で、AD 1,287 年～1,394 年、AD 1,670 年～1,888 年という分析結果であった。

一方、日置川流域においては、8 か所で放射性炭素年代測定を行い、そのうち 1 か所で採取した炭化物が近年に混入したものと判明した。また、滑落崖輪郭が明瞭な 6 か所では、BC 894 年～795 年、AD 1,416 年～1,449 年、AD 1,451 年～1,632 年、AD 1,680 年～1,763 年、AD 1,282 年～1,391 年、AD 1280 年～1389 年という分析結果で、滑落崖輪郭が不明瞭な 1 か所では、BC 23,612 年～23,176 年という分析結果であった(表-1)。これらを基に、各水系での滑落崖輪郭が明

水系	場所	明瞭さ	暦年較正年代	概略年代	AD 2000	AD 1500	AD 1000	AD 500	AD 0	BC 2000	BC 4000	BC 6000	BC 20000
新宮川	和歌山県田辺市本宮三越	明瞭	AD 1670 - 1888	1779									
	和歌山県田辺市本宮町静川	明瞭	Modern										
	和歌山県田辺市本宮町大瀬	明瞭	AD 1287 - 1394	1341									
日置川	和歌山県田辺市平瀬	明瞭	BC 894 - 795	845									
	和歌山県田辺市平瀬	明瞭	AD 1416 - 1449	1433									
	和歌山県田辺市平瀬	明瞭	AD 1451 - 1632	1542									
	和歌山県田辺市平瀬	明瞭	AD 1680 - 1763	1722									
	和歌山県田辺市合川	不明瞭	BC 23612 - 23176	23394									
	和歌山県西牟婁郡白浜町鹿野	明瞭	AD 1282 - 1391	1337									
	和歌山県西牟婁郡白浜町鹿野	明瞭	AD 1280 - 1389	1335									
	和歌山県西牟婁郡白浜町鹿野	明瞭	Modern										

1試料のみ 年代が重複する区間 採用した年代

表-1 新宮川、日置川水系における放射性炭素年代測定結果

瞭・不明瞭な場合の崩壊概略年代を、表のとおり選定し、新宮川水系の滑落崖輪郭が明瞭な箇所については崩壊概略年代がAD 1,341年、日置川水系の滑落崖輪郭が明瞭な箇所については、AD 1,335年、不明瞭な箇所については、BC 23,394年とした。また、新宮川水系の滑落崖輪郭が不明瞭な箇所については、放射性炭素年代測定結果が得られなかったものの、滑落崖輪郭が明瞭な箇所において両水系における崩壊概略年代が近接していたため、本研究では日置川水系と同じBC 23,394年を採用した。また、深層崩壊発生頻度は次式1に従って求めた。

$$F=Y/N \cdots (式1)$$

ただし、Fは深層崩壊発生頻度(年/回)を、Yは頻度推定対象期間(年)を、Nは対象期間における深層崩壊発生数(回)を示す。

また、各水系における1回あたりの深層崩壊発生面積を次式2に従って算定した(表-2)。

$$A=\sum A_i/N \cdots (式2)$$

ここでAは各水系での発生1回あたりの深層崩壊発生面積(ha)を、 $\sum A_i$ は頻度推定対象期間で発生した深層崩壊の面積総計(ha)を示す。

頻度推定対象期間Yは、放射性炭素年代測定結果から最古の崩壊概略年代である滑落崖輪郭が不明瞭な箇所のBC 23,394年からAD 2019年現在とした。深層崩壊発生数N及び面積総計 $\sum A_i$ は、平成23年、明治22年、地形判読結果に基づく深層崩壊発生箇所の抽出結果から別表の通り求めた。以上から、新宮川水系における深層崩壊発生頻度Fは157年、日置川水系においては110年と算定され、1回あたり深層崩壊発生面積は新宮川水系で3.2ha、日置川水系で3.7haと算定された。文献調査においては、深層崩壊に限定しなければ、AD 775年からAD 2,011年の間に27回の風水害による大災害が発生しており(表-3)、これは46年に一回の頻度に値し、深層崩壊の発生頻度はこの2~3分の1程度と推定された。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

・放射性炭素年代測定結果から滑落崖輪郭が明瞭・不明瞭な箇所における崩壊概略年代を推定した。

新宮川水系

発生年	深層崩壊面積 (ha)	深層崩壊発生数 (回)	備考
BC 23,394	274.2	73	地形判読箇所 滑落崖が不明瞭
AD 1,341	182.7	62	地形判読箇所 滑落崖が明瞭
AD 1,889	52.7	23	明治22年災害箇所
AD 2,011	13.2	4	平成23年災害箇所

$$\bigcirc \text{ 深層崩壊発生頻度 } F=(2,019 - 23,394)/(73+62+23+4)=157 (\text{回}/\text{年})$$

$$\bigcirc \text{ 1回あたり深層崩壊発生面積 } A=(274.2+182.7+52.7+13.2)/(73+62+23+4)=3.2 (\text{ha})$$

日置川水系

発生年	深層崩壊面積 (ha)	深層崩壊発生数 (回)	備考
BC 23,394	610.1	163	地形判読箇所 滑落崖が不明瞭
AD 1,335	210.6	63	地形判読箇所 滑落崖が明瞭
AD 1,889	6.3	3	明治22年災害箇所
AD 2,011	25.5	4	平成23年災害箇所

$$\bigcirc \text{ 深層崩壊発生頻度 } F=(2,019 - 23,394)/(163+63+3+4)=109 (\text{回}/\text{年})$$

$$\bigcirc \text{ 1回あたり深層崩壊発生面積 } A=(610.1+210.6+6.3+25.5)/(163+63+3+4)=3.7 (\text{ha})$$

表-2 新宮川、日置川水系における深層崩壊発生頻度の推定結果

・平成23年、明治22年の崩壊箇所と地形判読結果に基づく崩壊跡地の分布と崩壊概略年代から各水系の深層崩壊発生頻度と1回あたりの深層崩壊発生面積を求めた。

6. 今後の検討事項

両水系およびその周辺で今後実施される年代測定結果を用いて、今回の推定方法やその結果の精度向上を行いたい。

参考文献

- 1)小竹利明, 木下篤彦, 菅原寛明, 田中健貴, 小川内良人, 横山修, 藤原美波: 放射性炭素年代測定を利用した紀伊山地における深層崩壊発生頻度の調査方法について, 2019年度砂防学会研究発表会概要集, pp.189-190, 2019. 2)西山賢一, 若月強: 日本の山地斜面における豪雨に起因した斜面崩壊・土石流の発生頻度, 応用地質, 55, 第6号, pp.325-333, 2015. 3) Bronk Ramsey, C.: Bayesian analysis of radiocarbon dates, Radiocarbon 51(1), pp.337-360, 2009. 4) Reimer, P.J. et al.: IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP, Radiocarbon 55(4), pp.1869-1887, 2013.

和歌山県土砂災害啓発センターにおける防災教育の取り組みについて

和歌山県土砂災害啓発センター ○坂口隆紀・岸畑明宏・榎原伴樹・崎山朋紀
 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 柴田俊・木下篤彦

1. はじめに

和歌山県土砂災害啓発センター（以下、「センター」という。）では紀伊半島大水害から得た教訓を後世に継承する活動の一環として、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が取り組んでいる地域主導を目指した土砂災害に関する防災教育¹⁾³⁾に参画し、防災教育のノウハウを吸収し、現在はこれらを活用し、主に近隣の小学校と連携・協働して土砂災害に関する防災教育を行っている。

本報告では、センターが那智勝浦町内の小学校と協働して実施した令和元年度の授業の事例として、その実施計画から児童らによる成果発表まで一連の取組を紹介する。また、授業後の教員らの感想・意見を分析し、今後の土砂災害に関する防災教育の展開に向けて抽出した課題について報告する。

2. 那智勝浦町における土砂災害に関する防災授業の実施状況

センターは平成28年度から令和元年度まで、那智勝浦町内にある全小学校6校において土砂災害に関する防災授業を実施した（図-1）。

那智勝浦町教育委員会では防災教育において、学校などの主体が当事者意識を持って防災意識に携わること、組織的に防災教育を進めること、学んだことを発信することを重視している。

これら3点を踏まえ、土砂災害に関する防災授業の実施にあたっては、児童らが「自分ごととして考え・行動する。」ことを学習目標に取組を展開している。

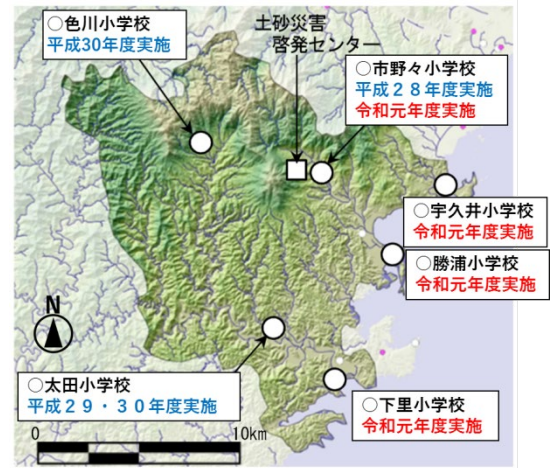


図-1 防災授業の実施状況（那智勝浦町）

3. 防災授業の計画と内容

センターは防災授業の計画段階において、児童たちの興味・関心を引き出すことを狙いに、実験・体験を多く組み入れた学習メニューを提案し、担当教員と打合せを進め学習メニューの組み合わせを決定する（図-2）。学習時間は現地見学（約30分）を含めて90～120分程度である。また、学習内容には専門用語が多く含まれるため、事前の教員との学習内容の事前打合せ、学校への啓発ビデオの提供の他、必要にあわせて担当教員らを対象とした土砂災害に関する基礎学習を行っている。


学習メニュー					
1	啓発ビデオ 	土砂災害に関する単語・用語に触れるDVD研修(約10分) ※事前研修にも利用	2	スライド 	土砂動態などの記録映像により土砂災害の基礎を学習(約30分～)
4	実験1 	土石流模型実験により透過・不透過えん堤の効果・仕組みを学習(約10分)	5	実験2 	花崗岩を実際に手で割って元々硬い岩でも脆くなることを体験して学習(約10分)
7	実験4 	噴霧器で模型に水(雨)をかけ扇状地は土石流が作った地形である事を学習(約10分)	8	実験5 	小型模型水路により、日ごろの川の状況や土石流は大きな石が先頭になり襲うことを学習(約10分)
10	クイズ研修 	○×ふだをもってクイズ形式で全員学習(約20分)	11	グループ研修 	学校区の警戒区域や砂防施設などの地理情報を用いた、避難路を考えるグループワーク(約40分)
12	実験(教科書に沿った学習) 	河川内への土砂のたい積→氾濫 	5年生理科「流れる水の働き」で学習する「しん食・運搬・たい積」を学習するとともに、紀伊半島大水害で発生した土砂・洪水氾濫の原因は学習した「たい積」が原因であること等を学び、授業内容と災害を関係づけて学習(約20分)		

図-2 学習内容

4. 防災授業への教員の感想・意見の整理と課題の抽出

令和元年度の防災授業後、教員に感想・意見を記入する用紙を配布し、11名から感想・意見を得た。これについて、那智勝浦町教育委員会の防災学習実施方針を主眼とした3点(①教員、児童、地域が当事者意識を持って取り組むことができる学習内容となっているか。②センター、教育委員会、学校が円滑に協働して防災教育を実施できているか。③児童が学んだ内容を自主的に発信できるような学習内容、体制となっているか。)から整理を行った。(表-1)

表-1 防災授業への教員の感想・意見

<p>①教員、児童、地域が当事者意識を持って取り組むことができる学習内容となっているか。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・映像やクイズ等もあって児童は興味をもって説明を聞いていた。大変分かりやすかった。 ・地域に関わる様々な資料を集めて頂き、子どもも分かりやすい。 ・40人以上いたので、実験は見えづらいのが残念。 ・自分ごととして捉えていくのが児童にとり難しい。子どもたちも、生まれる前の話なので、他人事のように感じている。 ・実験・砂防えん堤の見学、スライドを使っでの学習を約2時間、子どもたちの集中できる時間でちょうど良かった。工事現場見学はとても貴重な体験だった。映像で学習し、模型と現地見学で理解が深まる。実験や見学を一緒にやって頂けると子どもたちの興味関心上がる。
<p>②センター、教育委員会、学校が円滑に協働して防災教育を実施できているか。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・教科書に沿ったことに触れていただけなので大変分かりやすい。 ・事前の時間調整が良い。事前に打ち合わせがあるので学校のニーズにあった内容になっている。
<p>③児童が学んだ内容を自主的に発信できるような学習内容、体制となっているか。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・グループワーク等を用いて、発表する等、より深く考える場を設けるとさらに充実する。 ・子供が学んだことを生かせるか。 ・学校で学んだことをどう家庭や地域に広めていくかだと思ふ。
<p>④その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自分自身の土砂災害の知識が浅い。知識が少ない。

整理した感想・意見から①について、映像やクイズ、学校区の地理情報、現地見学を活用した授業内容は児童の主體的な学習につながるなどの意見があったが、一方で、センターで実験する際に面積の制限から集団で実験すると後ろから見ることになった児童が見づらいこと、紀伊半島大水害は児童が生まれる以前のため他人事のように感じてしまう、との課題が確認された。②については、教育内容が教科書に沿ったものであること、学校との打ち合わせによる授業時間割の調整が事前に行われていることで、円滑に防災教育を実施できているとの内容であった。③については、グループワーク等をより効果的に用いることで、児童が学習した内容をより積極的に地域へ発信できるようにするべきとの課題が確認された。最後に④その他の課題として、教員自身の知識不足により防災教育を学校が自主的に行うことが難しいとの課題が挙げられた。



図-3 市野々小学校での取り組み

5. 抽出された課題への対応事例

前章で抽出された課題について、小学校の取り組みで対応された事例(市野々小学校)について紹介、分析を行う。市野々小学校では学校独自の取組として、防災授業で学んだ事を地域へ発信し、学んだ知識を深めるため、保護者や地域住民を対象とした発表会を行っている(図-3)。

同小学校は、平成28年にセンターと協働して防災教育と啓発ビデオ制作に関わった経緯があり、教員がセンターで土砂災害に関する研修会を受講したり、教員が土砂災害に関する教材についての相談をセンターにしたりといったセンターと緊密な関係が構築されており、これらは前章の②の点についての協働体制の強化、④に関する課題の教員自身の知識の向上が図られている。また、土砂災害等に関してセンターが作成した教材等を用いて、児童達が協働して市野々地区について学んだ内容をとりまとめて発表するという総合学習を実施しており、③に関する課題であるグループワークや学んだことを発信する場を学校自ら構築している。

6. 最後に

本研究にご協力を頂いた那智勝浦町教育委員会、各小学校関係者に感謝するとともに、今回抽出された課題を参考に、より効果的な土砂災害に関する防災教育活動を行えるよう、今後も継続して取り組みを進めたい。また、センターの近隣に位置しない小学校へも同様の活動を広めていきたい。

参考文献

- 1) 犬丸ら：土砂災害に対する警戒避難意識向上に向けた教育コンテンツの検討，平成29年度砂防学会研究発表会概要集，pp.274-275，2017。
- 2) 吉村ら：土砂災害に対する警戒避難意識向上に向けた教育カリキュラムの検討，平成30年度砂防学会研究発表会概要集，pp.681-682，2018。
- 3) 小竹ら：土砂災害に関する防災教育の地域波及支援について，2019年度砂防学会研究発表会概要集，pp.749-750，2019。

和歌山県における山地災害教訓伝承の取組みについて

和歌山県土砂災害啓発センター
国土交通省国土技術政策総合研究所

○宮崎徳生・筒井和男・岸畑明宏・坂口隆紀
木下篤彦

1. はじめに

近年、集中豪雨や台風等による大規模な山地災害、土砂・洪水氾濫等が頻発し被害が甚大化している。和歌山県でも山地災害等が毎年発生しているが幸いにして被害はそれほど深刻ではない。

しかし、山地災害による土砂災害等から身を守るためには、平常時からの備えが大切であり、また、平成23年の紀伊半島大水害のような大規模災害については、当時の記録や教訓を後世に伝承し、防災意識の向上を図り被害の軽減に繋げることが重要である。

本県における過去の大規模山地災害としては、明治22年、昭和28年、平成23年と約60年周期で発生しており、これは一生に一度程度遭遇する間隔で発生している。山地災害による大規模な土砂災害等に備えるためには、「過去の災害に学び・生かす」取組みが大切である。このことから、本県では山地災害等の記憶を風化させず教訓を後世に伝承するため、平成29年から県内各地域で講演会を開催している。

本報告では、和歌山県日高川町で昭和28年に発生した大規模災害に関する写真、自然災害伝承碑、地域住民へのヒアリング成果を用いて講演会を開催することで、災害の記録及び教訓が聴講者に与える影響を検証したので報告する。

2. 昭和28年水害の教訓伝承のための準備

昭和28年水害の教訓伝承を試みるにあたり、以下の調査を実施し成果をとりまとめた。

2-1. 昭和28年水害当時の写真と現在を比較

比較写真の撮影は、入手した昭和28年水害当時の被災写真を基に、船津から川原河周辺エリアで実施した(図-1)。代表的な比較写真を写真-1, 2に示す。当時被災した場所には家や道路が再建されているところが多い。



図-1 船津～川原河周辺エリアの位置図。

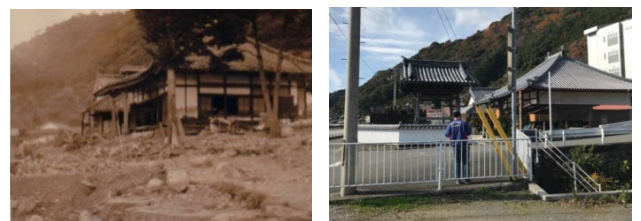


写真-1 昭和28年水害当時の写真と現在の比較。日高川町船津地内。(左)S28年水害時。(右)2019.12.24撮影。



写真-2 昭和28年水害当時の写真と現在の比較。日高川町原日浦地内。(左)S28年水害時。(右)2019.12.25撮影。



写真-3 下阿田木神社階段横にある昭和28年水害水位標。



写真-4 坂野川集会場前に建てられた昭和28年水害と平成23年の水害2つの水位を示すモニュメント。

2-2. 自然災害伝承碑に関する調査

住民への聞き取り調査等により現地を確認したところ、明治22年水害、昭和28年水害、平成23年紀伊半島大水害に関する伝承碑が確認できた。代表的なものを写真-3, 4に示す。

2-3. 当時の様子を知る住民へのヒアリング調査

美山村史によると、被害が大きかった弥谷地区では幅150m高さ400mの山津波が発生し、人も家も田畑のみ込んでしまった。この山津波で23戸が全滅、82名が生き埋めになったと記されている。

今回、当時の様子を知るT氏（当時24歳）に慰霊塔の前でお話を聞いた（写真-5）。当日は、昭和28年7月18日水害当時の弥谷集落のイラストマップをご持参頂いた。このイラストマップは弥谷出身のデザイナーが作成し、裏側にはこの惨禍に関する作者の手記が貼付されている（写真-6）。弥谷地区ではこのイラストマップを災害教訓の伝承に活用している。

なお、T氏の主な証言は次のとおりである。

- ・山津波は複数回発生した。初回の山津波の後、偵察及び救援に向かったT氏の弟達が犠牲になった。
- ・対岸の人家は山津波の前に川の増水で流された。住人は増水前に裏山に避難し助かった。
- ・昭和21年昭和南海地震を境に普段洗濯等に利用していた谷水が透明から米のとぎ汁の様な色に変わった。

3. 講演会における災害教訓の伝承とその効果の検証

講演会は、令和元年5月に完成した日高川町防災センターにおいて実施した（写真-7）。講演会では、昭和28年水害当時の写真と現在を比較した画像、自然災害伝承碑、昭和28年水害に関する証言を用いて災害教訓の伝承を試みた。

講演会后、昭和28年水害に関する講演内容について聴講者に行ったアンケート調査の結果は、全体の88%が災害に対する意識向上や避難



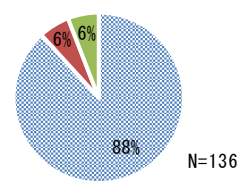
写真-5 慰霊塔の前で行った弥谷の山津波に関するヒアリング状況。



写真-6 イラストマップの裏側に貼付された手記。

写真-7 講演会の様子。

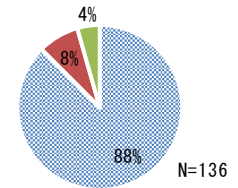
Q. 昭和28年水害の講演内容について、災害に対する意識向上や避難の参考になったか。



※とも・まあまあ参考になった
 ※あまり参考にならなかった・ならなかった
 ※無回答

図2. アンケート結果。

Q. 昭和28年水害の講演内容について、家族・友人など誰かに話したいと思ったか。



※思う ※思わない ※無回答

図3. アンケート結果。

の参考になったと回答が得られた（図-2）。また、全体の88%が講演内容を家族・友人など誰かに話したいと思うと回答した（図-3）。

4. おわりに

昭和28年水害から67年が経過し、当時の様子を知る地域の方々も高齢化しているが、貴重な画像・証言記録が収集でき、山地災害の被害実態、当時の警戒避難意識や行動実態を把握することができた。また、調査結果を基に講演会を開催した結果、防災意識の向上、災害教訓の伝承について一定の効果が確認できた。今後についても、過去の山地災害等の歴史や災害教訓を研究し、県内各地域に情報発信することで防災及び減災に繋げることが大切である。

人工衛星「しきさい」を活用した那智の滝上流域の 森林活性度と可能蒸発散量に関する研究

STUDY ON FOREST ACTIVITY AND POSSIBLE EVAPOTRANSPIRATION IN
THE UPPER REACHES OF THE NACHI GREAT WATERFALL USING AN
ARTIFICIAL SATELLITE "GCOM-C"

宮崎 徳生¹・筒井 和男¹・岸畑 明宏¹・坂口 隆紀¹

木下 篤彦²・柴田 俊²・鈴木 大和³・中谷 洋明³・鈴木 清敬⁴

Norio MIYAZAKI, Kazuo TSUTSUI, Akihiro KISHIHATA, Takaki SAKAGUCHI,
Atsuhiko KINOSHITA, Suguru SHIBATA, Yamato SUZUKI, Hiroaki NAKAYA and Kiyotaka SUZUKI

¹和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

E-mail: miyazaki_n0008@pref.wakayama.lg.jp

²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（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

³国土交通省国土技術政策総合研究所（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

⁴株式会社パスコ（〒153-0042 東京都目黒区青葉台3-10-1VORT 青葉台II2階）

Key Words: satellite image , forest activity , possible evapotranspiration

1. はじめに

平成23年台風12号の通過により、記録的な豪雨となった和歌山県那智川流域では、複数箇所ですり出しが発生し、下流域に甚大な被害をもたらされた。那智川流域の森林の多くは針葉樹の人工林であり、森林が有する多面的機能の維持のため適正な森林管理が求められているが、木材価格の低迷や林業就労者数の減少などにより、間伐等の森林施業が行われず放置された人工林も確認されている。放置された人工林では、過密による樹勢低下及び高齢林化等の影響で樹木の根系が衰弱し、森林の荒廃が進行することで森林活性度が低下し、森林の有する多面的機能のひとつに挙げられる土砂崩壊防止機能に影響を及ぼすことが懸念される。

また、森林施業は流域内の水分状態に影響を及ぼすことも推察され^{1)~5)}、流域内の森林状況を把握する際に広域を定期的に観測可能な人工衛星画像を活

用できれば効率的であり、人の立ち入りが困難な場所でも対応できるなど利点がある。

本研究では、気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C)の画像データを活用し、森林施業の有無による森林活性度や可能蒸発散量を推定するとともに流域内の水収支の評価と併せ森林活性度による土砂災害防止機能への影響を考察したので報告する。

2. 調査地と調査方法の概要

2.1. 調査地の概要

調査地は、和歌山県東牟婁郡那智勝浦町内にある那智の滝上流域である(図-1)。二級河川那智川(流域面積24.5km²、幹線流路延長約8.5km)の上流部に位置し、流域面積は概ね4.7km²、地質は熊野酸性岩、植生の大部分はスギ・ヒノキ植林である。

2.2. 間伐の有無と森林活性度の関係性の検討

対象範囲を森林簿、造林施業履歴(図-2)などを参考に、林班内の2017年間伐箇所内外と林班外(構造

物及び植生を含む) の3つの領域に分割し、間伐の有無と森林活性度の関係性を検討した。森林活性度には代表的な植生指標とされている正規化植生指数 (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) を用いた。一般的にはNDVIの値が大きいほど森林活性度が高いと言われている¹⁰⁾。NDVIは次式から算出できる(式1)。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \dots (式1)$$

ここで、NIR(Near Infra-Red)は近赤外バンドであり、R(Red)は赤バンドである。

NDVIの算出には、GCOM-C(分解能250m、画像取得周期2~3日)の取得データ、プロダクト:Level-2、陸:植生指数を用いた(図-3)。比較のため、GCOM-Cよりメッシュサイズが小さいLandsat-8(分解能30m、画像取得周期16日)の取得データ(Band4(Red)、Band5(NIR))を併用した(図-4)。

被雲画像を除いて解析を実施した。解析画像枚数を表-1に示す。衛星間における分解能の相違を把握するため、2017年間伐箇所内外と林班外(構造物及び植生を含む)で1セル当たりのNDVI値を比較した(図-5~図-10)。

撮影月	GCOM-C	Landsat-8
2018.4月	5	1
2018.5月	2	1
2018.6月	2	1
2018.7月	2	0
2018.8月	5	0
2018.9月	0	0
2018.10月	3	0
2018.11月	6	0
2018.12月	5	0
2019.1月	12	2
2019.2月	6	1
2019.3月	8	1
合計	56	7



図-1 調査地位置図

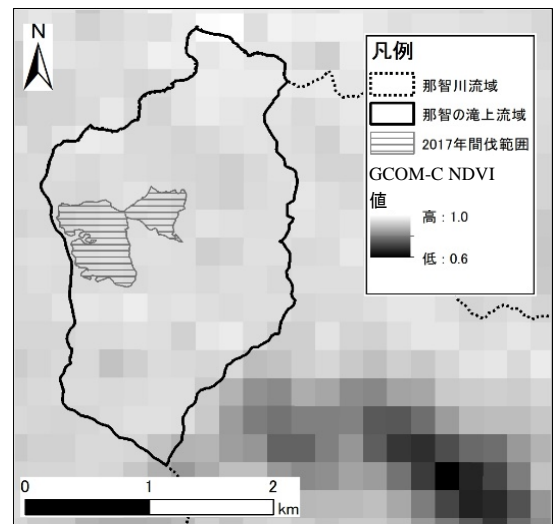


図-3 GCOM-Cを用いたNDVI算出値例

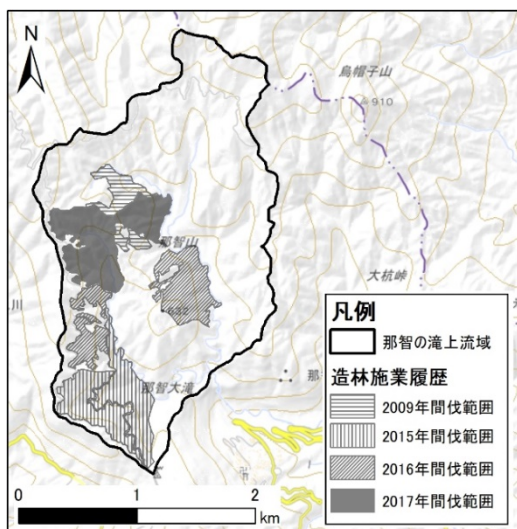


図-2 造林施業履歴図

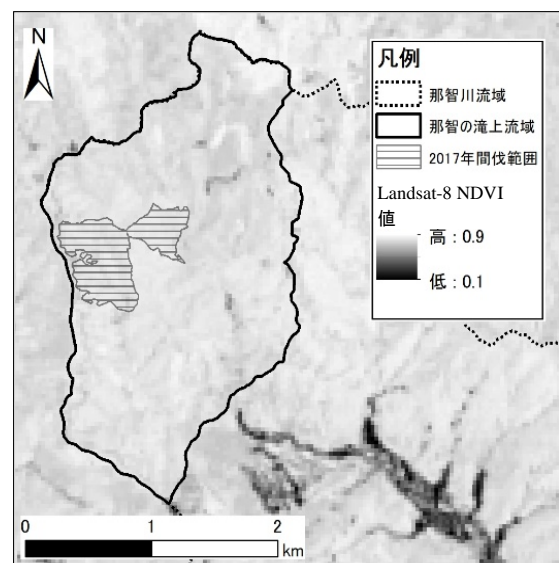


図-4 Landsat-8を用いたNDVI算出値例

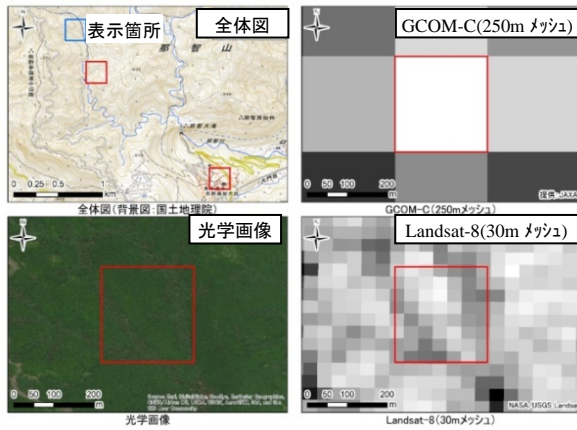


図-5 2018/6/25 間伐箇所 1セル当たり NDVI 値

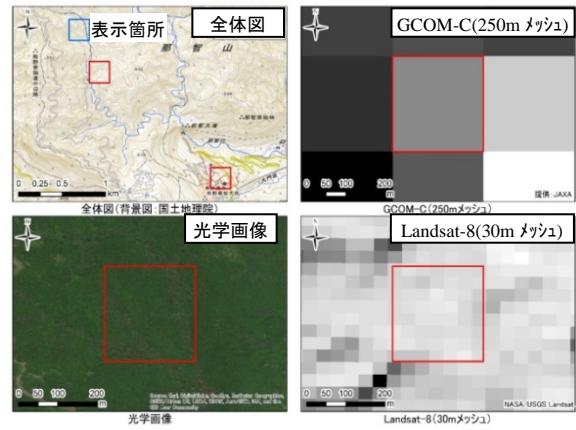


図-6 2019/1/3 間伐箇所 1セル当たり NDVI 値

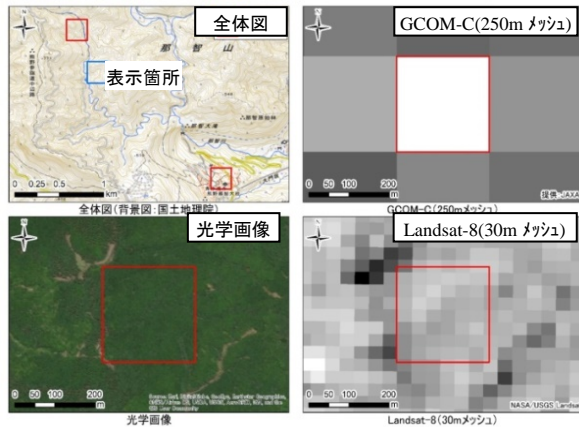


図-7 2018/6/25 間伐箇所外 1セル当たり NDVI 値

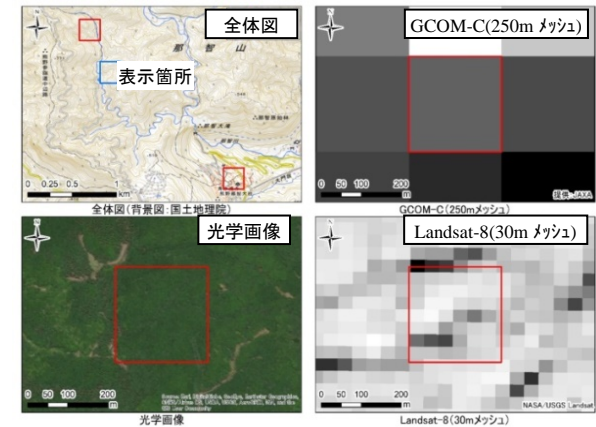


図-8 2019/1/3 間伐箇所外 1セル当たり NDVI 値

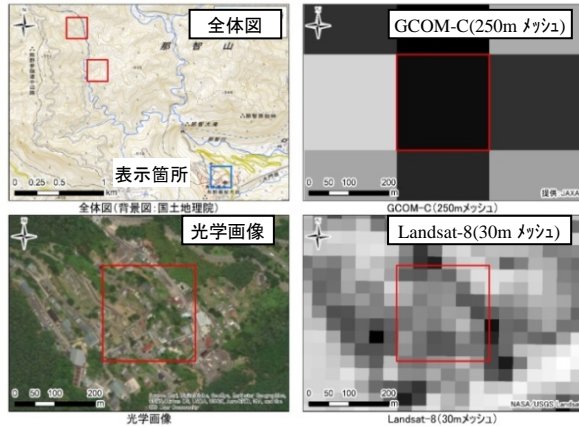


図-9 2018/6/25 林班外 1セル当たり NDVI 値

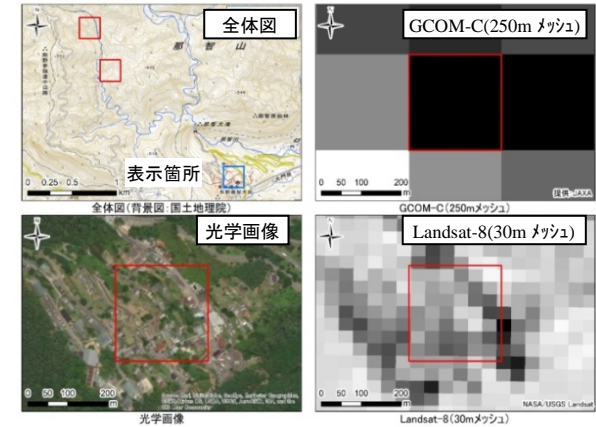


図-10 2019/1/3 林班外 1セル当たり NDVI 値

2. 3. 那智川流域における蒸発散量の検討

雨量と流量の観測結果を基に、総雨量から総流出量を差し引いた残りを蒸発散量として算出することを考えた。しかし、検討の結果、流量の観測結果の信頼性が低いと考えられた。そのため、代替案として容易に入手できるデータから月単位で可能蒸発散量が推定できるゾンスウェイト法^{6) 8)}を適用し、那智川流域における蒸発散量を推定することとした。

ゾンスウェイト法は、式2~5で表される。

ここで、 PE_i は可能蒸発散量 (mm)、 d は補正項 (月の日数 $days$ と平均日長時間 $daytime$)、 a は係数、

$$PE_i = 16d \left(\frac{10t_i}{I} \right)^a \dots (式 2)$$

$$a = 0.49239 + 0.01792I - 0.0000771I^2 + 0.000000675I^3 \dots (式 3)$$

$$d = \frac{days * daytime}{360} \dots (式 4)$$

$$I = \sum_{Jan}^{Dec} \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1.514} \dots (式 5)$$

T_i は月平均気温(°C)ただし $t_i \leq 0$ の場合は $PE_i = 0$,
 I は熱指数である. 当該調査地に最も近い気象庁「新宮」観測所の過去10年間の平均気温データを基に2010~2019年の可能蒸発散量を推定した.

3. 調査結果と考察

3.1. 衛星画像におけるNDVI値の比較

3.1.1. GCOM-CとLandsat-8の比較(GCOM-C 1セル当たり)

衛星間の分解能等仕様の相違によるNDVI値への影響を把握するため, 2017年間伐箇所内外と林班外(構造物及び植生を含む)の3箇所でGCOM-Cの1セルのNDVI値とそのセル内のLandsat-8のNDVI平均値を比較した(図-11). その結果, 林班内において, GCOM-Cと比較しLandsat-8のNDVI平均値が0.15程度低いことが確認された. これはメッシュサイズの違いによる, すなわちLandsat-8は, メッシュサイズが小さいため, 山影や道等のNDVI値の低い箇所の値を取得できる. 一方で, GCOM-Cではメッシュサイズが大きいため, 山影や道等のNDVI値の低い箇所の値を取得できないためだと考えられる. また, この傾向は夏季(2018年6月25日)と

冬季(2019年1月3日)で大きな差がないことが確認された. 林班外は植生以外の構造物を含むためNDVI値は低かった.

3.1.2. NDVI平均値の経年変化の比較

那智の滝上流域におけるGCOM-C及びLandsat-8にて取得したNDVI値の平均値の経年変化を比較した. その結果, GCOM-Cを用いて算出したNDVI平均値の経年変化では, 林班内の2017年間伐箇所内外において明瞭な差は確認できなかった(図-12). 一方, Landsat-8を用いて算出したNDVI平均値の経年変化では, 林班内の2017年間伐箇所内外において, 比較的明瞭な差があると考えられ, 2017年間伐箇所

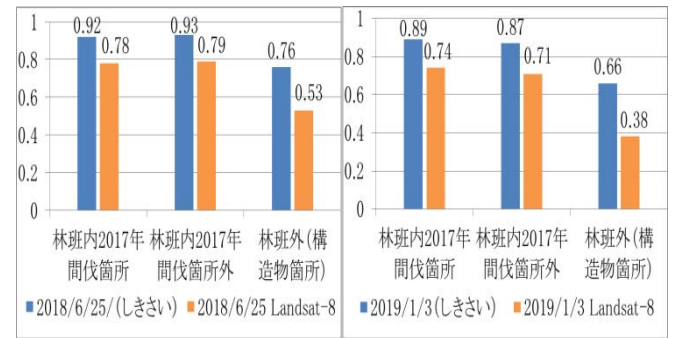


図-11 GCOM-CとLandsat-8の1セル当たりのNDVI平均値の比較

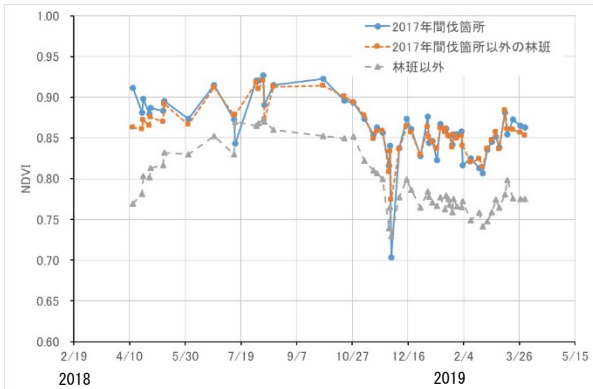


図-12 GCOM-Cから算出したNDVI平均値の経年変化

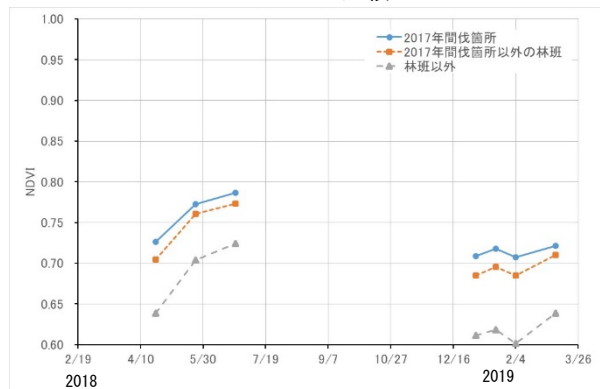


図-13 Landsat-8から算出したNDVI平均値の経年変化

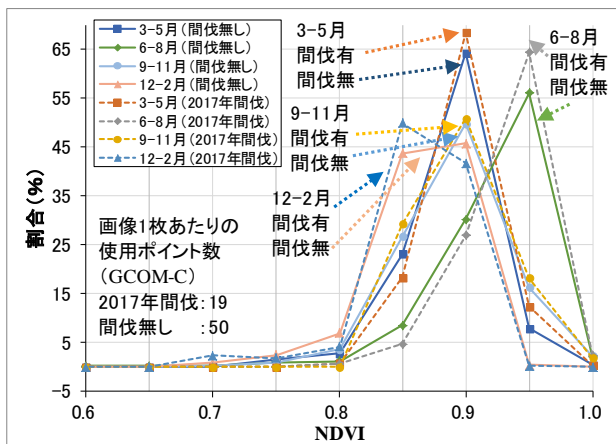


図-14 GCOM-Cから算出した間伐の有無によるNDVIのヒストグラムの比較図

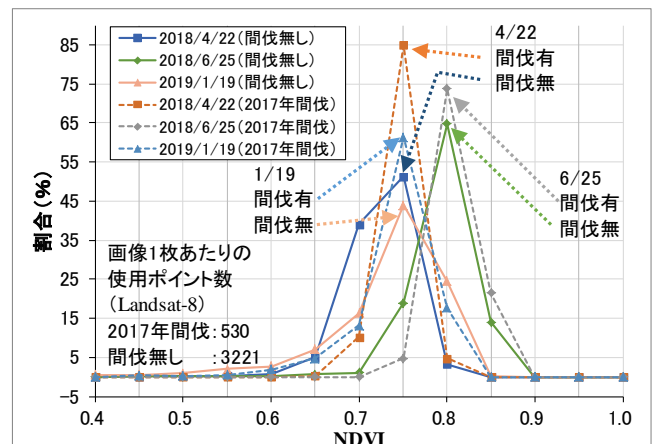


図-15 Landsat-8から算出した間伐の有無によるNDVIのヒストグラムの比較図

内の方が最大で0.024程度高い値を示し、間伐箇所の方が森林活性度は高いと考えられる(図-13)。また、各領域の代表的と思われる1セルのNDVI値の経年変化を確認したところ、GCOM-C及びLandsat-8ともに前述の平均値の比較結果と同様の傾向を示した。

3. 1. 3. NDVI 値のヒストグラムによる比較

林班内の2017年間伐箇所内外のNDVI平均値の経年変化をヒストグラムにより比較した結果、

GCOM-Cでは、夏季(6-8月)にNDVI値が高く、冬季(12-2月)に低いことが読み取れる。夏季に植生が活性化することが確認できた。また、図より間伐を行った範囲の方が間伐を行っていない範囲よりも森林の活性度が高い範囲が広いことが確認された(図-14)。一方、Landsat-8では、NDVI値は4月と6月は1月より高い。また、間伐を行った範囲の方が間伐を行っていない範囲よりも森林の活性度が高い範囲が広いことが示唆された(図-15)。

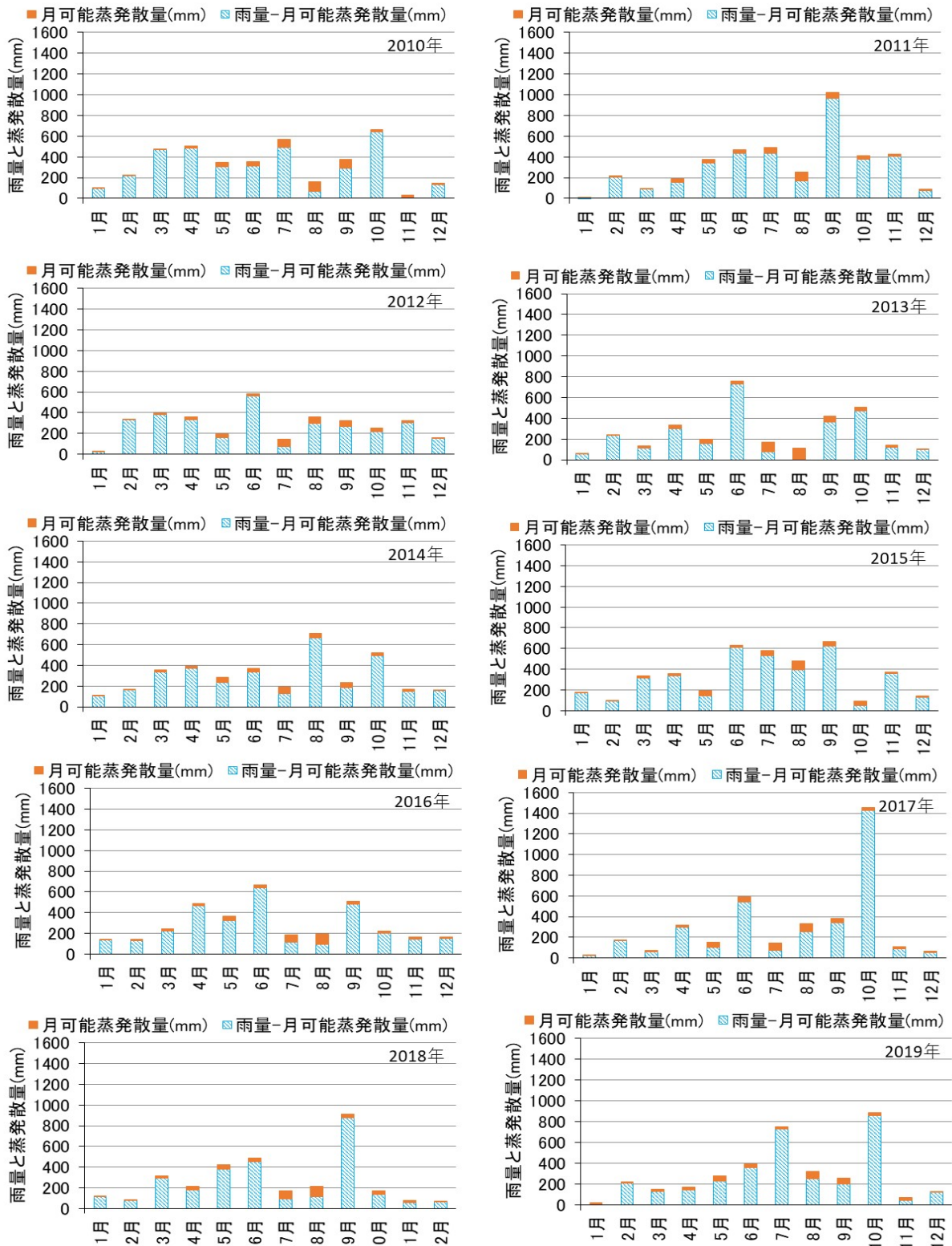


図-16 新宮観測所における降雨量と可能蒸発散量の関係

3. 2. ソーンズウェイト法による可能蒸発散量の推定

新宮観測所の2010～2019年の10年間の観測結果を用いて、年可能蒸発散量を算出すると、年間降雨量は3,144mm～4,128mmの幅があり、その平均値は3,669mmであった。

年間可能蒸発散量は893mm～955mmの幅があり、その平均値は926mmであった。そのため降雨量から可能蒸発散量を差し引いた分が水収支における流出分と推測され、2,204mm～3,213mmの幅があり、その平均値は2,744mmであった。

また、降雨量に占める可能蒸発散量の割合は、22.2～29.9%の幅があり、その平均値は25.4%で、年間可能蒸発散量は夏季に高く冬季に低い傾向が確認された(図-16)。

日本の代表的な水文観測試験地における水収支⁹⁾では、那智の滝上流から最も近く気候的にもほぼ同程度と考えられる三重県ぬたの谷流域における観測結果より蒸発散率が概ね30%程度と算出されており、新宮観測所の観測値からソーンズウェイト法で算出した年間可能蒸発散量の平均値25.4%は、概ね妥当な値であると判断する。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) GCOM-Cを用いて算出したNDVI値の平均値の経年変化では、2017年間伐箇所内外の森林において明瞭な差は確認できなかった。
- 2) Landsat-8を用いて算出したNDVI値の平均値の経年変化では、2017年間伐箇所内の方が最大で0.024程度高い値を示し、間伐箇所の方が森林活性度は高いと考えられる。
- 3) 一方、各メッシュのNDVI値をヒストグラムにより比較した結果、GCOM-CとLandsat-8ともに、間伐を行った範囲の方が間伐を行っていない範囲よりも森林の活性度が高い範囲が広いことが示唆され、土砂崩壊防止機能は維持されていると考えられる。
- 4) 水収支における可能蒸発散量をソーンズウェイト法で算出した値は、那智の滝上流域と気候的に近いと考えられる。ぬたの谷流域において観測された水収支の割合と概ね同程度の値であった。

5. 今後の課題

- 1) 多田ら¹⁰⁾のNDVI値を用いた蒸発散量の算出手法(図-17)を適用し、各ピクセルのNDVI値から蒸発散量の算出を行い、ソーンズウェイト法の算出値と比較し、那智の滝上流域におけるNDVI値と可能蒸

発散量の関係式を検討し、水収支の評価を検討する。
2) ソーンズウェイト法の式に代入する月平均気温に、当該調査地のGCOM-Cで観測した地表面温度の代用を検討し、森林施業の有無による年間可能蒸発散量の比較を行い、那智の滝上流域の水収支(降雨-流出-蒸発散の関係)関係性を検証する。

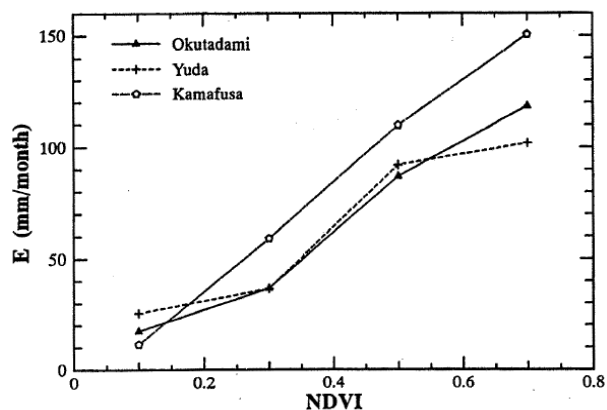


図-17 NDVI (横軸) と蒸発散量(縦軸) との関係

参考文献

- 1) 川崎正俊ら：強間伐施業が森林源流域の流出に及ぼす響、水文・水資源学会2017年度研究発表会概要集、2017。
- 2) 篠原慶規ら：スギ人工林における強度間伐が雨水配分に与える影響、水文・水資源学会2013年度研究発表会、2013。
- 3) 武田育郎ら：間伐遅れの針葉樹人工林における水文流出の特徴とその長期変動、農業農村工学会論文集、No. 263, pp. 41-48, 2009。
- 4) 小松光：ヒノキ林における間伐区と無間伐区との遮断蒸発量の比較、九大演報、89, 1-12, 2008。
- 5) 小松光：日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係、日林誌、89, pp. 217-220, 2007。
- 6) Thornthwaite, C. W. : An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., 38, pp. 55-94, 1948。
- 7) 沼尻治樹：月平均気温と昼の長さを用いた月可能蒸発散量推定法、法政大学情報メディア教育研究センター研究報告、Vol. 28, pp. 70-74, 2014。
- 8) 野上道夫：暖かさの指数と流域蒸発散量 - 気候値メッシュデータによる解析 -, 地学雑誌, 99-6, pp. 144-156, 1990。
- 9) 鈴木清敬：山地小流域における水収支特性の経年変化、名古屋大学大学院生命農学研究科修士論文, pp. 159, 2004。
- 10) 多田毅ら：NDVIを用いた蒸発散分布推定、水工学論文集、第38巻、p. 155-160, 1994。

(2020. 7. 1 受理)

水路実験による土砂移動時の地盤振動の スペクトルと距離減衰に関する考察

A MODEL STUDY ON SPECTRUM AND DISTANCE ATTENUATION OF GROUND
VIBRATION BY MOVEMENT OF A LARGE MASS

筒井 和男¹・坂口 隆紀¹・海原 荘一²・谷田 佑太²・木下 篤彦³・柴田 俊⁴
金澤 瑛⁵・中谷 洋明⁵・里深 好文⁶・藤本 将光⁶

Kazuo TSUTSUI, Takaki SAKAGUCHI, Soichi KAIHARA, Yuta TANIDA,
Atsuhiko KINOSHITA, Suguru SHIBATA, Akito KANAZAWA, Hiroaki NAKAYA,
Yoshifumi SATOFUKA and Masamitsu FUJIMOTO

¹和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6）

E-mail: tsutsui_k0002@pref.wakayama.lg.jp

²株式会社エイト日本技術開発（〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町3丁目1-21）

³国土交通省国土技術政策総合研究所（近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター）

（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6）

⁴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

（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6）

⁵国土交通省国土技術政策総合研究所（〒6305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

⁶立命館大学理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-7-1）

Key Words: flume experiment, Seismic characteristics, fourier spectrum, distance attenuation

1. はじめに

山間部で発生する深層崩壊等の大規模土砂移動は、天然ダムを形成し、豪雨時には越流により下流で氾濫被害を生じる可能性があり、従来から検知手法が数多く考案されている。その中で準リアルタイムでの広域監視を対象としたものとして、斜面崩壊に伴い発生する地盤振動を高感度地震観測網で検知する手法がある。

国内には、人間に感じられない非常に小さな地震による揺れを観測するための高感度な地震観測網である防災科学技術研究所の Hi-net¹⁾や広帯域地震計による観測網 F-net²⁾、国土交通省の大規模土砂移動検知システムの観測網が整備されており、2001年3月に岡山県総社市の斜面崩壊で、この崩壊によると思われる地震動が Hi-net の観測点で記録されている³⁾。また、大角らの研究⁴⁾では Hi-net データを解析し2004年8月に奈良県大塔村で発生した斜面崩壊の発生箇所をエンベロープ解析により推定できることが示されている。高原らの研究⁵⁾では2014年の赤谷地

区再崩壊時の Hi-net と国土交通省の観測局のデータから 1~7Hz 帯の振動波形と監視カメラによる土砂移動プロセスとの比較を行い、崩壊土砂が斜面を流下する際の振幅の増大は小さく、崩壊土砂が対岸に衝突し始めたときに振幅が大きくなっていることが明らかとなっている。他にも土砂移動時の地盤振動特性に関する過去の研究では、土石流に起因する地盤振動では 20~40Hz の高周波、深層崩壊に伴う土砂移動では 1~3Hz 程度の低周波が卓越して観測されることが報告されている^{例えば 6)}。高原らの研究⁵⁾では 2011 年の赤谷地区の崩壊土砂中に破碎されていない岩塊が含まれ⁷⁾、その岩塊層の移動により 0.01~0.1Hz の低周波が発生し、土砂が対岸に衝突する際に 1~7Hz の低周波成分が増大することが明らかになっているが、低周波成分の発生原因は十分には解明されていない。一方、海原ら⁸⁾は 2016 年 11 月の長崎県雲仙普賢岳での斜面崩壊時に離隔距離約 1.5km の非常に近接した観測局で 1~20Hz の広い周波数帯で地盤振動が発生していたことを報告している。地盤振動の減衰は高周波成分ほど大きくなるた

め、崩壊箇所から離れた観測点では高周波成分が観測できないと考えられるが、地盤振動の距離減衰について明らかにし、その周波数特性を明らかにすることは地盤振動による斜面崩壊の検知において重要である。

上記のように地盤振動により大規模土砂移動を検知し、その発生箇所の推定やその移動プロセスもある程度推測できることが示されているが、地震のような自然現象、発破や交通振動のノイズ等の人工的な現象も地盤振動を発生させることから、大規模土砂移動のみを正確に検知できる十分な知見は得られていない。しかし、大規模土砂移動の発生頻度は低く、発生場所が事前に特定できないことから、映像によりその過程を詳細に捉えることは非常に困難である。そのため、土砂移動による地盤振動を室内の水路実験で発生させ、これまで観測観察でのみ検討されてきた実現象時の地盤振動の主要な特徴との比較や、地盤振動の距離減衰について考察を行った。

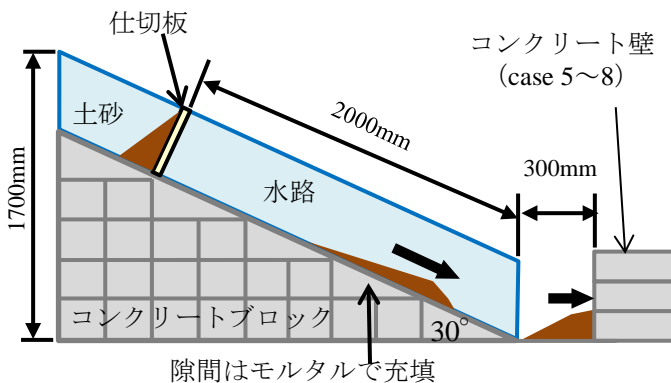


図-1 実験水路の模式図

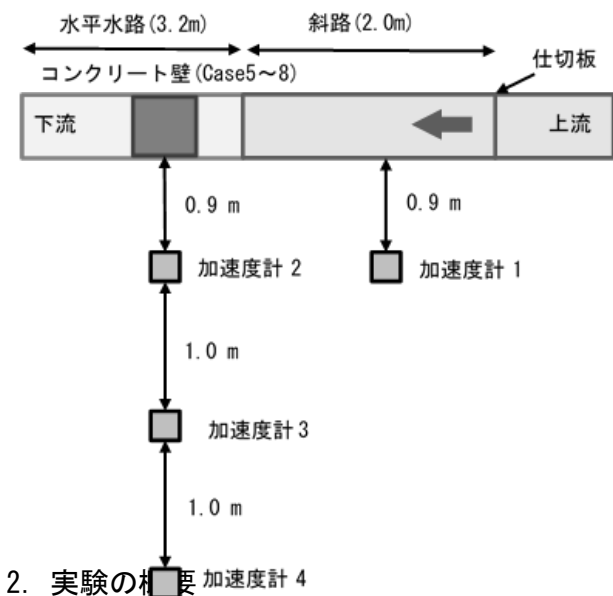


図-2 加速度計配置図

模型実験による振動、変位などの相似則を検討した事例^{例えぼ9)}はあるが、今回の水路実験では土砂移動の規模に限界があり起振力が限られたものとなる。検討対象とする実現象が深層崩壊ということもあり、現地の崩壊と実験では力の縮尺が極めて小さな値になること、伝播する地盤も現地では表層が土砂、深層が岩盤、実験では表層がコンクリート、下部は土砂地盤と媒体が異なること、また現地観測では発生箇所と観測局の距離が遠方のため実体波となるが、室内実験では振動発生箇所からの距離が近く表面波となる等その環境は大きく異なる。振幅等の特定の要因に着目した相似則を満たしていないことには注意が必要であるが、定性的な振動特性の確認はできると考えている。なお崩壊規模の振幅を求めるには、媒体の影響を含めて検討できる数値解析の方が有利と考えられる。

実験用水路は図-1に示すように斜面に見立てた斜路および河床に相当する水平水路である。縮尺規模は実現象の200分の1程度で、土砂が水路移動時に発生する振動を直接床に伝えるため、水路の基礎はコンクリートブロックを階段状に積み、その上にアクリル製水路を設置し、水路とブロックの間はモルタルを充填して水路全体を基礎と密着させた。水路勾配は30度、斜路の長さは2.0m、水平水路の長さは3.2mである。斜路の上流に仕切板を設置し、仕切板を引き抜くことで、斜路を流下するようにした。対岸への土砂の衝突を想定しコンクリート壁の設置の有無等を変化させて計測を行った。土砂は直径5~10cmの礫と直径1cm程度の礫を混合し、これに土砂の移動を促すため水を混ぜ合わせたものを使用した。水の重量20kgは水路幅、角度から予備実験により決定した。比重の同じものでは小規模の水路を流下させるには限界があり、起振力を大きくするため、直径10cm、重量5kgの鉄球3個を加えた条件も設定した。実験ケースは対岸の壁の有無、土砂の重量を変化させるとともに鉄球を加え表-1に示す合計8ケースを実施した。

表-1 実験条件

Case	実験条件	使用材料 (kg)			
		礫 (5~10cm)	礫 (1cm)	鉄球	水
1	壁なし	10	10	0	20
2		20	20	0	20
3		30	30	0	20
4		30	30	15	20
5	壁あり	10	10	0	20
6		20	20	0	20
7		30	30	0	20
8		30	30	15	20

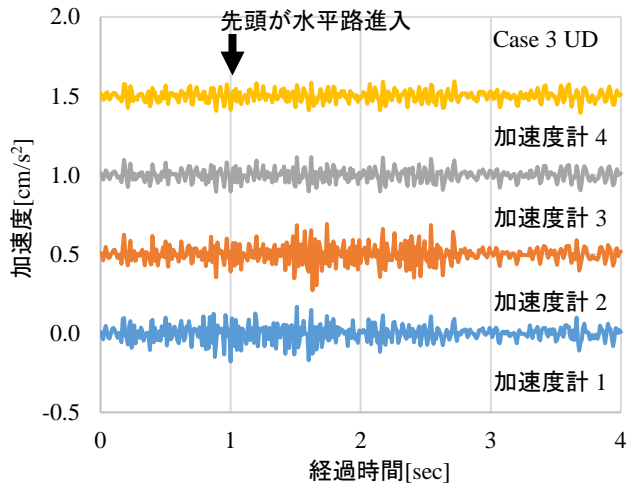


図-3 case3の加速度時刻歴 (UD成分)
0.5cm/s²ずつずらして表示

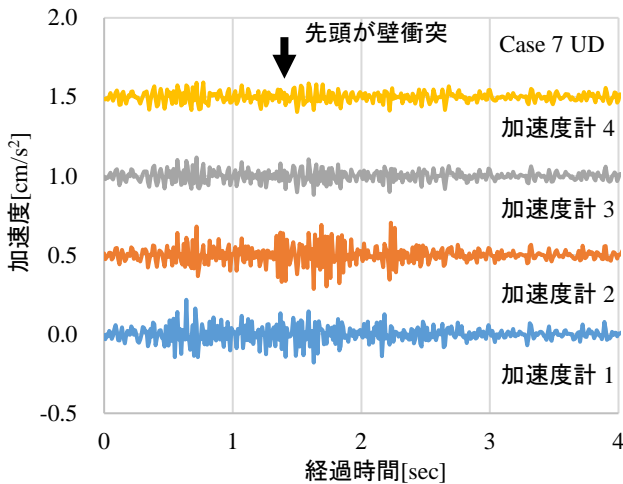


図-5 case7の加速度時刻歴 (UD成分)
0.5cm/s²ずつずらして表示

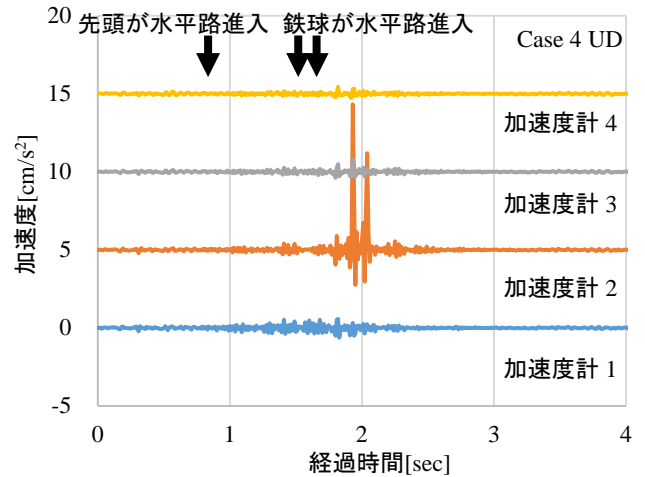


図-4 case4の加速度時刻歴 (UD成分)
5cm/s²ずつずらして表示

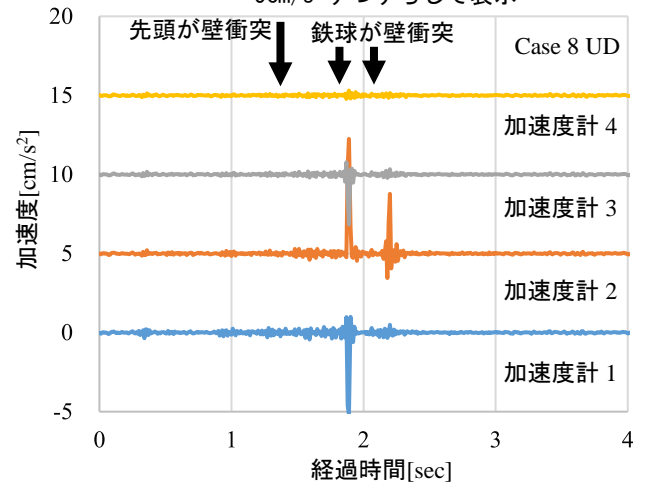


図-6 case8の加速度時刻歴 (UD成分)
5cm/s²ずつずらして表示

地盤振動の計測は白山工業社製サーボ型加速度計JU410を使用し、100Hzのサンプリングで3成分を計測した。加速度計の配置を図-2に示す。

3. 結果と考察

(1) 土砂移動プロセスと振幅増大のタイミングの関係

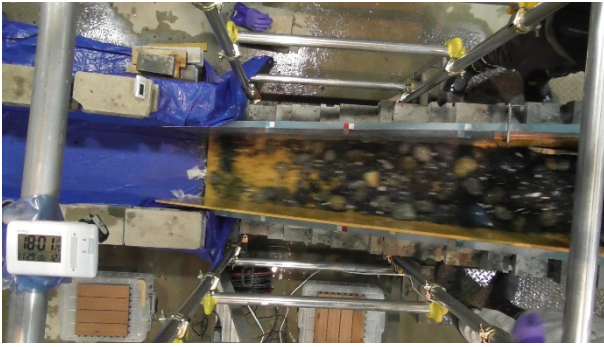
実験で得られた加速度計別の加速度時刻歴を、図-3~6にCase3, 4, 7, 8での上下方向成分を示す。グラフ横軸の経過時間0秒は土砂流下開始時刻である。流下土砂量が小さいケースでは計測された振幅が小さいことからCase1, 2, 5, 6の結果は割愛し、また鉄球の有無の比較と壁の有無の効果とを確認するため、Case3, 4, 7, 8のみを示す。土砂は4秒程度で流下した。鉄球を加えたCase4, 8で特に大きな振動が計測された。Case8では流下開始後1.89秒後に7.25cm/s²の最大振幅が発生した。

土砂の流下状況と振動との関係を検討するため、図-7, 8にcase4, 8のビデオカメラ画像を示す。ビデオカメラ画像の時刻は画像中の時計表示とフレー

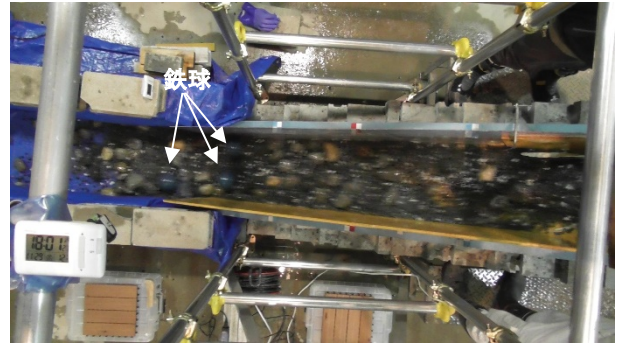
ム数(60FPS)による求めた。Case4では流下開始後0.8秒頃に土砂の先端が斜路から水平水路に進入し、1.5秒頃と1.6秒頃に鉄球が水平水路に到達した。斜路を土砂が移動している時間は振幅が増大せず、土砂が水平水路移動中の経過時間1秒付近から徐々に大きくなり、鉄球が水平水路を移動する1.8秒以降に特に大きくなっている。加速度計2の振幅は顕著に大きい。加速度計1は他の加速度計がピークに至るころには振幅は減少している。Case8では流下開始後1.3秒頃に斜路末端のコンクリート壁に土砂の先端が衝突した。鉄球は1.8秒頃と2.1秒頃に壁に衝突した。その直後に加速度計1, 2, 3において明瞭なピークを観測した。どの加速度計も振幅の増大タイミングが不明瞭なCase4と異なり加速度計1のピークの時間帯は同時刻であった。鉄球の水平水路進入および壁衝突時刻と波形ピーク時刻との差は目視による誤差の影響が大きいと考えられる。

(2) 土砂移動プロセスと周波数スペクトルの関係

土砂移動プロセスと振動の周波数スペクトルとの関係を調べるため、土砂の斜路移動時と水平水路移

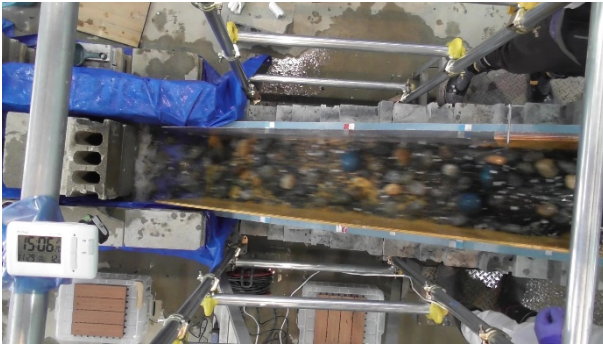


(a) 経過時間 0.8 秒

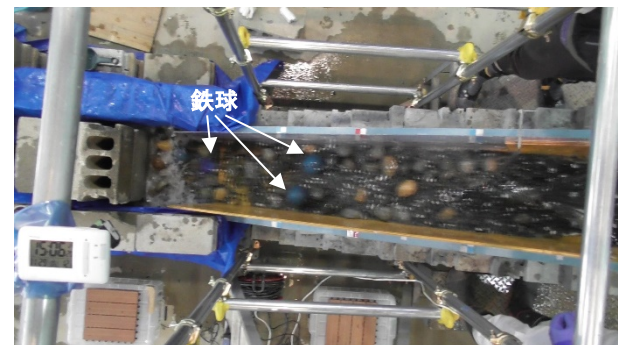


(b) 経過時間 1.5 秒

図-7 case4 の経過時間毎のビデオカメラ画像. (a)経過時間 0.8 秒 (b)経過時間 1.5 秒



(a) 経過時間 1.3 秒



(b) 経過時間 1.8 秒

図-8 case8 の経過時間毎のビデオカメラ画像. (a)経過時間 1.3 秒 (b)経過時間 1.8 秒

動時または壁衝突時のフーリエ振幅スペクトルを算出し、観測された振動には常時微動との比(S/N比)を求めた。その結果を図-9, 10に示す。常時微動は各実験開始前の約10秒前の約2.5秒間の振動データを用いた。Case4では斜路移動時は20Hz以上の高周波成分が各センサーで大きくなっているが、水平水路移動時に加速度計2では3Hz以下の低周波成分が大きくなっている。Case8では斜路移動時にCase4と同様に高周波成分が大きくなっているが、壁衝突時に加速度計1, 2, 3の10Hz以下の低周波成分が大きくなっている。これは実現現象の観測で得られた結果において、大規模土砂移動時に崩壊土砂の河床や対岸への衝突時に1~7Hz低周波成分が増大していることが明らかとなっており、室内実験による結果とも調和的であると考えられる。

(3) 振動の距離減衰

観測した地盤振動の距離減衰を評価するため、加速度計2, 3, 4の波形で、Case3, 4では水平水路移動時、Case7, 8では壁衝突時の振幅の二乗平方平均根RMS (Root Mean Square) を求めた。RMS値と各加速度計の水路中央からの距離の関係を図-11に示す。Case3, 7で加速度計2のRMS値に対する比率を求めると、距離1.9mでそれぞれ0.58, 0.52, 距離2.9mでそれぞれ0.50, 0.45に減衰している。同様にCase4, 8では、距離1.9mでそれぞれ0.12, 0.35,

距離2.9mでいずれも0.08に減衰している。

本実験は発生した振動を近距離に設置した加速度計で測定しており、その振動は表面波を捉えていると想定し、ここで地盤材料を粘弾性体と仮定すると波動エネルギーが熱エネルギーに変換されて失われ、その平面波動式⁹⁾は式(1)で表される。

$$u = B e^{-\beta z} e^{i\omega(t-z/V_s)} \quad (1)$$

ここに u は変位、 B は振幅、 β は材料減衰に起因した距離減衰係数、 z は伝播方向座標、 i は虚数、 ω は円振動数、 t は時刻、 V_s はS波速度である。したがって $e^{-\beta z}$ で表される材料減衰による距離減衰が生じる。また距離減衰係数 β は粘性係数 ξ を用いて、フオークト粘弾性体では $\beta = \omega^2 \xi / (2\rho V_s^3)^2$ で表され、円振動数 ω の2乗に比例するため、高周波ほど早く減衰する。さらに波動が振動源から表面波として伝わる場合は円筒波伝播とみなせるので幾何減衰も生じる。エネルギーの総和が等しいと仮定すると式(1)は次のようになる。

$$u = B(r/r_0)^{-0.5} e^{-\beta r} e^{i\omega(t-z/V_s)} \quad (2)$$

ここに r , r_0 は距離である。これにより地盤振動は内部減衰と幾何減衰を合わせた距離減衰が生じる。時間微分を2回行った加速度においても同様の距離減衰が生じる。距離減衰係数 β は減衰定数 D を用いて $\beta = \omega D / V_s$ と表され、卓越周波数を30Hz、減衰定数を0.1、弾性波速度を200m/sと仮定すると、式(2)によれば距離0.9mの位置での値に対し距離1.9mで

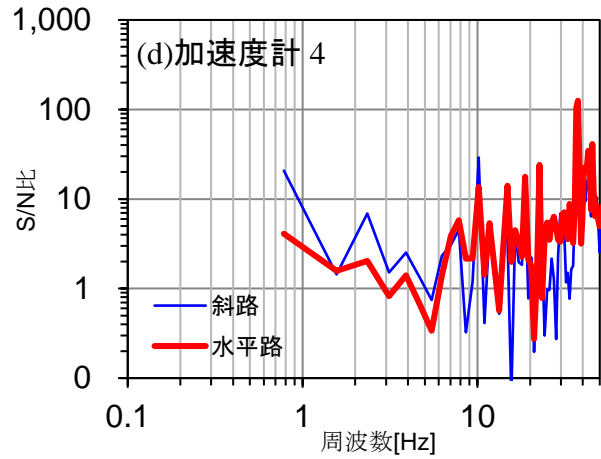
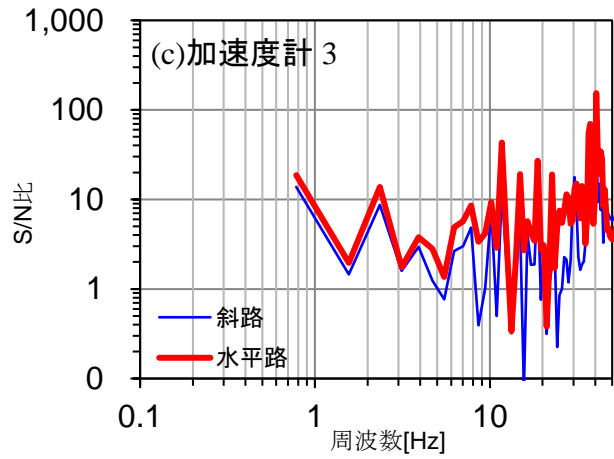
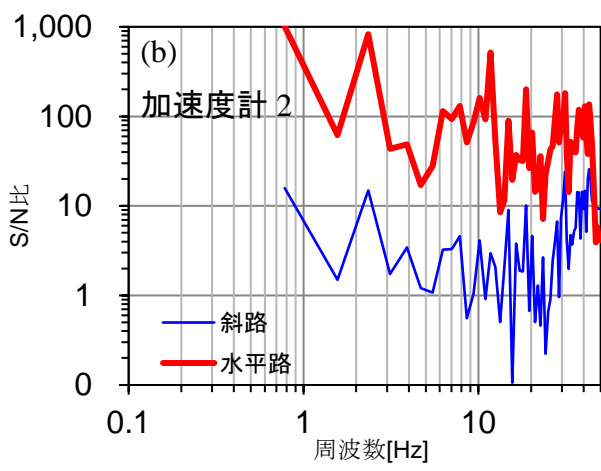
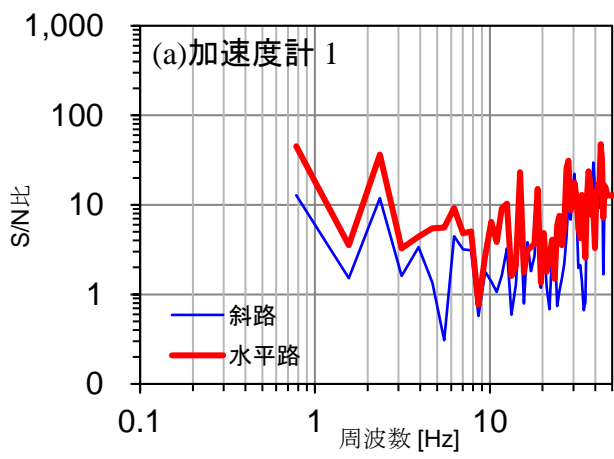


図-9 case4 の各加速度計 (UD 成分) のフーリエ振幅スペクトル比

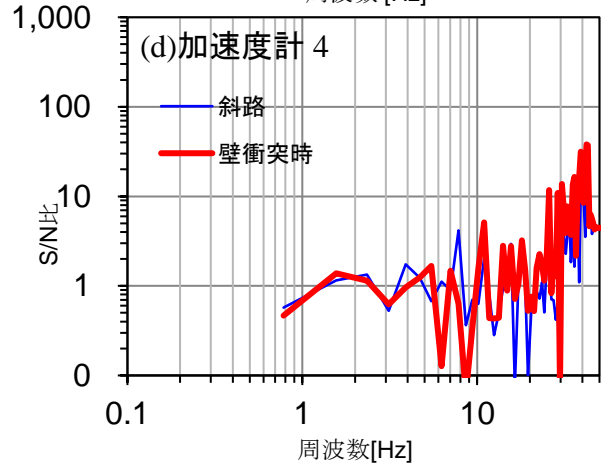
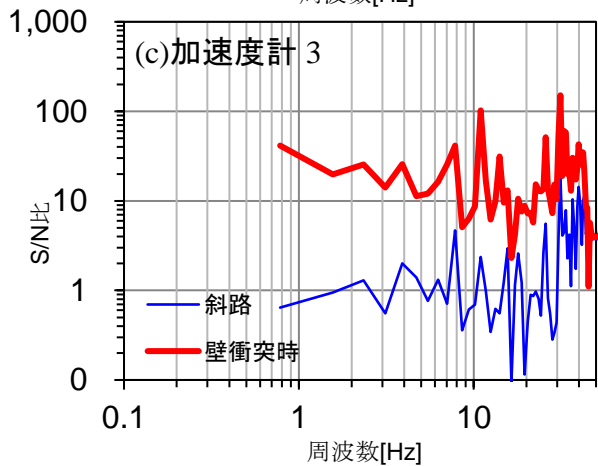
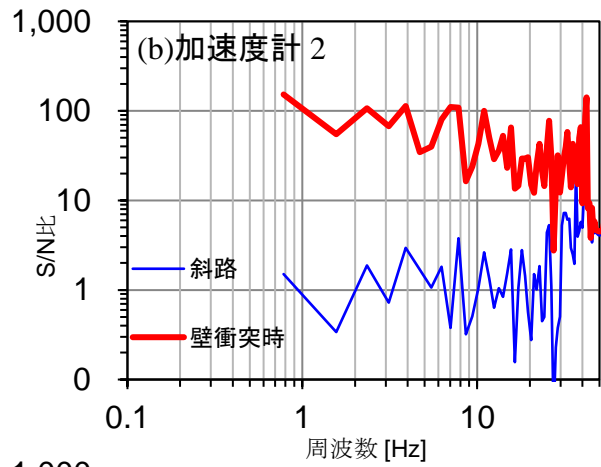
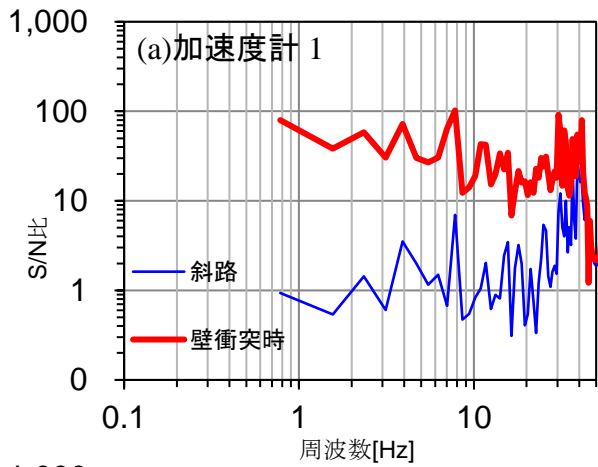


図-10 case8 の各加速度計 (UD 成分) のフーリエ振幅スペクトル比

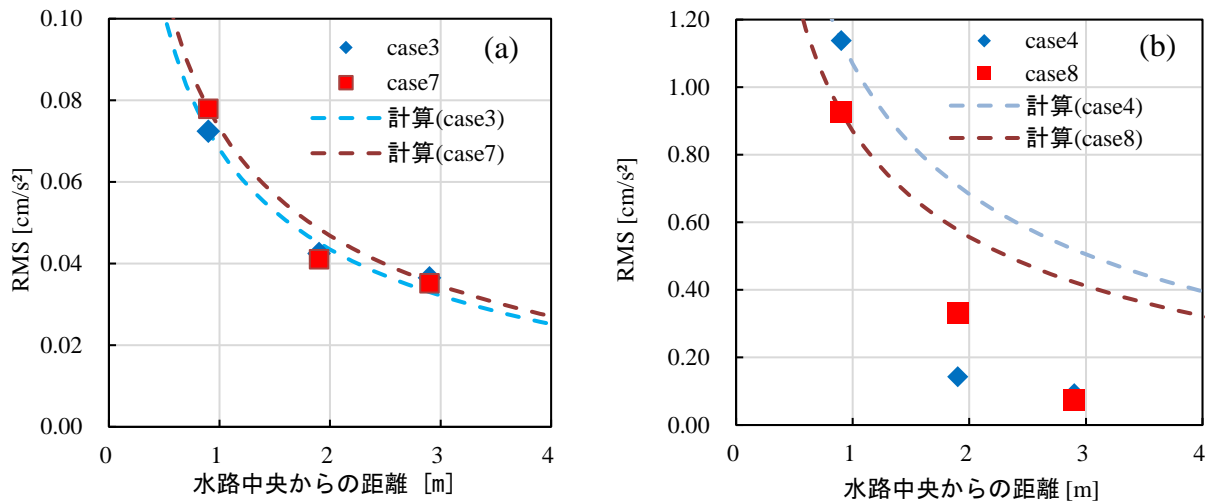


図-11 RMS 値 (UD 成分) と水路中央から加速度計までの距離との関係
(a) case3 と case7 (b) case4 と case8

0.62, 距離 2.9m で 0.45 に減衰することになる。Case3, 7 はこれと整合する減衰がみられるが, 弾性波速度等は今回計測していないこと, 実験室の地盤構造が不明であり低い弾性波速度を与えたため, あくまで簡易な評価である。Case4, 8 でより大きい減衰がみられ表面波より幾何減衰の大きい実体波が低周波成分に含まれていることも考えられる。距離減衰は媒体の特性や散乱による影響も大きいため, 実現象の観測を含めて今後知見を蓄積していく必要がある。

4. まとめ

斜面と河床に見立てた斜路と水平水路から構成する実験水路において土砂を流下させ発生した振動を計測し, 振動波形とビデオカメラ画像により確認した土砂移動プロセスとの比較を行った。斜路移動時の振幅に比べて, 水平水路移動時もしくは壁衝突時に振幅が増大すること, また, 移動過程毎にフーリエ振幅スペクトルを求めたところ, 低周波成分は鉄球を加えた場合の振幅と同様, 水平水路移動時もしくは壁衝突時に増大することが確認でき, 実現象で観察された現象と調和的な結果となった。地盤振動の距離減衰についても距離に応じ減衰することが確認できた。小規模な実験であるものの実現象で得られた知見の一部を再現できる可能性を示すと考えられる。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所: Hi-net 高感度地震観測網, <https://doi.org/10.17598/NIED.0003>, 参照 2020-4-22.
- 2) 国立研究開発法人防災科学技術研究所: F-net 高帯域地

震観測網, <https://doi.org/10.17598/NIED.0005>, 参照 2020-04-22.

- 3) 水野高志・伊藤潔・諏訪浩: 岡山県総社市における斜面崩壊にともなう地震動, 日本地震学会ニュースレター, Vol. 13, No. 1, pp.16-17, 2001.
- 4) 大角恒雄・浅原裕・下川悦郎: 2004年8月10日奈良県大塔村斜面土砂移動時の Hi-net データ解析—斜面土砂移動検知への応用—, 自然災害科学, Vol. 24, No. 23, pp. 267-277, 2005.
- 5) 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: 振動センサデータによる大規模土砂移動現象発生タイミング及び移動プロセスの解明について, 河川技術論文集, 第 22 巻, pp. 43-48, 2016.
- 6) 森脇寛: 崩壊型土石流の流下に伴う地盤の振動特性—小谷村蒲原沢土石流—, 地すべり, 第 3 号, 第 36 巻, pp. 99-107, 1999.
- 7) 桜井亘・酒井良・奥山悠木・小川内良人・福田睦寿・佐藤美波・海原荘一・只熊典子・藤原康正: 河道閉塞の内部構造により生じる水文・浸食特性の違いと対策上の留意点, 砂防学会誌, Vol. 68, No. 3, pp. 21-30, 2015.
- 8) 海原荘一・浅原裕・木下篤彦・田中健貴: 高感度地震観測網による土砂移動発生箇所近傍の地盤振動特性, 第 9 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 197-200, 2018.
- 9) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, Vol. 275, pp. 69-77, 1978.
- 10) 國生剛治: 地震地盤動力学の基礎エネルギー的視点を含めて, 鹿島出版会, pp. 26-36, 2014.

(2020. 7. 1 受付)

和歌山県土砂災害啓発センターにおける土砂災害に関する防災教育とその効果について

A STUDY ON THE EFFECTS OF THE DISASTER PREVENTION EDUCATION

ABOUT SEDIMENT DISASTER AT IWSRE

岸畑 明宏¹・坂口 隆紀¹・筒井 和男¹・宮崎 徳生¹

Akihiro Kishihata, Takaki Sakaguchi, Kazuo Tsutsui, Norio Miyazaki

¹和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027 番6）

E-mail: e0806041@pref.wakayama.lg.jp

Key Words: disaster prevention education, text mining, elementary school, enlightenment

1. はじめに

2011年9月の台風12号に伴う記録的豪雨により、和歌山県では紀南地方を中心に洪水・土砂災害が発生し、56人の尊い命が失われるとともに、道路の寸断による集落の孤立や世界遺産の被災など、1953年7月17日～18日の梅雨前線豪雨（紀州大水害）以来の大災害（写真-1）が発生した。この災害を受け、県では被害を繰り返さないために、土砂災害の記憶や教訓を後世に伝えるとともに、土砂災害に関する調査研究の拠点となる施設である「和歌山県土砂災害啓発センター（IWSRE）」（以下、啓発センター）を、土石流の多発により甚大な被害が発生した那智勝浦町に設置（図-1、写真-2）し、土砂災害の発生

メカニズムに関する調査研究を行うとともに、展示パネルや映像をとおして、「紀伊半島大水害」をはじめとする過去の災害の教訓を風化させずに後世に継承し、土砂災害から身を守るための研修・啓発活動を行っている¹⁾。



写真-1 那智勝浦町における紀伊半島大水害の発生状況



図-1 啓発センターの位置



写真-2 啓発センターの外観

2. 啓発センターが実施している研修

(1) 団体を対象とした土砂災害に関する啓発研修

啓発センターには、平成28年4月24日の開所以来、平成28年度には123団体3,166名、平成29年度には107団体2,650名、平成30年度には93団体2,051名、令和元年度には58団体1,146名の方が来館し、土砂災害についての啓発研修（以下、啓発研修）を受講している。研修受講団体の帰属県としては、図-2から、和歌山県はもとより、京阪神地域や中京地域が多く、遠くは長野県や岡山県からも来館している。また、受講団体の種別としては、学生、児童、自治会、消防団等の防災関係団体、民生児童委員が多い。

(2) 啓発研修の方法

啓発研修は30名程度以内を対象として行っており、下記の研修コンテンツを適宜組み合わせることで約30分～120分間のプログラムを受講団体に合わせて構成している。

- ・啓発センターの研修室を利用したスライドや動画を用いた土砂災害の基礎に関する研修（写真-3）（約30分～60分間）
- ・啓発センター内の土石流実験装置による透過型・不透過型砂防えん堤の役割の効果を確認する実験（写真-4）（約15分間）

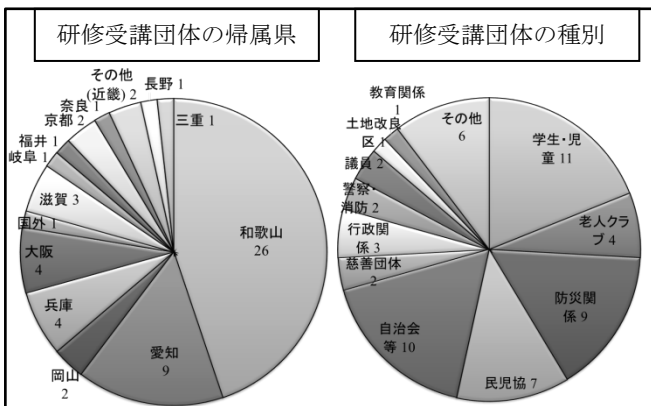


図-2 研修受講団体の帰属県及び種別



写真-3 土砂災害の基礎に関する研修の様子

- ・センターに近接している砂防えん堤工事現場の現地見学（近畿地方整備局 紀伊山系砂防事務所協力）（写真-5）など実験・体験（約20分間）

また、啓発研修の人数が多い場合には、各研修コンテンツを班分けすることで最大90人程度までを対象に啓発研修を行っている。

(3) 啓発研修の内容

団体への啓発研修の内容は、以下の啓発研修が対象とする各内容を、団体の種別により適宜組み合わせたものとしている。

- ・土砂災害啓発センターについて
- ・土砂災害の概要及び予兆について
- ・紀伊半島大水害について
- ・深層崩壊について
- ・土砂災害防止法・土砂災害警戒区域について
- ・早期避難の重要性について
- ・災害後の取り組み

研修にあたっては、画一的な資料を説明するだけでなく、申し込みの段階から研修で聞きたい内容を聴取し、「土砂災害の概要及び予兆について」では、土砂災害に対する興味とイメージを持ちやすい土砂災害の動画（写真-6）²⁾等を用いている。また、「紀伊半島大水害について」では、土砂災害発生から年月を経た現場の復旧状況と当時の被災状況の写真を見比べられる資料（図-3）を用いている。これらに加えて、受講団体の地元における土砂災害に係る情



写真-4 土石流発生装置による砂防堰堤の効果に関する実験の様子



写真-5 砂防えん堤工事現場の現地見学の様子

報を、必要に応じて関係都道府県に聞き取りするなどして研修題材（図-4）を作成して用いている。また、対象年齢にあわせてクイズ（図-5）を組み入れたりすることで、土砂災害を身近に感じ、危機感を持ってもらえるような啓発研修を行っている。



写真-6 土砂災害発生時の動画



図-3 被災時と復旧状況の対比を示す研修資料



図-4 受講団体の地元で発生した土砂災害に関する研修資料

3. 児童を対象とした啓発研修

児童を対象とした啓発研修では、通常の啓発研修の内容に加えて、児童が土砂災害をイメージしやすい各種実験を行っている。土砂災害に関連する地質については、那智勝浦町周辺に分布する風化前後の花崗岩を児童自身が金槌で叩き、風化後の花崗岩の「もろさ」を感じる実験（写真-7）を行っている。

また、土砂災害発生時の要因となる降水については、土を固めて作った「山」に噴霧器による「降雨」を継続的に当てることで「山が崩れる」様子を体験する実験（写真-8）を行い、土砂災害発生後の地形変化については、山と谷を模した模型の上部に配置した土で「斜面崩壊後の堆積土砂」を示し、噴霧器による「降雨」を継続的に当てることによって土石流が発生し、谷の出口で土石流が堆積して扇状地ができる様子を体験する実験（写真-9）を行っている。

以上に加えて、小学校5年生の理科で学習する「流れる水の働き」に関連した内容として、堆積した砂が、水流により浸食され、河川の流路が形成され、自然と蛇行し、加えて、地下水位の上昇により斜面崩壊が発生する様子を再現する実験（写真-10）を行っている。



図-5 土砂災害に関するクイズ



写真-7 風化前後の花崗岩を叩く実験



写真-8 雨が降ると山が崩れる実験



写真-9 土石流が起ると扇状地ができる実験



写真-10 流れる水の働きについての実験

4. 小学生を対象とした防災教育の効果検証

(1) 小学生を対象とした防災教育

啓発センターでは平成 28 年度から令和元年度にかけて、那智勝浦町内にある全小学校 6 校において土砂災害に関する防災教育を実施した。那智勝浦町教育委員会では防災教育において、学校などの主体が当事者意識を持って防災意識向上に携わること、組織的に防災教育を進めること、学んだことを発信することを重視しており、これら 3 点を踏まえ、土砂災害に関する防災教育の実施にあたっては、児童らが「自分ごととして考え・行動する」ことを学習目標に、担当教員と打合せを進め、個別に教育プロ

グラムを選定した。なお、学習時間については 90～120 分程度であった。今回の研究では、A 小学校（令和元年 9 月 11 日実施、対象生徒 4 年生 43 名）、B 小学校（令和元年 10 月 7 日実施、対象生徒 3・4 年生 12 名）、C 小学校（令和元年 11 月 21 日、28 日実施、対象生徒 5 年生 24 名）の防災教育受講者による感想文を分析した。また、表-1 に防災教育の実施内容を示す。

(2) テキストマイニングによる解析

受講者が書いた感想文をテキストデータ化した上で、計量化し、分析・可視化するにあたり、テキストデータを計量的に分析することが可能である KH Coder³⁾を用いた。KH Coder では、テキストデータにおいて出現している単語の検索や出現頻度の分析や、テキストデータにおいて、併せて出現することが多い共起関係にある単語を、多変量解析により共起ネットワークとして、単語と単語が共起する関係を直感的に捉えることができる形で示すこと等が可能である⁴⁾。このような事から、研修を受けた感想文とこれらの研修内容がどのように関連付けられ、意味づけられているかの検討を行った。

(3) 共起ネットワーク解析と研修結果の検証

各小学校を対象とした共起ネットワーク解析結果（図-6～8）を示す。単語を囲む円は大きいものほど、テキスト内での出現回数が多い事を示し、また、単語と単語が線で結ばれているものは共起性や関連性があることを示し、これらの集合をクラスターと呼び、本研究で取り扱うクラスターを枠線で明示する。なお、クラスターの位置関係は作図によるもので、共起的な関係性を示すものではない。今回の解析においては、受講者が研修プログラムに対して感じた主要テーマを明確にするため、出現頻度が上位 20 位以内にある単語について共起ネットワーク解析を行った。

A 小学校の感想文で抽出されたクラスターでは、1 つが「土砂」「災害」「知る」「分かる」「怖い」からなるもので、これは、土砂災害による死者や行方不明者数、全国での土砂災害発生状況といった教育内容が土砂災害の危険性を強く伝えたものと思われる。また、「不透過型砂防えん堤」「透過型砂防えん堤」からなるクラスターは、講義での砂防えん堤の役割についての内容に加えて、土石流発生装置による実験、砂防工事現場見学により効果的に学習されたものと思われる。

B 小学校の感想文から抽出されたクラスターでは、

表-1 防災教育の実施内容

A小学校	B小学校	C小学校
【啓発研修の内容】 ・土砂災害の概要及び予兆について ・深層崩壊について ・紀伊半島大水害について ・早期避難の重要性について ・災害後の取り組み ・土砂災害防止法・土砂災害警戒区域について	【啓発研修の内容】 ・土砂災害の概要及び予兆について ・深層崩壊について ・紀伊半島大水害について ・早期避難の重要性について ・災害後の取り組み	【啓発研修の内容】 ・土砂災害の概要及び予兆について ・深層崩壊について ・紀伊半島大水害について ・早期避難の重要性について ・地質について ・災害後の取り組み ・土砂災害防止法・土砂災害警戒区域について
【啓発研修（実験）の内容】 ・土石流発生装置での実験 ・砂防えん堤工事現場の見学 ・風化前後の花崗岩を叩く実験 ・流れる水の働きについての実験	【啓発研修（実験）の内容】 ・土石流発生装置での実験 ・砂防えん堤工事現場の見学 ・風化前後の花崗岩を叩く実験 ・雨が降ると山が崩れる実験 ・土石流が起こると扇状地ができる実験 ・流れる水の働きについての実験	【啓発研修（実験）の内容】 ・土石流発生装置での実験 ・砂防えん堤工事現場の見学 ・風化前後の花崗岩を叩く実験 ・雨が降ると山が崩れる実験 ・土石流が起こると扇状地ができる実験
【その他 実施した内容】 ・土砂災害による死者と行方不明者数（クイズ） ・全国での土砂災害発生状況	【その他 実施した内容】	【その他 実施した内容】 ・雨と川の水の色、堆積、浸食 ・わかやま土砂災害マップについて

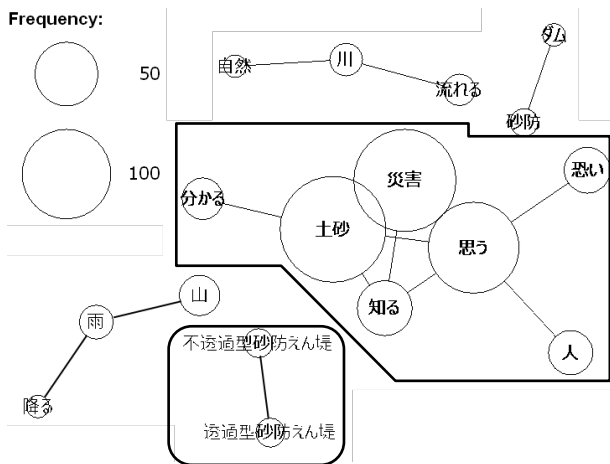


図-6 共起ネットワーク解析結果 (A 小学校)

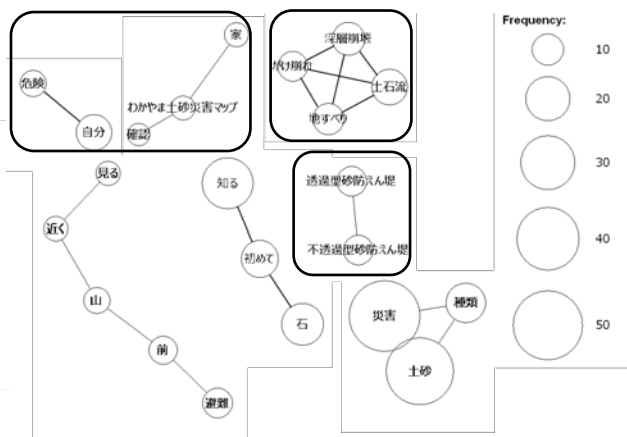


図-8 共起ネットワーク解析結果 (C 小学校)

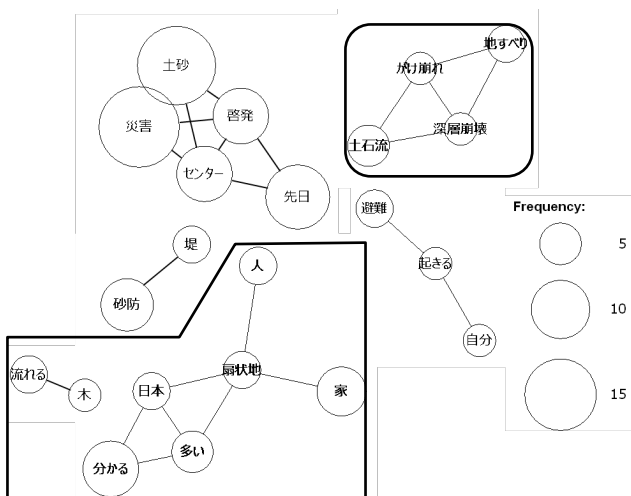


図-7 共起ネットワーク解析結果 (B 小学校)

1つが「土石流」「がけ崩れ」「地すべり」「深層崩壊」からなるもので、講義でのスライドや動画による説明で強く学習されたことが想定された。

また、「人」「扇状地」「家」「日本」「多い」などからなるクラスターは、スライドでの説明や土石流が起こると扇状地ができる実験で日本に扇状地が多数存在することや、扇状地が形成される様子が認識されたものとする。

C小学校の感想文においても、B小学校と同じく、「土石流」「がけ崩れ」「地すべり」「深層崩壊」からなるクラスターがあり、B小学校と同じく動画やスライドで強く学習されたものとする。加えて、A小学校と同じく「不透過型砂防えん堤」「透過型砂防えん堤」からなるクラスターも確認された。「わかやま土砂災害マップ」「家」「確認」「自分」「危険」からなるクラスターは、研修の中でPCを操作し、実際に小学校区周辺の土砂災害のおそれがある個所を和歌山県が管理するWEBサイトである「わかやま



写真-11 わかやま土砂災害マップを用いた防災教育

土砂災害マップ」(写真-11)で確認したことが、効果的であったと考えられる。

5. 最後に

啓発研修の理解度を問うために、5段階評価などの形でアンケートを求める事はよく行われている手法であるが、これだけでは研修内容をどのように理解しているかを判断しづらい。一方、今回の解析に用いた感想文では、受講者が色々と研修で感じた事を自由に書いてもらえるため、啓発研修で行った各内容の理解度についての分析を行うことができ、今後の、より理解度向上を図った研修プログラム作りに非常に有用な調査資料となる。

また、啓発研修を行った講師自身はその効果を把握することにより、研修教材の改善や研修プログラムの時間配分の変更、新たな教育内容の追加などの研鑽につながる事が重要であると考えます。

研修後に受講者の感想を分析し、研修内容と講師による研修方法を改善し、その上でより良い研修を行い、その結果を再度フィードバックしていく、このような研修方法を継続的にレベルアップできるサイクルが行われるよう、研鑽に努めていきたい。

謝辞：学校での防災教育に当たり、那智勝浦町教育委員会、勝浦小学校、市野々小学校、下里小学校におかれましては多大なご協力をいただきました。また、紀伊山系砂防事務所には複数回に渡って現場見学会の開催をはじめとした様々なご協力を頂き、この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坂口ら：紀伊半島大水害の被災体験を子供達に伝承する活動について、2019年度砂防学会研究発表会概要集 pp763-764, 2019.
- 2) (社)全国治水砂防協会：DVD「土砂動態」, 2009.
- 3) 樋口耕一：社会調査のための計量テキスト分析 ―内容分析の継承と発展を目指して―, ナカニシヤ出版, 2020.
- 4) 末吉美喜:テキストマイニング入門 ExcelとKH Coderでわかるデータ分析, 株式会社オーム社, 2020.

(2020.7.1 受付)

紀伊半島大水害の被災体験の研修プログラムとその生徒への効果について

岸畑 明宏¹・坂口 隆紀¹

¹和歌山県 土砂災害啓発センター (〒649-5302和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6)

和歌山県土砂災害啓発センターでは、土砂災害の被害軽減に向けた研修と地域の小中学校と連携した防災総合学習などを実施している¹⁾。また、紀伊半島大水害の被災者のご遺族の中では、久保榮子氏が「自らが体験した悲しみを後世の人に味あわせたくない」と考え、悲しみを抱えながら使命感を抱き、悲惨な被災体験を後世に伝承しようと体験紙芝居等を作成し懸命に活動をされており、共同して中学生を対象にした啓発研修と体験紙芝居を合わせた研修プログラムを行っている。本報告では、その効果について学習会実施後に行った生徒の感想文を基にテキストマイニング手法での効果分析を試みた。

キーワード 紀伊半島大水害, 土砂災害, 啓発活動, 体験紙芝居, テキストマイニング

1. はじめに

2011年9月の台風12号に伴う記録的豪雨により、和歌山県では紀南地方を中心に洪水・土砂災害が発生し、56人の尊い命が失われるとともに、道路の寸断による集落の孤立や世界遺産の被災など、1953年7月17日～18日の梅雨前線豪雨（紀州大水害）以来の大災害（図-1）が発生した²⁾。この災害を受け、県では被害を繰り返さないために、土砂災害の記憶や教訓を後世に伝えるとともに、土砂災害に関する調査研究の拠点となる施設である「和歌山県土砂災害啓発センター」（以下、啓発センター）（写真-1）を、土石流の多発により甚大な被害が発生した那智勝浦町に設置（図-2）し、土砂災害の発生メカニズムに関する調査研究を行うとともに、展示パネルや映像をとおして、「紀伊半島大水害」をはじめとする過去

の災害の教訓を風化させずに後世に継承し、土砂災害から身を守るための研修・啓発活動を行っている。



写真-1 和歌山県土砂災害啓発センター外観



図-1 紀伊半島大水害の発生状況



図-2 紀伊半島大水害の発生状況

2. 啓発センターが実施している研修

(1) 団体を対象とした土砂災害に関する啓発研修

啓発センターには、平成28年4月24日の開所以来、平成28年度には123団体3,166名、平成29年度には107団体2,650名、平成30年度には93団体2,051名、令和元年度には58団体1,146名の方が来館し、土砂災害についての啓発研修（以下、啓発研修）を受講している。研修受講団体の帰属県としては、図-3から、和歌山県はもとより、京阪神地域や中京地域が多く、遠くは長野県や岡山県からも来館している。また、受講団体の種別としては、学生、児童、自治会、消防団等の防災関係団体、民生児童委員が多い。

(2) 啓発研修の方法

啓発研修は30名程度以内を対象として行っており、下記の研修コンテンツを適宜組み合わせることで約30分～120分間のプログラムを受講団体に合わせて構成している。

- ・啓発センターの研修室を利用したスライドや動画を用いた土砂災害の基礎に関する研修（写真-2）（約30分～60分間）
- ・啓発センター内の土石流実験装置による透過型・不透過型砂防えん堤の役割の効果を確認する実験（写真-3）（約15分間）

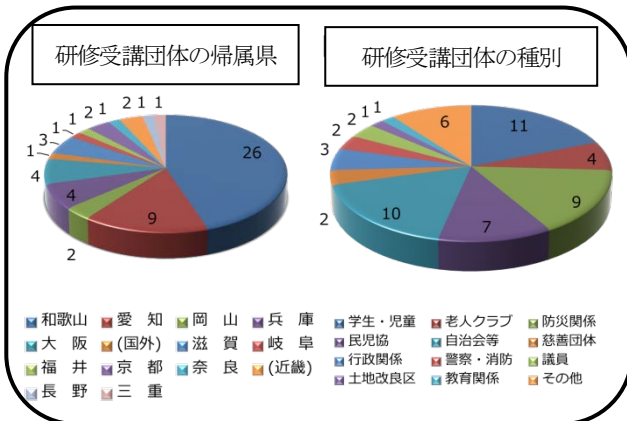


図-3 研修受講団体の帰属県及び種別



写真-2 土砂災害の基礎に関する研修の様子

- ・センターに近接している砂防えん堤工事現場の現地見学（近畿地方整備局 紀伊山系砂防事務所協力）（写真-4）など実験・体験（約20分間）

また、啓発研修の人数が多い場合には、各研修コンテンツを班分けすることで最大90人程度までを対象に啓発研修を行っている。

(3) 啓発研修の内容

団体への啓発研修の内容は、以下の啓発研修が対象とする各内容を、団体の種別により適宜組み合わせたものとしている。

- ・土砂災害啓発センターについて
- ・土砂災害の概要及び予兆について
- ・紀伊半島大水害について
- ・深層崩壊について
- ・土砂災害防止法・土砂災害警戒区域について
- ・早期避難の重要性について
- ・災害後の取り組み

研修にあたっては、画一的な資料を説明するだけではなく、申し込みの段階から研修で聞きたい内容を聴取し、「土砂災害の概要及び予兆について」では、土砂災害に対する興味とイメージを持ちやすい土砂災害の動画（写真-5）³等を用いている。また、「紀伊半島大水害について」では、土砂災害発生から年月を経た現場の復旧状況と当時の被災状況の写真を見比べられる資料（図-4）を用いている。これらに加えて、受講団体の地元における土砂災害に係る情報を、必要に応じて関係都道府県に聞き取りするなどして研修題材（図-5）を作成して



写真-3 土石流発生装置による砂防堰堤の効果に関する実験の様子



写真-4 砂防えん堤工事現場の現地見学の様子



写真5 土砂災害発生の動画

Q1. 問題 (土石流からの避難)

山の中の沢で川遊びをしていたら、山のおくてゴーツという音がした。土石流だ！さてどこにげる？

A 川原（かわら）にある大きな石のかげ
 B 川原にある木の上
 C 川の流れと直角方向の高台

正解は… **C** 川の流れと直角方向の高台

解説（かいせつ）…
 土石流は沢の上流で発生し、およそ時速60kmのスピードで一気に流れてくる。どんなに足の速い人でも追いつかれてしまう。早く沢からはなれて、高いところに避難が必要。

図-6 土砂災害に関するクイズ

6. 紀伊半島大水害 (土砂災害状況・那智川支川平野川)

流域面積	0.44km ²
土砂泥氈面積	16,850m ²
生産土砂量	54,450m ³
流出土砂量	23,300m ³
人的被害 死者	9人
物的被害 建物	全壊 3棟
	半壊 2棟
	床上浸水 19棟

9月4日（日）10時39分頃
 那智勝浦市町々地内
 河口から約4.7km



写真6 紀伊半島大水害体験紙芝居の様子

6. 紀伊半島大水害 (土砂災害状況・那智川支川平野川)

とうかがたえんてい 透過型堰堤
 ふうとかがたえんてい 不透型堰堤
 坂野古道
 令和2年3月17日
 那智川支川平野川
 河口から約4.7km

図-4 被災時と復旧状況の対比を示す研修資料

2. 京都府の土砂災害 平成30年7月豪雨 京都府提供

<p>綾部市 上杉町 【豊ヶ谷川】</p> <p>幅30m、高さ25mの規模の山腹崩壊が発生し、死者3名、人家全壊2戸の被害</p>	<p>舞鶴市 上福井 【大島川】</p>
<p>福知山市 大江町 【一級河川 谷川】</p> <p>幅110m、奥行180mの規模で地すべりが発生し、天然ダムが形成</p>	<p>舞鶴市 上福井 【瀬ヶ谷川支流】</p> <p>土石流が発生し、谷出口の民家が全壊した。これにより、住民1名が死亡</p>

図-5 受講団体の地元で発生した土砂災害に関する研修資料

※夫婦と娘の3人家族が洪水に見舞われ、最初は3人で樋に捕まって耐えていたが耐えきれず、隣の建物に移ろうと濁流に飛び込み流された。母親はフェンスに捕まり、娘は屋根に登って九死に一生を得たが、夫は遺体で発見された。

図-7 紀伊半島大水害体験紙芝居のシナリオ



写真-7 兎に扮した久保氏による〇×クイズ

4. 紀伊半島大水害(那智川での災害の特徴)



7. 紀伊半島大水害(那智川での災害の特徴)



図-8 久保氏が被災した状況を説明する資料

用いている。また、対象年齢にあわせてクイズ(図-6)を組み入れたりすることで、土砂災害を身近に感じ、危機感を持ってもらえるような啓発研修を行っている。

3. 紀伊半島大水害体験紙芝居

久保榮子氏(以下、久保氏)が行っている紀伊半島大水害体験紙芝居(写真-6)は、平成26年頃から始められ、

現在まで近隣の小中学校はもとより自治会や自主防災組織の方々などを対象に50件以上実施されている。内容は台風12号が平成23年9月4日未明に来襲し、久保氏自らが体験した事を中心に、その時感じた事や今も抱いている後悔の念などを紙芝居にまとめたもの(図-7)であり、また、紙芝居の後には、特に「早めの避難」の重要性を訴えるために、「脱兎のごとく逃げる」という言葉を用い、久保氏が兎に扮して〇×クイズを実施(写真-7)することで、物語の中で久保氏が災害の間に感じた、かけがえない命を守るための早期避難と行動の重要性を教えている。

4. 啓発研修と紀伊半島大水害体験紙芝居を合わせた研修プログラム

土砂災害に係る防災教育においては、その中で土砂災害の現象・特徴と危険な場所などを知り、それらの知識を応用できる判断力(考える力)と危険な時に自らの的確な判断で避難できる意志決定できる能力(行動する力)を養う必要がある⁴⁾とされている。

今回の啓発研修と紀伊半島大水害体験紙芝居を合わせた研修プログラム(以下、特別研修プログラム)のうち、啓発研修については、受講者が土砂災害の現象・特徴と危険な場所を知り、土砂災害について考える力を養うことが出来る研修内容とした。また、紀伊半島大水害体験紙芝居では、久保氏による、降りしきる大雨の時に避難勧告が発令されても避難しなかった事に対する後悔の念の描写と、「どうして早めの避難をしなかったのか。早めの避難行動をすれば全ての命は助かっていた」という訴えから、受講者が土砂災害に対して実際に避難する行動力の重要性について学習することを意図している。

また、特別研修プログラム全体として、受講者が土砂災害の性質と危険性を考える力を養うことに加えて、災害に際して受講者自身が判断して避難を決断できる行動する力を養うことが可能な研修内容を意図している。

なお、特別プログラムに要する時間は、土砂災害の基礎に関する研修として約30分間の啓発研修を行い、その後約60分間の紀伊半島大水害体験紙芝居とそれに続く〇×クイズの計90分と設定した。

紀伊半島大水害体験紙芝居の前に行う約30分間の啓発研修では、土砂災害の基礎に関する研修内容である「土砂災害の概要及び予兆について」「紀伊半島大水害について」「土砂災害防止法・土砂災害警戒区域について」「早期避難の重要性について」をスライドや動画によって説明し、加えて、紀伊半島大水害体験紙芝居の理解度向上を目的として、啓発研修の後に行う紀伊半島大水害体験紙芝居における久保氏が被災した場所や遭遇した災害について具体的に説明(図-8)した。特に、「早期避難の重要性について」は紀伊半島大水害体験紙芝居にお

ける久保氏の訴えやそれに続く〇×クイズにおいても扱われる内容であり、避難行動の実施に直結する内容であることから重要と考え、受講者が適切に理解できるような研修内容とした。

5. 特別研修プログラムの効果検証

(1) 特別研修プログラムの対象中学校

特別研修プログラムは、令和元年8月22日に和歌山県田辺市立龍神中学校（1年生28名）、同年10月9日に田辺市立新庄中学校（2年生38名）、同年12月4日に和歌山県立日高高等学校附属中学校（1年生38名）の計104名を対象に実施した。また、研修による効果の検証に用いた資料には、研修後に受講者が書いた感想文を用いた。

(2) テキストマイニング手法による解析

受講者が書いた感想文を計量化し、分析・可視化するにあたり、テキストデータを計量的に分析することが可能であるKH Coder⁴⁾を用いた。KH Coderでは、テキストデータにおいて出現している単語の検索や出現頻度の分析や、テキストデータにおいて、併せて出現することが多い共起関係にある単語を、多変量解析により共起ネットワークとして、単語と単語が共起する関係を直感的に捉えることができる形で示すこと等が可能である⁵⁾。このようなことから、研修を受けた感想文とこれらの研修内容がどのように関連付けられ、意味づけられているかの検討を行った。

(3) 共起ネットワーク解析と研修結果の検証

共起ネットワーク解析結果（図-9）と単語（名詞）の出現回数（表-1）を示す。大きく5つのクラスターに単語の共起関係が分類されているのが分かる。この円が

大きいものほど、出現回数が多い事を示し、また、単語と単語が線で結ばれているものは共起性や関連性があることを示し、線の太さが関連性の強さとして表現している。

なお、今回の解析においては、受講者が特別研修プログラムに対して感じた主要テーマを明確にするため、出現頻度が上位20位以内にある単語について共起ネットワーク解析を行った。

一番大きなクラスターを見ると、共起関係にあるワードは①「早期」・「避難」・「大切」、②「土砂」・「災害」・「思う」・「分かる」・「久保」、③「話」・「聞く」といった関連の強いグループを基本に大きなクラスターを形成している。特に今回の研修で一番伝えたかった「早期避難が大切」であることを学生は考え、「土砂災害を思った・分かった」という事から土砂災害に関する知識を学生が習得したと考えられる。

次に他のクラスターで抽出されているワードと啓発研修内容を比較検討した。

その中で、「深層崩壊」・「地すべり」・「土石流」・「がけ崩れ」の共起関係については、土砂災害の4種の起こり方が関連づけて認識されたものと考えられる。

土砂災害の種別に関する研修方法としては、実際の土砂災害の動画やCGを用いて説明しており、これらを用いた説明等が、土砂災害の種別の認識に有効な方法であったと考えられる。

次に、「自助」・「共助」のワードのクラスターが抽出されている。これは、紀伊半島大水害体験紙芝居の話や久保氏が行う際に研修室内では、大きな字で「自助」・「公助」・「共助」の文字を張り出しており（写真-8）、研修中に受講者が継続して文字を視認することで効果的に認識されたものと考えられる。

一方、土砂災害の危険な箇所については、土砂災害警戒区域についてスライドを使い、「自分ごと」と認識しやすいうように、受講者の学校周辺の土砂災害警戒区域

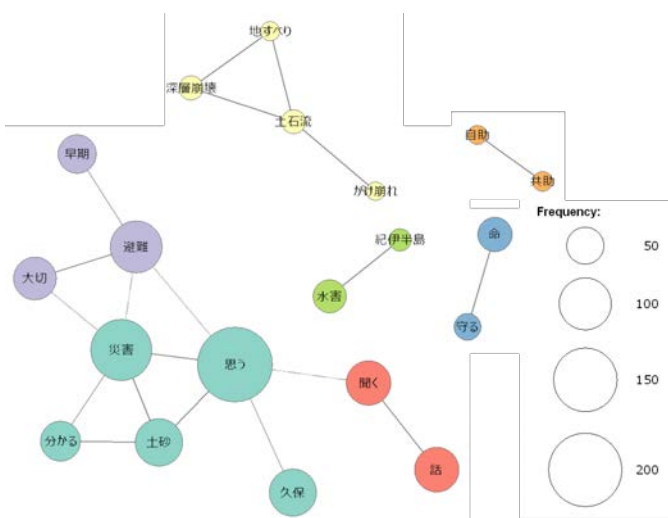


図-9 共起ネットワーク解析結果

出現回数(名詞)

抽出語	出現回数	抽出語	出現回数
災害	138	紀伊半島	18
避難	100	防災	18
土砂	83	準備	15
久保	82	お話	14
話	73	共助	14
自分	70	種類	14
早期	54	先生	14
人	51	学習	13
命	43	自助	13
水害	40	台風	13
家族	25	地すべり	13
家	23	がけ崩れ	12
紙芝居	23	津波	12
深層崩壊	21	山	11
体験	21	センター	10
土石流	21	経験	10
被害	21		
水	20		

表-1 単語の出現回数



写真-8 紀伊半島大被害体験紙芝居における「自助」・「公助」・「共助」の文字

6. 土砂災害から身を守るために

①ご自宅・勤務先等が、「土砂災害危険箇所」「土砂災害警戒区域」かどうか確認する。



土砂災害の約6割は、「土砂災害危険箇所」「土砂災害警戒区域」で発生します。普段からお住まいの場所等が土砂災害の恐れがある区域に含まれているかどうか、和歌山県HPの「わかやま土砂災害マップ」(<http://sabomap.pref.wakayama.lg.jp>)で確認しておきましょう。

図-9 土砂災害警戒区域に関する研修資料

(図-9)の説明を行ったが、単語の出現頻度上位100にも関連する単語が現れず、土砂災害警戒区域に関する啓発研修の改善が必要と思われた。

6. 最後に

啓発研修の理解度を問うために、5段階評価などの形でアンケートを求める事はよく行われている手法であるが、これだけでは研修内容をどのように理解しているかを判断しづらい。一方、今回の解析に用いた感想文では、受講者が色々と研修で感じた事を自由に書いてもらえるため、啓発研修で行った各内容の理解度についての分析を行うことができ、今後の、より理解度向上を図った研修プログラム作りに非常に有用な調査資料となる。

また、啓発研修を行った講師自身がその効果を把握することにより、研修教材の改善や研修プログラムの時間配分の変更、新たな教育内容の追加などの研鑽につながる事が重要であると考えます。

研修後に受講者の感想を分析し、研修内容と講師による研修方法を改善し、その上でより良い研修を行い、その結果を再度フィードバックしていく、このような研修方法を継続的にレベルアップできるサイクルが行われるよう、研鑽に努めていきたい。

謝辞：本研究及び日々の研修に当たり、紀伊半島大被害体験紙芝居を作成し、継続的に50回以上もの講演を行い、加えて、現在も新しい紙芝居を作り続けておられる久保氏には、多大なご協力を頂き、この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坂口ら：紀伊半島大被害の被災体験を子供達に伝承する活動について、2019年度砂防学会研究発表会概要集 pp763-764
- 2) 和歌山県：平成23年 紀伊半島大被害記録誌、2013年
- 3) (社) 全国治水砂防協会：DVD「土砂動態」、2009年
- 4) 樋口耕一：社会調査のための計量テキスト分析 ―内容分析の継承と発展を目指して―、ナカニシヤ出版、2020年
- 5) 末吉美喜：テキストマイニング入門 ExcelとKHCoderでわかるデータ分析、株式会社オーム社、2020

土砂移動時の地盤振動の再現 - 模型実験からの考察 -

Reproduction of seismic waves caused by large sediment movements: Results of model experiments

筒井 和男*1,2 坂口 隆紀*3 海原 莊一*4 谷田 佑太*4 木下 篤彦*5
 Kazuo TSUTSUI Takaki SAKAGUCHI Soichi KAIHARA Yuta TANIDA Atsuhiko KINOSHITA
 柴田 俊*6 金澤 瑛*5 中谷 洋明*5 里深 好文*7 藤本 将光*7
 Suguru SHIBATA Akito KANAZAWA Hiroaki NAKAYA Yoshifumi SATOFUKA Masamitsu FUJIMOTO

Abstract

Seismic sensor networks detect ground vibrations caused by the movement of large masses, predominantly at low frequencies of 1–3 Hz. We modeled sediment flow down a slope and measured ground vibrations in cases with and without a concrete wall at the end of the slope. The sediment weight, amount of water, and presence of iron balls were varied, and the waveform and amplitude spectrum were analyzed. As a basic, small-scale experiment, physical dissimilarities were not adjusted for. Nevertheless, the ground vibration amplitude and low-frequency waves mimicked real-world seismic vibrations.

Key words : deep-seated landslide, seismic wave, seismic characteristics, model experiment

1. はじめに

山間部で発生する深層崩壊等の大規模土砂移動を検知することは防災上重要であるが、従来から大規模土砂移動に伴い発生した地盤振動を遠く離れた地点で観測できることが知られている(例えば¹⁾)。崩壊型土石流の流下に伴う地盤の振動観測記録を規模や波形、周波数分布など種々の面から検討するとともに、過去の地盤振動事例から土石流と崩壊・地すべりとの発生源の違いによる地盤振動特性を整理した研究²⁾では、土砂移動に伴う地盤振動特性として、土石流に起因する場合は20~40 Hz、深層崩壊の場合1~3 Hzが卓越する等の特性が明らかになっている。

一方、防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net³⁾や広帯域地震観測網 F-net⁴⁾、国土交通省の振動観測局が整備され、深層崩壊に伴う地盤振動が観測された事例が報告されている(例えば⁵⁾)。大角ら⁶⁾の研究では Hi-net データを解析し斜面崩壊の位置推定を計算する一方で、土石流と崩壊との土砂移動プロセスの違いによる卓越振動数の違いはすべり速度、攪乱を伴う運動、移動距離の規模に原因があると推察するに留まっている。F-net データを解析した研究⁷⁾では、0.01~0.1 Hz の低周波成分の地盤振動から求めた変位波形から土砂移動プロセスが推定できるケースがあることが示されている。深層崩壊の卓越周波数を含む周波数帯の1~7 Hz 波形と崩壊の様子を捉えたビデオカメラ画像との比較から土砂移動メカニズムを考察した研究⁸⁾では、変位波形による土砂移動完了後に1~7 Hz 波形のピークが現れ、これは破碎した崩土が対岸に衝突したときに生じる地盤振動と考察している。また過去の46の深層崩壊事例を用いて地盤振動特性を検討した研究⁹⁾では、天然ダムの形成と非形成時の卓越周波数を比較し、1~2 Hz が卓越周波数の場合に天然ダ

ムが形成される事例が多いことが報告されている。2011年の紀伊半島大水害の赤谷地区の深層崩壊において、崩壊土砂中に破碎された土砂や岩塊層が確認されている¹⁰⁾、流下土砂中の破碎された土砂が河床や対岸に衝突した時に1~7 Hz の成分が発生していると推測されている。

Hi-net 等を用いた大規模土砂移動検知においては、振動センサーの特性と交通等の人工的なノイズ除去の必要性から、1~7 Hz のバンドパスフィルターを通すことが有用であると示唆されている⁹⁾が、この周波数帯で捉えられる土砂移動プロセスと地盤振動特性との関係を理解することは、誤検知を減らし大規模土砂移動の検知精度の向上を図るために重要である。大規模土砂移動の発生頻度は低く、その上、土砂移動プロセスを映像等で詳細に捉えることは非常に困難である。

大規模土砂移動時に生起する現象の全てを正確に再現することは難しい。しかし地盤振動等いくつかの面について再現が可能となれば、稀な実現象の発生がなくても検知技術の改良を期待できる。土柱の崩壊時の斜面の振動を計測した実験¹¹⁾を除いて、室内実験で再現した事例は見当たらない。そこで本稿では、小規模な実験設備を用いて、土砂移動プロセスと振動波形、卓越周波数等の関係がこれまで観測、観察されてきた実現象時の主要な特徴を再現できるか検討した結果を報告する。

2. 実験の概要

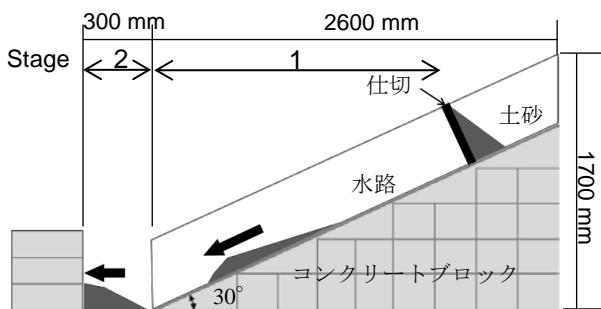
2.1 実験の目的

大規模土砂移動の発生頻度は低く、土砂移動プロセスを詳細に捉えた事例は少ないことから、実現象の観測で得られた土砂移動時の地盤振動の特性について室内実験による再現を試みた。具体的には土砂移動時の地盤振動

を測定し、既往研究から明らかとなっている振幅増大のタイミング、形状、低周波成分の卓越を確認するため、水平水路上に土砂の対岸への衝突を想定しコンクリート壁の設置の有無、また、供給土砂量及び巨礫や岩塊層を想定した鉄球を加える等の条件を変えて地盤振動の計測を行った。実験規模は幾何学的な相似からは実現象の200分の1程度である。なお、今回は大規模土砂移動に伴う地盤振動の特性について、実現象と室内実験の結果とを定性的に比較する目的としているため、力学的相似則は満たしていないことに注意が必要である。

2.2 実験装置と実験条件

実験水路の概要図を図-1に示す。水路流下時の地盤振動を直接床面に伝えるため、水路基礎はコンクリートブロックを階段状に積み、その上にアクリル製水路を設



対岸に見立てたコンクリート壁

図-1 実験水路の概要

Fig. 1 Schematic of the experimental flume

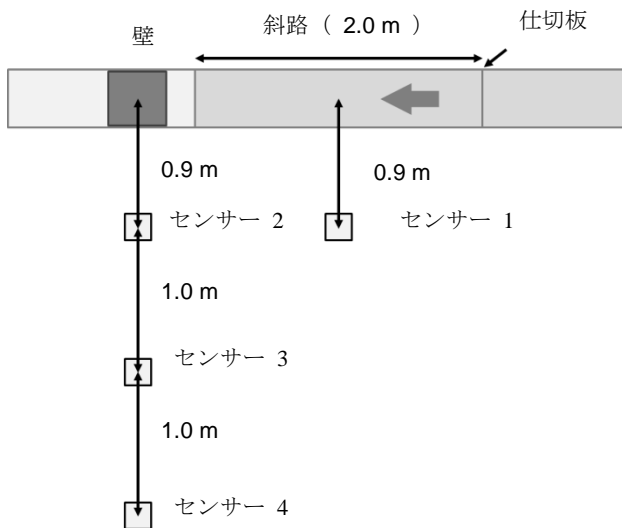


図-2 振動センサーの配置

Fig.2 Overview of the vibration sensors

置し、水路とコンクリートブロックの間はモルタルを充填して水路全体を密着させた。水路側面高さは40 cm、勾配は30度、斜路の長さは2.0 mとした。斜路の上流端には仕切板を設置し、仕切板を引き抜くことで、斜路を土砂と水が流下するようにした。また斜面水路の下流には、同じ幅の水平水路を設置した。下流水路部の長さ

は3.2 mである。立命館大学びわこ・くさつキャンパス内の実験施設にて行った。

振動の計測は測定範囲が±0.1~4 Gのサーボ型加速度計(白山工業社製JU410)により、100 Hzのサンプリングで3成分の振動測定を行った。センサー1は斜面水路の左岸に水路中心線より0.9 m離れた床面に、センサー2, 3, 4は水平水路左岸方向に水路中心線から直線上に0.9 m, 1.9 m, 2.9 m離れた床面に設置し(図-2)、水平方向の2成分、鉛直上下方向の1成分を測定した。水平成分は水路に平行な方向と水路に直角な方向とした。

土砂は直径5~10 cmの礫と直径1 cm程度の礫を混合し、これに水を混ぜ合わせたものを使用した。より大きな起振力を得るために直径10 cm、重量5 kgの鉄球3個を加えたケースも設定した。

実験ケースとしては対岸の壁の有無、土砂の重量を変化させるとともに鉄球を加え表-1に示す合計8ケースを実施した。

3. 結果と考察

3.1 土砂移動プロセスと振動波形について

振動センサーにより計測した加速度の時系列波形を図-3, 4に示す。図-3はCase 4(壁なし)、図-4はCase 8(壁あり)の波形である。図中のY軸に平行な破線は、時系列の順に土砂の移動開始時刻、続いてその右側に土砂の先端が図-3では水平水路に進入した時刻、図-4では壁に衝突した時刻、一番右側は土砂の移動が終了した時刻を示している。各時刻は撮影したビデオカメラ画像を用いて目視により判断した。図中の丸印は各センサーの最大振幅を示している。振幅は斜路移動時より下流水平水路移動時または壁衝突時に大きくなり、水路に近

表-1 実験条件

Table 1 The experimental conditions

Case	実験条件	使用材料 (kg)			水
		礫 (5~10 cm)	礫 (1 cm)	鉄球	
1	壁なし	10	10	0	20
2		20	20	0	20
3		30	30	0	20
4		30	30	15	20
5	壁あり	10	10	0	20
6		20	20	0	20
7		30	30	0	20
8		30	30	15	20

表-2 波形の最大振幅と発生タイミング

Table 2 Timings of the largest amplitudes

case	番号	水路方向								水路直角方向								鉛直上下方向							
		Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4	
		振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage	振幅 [cm/s ²]	Stage
1	1	0.06	1	0.06	2	0.05	1	0.05	1	0.05	1	0.07	2	0.06	2	0.05	2	0.19	1	0.24	2	0.11	1	0.09	1
1	2	0.07	1	0.06	2	0.06	2	0.06	2	0.05	2	0.05	2	0.05	2	0.05	2	0.14	1	0.16	2	0.10	2	0.10	2
2	1	0.06	2	0.06	2	0.05	2	0.05	2	0.06	2	0.06	2	0.05	2	0.05	2	0.15	2	0.50	2	0.14	2	0.12	2
2	2	0.06	2	0.06	2	0.05	2	0.05	2	0.06	2	0.07	2	0.06	2	0.04	2	0.15	2	0.25	2	0.12	2	0.10	2
3	1	0.09	1	0.05	2	0.05	1	0.05	1	0.05	1	0.05	2	0.04	2	0.04	1	0.18	1	0.23	2	0.11	2	0.09	1
2	2	0.08	1	0.07	2	0.06	1	0.06	1	0.06	2	0.06	2	0.04	2	0.04	2	0.22	1	0.25	2	0.13	2	0.10	2
4	1	0.27	2	0.26	2	0.13	2	0.11	2	0.12	1	0.25	2	0.16	2	0.08	2	0.63	2	9.32	2	0.80	2	0.44	2
2	2	0.17	2	0.24	2	0.10	2	0.09	2	0.15	2	0.31	2	0.17	2	0.09	2	1.95	2	4.32	2	1.85	2	0.43	2
5	1	0.07	1	0.09	2	0.06	2	0.05	1	0.06	2	0.08	2	0.05	2	0.05	2	0.15	2	0.20	2	0.09	2	0.09	2
2	2	0.05	1	0.08	2	0.05	1	0.05	1	0.08	1	0.08	1	0.06	1	0.06	1	0.14	1	0.21	2	0.11	1	0.08	1
6	1	0.07	1	0.07	1	0.05	2	0.04	1	0.07	2	0.06	2	0.05	2	0.04	2	0.15	1	0.17	2	0.11	2	0.09	2
2	2	0.08	1	0.07	2	0.05	2	0.05	2	0.09	1	0.07	1	0.07	1	0.07	1	0.19	1	0.26	2	0.11	1	0.11	2
7	1	0.10	1	0.06	2	0.06	2	0.06	2	0.08	1	0.07	1	0.07	1	0.07	1	0.22	1	0.21	2	0.12	2	0.10	2
2	2	0.08	1	0.09	1	0.06	1	0.06	1	0.05	2	0.06	2	0.05	1	0.04	1	0.23	1	0.29	1	0.12	1	0.11	1
8	1	2.15	1	0.32	1	0.10	1	0.08	1	0.13	2	0.21	2	0.14	2	0.09	2	4.00	1	4.15	2	2.59	1	0.28	2
2	2	4.58	2	1.34	2	0.28	2	0.12	2	0.17	2	0.62	2	0.66	2	0.09	2	5.20	2	7.25	2	3.17	2	0.31	2

注) 最大振幅発生タイミング: Stage 1 67回, Stage 2 125回。着色部は最大振幅を表す。

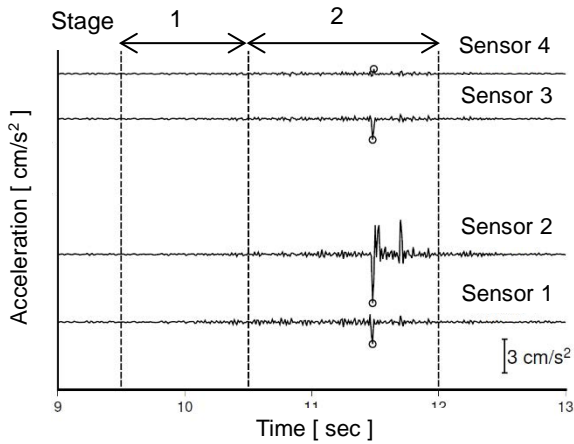


図-3 上下成分における時刻歴波形 (Case 4) 丸印はセンサーの最大振幅を示す。破線は左から土砂移動開始時刻, 水平水路進入時刻, 土砂移動終了時刻を示す。

Fig. 3 Up and down components of the acceleration waveform (Case 4)

The circle shows the waveform peak. The dotted line shows when the flow started, entered the horizontal flume, and ended.

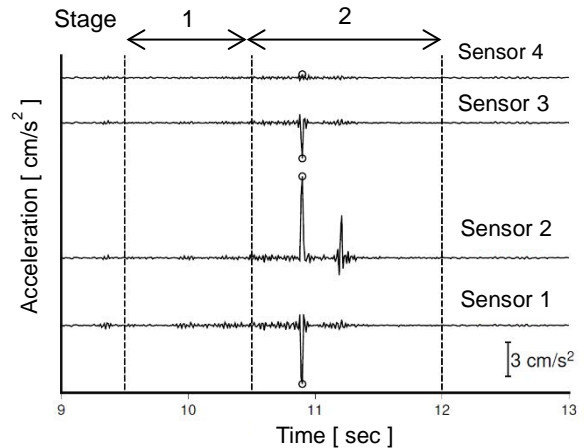


図-4 上下成分における時刻歴波形 (Case 8) 丸印はセンサーの最大振幅を示す。破線は左から土砂移動開始時刻, 衝突時刻, 土砂移動終了時刻を示す。

Fig. 4 Up and down components of the acceleration waveform (Case 8)

The circle shows the waveform peak. The dotted line shows when the flow started, hit the wall, and ended.

いもの (センサー1 とセンサー2) が大きかった。

最大振幅となる振動が発生した時刻を把握するため, 土砂が斜路移動中を Stage 1, 土砂の先端が水平水路進入もしくは壁に衝突した時点から土砂移動終了までを Stage 2 とし, 3成分において最大振幅が観測された時刻を表-2に整理した。鉄球を混入した Case 4, 8 で特に振幅が大きく, また 8 ケース×2 回の計 16 回の実験における 4 つのセンサーによる 3 成分計測結果において 192 回中 125 回が Stage 2 で最大振幅が発生していた。振幅が最も大きくなるタイミングは水平水路移動時もしくは壁衝突時であった。だが、ビデオカメラ画像によると鉄球は土砂の先端でなく中間付近を移動している様子が見られた。鉄球が最大振幅を生じさせると推測されるが目視による誤差もあり, そのタイミングについては今後の追加実験により詳細な検討を進めたい。

次に, 振幅の RMS (Root Mean Square) を求め土砂量との関係を検討した。RMS は振幅の二乗平均平方根で次式により算出した

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{y(j)\}^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, $y(j)$ は j 番目の加速度成分, N はサンプル数である。土砂は概ね 3 秒程度で移動していたため, 土砂移動開始時刻からの 2.56 秒間すなわち 256 個の加速度サンプルにより求めた。

センサー1 により計測した水路方向成分波形の RMS と供給土砂の総重量との関係を図-5 に示す。土砂重量との関係は明瞭となっていないが, 鉄球を加えた場合大きくなる傾向があった。

地盤振動の振幅特性の違いを表現する指標として, 波形の立ち上がり勾配の緩急を定量評価した。具体的には,

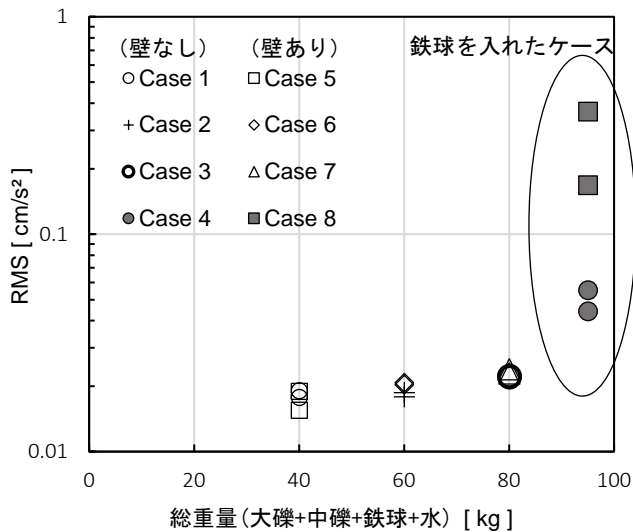


図-5 供給土砂重量とセンサー1水路方向成分のRMSの関係

Fig.5 Relationship between sediment weight and the flume directional component RMS (Sensor 1)

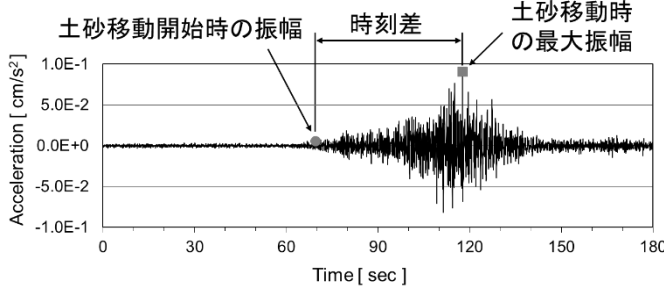


図-6 波形の立ち上がり勾配の定義
Fig. 6 Definition of a rising vibrational slope

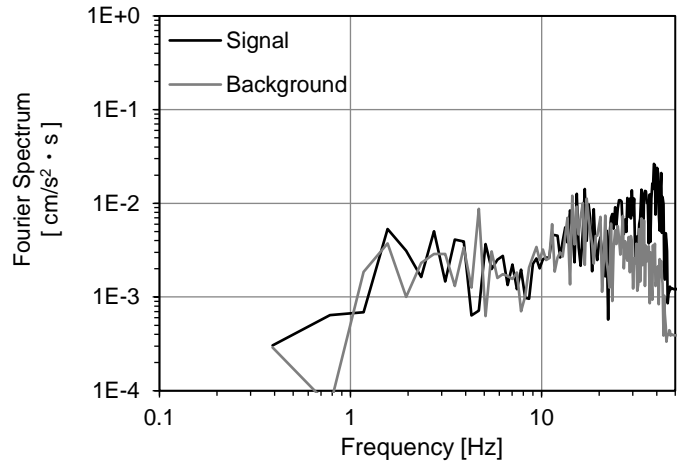


図-8 センサー2上下成分のフーリエ振幅スペクトル (Case 7)
Fig. 8 Fourier amplitude spectrum of Case 7

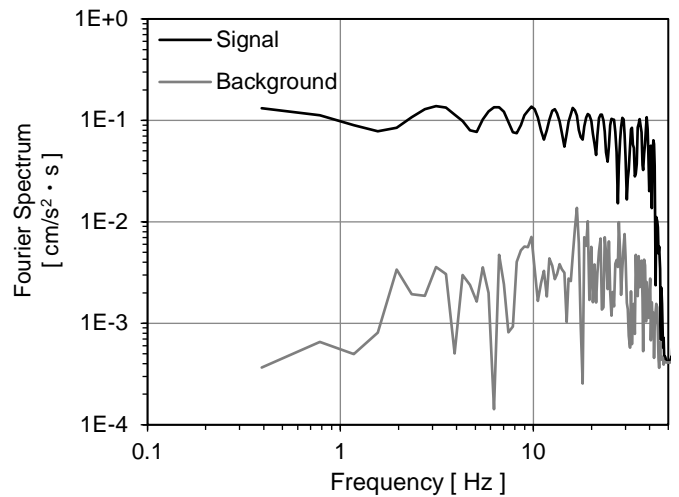


図-9 センサー2上下成分のフーリエ振幅スペクトル (Case 8)
Fig. 9 Fourier amplitude spectrum of Case 8

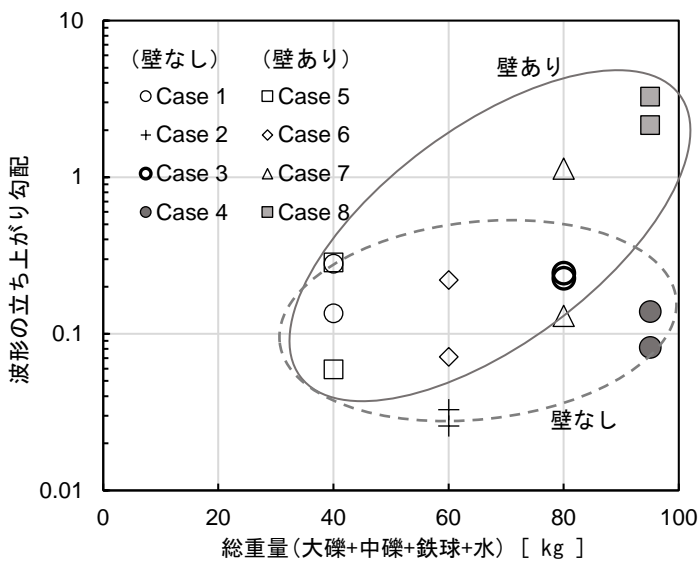


図-7 供給土砂重量とセンサー1水路方向成分の波形の立ち上がり勾配の関係

Fig. 7 Relationship between sediment weight and the rising vibrational slope of the flume directional component (Sensor 1)

既往研究⁹⁾を参考に、勾配を土砂移動開始時の振幅と最大振幅の差をそれらの時刻差で割った値とした(図-6)。図-7に供給土砂総重量とセンサー1により計測した水路方向成分波形の立ち上がり勾配の関係を示す。既往研究⁹⁾では崩土が対岸に衝突しない場合より衝突する場合の方が、波形の立ち上がり勾配が急になるとされているが、今回行った実験でも同様に、明瞭ではないものの壁ありの実験ケースにおいて、壁なしのケースに比較して勾配が急になる傾向が確認できた。

3.2 フーリエ振幅スペクトル解析による卓越周波数について

土砂移動時および常時微動のフーリエ振幅スペクトルを求めた。常時微動は土砂移動と関係なく発生している微小な地盤の揺れで、土砂移動時に発生する振動との共振の影響を確認するため算出した。常時微動は各実験開始の約10秒前の2.56秒間の振動データを用いた。Case 7, 8におけるセンサー2の上下成分フーリエ振幅スペクトル

ルをそれぞれ図-8, 9に示す。図-8では土砂移動時と常時微動のいずれも10 Hz以上で振幅スペクトルが大きく、図-9では常時微動は図-8と同傾向だが土砂移動時に10 Hz以下の周波数においても振幅スペクトルが大きい。これらからCase 8は土砂に鉄球を加えたものであり、低周波成分の振幅スペクトルが大きくなることが確認できた。一方、常時微動についてはかなりフラットな特性ではあるが約20 Hz前後が卓越周波数となっており、低周波成分は実験水路との共振の影響は受けていないと考えられる。

今回の実験により、巨礫や岩塊層の衝突のような大きなエネルギー源となる鉄球が低周波振動を発生させると推察される。一方、過去の実現象で天然ダムが形成された深層崩壊において卓越周波数が1~3 Hzとなるイベントの割合が高いとされている。小規模な水路実験ではあるが、土砂だけでなく鉄球等の剛体を用いることで振動特性をある程度再現できる可能性が示唆された。

4. まとめ

実験水路において土砂を流下させた際に生じる振動の計測結果を、実際の大規模土砂移動時の振動特性と比較し、これまでの観測で得られた土砂移動時の地盤振動特性について振幅増大のタイミング、形状、卓越周波数の観点から下記に列記する。

- 1) 振幅は斜路移動時より水平水路移動時または壁衝突時に大きくなり、最大の振幅が発生するタイミングも同様であった。観測に基づく振幅増大タイミングの知見と符合する。
- 2) 波形形状については、波形の立ち上がり勾配は壁ありの場合が壁なしの場合に比較して大きかった。このことは、既往研究で崩壊土砂が対岸に衝突した場合に波形の立ち上がり勾配が大きくなることと一致している。
- 3) 鉄球を加えた場合に低周波振動が増大することが確認できた。岩塊層の衝突のような大きなエネルギー源が低周波を発生させる可能性を推察することができ、天然ダムが形成した場合に発生した地盤振動を解析した既往研究と調和的であった。

今回の水路実験では、実現象で見られる低周波振動について、剛体である鉄球を用いることで部分的に再現できる可能性が示唆された。粒体状として挙動する土砂のみでは再現できなかったことから、低周波成分が発生する土砂移動では、移動土砂中に破碎に至っていない巨礫や岩塊層等が含まれている可能性が推察される。小規模な実験ではあるものの、移動検知のために不可欠な振動の特徴をある程度再現できる可能性が示唆された。今後は、実現象においてこれまで観測、観察されてきた土砂の移動方向と変位波形との関係や、2011年紀伊半島大水害における深層崩壊の巨礫の有無と周波数についても実験による考察を交えて再検討を進めたい。

参考文献

- 1) 水野高志・伊藤潔・諏訪浩：岡山県総社市における斜面崩壊にともなう地震動，日本地震学会ニュースレター，Vol.13, No.1, pp.16-17, 1979
- 2) 森脇寛：崩壊型土石流の流下に伴う地盤の振動特性—小谷村蒲原沢土石流—，地すべり，第3号，第36巻，pp.99-107, 1999
- 3) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：Hi-net 高感度地震観測網，<https://doi.org/10.17598/NIED.0003>，参照2020-4-22
- 4) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：F-net 高帯域地震観測網，<https://doi.org/10.17598/NIED.0005>，参照2020-04-22
- 5) Masumi Yamada, Yuki Matsushi, Masahiro Chigira, Jim Mori : Seismic recordings of Landslides caused by Typhoon Talas(2011), Geophysical Research Letters, Vol.39, L13301, doi:10.1029/2012GL052174, 2012
- 6) 大角恒雄・浅原裕・下川悦郎：2004年8月10日奈良県大塔村斜面土砂移動時のHi-net データ解析—斜面土砂移動検知への応用—，自然災害科学，Vol.24, No.23, pp.267-277, 2005
- 7) Masumi Yamada, Hiroyuki Kumagai, Yuki Matsushi, Takanori Matsuzawa : Dynamic landslide processes revealed by broadband seismic records, Geophysical Research Letters, Vol.40, 2998-3002, doi:10.1002/grl.50437, 2013
- 8) 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：振動センサデータによる大規模土砂移動現象発生タイミング及び移動プロセスの解明について，河川技術論文集，第22巻，pp.43-48, 2016
- 9) 木下篤彦・海原荘一・山路広明・廣瀬昌宏・只熊典子・浅原裕：崩壊時の地盤振動特性に着目した大規模土砂移動の検知に関する研究，河川技術論文集，第23巻，pp.441-446, 2017
- 10) 桜井亘・酒井良・奥山悠木・小川内良人・福田睦寿・佐藤美波・海原荘一・只熊典子・藤原康正：河道閉塞の内部構造により生じる水文・浸食特性の違いと対策上の留意点，砂防学会誌，Vol.68, No.3, pp.21-30, 2015
- 11) Maxime Farin, Anne Mangeney, Julien de Rosny, Renaud Toussaint, Phuong - Thu Trinh : Link Between the Dynamics of Granular Flows and the Generated Seismic Signal: Insights From Laboratory Experiments, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 123, 1407-1429, <https://doi.org/10.1029/2017JF004296>, 2017

地すべり対策工の効果の簡易的な検証方法の提案

Proposal of a simplified method for verifying the effectiveness of landslide mitigation measures

岸畑明宏 ^{a)*}, 榎原伴樹 ^{a)}, 崎山朋紀 ^{a)}, 坂口隆紀 ^{a)}, 木下篤彦 ^{b)c)}

Akihiro KISHIHATA, Tomoki ENOHARA, Tomoki SAKIYAMA, Takaki SAKAGUCHI and Atsuhiko KINOSHITA

Key words : Continuous rainfall, Extensometer, Groundwater level

キーワード : 連続雨量, 地盤伸縮計, 地下水位

1. はじめに

近年、全国的に豪雨等を起因とする斜面災害が多発しており、和歌山県内においても道路のり面を含め地すべり災害が多数発生している。これらの災害に対して適切な対応を取るためには、対策工の施工前の段階から地下水位や斜面変状等の観測を一定期間行うことが重要である。また、再度の被災を予防するためにも、対策工施工完了後も観測を継続し、対策工の効果を検証することが重要である。

これまでの地すべり対策工の効果を検証する手法の研究として、石田ら¹⁾は、土壌雨量指数・72時間実効雨量とボーリング孔の地下水位との関係から、地下水排除工の効果と地すべりの安定性を推定する手法を提案している。木下ら²⁾は、雨量とボーリング孔の地下水位の観測結果を基に、積算雨量と積算水位の関係式を求め、対策工施工前後の傾きの変化から、地下水排除工の効果を判定する手法を提案している。川上ら³⁾は地附山地すべりの地下水排除工の効果を排水トンネル工や集水井工での排水量と降水量との関係で整理している。木下ら⁴⁾は、明暗渠工・集水井工・ボーリング孔などでの水質の調査結果から、地下水排除工の効果を推定する手法を提案している。その他、計算によって、地下水排除工の効果を再現し、検証した事例もある⁵⁾⁻⁸⁾。また、地すべり対策工施工箇所での再度の地すべりに直接焦点を当てた研究事例としては、福田ら⁹⁾による研究がある。彼らは再活動地すべりへの効果的な対策として、地すべり面の変位量と地下水位の観測データを基に「限界間隙水圧」を推定しておくことを提案している。

著者らは、道路のり面を含む和歌山県内で発生する地

の依頼を受け現地調査を行い、ハード・ソフト面に対する助言を行っている¹⁰⁾⁻¹²⁾。その際にこれら既往の研究による調査手法を提案することもあるが、実際になされることは少ない。その理由として、調査内容(観測データの分析やシミュレーションなど)が難解であること、調査に予算がかかることが挙げられる。これらを踏まえ、地すべり対策のための調査においては、調査に必要な予算が少なく済み、コンサルタント等の専門業者に過度に頼らなくても行政職員でも簡易的に分析が可能な方法も求められている。また、観測データの分析結果は、首長や一般職員にも理解してもらい易く、住民の警戒避難を検討する上で判断可能なものであることも重要であると考えられる。そこで本稿では簡易的な対策工の効果の検証手法について提案し、和歌山県内で発生した地すべりの観測結果を分析した事例について報告する。

2. 本稿で提案する簡易的な地すべり対策工の効果検証手法

図-1に本稿で提案する地すべり対策工の簡易的な効果検証手法の模式図を示す。降雨イベント毎に、X軸に総雨量を、Y軸に各降雨イベントにおける水位上昇量や伸縮計変位量をプロットし、その近似直線を用いる。木下ら²⁾の手法ではX軸に積算雨量を用いているが、その定義がやや複雑なことから、ここでは簡易的に土砂災害警戒情報のCLライン検討時¹³⁾に用いる「一連の降雨」の定義である「前後に24時間以上の無降雨期間があるひとまとまりの降雨(連続雨量)」を総雨量として採用した。

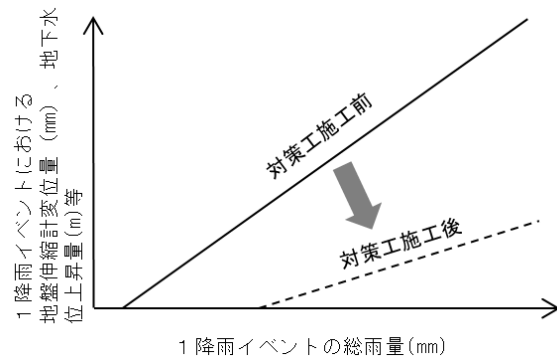


図-1 地すべり対策工の効果検証手法イメージ図

* 連絡著者 / corresponding author

a) 和歌山県土砂災害啓発センター

Wakayama Sabo Research and Education Institute

〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6

3027-6 Ichinono, Nachikatsuura Town, Higashimuro County,

Wakayama Prefecture

b) 国土交通省国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management

c) 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

Sediment Disaster Prevention Technology Center

Y 軸についても、木下ら²⁾の手法では積算水位としていたが、本稿では1降雨イベントによる水位上昇量や地盤伸縮計の変位量としている。なお、近似直線には変位量が0となった連続雨量の最大値までを傾き0の直線とし、これを超える連続雨量による変位量に対しては、傾き0の直線の終点を通る最小二乗法に基づく近似直線を採用した。この近似直線の対策工施工前後のデータを比較し、対策工の効果を確認するものである。

3. 地すべり対策工の効果検証事例

近年和歌山県内で発生した地すべりのうち、対策工施工前からの観測データが整っている3地区について検証を行った。図-2に検証箇所的位置図を示す。今回検証を行った3箇所については、雨が止んだ後も伸縮計で観測された変位や最高水位を示す場合が見られ、それらは降雨後24時間以内には収まっていることが確認できたため、降雨後24時間までを含めた観測結果について1降雨イベントにおける変位量として整理し、分析を行った。

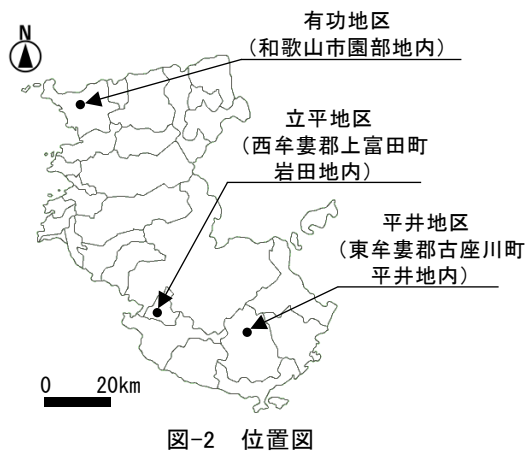


図-2 位置図

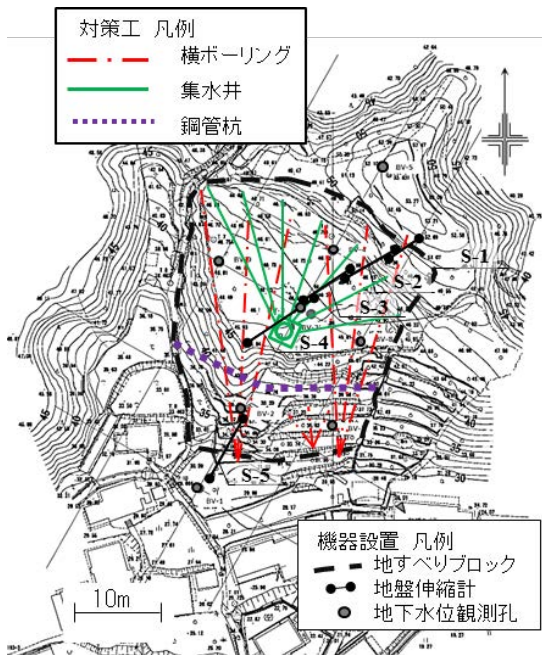


図-3 観測機器設置状況 (立平地区)
S-Oは地盤伸縮計のナンバーを表す。

3.1 立平地区地すべりについて

立平地区は和歌山県南部の西牟婁郡上富田町岩田地区内に位置している。第3紀堆積岩類・田辺層群(朝来累層)の分布する地域で、泥岩優先の砂岩泥岩互層で構成されている。2016年7月に亀裂の存在が確認され、その後伸縮計等により変位の監視が行われていた。2017年6月21日の降雨により最大17mm/日の変位量が確認され、その後も降雨による変位が観測され、危険性が高まったため地すべり対策が実施された。現地調査の結果、地すべりの規模は幅約60m、斜面長約70m、深さ約12mであることが確認された。図-3の平面図に地すべりブロックお



写真-1 斜面頂部での変状 (立平地区)

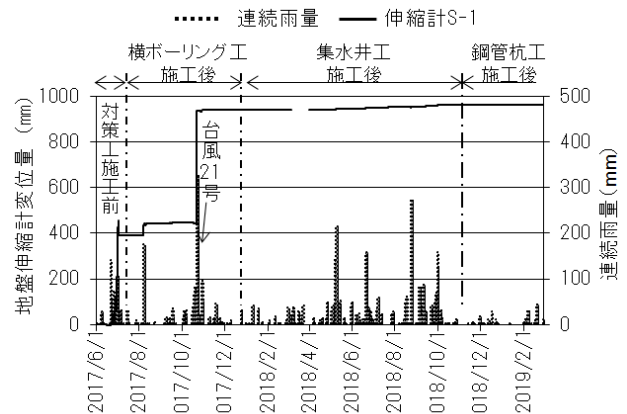


図-4 地盤伸縮計観測結果 (立平地区:S-1)

● 対策前 ○ 横ボーリング工施工後
△ 集水井工施工後 □ 鋼管杭工施工後
— 近似線(対策前) — 近似線(横ボーリング工施工後)
- - 近似線(集水井工施工後) ※鋼管杭工施工後についてはデータ不足のため近似線なし

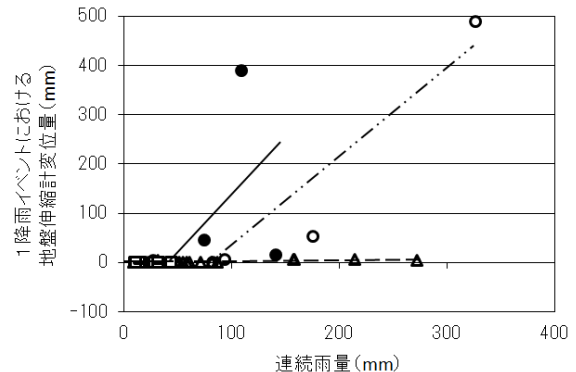


図-5 連続雨量と地盤伸縮計変位量の関係 (立平地区)

よび観測機器設置状況を示す。

応急対策として被災直後の2017年7月に横ボーリング工(15m×3本, 60~70m×4本)が施工された。また、その後恒久対策として集水井工(1基)及び鋼管杭工(6~12m×23本)が計画され、それぞれ2018年1月、2018年12月に完成した。

3.1.1 立平地区の観測結果

図-4に斜面頂部に設置した地盤伸縮計S-1の観測結果を示す。2017年6月21日の総雨量142mm(和歌山県朝来観測所)の降雨では15.5mmの変位量だったが、6月30日~7月1日にかけての総雨量110mmの降雨では362.4mmの活発な地すべり活動が観測された。一方、横ボーリング工施工後の8月6日~7日にかけての総雨量176mmの降雨では54.1mmと変位量が低下したが、10月の台風21号の総雨量327mmの降雨の際には489.8mmと大きな変位量が観測され、更なる対策工の必要性が確認された。集水井工施工後には降雨による伸縮計変位量が大きく低下し、2018年5月6日~9日の総雨量215mmの降雨では5.4mmの変位量が、8月23日~24日の総雨量273mmでは1.7mmの変位量が確認された。鋼管杭工完成後は大きな雨がなかったものの、2019年2月6日の総雨量32mmの降雨では0mmの変位量であった。

3.1.2 立平地区における対策工の効果について

図-5に本稿で提案する手法を用いた地すべり対策工の検証結果を示す。Y軸には対策工の施工前から観測が実施され、降雨に対して最も大きな反応を示した斜面頂部の地盤伸縮計S-1の観測結果を用いた。前項の降雨を含む、総雨量10mm以上を記録した降雨について、その期間の伸縮計変位量の関係をプロットした。

対策前と横ボーリング工施工後の近似直線を比較すると、施工後には連続雨量約80mmまで変位量が見られず、また、直線がX軸の正方向へ移動していることが確認できた。これは、横ボーリング工によって一定量の排水効果が得られたものと推察される。

一方、集水井工施工後と鋼管杭工施工後では近似直線の傾きは大きく減少し、対策工によって地すべりが安定化し総雨量増加に対する変位量増加が抑制されたことが確認できた。ただし、連続雨量270mm程度までしか検証できておらず、今後も継続して調査が必要である。

3.2 有功地区地すべりについて

有功地区は和歌山市の北部に位置し、1970年代頃に造成された団地内を通る市道の切土のり面及びその上部斜面で地すべりが発生した事例である(写真-2)。中生代白亜紀後期の和泉層群の信達累層が分布し、基盤岩の信達累層は砂岩泥岩互層よりなる。また、当該地区の南方には中央構造線活断層系の一部である根来断層が分布している。現地調査の結果、地すべりの規模は幅約40m、斜面長約42m、深さ約10mであることが確認された。

2017年10月の台風21号に伴う豪雨(総雨量415mm:和歌山県六十谷観測所)によりのり面下部の擁壁の傾倒

や開口クラックが発生し、擁壁前面への大型土嚢の設置等の応急対応や地盤伸縮計の設置等の監視体制の確立がなされた。その後、孔内傾斜計による地中変位計測や地下水位観測が行われていたが、2018年7月に総雨量270mmの降雨により変状が拡大した。図-6の平面図に斜面変状の状況と観測機器設置状況を示す。2018年7月20日~25日の間に応急対策として横ボーリング工が施工され、その後恒久対策としてアンカー工が施工された。

3.2.1 有功地区の観測結果

図-7に地盤伸縮計の観測結果を、図-8に地下水位観測結果を示す。地盤伸縮計の観測結果について、2018年7月4日~7日の総雨量270mmの降雨の際に累積680mmの変位を記録している。その後の横ボーリング工の施工前までの間は約0.5~1mm/日の変位量が確認できるが、施工後は約0.005mm/日程度に沈静化している状況が確認できた。地下水位について、2018年7月の豪雨の際に水位観測孔が破断したため一部のデータが欠測している。その影響でBor.2についてはGL-9.0m付近で破断しており、GL-9.0m以深に水位がある場合は観測できない状況となった。

3.2.2 有功地区の対策工の効果について

地盤伸縮計と地下水位の観測結果について、本稿で提案する手法を用いて対策工の効果を検証した結果を図-9



写真-2 斜面頂部での変状(有功地区)

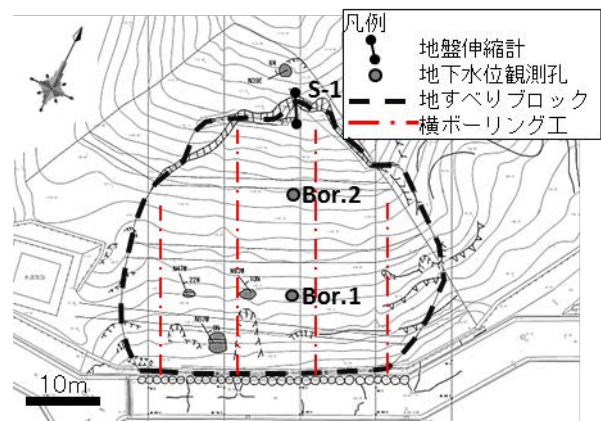


図-6 平面図(有功地区)

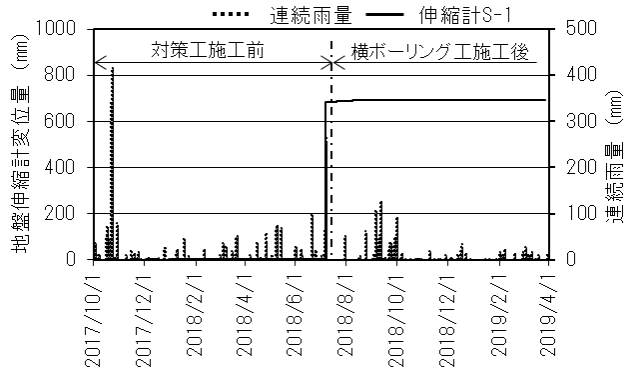


図-7 地盤伸縮計観測結果（有効地区）

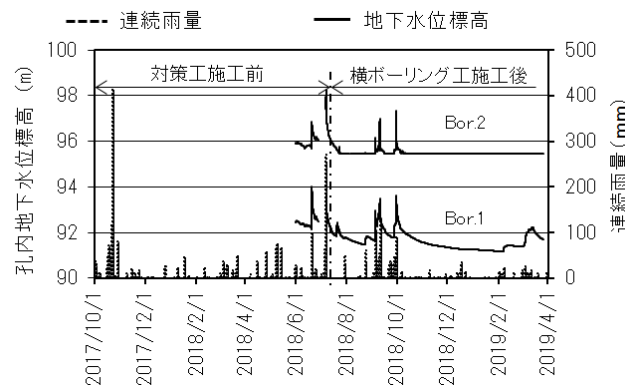


図-8 地下水位観測結果（有効地区）

～11 に示す。総雨量 10mm 以上の降雨イベントについて集計を行った。地盤伸縮計については、2018 年の 7 月の降雨（総雨量 270mm）を除いては大きな変位は見られず、横ボーリング工の施工前後ともに総雨量 130mm 程度までの降雨に対しては大きな変位は見られない。また、地下水位については、各孔ともに同程度の降雨に対する地下水位の上昇量が小さくなっている状況が確認できた。図-11 の観測孔 2 (Bor. 2) の結果において、横ボーリング工施工後の総雨量 92mm の降雨の際に、横ボーリング工施工前の 100mm の降雨の際より高い水位を記録している。これは 2018 年 9 月 29 日から 30 日にかけての降雨の際の最高水位であったが、当該降雨イベントより前の降雨により水位が上がり、降雨開始の時点で地下水位が下がり切っていなかったことに起因すると考えられる。

また、横ボーリング工施工後は、地すべり発生時や大きく変位が発生した 2018 年 7 月の規模の降雨（総雨量 270mm）を経験していないため、引き続き観測を継続し、対策工の効果を確認した上で必要に応じて追加の対策を検討する必要がある。

3.3 平井地区地すべりについて

平井地区は和歌山県南部の東牟婁郡古座川町内に位置し、平井川に隣接する町道を含む斜面で地すべりが発生した事例である（写真-3）。四万十帯牟婁層群が分布し砂岩、泥岩および砂岩泥岩互層で構成されている。2018

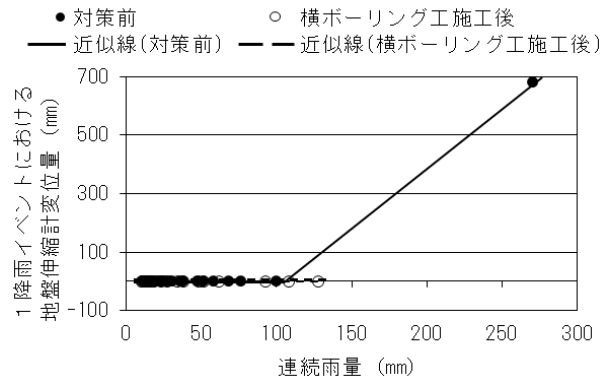


図-9 連続雨量と地盤伸縮計変位量の関係（有効地区）

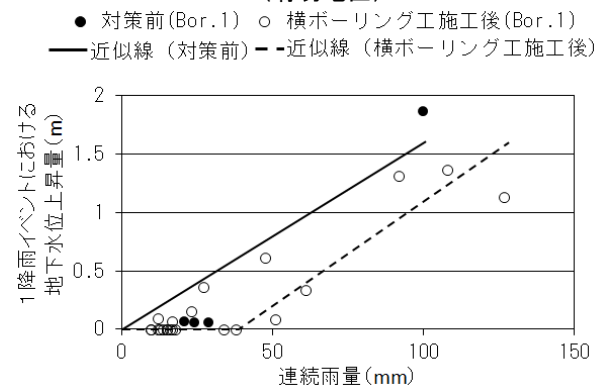


図-10 連続雨量と地下水位上昇量の関係（有効地区 Bor. 1）

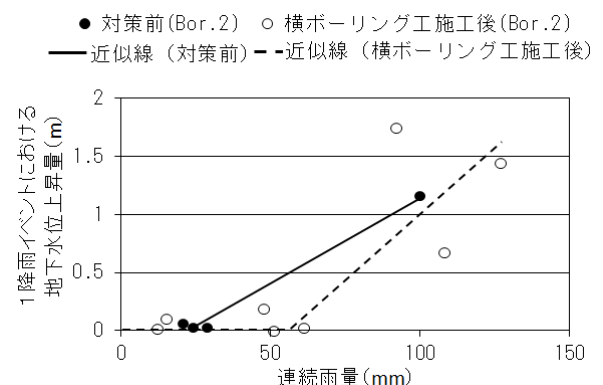


図-11 連続雨量と地下水位上昇量の関係（有効地区 Bor. 2）

年の台風 20 号に伴う豪雨（総雨量 535mm：和歌山県平井観測所）により地すべりが発生し、地盤伸縮計とパイプひずみ計による監視及び町道の通行止め規制が取られていた。現地調査の結果、地すべりの規模は幅約 50m、斜面長約 75m、深さ約 15m であることが確認された。図-12 の平面図に地すべりブロック及び観測機器設置状況を示す。応急対策として 2019 年 4 月下旬に横ボーリング工（25～30m×10 本）が施工され、恒久対策については現在計画が検討されているところである。

3.3.1 平井地区の観測結果

設置した地盤伸縮計の中で最も大きな動きを示した S-2 の観測結果を図-13 に、地下水位の観測結果を図-14 に示す。

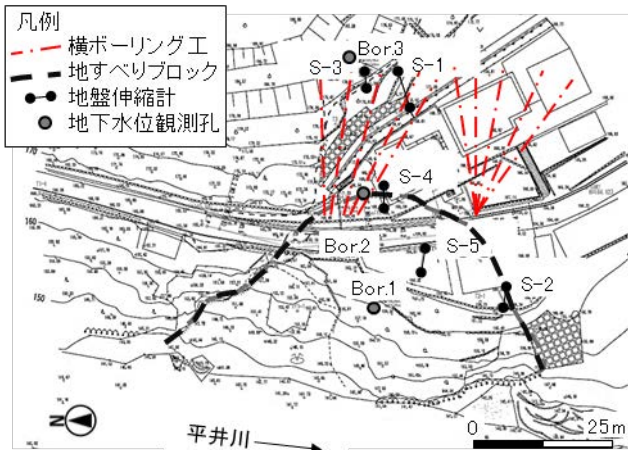


図-12 平面図（平井地区）



写真-3 斜面端部での崩壊状況（平井地区）

地盤伸縮計の観測結果について、2018年の9月末から10月上旬にかけての降雨に対してはやや顕著な動きが見られたが、その後は0.02mm/日程度の動きを示していた。しかし、2019年8月12日～17日にかけての台風10号に伴う豪雨（総雨量459mm）の際は19.5mmの変位量を示した。また地下水位については地すべりブロック内のBor.1では大きな変位は見られなかったが、地すべりブロック上部のBor.2,3では5～8m程度の大きな地下水上昇量が確認できる。

3.3.2 平井地区の対策工の効果について

図-14～16に総雨量に対する地盤伸縮計や地下水位計の変位量を整理し、対策工の効果を検証した結果を示す。

地盤伸縮計S-2の結果（図-15）について、横ボーリング工の施工前後を見比べると、同程度の規模の降雨に対しては変位量が概ね下回っていることが確認でき、総雨量360mm程度までの規模の降雨に対しては横ボーリング工の効果があることが推察できる。しかし、総雨量459mmの降雨の際には変位量が大きくなり、これらの結果から360mm～460mmの間に閾値があり、これを超える場合には今後も地すべりが発生する恐れがあることが推察できる。

また、地下水位の観測結果について、Bor.3（図-17）では近似線の傾きは小さくなっていることを確認でき、図-15の地盤伸縮計変位量の観測結果と併せて検証すると、横ボーリング工による地すべり抑制効果があること

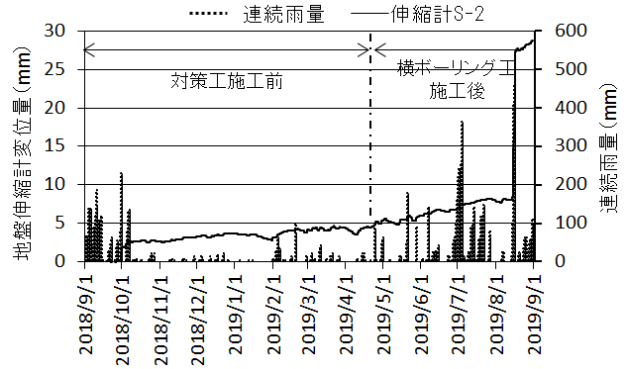


図-13 地盤伸縮計観測結果（平井地区 S-2）

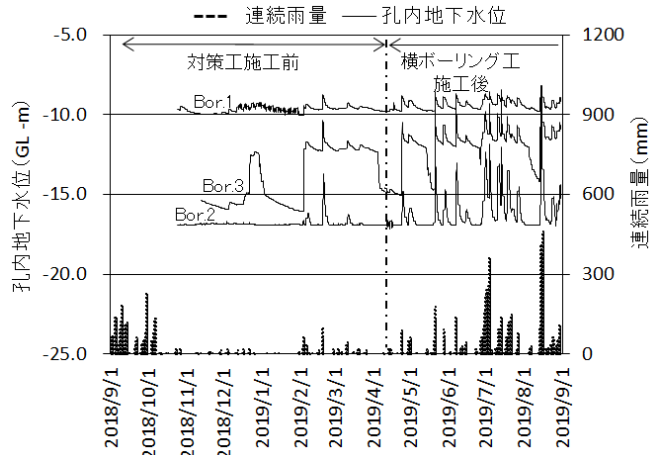


図-14 地下水位観測結果（平井地区）

が推察できる。

一方、Bor.2（図-16）、3とも地下水位の上昇が確認されない最大の連続雨量には施工前後で大きな差は確認されず、これは、更なる地下水排除工を行うことで地下水位の上昇を抑える余地があることが示唆される。

4. おわりに

本報告では、総雨量と各降雨イベントにおける変位量や最高水位の関係を整理し、対策工施工前後の結果を比較することによる、地すべり対策工の効果の簡易的な検証手法について提案した。和歌山県内で発生した地すべり災害を事例として対策工の効果の検証を行ったが、簡易的に対策工の効果の検討を行う方法の一つとして、本手法は有用であると考えられる。

ただし、次の点には注意が必要と考える。

- ・先行降雨の影響により、降雨イベント開始時点で地下水位が高い場合は、対策工の効果をうまく表現できない恐れがある。
- ・特に降雨による地下水位の上昇が比較的遅い場合などは、現場毎の特性を考慮し、1降雨イベントに対する観測データの取得期間を設定する必要がある。
- ・今回の事例においては、総雨量10mm以上の降雨に対する地盤伸縮計変位量や地下水位の関係を近似直線により表し評価したが、地下水位の上がり方等の特性に応じ、評価対象範囲を調整することも検討する必要がある。

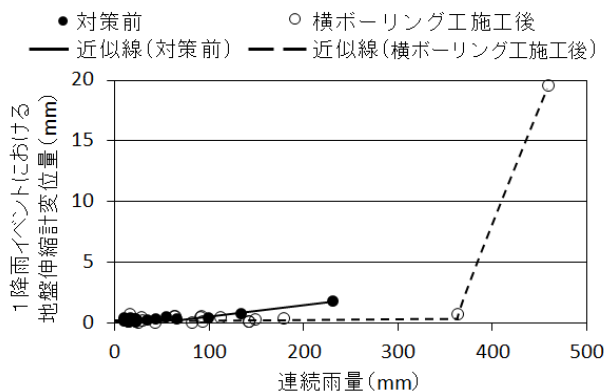


図-15 連続雨量と地盤伸縮計変位量の関係
(平井地区 : S-2)

いずれにせよ、地すべり対策の効果を検証するためには、兆候確認後早期に観測機器を設置し、対策工施工後も出水期を含む一定期間の観測の継続が重要である。今後、他の地区の事例についても検証するとともに、今回は地盤伸縮計と地下水位の観測結果により検討を行ったが、孔内傾斜計等でも同様の検証を行いたい。

謝辞

本発表にあたり、和歌山県西牟婁振興局建設部、和歌山市役所都市建設局道路管理課、古座川町役場建設課から資料の提供等ご協力をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 石田優子・木林幹・古根川竜夫・深川良一(2018)：地下水排除工前後の地下水変動特性の分析，日本地すべり学会誌，Vol. 55，No. 4，pp. 18-23.
- 2) 木下篤彦・坂井佑介・竹本真士・小田芳照・眞弓孝之・山崎孝成(2013)：積算水位対積算雨量の関係に着目した地下水排除工の施工効果判定，地すべり学会誌，Vol. 50，No. 2，pp. 1-8.
- 3) 川上浩・内藤哲・山浦直人(2003)：地附山地すべりにおける排水工の効果，地すべり学会誌，Vol. 40，No. 3，pp. 59-64.
- 4) 木下篤彦・坂井佑介・古谷治久・滝口潤・三浦理司・井上宏(2013)：豪雪地帯の融雪地すべりにおける地下水排除工効果の検討，地すべり学会誌，Vol. 50，No. 3，pp. 35-44.
- 5) 山田正雄・鶴飼恵三・鎌田智・福田毅・小澤岳弘(2008)：亀裂等水文地質構造を反映した3次元FEM浸透流解析による地下水排除工の効果判定，地すべり学会誌，Vol. 45，No. 1，pp. 45-56.
- 6) 高野邦夫・進藤陽介・小野由紀光・須田大祐・永井和馬(2007)：狼沢すべりにおける地下水挙動と地下水排除工，地すべり学会誌，Vol. 44，No. 2，pp. 27-32.
- 7) 國眼定・太田英将・林義隆・北方泰憲(2005)：地下水モデルを用いた地下水排除工の評価方法，地すべり学

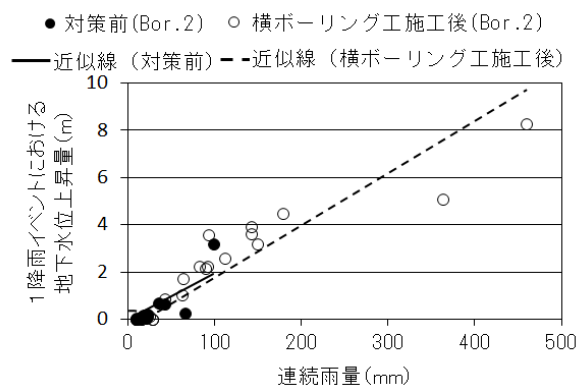


図-16 連続雨量と最高地下水位の関係
(平井地区 : Bor. 2)

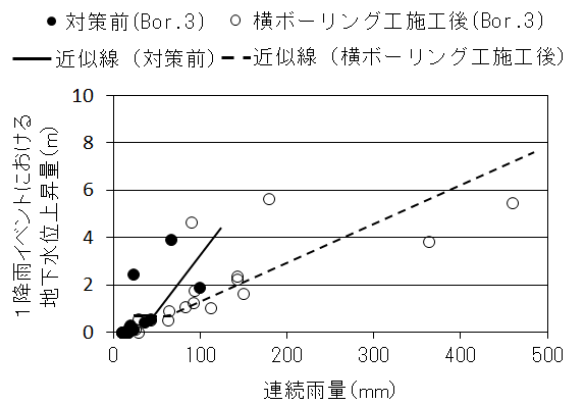


図-17 連続雨量と最高地下水位の関係
(平井地区 : Bor. 3)

会誌，Vol. 42，No. 3，pp. 32-41.

- 8) 岩堀康希・阿部真郎・吉松弘行・西真佐人・森屋洋(2005)：平根地すべりにおける地下水排除工の効果予測，地すべり学会誌，Vol. 41，No. 5，pp. 96-103.
- 9) 福田順二・山本哲朗・玉田文吾(2003)：地下水排除による再発地すべり防止対策，日本地すべり学会誌，Vol. 40，No. 4，pp. 62-70.
- 10) 森川智・岸畑明宏・坂口隆紀・榎原伴樹・崎山朋紀・木下篤彦(2019)：立平地区地すべりにおける対策工の評価方法の提案，第58回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 220-221.
- 11) 榎原伴樹・崎山朋紀・岸畑明宏・坂口隆紀・木下篤彦(2019)：地すべり対策工の効果の検証方法について，第58回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 222-223.
- 12) 榎原伴樹・崎山朋紀・木下篤彦(2018)：住民・マスコミ・首長への地すべり発生状況及び対策工の効果の分かりやすい説明方法について，第57回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 247-248.
- 13) 国土交通省河川局砂防部・気象庁予報部・国土交通省国土技術政策総合研究所(2005)：国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)，pp. 1-13.

コアストーンが分布する斜面の 水文特性に関する研究

STUDY ON THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF
THE SLOPES WHERE CORE STONES ARE DISTRIBUTED

榎原伴樹¹・筒井和男²・崎山朋紀³・岸畑明宏⁴・坂口隆紀⁵・

木下篤彦⁶・柴田俊⁷・松澤真⁸・田中健貴⁹

Tomoki ENOHARA, Kazuo TSUTSUI, Tomoki SAKIYAMA, Akihiro KISHIHATA, Takaki
SAKAGUCHI, Atsuhiko KINOSHITA, Suguru SHIBATA, Makoto MATSUZAWA
and Yasutaka TANAKA,

¹非会員 和歌山県日高振興局建設部 (〒644-0011 和歌山県御坊市湯川町財部651)

²学生会員 理修 和歌山県土砂災害啓発センター (〒649-5302和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

³非会員 和歌山県西牟婁振興局農林水産振興部 (〒646-8580 和歌山県田辺市朝日ヶ丘23-1)

⁴非会員 和歌山県土砂災害啓発センター (〒649-5302和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

⁵非会員 工修 和歌山県土砂災害啓発センター (〒649-5302和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

⁶正会員 農博 国土交通省国土技術政策総合研究所 (近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター)
(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

⁷非会員 農修 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 (〒649-5302 和歌山県
東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

⁸非会員 理博 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目22番
地)

⁹非会員 農修 北海道大学広域複合災害研究センター (〒060-8589北海道札幌市北区北9条西9丁目)

In recent years, Sediment disasters have occurred frequently and cause serious damage. In particular, debris flows due to shallow landslide have occurred in highly weathered granite distribution areas and cause severe damage. In the case that weathered residual cores of the granite flows down, the damage may be increased.

In order to reduce future damage, it is important to extract slopes that are at risk of shallow landslide. When core stones are distributed on the surface of granite porphyry, the hydrological characteristics may be different from those of general slopes.

In this study, we conducted an artificial rainfall survey on the slope of the granite porphyry distribution area, and examined the rainwater infiltration process during rainfall. We conducted the survey on slopes with and without corestone distribution and compared the results.

Key Words : core stones, shallow landslide, electric exploration, artificial rainfall

1. はじめに

近年、全国的に土砂災害が多発し、大きな被害が生じている。特に風化の進んだ花崗岩類分布域で表層崩壊を起因とする土石流が発生し、甚大な被害が生じている。また、その際には花崗岩類の風化残留核（コアストーン）が流下し、被害を大きくする事もある^{例えは1)}。和歌山県内においても2011年の紀伊半島大水害の際に、那智

川流域等において花崗斑岩分布域を中心に表層崩壊を起因とする土石流が多数発生し、大きな被害が生じた²⁾。

今後の警戒避難体制の強化や砂防事業の優先度を決定するために、表層崩壊危険斜面を抽出しておくことは重要である。従来の表層崩壊危険斜面抽出手法³⁾では、土層厚や斜面勾配、集水面積、土質強度、表層土層の透水性等を基に評価することになっている。降雨および人工散水による水の浸透過程について、比抵抗の変化から検討を行った事例⁴⁾では、パイプやコアストーンの存在が

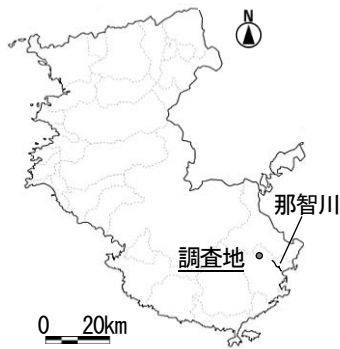


図-1 位置図

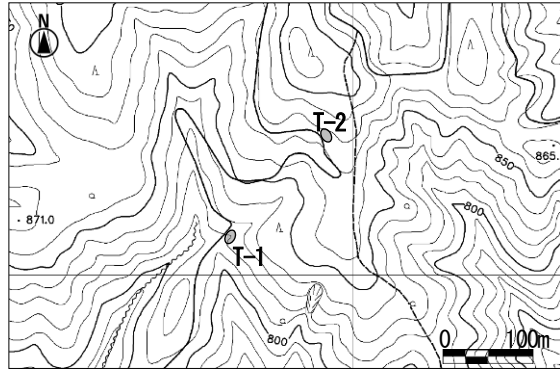


図-2 平面図

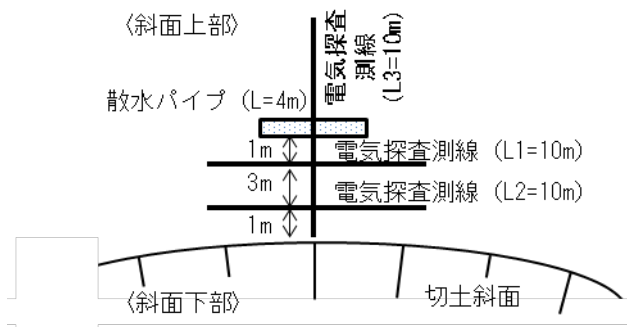


図-3 機器設置状況概要図

水の流れに影響を及ぼすことが確認されている。花崗斑岩の表層マサ土においてコラストーンが多く分布している場合は、一般的な斜面と比べて水文特性が異なる恐れがあり、土層の透水性等を適正に評価するためにはその水文特性を正しく評価し、反映する必要がある。

そこで、本研究では花崗斑岩分布域の斜面で散水試験を実施し、連続的な高密度電気探査により比抵抗の差分を捉え、降雨時の雨水浸透プロセスの検討を行った。試験はコラストーンが多く分布する斜面と均質なマサ土が分布する斜面で実施し、その結果を比較した。

2. 調査地の概要および調査方法

(1) 調査地の概要

調査は平成23年の紀伊半島豪雨の際に多くの土石流が発生した那智川流域に隣接する地区の、花崗斑岩が分布する切土斜面で実施した。調査箇所的位置図を図-1に、平面図を図-2に示す。当該箇所には風化程度の異なる露頭が点在しており、その中のコラストーンが多い風化帯



写真-1 コラストーンが分布する斜面 (T-1)



写真-2 均質なマサ土が分布する斜面 (T-2)

が分布する斜面 (T-1) と相対的に均質なマサ土が多く分布する斜面 (T-2) で実施した。それぞれの斜面の状況を写真-1, 2に示す。切土斜面の高さは概ね2~4m程度で、調査は1月の下旬から2月の中旬にかけて実施した。

(2) 調査方法

高密度電気探査を実施し、比抵抗の差分を捉えることにより、水の浸透過程の把握を行った。図-3に散水装置および電気探査測線の設置位置の概要を示す。切土斜面の頂部から約5m離れた位置に有孔塩ビパイプを設置し散水を行った。電気探査の測線は、横断方向に散水箇所1m下部 (L-1) とさらに3m下部 (切土斜面頂部から1m上部, L-2) の2測線、縦断方向に1測線 (L-3) 設けた。それぞれの測線の延長は10m、電極間隔は25cmとし、探査深度は約8mとした。散水に使用する水は近くの溪流から採取しタンクに貯蔵しポンプにて汲み上げ、流量を調整しながら散水を行った。

散水量は、それぞれの斜面で長期降雨と短期集中降雨を想定した二つのパターンにより行った。長期降雨については30mm/hから始め、2時間毎に10mm/hづつ増加させ、最終60mm/hを想定した流量を8時間、短期降雨については100mm/hを想定した流量を4時間散水した。散水

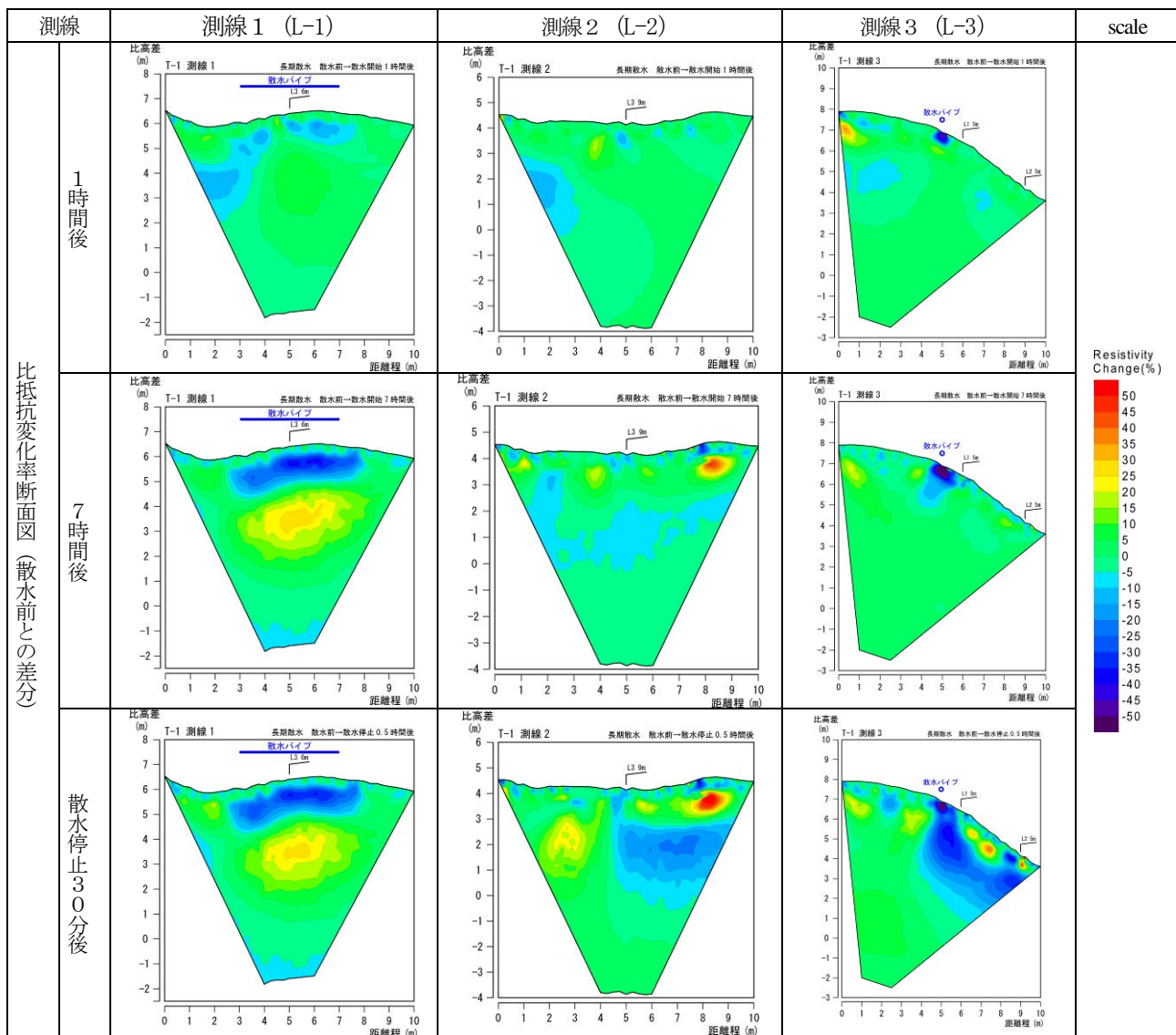


図-4 比抵抗観測結果 (コアストーンが多く分布する斜面 (T-1) , 長期降雨)

試験は、全て日中に実施し、先に均質なマサ土が多く分布する斜面 (T-2) で実施し、機器を付替えた後にコアストーンが多く分布する斜面 (T-1) で行った。2011年の紀伊半島大水害時には、3日程度降雨が続いた後に、時間雨量100mm/hを超える降雨があり崩壊が発生している⁵⁾。このため、それぞれの斜面において先に長期降雨を想定した散水を行い、翌日に短期降雨を想定した散水を実施した。短期降雨を想定した散水では、地下水の浸透経路を把握するために散水用の有効塩ビパイプの中央部を遮水し、遮水した流量と同じ量となるように濃度1.0%の硫酸アンモニウム溶液を投入した。なお、散水実施前の降雨状況は、散水開始3日前までにかけて、総雨量167mmの降雨があった (気象庁色川観測所)。

3. 調査結果

図-4から図-7に各斜面の長期降雨, 短期降雨それぞれ

の散水試験の結果を示す。それぞれ、散水前と散水開始1時間後の比抵抗値の差分、散水前と散水停止30分前の比抵抗値の差分、散水前と散水停止30分後の比抵抗値の差分を表した比抵抗変化率断面図を示す。比抵抗値の低下が見られる箇所は散水による水が浸透している箇所と考えられる。

(1) コアストーンが分布する斜面 (T-1) の浸透状況

コアストーンが分布する斜面 (T-1) における長期降雨を想定した散水の結果を図-4に示す。測線1において、距離程3m~7mの区間、高さ5m付近を中心比抵抗が低下しており、水が浸透している状況が伺える。この比抵抗値が低下している部分の下位となる距離程5~6m、高さ3~4mを中心として比抵抗値が上昇していることが確認でき、この比抵抗値の上昇は、盛土で雨水の浸透過程を検証した事例⁶⁾を参考にすると、水の浸透により地盤の間隙に存在する空気が封入され、下方に圧縮され比抵抗値が上昇していることが考えられる。また、測線2お

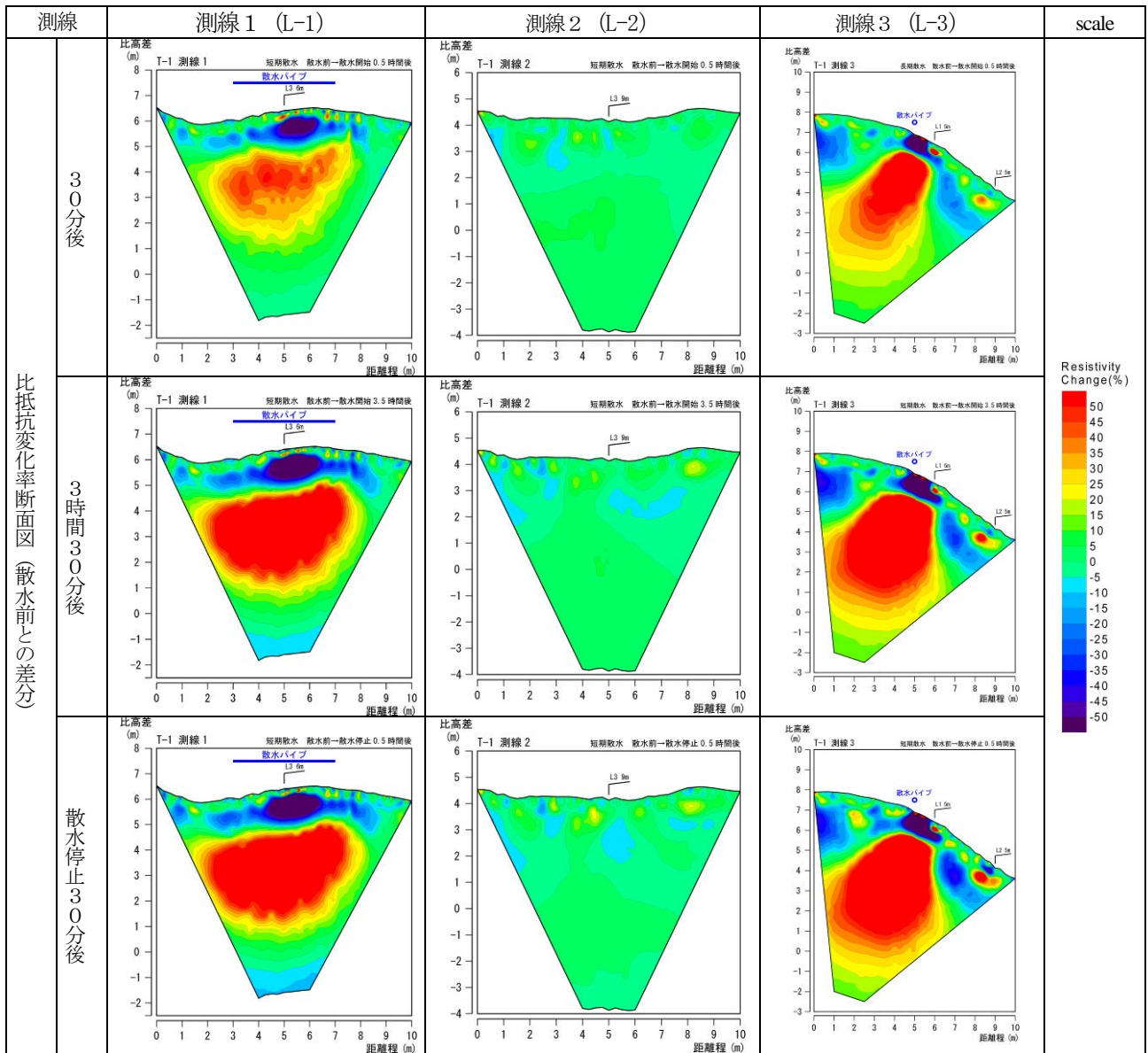


図-5 比抵抗観測結果 (コアストーンが多く分布する斜面 (T-1), 短期降雨)

よび3では散水停止30分後の比抵抗の低下が顕著であるが、これは散水停止により封入されていた空気が地上に抜ける過程で、封入空気により行く手を阻まれていた散水された水が浸透したことに起因すると考えられる。

コアストーンが分布する斜面 (T-1) における短期降雨を想定した散水の結果を図-5に示す、測線1において、距離程3m~7mの区間、高さ5~6m付近を中心として比抵抗値が低下しており、散水の影響が確認できる。この比抵抗値の低下部の下位となる距離程3~7m、高さ2~4mを中心に比抵抗値が上昇している。これも長期降雨と同様に、散水により地盤の間隙に存在する空気が封入され、下方へ圧縮されることにより比抵抗値が上昇していると考えられる。長期散水の測線2および測線3で確認できた散水停止30分後の比抵抗値が低下する様子は確認されず、これは、短期散水によって供給された水により、封入された空気が地上へ抜けることが出来なかったことに起因すると考えられる。

(2) マサ土が多く分布する斜面 (T-2) の浸透状況

相対的にマサ土が多く分布する斜面 (T-2) における長期降雨を想定した散水の結果を図-6に示す。測線1において、距離程3m~7mの区間、高さ6m付近を中心に比抵抗値が低下しており、散水の影響が現れている。また、この比抵抗値低下部の下部側方において比抵抗値が上昇している。測線2でも、浸透の影響による目立った比抵抗値の低下がみられる。測線3では、散水停止後の比抵抗値の低下が顕著で、これも散水停止により封入された空気が地上へ抜ける過程で、入れ替わるようにその間隙に水が浸透したことを捉えたものと考えられる。

相対的にマサ土が多く分布する斜面 (T-2) における短期降雨を想定した散水の結果を図-7に示す。測線1において、距離程3m~7mの区間、高さ6m付近を中心に比抵抗値が低下しており、散水の影響が確認できる。この比抵抗値低下部の周囲では著しく比抵抗値が上昇してお

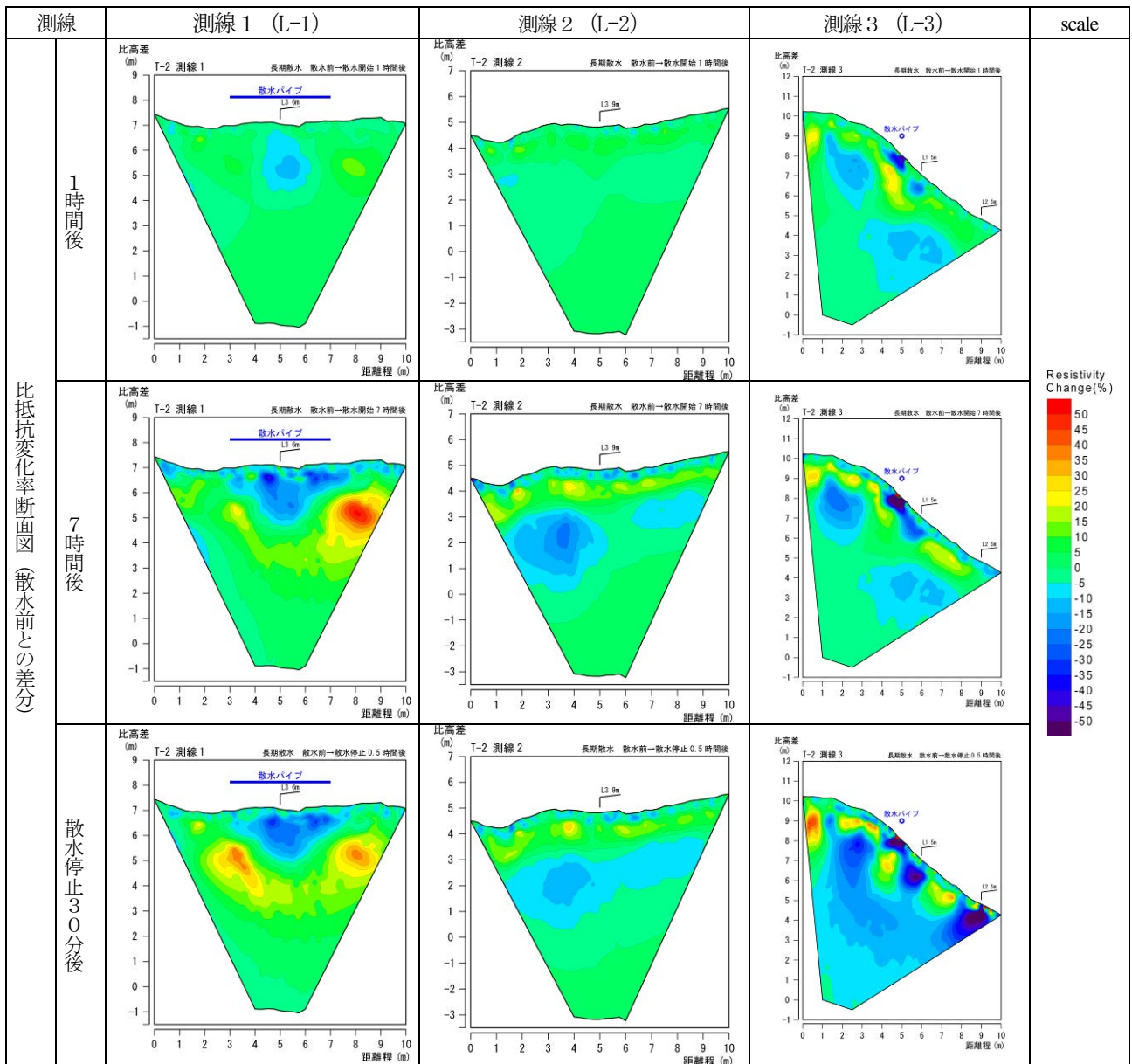


図-6 比抵抗観測結果(均質なマサ土が分布する斜面(T-2), 長期降雨)

り、これは封入空気の影響を捉えていると考えられる。測線2では散水停止30分後にかけて、高さ2~3m付近を中心に比抵抗値低下部が帯状に広がる。この帯状の比抵抗値低下部の上位に、比抵抗値の上昇部が認められるが、これは水が浸透したことにより間隙中の空気が地上へ抜ける過程で一時的に圧縮された可能性がある。測線3では散水箇所の下位で比抵抗値が上昇するが、始点側の距離程1~2m、高さ8m付近の比抵抗値の低下が顕著で、これは、斜面傾斜方向とは別の流路を捉えている可能性があると考えられる。

4. まとめ

花崗斑岩分布域のコアストーンが多く分布する斜面

および均質なマサ土が分布する斜面にて散水実験を行った。浸透水は、地表面の形状に沿い一律に流下するわけではなく、相対的に水が通りやすい水みちを選択的に流下することが分かった。本調査地の花崗斑岩は、柱状節理が発達しており、柱状節理沿いに風化が進行することによりコアストーンが形成され、最終的にはコアストーンが消失し、マサ土斜面になることが知られている⁷⁾。コアストーン斜面ではコアストーンとコアストーンの間マサ部が水みちになったと想定される。一方、マサ土斜面は、一見、均質に風化した砂質な土層に見えるが、散水試験斜面下部の切土斜面をハンマーで打撃したところ、部分的に軟質な部分が確認された。これは、柱状節理の中心部は岩石構造が残っているため相対的に硬質で、柱状節理の外周部は相対的に軟質になっていると想定される。そして、この軟質な部分が水みちとなったと推定さ

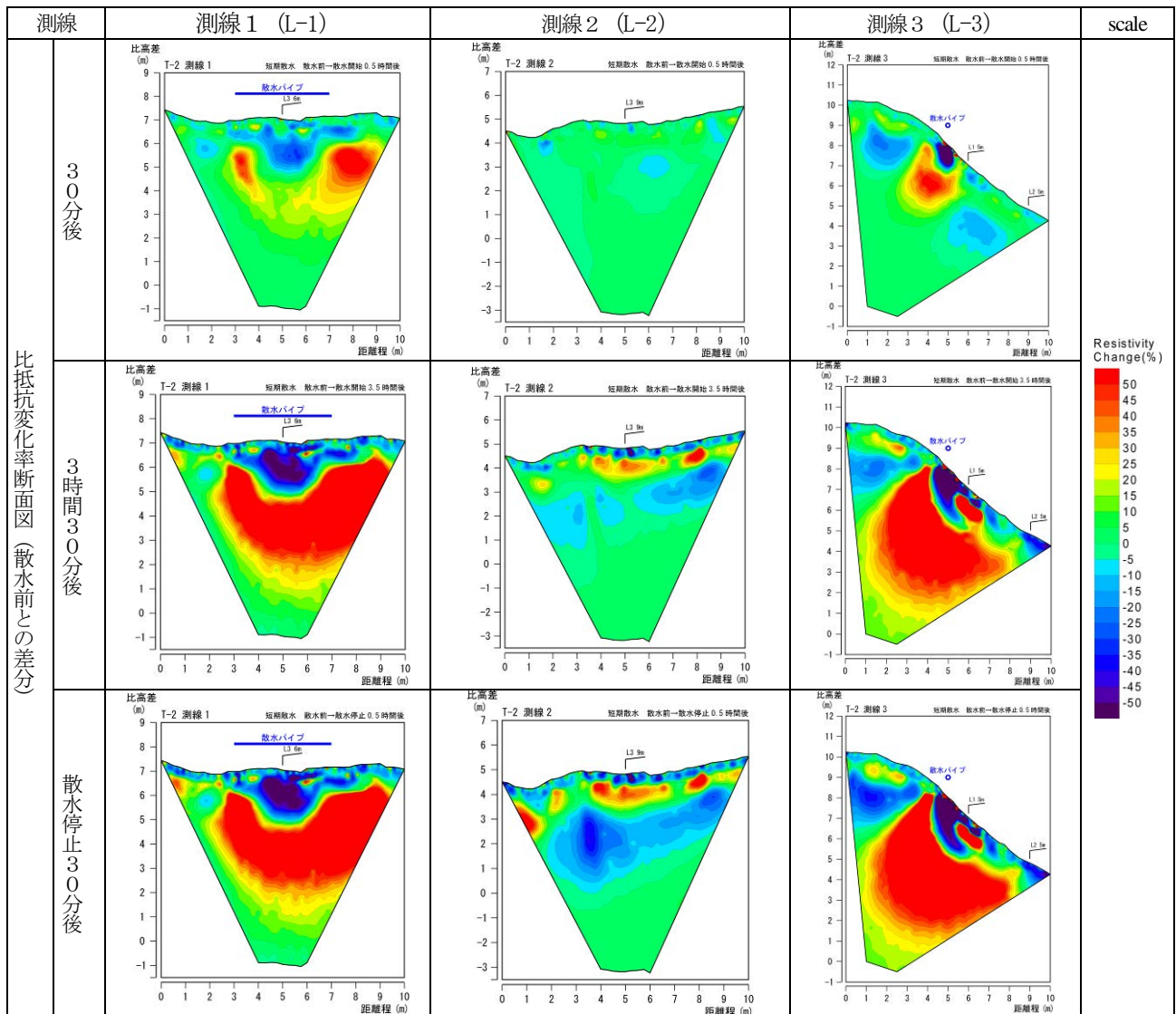


図-7 比抵抗観測結果(均質なマサ土が分布する斜面(T-2), 短期降雨)

れる。今後、コラストーンの分布、土層の透水性などの詳細調査を実施することから、コラストーンが水文特性に与える影響についてさらなる検討を行う予定である。

参考文献

- 海堀正博, 長谷川祐治, 山下祐一, 崎田博史, 中井真司, 桑田志保, 平松晋也, 地頭菌 隆, 井良沢道也, 清水 収, 今泉文寿, 中谷加奈, 柏原佳明, 加藤誠章, 島田英司, 平川泰之, 吉永子規, 田中健路, 林 拙郎: 平成30年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害: 砂防学会誌, Vol.71, No.4, pp.49-60, 2018.
- 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.
- 独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石
- 流チーム: 表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル(案), 土木研究所資料, 2009.
- 野池耕平, 小竹利明, 菅原寛明, 田中健貴, 木下篤彦, 榎原伴樹, 崎山朋紀, 松澤真, 田村友起夫, 澤田悦史, 斉藤泰久: パイピング孔周辺における人工散水による水の浸透過程の検討: 2019年度砂防学会研究発表会概要集, pp.559-560, 2019.
- 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: 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, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.37-42, 2016.
- 高倉伸一, 吉岡真弓, 内田洋平, 石澤友浩, 酒井直樹: 比抵抗モニタリングによる盛土中の水分変化の推定, 物理探査, pp.223-236, 2012.
- 平田康人: 柱状節理の発達した火成岩の組織・構造とそれに規制された球状風化メカニズム, 京都大学大学院理学研究科博士論文, pp.1-207, 2018.

(2020. 4. 2受付)



2020 Kyoto Japan

Can Repeat LiDAR Surveys Locate Future Massive Landslides?

Mio Kasai

Abstract

This study examined a topographic indicator of a massive landslide that occurred in 2011 in the Kii Peninsula, Japan. Assuming that the slope was deforming slowly based on surface roughening before the event, a roughness filter, the standard deviation of the slope angle for 3-3 cells on a 1 m digital elevation model (DEM), was used as a measure of change in the ground surface and calculated using light detection and ranging (LiDAR) data for 2006 and 2010. The images produced from the survey data showed that a major crack had already developed between a wide ridge and a lower undulating patch on the slope that subsequently became the head of the slide. The cells in which the standard deviation increased by 0.39 to 2.32 between the surveys formed a group of ripple-like features clustered in the area. The results indicate that repeat LiDAR surveys can help identify slopes in imminent danger of sliding based on the location of progressive surface roughening.

Keywords

Repeat LiDAR surveys, Surface roughness, Massive landslide

Introduction

Steep landscapes underlain by deeply weathered bedrock, such as in the crushed zone in Japan, are prone to massive landslides. Rock masses in this mountain range move downward slowly, but are constantly deforming the slope profile until an intense rainfall or earthquake triggers rapid landsliding from the ridge top. Because of their size, slides not only affect human lives, properties, and infrastructure directly but also have prolonged effects on daily lives and the economies of local communities. For disaster-mitigation planning, it is important to identify slopes in imminent danger of collapse before a triggering event occurs, by locating topographic signs of deformation. Using airborne light detection and ranging (LiDAR) surveys, previous research has demonstrated that key features are undulating patches in which cracks and troughs develop, wide, discontinuous ridges, bulging slope profiles, and small landslides or rock falls at the foots of slopes (Chigira et al., 2013). Because cracks and troughs form rough ground, a surface roughness filter can be applied to estimate the degree of slope activity (Kasai et al., 2009). In reality, however, these features can be found everywhere on topographic maps based on LiDAR surveys, probably because once they form, they remain until they erode away after the slope has stabilized. Therefore, surface roughness estimated from a single survey does not always indicate current slope activity. However, repeated LiDAR surveys might identify slopes in imminent danger of collapse. With the increasing accumulation of survey data over the last two decades, we can use the data to find dynamically changing ground surfaces associated with massive landslides.

This study examined the change in surface roughness of the slope before the 2011 Nagatono slide, on

the Kii Peninsula, Japan (Fig. 1), using LiDAR survey data obtained in 2006 and 2010. The research question is, whether repeat LiDAR surveys could locate future massive landslides. The outcome of this study would help with disaster-mitigation planning.

Study area

The 0.75 km² study area (red triangle, Fig. 1) is located in the Kii Mountains, a range underlain by crushed Cretaceous mudstones and sandstones belonging to the Shimanto Belt. The belt consisting of mildly metamorphosed sedimentary rocks extends from the Nansei Islands through Kyushu, Shikoku, Kii Peninsular, Akaishi and Kanto Mountains to the Boso Peninsula in Japan (Taira et al., 1982). The landscape is characterized by steep hillslopes averaging 37.5 degrees covered by planted *Cryptomeria japonica*. An intense storm that

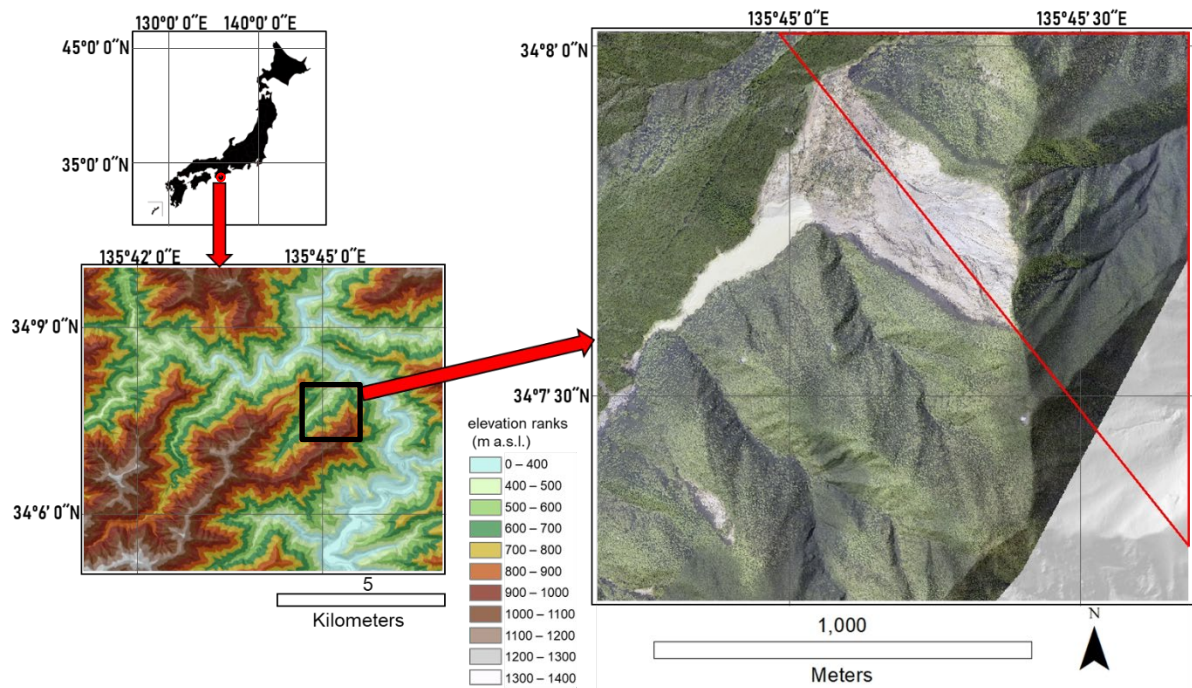


Fig. 1 Study site and the Nagatono slide. The photograph was taken in 2011. LiDAR surveys in 2006 and 2010 covered the area shown by a red triangle.

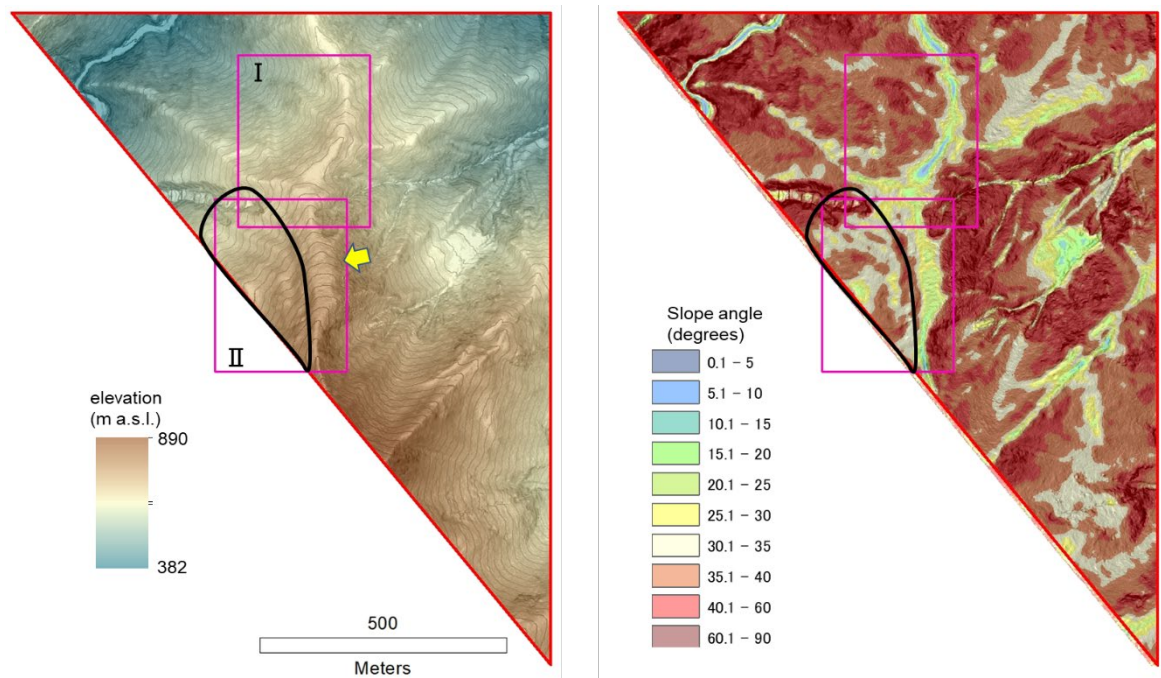


Fig. 2 Hillshade image overlain by slope gradient and elevation maps (left) and slope distribution map (right) produced by the 2006 LiDAR survey data. A wide ridge existed before the Nagatono slide (yellow arrow). A part of an undulating patch was covered by each survey in 2006 and 2010 (enclosed in black). Enlarged images of the areas of pink rectangles, I and II, are presented in Figs. 3 and 4.

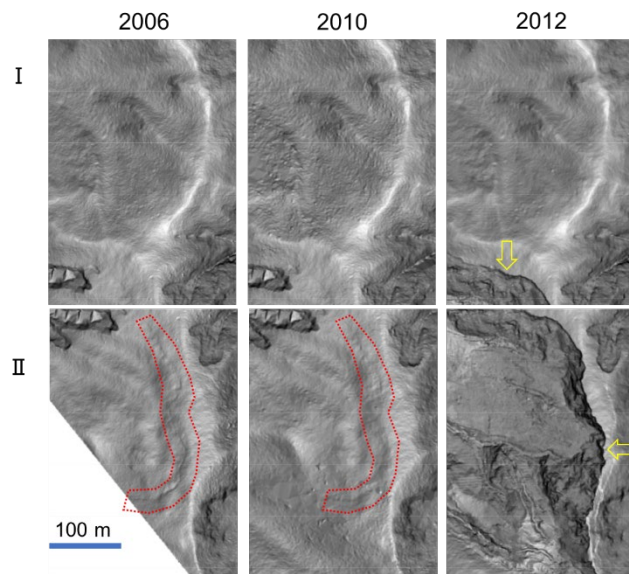


Fig. 3 Enlarged images of the I and II areas (Fig.2), produced by the 2006, 2010 and 2012 LiDAR survey data. A crack (II, enclosed in red dotted line) was evident particularly in the 2006 image before the Nagatono slide (indicated by yellow arrow).

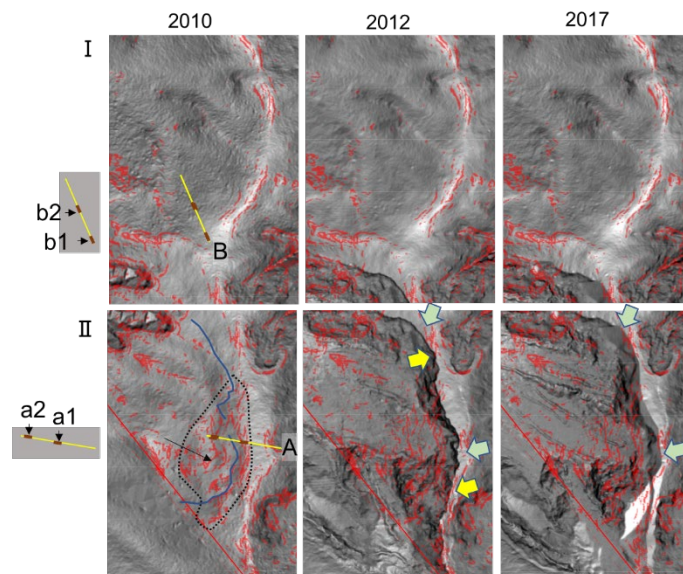


Fig. 4 Cells with standard deviations that increased by 0.39 to 2.32 from 2006 to 2010 (colored in red) on the topographic maps of the I and II areas, produced by the 2010, 2012 and 2017 LiDAR survey data. Longitudinal profiles of the sections from lines A and B (colored in brown) are presented in Fig. 5. The crack marked in Fig.3 is traced in blue. A group of ripple-like features (e.g. black arrow) appeared over the undulating patch (enclosed in black dotted line). The Nagatono slide collapsed from the edges indicated by the cells (yellow arrows) in 2012 and had progressed to another edge (green arrows) by 2017.

triggered several massive slides in the region brought more than 1,300 mm of rainfall from September 1–4 in 2011 at the Kazeya metrological station 10 km from the site (Nara local meteorological office, 2011). The mean annual precipitation at the station was 2,400 mm from

1978 to 2019. The Nagatono slide started from a wide ridge (indicated by a yellow arrow: Fig. 2) connected to an undulating patch underneath it (Fig. 2: encircled in black). The slope angles of the patch were largely below 35 degrees (Fig. 2). The total area of the slide was 220,700

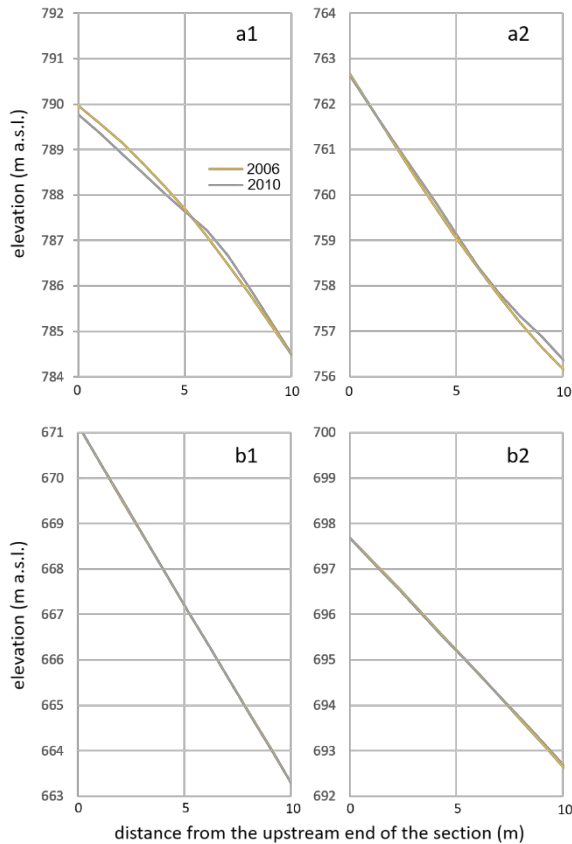


Fig.5 Longitudinal profiles of the smoothed surfaces of 10 m sections from lines A and B (Fig. 4).

m², and it yielded 4.1 million m³ of debris (Chigira et al., 2013). LiDAR surveys in 2006 and 2010 covered half of the slope that eventually formed the slide (Fig. 1), offering an opportunity to examine the topographic change before the event. The data resolution in 2006 was finer than that in 2010 (Fig. 3). The average point density of the former was 3.34 points/m², while it was 0.38 points/m² for the latter.

Methods

The resolution of LiDAR data usually differs between surveys, particularly in mountainous regions due to slope steepness and dense vegetation cover, both of which limit the number of ground points. To reduce the effects of the resolution difference on the analyses, the surface was first smoothed using local polynomial interpolation of the ground points on ArcGIS, with a semi-axis of 10 m and smoothing factor of 0.1. Then the 1 m DEM of the smoothed surface was used to estimate

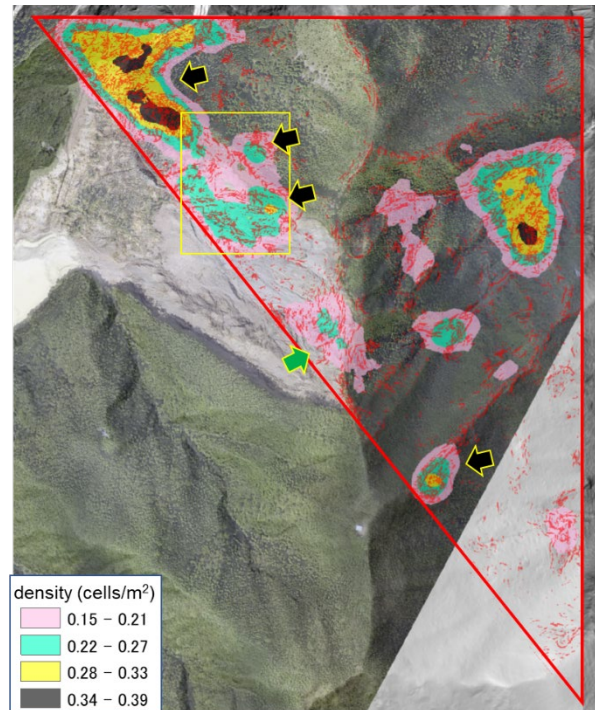


Fig.6 Cells with standard deviations that increased by 0.39 to 2.32 from 2006 to 2010 (colored in red) and clusters of the cells on the 2011 photographic image. Black arrows: clusters possibly resulting from coarse ground points. Green arrow: a cluster believed to reflect the real surface change associated with the Nagatono slide. The area of a yellow rectangle is presented in Fig.7.

the surface roughness at the time of each survey. This study used the standard deviation of slope angle for 3x3 cells as a roughness filter, as proposed by Frankel and Dolan (2007). An increase in the value means that the location became bumpier after 4 years. After selecting the range of increase in the value that represents dynamic change in the ground surface, the spatial density of the cells in this range within a 50 m radius was calculated to find clusters of such cells. Finally, the clusters were examined to determine whether they could predict the Nagatono slide.

Results and Discussion

The appearance of a major crack running underneath the wide ridge in the 2006 image (Fig. 3) was evidence that the Nagatono slide had already started to move at least 6 years before the event. Therefore, careful examination of high-resolution topographic maps can help identify slopes that are imminent dangers. The

crack was also recognizable in the 2010 image, albeit less clearly than before (Fig. 3). It is difficult to estimate the progress of slope deformation between the surveys with images only. By contrast, cells with standard deviations that increased by 0.39 to 2.32 during the period appeared as a group of ripple-like features along the crack and troughs (e.g. black arrow, Fig. 4) over the undulating patch (enclosed in black dot line, Fig. 4). Over the 4 years, the longitudinal profile of the smoothed surface of line A on the slope at the head of the Nagatono slide also changed more noticeably than that of line B on the slope where little happened in 2011 (Figs. 4 and 5). In 2012, the Nagatono slide collapsed from the edges indicated by the cells (yellow arrows, Fig. 4). By 2017, the slide had progressed to another edge on the ridge top (green arrows, Fig. 4). These combined results suggest that an increase in the standard deviation of the slope angles of neighboring cells, estimated from repeat LiDAR surveys, can show the progress of slope deformation and help locate future massive landslides and determine their extent.

However, careful review of the images is required, because the wrong surface texture may be produced if there are only a few ground points. While Fig. 6 shows that clusters of cells covered the slope where the Nagatono slide occurred, the coarse resolution of the 2010 image in the area at the flank of the slide (Fig. 7) prevented the confirmation of slope activity before the event. Alternatively, the cluster may not be related to the occurrence of the slide; other clusters resulting from the coarse resolution of data are also seen on the map (black arrows, Fig. 6). Those clusters could not be eliminated after smoothing the surface, and the presented method needs improvement for dealing with coarse datasets. In comparison, the cluster at the top of the slope, which became the head of the slide (green arrow, Fig. 6), was believed to reflect the real surface change, as indicated above. Clusters were also seen around streams. These should be ignored when trying to identify the locations of massive landslides, as progressive slope deformation usually does not allow a stream network to develop.

Conclusion

This study detected topographic changes that predicted the 2011 Nagatono slide from LiDAR surveys done in 2006 and 2010. The results suggest that a cluster of cells, indicative of a roughing surface, estimated from repeat LiDAR surveys, can predict future landslides, particularly when they appear on an undulating patch on a wide ridge. The increased standard deviation of the slope angle for 3:3 cells in a 1 m DEM proved to be a useful indicator of dynamic surface change. With higher-resolution LiDAR data, slopes that are urgent concerns can be identified more correctly, helping to

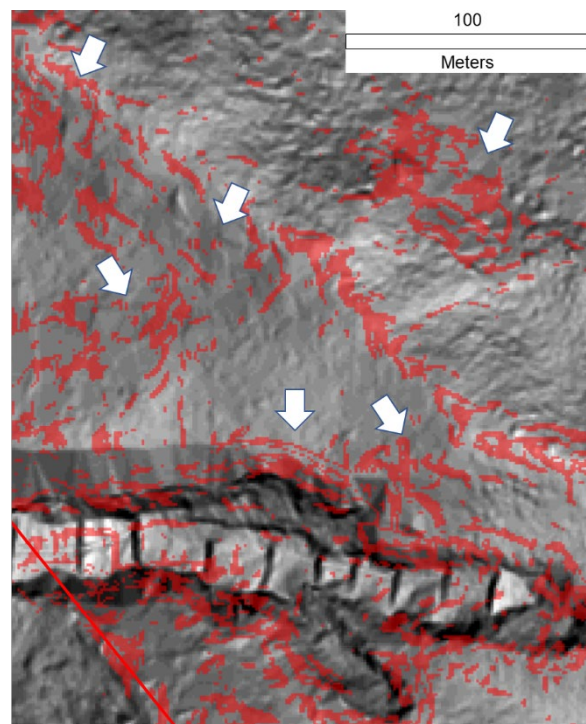


Fig.7 Topographic map produced by the 2010 LiDAR survey data for the area shown in Fig. 6 (yellow rectangle). Sparse ground points resulted in false ground texture, affecting the value of the roughness filter (e.g. indicated by arrows).

prepare for massive landslides during the next triggering event to mitigate associated disasters.

Acknowledgments

The author thanks Kinki Regional Development Bureau of Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, and Nara Prefecture for providing LiDAR survey data and orthophotographs.

References (in the alphabetical order)

- Chigira M, Thou C Y, Matsushi Y, Hiraishi N, Matsuzawa, M, (2013) Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas. *Geomorphology*. 201: 479-493.
- Frankel K L, Dolan J F, (2007) Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 112: F02025.
- Kasai M, Ikeda M, Asahina T, Fujisawa K, (2009) LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a

steep and rocky region of Japan. *Geomorphology*. 113(1): 57-69.

Nara local meteorological office, (2011). *Torrential Rain and Gale Force Winds by Typhoon No.12, Heisei 23*. URL: https://www.jma-net.go.jp/nara/kishou/pdf_files/t1112_20110908.pdf [Last accessed: 12/03/2020]. in Japanese.

Taira A, Okada H, Whitaker J H, Smith A J, (1982) *The Shimanto Belt of Japan: Cretaceous-lower Miocene active-margin sedimentation*. Geological Society, London, Special Publications. 10: 5-26.



Hokkaido University, Research Faculty of Agriculture, Kita-9
Nishi-9 Kita-ku, Sapporo 060-8589, Japan
e-mail: kasaim@for.agr.hokudai.ac.jp

2.5 北海道大学 テーマ2

奈良県赤谷西地区の重力変形斜面における降雨時のイオン濃度変化

北海道大学 広域複合災害研究センター ○田中健貴

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 小竹利明・木下篤彦・山田拓・柴田俊

応用地質株式会社 小松慎二・窪田安打・林幸一郎

1. はじめに

深層崩壊は、発生頻度は低いが、天然ダム形成・決壊による土砂流出などをもたらす、被害は大きくなるおそれがある。深層崩壊による被害を防止、低減するためには、深層崩壊が発生するおそれのある斜面（以後、危険斜面）を、事前抽出する必要がある¹⁾。危険斜面抽出方法として、渓流や湧水の電気伝導度（以後、EC）を活用する方法²⁾があるが、実際に活用する上で、危険斜面周辺でECが高い機構を解明する必要がある。これまで紀伊山地で実施されたボーリングコア溶出試験では、岩盤にCaCO₃が多く含まれ、ここから溶出するCa²⁺、HCO₃⁻がECの上昇に寄与している可能性が示唆された³⁾。一方で、実際の斜面で地下水のECが高まる時間的・空間的プロセスは明らかになっていない。そこで本稿では、重力変形斜面を危険斜面と考え、降雨後に地下水の水質分析を行い、ECや溶出イオン濃度の分布を調査した。

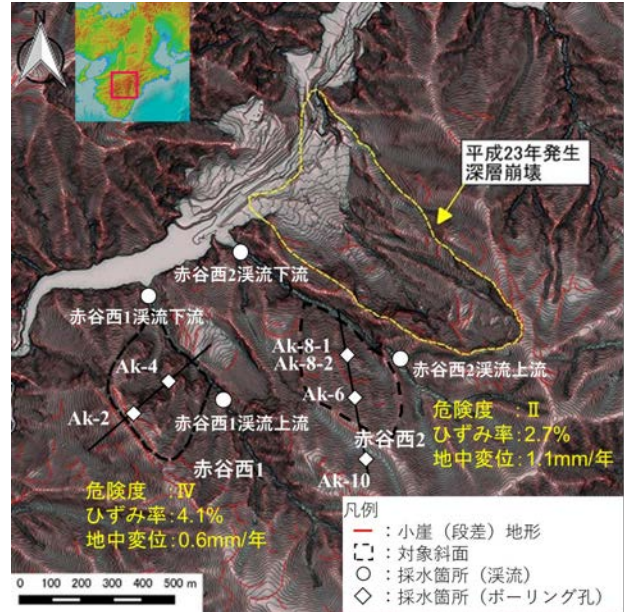
2. 調査方法

調査は奈良県五條市赤谷地区に位置する2斜面（赤谷西1、赤谷西2と呼ぶ）で実施した（図-1）。千木良（2015）による微地形に基づく危険度評価⁴⁾では、赤谷西1は危険度IV、赤谷西2は危険度IIである。また斜面の変形の程度を示すひずみ率⁵⁾は、赤谷西1が4.1%、赤谷西2が2.7%である。また、採水は図-1に示すボーリング孔利用した。ボーリング孔の深さは、Ak-2は78m、Ak-4は53m、Ak-6は85m、Ak-8-1は70m、Ak-8-2は47m、Ak-10は85mである。採水は2020年1月11日に実施した。採水前の最大時間雨量は1月8日午前8時の14.5mm/hrである。水質分析はNa⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SiO₃²⁻、pH、ECである。

3. 調査結果

1) ECの分布

赤谷西1のECは、斜面上方10.6 mS/m、斜面下方10.5 mS/mであり、斜面上方と下方でECは同程度である。赤谷西2ではAk-10で4.7 mS/m、Ak-6で3.3 mS/m、Ak-8-1および



-1 調査地概要

Ak-8-2では深い孔のAk-8-1で11.2 mS/m、浅い孔のAk-8-2で4.4 mS/mであった。渓流での採水は、赤谷西1では沢地形は認められたが、流水は見られなかった。赤谷西2では渓流上部で3.3 mS/m、渓流下部で4.4 mS/mであった。

2) 溶出イオン濃度

イオン当量濃度を図-2に示す。赤谷西1のボーリング孔Ak-2、Ak-4はともに他のイオンと比較してCa²⁺、HCO₃⁻が相対的に多い。赤谷西2では、Ak-10はHCO₃⁻が相対的に多いが、Ak-6は、特徴的に多いイオンは見られない。Ak-8-1、Ak-8-2はAk-2、Ak-4と同様にCa²⁺、HCO₃⁻が相対的に多く、深い孔であるAk-8-1で溶出イオン濃度が多い傾向が見られる。次に、Ca²⁺とHCO₃⁻について、イオン当量濃度とECの関係を図-3に示す。Ca²⁺とHCO₃⁻の溶出量が大きくなるとECが大きくなる傾向が見られた。

4. 考察

赤谷西1では斜面全体でECの値に大きな変化はなかったが、赤谷西2では斜面下方でECや溶出イオン濃度が上昇する傾向が見られた。溶出イオン濃度の結果から、ECを上昇させている主な溶出イオンはCa²⁺、HCO₃⁻であると考えられる。なお、赤谷西1においても、斜面上部と斜面下部の溶出イオンの傾向はCa²⁺、HCO₃⁻が多く、ECの上

昇に影響を与えていることが示唆される。これらの結果は既往研究で示された岩盤に含まれる CaCO_3 から溶出した Ca^{2+} , HCO_3^- が EC を上昇させている可能性が考えられる。さらに、赤谷西 2 の斜面上部では、 Ca^{2+} , HCO_3^- はともに少ない傾向であるが、斜面下部では赤谷西 1 と同様に Ca^{2+} , HCO_3^- が多い。このことから、赤谷西 2 では斜面中腹よりも下部あるいはより深層において溶出イオン濃度が増大するプロセスがあると考えられる。

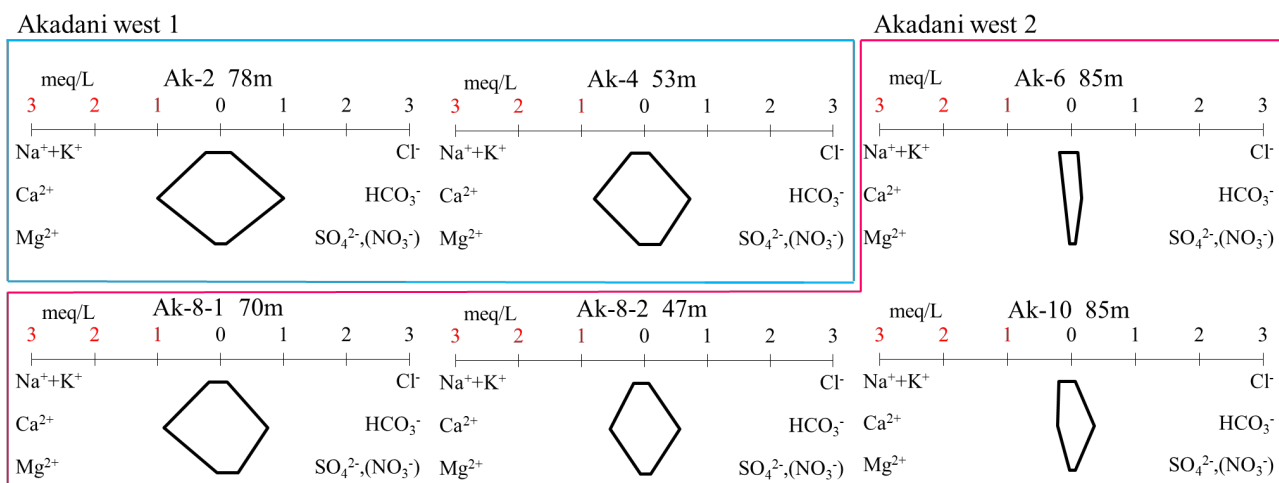
5. まとめ

今回の調査では、ボーリング孔から採取した地下水の EC 上昇に Ca^{2+} , HCO_3^- が影響している可能性が示された。一方で、渓流水の水質形成に平面的な地下水の流入・流出経路が与える影響については明らかではない。今後、

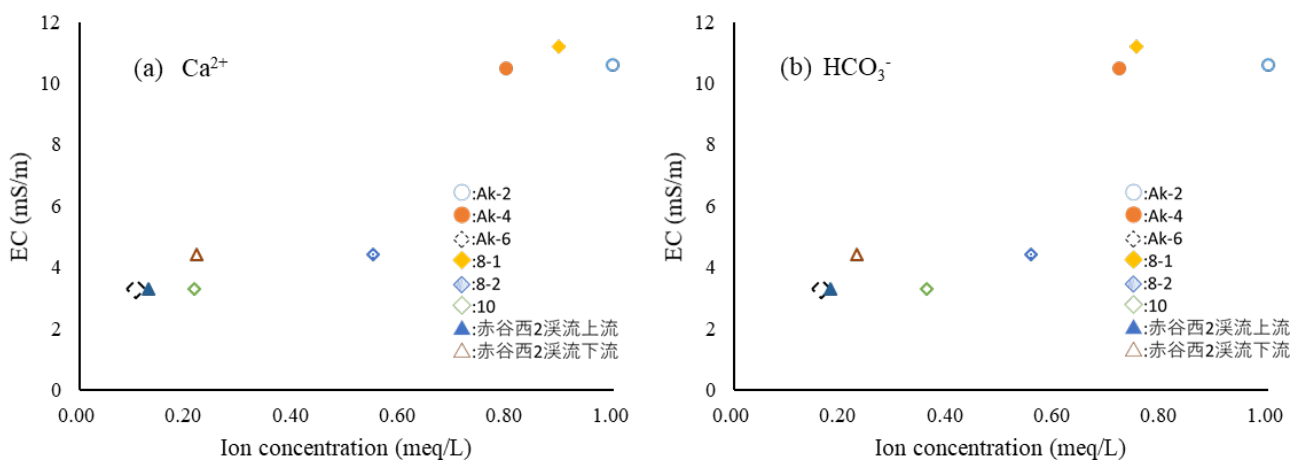
地下水流動のトレーサー試験を通じた推定や、継続した地下水と渓流水の水質分析を行う予定である。

参考文献：

- 1) 蒲原潤一, 内田太郎: 深層崩壊対策技術に関する基本的事項, 国総研資料第 807 号, 2014.
- 2) 独立行政法人土木研究所 (2008) : 深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル (案), 土木研究所資料, No.4115
- 3) 田中健貴ほか (2019) : 重力変形斜面の岩盤に発達する亀裂が溶出特性に与える影響, 日本地すべり学会誌, Vol.56, No.1, pp.1-7
- 4) 千木良雅弘 (2015) : 深層崩壊の場所の予測と今後の研究展開について, 応用地質, Vol.56, No.5, p.200-209
- 5) 千木良雅弘ほか (2012) : 2011 年台風 12 号による深層崩壊, 京都大学防災研究所年報, No.55 A, p.193-211



-2 各ボーリング孔で採取した地下水のイオン当量濃度



-3 各ボーリングで採取した地下水のイオン濃度と EC の関係 (a) Ca^{2+} 濃度, (b) HCO_3^- 濃度

重力変形斜面における地下水の水質変化に岩盤からの溶出イオンが与える影響

THE EFFECT OF LEACHING ION FROM BEDROCK ON WATER QUALITY OF
GROUND WATER IN GRAVITATIONAL DEFORMATION SLOPE

田中健貴¹・木下篤彦²・小竹利明²・山田拓²・柴田俊²・

窪田安打³・小松慎二³・林幸一郎³

Yasutaka TANAKA, Atsuhiko KINOSHITA, Toshiaki KOTAKE, Taku YAMADA, Suguru SHIBATA,
Yasuuchi KUBOTA, Shinji KOMATSU and Koichirou HAYASHI

¹北海道大学 広域複合災害研究センター (〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目)

E-mail: tanakay@cen.agr.hokudai.ac.jp

²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

(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

³応用地質株式会社 (〒532-0021 大阪府大阪市淀川区田川北2-4-66)

Key Words: deep-seated landslide, water analysis, electric conductivity, ion leaching, ground water

1. はじめに

2011年台風第12号により、紀伊山地では深層崩壊と呼ばれる大規模な斜面崩壊が多発した¹⁾。深層崩壊は、発生頻度は低い、被害は大きくなる場合が多い。深層崩壊による被害を防止あるいは低減するためには、深層崩壊が発生するおそれのある斜面(以後、危険斜面)を、事前抽出する必要がある²⁾。

これまで、危険斜面を抽出する方法として、調査対象斜面周辺の渓流水や、斜面における湧水の水質分析を行う方法が提案されてきた³⁾。この方法では、採水した試料のECや溶出イオンに着目した分析を行う。この方法によって縦断的な渓流水の水質分析結果から、ECやイオン溶出量が大きくなる箇所が存在し、その要因として長期間にわたって地下に滞留した地下水が流出した可能性が考えられている⁴⁾。しかし、危険斜面周辺でECが大きくなる詳細なプロセスについては、不明な点が多い。

これまで、紀伊山地では、危険斜面と考えられる斜面でボーリング調査が行われてきた。その結果、得られたボーリングコアにCaCO₃によって形成される白色脈が見られた。また、ボーリングコアを用

いた溶出試験では、他イオンと比較して、CaCO₃から溶出したCa⁺、HCO₃⁻が相対的に多く、これらの溶出イオンによってECが大きくなる傾向が見られた⁵⁾、⁶⁾。以上を踏まえると、危険斜面内部の岩盤にCaCO₃が含まれる場合、Ca⁺、HCO₃⁻が溶出することによって、危険斜面周辺で湧水や渓流水のECが大きくなるプロセスが仮説として考えられる。

そこで、上記仮説を検証する端緒として、危険斜面と考えられる重力変形斜面において、渓流水および地下水のECの水質分析を行うこととした。これによって、渓流水および地下水のECに影響を与える溶出イオンを分析し、岩盤に含まれる鉱物由来からの溶出イオンとの関係について検討することが出来ると考えられる。

2. 調査地および調査方法

調査は奈良県五條市赤谷地区に位置する2斜面(赤谷西1, 赤谷西2と呼ぶ)で行った。当該地区では、2011年台風第12号によって深層崩壊が発生

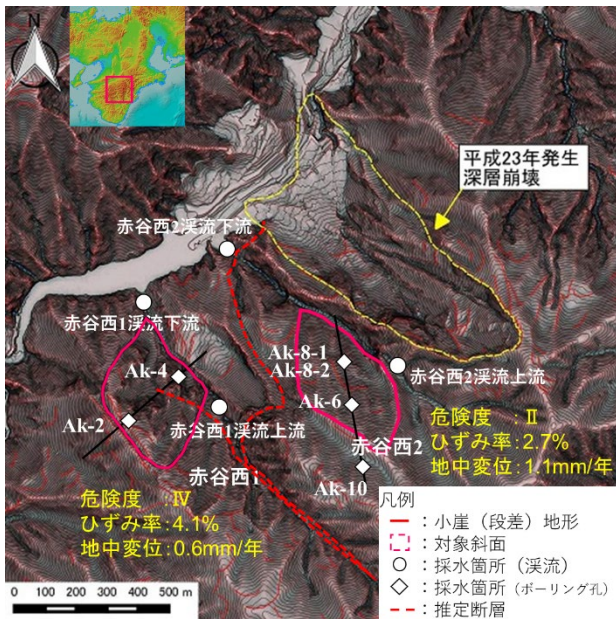


図-1 調査地概要

しており、調査は崩壊斜面の近傍で実施した(図-1)。また、調査地では衝上断層の存在が指摘されており、深層崩壊の発生に寄与したことが指摘されている⁷⁾。微地形に基づく危険度評価⁸⁾(図-2)では、赤谷西1は危険度IV、赤谷西2は危険度IIである。また斜面の変形の程度を示すひずみ率は、赤谷西1が4.1%、赤谷西2が2.7%である。これらのひずみ率は、2011年台風12号によって発生した深層崩壊の、崩壊前の地形から推定したひずみ率5~21%⁹⁾よりは小さいが、当該斜面では段差や小崖といった重力変形による深層崩壊の兆候は見られている。

これらの斜面では、ボーリング調査が実施されており、地下水の採水が可能である。ボーリング調査の位置を図-1に示す。また、これらのボーリングコアから推定される地質構造を図-3に示す。なお、ここで示す地下水位は観測期間中の最高水位を示す。また、断面測線は斜面の傾斜方向を基本とし、微地形から推定される斜面の変形方向で、重力変形斜面の概ね中心を通る測線で設定した。ボーリング孔の深さは、それぞれ赤谷西1においてAk-2は78m、Ak-4は53mであり、赤破線で示すように断層の存在が推定される。赤谷西2においてAk-6は85m、Ak-8-1は70m、Ak-8-2は47m、Ak-10は85mである。ここでは、赤破線のように断層が推定され、Ak-6以外は断層よりも深い範囲にボーリング孔が達している。なお、Ak-10は赤谷西2の重力変形と考えられる範囲のさらに上方に位置する。次に、ボーリング調査で得られたコアの状態について示す。Ak-2は全体として開口割れ目が多く見られた。また、風化が進んでおり、特に深度43.2~47.8m、70.1~73.6m

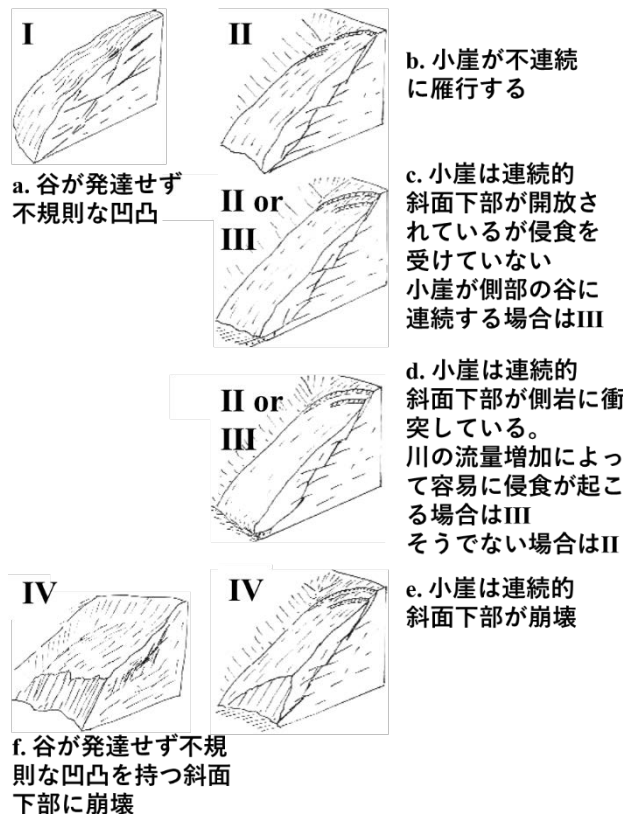


図-2 微地形による深層崩壊発生危険度⁸⁾

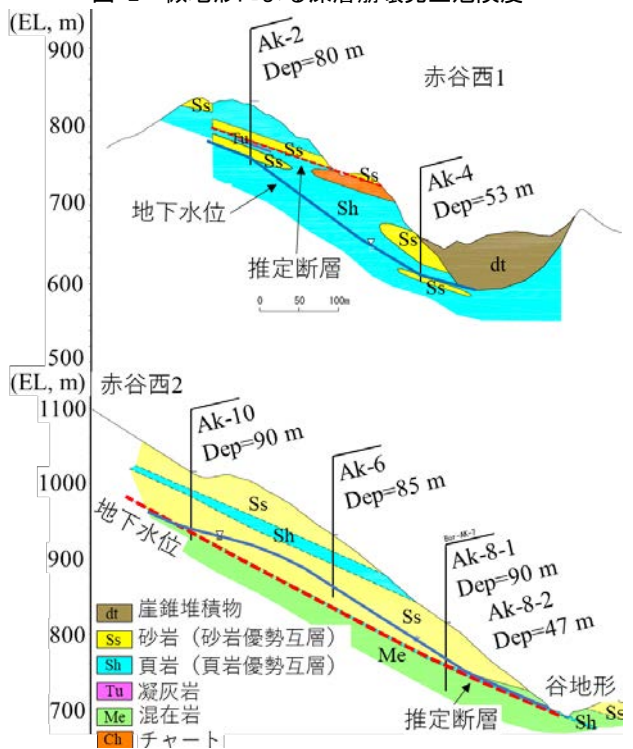


図-3 赤谷西1, 2の推定される地質構造

で特に風化が著しい様子が見られた。Ak-4は、32mより浅い範囲では開口割れ目が多く見られるが、33mよりも深い範囲では割れ目は見られない。また、32.3~32.6mで特に破碎が進行し、粘土化している様子が見られる。Ak-6は深度68m付近まで風化の進行や亀裂が多く見られ、69m付近から未溶脱の炭

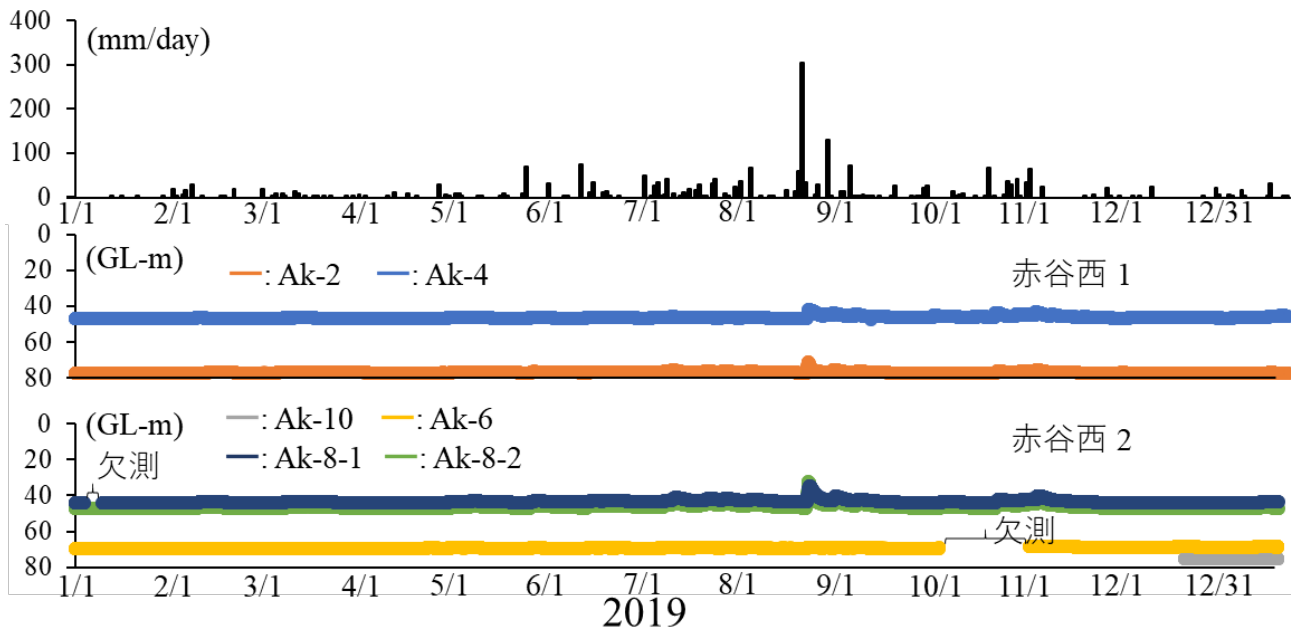


図-4 調査地における降雨量（上段）およびボーリング孔内の地下水位挙動（中段：赤谷西1，下段：赤谷西2）

酸塩鉱物が混在するようになる。深度 81m より深い深度では、新鮮で堅硬なコアである。Ak-8-1 は深度 54m から 85m 付近まで割れ目開口が見られるが、深度 54m より浅い範囲ではより顕著に割れ目開口が見られる。Ak-10 は全体で割れ目開口が見られるが、特に深度 58m よりも浅い深度では風化が進んでいる。深度 85m よりも深い深度では、亀裂が少ない。

採水は 2020 年 1 月 11 日午前 11 時に各採水箇所と同時に 1 回実施した。採水日の 1 週間前までの降雨状況は、1 月 8 日に 15mm/hr 程度の時間雨量を記録している。採水は、ボーリング孔の地下水、斜面周辺の溪流で採水を実施した。ボーリング孔採水深度は Ak-2 : 72~78 m, Ak-4 : 32~46 m, Ak-6 : 64~74 m, Ak-8-1 : 56~70 m, Ak-8-2 : 46~47 m, Ak-10 : 75~85 m であり、上記以外の区間は遮水している。地下水の採水は採水器（ベラー採水器 φ40mm×91cm 950ml）を、渓流水の採水にはポリエチレン製容器(1000ml)を使用し、ポリエチレン製容器(1000ml)で保存して持ち帰った。水質分析項目は Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, NO₃²⁻, HCO₃⁻, CL⁻, SiO₃²⁻, pH, EC である。分析には JIS K 0101, JIS K 0102 に基づき、Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ はイオンクロマトグラフィー (ICS-1600), SO₄²⁻, NO₃²⁻, HCO₃⁻, CL⁻ はイオンクロマトグラフィー (ICS-2000), SiO₃²⁻ は分光光度計(U-1500), pH と EC は pH/EC 計(WM-50EG)を使用した。

3. 結果

(1) ボーリング孔内の地下水位

2019 年 1 月 1 日から 2020 年 1 月 11 日までのボー

リング孔内における地下水位を図-4 に示す。赤谷西 1 では上部の Ak-2, 下部の Ak-4 は同様の地下水位の上昇, 低下を示している。一方で、赤谷西 2 では、斜面下部の Ak-8-1 と Ak-8-2 は同様の地下水位変化を示しているが、斜面中腹の Ak-6 は Ak-8-1 と Ak-8-2 とは異なる傾向を示す。例えば、8 月 16 日（□で示す範囲）に Ak-8-1 と Ak-8-2 は地下水位が上昇しているが、Ak-6 は明瞭な変化は見られない。なお、Ak-10 は観測開始が 2020 年 12 月 10 日である。

(2) pH および EC の分布

赤谷西 1 の pH および EC は、斜面上方 Ak-2 で EC が 10.6 mS/m および pH が 7.6, 斜面下方 Ak-4 で EC が 10.5 mS/m および pH が 7.1 であり、斜面上方と下方で EC の値はほぼ等しい。赤谷西 2 では斜面上方に位置する Ak-10 で EC が 4.7 mS/m および pH が 7, 斜面中腹に位置する Ak-6 で EC が 3.3 mS/m および pH が 6.8, 斜面下部に位置する Ak-8-1 および Ak-8-2 では、より深い孔の Ak-8-1 で EC が 11.2 mS/m で pH が 7.5, 浅い孔である Ak-8-2 で EC が 4.4 mS/m, また pH が 6.9 であった。つまり、赤谷西 2 においては、EC は Ak-10 から Ak-6 にかけて小さくなり、Ak-6 から Ak-8-1, Ak-8-2 にかけて大きくなっている。

また、溪流での採水については、赤谷西 1 では沢地形は認められたが、流水は見られなかった。赤谷西 2 では溪流上部で EC が 3.3 mS/m であり pH は 6.9, 溪流下部で EC が 4.4 mS/m で pH は 7.1 であり、下部でより大きい傾向が見られた。

(3) 溶出イオン濃度

2020 年 1 月 11 日に各採水箇所と同時に採水した

試料を、イオン当量濃度をヘキサダイアグラムに整理した結果を図-5に示す。赤谷西1のボーリング孔 Ak-2, Ak-4 はともに Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- と比較して Ca^{2+} , HCO_3^- が相対的に多い。また, Ak-2, Ak-4 を比較すると, Ca^{2+} が Ak-2 で 1.0 meq/L, Ak-4 が 0.8 meq/L, HCO_3^- については Ak-2 で 1.0 meq/L, Ak-4 が 0.72 meq/L であった。赤谷西2では, Ak-10 は HCO_3^- が 0.36 meq/L と相対的に多いが, Ak-6 は, 特徴的に多いイオンは見られない。Ak-8-1, Ak-8-2 は Ak-2, Ak-4 と同様に Ca^{2+} , HCO_3^- が相対的に多く, Ca^{2+} が Ak-8-1 で 0.9 meq/L, Ak-8-2 が 0.55 meq/L, HCO_3^- については Ak-8-1 で 0.75 meq/L, Ak-8-2 が 0.56 meq/L であり, 深い孔である Ak-8-1 で溶出イオン濃度が多い傾向が見られる。つまり, 斜面上方 Ak-10 と斜面下方 Ak-8-1, Ak-8-2 は Ak-6 よりも溶出イオン濃度が大きい傾向が見られる。

次に, 赤谷西の渓流水については, 溪流の上流では相対的に濃度が大きいイオンは見られない。溪流の下流では, 上流と比較すると, Ca^{2+} (上流: 0.13 meq/L, 下流: 0.22 meq/L) および HCO_3^- (上流: 0.18 meq/L, 下流: 0.23 meq/L) が多い。

また, 2020年1月11日に行った採水結果を基に, 各分析対象イオンのイオン当量濃度と EC の関係を図-6に示す。 Ca^{2+} と HCO_3^- の溶出量が大きいと, EC が大きい傾向が見られた。また, SO_4^{2-} が Ak-4 および Ak-8-1 で他の採水場所と比較してイオン当量濃度が大きい。他の溶出イオンについては, イオン当量濃度と EC の関係は明瞭ではない。イオン状シリ

カ (SiO_3^{2-}) は, 相対的に Ak-6, Ak-10 で大きく, 渓流水では上流側でやや大きい傾向が見られたが, 今回の採水では, 明瞭な関係は見られなかった(図-7)。

4. 考察

(1) 地下水位の挙動と EC の変化

Ak-6 よりも Ak-8-1, Ak-8-2 で, 地下水位の変化が大きい傾向が見られた。これは, 断層による影響^{10), 11)}を受けたと考えられる。つまり, 図-3 に赤破線で示す断層が不透水層の役割を果たし, 断層の上部と下部では, 地下水の流れが異なる可能性がある。また, 赤谷西2において EC や溶出イオン濃度が Ak-10 から Ak-6 にかけて小さくなり, Ak-6 から Ak-8-1, Ak-8-2 にかけて大きくなる傾向が見られた。ここで一般に, 地下水が未溶脱の炭酸塩鉱物に触れる時間が長い斜面下部の方が, EC や溶出イオン濃度は大きくなる¹²⁾。このことも, Ak-10 と Ak-6, また Ak-6 と Ak-8-1 および Ak-8-2 では異なる地下水の流れが存在する可能性があり, 断層が影響を与えたことを示唆する。EC は, 赤谷西1では斜面上部と下部で同等であり, 赤谷西2では斜面下部で大きい傾向が見られた。また, Ak-8-1 と Ak-8-2 の比較から, より深い孔で EC は大きい傾向が見られた。つまり, 同じ斜面内でも, 採水箇所によって EC の傾向は異なる場合がある。このことは, 水質分析による危険斜面抽出を行う上で, 採水箇所選定が重要であることを示唆する。

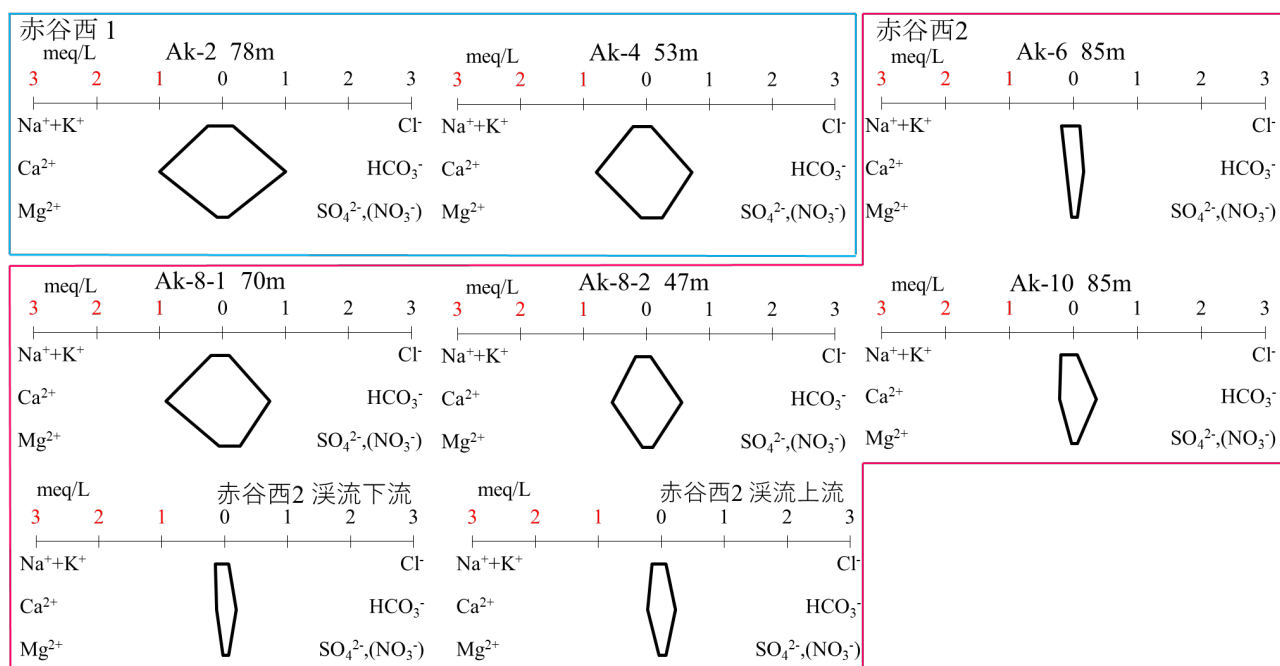


図-5 地下水および渓流水のヘキサダイアグラム

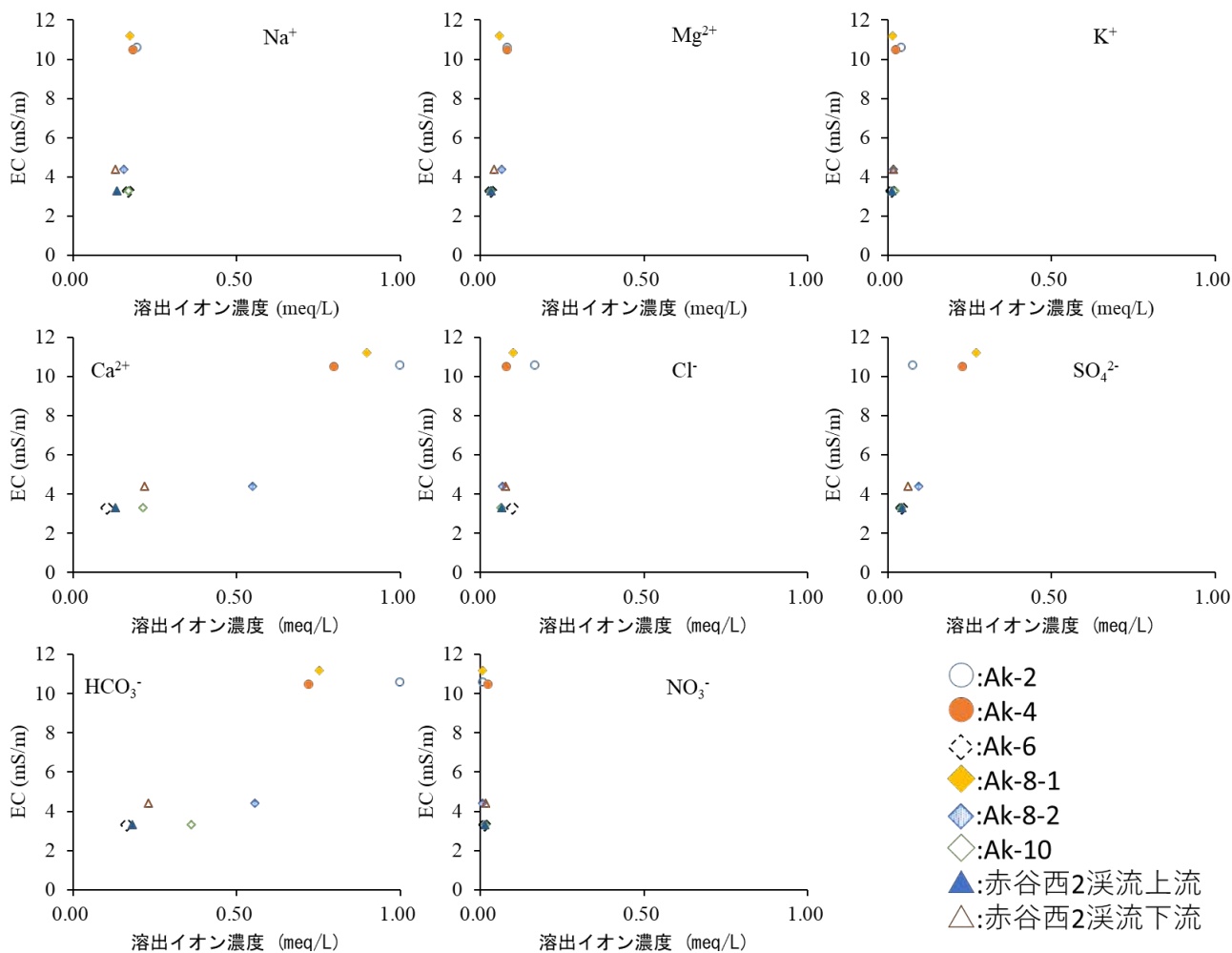
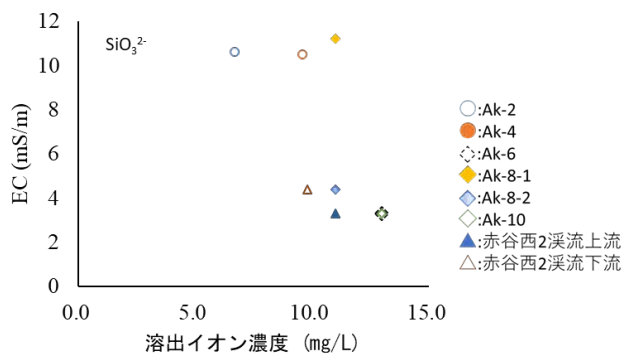


図-6 溶出イオンと EC の関係



7 イオン状シリカ溶出量と EC の関係

(2) EC の変化と溶出イオン

ヘキサダイアグラムの結果 (図-5) から、EC を上昇させている主な溶出イオンは Ca²⁺, HCO₃⁻ と考えられ、CaCO₃ が溶出した可能性が考えられる。このことは、既往研究における、紀伊山地での岩盤に含まれる鉱物のイオン溶出プロセス⁹⁾を支持する結果であると考えられる。

また、このプロセスを踏まえ、赤谷西2において

は、次に示すような地下水流下が想定される。Ak-8-1 および Ak-10 は、それぞれ岩盤に割れ目開口が多く見られ、また白色脈として観察される炭酸塩鉱物 (CaCO₃) が含まれる範囲が存在し。これらの箇所では、割れ目開口を介した地下水流入によって、岩盤に含まれる CaCO₃ が溶脱し、徐々に斜面下方へ流下すると考えられる。このことによって、渓流水は斜面下方で、斜面上方に比べて、EC がより大きくなることが推定される。ここで、Ak-6 や Ak-8-2 も斜面下方の渓流水の水質形成に寄与した可能性もあるが、地下水位の挙動や水質分析から、Ak-10 や Ak-8-1 と比べ、EC が小さいため、渓流水への影響はより深い地下水で比較的大きいと考えられる。

(3) 今後の課題

ここまで示してきた地下水および渓流水の水質分析結果から、岩盤に含まれる鉱物が地下水および渓流水の水質に影響を与える可能性が示された。しかしながら、危険斜面における EC の上昇、地下水流

下を把握する上で、以下の課題が残された。

・地下水に含まれる溶出イオン濃度は、地下水と岩盤の接触面積および接触時間による影響を受ける。既往研究で実施された溶出試験では、試料であるボーリングコアを粉砕した上で試験が行われている⁵⁾。⁶⁾ 一方で、自然状態では長い時間をかけて、溶出が生じていると考えられる。EC と溶出イオンの関係をより詳細に把握する上で、より自然に近い状態での溶出プロセスについて検討する必要がある

・他流域からの地下水流入の影響を検討する必要がある。今回は、斜面外からの地下水の流入の可能性について検討出来ていないが、斜面下部や渓流水の水質形成に、他斜面からの地下水流入は影響を与えている¹³⁾ことが予想される。渓流水の水質分析を危険斜面抽出に応用するためには、他斜面からの地下水流入が、水質形成に与える影響を明らかにする必要がある

5. まとめ

本稿では、危険斜面抽出方法の1つである水質分析の応用を踏まえ、危険斜面周辺で EC が大きくなる要因を、地下水と渓流水の水質変化に着目して分析した。その結果、以下のことが示された。

・微地形判読に基づく危険度がより高い斜面（赤谷西1）で、EC や Ca^{2+} , HCO_3^- の溶出イオン濃度が大きい傾向が見られた

・本研究の調査地では、地下水に Ca^{2+} , HCO_3^- が相対的に多く含まれる地点が見られた。また、相対的に斜面下部や深部で、EC が大きい傾向があった

・既往研究と合わせて考えると、 Ca^{2+} , HCO_3^- は岩盤に含まれる CaCO_3 から溶出している可能性がある

・水質分析による危険斜面抽出にあたっては、同一斜面内でも EC が変化するため、斜面全体の水質の傾向を捉えるような採水箇所設定の必要がある

・今回の調査では、詳細な地下水の流れについて、明らかにすることが出来ていない。危険斜面周辺での水質形成、特に EC が上昇するプロセスを明らかにするためには、詳細な地下水の流下過程を明らかにする必要がある

今後、ボーリング孔への食塩投入といったトレーサー試験を行うことで、地下水流下過程の解明を試みたい。また、危険斜面抽出を目指し、水質分析の試料を採取する位置や長期的な観測の考え方について整理し、現場での応用を進めたい。

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, 長野英二, 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.45-53, 2012.
- 2) 蒲原潤一, 内田太郎:深層崩壊対策技術に関する基本的事項, 国総研資料第807号, 2014.
- 3) 地頭菌隆: 渓流水の電気伝導度を用いた深層崩壊発生場の予測. 砂防学会誌 Vol. 66, No. 6, pp.56-59, 2014.
- 4) 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ー鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にしてー, 砂防学会誌, Vol.59, No.2, pp.5-12, 2006.
- 5) 森加代子・林幸一郎・木下篤彦・水野秀明・今森直紀・田中健貴・小川内良人: 岩盤クリープ斜面を構成する岩石からのイオン溶出特性, 平成29年度砂防学会研究発表会概要集, pp.418-419, 2017.
- 6) 田中健貴, 木下篤彦, 吉村元吾, 菅原寛明, 小川内良人, 横山修: 重力変形斜面の岩盤に発達する亀裂が溶出特性に与える影響, 日本地すべり学会誌, Vol.56, No.1, pp.1-7, 2019.
- 7) Arai, N. and Chigira, M.: Rain-induced deep-seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan. Isl. Arc, 27, e12245, 2018
- 8) 千木良雅弘: 深層崩壊の場所の予測と今後の研究展開について, 応用地質, Vol.56, No.5, p.200-209, 2015.
- 9) 千木良雅弘・松四雄騎・ツオウチンイン・平石成美・松澤真・松浦純生: 2011年台風12号による深層崩壊, 京都大学防災研究所年報, No.55 A, p.193-211, 2012
- 10) 森屋洋, 荻田茂, 山田孝雄, 阿部真郎: 東北地方における断層周辺の第三紀層地すべり. 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.4, pp.248-253, 2007.
- 11) 川上浩: 断層によるせき止め地下水を原因とする地すべり2例. 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.4, pp.237-240, 2007.
- 12) 吉岡龍馬: 地すべり(4) 地すべりと水-地球化学的調査(その1), 地下水学会誌, Vol. 32, No. 3, pp. 147-162, 1990.
- 13) 日浦啓全, 末峯章, 前田寛之, 王功輝, 古谷元: 四国の結晶片岩地すべりにおける地下水の水文地質学, 日本地すべり学会誌, vol.55, No.4, pp.153-162, 2018.

(2020. 7. 1 受付)

電気的手法を用いた新たな掃流砂計測法の開発

三重大学 堤大三

1. はじめに

河川では、水と共に土砂が流下しており、土砂移動量を把握することは、災害防止や流域全体の土砂管理のために重要な課題である。特に、山地河川における土砂移動は、その非平衡性のために流砂量式による予測が困難であり、土砂移動量の実測が必要不可欠である。土砂移動形態は、粒径別にウォッシュロード、浮遊砂、掃流砂に大別される。粒径の小さなウォッシュロードや浮遊砂は、濁度計を用いて計測されることが一般的であるが、粒径が比較的大きな掃流砂の計測には様々な手法が存在する。掃流砂を実測する手法は、直接法と間接法に大別されるが、現在では比較的簡便に連続観測が可能な間接法が主流となっている。間接法の一つとして、スイスでは1980年代から、プレート型ジオフォンシステムが開発され、スイスをはじめとして、欧米各国で採用されている。ジオフォンシステムでは、砂礫がプレートに衝突した際に発生する振動信号から掃流砂量を算定している (Rickenmann, 2017)。日本では、スイスとほぼ同時期に、パイプ型 hidroフォンシステムの開発が始められた (栗原・宮本, 1992)。パイプ型 hidroフォンは、鋼管製のパイプ内にマイクを装備した計器であり、コンクリート水路や堰堤の水通し部等の固定床に設置される。土砂粒子がパイプに衝突した際に生成される音響信号から掃流砂量を算定している。現在では日本の多くの河川で広く利用されている。近年では、これらの掃流砂計測システムは、自然河川だけでなく、ダム貯水池に堆積した土砂を下流へ流すための排砂バイパストネル (SBT) にも設置され、排出土砂量の管理にも用いられている (Albayrak, 2017; 小柴・角, 2018)。

両計測システム共に、30年以上の知見の積み重ねによって、その信頼性や精度が向上しているが、依然解決されない課題も残っている。その一つは、振動信号や音響信号といった間接的な信号を実際の掃流砂量に変換するため、直接サンプラーによる掃流砂量計測を

断続的に行う必要があることから (図-1(a)最下緑枠内)、計測設備が大規模となり多大な時間と労力が必要となる。もう一つは、掃流砂が集中する河床付近での移動量を効率的に計測するためには、計測機器を河床面に設置する必要があるが、このために大規模な土砂移動が発生した際に、大径の石礫が直接検知部に衝突し機器そのものが破壊され、計測が不可能となってしまうことである (図-1(b),(c))。接触型の計測法である限り避けられない問題ではあるが、土砂移動観測で、より重要な大規模な土砂移動現象が計測できないということは致命的な欠陥ともいえる。計測機器の堅牢さという観点では、河床からパイプが突起しているパイプ型 (図-1(a)中部青枠, (c)) より、プレート型ジオフォン (図-1(a)最上赤枠内) やプレート型に改良された hidroフォン (図-1(a)中部黄枠内) の方が礫の衝突に対する耐性が高い。しかし、排砂バイパストネル出口 (図-1(d)) の様に土砂濃度が高くかつ高速流の条件下では、プレートを固定するフレームが変形することがあり (図-1(e))、場合によっては河床ごと計測機器が流失してしまうような場合もある (図-1(f))。これらの課題を克服しない限り、土砂移動観測の本来の目的である災害防止や流域全体の土砂管理を実現することは困難である。

2. 新たな掃流砂計測手法の概要

本研究では、上記の課題、特に大規模土砂移動時に砂礫の衝突によって機器が破損し、観測が継続できなくなる問題を解決するため、新しい土砂移動計測手法を開発することを目的とする。砂礫の衝突による機器の破損を防ぐには、機器の強靱化か非接触センサーか、どちらかの方向性が考えられる。本研究では、後者の方向性を選択し、極力砂礫が接触しないような計測手法を開発することとした。

河川水は電解質を含んでいるため、電圧を与えると電流が流れる。その際、水に不導体である砂礫が含まれていると、全体として抵抗が増加し、流れる電流量が減少すると推測

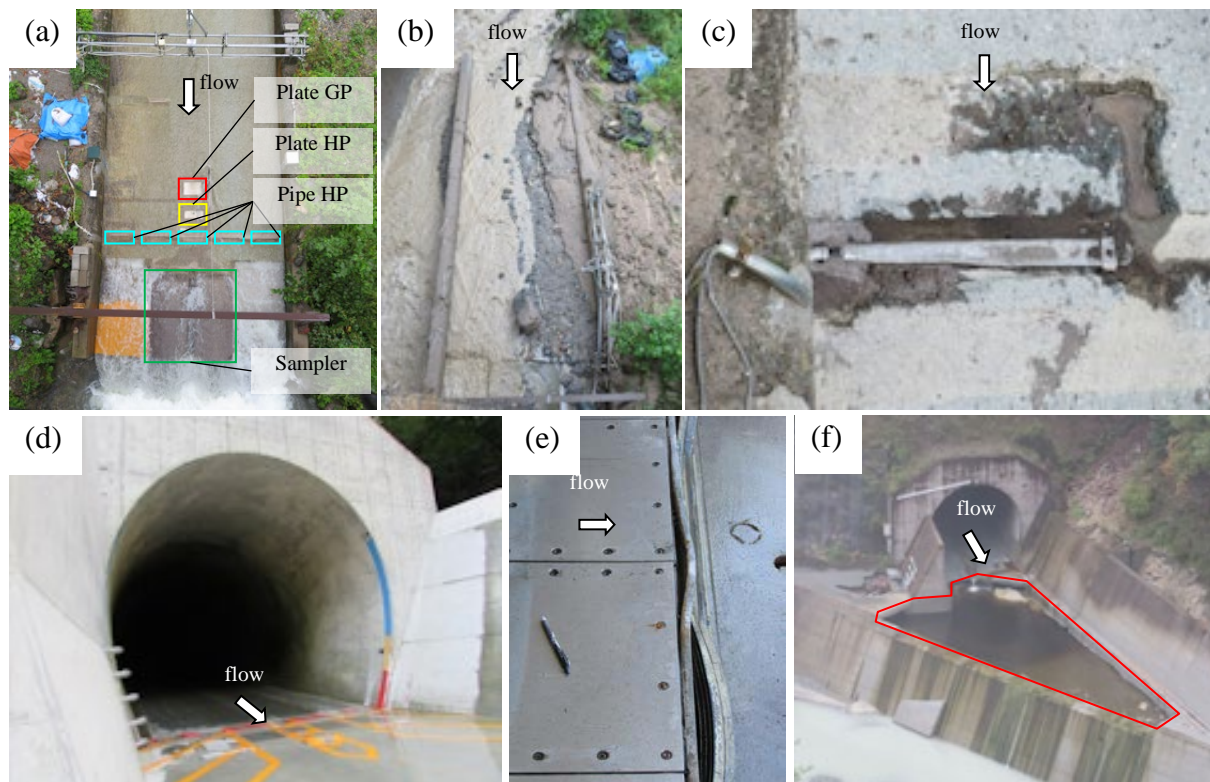


図-1 既存の土砂移動観測装置の現状:(a)京都大学防災研究所の土砂移動観測サイト(最上赤枠:プレート型ジオフォン(Plate GH), 中間黄枠:プレート型ハイドロフォン(Plate HP), 中間青枠:パイプ型ハイドロフォン(Pipe HP), 最下緑枠:直接サンプラー計測器(Sampler)), (b)観測サイトが大規模土砂移動によって破損, (c)パイプ型ハイドロフォン(a)の最左が大粒径の砂礫の衝突によって完全に变形, (d)小渋ダムの排砂バイパストンネル出口における土砂移動観測システム(プレート型ハイドロフォン), (e)スイスのソリスダム排砂バイパストンネルのプレート型ジオフォンのフレームが变形, (f)小渋ダムの排砂バイパストンネル出口のコンクリートの河床(赤枠内)が破損され, 観測システム全体が流失

される。この原理を用い、河川の左岸・右岸に電極を設置し、一定電圧を与えて流れる電流値の変化を計測することで電極間の河川水に含まれる土砂体積の割合を推定するものである(図-2)。その際、電流値は電極幅、水位、電極間距離にも依存するため、それらの影響を考慮し、電流値を電気伝導度に変換することとする。電気抵抗値 $R = E/I$ [Ω]の逆数であるコンダクタンス $G = 1/R$ [S]を、電極面積 $A = wh$ [m²]で除し、電極間距離(川幅) B [m]をかけたものが電気伝導度 $\kappa = IB/(Ewh)$ [S/m]となる。ここで、 I : 電流値[A], E : 電圧値[V], w : 電極幅[m], h : 水深[m]である。なお、直流電流では分極が生じるため、水の電気伝導度を計測する場合は交流電流を用いる必要がある。

この手法では、電極板はコンクリート護岸等の側壁に設置するため、河床を移動する砂礫の衝突を直接受けることがない。また、電極は単なる金属プレートであり、側壁に密着して固定すれば、仮に砂礫が衝突したとしても簡単には破損しない。さらに、既往の手法の様に振動センサー(ジオフォン)や音響セ

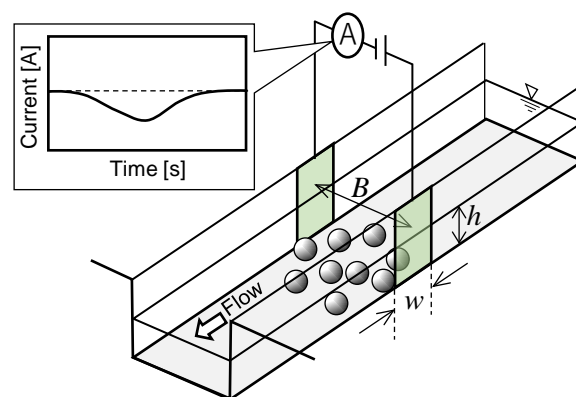


図-2 本研究で提案する新しい土砂移動計測手法の概念図:河川兩岸の電極間に交流電圧を与え、電流値の変化を計測する

ンサー(ハイドロフォン)といった精密な計器を必要とせず、計測する対象は水深と流量といった基本的な水理量と電流値のみであり、非常に単純な計測だけですむといった利点がある。以上のように、本手法は非接触型に近く、大規模な土砂移動の際にも砂礫の衝突によって破損する可能性が低いところが利点であり、既往の観測手法にはない独自性を持つ

ている。また、もし測定する電気伝導度と土砂濃度の間に理論的な関係が成り立つならば、既往の間接法のように直接法と併用してキャリブレーションを行う必要がなく、単独で運用できるという利点もある。

3. これまでの実験結果

幅19cm、奥行き19cmの水槽の内側に水槽幅と同じ幅のステンレス製の電極を設置し、水と土砂を種々の深さ、土砂濃度で投入し電流値を計測した。その結果を図-3に示す。縦軸は計測された電流値から算出した電気伝導度を、市販の電気伝導度計で別途計測した水の電気伝導度で除し標準化したものである。土砂濃度が低い範囲ですれが生じているが、土砂濃度と標準化電気伝導度の間には傾きが-1の直線関係があることがわかった。また、水槽幅を変化させて電極幅の外側に電流が流れているかを検証する実験を実施し、図-4に示す結果を得た。電極幅の外側にも電流が流れていることが示されているが、水槽幅が電極幅の数倍程度を超すと電気伝導度が上昇しなくなることから、電流の影響は限られた範囲にとどまることがわかった。流水中の土砂移動検知の可否に関しては、実験室において長さ2m、幅0.09mの水路を作製して実験を始めており、初期段階の結果から流水中でも土砂移動検知が可能であることがわかっている。また水路実験では、電圧値40V程度で十分な電流変化の検知感度があることがわかり、現地観測にスケールアップ（50倍）した場合は、1V程度の電圧で計測が可能となり、人体を含め、生物に危険性がないことも確認している。

4. 今後の計画

三重大大学の研究室には、土砂水理実験を行うための実験室が整備されており、本研究で使用する水路を既に作製済みである（図-5）。また、研究室に所属する学部生と大学院生が、本研究の水路実験と現地観測を担当することを計画しており、研究を遂行する上で必要な人的資源を十分に有している。

本研究の目的に照らして土砂移動量の多い流域として、2011年の紀伊半島豪雨災害で発生した深層崩壊跡を含む流域を選定し、設置を計画している。大規模土砂災害対策技術センターと既に協議を始めており、現地観測を行うサイトの絞り込みを行っている段階であ

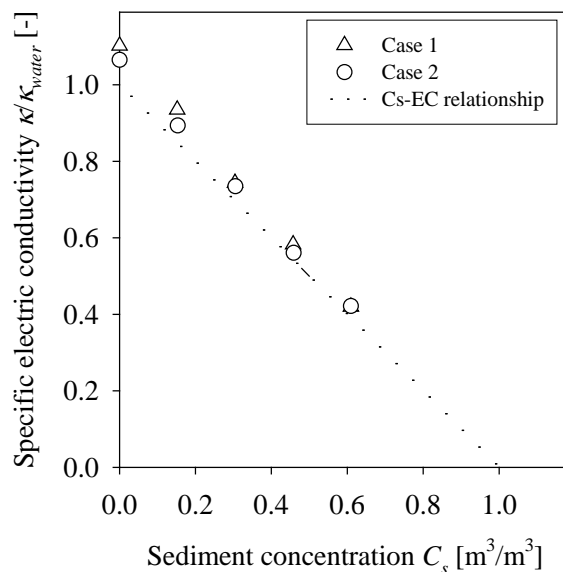


図-3 土砂濃度 (C_s) と標準化電気伝導度 (κ/κ_{water}) の関係

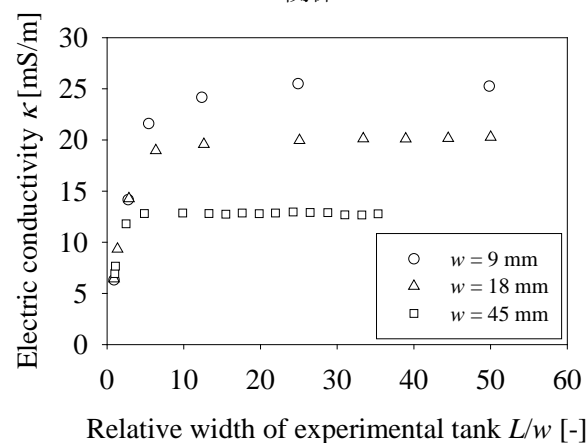


図-4 電極幅に対する水槽の相対幅 (L/w) と電気伝導度 (κ) の関係

る（和歌山県田辺市熊野、図-6）。設置場所の選定に関しては国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所とも十分に情報共有している。

5. おわりに

掃流砂量計測手法としては、水中に音響センサーを挿入し、河床を移動する土砂が発する衝突音を捉えて移動量を推定する受動音響センサー（水中ソナー, Geay et al., 2017）、河川側岸の地上部に設置した振動計で河川内の土砂移動による振動を捉えて土砂移動量を推定する手法（Burtin et al., 2017）、河床面に設置したプレート上を通過する土砂の重量を計測する手法は（Itoh et al., 2018）、TDRを用い



図-5 作製した実験水路



図-6 現地観測候補地(和歌山県田辺市熊野)

た誘電率の計測から土砂濃度を推定する手法(内藤ら, 2018)等が新たに開発されている。また, パイプ型 hidroフォンのパイプ厚を増加させてパイプの変形を防ぐ試みもなされているが, 本研究で提案する電気的な手法は, これらすべての手法と異なり, 砂礫の衝突による破損の危険性を軽減することと, 検知される信号と土砂移動量との間に単純かつ理論的な関係が成り立つ可能性が高く, 直接法によるキャリブレーションを必要としない手法になりうる。今後, 水路実験と現地観測への適用を行い, 本手法の実用化を目指していく。

参考文献

- Albayrak et al. (2017): Calibration of Swiss Plate Geophone System for bedload monitoring in a sediment bypass tunnel, Proc. 2nd Int'l WS on Sediment Bypass Tunnels, FP16
- Burtin et al. (2016): Seismic monitoring of torrential and fluvial processes, Earth Surf. Dynam., 4, 285–307
- Geay et al., (2017), Passive acoustic monitoring of bed load discharge in a large gravel bed river, J. Geophys. Res. Earth Surf., 122, 528–545
- Itoh et al. (2018): Development of new sensor systems for continuous bedload monitoring using a submerged load-cell system (SLS), Earth Surf Process Landf 43, 1689-1700
- Rickenmann, (2017): Bed-Load Transport Measurements with Geophones and Other Passive Acoustic Methods, J. Hydraul. Eng., 143(6), 03117004
- 栗原・宮本(1992): 音響を利用した流砂量計装置について, 砂防学会誌44 (5), 26-31
- 小柴・角 (2018): 小浜ダム排砂バイパストンネルにおけるインパクトプレートを用いた掃流砂量計測, 土木学会

紀伊山地における空中電磁探査結果と基岩内地下水位の関係性

京都大学大学院農学研究科 ○木村佑・小杉賢一朗・正岡直也

紀伊山系砂防事務所 小竹利明・山田拓・柴田俊

1 背景と目的

基岩内地下水位の値は土砂災害発生の予測に非常に大きな役割を果たすと考えられている。しかしながら基岩内地下水位の測定には大きなコストを要する。このため空中電磁探査が簡便な調査法として注目されているが、地下水位の推定精度についてはまだわからないことが多い。空中電磁探査によって得られる比抵抗値のデータは基岩の岩質、含水率、風化度合い等の影響を受けている。本研究では紀伊山地における空中電磁探査データを整理し、基岩内地下水位との関係性を解析した。

2 調査地と方法

平成23年9月の台風12号による紀伊半島大水害で甚大な被害を受けた紀伊山地の計10地区を対象とした。これらの地区では深層崩壊斜面とその周辺でボーリング孔が掘削され地下水位が計測されている。これらの地区を対象に2012年7月、10月、11月、2013年11月の4回に分けて空中電磁探査が行われた。調査は140kHz、31kHz、6900Hz、1500Hz、340Hzの5種類の周波数を用いて行われ、それぞれの周波数で異なる深さの地盤の比抵抗値が計測された。一般に、周波数が高くなるほど浅層の情報を反映しているといわれている。

本研究では、10地区の計142本のボーリング孔について、2012年8月から2020年3月までの1時間ごとに計測された地下水位と空中電磁探査により得られた比抵抗値の相関を解析した。解析においては、各地区における地質調査結果も考慮した。

3 結果と考察

3.1 地下水位と比抵抗値の相関性

図1に140kHzで行われた電磁探査について、10地区すべての地下水位と比抵抗値の相関を示した。相関はあまり高くないものの、比抵抗値が大きくなるほど地下水位が深くなる傾向が見られた。

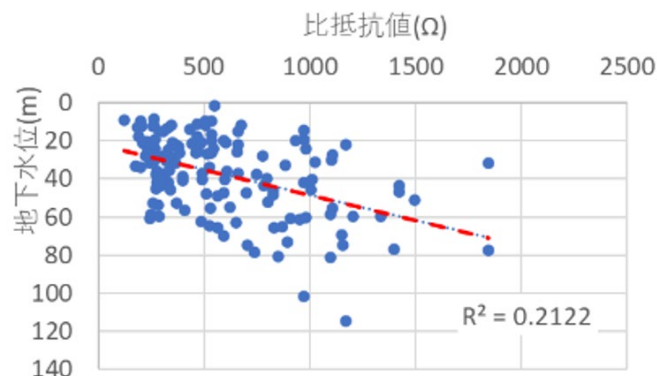


図1：地下水位と比抵抗値の相関（全地区を対象とした周波数140kHzの結果）

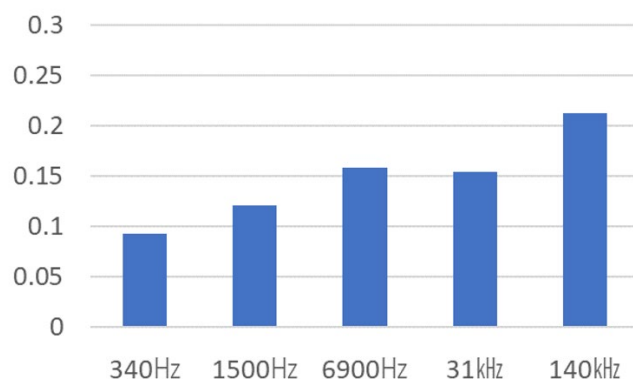


図2：周波数によるR²値の変化（全地区を対象とした結果）

他の周波数についても同様に地下水位と比抵抗値の相関を解析した。いずれの周波数でも140kHzと同様の傾向が見られた。R²は140kHzの場合に最も高くなった（図2）。このため本研究では140kHzの調査結果を用いることで地下水位分布の概略を把握できると考えた。

3.2 地区別に見た相関性

3.1より、140kHzの周波数を使用することで地下水位分布の概略を把握できると考えられる。ただし、データのばらつきは大きく、地区ごとの相関性にも大きな差が出た（図3）。その原因の一つとして、岩質の違いが考えられる。

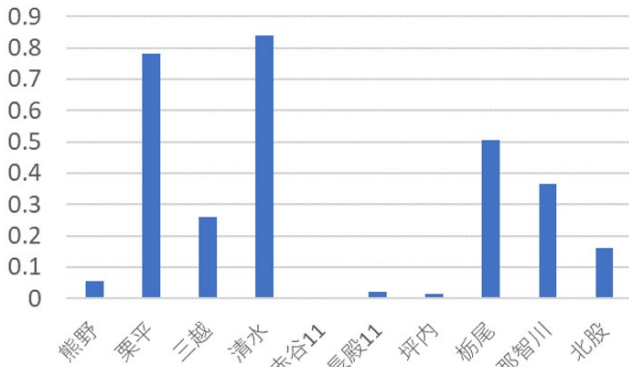


図3：各地区における 140 kHzを用いた場合の R²値

3.2.1 栗平地区における考察

図4に栗平地区のボーリング孔と140 kHzによる電磁探査から得られた比抵抗値の分布を示した。この地区では一様な岩質になっているため(図5)、図3に示したとおり、比較的高い相関性が見られたと考えられる。

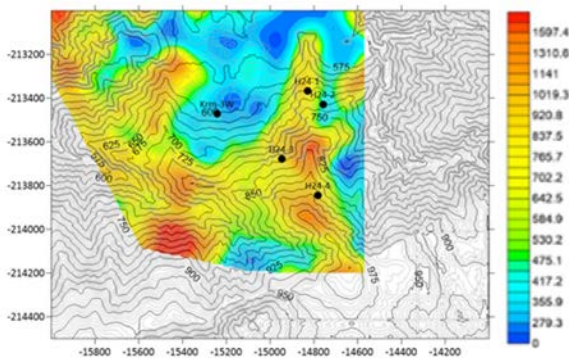
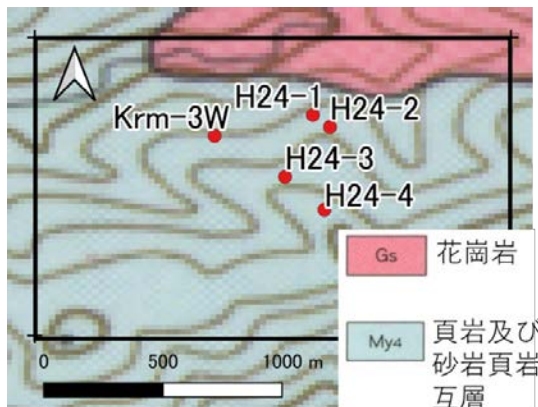


図4：栗平地区の空中電磁探査結果



5：栗平地区の平面地質図

20万分の1地質図幅「和歌山」GISデータ(産総研地質調査総合センター)

(https://gbank.gsj.jp/geonavi/docdata/data/org_data/wxga_751_org_751.jpg)を使用し、著者らが、ボーリング孔、縮尺、方位、黒枠線、凡例を加筆修正

3.2.2 熊野地区における考察

図6に熊野地区のボーリング孔と140 kHzによる電磁探査から得られた比抵抗値の分布を示した。この図において比抵抗値が大きく変わる境界は大まかに砂岩層と泥岩層の境界線と一致していた(図7)。

このように比抵抗値の値が岩質による影響も受けただため、熊野地区全体の相関で見ると高いR²値は得られなかった(図3)ものと考えられる。

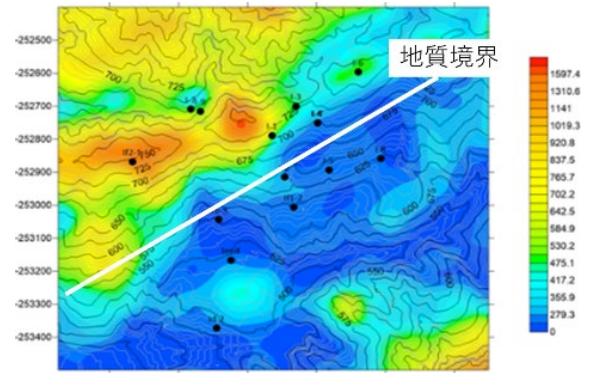
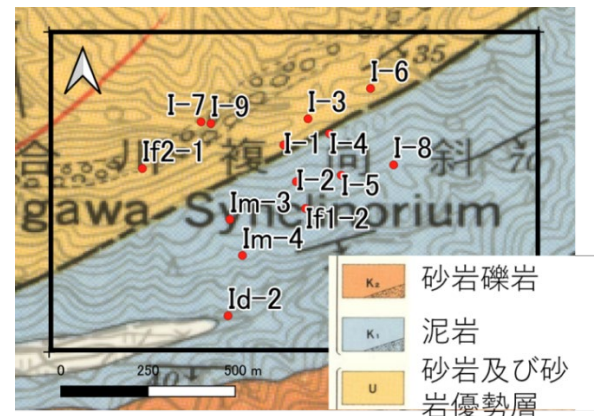


図6：熊野地区の電磁探査結果



7：熊野地区の平面地質図

5万分の1地質図幅「栗栖川」GISデータ(産総研地質調査総合センター)

(https://gbank.gsj.jp/geonavi/docdata/data/org_data/wxga_592_org_592.jpg)を使用し、著者らが、ボーリング孔、縮尺、方位、黒枠線、凡例を加筆修正

3.3 まとめ

紀伊山地のボーリング孔について、比抵抗値が大きくなるほど地下水位が深くなるという傾向が見られた。また、この傾向は140 kHzでの調査結果で最も強く見られた。

比抵抗値から地下水位を精度よく推定するには、

基岩地質の分布を考慮する必要があることがわかった。

4 参考文献

防災地質チーム，地質調査における電気探査の活用，寒地土木研究所月報 No.651，p51-54，2007.

大日本コンサルタント株式会社，那智川流域他空中物理探査による広域斜面調査業務業務概要書，2015.

大日本コンサルタント株式会社，新宮川流域南部他空中物理探査解析業務成果概要版，2013.

本稿は、令和3年度砂防学会研究発表会概要集（JSECE Publication No.88、ISSN 2433-0477）に掲載された内容を編集したものである。

亀裂のある急峻な山体の基岩の不飽和水文特性が雨水浸透に及ぼす影響

京都大学大学院農学研究科 ○寺山祐司・正岡直也・小杉賢一郎

1. はじめに

近年、山崩れやがけ崩れなどの斜面崩壊の中で、山体表層の土層だけでなく、山体深部の山体基岩までが崩壊土塊となる深層崩壊が問題になっている。深層崩壊は、それ自体が大規模な土砂移動現象で危険であることに加えて、土石流や河道閉塞の原因になることもあり、二次的な災害を起こす可能性がある点でも危険性が高い。このような深層崩壊は、豪雨による地盤への雨水浸透によって起こると考えられている。このため近年では、山体基岩層における地下水涵養プロセスが注目されている¹⁾²⁾。山体浅部の強風化基岩は構成粒子の一部が土壌化し、水がマトリックスの間隙内を移動することが近年の研究で確認された³⁾。また、花崗岩地質の森林斜面における研究で、基岩の透水性が土壌に比べて低い値であることが報告されている。しかし、ボーリング孔内の水位の観測によると、数十メートルの深さでも降雨に対し素早く水位が上昇することがある。こうした矛盾の原因として考えられるのが亀裂を伝った雨水浸透である⁴⁾。ボーリングコアの観察から、花崗岩流域には山体の浅い部分に多数の亀裂が存在する場合があることが分かっているが、亀裂が鉛直浸透にどの程度の影響を与えるかは明らかにされていない。そこで、亀裂のある基岩を単純な模型で再現し、降雨の浸透・流出実験を行うことで、その水移動に関する特性（浸透特性）を解析することを本研究の目的とした。

2. 研究手法

この研究の手法は、主に二つのプロセスから成る。まず基岩をミニチュア化した模型を用いて降水実験⁵⁾⁶⁾を行い、次に結果を逆解析することで浸透特性を評価する。前者を実験手法、後者を逆解析手法として、以下で説明する。

2.1. 実験手法

図1の装置で実験を行った。まず、試料容器に試料を詰めた(写真1)。今回の実験で試料として用いたのは、1辺が約1.6 cmの角が丸まったサイコロ(写真2)であり、この体積は4.067 cm³であった。資料容器には縦、横、高さ方向に、それぞれ5、5、30個のサイコロを詰めた(写真3)。サイコロと試料容器の間には壁面流出を防止するシリコン板を貼った。試料を詰めた部分の空隙率は5.47%であった。また飽和透水係数は0.416 cm/sであった。サイコロを詰めた試料容器を水が透過する台の上に乗せ、ポンプとホースを用いて上から給水し、試料容器の下から排出される排水量を秤で測定した。この際、一定の時間間隔で水の供給強度を変化させた。また、秤の重量は1秒インターバルで測定した。



写真1 試料容器

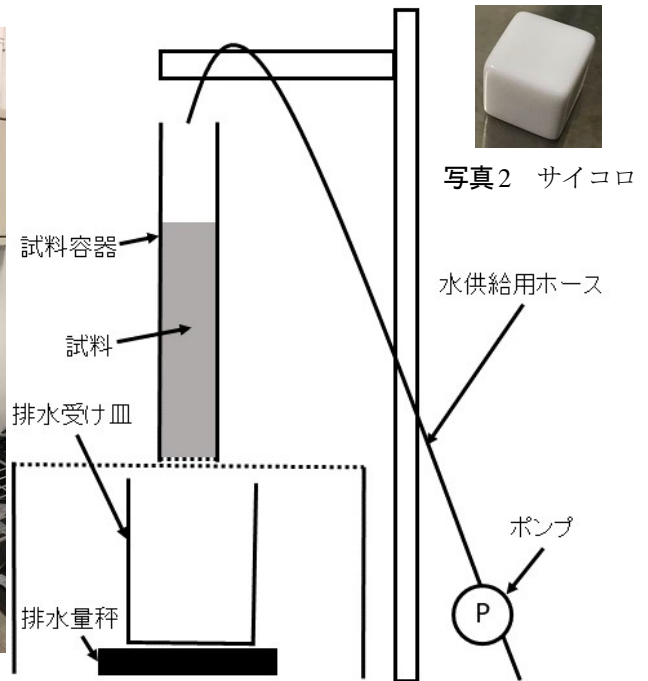


図1 実験装置

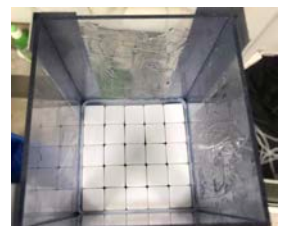


写真3 試料容器 (上から)

2.2. 逆解析手法

浸透特性を表す関数には、次の式①、②を用いた⁷⁾。

$$\textcircled{1} \quad K = K_s S_e^\alpha [Q(\ln(\psi/\psi_m)/\sigma + \beta\sigma)]^\gamma$$

$$\textcircled{2} \quad S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = Q(\ln(\psi/\psi_m)/\sigma)$$

ここで、 K_s は飽和透水係数、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、

Qは標準正規分布の上側確立を表す関数である。K_s, θ_s, θ_rは実測値であり、それぞれ0.416 cm/s, 0.0547, 0と設定した。またψ_mはS_c=0.5の時の圧力水頭、σは孔隙径分布の幅を表す無次元パラメータ、αとβは土壌孔隙の連結性に関わるパラメータであり、この解析ではこれら4つのパラメータを変数として扱った。孔隙の連結性に関わるもう一つのパラメータであるγは、この解析では1とした。2.1の実験で得られた排水量の値をフィッティングデータとして、式①、②を用いたリチャーズ式を解くことで、上記4つのパラメータを最適化した。

表1 パラメータ最適化結果

-ψ _m	σ	α	β
28.71cm	0.1080	1.556	0.3047

3. 結果と考察

逆解析で得られたパラメータの値を表1に示し、図2には1秒あたりの水の供給量(図2中のポンプの供給量)、実験で得られた1秒あたりの排水量(図2中の実験値)、逆解析でフィッティングされた排水量(図2中の計算値)を示した。図2では、予め1分間定量の水を供給し、その後、供給量を変えた最初のタイミングを0秒とした。これは後に述べる図3の2つの実験でも同様である。0秒から240秒までは、計算値による実験値の再現に概ね成功した。しかし、240秒から300秒までは、計算値に比べ実験値の増減が緩やかだった。図3では、水の供給を図2と異なる2通りのパターンで行った実験①、②に対し、表1のパラメータを用いて計算した排水量と比較することで、逆解析の妥当性を検証した。その結果、図3中に青い四角で示した様に、水の供給量が0.005cm/sec以下の時のフラックスの変化は、計算値の再現精度が低い傾向があった。具体的には、計算値よりも実験値の方が急激に変化するようなグラフになりやすかった。

水の供給量が0.005cm/sec以下のときに再現精度が低くなる原因としては、排水量の計測精度の問題、ポンプの精度の問題、および低水分領域での透水係数をモデルが再現しきれていない可能性が考えられる。ただし、概して実験値の再現精度が高い計算を行うことができた。

本稿は、令和3年度砂防学会研究発表会概要集(JSECE Publication No.88, ISSN 2433-0477)に掲載された内容を編集したものである。

参考文献

- 1) K.Kosugi et al.:WATER RESOURCES RESEACH,Vol.47,pp.1-16(2011)
- 2) C.P.Gabrielli et al.:Journal of Hydrology,Vol.450-451,pp.117-133(2011)
- 3) S.Katsura et al.:Vadose Zone Journal,Vol.8,No.3,pp.557-573(2009)

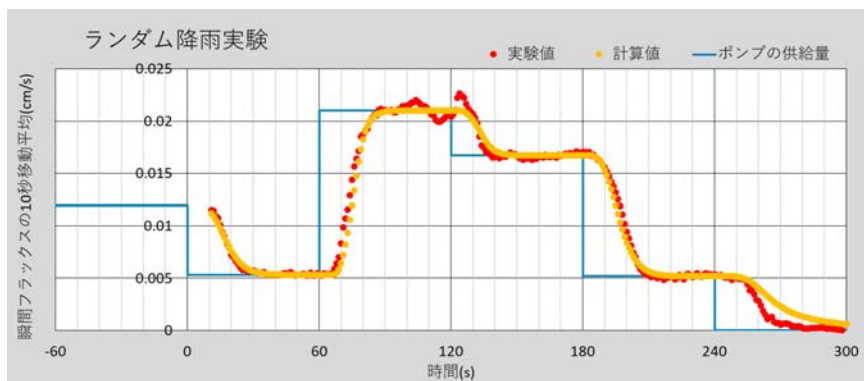


図2 降雨実験の結果と逆解析の結果

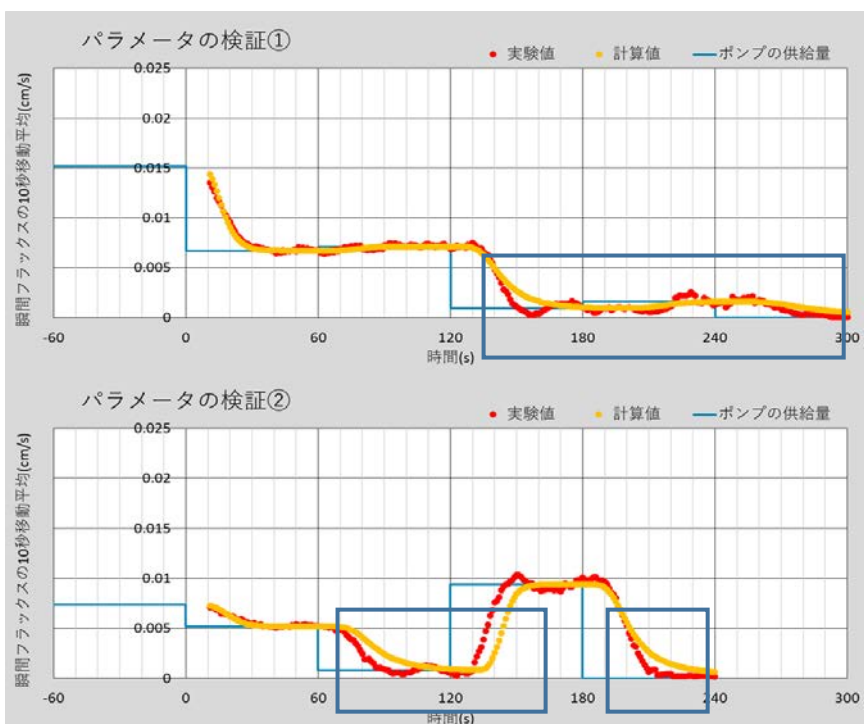


図3 パラメータの検証実験結果

- 4) R.Salve et al:WATER RESOURCES RESEACH,Vol.48,pp.1-25(2012)
- 5) 森也寸志ほか：農業土木学会論文集, No.213, pp.61-68(2001)
- 6) 西垣誠ほか：地下水学会誌, Vol.35,No.2, pp.113-122(1993)
- 7) K.Kosugi:Soil Science Society of America Journal,Vol.63,pp.270-277(1999)

3. 学会活動

3.1 学会誌掲載

タイトル	執筆者（連盟含む）	雑誌名	巻号	論文種別	発行年月
コアストーンが分布する斜面の水文特性に関する研究	榎原伴樹・筒井和男・崎山朋紀・岸畑明宏・坂口隆紀・木下篤彦・柴田俊・松澤真・田中健貴	河川技術論文集	Vol.26	論文	2020.6
地すべり対策工の効果の簡易的な検証方法の提案	岸畑明宏・榎原伴樹・崎山朋紀・坂口隆紀・木下篤彦	日本地すべり学会誌	Vol.57 No.5	技術報告	2020.9
土砂移動時の地盤振動の再現・模型実験からの考察 -	筒井和男・坂口隆紀・海原荘一・谷田佑太・木下篤彦・柴田俊・金澤瑛・中谷洋明・里深好文・藤本将光	砂防学会誌	Vol.73 No.5	研究ノート	2021.1
2011年に深層崩壊が発生した奈良県十津川村栗平地区における比抵抗探査を用いた断層沿いの地下水流入過程の検討	木下篤彦・柴田俊・山越隆雄・中谷洋明・加藤智久・河戸克志・奥村稔・三田村宗樹・松井保	日本地すべり学会誌	Vol.58 No.1	論文	2021.1
高感度地震観測網による大規模土砂移動発生時の地盤振動特性と検知	海原荘一・浅原裕・木下篤彦・中谷洋明・田中健貴	砂防学会誌	Vol.73 No.5	論文	2021.1

3.2 学会発表

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
1	山間地域におけるUAVによる自動巡回画像取得の試行について	河井恵美・小竹利明・山田拓・柴田俊・木下篤彦・能島佑佳・久家政治・荒木義則	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
2	大規模土砂災害における無人航空機等を活用した初動調査について	秦雅之・亀井稔・松岡和行・南口由行・木下篤彦・中田一騎・山野亨・河井恵美・荒木義則	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
3	天然ダムからの多量の土砂の供給を受けた河道における河床変動の特徴	只熊典子・海原荘一・高田隆行・木下篤彦・柴田俊・小竹利明・山田拓・田中健貴	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
4	土石流の河川への流入を考慮した洪水氾濫リスク評価	薩山星・飛岡啓之・平川了治・木下篤彦・竹林洋史	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
5	人工衛星「しきさい」を活用した那智の滝上流域の水源涵養機能に関する研究	崎山朋紀・宮崎徳生・榎原伴樹・岸畑明宏・坂口隆紀・柴田俊・木下篤彦・鈴木清敬・鈴木大和・中谷洋明	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
6	散水実験によるコアストーンの水文特性への影響検討ー那智川の花崗斑岩の事例	松澤真・鬼頭伸治・田村友起夫・小竹利明・山田拓・柴田俊・木下篤彦・榎原伴樹	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
7	複数地域の流出特性を考慮した汎用タンクモデルの構築方法の提案	池田寛・山田拓・小竹利明・木下篤彦・柴田俊・中谷洋明・野村康裕・倉本和正・中田一騎・大上峻	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
8	多用途ブロックのかみ合わせ効果に関する一考察	佐藤哲也・小竹利明・木下篤彦・神野忠広・近藤和仁・橋口聡太郎・浅利修一・秋野淳一	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
9	紀伊山地における重力変形斜面と水質の関係	小竹利明・木下篤彦・山田拓・柴田俊・小川内良人・横山修	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
10	栗平地区における断層の分布と地下水の挙動に着目した2011年の深層崩壊発生原因の検討	木下篤彦・柴田俊・山越隆雄・中谷洋明・加藤智久・河戸克志・奥村稔・三田村宗樹・松井保	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
11	斜面崩壊に伴う土砂移動を想定した室内振動実験-高感度地震観測網における大規模土砂移動時の地盤振動特性の再現-	竹田海渡・谷田佑太・海原荘一・福島康宏・木下篤彦・柴田俊・山田拓・小竹利明・金澤瑛・中谷洋明・藤本将光・里深好文	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
12	和歌山県土砂災害啓発センターにおける防災教育の取り組みについて	坂口隆紀・岸畑明宏・榎原伴樹・崎山朋紀・柴田俊・木下篤彦	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
13	昭和28年日高川流域での土砂災害教訓伝承の取組み	森川智・崎山朋紀・宮崎徳生・榎原伴樹・岸畑明宏・坂口隆紀・伊奈高司・谷本展也・木下篤彦	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
14	半減期の異なる2つの実効雨量を用いた危険降雨量の設定方法の検討～紀伊山系における検討事例～	山田拓・小竹利明・木下篤彦・柴田俊・中谷洋明・野村康裕・倉本和正・池田寛・中田一騎・大上峻平	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
15	空振りの少ないCL対象災害の選定条件に関する一考察	大上峻平・山田拓・小竹利明・木下篤彦・柴田俊・中谷洋明・野村康裕・倉本和正・池田寛・中田一騎	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
16	日置川水系新宮川水系における放射性炭素年代測定結果を用いた深層崩壊発生頻度推定方法の検討	岸畑明宏・坂口隆紀・崎山朋紀・榎原伴樹・木下篤彦・柴田俊・小山内良人・横山修・田中健貴	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
17	奈良県赤谷西地区の重力変形斜面における降雨時のイオン濃度変化	田中健貴・小竹利明・木下篤彦・山田拓・柴田俊・小松慎二・窪田安打・林幸一郎	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
18	防災用監視カメラを用いた降雨量推定手法の検討	金澤瑛・木下篤彦・中谷洋明・山田拓・柴田俊・海原荘一・井深真治	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
19	支川で発生した土石流による合流部の河床変動に関する実験的研究	水野裕斗・北村一貴・里深好文・小竹利明・山田拓・木下篤彦・柴田俊・岡野和行・井之本信	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
20	奈良県赤谷西地区の重力変形斜面における岩盤内の地下水特性	林幸一郎・窪田安打・小松慎二・小竹利明・山田拓・柴田俊・木下篤彦・田中健貴	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
21	地質境界付近の水文挙動が表層崩壊の発生に与える影響	榎原伴樹・筒井和男・崎山朋紀・岸畑明宏・坂口隆紀・木下篤彦・柴田俊・松澤真・田中健貴	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
22	数値計算モデルによる予測結果を用いた対策検討ー紀伊山系滝川流域栗平地区の事例ー	小竹利明・山田拓・柴田俊・木下篤彦・臼杵伸浩・岡野和行・江口友章・井之本信・水山高久	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
23	紀伊半島大水害の河道閉塞と対策	小竹利明・山田拓・柴田俊	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5
24	熊野川流域における深層崩壊の発生を伴う土砂洪水氾濫の再現計算	日名純也・片嶋啓介・小竹利明・山田拓・山下大雅・柴田俊・内田太郎	2020年度砂防学会研究発表会	2020.5

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
25	那智川流域における土砂流出発生,非発生の分離の試み	小泉和也・島田徹・渡辺隆吉・孝子繪 図・水流竜馬・小竹利明・山田拓・柴田 俊	2020年度砂防学会研究 発表会	2020.5
26	ポアホールカメラによる亀裂判 読の結果と破砕度区分を組み合 わせた重力による斜面の変形深 度の評価	山本望・平田遼・手塚咲子・石井靖雄・ 柴田俊・山田拓・小竹利明	2020年度砂防学会研究 発表会	2020.5
27	重力変形斜面における降雨と岩 盤内地下水の水位変動および水 質変化の関係	林幸一郎・小松慎二・窪田安打・木下篤 彦・小竹利明・山田拓・柴田俊・田中健 貴	第10回 土砂災害に関す るシンポジウム	2020.8
28	重力変形斜面における地下水の 水質変化に岩盤からの溶出イオ ンが与える影響	田中健貴・木下篤彦・小竹利明・山田 拓・柴田俊・窪田安打・小松慎二・林幸 一郎	第10回 土砂災害に関す るシンポジウム	2020.8
29	紀伊半島大水害で発生した深層 崩壊斜面下流における蛇行度及 び川幅と河床変動の関係	海原荘一・只熊典子・高田隆行・木下篤 彦・柴田俊・小竹利明・山田拓・田中健 貴	第10回 土砂災害に関す るシンポジウム	2020.8
30	大規模土砂災害における無人航 空機を活用した緊急調査の試行 的研究	荒木義則・木下篤彦・秦雅之・河井 恵美・小竹利明・山田拓・柴田俊・ 亀井稔・松岡和行・南口由行	第10回 土砂災害に関す るシンポジウム	2020.8
31	輝度の差分映像による斜面崩壊, 土石流の検知と降雨,夜間の監視 映像の鮮明化	柴田俊・小竹利明・山田拓・木下篤彦・ 中谷洋明・金澤瑛・海原荘一・井深真治	第10回 土砂災害に関す るシンポジウム	2020.8
32	人工衛星「しきさい」を活用し た那智の滯上流域の森林活性度 と可能蒸発散量に関する研究	宮崎徳生・筒井和男・岸畑明宏・坂口隆 紀・木下篤彦・柴田俊・鈴木大和・中谷 洋明・鈴木清敬	第10回 土砂災害に関す るシンポジウム	2020.8
33	水路実験による土砂移動時の地 盤振動のスペクトルと距離減衰 に関する考察	筒井和男・坂口隆紀・海原荘一・谷田佑 太・木下篤彦・柴田俊・金澤瑛・中谷洋 明・里深好文・藤本将光	第10回 土砂災害に関す るシンポジウム	2020.8
34	超過確率年を用いた土砂災害警 戒避難基準雨量の有効性	竹本大昭・海原荘一・木下篤彦・田中 健貴・中谷洋明	第10回 土砂災害に関 するシンポジウム	2020.8

(1) 砂防学会研究発表会

愛知県名古屋市で開催予定であった砂防学会研究発表会は国内での新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、大会中止となったため、投稿のみとなった。

期 間：2020年5月19日（火）～21日（木）

会 場：愛知県産業労働センター（ウインクあいち）

(2) 第10回土砂災害に関するシンポジウム

山口県宇部市で開催予定であった土砂災害に関するシンポジウムは国内での新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、シンポジウム中止となったため、投稿のみとなった。

期 間：2020年8月28日（金）～29日（土）

会 場：山口大学医学部 A 棟 1 階大講義室（オーディトリウム）

4. 広報・啓発活動

● 「タウンミーティング

～土砂災害から身をまもるために必要なこと～

土砂災害の被害軽減のために、「何ができるか」・「何をすべきか」を県と由良町内各区長等の参加者が対話形式で行う集会を実施した。

開催日：2020年12月22日（火）

会場：由良町役場

5. 研修活動

(1) 「ライブ配信を用いた土砂災害に関する防災教育」

和歌山県立田辺高等学校と福島県立磐城高等学校両校とが進める防災交流に際し、紀伊半島大水害の概要や土砂災害の種類、対策工事についてオンラインで説明し、土石流模型装置による実験のライブ配信により、土石流や砂防堰堤の効果を実演した。

開催日：2020年11月27日（金）

会場：太地町立太地中学校

参加者：60名

(2) 「デジタルコンテンツを用いた土砂災害に関する防災教育」

関西広域連合主催の防災職員向けの研修において、オンライン配信による土砂災害に関する研修を実施した。

開催日：2021年1月13日（水）、14日（木）

会場：那智勝浦町立市野々小学校

参加者：20名

令和 2 年度 大規模土砂災害対策研究機構年報

発 行	令和 3 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 HP	http://www.kkr.mlit.go.jp/kiisanchi/kikou/