

**令和元年度
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。

令和元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）

- ・ 赤谷西地区岩盤クリープ斜面の変動と空中電磁探査による比抵抗分布特性について
- ・ 空中電磁探査と水位データを活用した栗平地区の崩壊メカニズムについて
- ・ Examination of landslides detection technique and sediment-sand observation technique by image analysis

2.2 国土交通省国土技術政策総合研究所

- ・ 我が国における近年の河道閉塞とその対策

2.3 土木研究所

- ・ ボアホールカメラによる亀裂判読の結果と破碎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

2.4 和歌山県

- ・ SAR 干渉画像を用いた崩壊危険斜面抽出手法とその適用範囲について
- ・ 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
- ・ 那智川流域における地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険斜面の抽出に関する研究
- ・ 干渉 SAR 解析による崩壊危険斜面抽出手法とその適用範囲について
- ・ 地質境界が存在する斜面での地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険度評価手法の提案

- ・ 地すべり対策工の効果の検証方法について
- ・ 立平地区地すべりにおける対策工の評価方法の提案
- ・ SAR 干渉画像を用いた斜面変動検出の試み
- ・ Landslide Detection by InSAR Method Analysis and Its Range of Reach
- ・ Estimation of hydrogeological structure using airborne electromagnetic survey in the Iya_ Tanabe city
- ・ A study on the characteristics of the slope with a risk of shallow landslides where the geological boundary exists
- ・ Training Program of the Kii Peninsula Flood Experience and Its Effects on Students

2.5 三重大学

- ・ パルス法による山地河川における流砂量推定手法の高度化

2.6 北海道大学

- ・ 奈良県赤谷西地区を対象とした地下水および渓流水の水質分析による深層崩壊危険斜面抽出に関する検討

2.1 相互連携に基づく研究 テーマ1

赤谷西地区岩盤クリープ斜面の変動と空中電磁探査による比抵抗分布特性について

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
 応用地質株式会社
 大日本コンサルタント株式会社

○木下篤彦
 田中健貴
 桜井亘・内田太郎
 林幸一郎・窪田安打
 河戸克志・奥村稔

1. はじめに

奈良県・和歌山県にまたがる紀伊山系では、2011年の台風12号により、多数の深層崩壊が発生し、多大な被害が発生した¹⁾。これらの被害を軽減するには、事前に危険箇所を把握し、対策を検討しておく必要がある。これまで、深層崩壊の危険箇所抽出手法としては、地形判読によるもの、水質によるもの、物理探査によるものなどが提案されている²⁾。これらの手法は、一長一短あり、調査する面積や地質・地形によって使い分ける必要がある。これらのうち、本研究では、短い期間に広いエリアでの調査が可能な物理探査手法である空中電磁探査に着目した³⁾。2011年に深層崩壊が発生した奈良県五條市の赤谷流域内の岩盤クリープが発生している斜面(以下、赤谷西地区と呼ぶ。)において、空中電磁探査により地表から地下100~150m程度の深さの比抵抗分布を計測するとともに、孔内傾斜計により斜面の挙動を計測し、比抵抗分布の妥当性を検証した。

2. 熊野川流域で実施した空中電磁探査の概要

図-1に赤谷西地区の位置図を、図-2に空中電磁探査の仕組みの模式図を示す。空中電磁探査は、地盤の比抵抗を測定する電磁探査の一種で、ヘリコプターを用いて空中から人工的に発生させた交流磁場が地中を透過する際に生ずる電磁誘導現象を利用し、地盤の比抵抗3次元構造を測定・解析し、地質・地下水状態を広域で把握する探査手法である³⁾。図-3に空中電磁探査により得られる比抵抗値と体積含水率・粘土鉱物含有量との関係についての模式図を示す。粘土分が多くなるほど、また、体積含水率が多くなるほど低比抵抗となり、青で表示する。逆に、粘土分が少なくなるほど、また、体積含水率が少なくなるほど高比抵抗となり、赤で表示する。赤谷流域を含む熊野川流域では、2012年から2014年にかけて計326.11km²の範囲で空中電磁探査を行っている。なお、測定はいずれも降雨の少ない時期を選んで実施している。

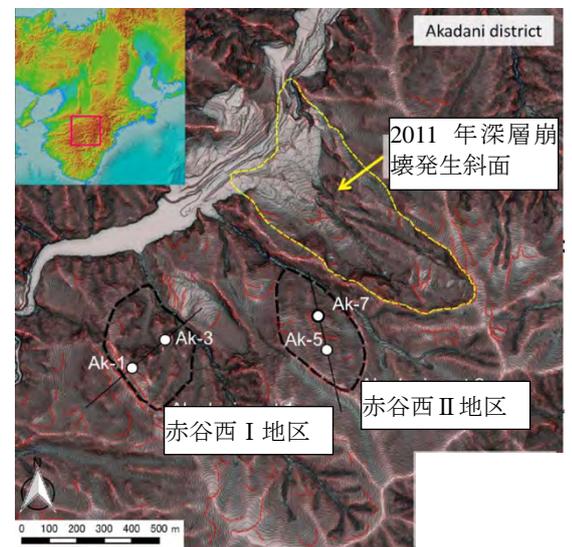


図-1 赤谷西地区の位置図。Ak-○はボーリング位置かつ孔内傾斜計観測位置を示す。

3. 赤谷西地区の岩盤クリープ斜面の危険度評価と孔内傾斜計でのひずみの観測について

3.1 既往研究を基にした2つの岩盤クリープ斜面の危険度評価

まず、既往研究成果²⁾を基に、赤谷西I・II地区の斜面の危険度評価を行った。評価手法としては、ひずみ率²⁾による手法と千木良ら⁴⁾による地質・地形からの危険度評価手法を用いた。ひずみ率は、小崖長を斜面長で除したもので、斜面の変形割合を示す²⁾。また、千木良ら⁴⁾による深層崩壊発生危険斜面の評価手法は、斜面の見た目の概況から崩壊危険度を判定するものである。ひずみ率の算出結果は、赤谷西I・II地区でそれぞれ4.1%、2.7%であった。また、地質・地形による危険度は、それぞれIV、IIであった。このことから従来の手法で評価した場合は、ひずみ率でも地質・地形でも、赤谷西I地区の方が危険度が高いことが分かった。

3.2 孔内傾斜計によるひずみ速度の観測について

図-4(a)・(b)に赤谷西I・II地区の

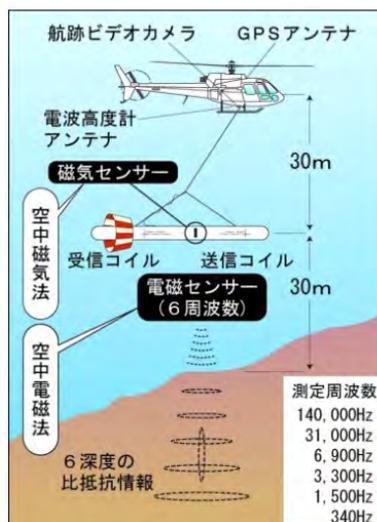


図-2 空中電磁探査の仕組みの模式図。測定周波数によって異なる深度で比抵抗が得られる。

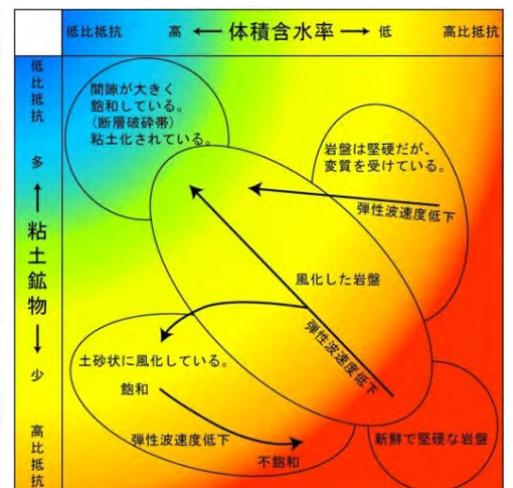


図-3 空中電磁探査により得られる比抵抗値と体積含水率・粘土鉱物含有量との関係についての模式図

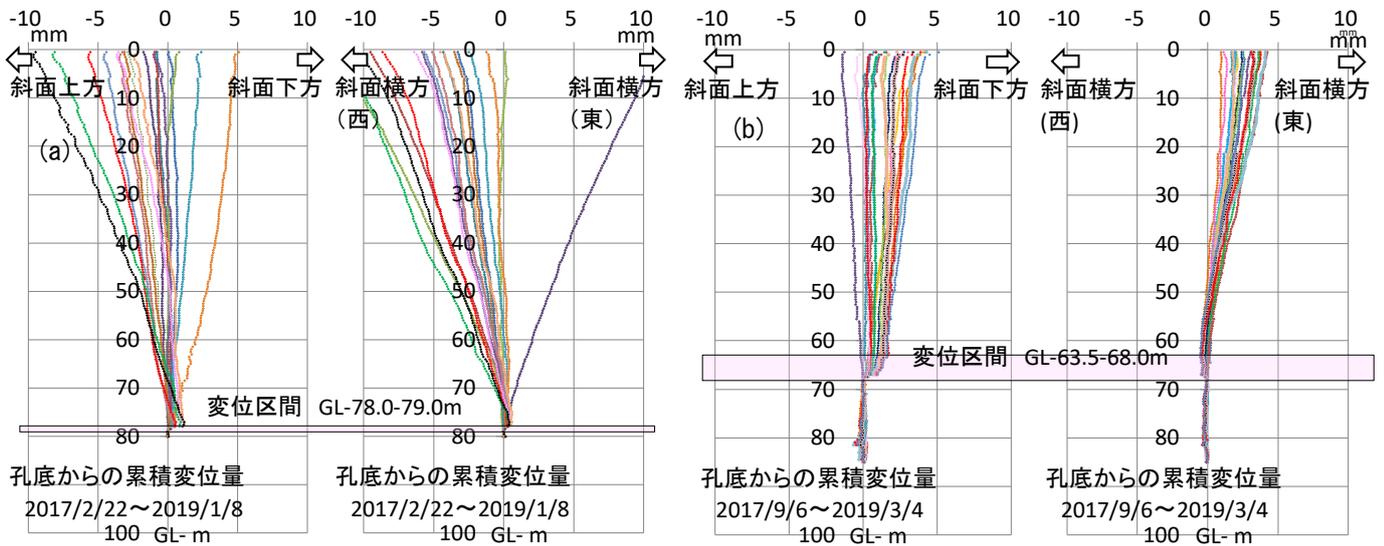


図-4 赤谷西 I・II 地区での孔内傾斜計による地中のひずみ変位観測結果. (a) I 地区(AK-1), (b) II 地区(Ak-5).

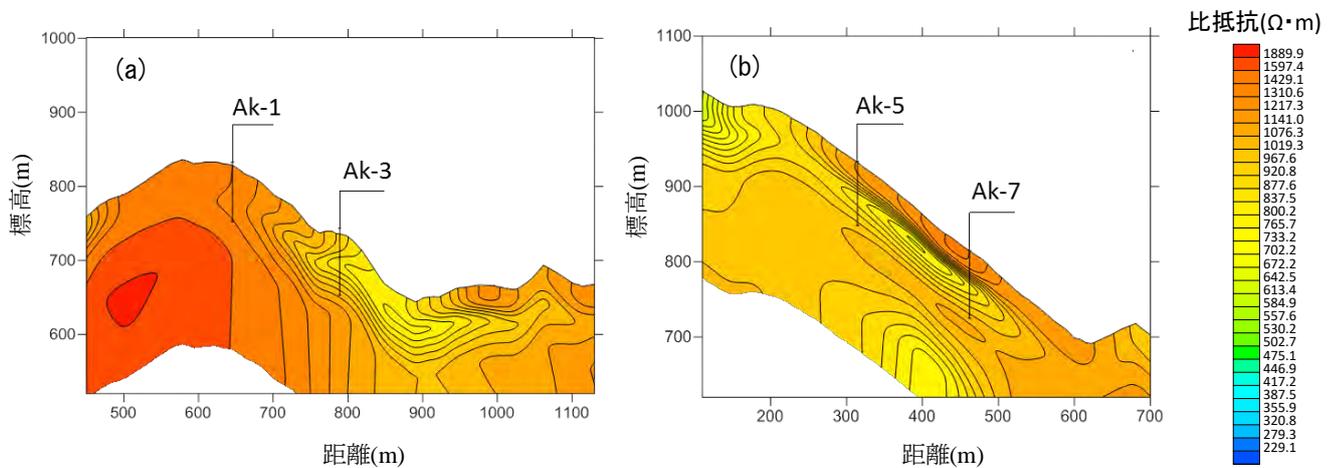


図-5 赤谷西 I・II 地区での主測線の比抵抗縦断面図. (a) I 地区, (b) II 地区.

斜面での孔内傾斜計による地中のひずみ変位の調査結果を示す. I 地区では、深度 78.0~79.0m に微小なせん断性の変形が見られた. 一方、II 地区では、深度 63.5~68.0m に微小なせん断性の変形が見られた. I 地区で観測を行った約 2 年間の変位速度は、0.6mm/年程度(深度 78.0~79.0m)であった. 一方、II 地区の約 1.5 年間の変位速度は、1.1mm/年程度(深度 63.5~68.0m)であった. このことから、変位速度の大きい層で考えると、II 地区の方が変位速度が大きく、崩壊の危険性が高いことが分かった. この結果は、ひずみ率や地質・地形による評価結果とは異なる.

4. 空中電磁探査による赤谷西 I・II 地区の比抵抗分布について

図-5 (a)・(b)に赤谷西 I・II 地区の主測線の比抵抗断面を示す. (a)・(b)ともに地下 50m 程度付近に比抵抗分布が変化する面が見られた. 特に、(b)は(a)に比べ比抵抗の変化面が明瞭に見られ、変形が発生している面と考えられる. このことは、孔内傾斜計による変位速度の調査結果と同様で、II 地区の方が I 地区よりも斜面の変形が進み、崩壊の危険性が高いことが示唆された.

5. おわりに

本研究では、赤谷西 I・II 地区について、既往研究による危険度評価手法と空中電磁探査による比抵抗分布による評価手法を孔内傾斜計による変位速度と比較した結果、空中電磁探査による手法の方が危険度を適切に評価できていることが分かった. ただし、空中電磁探査による手法は補間・補正などが伴うため、精度が大きく落ちることも想定される. このため、複数の手法で検討し、判断する必要があると考えられる.

参考文献：1) 松村ら：2011 年 9 月台風 12 号による紀伊半島で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol. 64，No. 5，pp. 43-53，2012，2) 木下ら：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，pp.1-18，2016，3) 坂井ら：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. 20-29，2016，4) 千木良ら：深層崩壊発生危険斜面の地質・地形的抽出法について，平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集 A，pp.16-17，2014

空中電磁探査と水位データを活用した栗平地区の崩壊メカニズムについて

The mechanism of the deep-seated landslide in Kuridaira District using the airborne electromagnetic survey and the groundwater level data

木下篤彦 (国総研) *, 田中健貴 (大規模土砂災害対策技術センター),

東原 純, 加藤智久, 田邊裕明(中央開発(株)), 河戸克志, 奥村稔(大日本コンサルタンツ(株))

Atsuhiko KINOSHITA (NILIM) *, Yasutaka TANAKA (Sediment Disaster Prevention Technology Center),

Jun TSUKAHARA, Tomohisa KATO, Hiroaki TANABE(Chuo Kaihatsu Corporation.), Katsushi KAWATO

and Minoru OKUMURA(NIPPON ENGINEERING CONSULTANTS CO.,LTD.)

キーワード：深層崩壊, 空中電磁探査, 比抵抗, 地下水位

Keywords: Deep-seated landslide, Airborne electromagnetic survey, Resistivity, Groundwater level

1 はじめに

2011年9月の紀伊半島大水害では、紀伊山系で大規模な深層崩壊が多数発生し、大きな被害が出ている。今後、これらの被害を軽減するためには、深層崩壊の発生メカニズムを明らかにし、これに基づいて今後の発生箇所を予測する必要がある。本研究では、紀伊半島大水害で深層崩壊が発生した奈良県十津川村の栗平地区を例に取り、空中電磁探査と現地でのボーリング実施箇所での地下水位の観測から、深層崩壊のメカニズムを分析した。

2 栗平地区の概要及び空中電磁探査・ボーリング調査の実施について

2.1 栗平地区の概要について

写真-1に栗平地区の崩壊2日後の様子を、図-1に位置図を示す。栗平地区では、幅600m、高さ450m、長さ650mの崩壊が発生し、約2,385万m³にのぼる崩壊土砂が河道を閉塞し、湛水池を形成している。この地区の地質は、四万十帯日高川層群である。また、斜面は流れ盤となっている。

2.2 空中電磁探査の概要について

空中電磁探査は、地盤の比抵抗を測定する電磁探査の一種で、ヘリコプターを用いて空中から人工的に発生させた交流磁場が地中を透過する際に生ずる電磁誘導現象を利用し、地盤の比抵抗3次元構造を測定・解析し、地質・地下水状態を広域で把握する探査手法である(図-2)。粘土分が多くなるほど、また、体積含水率が多くなるほど低比抵抗となり、青で表示し、逆の場合は赤で表示する。栗平地区を含む熊野川流域では、2012年から2014年にかけて計326.11km²の範囲で空中電磁探査を行っている。なお、測定はいずれも降雨の少ない時期を選んで実施している。

3.3 ボーリング及び地下水位調査について

ボーリングについては、2012年4月より栗平地区で図-1に示す6箇所で行うとともに、ボーリング調査終了後には地下水位やパイプ歪計・パイプ傾斜計による歪みの観測を行っている。

3 空中電磁探査の結果について

図-3に周波数140kHzの比抵抗平面分布を示す。崩壊斜面の中腹から末端にかけて広い低比抵抗ゾーンが見られる。また、図-4に図-1中(a)~(c)における比抵抗縦断面図を示す。図-4(b)から、低比抵抗ゾーンは斜面中腹から栗平川へ向かっており、低比抵抗ゾーンが広がっている原因として、地下水位が高いことが挙げられる。また、図-4において、崩壊斜面のすぐ側にある、(a)・(c)では、比抵抗が大きく変化するゾーンが見られる。これらは、斜面が変形しているゾーンと考えられる。

4 地下水位の観測結果について

地下水位の観測成果として、図-5に連続雨量と雨による水位上昇量との関係を示す。なお、連続雨量とは、降雨前後24時間無降雨状態であることをもって一連の降雨としている。(a)の水位孔2は斜面上部にあるが、斜面側部にある(b)の水位孔6の約2倍の水位上昇量であることが分かった。斜面上部からの多量の水の供給が崩壊の原因の一つになったと考えられる。

5 おわりに

本研究では、空中電磁探査と斜面での地下水位観測から、栗平地区の崩壊メカニズムを検証した。今後は、斜面周辺での水文挙動や比流量に着目して、さらに検証を進めていきたい。



写真-1 崩壊 2 日後の栗平地区の様子. 幅 600m, 高さ 450m, 長さ 650m.

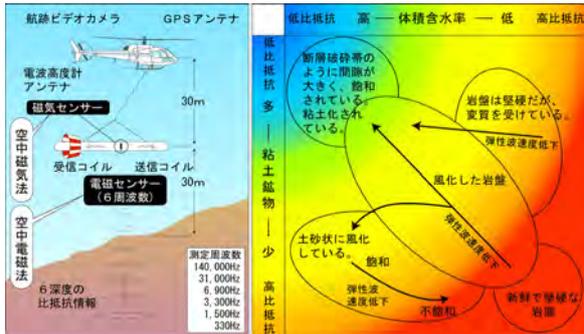


図-2 (a)空中電磁探査の仕組みの模式図. 測定周波数によって異なる深度で比抵抗が得られる. (b) 空中電磁探査により得られる比抵抗値と体積含水率・粘土鉱物含有量との関係についての模式図

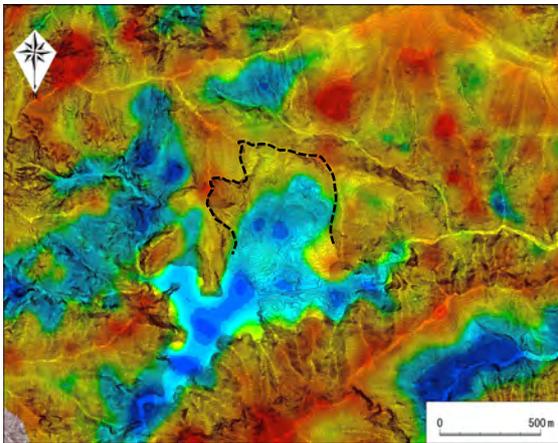


図-3 周波数 140kHz(地表から約 10m 深さまでの平均比抵抗)の比抵抗平面分布. 点線は崩壊斜面の縁を示す.

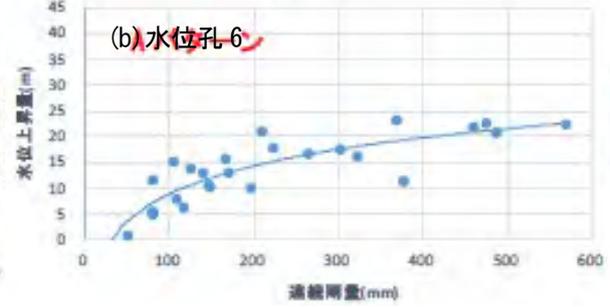
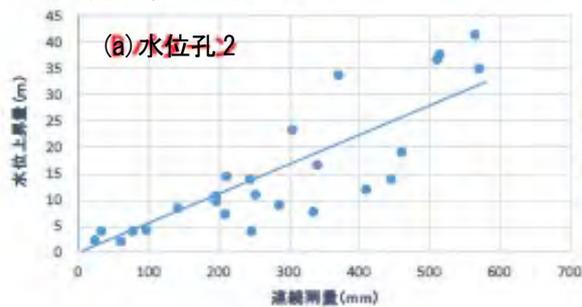


図-5 図-1の(a)水位孔 2, (b)水位孔 6の連続雨量と水位上昇量との関係

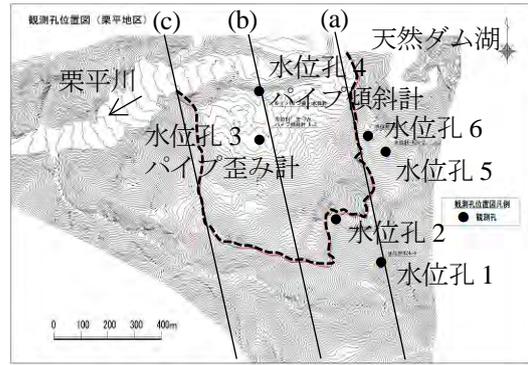


図-1 栗平地区の位置図及び観測状況. 実線(a)~(c)は図-4の空中電磁探査の測線を, 点線は崩壊斜面の縁を示す. 矢印は流向を表す.

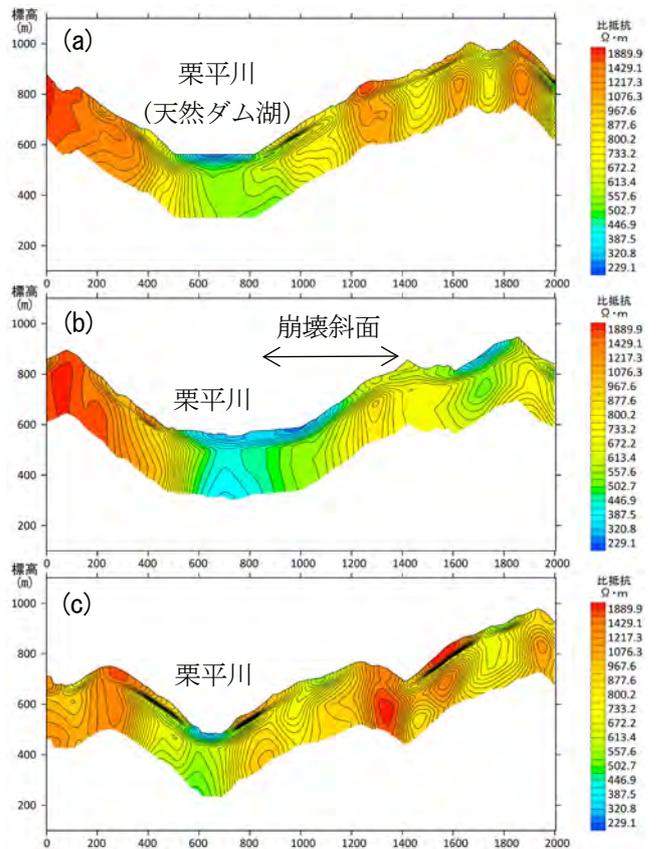


図-4 図-1中(a)~(c)測線の比抵抗縦断面図

Examination of landslides detection technique and sediment-sand observation technique by image analysis

Suguru Shibata^{*1}, Taku Yamada^{*1}, Toshiaki Kotake^{*1}, Atsuhiko Kinoshita^{*2}, Tsuyoshi Ikeshima^{*3}, Tasuku Mizutani^{*3} and Sadakazu Matsumoto^{*3}

^{*1} Kiisan Sabo Office, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

^{*2} National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

^{*3} Nippon Koei Co., Ltd., Japan

At present, image monitoring is required to identify and confirm landslides and sabo facilities from CCTV and on-site cameras. In addition, a contact-type method in which a turbidity meter is installed in the river is still the mainstream method for measuring the turbidity of a river, which is important information for the observation of sediment flow. There are many situations in which turbidity meters are washed away or destroyed by sediment during large scale floods.

In order to solve these problems, we developed an image analysis system that automatically analyzes image changes associated with landslides and facility deformations using information from camera images installed in the field, and notifies operators. In addition, we analyzed an image of a river and observed numerical values and brightness in the RGB color system. Based on this, the application range of image analysis in sediment observation was organized based on the correlation between image information, river turbidity, water level, and hydrophone pulse value, and we aimed to develop a new method for using image analysis. We also worked on improving the video of shooting in the dark and in the rain.

We have found that the R value increased when the sediment movement became active. In particular, we proposed that the timing when the value of R / B exceeds 1 is set as the threshold when sediment movement becomes active in this case.

Key words: *Image analysis, image difference method, system development, turbidity, sediment transport observation*

1. BACKGROUND & PURPOSE

Although natural dams, slope failures, and river flooding are monitored by CCTV and on-site cameras, it is impossible for humans to monitor for 24 hours. In addition, the current cameras are installed in many places, but there are many situations where the camera's performance cannot be fully exhibited due to various obstacles such as nighttime darkness, rain, and fog, and it cannot be said that it is fully utilized.

Based on this background, we have optimized the images and improved them so that sufficient

information can be obtained in any situation. In addition, we automatically send alerts from camera images to evacuate residents and construction workers. The main purpose of this research is to connect it to safety measures.

As a concrete content of the research theme, it has been pointed out that the R value, which value indicates red color in RGB color system increases and the brightness changes drastically during debris flow in the existing research, but what value is really given for issuing an alarm etc. We considered whether it was suitable.

2. OBSERBATION SITE

The map in the jurisdiction of Kiisan Sabo Office is shown. Within this jurisdiction, this study was observed in the Akatani, Nagatono, Kuridaira, Iya, and Nachikawa areas. In this presentation, we will focus on the image analysis performed on the Iya area, Akatani area and Nagatono area.



Figure 1 observation site in Kii Peninsula

3. OBSERVATION METHOD

We analyzed the response of RGBL values and Sediment hydrological observation data for June 26 ~July 4 when significant water discharge occurred during the observation (photographing) period. About the relationship between HP / turbidity and RGBL values Study was carried out.



Figure 2.1 Image analysis of Kumano River

At the same time we also performed image analysis of the landslide slopes in the Akatani and Nagatono districts. Specifically, in the Akatani area, we examined methods for detecting collapse and facility deformation by image analysis, and in the Nagatono

area, we extracted the problems of the existing CCTV and examined countermeasures. Both studies were based on the improvement of existing cameras.



Figure 2.2 Slope collapse in Akatani area



Figure 2.3 Slope collapse in Nagatono area

4. RESULT OF FLOODING ANALYSIS

First we talk about river flooding. When turbidity increases, R is superior to B. The ratio of R and B may be an indicator. Although the brightness may increase at night, it is difficult to separate it from rainfall and turbulence. The value of R is always higher for standard colors than for water. The ratio of red (R) on the water surface to standard red (r) may be an indicator.

If the ratio of red to blue (R / B) on the water surface is arranged, it responds to fluctuations in turbidity. When turbidity rises, $R / B > 1$ continues.

At present, there is still a lot of possibility of fluctuation and it is necessary to accumulate data. R / B is simple and versatile as a turbidity detection index, but for the time being it needs to be handled as a trigger for data and CCTV image confirmation.

To improve the hit rate, a combination such as R / r approaching 1 is required. (For example, $R / B > 1$ and $R / r > 0.8$ to 0.9)

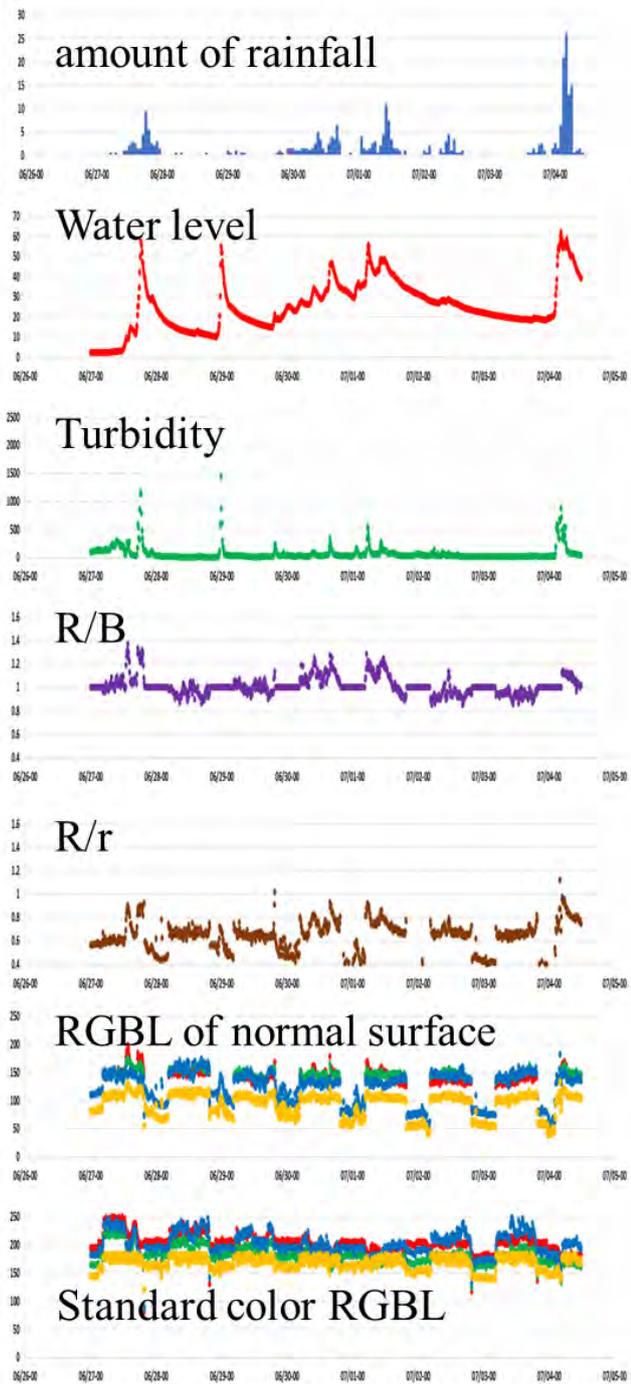


Table 1 Each measured value in Iya River

5. RESULT OF SLOPE FAILURE IMAGE ANALYSIS

We extracted the problems of the existing CCTV and examined the countermeasures. Several methods have been used to improve the image during

rainfall.

The development of an image processor integrated with a surveillance camera has greatly improved the sharpness of images at night, and the visible range such as collapsed areas has also been greatly expanded. Furthermore, retroreflective materials and solar lights were used to improve the lack of illumination. In order to reduce environmental noise in image sharpening, correction of weight balance and analysis of phase change were performed.

In Akatani and Nagatono, there are significant

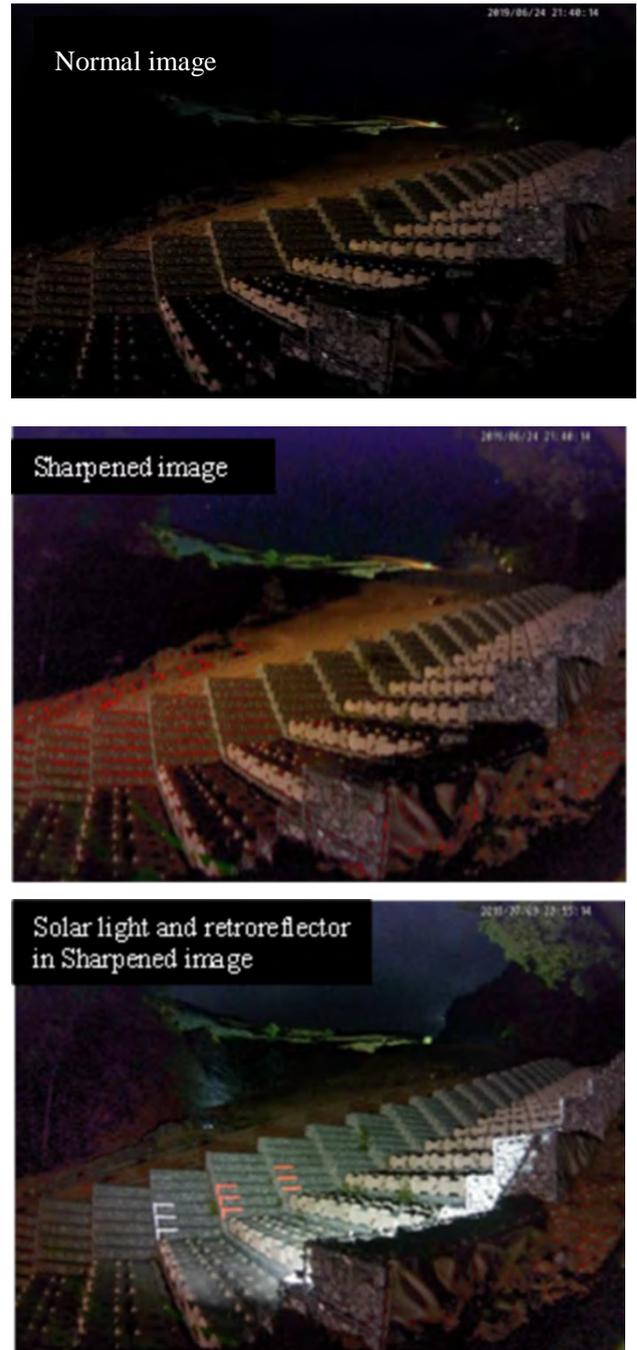


Figure 5.1 Image sharpening processing at Nagatono restrictions on video transmission, so local analysis

processing is required. Therefore, instead of an approach based on dynamic detection technology, a detection approach based on image difference with a small calculation load and a track record of operation was selected.



Figure 5.2 Investigation of collapse and deformation detection

In the observed image of Kuridaira, the image difference in normal time is always about 10% due to the change of flow conditions. However, when the river channel collapses, the value of the image difference reaches 25%. Therefore, in this case of Kuridaira, collapse can be detected by setting the threshold to 25%.

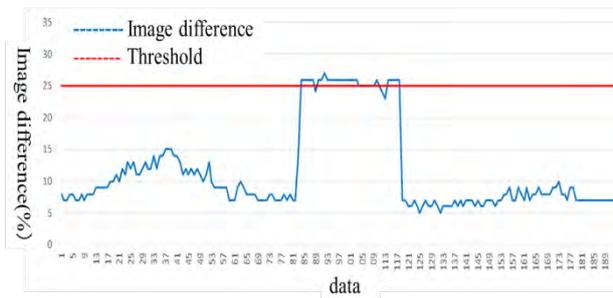


Table 2 Transition of image difference

In this study, we devised various ways to reduce false detections. First, image analysis was performed in real time for each frame constituting the camera video. The frame can be set freely, and the precise collapse can be detected by setting the frame finely for the part to be detected. Secondly, the pattern matching process was used to convert the color and position variation of the image into numerical data with respect to the reference image. By making numerical data, it became possible to clearly set the criteria for the occurrence of collapse. Therefore, in this study, we developed a system that sends an alarm considering that an abnormality such as a disaster has occurred by recognizing an image fluctuation rate

exceeding a specified value.

6. CONCLUSION

The threshold was set to $R/B > 1$ from the analysis results in the Iya area. Since the threshold value varies from place to place, it is necessary to accumulate and review data individually for the setting. In conclusion, it can be said that the technology developed in this study has enabled detection of sediment production from monitoring images of mountain streams and rivers.

Finally, the main results of this research are summarized. In image analysis, we showed the usefulness of setting indicators and thresholds using RGB values for river runoff (turbidity) and using them as detection criteria. In addition, regarding the detection of slope failures and facility deformations, it was recommended to set the image fluctuation rate using differential analysis of still images and to set the threshold value of the image fluctuation rate. By generating an alert when this threshold is exceeded, continuous visual monitoring will be reduced and the burden on the field will be reduced. In addition, with regard to the image processing system, by developing a system that processes and analyzes images transmitted from the field in real time, presents a certain solution to issues such as lack of light intensity at night and poor visibility during rainfall. As future work, it is necessary to accumulate more data. At the same time, thresholds and system optimization are required. Specifically, the frequency, scale, and monitoring system of the collapse will change depending on the collapse site, so it is necessary to change and verify the threshold according to the site for practical use

我が国における近年の河道閉塞とその対策

国土技術政策総合研究所 水野正樹, 西井洋史, 山越隆雄, 平田育士

1. はじめに

大規模な河道閉塞は、崩壊時の被害だけでなく、上流域湛水による浸水被害、その決壊に伴い発生する洪水や土石流による下流域の氾濫被害を生じさせる可能性がある。近年、日本で大規模な河道閉塞は、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年台風第12号による紀伊半島、2017年九州北部豪雨による大分県日田市、2018年北海道胆振東部地震による厚真川等において形成されており、地震や豪雨により数年に一度程度の頻度で発生している。

これらの日本における近年の大規模な河道閉塞事例における発生状況、減災のための緊急対応状況、河道閉塞対応方法の進展事項等について、報告する。

2. 近年の主な河道閉塞事例

2000年以降の日本の主な河道閉塞形成事例について、河道閉塞の発生状況を示す。

2.1 2004年新潟県中越地震による大規模崩壊や河道閉塞等^{1) 2)}

10月23日、M6.8、最大震度7の地震により、河道閉塞は52箇所（うち、9箇所は流出）、崩壊土砂量100万m³以上の大規模崩壊・地すべりは12箇所発生。（写真1）

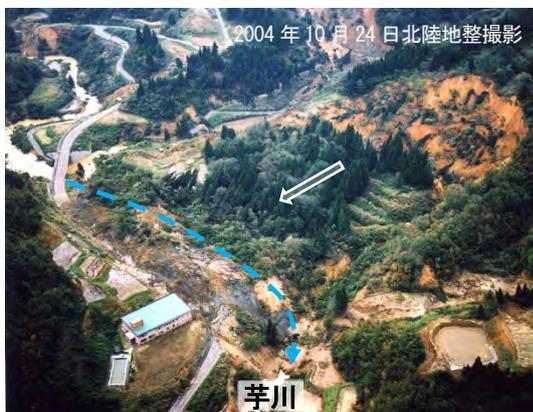


写真1 芋川流域東竹沢地区の河道閉塞（高さ約30m）

2.2 2008年岩手・宮城内陸地震による斜面崩壊や河道閉塞等

- 6月14日、M7.2、最大震度6強の地震により、約3,000箇所の斜面崩壊が発生。荒砥沢ダム直上流では大規模な地すべりが発生。三迫川上流の東栗駒山の斜面を崩壊源とした大規模な土石流が発生（駒の湯温泉被災）。
- 断層線付近にある地盤変位の急変領域に14箇所、その他の地域に1箇所、全体では合計15箇所の河道閉塞が形成した（図1）。

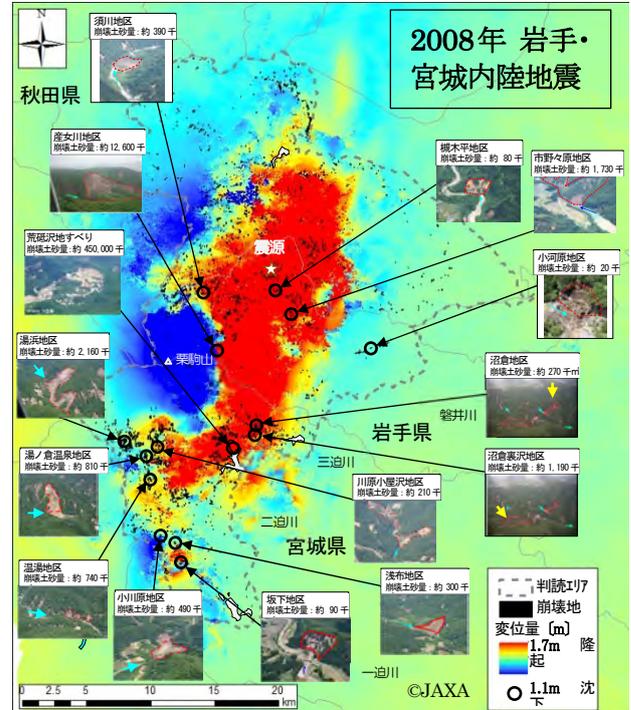


図1 河道閉塞の分布と地震断層による地盤の垂直変位量（電子基準点併用ALOS 2.5次元解析）

2.3 2011年台風第12号による河道閉塞等

総降水量は、紀伊半島を中心に広い範囲で1000mmを超え、紀伊半島の一部の地域では解析雨量で2000mmを超えた³⁾。奈良県、和歌山県内において合計17箇所の河道閉塞が形成した。

2.4 2017年九州北部豪雨による大分県日田市の河道閉塞



写真2 日田市小野地区の崩壊箇所

- 豪雨が弱まり、降雨強度（大分県上宮山観測所）が10mm/h以下となっってから10時間後の2017年7月6日AM10頃に山腹が崩壊。死者1名、

県道・家屋等を破壊する被害とともに河道閉塞が発生。(写真2)

- 崩壊箇所は、2015年11月20日～2016年2月26日ALOS-2データを用いて国土地理院が解析した差分干渉SAR画像で変動縞が出現、及び崩壊後現地調査結果から、崩壊する前から地すべり滑動していたことが判明。

2.5 2018年北海道胆振東部地震の大規模河道閉塞

9月6日、M6.7、最大震度7の地震により、斜面崩壊部の移動量:約500m、斜面崩壊の幅:約400m、天然ダムの高さ:約50m、閉塞部の長さ:約1,100mの河道閉塞が発生。(写真3)



写真3 北海道胆振東部地震による河道閉塞

3. 近年の河道閉塞における緊急対応状況と対応方法の変遷

2.に挙げた2000年以降の日本の主な河道閉塞形成事例について、主な緊急対応状況、及び河道閉塞対応方法の進展事項等を表1に示す。

表1 近年の河道閉塞発生時の主な緊急対応と対応方法の進展状況^{2)、4)、5)}

発生日月	災害名	河道閉塞箇所数	主な緊急対応	河道閉塞の対応方法の進展 (災害を踏まえて整備されたマニュアル等)
2004/10/23	新潟県中越地震	52	<ul style="list-style-type: none"> ○ヘリコプター出動や専門家派遣による現地調査の実施。 ○芋川本川の規模の大きな2つ(寺野、東竹沢)の河道閉塞について、決壊の危険度を概略判定。 ○排水ポンプ等で湛水の水位を下げつつ仮排水路を整備。 	<ul style="list-style-type: none"> ○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),大規模土砂災害危機管理検討委員会,2007 ○大規模土砂災害危機管理計画および大規模土砂災害危機管理計画のための指針,国土交通省砂防部,2008
2008/6/14	岩手・宮城内陸地震	15	<ul style="list-style-type: none"> ○投下型水位観測ブイが初めて活用(湯浜地区)。 ○一迫川の河道閉塞箇所の危険度評価(数値シミュレーション)。 ○Ku-SATを介した遠隔監視および警報通知システムの導入。 ○重機の遠隔操作による土砂撤去(無人化施工)。(同年4月に創設されたTEC-FORCEが初めて派遣) (直轄区域外において直轄事業による緊急対応を実施した初めてのケース) 	<ul style="list-style-type: none"> ○天然ダム監視技術マニュアル(案),土木研究所,2008.12 ○大規模な河道閉塞(天然ダム)の危機管理のあり方について(提言),大規模な河道閉塞(天然ダム)の危機管理に関する検討委員会,2009.3 ○特殊な土砂災害等の警戒避難に関する法制度について(提言),特殊な土砂災害等の警戒避難に関する法制度検討会,2009.12 ○天然ダム形成時対応の基本的考え方(案),国土技術政策総合研究所,2009(2013更新) ○天然ダム対策工事マニュアル(施工編)(案),天然ダム対策工事研究会,2010.11 ○土砂災害防止法の一部改正が成立,2010.11 ○土砂災害防止法に基づく緊急調査実施の手引き(河道閉塞による土砂災害対策編)及び計算プログラム,国土交通省砂防部ほか,2011.4
2011/5/1	「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律の一部を改正する法律」施行 (改正により、天然ダムに起因する土石流及び湛水に対し国土交通省が緊急調査を実施し、土砂災害緊急情報を提供)			
2011/8/20 ～ 2011/9/5	平成23年台風12号	17	<ul style="list-style-type: none"> ○人工衛星SAR画像を活用した河道閉塞箇所の判読。 ○ヘリ調査と航空レーザー測量。 ○法改正後、河道閉塞に関する初の緊急調査(土石流氾濫シミュレーション等)(5箇所)。土砂災害緊急情報を関係自治体に通知。 ○投下型水位観測ブイを用いた水位観測(4箇所)と水位予測計算による越流時刻の予測。 ○ダム高低減のため天端掘削、及び湛水池の埋め戻し。 ○重機の遠隔操作による土砂撤去(無人化施工)。 	<ul style="list-style-type: none"> ○深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算マニュアル(案),土木研究所,2012.9(2013.1修正) ○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),国土技術政策総合研究所,2013 ○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方法(案),国土技術政策総合研究所,2014 ○深層崩壊対策技術に関する基本的事項,国土技術政策総合研究所,2014 ○土砂災害防止法に基づく緊急調査実施の手引き(河道閉塞による土砂災害対策編)一部改訂,国土交通省砂防部ほか,2016 ○紀伊山地における大規模河道閉塞(天然ダム)対策の考え方(案),近畿地方整備局ほか,2017
2017/7/5～ 2017/7/6	平成29年7月九州北部豪雨	1	<ul style="list-style-type: none"> ○伸縮計、傾斜計による拡大崩壊監視。 ○ドローンを活用した現地調査。 ○衛星干渉SARによる予兆変位の範囲確認。 	
2018/9/6	北海道胆振東部地震	大規模は1	<ul style="list-style-type: none"> ○投下型水位観測ブイを用いた水位観測。 ○ダム高低減のため天端掘削、及び湛水池の埋め戻し。 	

4. おわりに

2004年新潟県中越地震以降、日本では、豪雨や地震で度々発生した河道閉塞に対して多数の緊急対応の実績を蓄積し、河道閉塞への対応方法が進展している。2010年には、規模や保全対象人家数等の一定の要件を満たす河道閉塞が形成した場合、重大な土砂災害が急迫しているとして、国が緊急調査を行い、住民の避難指示の判断等を適切に行えるよう、土砂災害が想定される区域及び時期に関する土砂災害緊急情報を提供することが土砂災害防止法に規定された。

今後も、切迫する南海トラフ巨大地震等の地震や、地球温暖化の影響に伴う極端な気象現象の増加により、河道閉塞の発生が懸念される。これからも河道閉塞対策の更なる継続的な進展が必要である。

【参考文献】

- 1) 国土交通省砂防部保全課:平成16年新潟県中越地震に伴う斜面崩壊の発生状況について(続報),平成17年1月13日
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050113_.html
- 2) 国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所:砂防事業に関する調査・研究の動向(その7),国総研資料616号,P112~130,2010/11
- 3) 気象庁:災害時気象速報平成23年台風第12号による8月30日から9月5日にかけての大雨と暴風,災害時自然現象報告書2011年第3号,p1,平成23年11月28日
- 4) 国土技術政策総合研究所:平成16年(2004年)新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要,国総研資料第248号,p34~36,2005/5
- 5) 国土技術政策総合研究所,土木研究所ほか:平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告,国総研資料第486号,p34~71,2008/12

2.3 相互連携に基づく研究 テーマ1

ボアホールカメラによる亀裂判読の結果と破碎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

国立研究開発法人土木研究所・国土交通省近畿地方整備局

1. はじめに

深層崩壊による下流へのリスク評価のためには、その規模の推定が必要であり、例えばボーリング調査により地形・地質構造や地盤の破碎状況を調査し、破碎度区分評価¹⁾等を行って変形下端深度を評価することも考えられる。2011年に深層崩壊が発生した奈良県五條市赤谷地区の西側斜面(赤谷西地区)は、砂岩・頁岩互層からなり、斜面の上部に線状凹地が認められ重力斜面変形が生じていると推定される。ボーリング調査の結果、岩盤の破碎が少なく、砂岩層に石英脈の溶脱が認められ、破碎度区分評価が難しい区間がみられた。そこで本研究は、ボアホールカメラによる亀裂判読に基づく亀裂性状の評価を行い、破碎度の評価に反映する手法を検討した²⁾。

2. 研究方法

本研究では、赤谷西地区における3孔の調査ボーリング(Ak-5, Ak-7, Ak-9)のうち、最も破碎が大きかった斜面中腹で掘削されたAk-5孔を対象とした(図-1)。検討では、ボーリングコアを用いて破碎度区分評価を実施したほか、ボアホールカメラによる亀裂の本数、傾斜・開口量の判読を行い、亀裂の性状を評価した。その上で、亀裂の性状から重力斜面変形により破碎された可能性の高い区間を評価する指標を検討し、破碎度区分評価結果と亀裂の性状を評価した結果を組み合わせ、破碎度を評価する手法を検討した。

破碎度区分の評価は、脇坂ら³⁾による方法を用いた。Ak-5孔では、砂岩層に石英脈が溶脱し開口したと見られる区間がある一方、重力斜面変形によって開口したと見られる区間もあり、破碎度区分評価が難しい区間があった。そこで評価が難しい区間は暫定的にCr1a'と区分した。Ak-5孔の掘進長は85mであり、孔内傾斜計の計測結果より、変形下端深度が68.0mと評価された(図-2(a))。そこで、変形区間と非変形区間を設定し、ボアホールカメラ画像より亀裂の本数、傾斜・開口量の判読を行い、両区間での結果を比較し、重力斜面変形により亀裂が開口した可能性の高い区間を評価する指標を検討した。変形区間と非変形区間は、68.0mより上部10m区間(深度53~63m)と下部10m区間(深度68~78m)とした。ボアホールカメラによる亀裂判読結果は、深度1m毎に集計した。

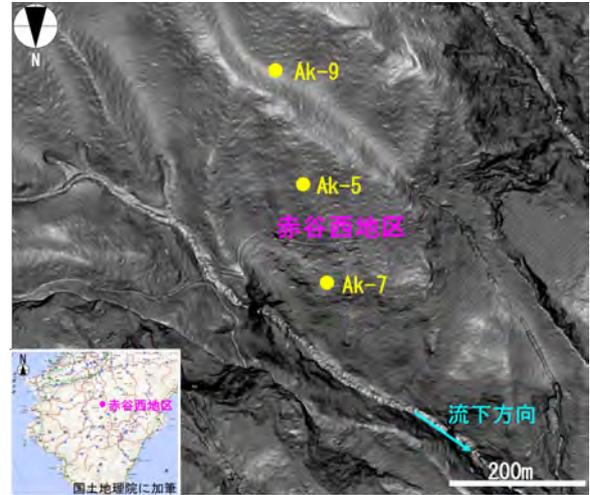


図-1 研究対象地位置図

検討した指標に基づき重力斜面変形によって亀裂が開口したと評価される区間は、破碎度区分評価の難しかったCr1a'からCr1aに評価区分を変更する。このように、破碎度区分評価と亀裂性状の評価結果を組み合わせ、破碎度区分評価する。

3. 研究結果

(1) 変形区間に見られる特徴

破碎度区分評価結果を図-2(d)に、コア観察において認められた亀裂の特徴を表-1に示す。変形区間では、石英脈の溶脱と見られる亀裂の本数が多く、開口量も大きい。亀裂は高角度のものが顕著に認められた。また、形状は鋸歯状をなすものが多く、Cr1aに相当すると見られる区間も認められた。一方、非変形区間では石英脈の溶脱と見られる亀裂の本数は、変形区間と比べて明らかに少なく、開口量も小さい。また、亀裂の形状は平滑であった。このように変形区間では、石英脈の溶脱の程度が大きく、亀裂の本数も多く、開口量も大きく、また、亀裂は高角度をなし、鋸歯状の形状を示す特徴を有していた。

亀裂の本数、開口量を比較すると、変形区間の開口亀裂本数及び傾斜 60° 以上の亀裂開口量は非変形区間のそれらよりも、それぞれ2~3倍、2~6倍程度大きい特徴を有していた(図-2(b),(c)、表-1)。

以上の変形区間と非変形区間におけるコア観察による亀裂の特徴の違いと亀裂の本数、開口量の比較結果から、変形区間で顕著に認められた亀裂は、重力による斜面変形の影響を受けていると推定される。

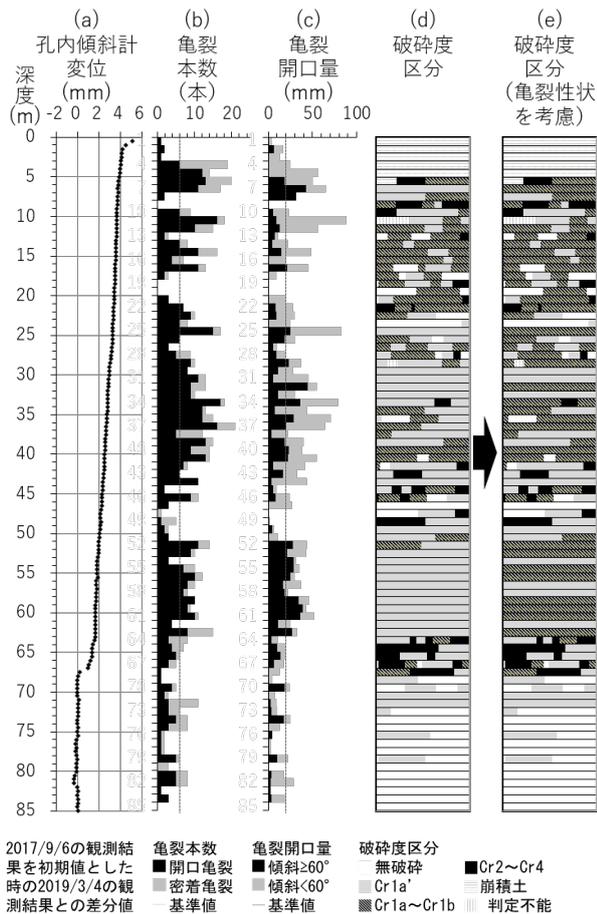


図-2 Ak-5 孔の変位観測結果と
破砕状況及び亀裂状況評価結果

表-1 変形区間と非変形区間における
亀裂及びコアの特徴

		変形区間	非変形区間
コア観察による亀裂の特徴	破砕度	・Cr1a'	・無破砕～Cr1a'
	石英脈の溶脱の程度と亀裂の特徴	・溶脱の程度が大きい ・高角度のものが顕著 ・亀裂の形状は鋸歯状であるものが多い	・溶脱の程度は比較的小さい ・亀裂の形状は平滑
亀裂の本数・開口量の状況	開口亀裂本数	・3～10本/1m ・区間平均値：7.5本/1m	・1～5本/1m ・区間平均値：2.4本/1m
	傾60°以上の亀裂開口量	・10.9 ～ 38.7mm/1m ・区間平均値：26.4mm/1m	・0.0～18.1mm/1m ・区間平均値：4.7mm/1m

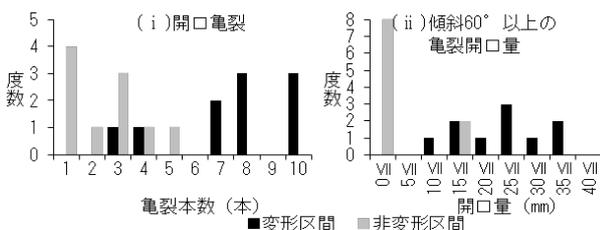


図-3 変形区間と非変形区間のそれぞれ
1m 当たりにおける頻度分布図

(2) 破砕度区分と亀裂の本数、傾斜・開口量を組み

合わせた破砕状況の評価手法の検討

前節の調査結果をふまえ、重力斜面変形による可能性の高い区間を評価する指標として、(i)1m 当りの開口亀裂本数、(ii)傾斜 60° 以上の 1m 当りの亀裂開口量を用いる。変形区間と非変形区間における両指標の分布を図-3 に示す。開口亀裂本数は、変形区間と非変形区間を完全に区分できない (図-3(i))。亀裂性状の評価は破砕を評価する上での補足情報として活用することから、基準値は変形区間が過大評価とならないよう誤判別が発生しない値とした。亀裂本数については、非変形区間の最大値より大きい 6 本/1m を用いることとした。また、同様に傾斜 60° 以上の亀裂開口量は、非変形区間の最大値より大きい 20mm/1m とした (図-3(ii))。

亀裂性状の評価結果を組み合わせた破砕度評価は、(i)、(ii) の基準値を満たす Cr1a' を Cr1a に変更した。その結果は図-2(e) に示すとおりである。深度 30～34m、52～63m 区間のうち、31～32、33～34、52～53、54～56、58～61、62～63m 区間で Cr1a' から Cr1a に変更した。30～34、52～63m 区間内の全ての区間が Cr1a に再評価されるわけではないが、亀裂の性状の評価指標を用いることで、コア観察により重力斜面変形による可能性の高いと評価された区間が Cr1a と評価されるようになった。

本検討の手法を用いた図-2(e)によると、深度 68.0m より上部で Cr1a 以上の評価域が大部分を占め、孔内傾斜計の計測結果が得られるよりも前に、68.0m が重力斜面変形の下端深度と推定される。

4. 結論

ボーリングコアを用いた破砕度区分評価結果に、ボアホールカメラの判読による亀裂性状の評価結果を加えることで、岩盤の変形・破砕が少なく岩盤中の鉱物脈の溶脱が認められる岩盤においても、容易に変形領域を評価できる可能性が示された。今回の指標値は Ak-5 孔での孔内傾斜計の計測結果に基づき設定したものであるため、今後、今回得られた亀裂の評価指標の他孔への適用性を検討する。

参考文献

- 1) 脇坂安彦・上妻睦男・綿谷博之・豊口佳之：地すべり移動体を特徴づける破砕岩—四万十帯の地すべりを例として—, 応用地質, Vol.52, No.6, p.231-247, 2012
- 2) 山本ら：ボ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, 2020 年度砂防学会研究発表会概要集, p.441-442, 2020

SAR 干渉画像を用いた崩壊危険斜面抽出手法とその適用範囲について

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
 国際航業株式会社
 国土交通省国土技術政策総合研究所

○崎山朋紀・榎原伴樹・坂口武弘
 田中健貴・木下篤彦
 江川真史・佐藤匠・久保毅
 鈴木大和・山下久美子*
 ※現 国際航業株式会社

1. はじめに

平成 23 年紀伊半島大水害では、和歌山県内をはじめ奈良県、三重県などで大規模な崩壊が発生し、被害が出ている¹⁾。これらの被害を軽減するには、事前に崩壊危険箇所を把握しておくことが重要である。崩壊危険箇所抽出技術として、現在、レーザプロファイラによる地形判読²⁾や空中電磁探査による地下情報把握技術³⁾などが検討されている。これらは高精度に危険箇所が把握できるメリットはあるものの、コストが高いことと調査を実施できる時期が限られているというデメリットがある。これらを補う技術として、干渉 SAR 解析が挙げられる。干渉 SAR は、人工衛星から地表の同一の場所に対して 2 回の SAR (合成開口レーダー) 観測を実施し、それらを干渉させて得た位相の差から地表変動を推定する技術である⁴⁾。この技術は安価であることと定期的に広域な衛星画像が得られるというメリットがある。これまで、干渉 SAR 解析で斜面変動を捉えた研究は多くあるが⁵⁾⁷⁾、レーザプロファイラなど他の面的に斜面変動を捉えた結果と比較し、それぞれの精度を検証した事例は少ない。

本研究では、干渉 SAR 解析結果を用いた斜面変動把握を行い、また他のリモートセンシング技術や現地調査と比較を行うことで、その適用範囲を明らかにし、今後の広域モニタリング手法の検討に役立てることを目的とする。

2. 調査方法

まず、国土地理院の干渉 SAR 解析結果 (地理院 SAR マップ、2014~2018 年 までの ALOS-2 取得データによる解析結果、高分解モード、北行軌道 26 ペア・南行軌道 28 ペア) を用い、次の判断基準に従って斜面変動を抽出した。①斜面単位に相当する局所的な干渉縞が確認できる。②干渉縞の分布範囲が斜面変動を引き起こす地形として整合的である。③複数時期で干渉縞が確認できる。④電波照射方向と斜面変動方向に矛盾がない。⑤衛星画像等で人為的な地形改変が認められない。次に、干渉 SAR の抽出結果と対比するため、既往の航空レーザ測量成果を用い地形変動解析 (3D-GIV 解析) を行い、斜面変動箇所を抽出した。

以上の結果から、変動規模、現地へのアクセスを考慮し、10 箇所を選定し現地調査を行った (図-1)。現地調査では、航空レーザ計測データを用いた微地形判読を併用し、斜面上に現れる変状を目視で確認した。また、GNSS 観測を行い、干渉 SAR 及び 3D-GIV 解析の結果と対比した。

3. 調査結果と考察

干渉 SAR 解析結果より 116 箇所 (うち 26 箇所で複数ペア) の斜面変動を抽出した。また、3D-GIV 解析により 141 の斜面変動を抽出した。現地調査を実施した 10 地区の調査結果は以下のとおりである。

3.1. 和歌山県田辺市・上秋津地区

この地区では、2014~2018 年までの干渉 SAR 解析結果から、7 ペアで斜面変動を示すと考えられる干渉縞を確認した。2016 年 6 月 20 日と 2017 年 6 月 5 の解析ペアでは、

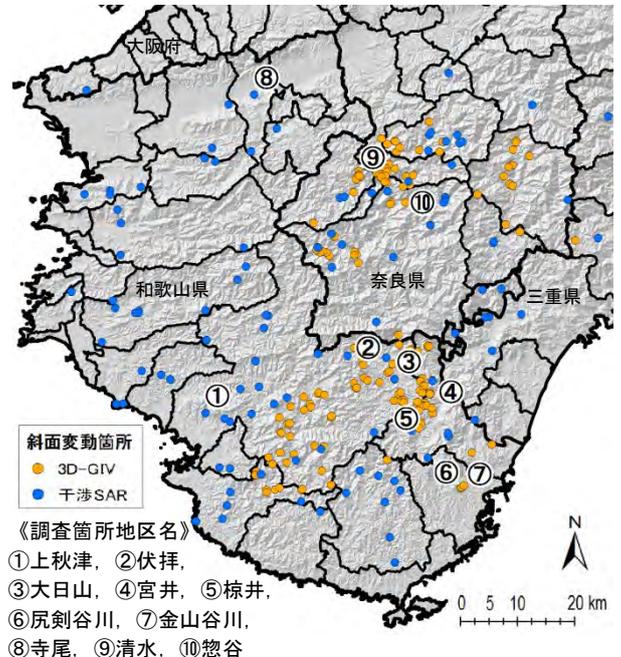


図-1 現地調査実施箇所位置図。

干渉縞の色調階から、最大で電波照射方向に 8cm 程度の斜面変動が読み取れた。対象斜面は、全幅 650m 程度、全長 500m 程度の地すべり斜面であり、現地調査では、頭部付近の旧農道舗装等の変状、南側端部の表層崩壊など顕著な変状が認められ、それらは SAR 干渉画像から読み取れる変動範囲と概ね整合していた。また、GNSS 基準点測量により 2013 年 3 月 5 日から 2019 年 1 月 22・23 日の変位量を算出した結果、変位が最も大きい観測点で東方向に累積 0.502m (約 8.5cm/年) であり、その変動の傾向は干渉 SAR 解析結果と概ね一致していた。

3.2. 和歌山県新宮市熊野川町・宮井地区

2015 年以降 2018 年までの干渉 SAR 解析結果から、5 ペアで斜面変動を示すと考えられる干渉縞を確認した。干渉縞の色調階から、最大で電波照射方向に 8cm 程度の斜面変動が読み取れた (図-2)。一方、3D-GIV 解析では 2013~2017 年の 4 年間で最大 1.5m 程度の地形変動を示す纏まったベクトル群が検出された (図-3)。ベクトル群は、変動の方向・範囲が SAR 干渉画像から読み取れるものと概ね整合していることから、干渉 SAR の抽出結果を裏付けるものと考えられる。なお、現地調査の対象箇所のうち、同一斜面を両手法で同時に検出できた事例は 1 箇所のみであった。

この斜面では治山事業による GNSS 基準点測量の実績があり、2014 年 11 月と 2017 年 10 月の計測結果から、変位が最も大きい P-8 で北東方向に累積 0.241m (約 8.2cm/年) であった。一方干渉 SAR 解析では電波照射方向 (東方向) に約 8cm/年であり、両者の変動の傾向は概ね一致していた。

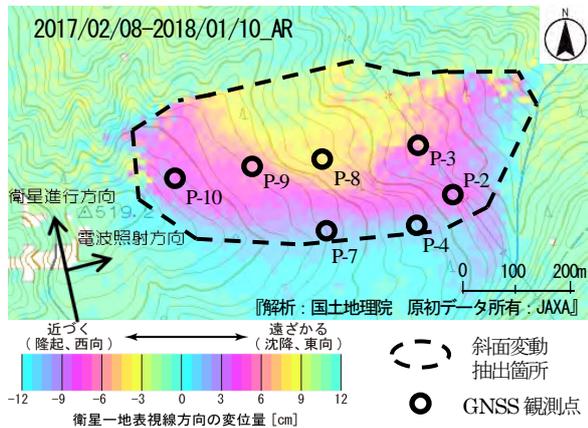


図-2 SAR 干渉画像（宮井地区）. 国土地理院の SAR 干渉画像 2017/02/08-2018/01/10_AR を加工して著者が作成.

3.3. 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町井関・金山谷川地区

3D-GIV 解析から 2012～2017 年の 5 年間で最大 1.5m 程度の変動を示す纏まった南向きのベクトル群が検出された。対象斜面は、全幅 70m 程度、全長 100m 程度の地すべりブロックであり、現地調査では、明瞭な滑落崖、開口亀裂や倒木など多数の変状が認められ、それらの範囲及び方向は 3D-GIV 解析の結果と概ね整合していた。

3.4. その他

その他、上記 3 地区を含む現地調査結果の概要を表-1 に示す。

干渉 SAR で抽出した大日山地区を除く 4 地区で、斜面変動の痕跡が確認された。これらの痕跡は、発生した時期は不明だが、画像から読み取れる変動範囲と概ね整合していた。

4 地区のうち斜面変動の規模が最も小さい伏拝地区で、その規模は概ね 200m × 200m であった。大日山地区では、画像から読み取れる変動は 3cm 程度の微小なものであったことから、変動があったにもかかわらず、痕跡を確認できなかった可能性がある。一方、3D-GIV 解析では、抽出した 6 地区すべてで、顕著な斜面変動の痕跡を確認できた。

干渉 SAR で抽出できたが 3D-GIV 解析で抽出できなかった事例が 2 地区あった。これらについては、3D-GIV 解析で検出できる斜面変状は水平変位量数 10cm 以上であり、精度の違いによるものと考えられる。

3D-GIV 解析で抽出できたが干渉 SAR で抽出できなかった事例が 5 地区あった。これらの地区では変位量数 10cm 以上の斜面変動が検知されたにもかかわらず干渉 SAR で抽出できなかった理由として、以下の可能性が考えられる。

- 両手法の観測期間に多少のずれがあることから、干渉 SAR 解析ペアの期間内に動きがなかった。
- 大気中に含まれる水蒸気の影響などによると考えられるノイズが多数の解析ペアで確認されたことから、ノイズにより斜面変動を検出できなかった。
- ALOS-2 の干渉 SAR では、人工衛星からマイクロ波を横斜め方向（東西方向）に照射しその反射波の位相を受信するという観測の原理上、南・北向き斜面では、地すべりの変動方向が衛星への視線方向と直交する方向であり斜面変動の距離に対して感度が悪くなり検出できなかった。
- 斜面変動領域が検出可能なサイズを下回っていた。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- SAR 干渉画像から 8cm 程度までの斜面変動が抽出できた。

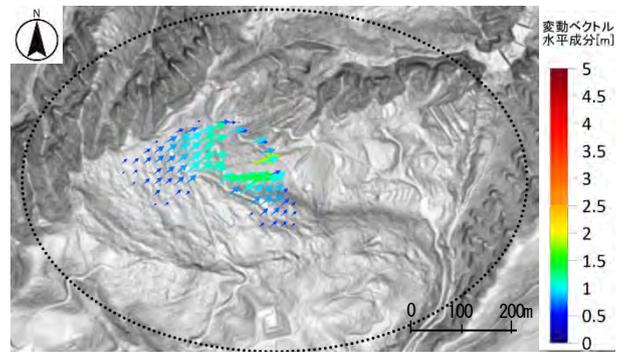


図-3 3D-GIV 解析結果（宮井地区）. 2013 年から 2017 年の解析ペア。

表-1 調査結果一覧. ※の地区は GNSS 測量も合わせて実施している。

NO	地区名	変位の有無		現地変状の有無	斜面変動推定規模 (m)	斜面傾斜方向
		SAR 干渉画像判読	3D-GIV 解析			
1	上秋津※	○	○	○	幅 W650 長さ L500	東
2	伏拝	○	×	○	W200 L200	北西
3	大日山	○	×	×	W400 L400	東
4	宮井※	○	○	○	W330 L800	北東
5	椋井	×	○	○	W400 L500	東
6	尻剣谷川	×	○	○	W100 L100	北東
7	金山谷川	×	○	○	W70 L100	南
8	寺尾	○	○	○	W270 L400	北
9	清水	×	○	○	W110 L350	東
10	惣谷	×	○	○	W600 L800	北

・ SAR 干渉画像により概ね 200m × 200m 以上の広さの斜面変動が抽出できた。

・ 干渉 SAR を用いて崩壊危険斜面を抽出する手法は有効である。一方で干渉 SAR だけに依存した斜面変動モニタリングは斜面変動を見逃す可能性がある。

以上より、干渉 SAR を用いて斜面変動を把握する場合には、その特徴を把握した上で場面に応じ、他のモニタリング手法とうまく組み合わせる必要があることを確認した。

参考文献

- 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.
- 花岡ら：航空レーザ計測データを用いた地表面変位量把握の事例と課題 - 最上川水系立谷沢川流域 濁沢川池ノ台地区における事例 -，平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.A-136-137, 2013.
- 木下ら：平成 23 年大雨台風 12 号により紀伊半島で発生した深層崩壊周辺の広域比抵抗構造特性，平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.B-356-357, 2013.
- 国土地理院：国土地理院の干渉 SAR ホームページ，http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/gsi_sar.html, 2018.
- 水野ら：DinSAR と航空レーザ測量と GNSS を用いた稲子岳の地すべり調査，平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.511-512, 2018.
- 山中ら：全国干渉 SAR 解析による斜面変動の検出事例，第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.55-60, 2016.
- 江川ら：国土監視ツールとしての L バンド SAR 干渉解析の活用について，平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.B194-B195, 2015.

2.4 相互連携に基づく研究 テーマ2

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

和歌山県土砂災害啓発センター
防災士（和歌山県東牟婁郡那智勝浦町在住）
和歌山県田辺市立上秋津中学校

○坂口武弘，坂口隆紀
久保榮子
新行靖

1. はじめに

平成23年の紀伊半島大水害では、和歌山県東牟婁郡那智勝浦町にある那智川流域において、同時多発的な土石流と土石流が那智川本川に到達したことによる氾濫被害により甚大な被害が生じた。和歌山県では紀伊半島大水害から得た教訓を後世に継承することと、大規模土砂災害に関する研究拠点となることを目的とした和歌山県土砂災害啓発センターを平成28年4月に立ち上げている。土砂災害啓発センターでは、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の支援のもと、警戒避難意識向上に向けた教育コンテンツの検討（犬丸ら2017）や教育カリキュラムの検討（松木ら2018）に参画し、土砂災害に係る啓発コンテンツを得るとともに、町内の小学校における総合学習授業の講師役の機会を得て、土砂災害に係る防災教育のノウハウを吸収しているところである。

一方、紀伊半島大水害の被災者のご遺族の中には、「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紙芝居等を作成し懸命に活動されている方がいる。

そこで今回、中学生を対象とした被災体験をベースにした防災教育の内容について検討し、被災地外の中学校において試行学習会を実施した。本報告では、その内容と防災教育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考察する。

2. 被災体験の伝承プログラムに関する検討

2.1 伝承プログラムの検討

土砂災害に係る防災教育を行う上では、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（檜垣ら2016）と言われている。

土砂災害啓発センターでは、土砂災害に係る団体研修を年間93件（平成30年実績）実施しており、その中で紀伊半島大水害時の那智川流域の様子を再現CG映像等のビデオや被災写真等で説明し、また、他の場所で撮影された土砂災害の映像を用いた土砂災害のメカニズムや被災を教訓とした避難に関する取組等を説明している。また、近隣の小中学校も5件（平成30年実績）来館し、子供用に作成した紀伊半島大水害時の那智川流域の様子を再現CG映像等のビデオや模型実験などの授業を行い、土砂災害の現象・特徴を説明し、主に「考える力」を養っている。

一方、紀伊半島大水害体験紙芝居（図1）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48件実施されている。内容は平成23年9月4日未明に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である。また、「早く逃げること」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、自身はウサギに扮し〇×クイズを実施（図2）しており、そうした一連の活動を通じて危険な時に自らの的確な判断で避難できる「行動する力」を主に養っている。

今回、そうした従来個別に行っていた授業と紙芝居を一体化する機会を設け、より有効な土砂災害防止教育が行えるよう「考える力」を養う授業と「行動する力」を養う紙芝居をベストミックスする手法を考え計画した。

図1 紀伊半島大水害体験紙芝居



（紙芝居の概要）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2 〇×クイズの実施状況

図3 読み手の置かれた状況の説明

図4 土石流の実際の動画

2.2 伝承プログラムの内容

プログラムに要する時間は、中学生の集中力等を考慮して1時間と設定した。また、今回は紙芝居をベースに伝承プログラムを実施することとしたため、紙芝居とそれに続く〇×クイズに要する時間を優先し45分と設定した。それに伴い残り15分の中で、紀伊半島大水害の説明用ビデオのCG部分を切り取り、被災者（紙芝居の読み手）がどの場所でどんな現象に遭遇していたのかを具体的に説明（図3）するとともに、土砂災害の現象・特徴に関する説明については、紀伊半島大水害時に那智川流域で発生した土石流（図4）にのみ絞るなどして時間の短縮を図った。また、プログラムの順番は紙芝居で語られる事が、こういった状況で発生した事を理解した方が紙芝居の理解が進むと考え、土砂災害の説明等を先行し紙芝居を後に配した。

3. プログラムの効果・課題の考察

プログラムを試行する学習会は和歌山県田辺市立上秋津中学校で実施した。当日は1年生が31名、2年生が30名、3年生40名が参加し、学習会後に感想文を自由に書く方式で調査を行った。分析方法は感想文中に書かれている単語の有無や内容、具体的な描写などに着目して行った。

結果を図5から図9に示す。この結果から、図5ではプログラムを受けて少なくとも65%の生徒が心を動かされており、また、その感情としては43%が紙芝居や土砂災害の映像などから「怖い」や「恐ろしい」といった災害に対する「恐怖」を感じていることが分かる。また、図6からは、60%もの生徒が感想文中に紙芝居の具体的な描写を記載しており、紙芝居を生徒が高い集中力を持って聞いていたことが分かる。また、悲しみを抱えながら紙芝居を行った読み手に対し「すごい」「えらい」との表現が感想文中にしばしば登場することも合わせると、被災者が紙芝居を行うことにより読み手に対し「畏敬の念」を生徒に抱かせていることが分かる。

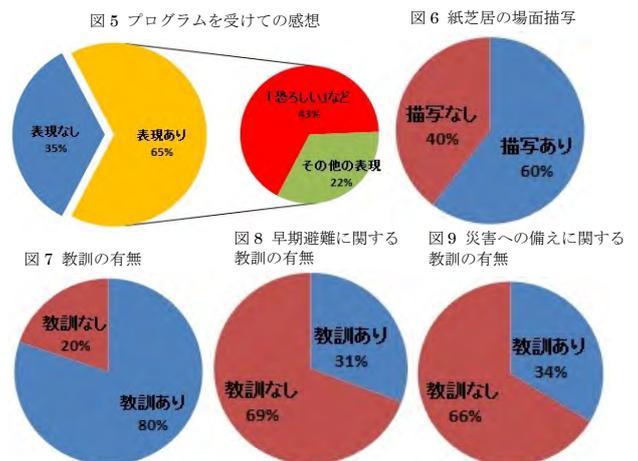
最後に、このプログラムの最大の目的である災害から得た教訓の伝承であるが、図7から分かるように80%の生徒が「避難する時は冷静に」や「近所の人に声をかけて一緒に避難する」など、このプログラムから何らかの教訓を得ており、教訓を伝承することについては現プログラムの内容で及第点と思われる。しかし、図8及び図9から分かるように、今回のプログラムで特に伝えたかった「早期避難」や「災害への備え」に関する教訓については30%台と十分に伝わっていない実態も見受けられた。

4. 今後の展開に向けての課題

上述の考察からも明らかのように、プログラムの構成を考える際に、「被災者による紙芝居」に優先的に時間を配分する方向性は正しいことが分かった。また、副次効果として被災者が自らの悲惨な体験を語ることが、学校教育の最上位の道徳性と位置付けられている「畏敬の念」を生徒に育ませる効果もあることが分かった。しかし、現在その必要性が叫ばれている「早期避難」や「災害への備え」を促す効果は限定的であると言わざるを得ない。今後は、今まで以上に被災者の心情により添い協業しながら、生徒の避難行動や準備行動を直接促すようなコンテンツの開発に注力していきたい。

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
- 2) 松木ら：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-156
- 3) 檜垣ら：土砂災害と防災教育 命を守る判断・行動・備え，朝倉書店，2016



2.4 相互連携に基づく研究 テーマ3

那智川流域における地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険斜面の抽出に関する研究

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

パシフィックコンサルタンツ株式会社

大日本コンサルタント株式会社

○榎原伴樹・崎山朋紀・岸畑明宏・坂口武弘

田中健貴・木下篤彦

野池耕平・松澤真

河戸克志

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数発生し、大きな被害を受けた¹⁾。那智川流域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、既往の研究において空中電磁探査と地下水位の変動から、地下水の排水性に着目した検討がなされている⁴⁾。しかし、地質境界上・下部の表層土層内の水文挙動に関する検討は十分なされていない。そこで、本研究では、斜面の地下水位の観測結果に加え、表層土層内の水文観測を実施し、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。崩壊が多数確認できる斜面(右岸)と崩壊の発生が確認できない斜面(左岸)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い、崩壊が多数確認できる斜面(右岸)においてテンシオメータによる表層土層内の水文挙動の観測を実施した。平野川流域の概要図と観測地点を図-1, 2に示す。

斜面の地下水位の観測は、それぞれの観測孔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。またテンシオメータは斜面上部から花崗斑岩分布域、地質境界付近、泥岩分布域の3箇所にそれぞれ、表層土層の中間部(40cm)、下部(80cm)の2深度に設置した。

3. 調査結果

各斜面の地下水位の観測結果を図-4に、崩壊が多数確認できる斜面(右岸)の表層土層内のテンシオメータによる観測結果を図-5に示す。図-4から、各斜面とも泥岩層の地下水位は緩やかな応答を示し、常時の地下水位は泥岩層及び地質境界では確認できるが、花崗斑岩層では確認できない。降雨時の花崗斑岩層内の応答は、右岸(崩壊斜面)では各深度が独立した水位を示すが、左岸(非崩壊斜面)では地質境界付近の地下水位と一体となった変動を示し、各斜面で降雨に対する応答が大きく異なることが確認でき、斜面の透水性の違いが崩壊の発生に大きな影響を与えた可能性が推察できた。

テンシオメータの結果について、いずれの観測点も無降雨状態が続くと、地表面部が乾燥傾向となるため、概ね深度40cmの観測値の方が深度80cmより高い値を示している。また、雨が降るとTH-1とTH-3では深度40cmの値の方が低い値となっているが、これは雨水の浸透によるものと考えられる。一方、TH-2では降雨の際も深度80cmの値の方が低い値を保ち続けている。この結果から、一定規模以上の降雨の際は、表層土層内において、雨水の浸透に加え地質境界等の斜面内部からの水の流入が発生している可能性が考えられ、平成23年当時のような大規模の出水

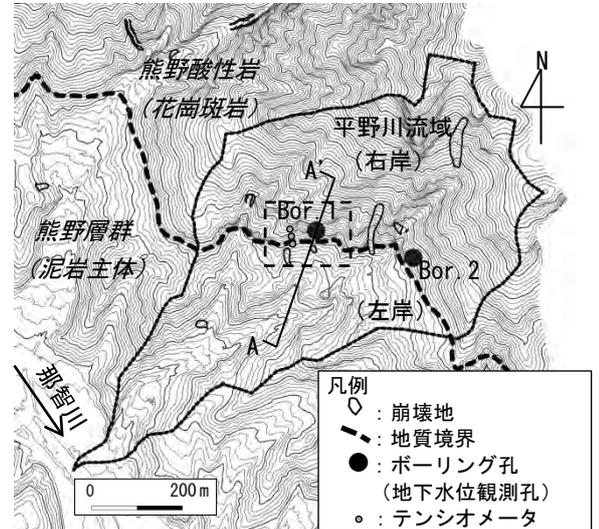


図-1 平野川流域の概要. 四角(点線)で囲ったエリアは図-2に拡大図で示す. 矢印は流向を表す.

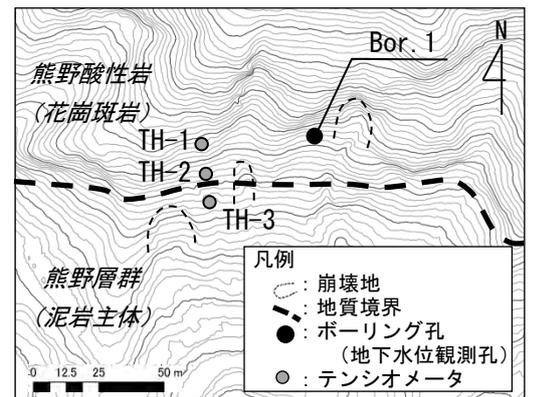


図-2 テンシオメータの配置図
(図-1中四角で囲ったエリアの拡大図)

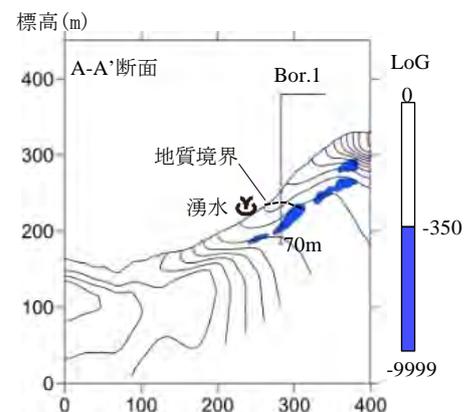


図-3 右岸(崩壊斜面)の空中電磁探査による比抵抗解析断面(点線は地質境界)

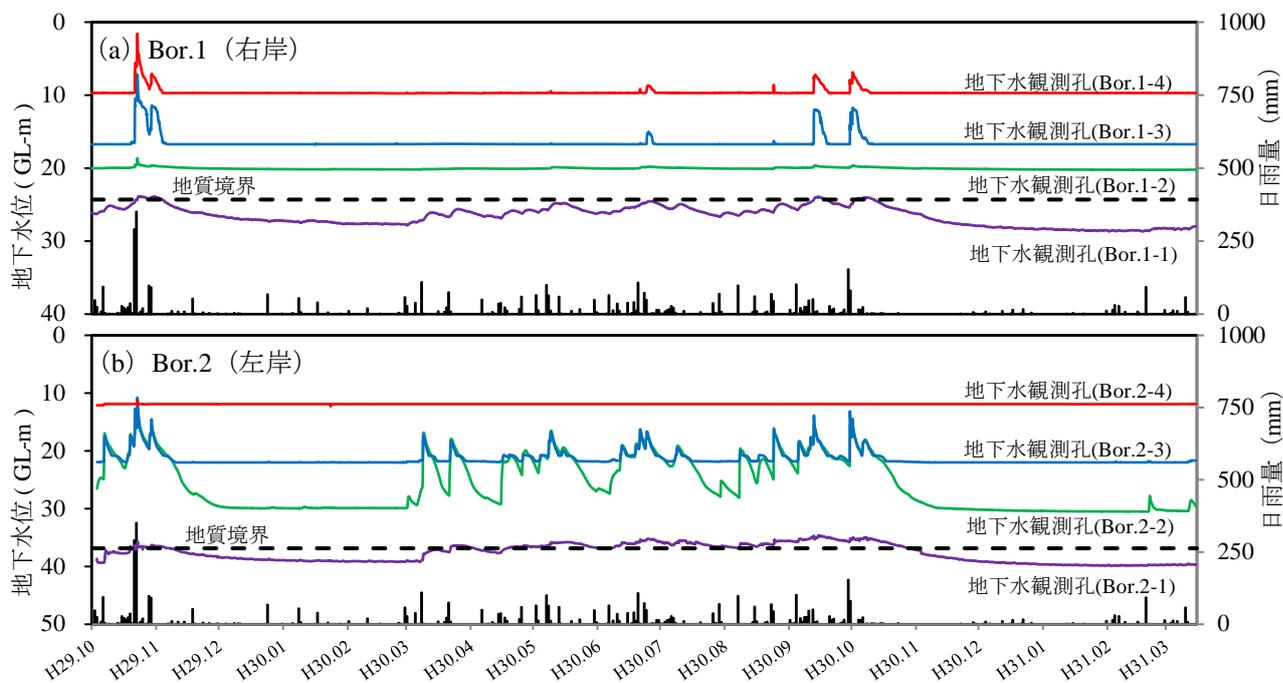


図-4 各斜面の地下水位の変動。(a) 崩壊が多数確認できる斜面 Bor.1 (右岸), (b) 崩壊が発生しなかった斜面 Bor.2 (左岸)。

の際は斜面崩壊発生の大きな要因になった可能性があると考えられる。なお、今回の表層土層内の水文観測期間中の出水においては、右岸（崩壊斜面）の地下水位の大きな変動は捉えることができなかった。

また、右岸（崩壊斜面）の空中電磁探査による比抵抗解析の結果（図-3）では、比抵抗急変箇所の分布が途絶している状況が確認でき、これは帯水層等が不連続である様子が示されている可能性があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、流域内に地質境界が存在する那智川流域において、崩壊斜面と非崩壊斜面の地下水位の観測と、表層土層内の水文調査を行った。崩壊斜面と非崩壊斜面では斜面の透水性に違いがあること、崩壊斜面では地質境界で水文挙動が大きく変化することが確認でき、これらのことが表層崩壊の発生に大きな影響を与えたと考えられる。

今回の調査では表層土層内の水文観測期間が短く、地下水位の変動との関連付けが不十分な状態である。また、規模の大きい降雨での水文観測ができていない。雨の降り方により水文挙動も異なることも想定されることから、今後も観測を継続して十分なデータを蓄積し、崩壊に係る水文プロセスを解明し、表層崩壊危険斜面の抽出につなげたい。

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.
- 6) 影浦ら：滋賀県葛川試験地における空中電磁探査による三次元比抵抗構造、砂防学会概要集, pp.618-619, 2017.

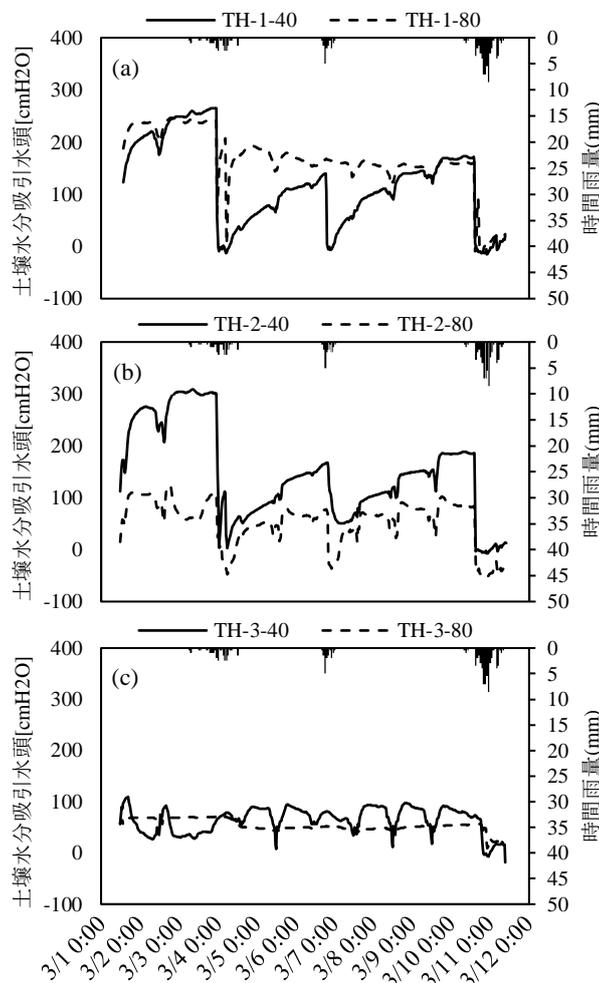


図-5 テンシオメータ観測結果。(a) TH1 (花崗斑岩層), (b) TH2 (地質境界), (c) TH3 (泥岩層)。

干渉 SAR 解析による崩壊危険斜面抽出手法と その適用範囲について

LANDSLIDE DETECTION METHOD BY INSAR ANALYSIS AND ITS APPLICABLE RANGE

崎山朋紀¹・榎原伴樹¹・坂口武弘¹・田中健貴²・木下篤彦³・江川真史⁴・
佐藤匠⁵・久保毅⁶・鈴木大和⁷・山下久美子⁸

Tomoki SAKIYAMA, Tomoki ENOHARA, Takehiro SAKAGUCHI, Yasutaka TANAKA, Atsuhiko
KINOSHITA, Masafumi EKAWA, Takumi SATO, Takeshi KUBO, Yamato SUZUKI and Kumiko
YAMASHITA

¹ 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）

² 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）

³ 正会員 農博 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

⁴ 非会員 理修 国際航業株式会社（〒660-0805 兵庫県尼崎市西長洲町1-1-15）

⁵ 非会員 農修 国際航業株式会社（〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1）

⁶ 非会員 国際航業株式会社（〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1）

⁷ 非会員 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）

⁸ 非会員 理修 元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）

（国際航業株式会社（〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1））

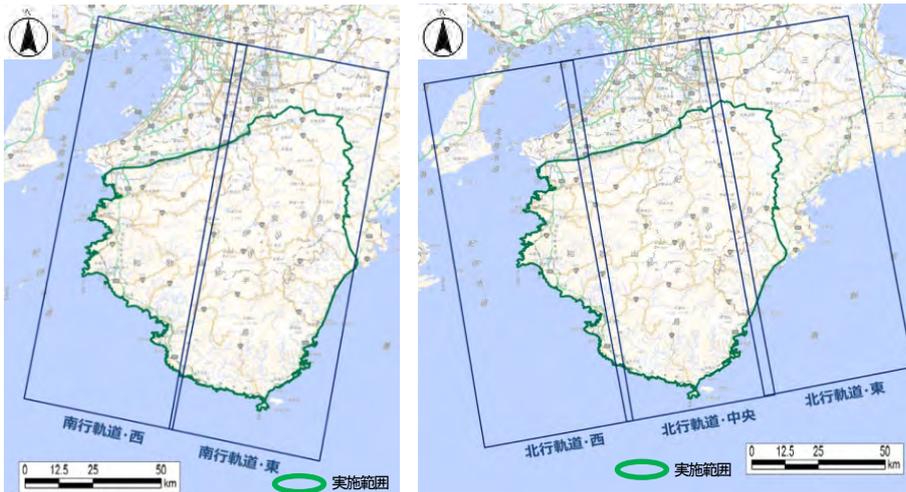
The landslides, triggered by torrential rain due to Typhoon Talas in 2011, caused enormous casualties and huge economic losses on the Kii peninsula. It is important to detect landslide activity at an early stage in order to reduce such damage. In this study, we used InSAR analysis images using ALOS-2 data to detect landslides in the area. 3D-GIV analysis was also used for comparison. And then, based on the detection findings, we conducted field surveys in order to support our findings. As a result, we have confirmed that this method was effective. However, there was a possibility of missing slope movements with this method alone.

Key Words : InSAR, ALOS-2, 3D-GIV, landslide detection, slope movement

1. はじめに

平成23年紀伊半島大水害では、和歌山県内をはじめ近隣の奈良県・三重県などで大規模な崩壊が発生し、被害が出ている¹⁾。これらの被害を軽減するには、事前に崩壊危険箇所を把握しておくことが重要である。崩壊危険箇所抽出技術として、現在レーザプロファイラによる地形判読²⁾や空中電磁探査による地下情報把握技術³⁾などが検討されている。これらは高精度に危険箇所が把握

できるメリットはあるものの、コストが高いことと調査を実施できる時期が限られているというデメリットがある。これらを補う技術として、リモートセンシング技術の一つである干渉SAR解析が挙げられる。干渉SARは、人工衛星から地表の同一の場所に対して2回のSAR（合成開口レーダー）観測を実施し、それらを干渉させて得た位相の差から地表変動を推定する技術である⁴⁾。この技術は安価であることと定期的に広域な衛星画像が得られるというメリットがある。これまで、干渉SAR解析で斜面変動を捉えた研究は多くあるが⁵⁾⁹⁾、他のリ



南行軌道・西		
1時期目	2時期目	間隔
2014/11/30	2015/10/18	322日間
2015/03/27	2015/09/11	168日間
2015/09/11	2015/11/20	70日間
2015/10/18	2016/01/10	84日間
2015/10/18	2016/09/18	336日間
2015/11/20	2016/02/26	98日間
2016/02/26	2016/06/03	98日間
2016/06/03	2016/08/12	70日間
2016/08/12	2016/11/04	84日間
2016/08/12	2017/08/11	364日間
2016/09/18	2017/07/23	308日間
2016/12/11	2017/04/02	112日間
2017/07/23	2017/12/10	140日間

南行軌道・東		
1時期目	2時期目	間隔
2017/11/03	2018/02/23	112日間
2017/12/10	2018/04/01	112日間
2018/04/01	2018/09/16	168日間
2018/06/01	2018/08/10	70日間
2018/08/10	2018/11/02	84日間

北行軌道・西		
1時期目	2時期目	間隔
2014/09/21	2015/10/04	378日間
2016/06/26	2016/09/04	70日間
2016/07/10	2019/09/04	1151日間
2016/09/04	2017/09/03	364日間
2017/02/24	2017/06/02	98日間
2017/03/19	2017/09/03	168日間
2017/11/26	2018/03/18	112日間
2018/06/24	2018/09/02	70日間

北行軌道・西		
1時期目	2時期目	間隔
2014/09/15	2015/06/22	280日間
2015/08/26	2016/08/24	364日間
2016/06/20	2016/11/21	154日間
2016/06/20	2017/06/05	350日間
2016/08/10	2017/08/09	364日間
2017/06/05	2018/01/29	238日間
2017/08/09	2018/08/08	364日間

北行軌道・中央		
1時期目	2時期目	間隔
2014/08/13	2015/02/25	196日間
2015/02/25	2015/06/03	98日間
2015/04/13	2015/12/21	252日間
2015/04/13	2016/07/04	448日間
2015/06/03	2016/06/01	364日間
2015/09/09	2016/09/07	364日間
2015/12/21	2016/03/28	98日間
2016/03/28	2016/07/04	98日間
2016/06/01	2017/02/08	252日間
2016/07/04	2016/12/05	154日間
2016/07/04	2017/06/19	350日間
2016/08/24	2017/08/23	364日間
2016/12/05	2017/03/13	98日間
2017/02/08	2018/01/10	336日間
2017/03/13	2017/06/19	98日間
2017/06/19	2018/04/09	294日間
2017/08/23	2018/08/22	364日間

北行軌道・東		
1時期目	2時期目	間隔
2014/09/10	2015/03/11	182日間
2015/11/18	2016/02/24	98日間
2016/09/07	2017/09/06	364日間
2016/11/16	2017/02/22	98日間

【出典:地理院 SAR マップ】

図-1 干渉 SAR 画像の判読に用いた干渉ペア，実施範囲

モートセンシング技術により面的に斜面変動を捉えた結果と比較をした事例は少ない。

本研究では、干渉 SAR 解析結果（地理院 SAR マップ）を用いた斜面変動把握を行い、また他のリモートセンシング技術や現地調査と比較を行うことで、その適用範囲を明らかにし、今後の広域モニタリング手法の検討に役立てることを目的とする。

2. 調査方法

(1) 干渉 SAR 画像による斜面変動の抽出

干渉 SAR 画像による斜面変動の抽出を行った。抽出には国土地理院の干渉 SAR 解析結果（ALOS-2 の取得データによる解析結果，高分解モード，北行軌道 26 ペア・南行軌道 28 ペアの合計 54 ペア）を使用した。各ペアの時間間隔は最短で 2 ヶ月，最長で 1 年間強のものである。ALOS-2 搭載の合成開口レーダーから照射される波長約 24cm の L バンドの電波は、樹木の枝葉を透過しやすく、変化の少ない幹や地表面などで反射することから森林でも干渉を得ることができる。判読に用いた干渉解析のペアと実施範囲を図-1 に示す。また、干渉 SAR 画像を用いて抽出するにあたり、以下の判断基準に従って抽出作業を行った。

- ・斜面単位に相当する局所的な干渉縞が確認できる。
- ・干渉縞の分布する範囲が斜面変動を引き起こす地形として整合的である。
- ・複数の時期にわたって干渉縞が確認できる（継続して変状が発生している）。
- ・電波照射方向と斜面変動方向に矛盾が見られない。
- ・他の衛星画像等で人為的な地形改変が認められない。

(2) 地形変動解析（3D-GIV 解析）による斜面変動の抽出

3D-GIV とは、航空レーザ計測データから斜面変動箇所を抽出する技術であり、樹木など地表遮蔽物をフィルタリング処理した 2 時期の数値標高モデル（DEM）から地形解析図を作成し、画像解析処理により変位ベクトルを面的に算出するものである。干渉 SAR 画像による抽出結果と対比するため、既往の航空レーザ測量成果を用いた 3D-GIV 解析により、斜面変動箇所の抽出を実施した。3D-GIV 解析の実施範囲と解析ペアを図-2 に示す。

(3) 現地調査の実施

干渉 SAR 画像及び 3D-GIV 解析により抽出した斜面変動のうち、変動規模、現地へのアクセスを考慮して 10 箇所を絞り込み、実際に崩壊の兆候を確認するため現地調査を実施した（図-3）。現地調査では、あらかじめ

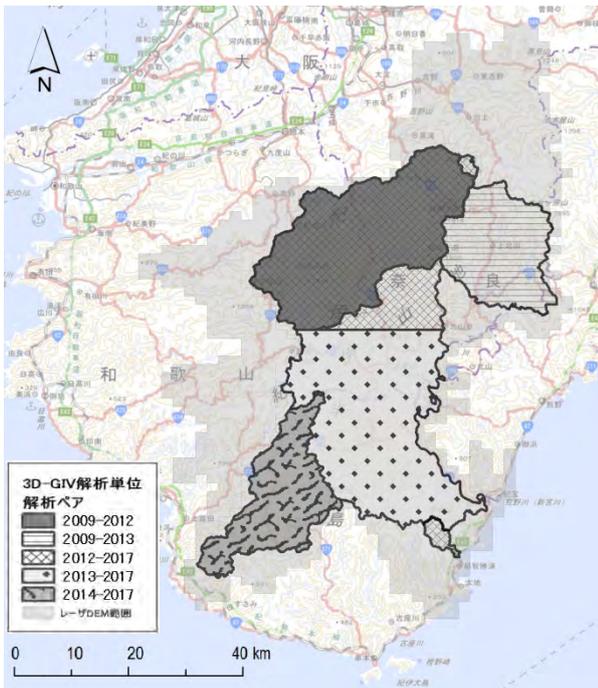


図-2 3D-GIV 解析の実施範囲・解析ペア

め航空レーザ計測データを用いて微地形判読を実施した後、斜面や道路等の構造物に現れる変状などを確認した。また、GNSS 観測をおこない干渉 SAR 画像及び 3D-GIV 解析による抽出結果と対比した。

3. 調査結果

干渉 SAR 画像より 116 箇所の斜面変動を抽出した。そのうち 26 箇所で複数ペアの斜面変動を確認した。また、3D-GIV 解析により 141 の斜面変動を抽出した。現地調査を実施した 10 地区の調査結果は以下のとおりである。

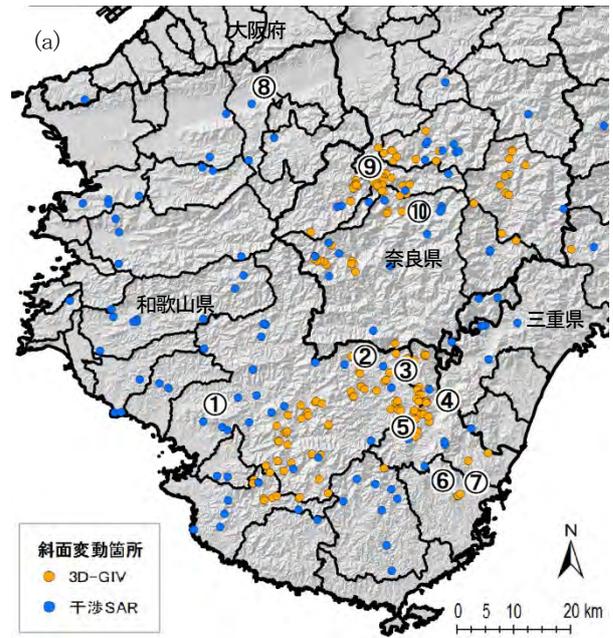
(1) 和歌山県田辺市・上秋津地区

a) 斜面変動の抽出結果

この地区では、2014 年以降 2018 年までの干渉 SAR 解析結果から、7 つのペアで斜面変動に伴うと考えられる干渉縞を確認した。干渉縞の色調階から最も変動の大きい場所では電波照射方向で 8cm 程度の斜面変動が発生しているものと考えられる (図-4)。

b) 現地調査結果

対象斜面は、全幅 650m 程度、全長 500m 程度の地すべり斜面である。斜面頭部付近では旧農道の変状、南側端部では表層崩壊など顕著な変状が認められた (写真-1)。これらの変状は、干渉 SAR 画像から読み取れる変動範囲と概ね整合していた。また、この斜面では、2 時期の GNSS 基準点測量による変位量を算出した。その結果を表-1 に示す。2013 年 3 月と 2019 年 1 月の計測結果を比較した結果、変位が最も大きい P-1 で累



(b)	NO	地区名	調査場所
	1	上秋津	和歌山県田辺市上秋津
	2	伏拝	和歌山県田辺市本宮町伏拝
	3	大日山	和歌山県田辺市本宮町本宮
	4	宮井	和歌山県新宮市熊野川町宮井
	5	棕井	和歌山県新宮市熊野川町棕井
	6	尻剣谷川	和歌山県東牟婁郡那智勝浦町井関
	7	金山谷川	和歌山県東牟婁郡那智勝浦町井関
	8	寺尾	和歌山県伊都郡かつらぎ町大字寺尾
	9	清水	奈良県五條市大塔町清水
	10	惣谷	奈良県五條市大塔町惣

図-3 (a) 現地調査実施箇所位置図, (b) は(a)の数字の箇所の地区名を示す。

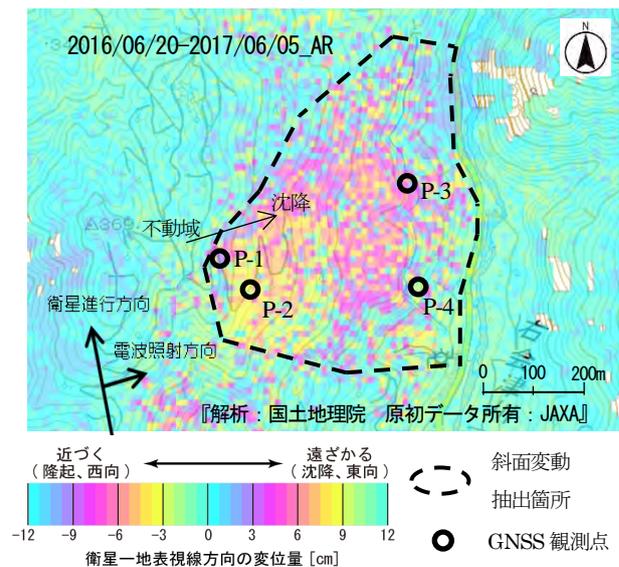


図-4 干渉 SAR 画像 (上秋津地区)。国土地理院の SAR 干渉画像 2016/06/20-2017/06/05_AR を加工して著者が作成。



写真-1 現地写真（上秋津）. 矢印は移動方向.

表-1 GNSS 測量結果（上秋津地区）

観測点	観測時期	水平変位 (m)	変位方向
P-1	2013/03/05-2019/01/22・23	0.502	東
P-2	2013/03/05-2019/01/22・23	0.455	東
P-3	2013/03/05-2019/01/22・23	0.304	東
P-4	2013/03/05-2019/01/22・23	0.325	東

積 0.502m（約 8.5cm/年），最も小さい P-3 で累積 0.304m（約 5.2cm/年）であった。干渉 SAR 解析と GNSS 測量の結果を比較すると、いずれも東方向に約 8cm/年であり、両者の変動の傾向は概ね一致していた。

(2) 和歌山県新宮市熊野川町・宮井地区

a) 斜面変動の抽出結果

2015 年以降 2018 年までの干渉 SAR 解析結果において 5つのペアで斜面変動に伴うと考えられる干渉縞が確認された。干渉縞の色調階から、最も変動の大きい場所では電波照射方向で 8cm 程度の変動が発生しているものと読み取れる（図-5）。

一方、3D-GIV 解析では地形変動を示す纏まったベクトル群が検出された（図-6）。この範囲では、2013 年から 2017 年の 4 年間で最大 1.5m 程度の変動ベクトルが検出された。ベクトル群は、干渉 SAR で検出した斜面変動を示すと考えられる干渉縞の範囲内にあり、かつ干渉縞の色階調から変動が周辺に比べて大きいと読み取れる北側部分に集まっている。また、ベクトル群の方向が干渉 SAR の抽出結果と概ね整合していることから、解析結果は干渉 SAR による斜面変動の抽出結果を裏付けるものであると考えられる。なお、干渉 SAR 画像と 3D-GIV 解析画像が重複する箇所において、同一斜面を両手法で同時に検出できた事例は 1 箇所のみであった。

b) 現地調査結果

対象斜面は、全幅 330m 程度、全長 800m 程度の地すべり斜面である。地すべりブロック頭部では複数の階段状の滑落崖、根曲がり、地表の不陸が認められ、また、

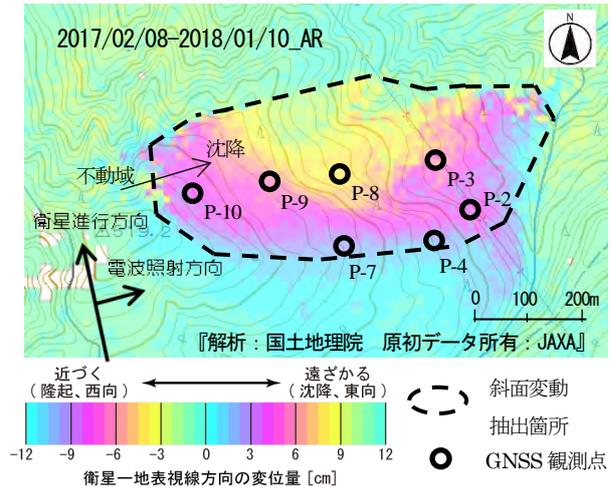


図-5 干渉 SAR 画像（宮井地区）. 国土地理院の SAR 干渉画像 2017/02/08-2018/01/10_AR を加工して著者が作成。

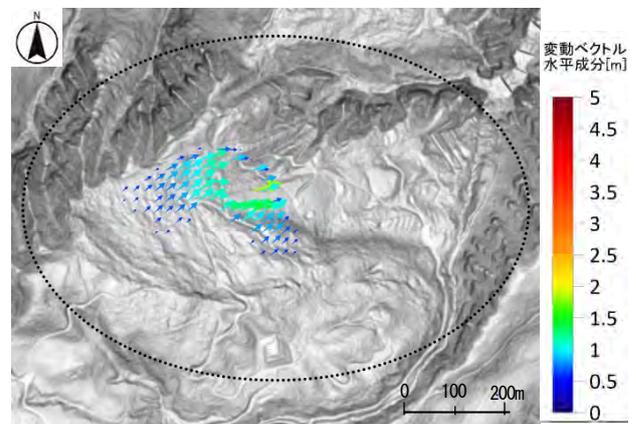


図-6 3D-GIV 解析結果（宮井地区）
解析ペア 2013-2017

表-2 図-5 中 P-2~10 の GNSS 測量結果（宮井地区）

観測点	観測時期	水平変位 (m)	変位方向
P-2	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.109	北東
P-3	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.127	北東
P-4	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.064	北東
P-7	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.06	北東
P-8	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.241	北東
P-9	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.212	北東
P-10	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.157	北東

ブロック内においても、切土法面の崩壊、亀裂、根曲がり等の多数の変状が認められた。これらの変状は抽出した変動範囲と概ね整合していた。

この斜面では治山事業による GNSS 基準点測量の実績があることから、その結果（表-2）と干渉 SAR の結

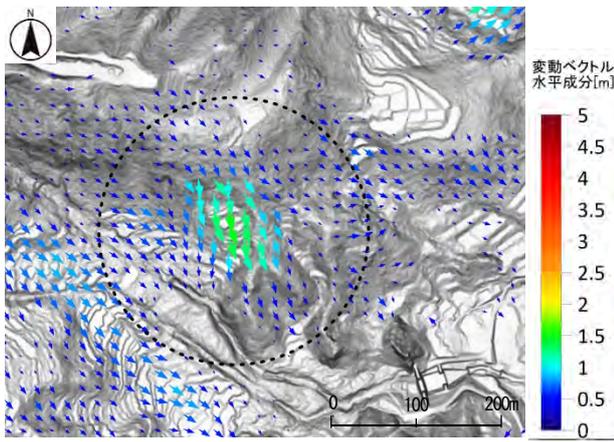


図-7 3D-GIV 解析結果 (金山谷川地区)
解析ペア 2012-2017



写真-2 現地写真 (金山谷川地区)

果を対比した。2014年11月と2017年10月の計測結果を比較した結果、変位が最も大きいP-8で累積0.241m(約8.2cm/年)、最も小さいP-7で累積0.060m(約2.0cm/年)であった。干渉SAR解析で電波照射方向である東方向に約8cm/年、一方GNSS測量の結果では北東方向に約8cm/年であり、両者の変動の傾向は概ね一致していた。

(3) 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町井関・金山谷川地区

a) 変動斜面の抽出結果

3D-GIV解析から地形変動を示す纏まったベクトル群が検出された。この範囲で2012~2017年の5年間で最大1.5m程度の南向きの変動ベクトルが検出された(図-7)。一方、干渉SAR画像では当該斜面から斜面変動を検出できなかった。この理由については、変動が2012~2014年の間に発生し、その後止まっている可能性や、今回現地調査対象とした他の斜面変動領域と比較して狭いことから抽出できなかった可能性などが考えられる。

b) 現地調査結果

対象斜面は、全幅70m程度、全長100m程度の地すべりブロックで、明瞭な滑落崖と顕著な変状を有しており、ブロック内には開口亀裂や段差、倒木が多数認めら

表-3 調査結果一覧

NO	地区名	変位の有無		現地調査 斜面など 変状の有 無	斜面変動 推定 規模(m)	斜面傾 斜方向
		干渉SAR 画像判読	3D-GIV 解析			
1	上秋津 ※GNSS測量	○	○	○	W650 L500	東
2	伏拝	○	×	○	W200 L200	北西
3	大日山	○	×	×	W400 L400	東
4	宮井 ※GNSS測量	○	○	○	W330 L800	北東
5	樟井	×	○	○	W400 L500	東
6	尻剣谷川	×	○	○	W100 L100	北東
7	金山谷川	×	○	○	W70 L100	南
8	寺尾	○	○	○	W270 L400	北
9	清水	×	○	○	W110 L350	東
10	惣谷	×	○	○	W600 L800	北

れる(写真-2)。3D-GIV解析ではブロック全体に変位が認められ、現地と概ね整合していた。

(4) その他

その他、現地調査結果の概要を表-3に示す。

現地調査の結果、干渉SARで抽出した大日山地区を除く4地区で、斜面変動の痕跡が確認された。大日山地区では、干渉SAR画像で3cm程度の変動が読み取れたことから、微小な斜面変動であったために目視で確認できるような痕跡を現地で確認できなかった可能性がある。また、4地区のうち斜面変動の規模が最も小さかったのは伏拝地区で、その規模は概ね200m×200mであった。一方、3D-GIV解析では、抽出した6地区すべてにおいて、顕著な斜面変動の痕跡を確認できた。

4. 考察

現地調査の結果、干渉SAR画像により抽出した大日山地区を除く4地区において、顕著な斜面変動の痕跡が確認された。これらの痕跡は、発生した時期は不明であるが、干渉SAR画像から読み取れる変動範囲と概ね整合していた。また、上秋津地区及び宮井地区の2地区において干渉SAR画像とGNSS測量結果の斜面変動の傾向が概ね一致していたことから、これら4地区で確認された痕跡は斜面崩壊の兆候を示しているものと考えられ、干渉SAR画像を用いて崩壊危険斜面を抽出する手法は有効であると考えられる。

対象地区のうち、同一斜面を両手法で同時に検出できた事例は宮井地区のみであった。この斜面では3D-

GIV 解析において 2013～2017 年の 4 年間で最大 1.5m 程度の変動ベクトルを検出した。一方、干渉 SAR 画像では、3D-GIV 解析と解析データの時期に多少ずれはあるものの、2015～2018 年に 5 つのペアで斜面変動を表す干渉縞が抽出でき、各ペアで最大 8cm 程度の変位が読み取れた。また、干渉 SAR 画像で抽出した斜面変動は、GNSS 測量結果とその傾向が概ね一致していた。これらのことから、干渉 SAR 画像はこの領域で長期的に継続している斜面変動を捉えたものだと考えられる。

3D-GIV 解析で抽出できたが干渉 SAR 画像で抽出できなかった事例が 5 地区あった。これらの地区では変位量数 cm 以上の斜面変動が把握された。大きな変動を検知したにもかかわらず干渉 SAR 画像で抽出できなかった理由として、以下の可能性が考えられる。

- ・干渉 SAR と 3D-GIV 解析の観測期間に多少のずれがあることから、干渉 SAR 解析ペアの期間内に動きがなかった。
- ・大気中に含まれる水蒸気の影響などによるものと考えられるノイズが多数の解析ペアで確認されたことから、斜面変動があったにもかかわらず斜面変動を検出できなかった。
- ・ALOS-2 による干渉 SAR では、人工衛星からマイクロ波を横斜め方向（東西方向）に照射しその反射波の位相を受信するという観測の原理上、南・北向きの斜面では、地すべりの変動方向が衛星への視線方向と直交する方向であり斜面変動の距離に対して感度が悪くなり検出できなかった。
- ・斜面変動領域が検出可能なサイズを下回っていた。

干渉 SAR 画像で抽出できたが 3D-GIV 解析で抽出できなかった事例が 2 地区あった。これについては、3D-GIV 解析で検出できる斜面変状は水平変位量数 10cm 以上であり、精度の違いから抽出できなかったものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、干渉 SAR 解析結果を用いた斜面変動把握を行い、その適用範囲を明らかにするため、他のリモートセンシング技術である 3D-GIV 解析による抽出結果や現地調査との比較を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・干渉 SAR 画像から 8cm 程度までの斜面変動が抽出できた。
- ・干渉 SAR 画像により概ね 200m×200m 以上の広さの斜面変動が抽出できた。
- ・干渉 SAR 画像を用いて崩壊危険斜面を抽出する手法は有効である。一方で干渉 SAR だけに依存した斜面変動モニタリングは斜面変動を見逃す可能性がある。

以上のことから、干渉 SAR を用いて斜面変動を把握する場合には、干渉 SAR の特徴を把握した上で場面に応じ、他のモニタリング手法とうまく組み合わせる必要があることを確認した。引き続き、効率的に崩壊危険箇所を把握するためのモニタリング手法について検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 松村和樹, 藤田正治, 山田孝, 権田豊, 沼本晋也, 堤大三, 中谷加奈, 今泉文寿, 島田徹, 海堀正博, 鈴木浩二, 徳永博, 柏原佳明, 長野英次, 横山修, 鈴木拓郎, 武澤永純, 大野亮一, 長山孝彦, 池島剛, 土屋智: 2011 年 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) 花岡正明, 齋藤信哉, 高田浩穂, 佐藤健一, 佐藤雄太, 藤原伸也, 向山栄, 高見智之, 小林容子, 久保毅, 福島昇, 横尾泰広: 航空レーザ計測データを用いた地表変位量把握の事例と課題 -最上川水系立谷沢川流域 濁沢川池ノ台地区における事例-, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.A-136-137, 2013.
- 3) 木下篤彦, 北川眞一, 大山誠, 内田太郎, 河戸克志, 阿部征輝, 奥村稔: 平成 23 年大雨台風 12 号により紀伊半島で発生した深層崩壊周辺の広域比抵抗構造特性, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.B-356-357, 2013.
- 4) 国土地理院: 国土地理院の干渉 SAR ホームページ, http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/gsi_sar.html, 2018.
- 5) 水野正樹, 王純祥, 三五大輔, 西川大亮, 平田育士: DinSAR と航空レーザ測量と GNSS を用いた稲子岳の地すべり調査, 平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.511-512, 2018.
- 6) 平田育士, 吉川和男, 三五大輔, 野呂智之, 神山嬢子, 鈴木大和, 阪上雅之: 干渉 SAR 解析における変動縞判読方法の検討, 平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.B458-B459, 2017.
- 7) 石塚師也, 藤井幸泰, 金子誠, 高橋亨, 松岡俊文: 干渉 SAR 解析によって推定した地表変動と地すべりブロックとの関連—白山甚之助谷周辺の地すべりを例に—, 応用地質, 第 57 巻, 第 6 号, pp.289-294 頁, 2017.
- 8) 山中雅之, 中埜貴元, 和田弘人, 仲井博之: 全国干渉 SAR 解析による斜面変動の検出事例, 第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.55-60, 2016.
- 9) 江川真史, 國友優, 神山嬢子, 松下一樹, 吉川和男, 三五大輔, 平田育士: 国土監視ツールとしての Lバンド SAR 干渉解析の活用について, 平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.B194-B195, 2015.

(2019. 4. 2 受付)

地質境界が存在する斜面での地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険度評価手法の提案

THE PROPOSAL OF THE RISK ASSESSMENT METHOD FOCUSING ON THE GEOLOGICAL STRUCTURE AND THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS ON THE SLOPE WHERE THE GEOLOGICAL BOUNDARY EXISTS

榎原 伴樹¹・崎山 朋紀¹・坂口 武弘¹・岸畑 明宏¹・田中 健貴²・
木下 篤彦³・野池 耕平⁴・松澤 真⁴・河戸 克志⁵

Tomoki ENOHARA, Tomoki SAKIYAMA, Takehiro SAKAGUCHI, Akihiro KISHIHATA, Yasutaka TANAKA, Atsuhiko KINOSHITA, Kohei NOIKE, Makoto MATSUZAWA and Katsushi KAWATO

¹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）

²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）

³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）

⁴非会員 理修 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）

⁵非会員 理修 大日本コンサルタント株式会社（〒330-6011 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2L.A.タワー）

In the Nachi River basin, the shallow landslides and the debris flows occurred by the heavy rainfall from Typhoon Talas in 2011. This basin is characterized by the existence of geological boundaries, which is considered to be one of main causes of the landslides.

In this study, we conducted geophysical and hydrological surveys to make it clear. First, we conducted airborne electromagnetic survey. Second, the groundwater level was observed using the boreholes. The surveys were conducted on landslide occurred and not occurred slopes and the results were compared. Third, we conducted hydrological observation of the surface soil layer near the geological boundary using the tensiometers and the soil moisture meters.

As a result, we have found that both the drainage characteristics and the distribution of resistivity were different on the two slopes. We have also found that geological boundaries affect hydrological behavior.

Key Words : *shallow landslide, geological boundaries, hydrological survey, airborne electromagnetic survey*

1. はじめに

平成23年9月の台風12号に伴う豪雨により、和歌山県の那智川流域の広い範囲で斜面崩壊や土石流が発生し、甚大な被害が発生した¹⁾。被害軽減を図るため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は、表層崩壊危険斜面を抽出しておくことは重要である。表層崩壊の予測手法として、既往の研究^{例えは2,3)}において浸透流解析等の雨水流出に関するモデルと斜面安定解析を組み合わせた表層崩壊発生危険度を評価するモデルが提案されている。さらに、航空レーザ測量や簡易貫入試験の改良等、近年の評価モデルの入力条件の測定技術の進

歩も相まって、比較的精度よく予測できるようになってきている⁴⁾。

一方、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）が貫入する特異な地質構造や水理構造を呈しており、このことが表層崩壊発生の原因となった可能性が報告されている⁵⁾。現在、主に用いられている手法は、土層厚や斜面勾配、集水面積、土質強度等の条件を基に斜面を評価するものであり、斜面内で透水性や土質強度などが異なる地質体が存在する那智川流域では、適正に評価されない恐れがある。

これまで、那智川流域では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、短期間に広域な地盤情報を取得することが可能な空中電



図-1 那智川流域の概要



写真-1 地層境界(点線) . 上部が花崗斑岩で下部が泥岩
写真-2 地層境界付近からの湧水の流量観測状況

磁探査と、斜面の地下水位の変動の結果に着目した検討がされている⁶⁾。しかしながら、地質境界を有する斜面での表層崩壊の発生の大きな原因となる地質境界付近の表層土層内の水文挙動に関する検討は十分なされていない。そこで本研究では、同一溪流内の崩壊斜面と非崩壊斜面を対象とした物理探査や地下水位の継続観測に加え、崩壊斜面での地質境界付近の物理探査と表層土層内の水文観測を実施し、その水文特性について検討した。

2. 調査地と調査手法について

(1) 那智川流域の概要

那智川流域では、平成23年8月30日から9月4日にかけて台風12号に伴う記録的な豪雨により、大規模な表層崩壊とそれに伴う土石流、支川からの土石流の流入による河川氾濫により甚大な被害が生じた。特に9月4日の未明には、和歌山県が設置した市野々観測所(那智勝浦町市野々)において最大時間雨量123mm、0時から4時の間の累積雨量が341mmを観測し、表層崩壊及びそれに伴う土

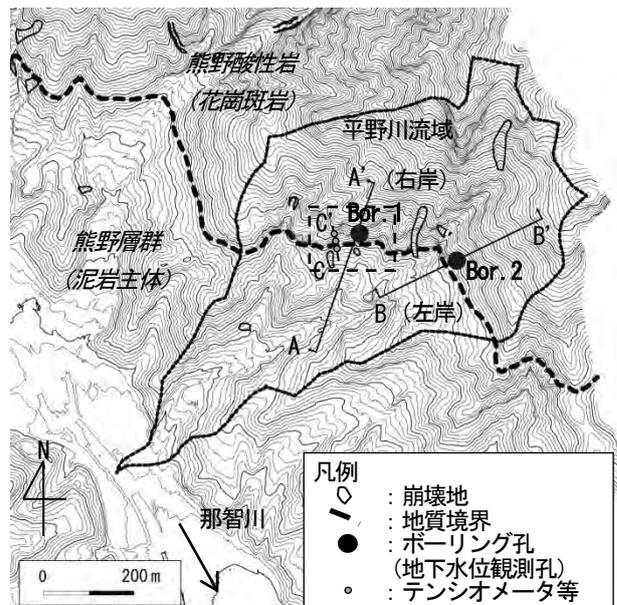


図-2 平野川流域の概要. 四角で囲ったエリアは図-3に拡大図で示す.

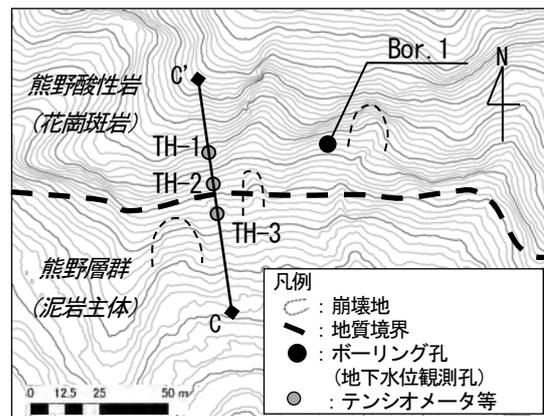


図-3 テンシオメータ等の配置図(図-2中、四角で囲ったエリアの拡大図)

石流が多数発生した。那智川流域の概要図を図-1に示す。那智川流域の地質的な特徴として、堆積岩である熊野層群(砂岩泥岩互層)の上を貫入岩である熊野酸性岩(花崗斑岩)が覆う2層構造となっていることが挙げられ、地質境界付近では湧水が多く見られる。平成23年に発生した崩壊の多くが地質境界付近の熊野酸性岩の分布域で発生している⁸⁾。

本研究では表層崩壊危険斜面の特性を把握するため、表層崩壊及び土石流が多数発生した那智川流域の中で、地質境界の露頭及び湧水の湧出が確認できる平野川(図-2、写真-1・2)を対象として、崩壊が多数確認できる斜面(右岸)と、崩壊の発生が確認できない斜面(左岸)において、地下の大まかな地質構造を把握するために空中電磁探査及び電気探査を実施し、水文特性を把握するために地質境界付近の地下水位の観測と、テンシオメータ等による表層土層内の水文挙動の観測を行った。地下水位の観測孔及びテンシオメータ等の設置位置を図-2、3に示す。

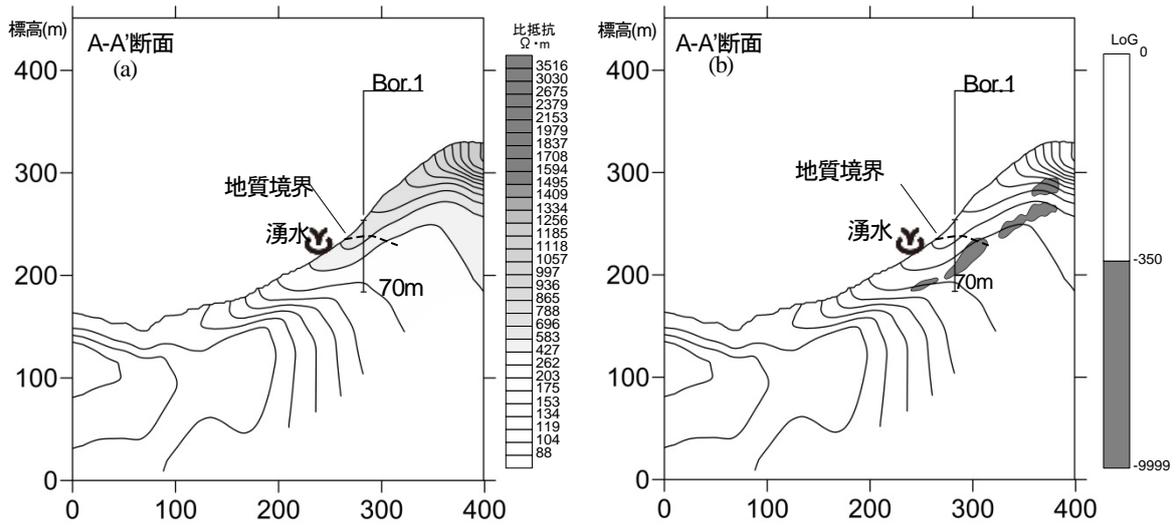


図-4 図-2中 A-A' 断面図. (a) 比抵抗断面, (b) 比抵抗解析断面. 点線は地質境界を示す.

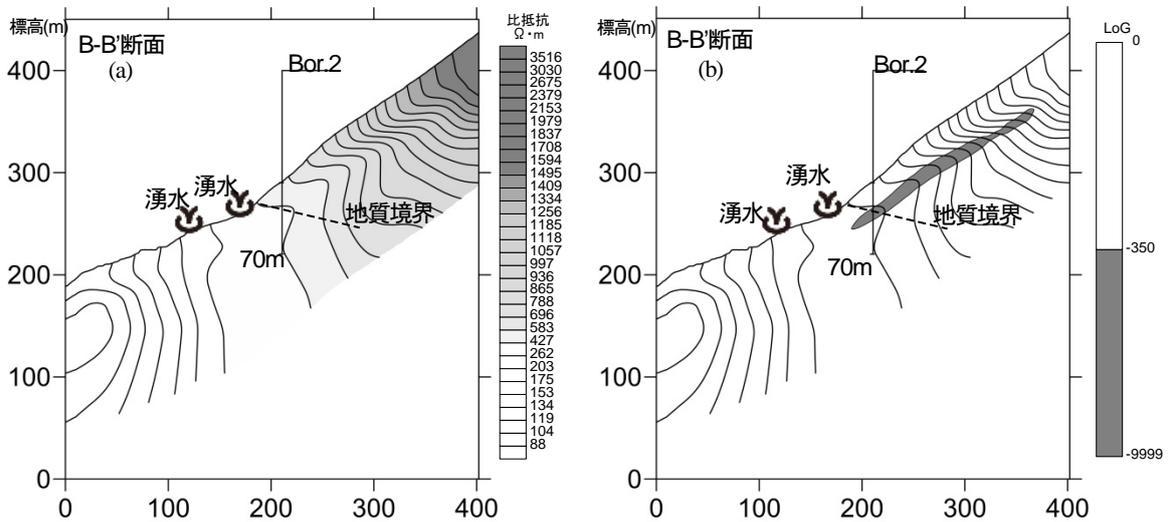


図-5 図-2中 B-B' 断面図. (a) 比抵抗断面, (b) 比抵抗解析断面. 点線は地質境界を示す.

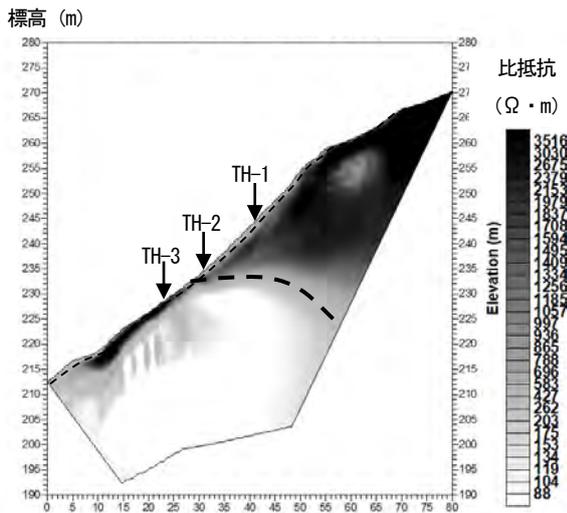


図-6 図-3中 C-C' 測線上の電気探査結果. 点線は地質境界を示す.

(2) 空中電磁探査および電気探査について

空中電磁探査はヘリコプターで複数の送受信コイルを

収納したセンサを曳航し、送信コイルの磁場に反応して発生する地盤からの磁場を受信コイルで計測することで斜面内部の比抵抗を測定する探査手法である。異なる周波数帯域の電磁波を用いることによって、異なる深度の斜面内部の比抵抗を同時に測定することができる。那智川流域では平成24年に、地下200mまでの大まかな地質情報を把握する目的で実施している。今回、崩壊が多数確認できる斜面（右岸）においては、地下約20mまでの詳細な地質構造や不安定土層厚を確認する目的で電気探査を実施した。電気探査はテンシオメータ等による水文観測を実施した測線上で実施した。空中電磁探査と電気探査で取得する比抵抗($\Omega \cdot m$)は体積含水率(=間隙率×飽和度)と粘土の含有量を反映しており、比抵抗構造から地質構造や地下水の分布状況を検討することができる。

(3) 斜面の地下水位観測と表層土層内の水文挙動について

平野川流域における崩壊の発生が多数確認できる斜面（右岸）と、崩壊の発生が確認できない斜面（左岸）の

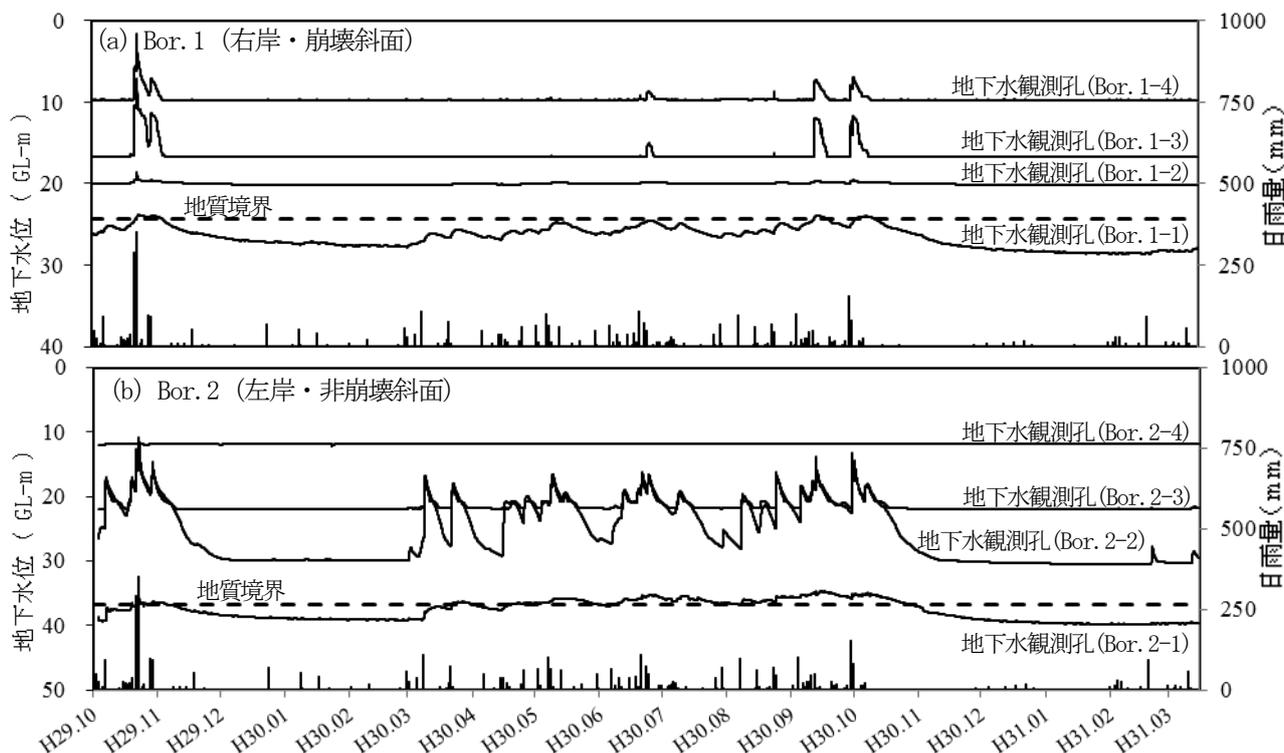


図-7 各斜面の地下水位の変動。(a) 崩壊が多数確認できる斜面 Bor. 1 (右岸), (b) 崩壊が発生しなかった斜面 Bor. 2 (左岸)。

2つの斜面において、斜面の水文特性の違いが崩壊発生の原因に関わっていると考え、地質境界を貫入したボーリング孔において平成29年10月から平成31年3月にかけて地下水位の観測を実施した。それぞれの斜面において、上位の花崗斑岩は亀裂の有無に着目して2深度、花崗斑岩と熊野層群泥岩の地質境界付近、熊野層群を対象とした合計4深度で地下水位の観測を行った。深度別の地下水位の変動を捉えるため、それぞれの調査地点において4孔ずつの地下水観測孔を設置した。地下水観測の対象層にはストレーナ（有孔管）を設置し、対象より上位は無孔管として上位層からの地下水が流入しないよう遮水した。

また、降雨時の斜面表層土層内の水文挙動を捉えることを目的として、崩壊の発生が多数確認できる斜面（右岸）のボーリング孔（Bor.1）周辺において、図-3に示す通り地質境界と交差する方向に、斜面上部から花崗斑岩分布域、地質境界付近、泥岩分布域の3箇所的位置にそれぞれ地下水位計、土壌水分計及びテンシオメータを設置し観測を行った。現地調査の結果から、当該地点の表層土層は約80cm程度であることが確認できた。地下水位計は表層土層の下部付近の深度80cm、土壌水分計とテンシオメータは、表層土層内の中間付近の深度40cmと下部付近の深度80cmのそれぞれ2深度に設置した。地下水位計と土壌水分計は平成31年2月から、テンシオメータは平成31年3月から観測を行っている。

3. 観測結果

(1) 地質構造について

空中電磁探査による比抵抗分布と比抵抗解析結果を図-4, 5に示す。図-4は崩壊が多数確認できる斜面（右岸）、図-5は崩壊の発生が確認できない斜面（左岸）の、各々ボーリング地点を通過する断面での比抵抗分布と比抵抗解析断面を示している。比抵抗の解析には本研究ではLoG解析¹⁰と呼ばれる空間フィルタを使用し、深度方向の比抵抗変化率が大きい領域を抽出している。また、図-6に崩壊が多数確認できる斜面（右岸）で実施した水文観測実施測線（図-3中C-C'測線）上での電気探査の結果を示す。

空中電磁探査の結果による各断面図の比抵抗分布状況（図-4(a)、図-5(a)）では斜面上部では高比抵抗値を、斜面下部では低比抵抗値を示しており、花崗斑岩と泥岩のそれぞれの分布域と概ね合致していることが確認できた。また、崩壊が多数確認できる斜面（右岸）の比抵抗解析結果（図-4(b)）では、比抵抗変化率の大きい領域は途中で途絶しているが、崩壊が発生していない斜面（左岸）の結果（図-5(b)）では、比抵抗変化率の大きい領域が連続している状況が確認できた。

崩壊が多数確認できる斜面（右岸）での電気探査の結果（図-6）からも、斜面上部には高比抵抗帯、斜面下部には低比抵抗帯が分布しており、地表で確認できた地質境界分布や地質調査結果から、低比抵抗帯は熊野層群の泥岩、高比抵抗帯は花崗斑岩の分布域が反映されている

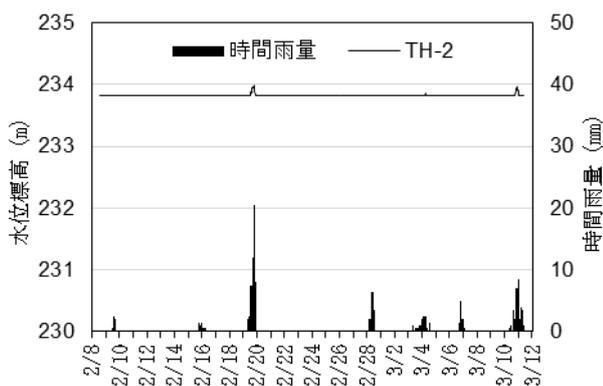


図-8 表層土層中の地下水位観測結果 (平成31年, TH-2)

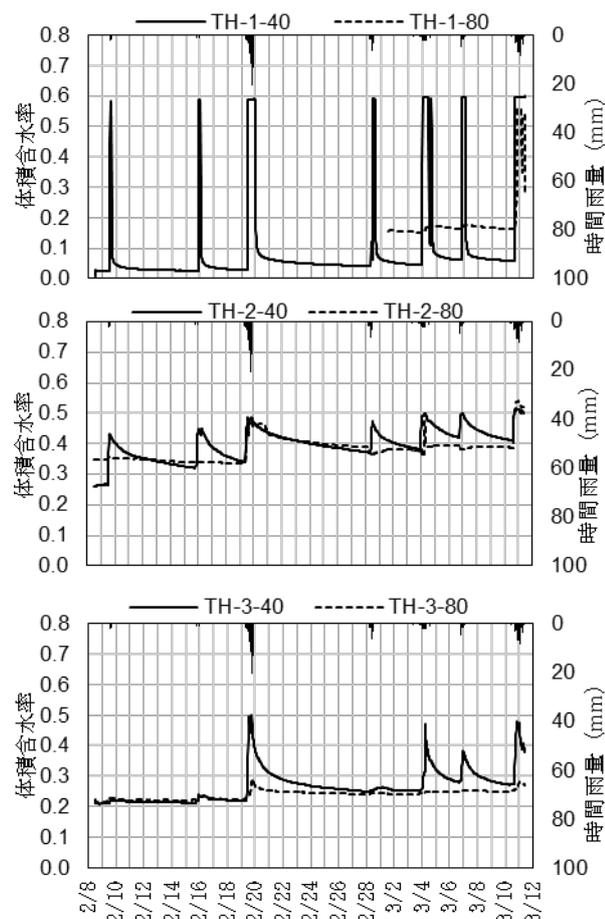


図-9 表層土層中の土壌水分量計観測結果 (平成31年)。
TH1は花崗斑岩層, TH2は地質境界, TH3は泥岩層に設置。
40, 80はそれぞれ設置深度 (cm) を表す。

ものと考えられる。また、地表部には中程度の比抵抗帯が薄く分布し、斜面上部では消失しているが、これは表層土層の分布を反映していると考えられる。

(2) 斜面の地下水位の観測結果について

各斜面の地下水位の観測結果を図-7に示す。右岸・左岸ともに泥岩層の地下水位は降雨に対して緩やかな応答を示している。Bor.1 (右岸) では、泥岩層 (Bor.1-1) と地質境界付近 (Bor.1-2) では常時地下水位が確認できるが、花崗斑岩層 (Bor.1-3, Bor.1-4) では確認できない。

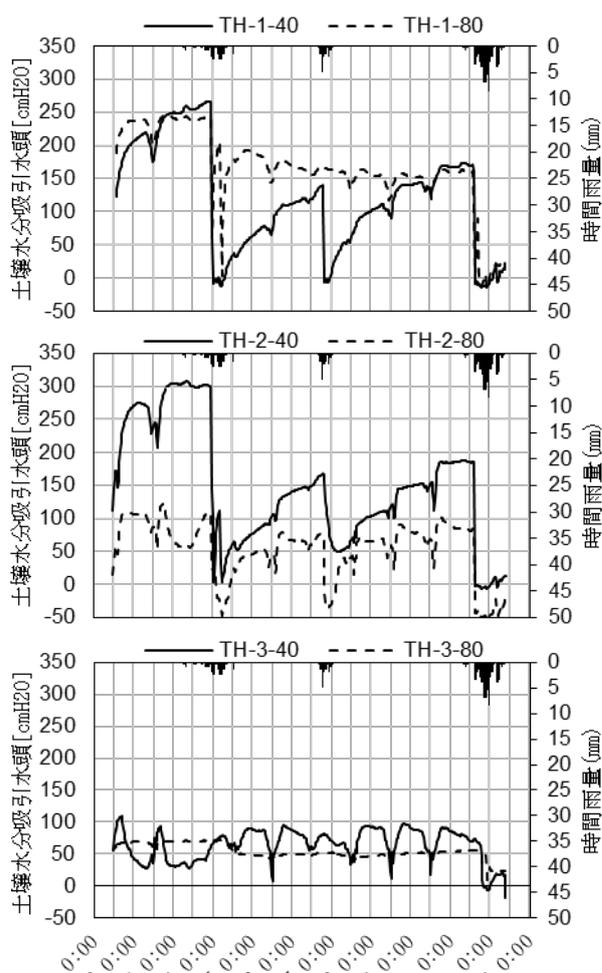


図-10 テンシオメータ観測結果 (平成31年) . TH1は花崗斑岩層, TH2は地質境界, TH3は泥岩層に設置。
40, 80はそれぞれ設置深度 (cm) を示す。

降雨後は泥岩層 (Bor.1-1) と地質境界付近 (Bor.1-2) では緩やかに変化している状況が確認でき、花崗斑岩層 (Bor.1-3, Bor.1-4) ではまとまった降雨の後に水位上昇が確認できる。一方、Bor.2 (左岸) においても泥岩層 (Bor.2-1) と地質境界付近 (Bor.2-2) では常時の地下水位が確認できるが、花崗斑岩層 (Bor.2-3, Bor.2-4) では確認できない。地質境界付近の地下水位 (Bor.2-2) は降雨に対し鋭敏に反応し、それより上位の花崗斑岩層内の水位 (Bor.2-3, Bor.2-4) も地質境界付近の地下水位の上昇に伴い一体となり変化している状況が確認できる。このことから左岸側の崩壊の発生が確認できない斜面の花崗斑岩層内は透水性が高く、崩壊が多数発生した斜面 (右岸) と発生しなかった斜面 (左岸) との斜面内の地下水位の変動が大きく異なることが確認できた。

(3) 表層土層内の水文特性

崩壊の発生が多数確認できる斜面 (右岸) の表層土層内の水位観測結果 (TH-2のみ) , 土壌水分計及びテンシオメータによる水文観測結果を図-8~10に示す。表層土層内の地下水位は、花崗斑岩分布域に設置したTH-1

と泥岩分布域に設置したTH-3においては水位が確認できなかったが、地質境界に設置したTH-2のみ2月19日の総雨量93mmの降雨や3月10日～11日にかけての総雨量66mmの降雨に反応して出現が確認できた。

土壌水分量計観測結果について、小規模な降雨の際はいずれの観測点も地表に近い深度のほうが体積含水率は高い値を示しており、このことは地表部からの雨水の浸透によるものと考えられる。一方、まとまった二度の降雨の際には、地質境界付近のTH-2の深度80cmの値が一時的には深度40cmの値よりも高い値を観測している。

テンシオメータの観測結果について、いずれの観測点も無降雨状態が続くと地表面部の方が乾燥傾向となるため、概ね深度40cmの観測値の方が深度80cmより高い値を示している。また、雨が降るとTH-1とTH-3では深度40cmの値の方が低い値となっていることが確認できるが、これは雨水の浸透によるものと考えられる。一方、TH-2では降雨の際も深度80cmの値の方が低い値を保ち続けている。

これらの結果から、一定規模以上の降雨の際には、地質境界付近の表層土層内において、雨水の浸透に加え地質境界等の斜面内部からの水の流入が発生している可能性が考えられ、平成23年当時のような大規模の出水の際にはこのことが斜面崩壊発生の大きな要因になった可能性があると考えられる。

なお、今回の表層土層内の水文観測期間中の出水においては、斜面の地下水位の大きな変動は捉えることができなかった。

4. おわりに

本研究では、平成23年の台風12号に伴う豪雨による表層崩壊及び土石流で大きな被害を被った那智川流域において、物理探査や水文調査を行い、流域内に地質境界が存在する斜面での表層崩壊危険箇所の抽出方法について検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- 1)比抵抗の急変箇所の分布が崩壊斜面と非崩壊斜面で異なっていることが確認できた。比抵抗変化率が大きい深度は地下水状態や地質状態の急変箇所を示しており、帯水層等が想定できる。このことから、比抵抗変化率の大きい領域が途絶していることは帯水層が不連続であることを示していることが考えられ、空中電磁探査等の広域的な物理探査により効率的に表層崩壊危険斜面を抽出できる可能性があると考えられる。
- 2)崩壊斜面と非崩壊斜面では、降雨に対する地下水位の応答が大きく異なることが確認でき、斜面の透水性の違いが崩壊の発生に大きな影響を与えていることが推察された。
- 3)崩壊斜面の表層土層内の水文挙動について、雨水の浸透とは別に、地質境界付等の斜面内部から水が流入してきていることが推察され、このことが地質境界付近

での表層崩壊の発生につながったと考えられる。

今回の調査では表層土層内の水文観測期間が短く、深層地下水水位の変動との関連付けが不十分な状態である。また、規模の大きい降雨での水文観測ができていない。雨の降り方（短期集中、連続降雨等）により水文挙動も異なることも想定されることから、今後も観測を継続して十分なデータを蓄積し、崩壊に係る水文プロセスを解明し、表層崩壊危険斜面の抽出につなげたい。

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.
- 2) 沖村孝, 市川龍平, 藤井郁也: 表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のための手法: 砂防学会誌, Vol.37, No.5, pp.4-13, 1985.
- 3) 平松晋也, 水山高久, 石川芳治: 雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究: 砂防学会誌, Vol.43, No.1, pp.5-15, 1990.
- 4) 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.
- 5) 田村泰志, 木下篤彦, 北川眞一, 大山誠, 内田太郎, 小杉賢一朗, 田村泰志, 荒木繁幸, 松村法行, 杉山直起: 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, pp.A84-A85, 2013.
- 6) 坂口武弘, 西岡恒志, 榎原伴樹, 木下篤彦, 田中健貴, 河戸克志: 地層境界付近の地下水位変状と空中電磁探査解析結果に着目した表層崩壊危険斜面抽出の研究, 砂防学会概要集, pp.575-576, 2018.
- 7) 榎原伴樹, 西岡常志, 崎山朋紀, 坂口武弘, 木下篤彦, 田中健貴, 河戸克志: 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.
- 8) 千東圭央, 西岡恒志, 筒井和男, 福田和寿, 木下篤彦, 今森直紀, 加藤智久, 横山修, 松村法行: 平成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, pp.A300-A301, 2016.
- 9) 一般財団法人災害科学研究所トンネル調査研究会編: 地盤の可視化と探査技術 比抵抗高密度探査法の実例, 鹿島出版会, pp.60-61, 2001.
- 10) 影浦亮太, 奥村稔, 河戸克志, 佐藤敏久, 小杉賢一朗, 正岡直也: 滋賀県葛川試験地における空中電磁探査による三次元比抵抗構造, 砂防学会概要集, pp.618-619, 2017.

(2019. 4. 2 受付)

地すべり対策工の効果の検証方法について

The verification method of effect of landslide countermeasure work

榎原伴樹*・崎山朋紀・岸畑明宏・坂口隆紀（和歌山県），
木下篤彦（国土交通省国土技術政策総合研究所）

Tomoki ENOHARA*, Tomoki SAKIYAMA, Akihiro KISHIHATA, Takaki SAKAGUCHI (Wakayama Prefectural Government) and Atsuhiko KINOSHITA(National Institute for Land and Infrastructure Management)

キーワード：地すべり，対策工，効果の検証

Keywords: Landslide, countermeasure work, Verification of effect

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，和歌山県においても地すべり災害が多数発生している。特に道路等既存の公共施設が地すべりにより被災する事例も発生している。

これらの災害に対して適切な対応をとるためには，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，再度の被災等を予防するためにも対策工施工後も観測を継続し，対策工の効果を検証することが重要である。本発表では和歌山市有功（いさお）地区で発生した市道法面の地すべり災害箇所の事例を基に対策工の検証方法について検討を行った。

2 有功地区地すべりの概要

有功地区は和歌山市の北部に位置し，当該箇所は標高70～90mの丘陵地が1970年代頃に造成された団地内を通る市道の，切土法面及びその上部斜面である。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。

平成29年10月の台風21号に伴う豪雨（連続雨量415mm：和歌山県六十谷観測所）により法面下部の擁壁の傾倒や開口クラックの発生が確認され，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（写真-1，2）。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，平成30年7

月に累積270mmの降雨を受け変状が拡大した。平面図（図-1）に斜面変状の状況と観測機器設置状況を示す。

3 対策工とその効果について

平成30年7月20日～25日の間に応急対策工事として水抜きボーリング工が施工され，現在は本復旧工事がなされているところである。恒久対策としてはアンカー工が計画されている。

水抜きボーリング工前後の地盤伸縮計及び地下水位観測結果を図-2に示す。地盤伸縮計の観測結果について，平成30年7月4日～7日の豪雨（連続雨量270mm：和歌山県六十谷観測所）の際に累積変位量680mmの変位を記録している。その後の水抜きボーリング工の施工前までの間は約0.5～1mm/日の変動が確認できるが，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。地下水位の変動については，平成30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。両孔共に水抜きボーリング施工後は，施工前に比べて最高水位が低くなっていることが確認できる。



写真-1 頂部の変状と伸縮計設置状況



写真-2 斜面下部の応急対策状況

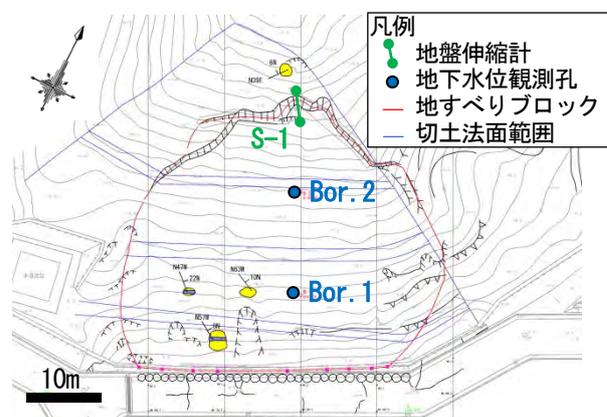


図-1 平面図

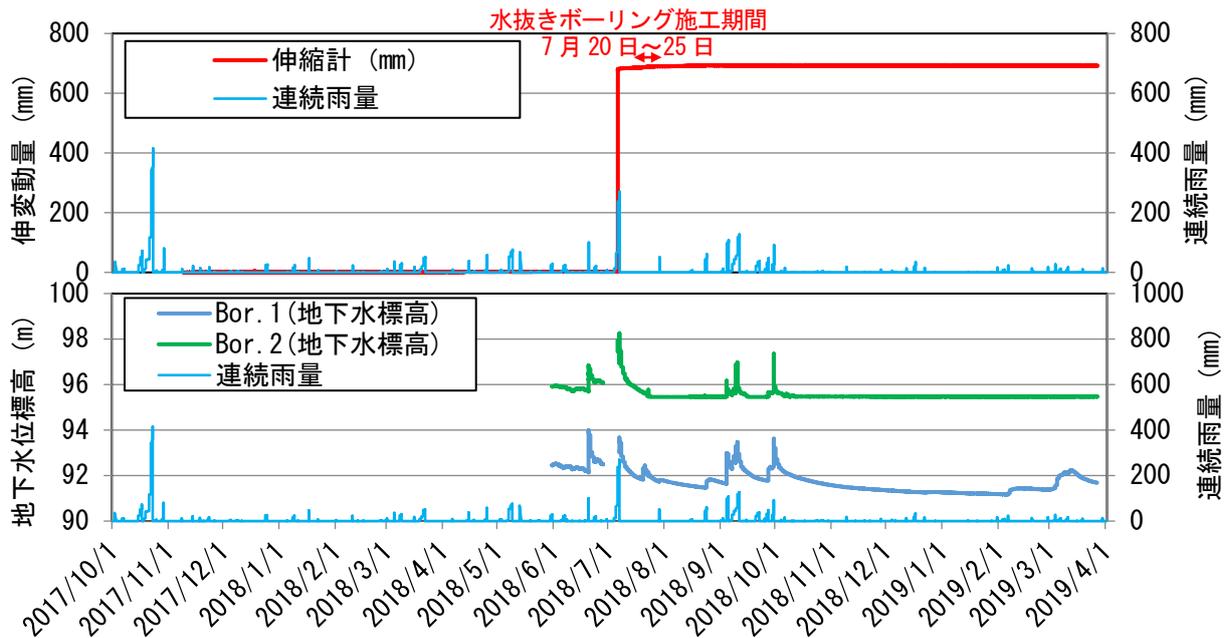


図-2 地盤伸縮計変動状況（上），地下水位変動状況（下）

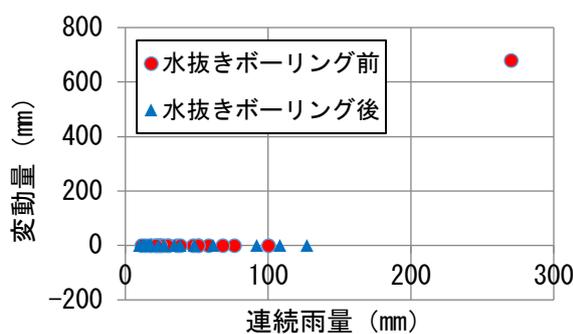


図-3 連続雨量に対する地盤伸縮計の応答

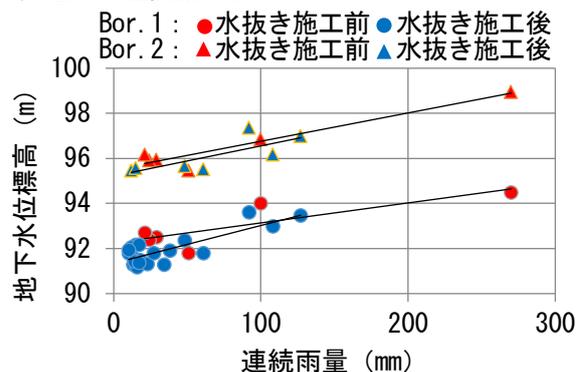


図-4 連続雨量に対する地下水位の応答

対策工の効果を把握するために、図-3、4に降雨の規模に対する地盤伸縮計や地下水位計の応答を整理したものを示す。ここで、降雨の規模としては連続雨量（24時間の無降雨期間の連続でリセット）を用い、連続雨量10mm以上のイベントについて集計を行った。地盤伸縮計については、平成30年の7月の豪雨を除いては大きな変動は見られず、水抜きボーリング施工前後ともに連続雨量100mm程度までの降雨に対しては大きな変動は見られない。また、地下水位の応答については、各孔ともに同程度の降雨に対する地下水位の上昇が概ね低下している状況が確認できた。しかし、水抜きボーリング施工後は、地すべり発生時や大きく変状が発生した平成30年7月の規模の降雨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。

4 おわりに

本発表では和歌山県和歌山市有功地区で発生した地すべり災害を事例として、地すべり対策工事の効果の検証方法について検討を行った。連続雨量に対する観測結果を対策工の施工前後で比較することにより、対策工の効果の検証を行った。

このような整理を行うことにより、追加の対策工の必要性やその内容の検討、また、実施済みの対策工の効果の説明等に活用できると考える。

また、今回は地盤伸縮計や地下水位の観測結果について整理を行ったが、孔内傾斜計等でも同様の整理を行いたい。

謝辞

本発表にあたり、和歌山市都市建設局道路管理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。

2.4 相互連携に基づく研究 テーマ7

立平地区地すべりにおける対策工の評価方法の提案

The proposal of the evaluation method of the countermeasure works in Tachidaira district

森川智*, 岸畑明宏, 坂口隆紀, 榎原伴樹, 崎山朋紀 (和歌山県)

木下篤彦 (国土交通省国土技術政策総合研究所)

Satoru MORIKAWA*, Akihiro KISHIHATA, Takaki SAKAGUCHI, Tomoki ENOHARA, Tomoki SAKIYAMA(Wakayama Prefectural Government) and Atsuhiko KINOSHITA(National Institute for Land and Infrastructure Management)

キーワード: 地すべり, 対策工, 評価

Key Words: landslide , countermeasure works , evaluation

1. はじめに

付加体などの堆積岩が約90%を占める和歌山県では、出水期に地すべり災害が複数発生している。これらの被害を軽減するには、抑制工や抑止工を効果的に配置する必要がある。本研究では、和歌山県西牟婁郡上富田町の立平地すべりを事例として挙げ、対策工を評価する手法を提案する。

2. 立平地すべりの概要

当地区は和歌山県南部の西牟婁郡上富田町岩田地内に位置している。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。平成28年7月に亀裂の存在が確認されたため、伸縮計等により変動の監視を行ってきたが、平成29年6月21日の降雨により最大2mm/hの変動が確認され、その後も降雨による変動が活発化し、危険性が高まったため地すべり対策を

実施することとなった。現地調査の結果、地すべりの規模は幅約60m、長さ約70m、深さ約12mであることが確認された。

3. 対策工の施工状況

対策工として平成29年6月の被災直後の応急対策として横ボーリング(15m×3本、60~70m×4本)が計画された(図-1)。また、その後の本体工事として集水井(1基)、鋼管杭(6~12m×23本)が計画され、それぞれ、平成29年7月、平成30年1月、平成30年12月に完成した。

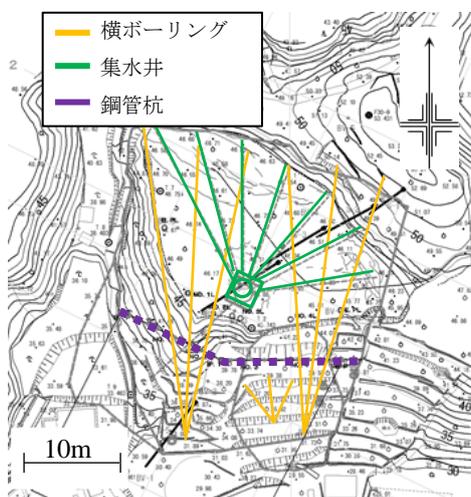


図-1 対策工配置図

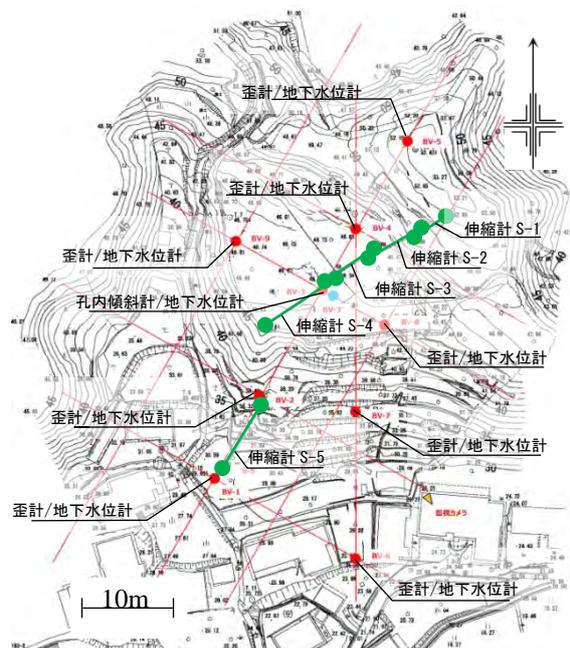


図-2 観測機器設置状況

4. 伸縮計の観測結果

斜面の変動を監視するための観測機器の設置状況を図-2に示す。また、降雨と地盤伸縮計の変動の関係について図-3に示す。なお、本研究では平成29年6月1日から平成31年2月28日までの伸縮計観測結果を用いた。

斜面最上部に設置されている伸縮計S-1の動きについて、平成29年6月21日の連続雨量142mmの降雨では15.5mmの変動だったが、6月30日～7月1日の連続雨量110mmでは362.4mmと活発な地すべり活動が観測された。一方、横ボーリング施工後の8月6日～7日の連続雨量176mmの降雨では54.1mmと変動量が低下したが、10月の台風21号の連続雨量327mmの際には489.8mmと大きな変動が観測され、更なる抑制工の必要性が確認された。

集水井施工後には降雨による伸縮計変動量が大きく低下し、5月6日～9日の連続雨量215mmの降雨では5.4mmの変動が、8月23日～24日の連続雨量273mmでは1.7mmの変動が確認された。鋼管杭完成後は大きな雨がなかったものの、平成31年2月6日の連続雨量32mmでは0mmの変動であった。

5. 対策工の評価方法

対策工の評価イメージを図-4に示す。各降水イベントにおける総雨量と地すべりのひずみ量をプロットし、対策工施工前後で近似直線の係数を比較することで、対策工による地すべり安定化の効果を評価する。なお、本研究ではひずみ量の代わりに伸縮計変動量を用いた。

前項の降雨を含む計43回の降雨に対して、連続雨量とその期間における伸縮計変動量の関係及び近似直線をプロットしたものを図-5に示す。

対策前と横ボーリング施工後では、近似直線の傾きに大きな差はなかったが、切片は5.223から-72.776と大きく減少した。これは、横ボーリングによって一定量の排水効果が得られたものの、連続雨量増加に対して変動量増加を抑える効果は限られていたことが推察される。

一方、集水井施工後と鋼管杭施工後では近似直線の傾きがそれぞれ0.0194、0.0333と施工前の1.1164に対して大きく減少した。これは、対策工によって地すべりが安定化し連続雨量増加に対する変動量増加が抑制されたことが推察される。

6. おわりに

本手法は、各降水イベントにおける伸縮計観測値と連続雨量の関係をプロットし、近似直線の数式を

確認するという簡易な方法であるが、追加の抑制工の必要性を検討する際の既設対策工の評価に有用であると考えられる。また、本手法の実施には、対策工施工前後の継続観測結果が必要であるため、地すべり対策を検討する際には、地すべりの兆候確認後早期に観測を開始し、対策工施工後も1年以上の継続観測を行われない。

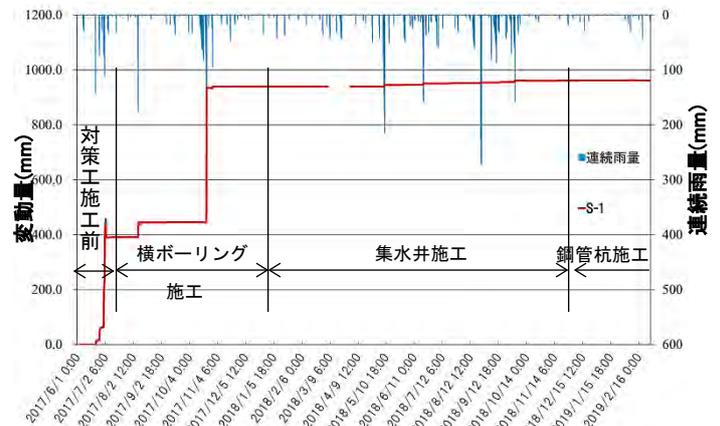


図-3 伸縮計変動量と連続雨量の関係

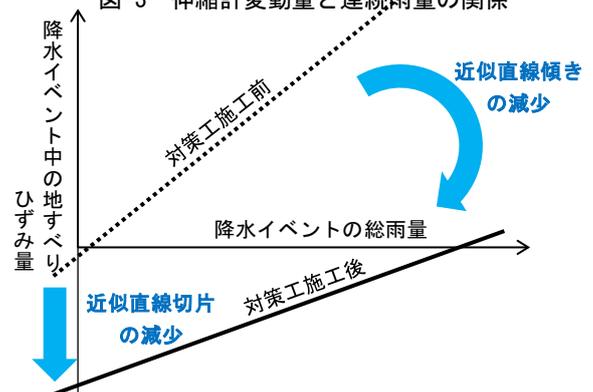


図-4 対策工の評価方法イメージ

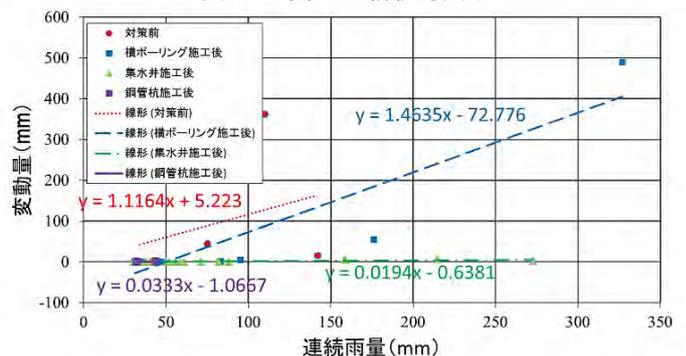


図-5 対策工施工前後の伸縮計変動特性

参考文献

- 1) 榎原ら (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. 246-247.

2.4 相互連携に基づく研究 テーマ8

SAR 干渉画像を用いた斜面変動検出の試み

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

○崎山朋紀・榎原伴樹・岸畑明宏・坂口隆紀
木下篤彦

1. はじめに

山地災害による被害を防止・軽減するには、事前に崩壊危険斜面を把握しておくことが重要である。広域に崩壊危険斜面を検出する技術として現在、航空レーザ測量による地表面変位量把握¹⁾や空中電磁探査による地下情報把握技術²⁾などが検討されている。これらは高精度に危険斜面を把握できる長所があるものの、コストが高いことと調査できる時期が限られるという短所がある。これらを補う技術として、干渉 SAR 解析が挙げられる。干渉 SAR は、人工衛星から地表の同一の場所に対して 2 回の SAR (合成開口レーダー) 観測を実施し、それらを干渉させて得た位相の差から地表変動を推定する技術である³⁾。この技術は安価に、定期的に広域な衛星画像が得られるという利点がある。これまで、干渉 SAR 解析で斜面変動を捉えた研究は多くあるが^{4)・5)}、航空レーザ測量など他の面的に斜面変動を捉えた結果と比較し、それぞれの精度を検証した事例は少ない。

本研究では、山地における斜面変動モニタリング手法の検討に役立てることを目的に、干渉 SAR 解析結果を用いた斜面変動検出を試行した。また、他のリモートセンシング技術や現地調査と比較し、その適用範囲を検討したので、その結果を報告する。

2. 調査方法

国土地理院の干渉 SAR 解析結果(地理院 SAR マップ, 2014~2018 年 ALOS-2 取得データの解析結果, 高分解モード, 北行軌道 26 ペア・南行軌道 28 ペア)を用い斜面変動を検出した。次に、干渉 SAR の検出結果と対比するため、既往の航空レーザ測量成果を用いた 3D-GIV 解析(2 時期の数値標高モデルから地形解析図を作成し、画像マッチング処理することで地表面移動ベクトルを把握する手法。)を行い、斜面変動を検出した。以上の結果から、変動規模、現地へのアクセスを考慮し、10 箇所を選定し現地調査を行った(図-1)。現地調査では、航空レーザ測量データを用いた微地形判読を併用し、斜面上に現れる変状を目視で確認した。また、GNSS 観測を行い、干渉 SAR 及び 3D-GIV 解析の結果と対比した。

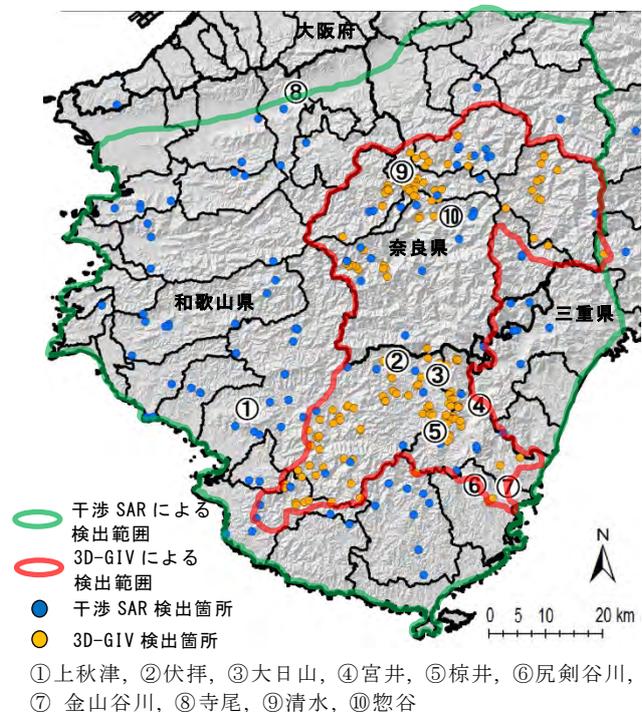


図-1 現地調査実施箇所位置図。①～⑩は現地調査を実施した箇所及び地区名を示す。

3. 調査結果と考察

現地調査の対象箇所のうち、同一斜面の変動を両手法で検出できた事例は宮井地区のみであった。当地区では、2015~2018 年の SAR 干渉画像から、5 つのペアで斜面変動によると考えられる干渉縞を確認した。干渉縞の色調から電波照射方向に 8cm 程度までの斜面変動が発生しているものと考えられる(図-2)。一方、3D-GIV 解析では 2013~2017 年の 4 年間で最大 1.5m 程度の地形変動を示すベクトル群を検出した(図-3)。ベクトル群は干渉 SAR で検出した斜面変動を示すと読み取れる範囲内にあることから、解析結果は干渉 SAR の検出結果を裏付けるものであると考えられる。また、この斜面では治山事業による GNSS 基準点測量の実績があり、2014 年 11 月と 2017 年 10 月の計測結果から、変位が最も大きい P-8 で北東方向に累積 0.241 m (約 8.2cm/年)であった。一方、干渉 SAR 解析では電波照射方向(東方向)に約 8cm/年であり、両者の変動の傾向は概ね一致していた。

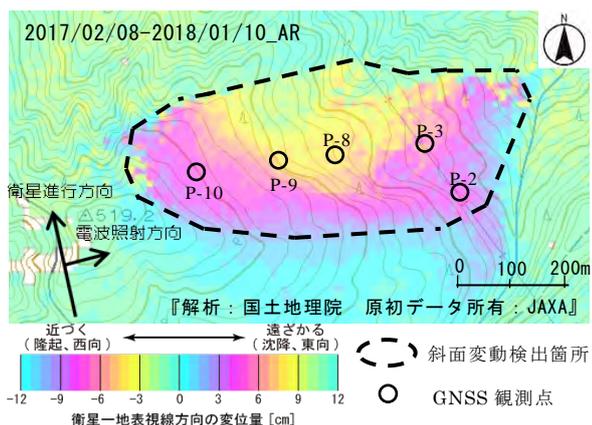


図-2 SAR 干渉画像(宮井地区). 国土地理院の SAR 干渉画像 2017/02/08-2018/01/10_AR を加工して著者が作成.

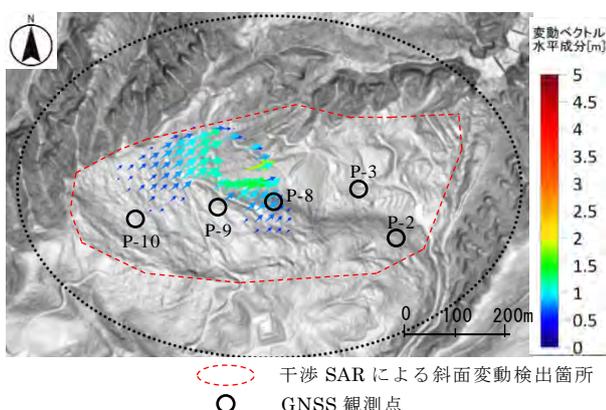


図-3 3D-GIV 解析結果(宮井地区). 2013 年から 2017 年の解析ペア.

宮井地区を含めた調査結果一覧を表-1 に示す.

干渉 SAR により検出した 5 地区中 4 地区において、現地で斜面変動の痕跡を確認できた。これらの痕跡は、SAR 干渉画像から読み取れる変動範囲と整合していた。また、これら 4 地区のうち斜面変動の規模は最小で概ね 200m×200m であった。一方、3D-GIV 解析では検出した 6 地区全てで斜面変動の痕跡を確認できた。

斜面変動を干渉 SAR でのみ検出できた事例が 2 地区あった。3D-GIV 解析で検出できなかった理由は、3D-GIV 解析で検出できる変位は水平変位量数 10cm 以上であり、両手法の精度の違いによるものと考えられる。一方、3D-GIV 解析でのみ検出できた事例が 5 地区あった。これらの地区では、変位量数 10cm 以上の斜面変動が検出されたにもかかわらず干渉 SAR で検出できなかった理由として、両手法の観測期間のずれ、雨雲などの影響によるノイズ、衛星と斜面の空間的位置関係による検出感度の低下、変動領域が検出可能なサイズを下回っていた、などが考えられる。

表-1 調査結果一覧

※の地区は GNSS 測量も合わせて実施している。

NO	地区名	斜面変動の検出		現地変状の有無	斜面変動推定規模 (m)	斜面傾斜方向
		SAR 干渉画像	3D-GIV 解析			
1	上秋津 ※	✓	N/A	✓	W650 L500	東
2	伏拝	✓	×	✓	W200 L200	北西
3	大日山	✓	×	×	W400 L400	東
4	宮井 ※	✓	✓	✓	W330 L800	北東
5	椋井	×	✓	✓	W400 L500	東
6	尻剣谷川	×	✓	✓	W100 L100	北東
7	金山谷川	×	✓	✓	W70 L100	南
8	寺尾	✓	N/A	✓	W270 L400	北
9	清水	×	✓	✓	W110 L350	東
10	惣谷	×	✓	✓	W600 L800	北

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- SAR 干渉画像から 8cm 程度までの斜面変動が検出できた。
- SAR 干渉画像により概ね 200m×200m 以上の広さの斜面変動が検出できた。
- 干渉 SAR だけに依存した斜面変動モニタリングは斜面変動を見逃す可能性がある。

以上より、干渉 SAR を用いて斜面変動を検出する場合には、その特徴を把握した上で場面に応じ、他のモニタリング手法とうまく組み合わせる必要があることを確認した。

参考文献

- 1) 花岡ら：航空レーザ計測データを用いた地表変位量把握の事例と課題 -最上川水系立谷沢川流域 濁沢川池ノ台地区における事例-, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.A-136-137, 2013.
- 2) 木下ら：平成 23 年大雨台風 12 号により紀伊半島で発生した深層崩壊周辺の広域比抵抗構造特性, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.B-356-357, 2013.
- 3) 国土地理院：国土地理院の干渉 SAR, http://www.gsi.go.jp/uchusoku_chi/gsi_sar.html, 2018.
- 4) 水野ら：DinSAR と航空レーザ測量と GNSS を用いた稲子岳の地すべり調査, 平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.511-512, 2018.
- 5) 山中ら：全国干渉 SAR 解析による斜面変動の検出事例, 第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.55-60, 2016.

Landslide Detection by InSAR Method Analysis and Its Range of Reach

Tomoki SAKIYAMA*¹, Tomoki ENOHARA¹, Akihiro KISHIHATA¹, Takaki SAKAGUCHI¹
and Atsuhiko KINOSHITA²

*¹Wakayama Sabo Research and Education Institute, Japan

² Sediment Disaster Prevention Technology Center, Kinki Regional Development Bureau Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

The landslides triggered by torrential rain by Typhoon Talas in 2011, caused enormous casualties and huge economic losses in the Kii Peninsula. It is important to detect landslide activity at an early stage to reduce such damage. In this study; we used InSAR images using ALOS-2 data to detect landslides in the Kii Peninsula. 3D-GIV analysis was also used for comparison. Based on what was detected, we conducted field surveys on 10 sites to support our findings. As a result; we have detected approximately at most up to 8 cm/year with the minimum of approximately 200 x 200 m in scale of slope movements. However, there is a possibility of overlooking slope movements with this method alone.

Key words: InSAR, ALOS-2, 3D-GIV, landslide detection, slope movement

1. INTRODUCTION

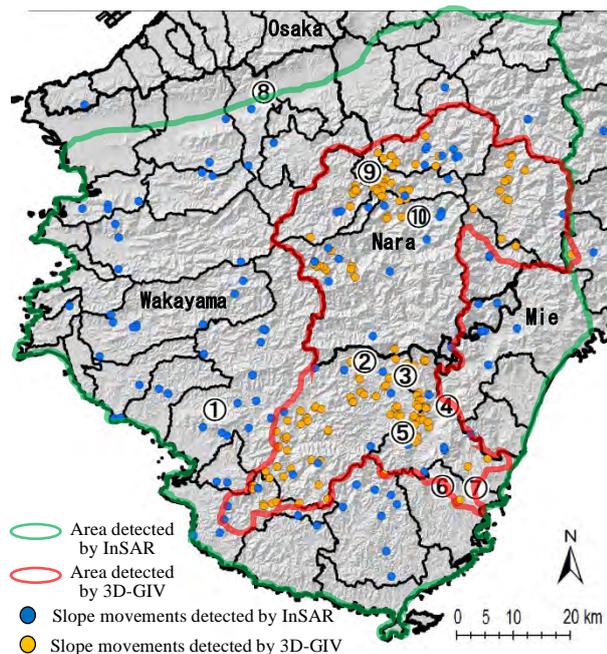
The landslides triggered by torrential rain by Typhoon Talas in 2011 caused many casualties and great economic losses in the Kii Peninsula. To mitigate such damage, it is important to forecast risk slopes for landslides in advance and take measures according to the situations. At present, for forecasting the risk slopes over large areas, remote sensing techniques such as airborne laser surveys that capture topography information [e.g. *Homma et al.* 2015] and airborne electromagnetic surveys that obtain underground information are being investigated [e.g. *Kinoshita et al.* 2019]. These methods have the advantage; that the risk slopes can be forecast with high accuracy. However, the cost is high and the time-frame for conducting the survey is limited. Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) is another option to supplement these methods. InSAR is a technology that identifies ground surface displacements by comparing two or more Synthetic Aperture Radar (SAR) images of the same area acquired at different times. This technology is advantageous as it is inexpensive and a wide range of satellite images can be obtained regularly, etc. Until now, many studies have captured landslide movements by InSAR [e.g. *Kamiyama et al.* 2015]. However, there are

insufficient studies that have verified and compared the accuracy of ground deformation analysis results using airborne laser survey data and InSAR analysis results. The aim of this study is to detect slope movements in the Kii Peninsula, using InSAR images on a trial basis. In addition, detection results by ground deformation analysis using airborne laser survey data are compared to confirm the accuracy and reach.

2. SURVEY METHODS

Firstly, slope movements were detected using InSAR images, which were analyzed by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) from ALOS-2 raw data of the Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA). These images were released by GSI to the relevant organizations free of charge on their website. InSAR data pairs used for detection were 26 data pairs with ascending orbits and 28 data pairs with descending orbits in high resolution mode, obtained from 2014 to 2018. The detections were made by visual observation using the following criteria:

- (1) Interferometric fringe patterns that show slope movement corresponding to slope units
- (2) Interferometric fringe distribution range consistent with the topography causing slope



①Kamiakitsu, ②Fushioigami, ③Dainichiyama, ④Miyai, ⑤Mukui, ⑥Shirikendani, ⑦Kanayamadani, ⑧Terao, ⑨Shimizu, ⑩Soutani

Fig. 1 Comparison of detection results of InSAR and 3D-GIV. ①~⑩ on the map show the field survey locations.

movement

(3) Interferometric fringes occurring in multiple data pairs

(4) No contradiction between the line-of-sight direction and the direction of slope movement

(5) No artificial terrain modification is seen in satellite images.

Secondly, 3D-Geomorphic Image Velocimetry (3D-GIV) analysis was performed to detect slope movements in order to compare with the detection results of InSAR. 3D-GIV is a method for determining the three-dimensional vector of the ground surface displacement, by means of matching and analyzing digital geomorphic images created from multi-temporal data of airborne laser surveys.

Lastly, based on the above results, 10 sites were selected in consideration of the scale of movements, access to the site, and field surveys conducted (Fig. 1). In the field survey, along with the detection results, microscopic terrain interpretation images, depicted based on the aerial laser survey data were used as a guide, and signs of movement appearing on the slope were visually confirmed. In addition, Global Navigation Satellite System (GNSS) surveys were performed and compared with the detection results of InSAR.

3. SURVEY RESULTS AND DISCUSSION

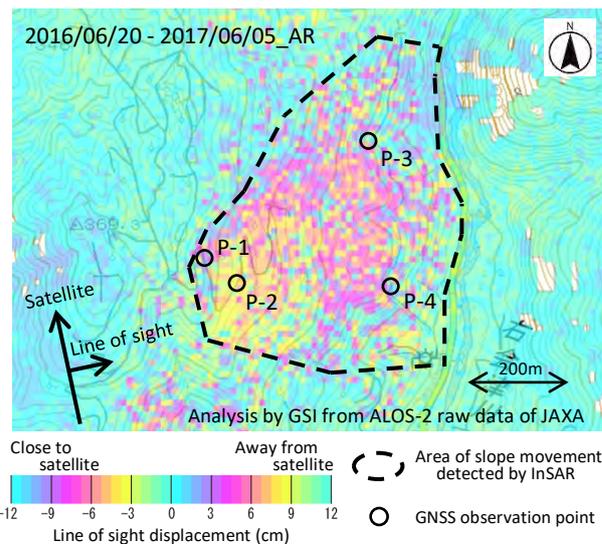


Fig. 2 InSAR image of Kamiakitsu

Table 1 GNSS measurement results of Kamiakitsu

1st Obs.2013/03/05-2nd Obs.2019/1/22·23

Observation points	Horizontal displacements(m)	Direction of displacements
P-1	0.502	Eastern
P-2	0.455	Eastern
P-3	0.304	Eastern
P-4	0.325	Eastern

From the InSAR images, 116 slope movements (of which 26 were multiple pairs) were identified. In addition, 141 slope movements were identified on the 3D-GIV images (Fig. 1). The survey results of the 10 sites where the field survey was conducted are as follows:

3.1 Kamiakitsu, Tanabe City

On this site, the InSAR images from 2014 to 2018 fringe patterns indicating slope movements were confirmed from 7 pairs of images. In the analysis of Jun. 20, 2016 and Jun. 5, 2017 pair, the slope movements up to about 8 cm in the line of sight were seen from the color patterns (Fig. 2). The target slope is a landslide slope with approximately 650 x 500 m in size of the area. In the field survey, signs indicating slope movement such as the deformation of the farm road pavement near the top and the shallow landslide at the bottom end were found, which were almost consistent with the movement range read from the InSAR images. In addition, as a result of calculating the displacement amount from Mar. 5, 2013 to Jan. 23, 2019 by GNSS survey, an eastward displacement of up to

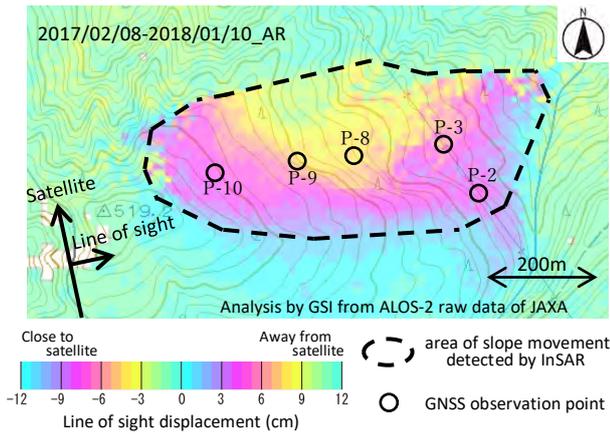


Fig. 3 InSAR image of Miyai

Table 2 GNSS measurement results of Miyai

1st Obs.2014/11/20,21-2nd Obs.2017/10/26

Observation points	Horizontal displacements(m)	Direction of displacements
P-2	0.109	Northeastern
P-3	0.127	Northeastern
P-8	0.241	Northeastern
P-9	0.212	Northeastern
P-10	0.157	Northeastern

0.502 m (approximately 8.5 cm / year) was confirmed (Table 1). The movement tendency was almost consistent with the result of the InSAR analysis.

3.2 Miyai, Shingu City

On the InSAR images from 2015 to 2018, fringe patterns indicating slope movements were confirmed from 5 pairs of images. The slope movements approximately up to 8 cm in the line of sight were seen from the color patterns (Fig. 3). In contrast, 3D-GIV detected a group of vectors showing ground surface displacements of approximately up to 1.5 m in the four years from 2013 to 2017 (Fig. 4). The vector group considerably supports the detection results of INSAR because the direction and range of movement are almost consistent with those that could be read from the INSAR images. In addition, only this site could be detected by both methods among the target sites of the field survey. On this slope, there is a track record of a GNSS survey by the forest restoration project. From the GNSS measurement results in Nov. 2014 and Oct. 2017, it was P-8 with the largest displacement being 0.241 m (8.2 cm / year) in the northeast direction (Tab. 2).

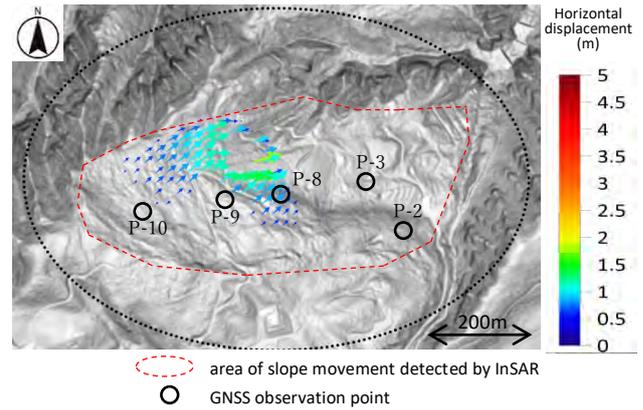


Fig. 4 3D-GIV image of Miyai

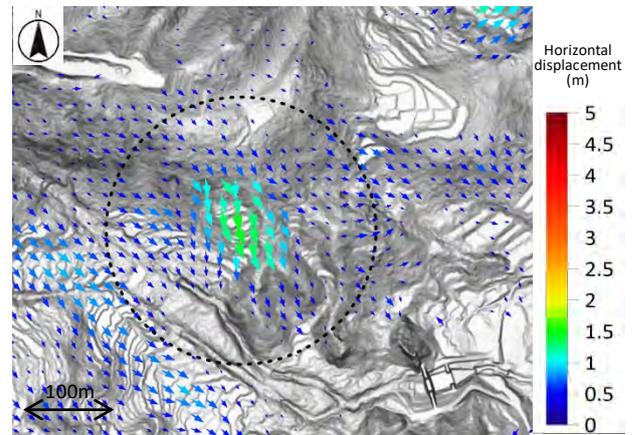


Fig. 5 3D-GIV image of Kanayama



Fig. 6 The effects on the slope of Kanayama

In contrast, it was approximately 8 cm / year in the line of sight (eastward) in the INSAR images, and the movement trends of both were almost the same.

3.3 Kanayamatani, Nachikatsuura Town

On this site, 3D-GIV detected a group of south-facing vectors showing ground displacements approximately up to 1.5 m between 2012 and 2017 (Fig. 5). The target slope is a landslide block with approximately 70 x 100 m in size of the area. In the

Table 3 Survey results

Site NO	Site Names	Detected by InSAR	Detected by 3D-GIV	Confirmation of effects in field surveys	Estimated scale of slope movements (m)	Slope inclination direction
①	Kamiakitsu ※GNSS	✓	N/A	✓	W650 L500	E
②	Fushiogami	✓	×	✓	W200 L200	NW
③	Dainichiyama	✓	×	×	W400 L400	E
④	Miyai ※GNSS	✓	✓	✓	W330 L800	NE
⑤	Mukai	×	✓	✓	W400 L500	E
⑥	Shirikentani kawa	×	✓	✓	W100 L100	NE
⑦	Kanayamatani kawa	×	✓	✓	W70 L100	S
⑧	Terao	✓	N/A	✓	W270 L400	N
⑨	Shimizu	×	✓	✓	W110 L350	E
⑩	Soutani	×	✓	✓	W600 L800	N

field survey many deformations such as; clear head scarps, open cracks, tilted, bent and fallen trees were observed (Fig. 6). Their ranges and directions were consistent with the results of 3D-GIV. Despite having confirmed a relatively large displacement with 3D-GIV, it could not be detected with InSAR.

3.4 Additional Sites

Table 3 shows the results of the field surveys, including the above three sites. Of the 5 sites detected by InSAR, traces of slope movement were confirmed on 4 sites besides Dainichiyama. Although these traces were unknown when they occurred, they were consistent with the range of movement that could be seen from the images. Fushiogami was the smallest slope movement among the four sites, and the area scale was approximately 200 x 200 m. In the Dainichiyama, the movement that can be seen from the image was approximately 3 cm. It was possible that the movement was too small despite the displacement, so it could not be confirmed visually, or detected correctly. In contrast, traces of significant slope displacements were confirmed on all six sites detected by 3D-GIV.

There were 2 sites detectable by InSAR but not by 3D-GIV. The reason being the difference in accuracy between InSAR and 3D-GIV. 3D-GIV can detect displacements approximately 10 cm or more in the horizontal direction.

There were 5 sites detectable by 3D-GIV but not by InSAR. There were 5 sites detectable by 3D-GIV but not by InSAR. The following are probable causes InSAR could not detect these sites even though the slope movement, approximately over 10 cm, was detected by 3D-GIV.

- There was a slight difference between the

observation periods of both methods. Therefore, there was probably no movement within the InSAR observation period.

- Slope movements were overlooked due to incoherent areas caused by factors such as atmospheric water vapor turbulence and others, appearing on the majority of the InSAR images.

- ALOS-2 InSAR can only detect a one-dimensional displacement in the line-of-sight direction of the satellite between the SAR antenna and the point on the ground surface. Therefore, in the case of landslides moving in the northward or southward direction, that is in the direction perpendicular to the line of sight of the satellite, sensitivity to the distance of the slope movement decreases and can't be detected.

- The slope movement area was smaller than the detectable size.

4. CONCLUSIONS

The results obtained in this study are as follows:

- Slope movements approximately at most up to 8 cm/year with the minimum of approximately 200 x 200 m in scale were detected.

- There is a possibility of overlooking slope movements with the INSAR method alone.

From the above, we confirmed that when detecting a slope movement using InSAR: it is necessary to understand the characteristics and combine it with other monitoring methods according to the circumstances.

REFERENCES

- Homma, S., Sato, T., Kobayashi, Y., Mukoyama, S., Yanagisawa, K. and Momose, S. (2015): Analysis of ground deformation used digital geomorphic image matching : A case study of analysis at Nomatazawa in Nagano prefecture, Proceedings of 2015 research meeting of Japanese Society of Engineering Geology, Japan Society of Engineering Geology, pp.159-160 (in Japanese)
- Kinoshita, A., Tanaka, Y. and Kawato, K. (2019): The extraction technology of the dangerous slopes for deep-seated landslides and shallow landslides using the airborne electromagnetic survey, Proceedings of Conductivity Anomaly Research Group, 2019 (web version), Conductivity Anomaly Research Group, pp.1-13 (in Japanese with English abstract).
- Kamiyama, J., Ekawa, M., Mizuno, M. and Kunitomo, M. (2015): Detection of Slope Deformation using SAR Interferometry, Civil engineering journal, 57-5(2015), pp.14-17 (in Japanese)
- Sakiyama, T., Enohara, T., Sakaguchi, T., Tanaka, Y., Kinoshita, A., Ekawa, M., Sato, T., Kubo, T., Suzuki, Y. and Yamashita, K. (2019): Landslide Detection Method by InSAR Analysis and Its Applicable Range, Advances in River Engineering, JSCE, Vol.25, pp.693-695 (in Japanese with English abstract)

Estimation of hydrogeological structure using airborne electromagnetic survey in the Iya, Tanabe city

Akihiro Kishihata*¹, Takaki Sakaguchi *¹, Tomoki Sakiyama *¹, Tomoki Enohara *¹ and Atsuhiko Kinoshita*²

*1 Wakayama Sabo Research and Education Institute, Japan

*2 Sediment Disaster Prevention Technology Center, Kinki Regional Development Bureau Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

In the Iya, the deep-seated catastrophic landslides occurred as a result of the heavy rainfall from Typhoon Talas in 2011. In this study, we conducted hydrogeological survey to study the factor of the landslides with airborne electromagnetic survey. As a result, we have found that the main factors of the landslides are loosened region of rock caused by rock creep and ground water inflow from stream behind the landslides.

Key words: deep-seated catastrophic landslides, airborne electromagnetic survey

1. INTRODUCTION

The typhoon Talas in 2011 caused the record breaking heavy rain at the wide reach of the western Japan, and many landslides occurred at all part in Kii-peninsula. There occurred the deep-seated catastrophic landslides at Kumano area in Tanabe city, Wakayama prefecture.

In this research, we aimed at the groundwater structure in the creep behavior of rock bed, and considered the cause of deep-seated catastrophic landslides by the past researches.

At Iya, electric exploration, airborne electromagnetic survey, boring survey, stream flow rate investigation, ground water level survey, and ion analysis of ground water have been conducted already. The past researches suggested that the groundwater pours the slope from the Hyakken dani river behind the landslide site, and pore water pressure rised in the rock crack of the sliding surface and the loosened region of rock caused by rock creep. We report the process of consideration at ground water structure and loosened region of rock bed.

2. THE GEOLOGICAL STRUCTURE

There is the Muro formation of Simamto Belt at the investigation area, and distribute the mudstone and conglomerate (Kogawa formation) formed from

Oligocene to Miocene and the sandstone(Uchikoshi formation). (Fig-1) The conglomerate independent bed and a sandstone independent bed distribute over the investigation slope area, and the mudstone and sandstone formation distribute behind slope. The bedding face develops at about 40 degree of flow board direction at the collapsed the landslide slope. (Fig-2)

3. CONSIDERATION OF SURVEY

2.1 the Hyakkendani river water level and Ground water level of slope

The water level observation result of the groundwater of loosened region of rock bed and the lower slope zone is indicated in Fig-3.

While the groundwater of the loosened region mainly occurred by the rainfall, and that water level peak occurred a few hours after the rainfall peak,

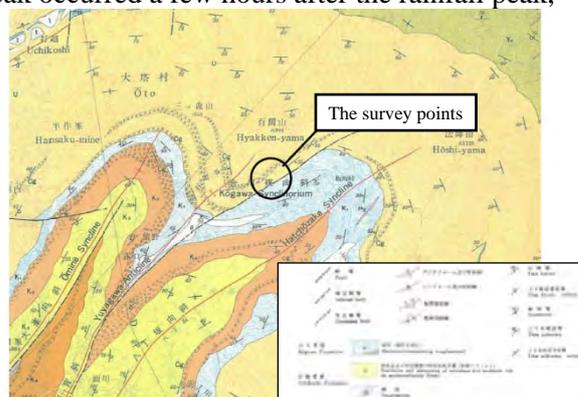


Fig.1 The geological map near the survey points

the deep groundwater level peak occurred 2 days after the rainfall peak, and this indicates that the response characteristics differ between the loosened region and deep groundwater.

2.2 Water quality of loosened region of the rock bed and the Hyakkendani river

The water quality result of analysis of the groundwater in the loosened region and the Hyakkendani river is indicated in Fig-4. The water quality analysis revealed that the groundwater quality in the loosened region resembled quality of the river behind the landslide (the Hyakkendani river) closely, and indicated that the groundwater in the loosened zone derived from the Hyakkendani river.

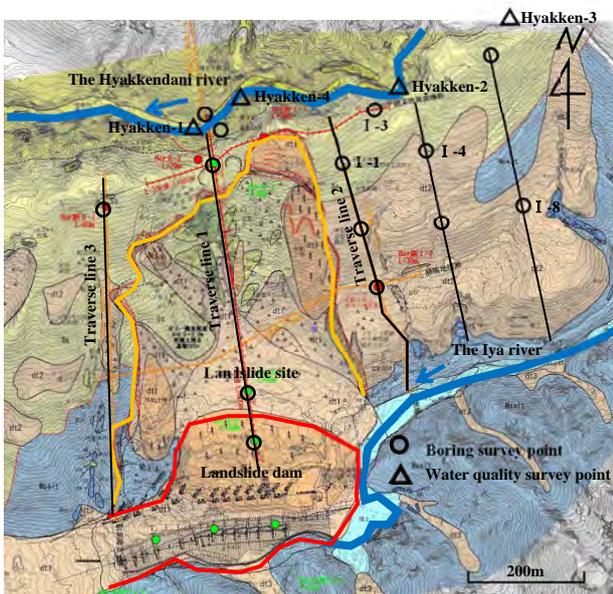


Fig.2 The overview of Iya landslide

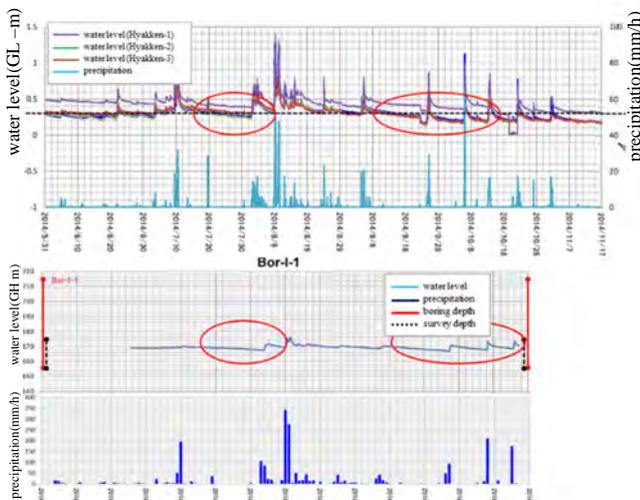


Fig.3 The correlation between water level of the Hyakkendani river and the boring site

2.3 Electric exploration and airborne electromagnetic survey

The past survey result indicated that the rock bed has moved along the landslide, and the creep deformation caused the loosened region where the low resistivity region penetrates the high resistivity zone (Fig-5, Fig-6). We considered that the groundwater poured this loosened region and occurred the deep-seated catastrophic landslides.

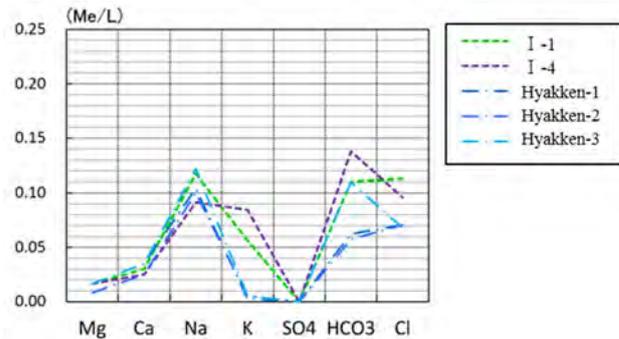


Fig.4 The result of the water quality survey

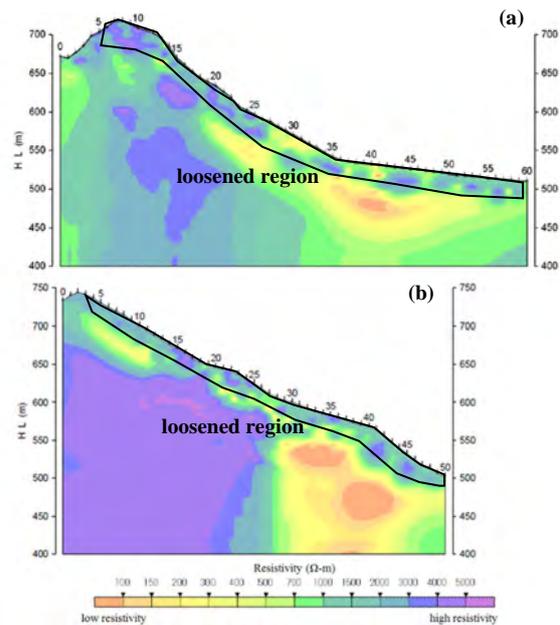


Fig.5 The result of the electric exploration
(a) Traverse line 1, (b) Traverse line 2

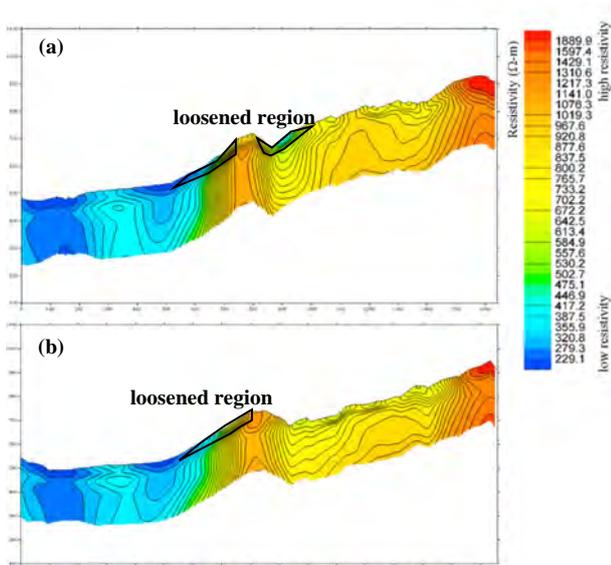


Fig.6 The result of airborne electromagnetic survey
 (a) Traverse line 1, (b) Traverse line 2

4. CONCLUSIONS

The survey result indicates that the groundwater of the loosened region was caused by rainfall and the Hyakkendani river. Then, we suggest that the deep ground water was caused by the water which is poured directly from the Hyakkendani river through the loosened region of rock bed.

Therefore, this suggestion indicates the deep-seated catastrophic landslides at Iya, occurred by the elevation of water level in pressured groundwater which was caused by the heavy and long rainfall long at the time of The typhoon Talas in 2011.

We think that detailed electric exploration through the fault is needed for verifying suggested landslides mechanism.

REFERENCES

- Okajima, S., Kosugi, K., Sakurai, W., Sakai, R., Kitagaki, H. and Hirano, G. (2015): About association of deep-seated landslide and the groundwater structure in Tanave-shi Iya, area, the Proceeding of Lecture Presentation of Japan Society of Engineering Geology, pp.71-72 (in Japanese)
- Kinoshita, A., Tanaka, Y. and Kawato, K. (2019): The extraction technology of the dangerous slopes for deep-seated landslides and shallow landslides using the airborne electromagnetic survey, Proceedings of Conductivity Anomaly Research Group, 2019 (web version), Conductivity Anomaly Research Group, pp.1-13 (in Japanese with English abstract).

A study on the characteristics of the slope with a risk of shallow landslides where the geological boundary exists

Tomoki Enohara ^{*1}, Tomoki Sakiyama ¹, Akihiro Kishihata¹, Takaki Sakaguchi ¹ and Atsuhiko Kinoshita²

¹ Wakayama Sabo Research and Education Institute, Japan

² Sediment Disaster Prevention Technology Center, Kinki Regional Development Bureau Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

In the Nachi River basin, the shallow landslides and the debris flows occurred as a result of the heavy rainfall from Typhoon Talas in 2011.

Different geology is distributed in the Nachi River basin. Many of the shallow landslides occurred near the geological boundary, and it is reported that the peculiar geological structure and hydraulic structure of the basin may have caused the shallow landslides.

In this study, we conducted geophysical and hydrological surveys to study the characteristics of the risk slope of shallow landslides with geological boundaries. The surveys were conducted on the slopes where shallow landslides occurred and where they did not occur, and the results were compared.

As a result, we have found that both the drainage characteristics and the distribution of resistivity are different on the two slopes.

Key words: shallow landslide, geological boundaries, airborne electromagnetic survey

1. INTRODUCTION

The heavy rain caused by the typhoon Talas in 2011 caused severe damage due to shallow landslides and debris flow in the Nachi River basin [Matsumura *et al.*, 2012]. A schematic diagram of the Nachi River basin is shown in **Fig.1**. In the Nachi River basin, the Kumano acid rock (granite porphyry) penetrates the sedimentary rock Kumano Group (sandstone mudstone alternate layer). Most of the shallow landslides that occurred in 2011 occurred near the geological boundary. It has been reported that the special geological structure and hydraulic structure of the basin may have caused the shallow landslides [Tamura *et al.*, 2013]. In such a basin, there is a risk that it will not be properly evaluated by the existing evaluation methods [PWRI, 2009].

In order to propose a method for detecting risk slopes of shallow landslides in a river basin with such geological boundaries, we conducted geophysical surveys, groundwater level observations, and hydrological observations inside surface soil layers to study the characteristics of risk slopes of shallow landslides.

2. SURVEY LOCATIONS AND SURVEY METHODS

The surveys were conducted in the Hirano River basin of the Nachi River basin. The Hirano River is one of the eight tributaries where debris flow occurred. It is also the lowest downstream on the left bank. Firstly, we conducted an airborne electromagnetic survey to understand the rough geological structure of the underground. Secondly, we aimed to detect if the difference in the hydrological characteristics of the slope is related to shallow landslides, and we observed the groundwater level of the slope at the observation holes penetrating the geological boundary. The surveys were conducted on the slopes where shallow landslides occurred and where they did not occur, and the results were compared. Lastly, in order to understand the hydrological behavior of the surface soil layer during rainfall, we conducted a soil moisture sensor observation on the slope where shallow landslides occurred. **Fig.2** shows a schematic diagram of the Hirano River basin, and **Fig.3** shows the observation points.

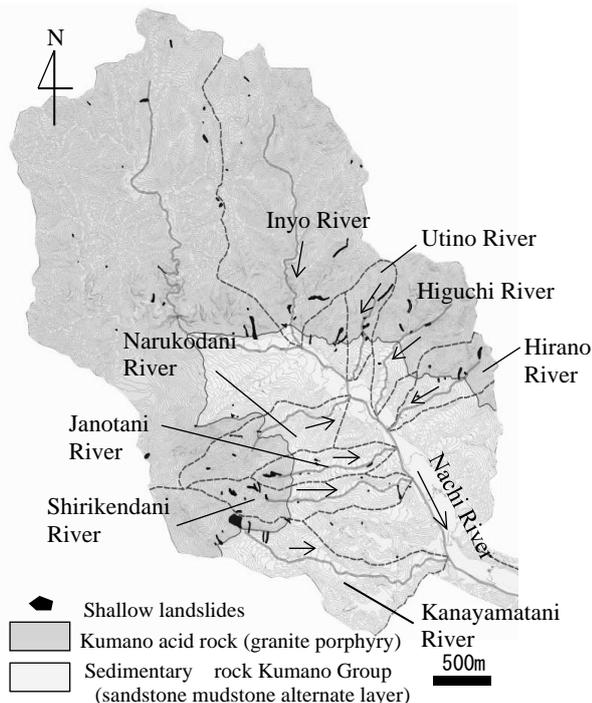


Fig.1 Nachi River basin

We observed the groundwater level at four depths in each observation hole. Of the four depths, 2 depths are in the upper granite porphyry layer, 1 depth is near the geological boundary and 1 depth is in the lower mudstone layer. Soil moisture sensors were installed at three locations: granite porphyry distribution area, near the geological boundary, and mudstone distribution area. At each observation point, it was installed at two depths, the middle part (40cm) and the lower part (80cm) of the surface soil layer.

3. SURVEY RESULTS

Fig.4 shows the groundwater level observation results on each slope. **Fig.5** shows the observation results of soil moisture sensors on the slope where shallow landslides occurred. **Fig.4** confirms that the groundwater level of the mudstone layer shows a gradual response to rainfall on each slope. The groundwater level can be confirmed at the mudstone layer and the geological boundary during rainy and non-rainy days, but not at the granite porphyry layer. Regarding the groundwater level response of the granite porphyry layer during rainfall, the slope where shallow landslides occurred showed independent groundwater levels at each depth. In contrast, the slope where shallow landslides did not occur showed fluctuations integrated with the groundwater level near the geological boundary. Therefore, it was confirmed that the response to rainfall was significantly different on each slope,

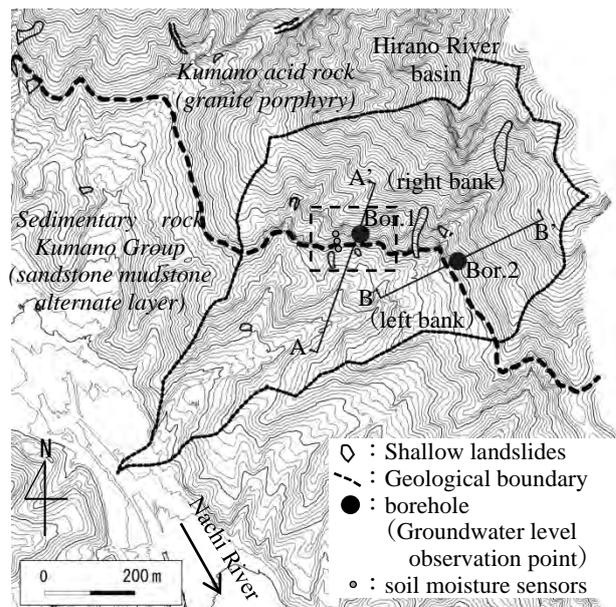


Fig.2 Hirano River basin. The area enclosed by the square is shown in an enlarged view in **Fig.3**.

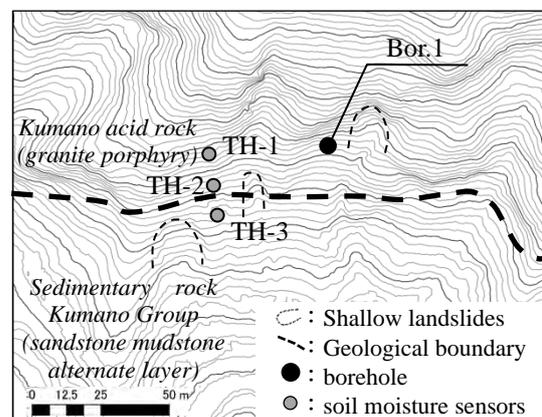


Fig.3 Enlarged view of the observation point. (enlarged view of the area enclosed by the square in **Fig.2**)

and it can be inferred that the difference in slope drainage may have had a significant effect on the occurrence of shallow landslides.

As for the observation result of the soil moisture sensor, in the case of a small amount of rainfall, the volume moisture content was higher at the depth closer to the ground surface at any observation point. This is thought to be due to infiltration of rainwater from the surface. In contrast, in the case of two large amounts of rainfall, the value of 80cm depth at the observation point TH-2 near the geological boundary was temporarily higher than the value of 40cm depth. From these results, it is considered that in the case of rainfall above a certain amount, in addition to the infiltration of rainwater, groundwater from geological boundaries, for instance, flows into the surface soil layer. In the case of heavy rainfall such as in 2011, this may have been one of the major causes of shallow landslides.

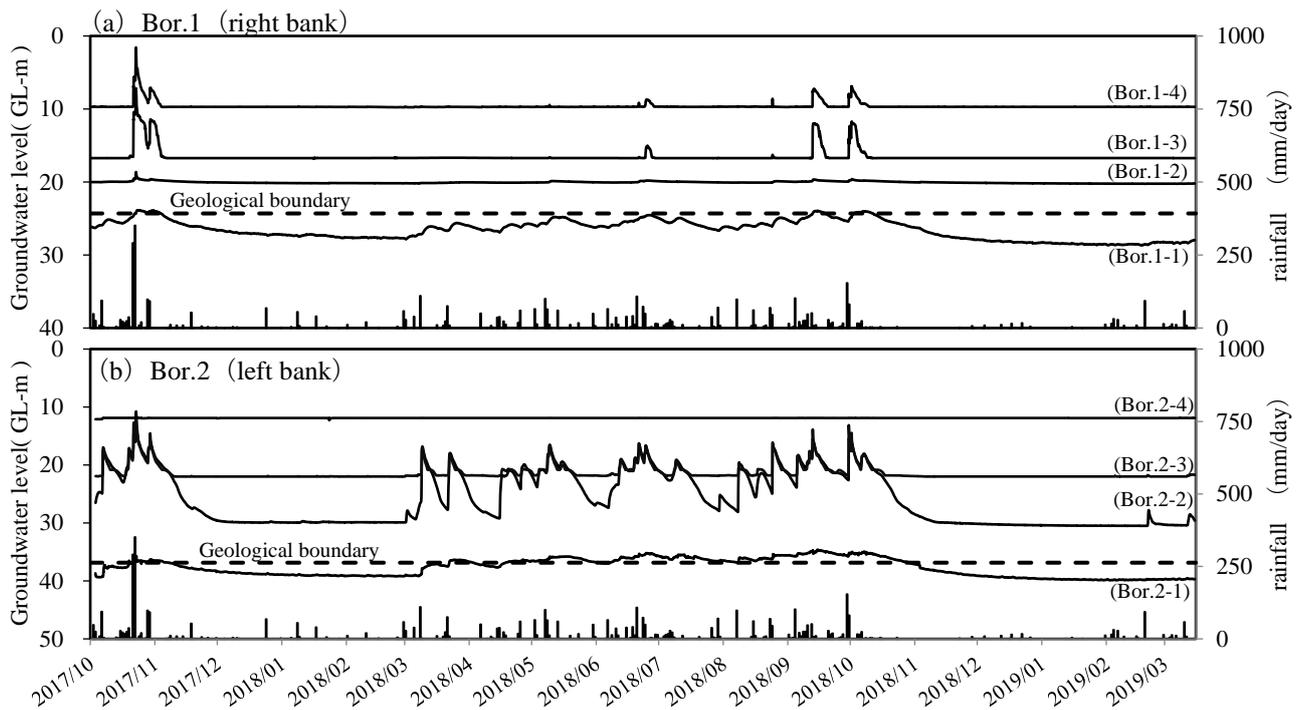


Fig.4 Groundwater level observation results on each slope. (A) Bor.1 (right bank)slope where the shallow landslides occurred. (B) Bor.2 (left bank)slope where the shallow landslides did not occurred.

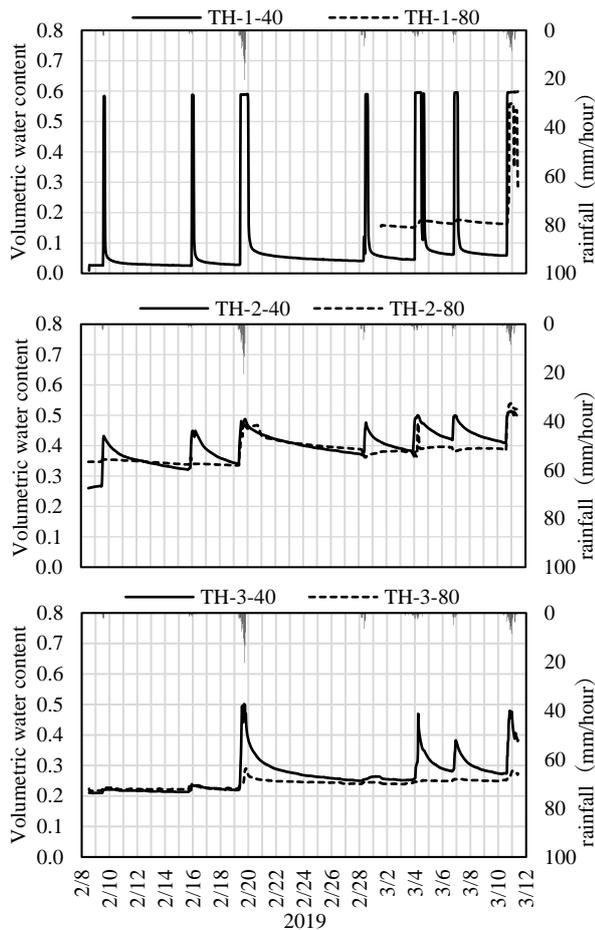


Fig.5 Observation result of soil moisture meter in surface soil layer. TH1 is installed in the granite porphyry layer, TH2 is installed in the geological boundary, and TH3 is installed in the mudstone layer.

Additionally, during the hydrological observation period of the surface soil layer during this time, it was not possible to capture the large fluctuation of the groundwater level on the slope where shallow landslides occurred.

In addition, **Fig.6** shows the distribution of resistivity by the airborne electromagnetic survey, and **Fig.7** shows the result of resistivity analysis [Kageura *et al.*, 2017]. According to the results of resistivity analysis, it was confirmed that the distribution states of the specific resistance sudden change was different between the right bank and the left bank. On the slope where shallow landslides occurred, the distribution of the sudden change in resistivity is discontinued, which may indicate that the aquifer is discontinuous.

4. CONCLUSIONS

In this study, we conducted geophysical exploration, hydrological observation and studied the characteristics of the slope at risk of shallow landslide, in the Nachi River basin where geological boundaries are distributed. As a result, we have found the following:

- The response of the groundwater level to rainfall differs significantly between the slopes where shallow landslides occurred and where they did not occur. Thus it can be concluded that the difference in drainage between these slopes affected the occurrence of the shallow landslides.

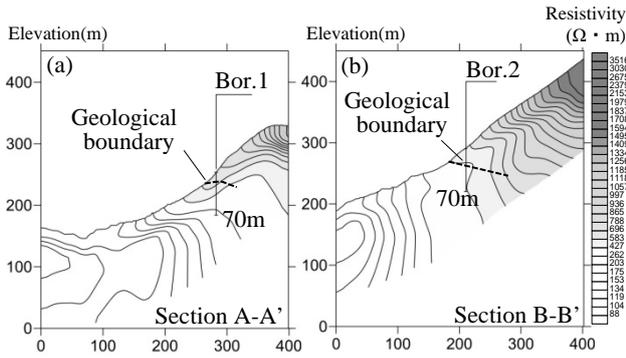


Fig.6 Resistivity distribution on each slope.
(a) right bank, (b) left bank

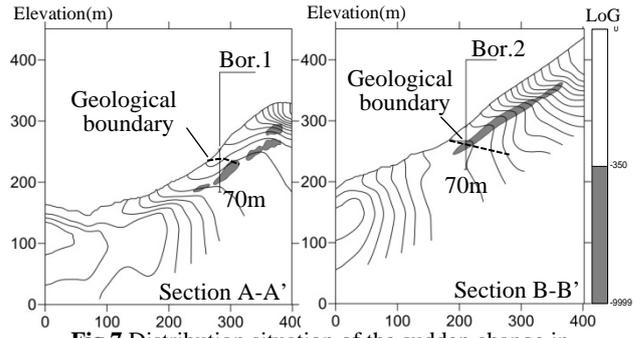


Fig.7 Distribution situation of the sudden change in resistivity of each slope. (a) right bank, (b) left bank

- From the hydrological behavior in the surface soil layer, it is considered that in the case of rainfall above a certain amount, in addition to the infiltration of rainwater, groundwater from geological boundaries, for instance, flows into the surface soil layer. This may have caused the shallow landslides.

- The distribution states of the sudden change in resistivity was different between the slopes where shallow landslides occurred and where they did not occur. The discontinuity of the distribution of sudden changes in resistivity may indicate that the aquifer is discontinuous. Therefore, there is a possibility that the risk slope of shallow landslides can be detected effectively by an airborne electromagnetic survey.

In this survey, the hydrological observation period of the surface soil layer was short and hydrological observation during the heavy rainfall has not been done yet. Consequently, the relationship between groundwater level fluctuation and soil moisture has not been fully elucidated. We will continue to observe, accumulate data and clarify hydrological processes related to shallow landslides, to lead to the detection of risk slopes of shallow landslides.

REFERENCES

- Matsumura, K., Fujita, K., Yamada, T., Gonda, Y., Numamoto, S., Tsutsumi, D., Nakatani, K., Imaizumi, F., Shimada, T., Kaibori, M., Suzuki, K., Tokunaga, H., Kashiwabara, Y., Nagano, E., Yokoyama, O., Suzuki, T., Takezawa, N., Oono, R., Nagayama, T., Ikejima, T. and Tsuchiya, S. (2012): Sediment disasters due to typhoon No. 12 at 2011, occurred in Kii peninsula, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 64, No.5, pp.43-53 (in Japanese).
- Tamura, T., Kinoshita, A., Kitagawa, S., Ooyama, M., Uchida, T., Kosugi, K., Araki, S., Matsumura, S., and Sugiyama, N. (2013): Slope failure occurrence mechanism in Kanayamadani and Narukodani collapsed by Typhoon Talas in 2011, Summary collection of the 62nd 2013 Japan Society of Erosion Control Engineering Research Presentation, pp. A84-A85(in Japanese).
- Public Works Research Institute, Erosion and Sediment Control Research Group, Volcano and Debris Flow Research Team (2009): Manual for evaluating the risk of debris flow due to shallow landslides (Draft), Technical Note of PWRI(in Japanese).
- Kageura, R., Okumura, M., Kawato, K., Sato, T., Kosugi, K., Masaoka, N. (2017): Three-dimensional resistivity structure by airborne electromagnetic survey at the Kuzugawa test site in Shiga Prefecture, Slope failure occurrence mechanism in Kanayamadani and Narukodani collapsed by Typhoon No.12 in 2011, Summary collection of the 66th 2017 Japan Society of Erosion Control Engineering Research Presentation, pp. 618-619(in Japanese).

Training Program of the Kii Peninsula Flood Experience and Its Effects on Students

Takaki SAKAGUCHI^{*1}, Takehiro SAKAGUCHI^{*1}, Eiko KUBO^{*2} and Yasushi SHINGYO^{*3}

¹The Wakayama Sabo Research and Education Institute (IWSRE)

² A Disaster Prevention Expert

³ Tanabe City Ryujin Junior High School, Wakayama Prefecture

Landslides, debris flow and flooding triggered by Typhoon Talas in 2011, caused tremendous human casualties and economic losses in the Kii Peninsula. Due to this catastrophe, the Wakayama Prefectural Government established the Wakayama Sabo Research and Education Institute (IWSRE) in April 2016, in the town of Nachikatsuura. This is one of the most affected areas and it is the basis for the Institution for researching sediment-related disasters and for handing down the lessons we learned from the disasters for posterity. The IWSRE carries out various training programs for raising awareness of sediment-related disaster prevention for adults and children. On the other hand, in order to enlighten the future generations about the tragic disaster experiences, one of the bereaved survivors is channeling her pain into advocacy by giving lectures using "kamishibai"; a traditional Japanese style of storytelling using pictures based on her own disaster experience. In an effort to create effective disaster prevention training programs, we planned a training session for junior high school students, experimenting with the kamishibai story. After the session, we analyzed the students' opinions based on their written essays about the training session. In this report, we included the training content and the results of the students' opinions analysis. We then discussed the content and the effects of the training based on the results.

Key words: the Kii Peninsula Flood, Wakayama Sabo Research and Education Institute(IWSRE), training for disaster prevention

1. Standard Training Conducted by the IWSRE (Photo.1)



Photo.1Wakayama Sabo Research and Education Institute (IWSRE)



Fig. 1 Training scene (Classroom lecture)

To carry out disaster prevention education of sediment-related disasters, it is necessary to know

the phenomena, features and dangerous places. It is also necessary to cultivate judgment knowledge that people can apply and the ability for them to make decisions to evacuate based on their own proper judgement at the time of danger. For above reasons, the IWSRE conducts about 90 group training

sessions on sediment-related disasters annually (Fig. 1). In the training, we explain the situation of the Nachi River basin during the Kii Peninsula Flood with videos of CG images at the time of disaster and



Fig. 2 Example of the demonstration



Fig. 3 The Kamishibai

other area disaster photographs. Additionally, we explain the mechanism of sediment-related disasters using images, and the importance of early evacuation based on hazard maps and weather information. In addition, we carry out training sessions to children at elementary and junior high schools. In these training sessions, a video for children that shows the situation during the Kii Peninsula Flood is used as a training material. We also try to increase demonstrations and first hand-experience during the training session so that children will remain interested (Fig. 2). By doing so, we mainly develop the “thinking ability” of the trainees.

2. The Kamishibai Technique/Training by a Victim of the Kii Peninsula Flood in2011

On the other hand, in order to enlighten the future generations about the tragic disaster experiences, one of the bereaved survivors is channeling her pain

into advocacy by giving lectures using "kamishibai"; a traditional Japanese style of storytelling using pictures based on her own disaster experience. The kamishibai (Fig. 3) was started

Flood waters began to rise in my house.

Subsequently I was separated from my daughter as flood waters swept her away.

I was then sucked into a water torrent.

In the flood

Thankfully after my ordeal I was reunited with my daughter.

A family of three consisting of a couple and their daughter was hit by a flood. At first all three of them were hanging on the roof gutter and fighting a torrent, but they were swept away. Eventually, the mother was caught in a fence and the daughter climbed on top of the roof and managed to survive. Unfortunately her husband was found dead.

Fig. 4 Outline of the Kamishibai

around 2014, and has been played to more than 50 groups such as students of elementary and junior

high schools, residents' associations, voluntary disaster prevention organizations to date. The story is based on her own disaster experience on the dawn of September 4, 2011 (Fig. 4). In the story, she emphasizes what she felt during the disaster and especially the importance of early evacuation and acting to protect irreplaceable life. Through the activities of the kamishibai show, she mainly encourages the participants' "power to act".

3. Standard and Kamishibai Training Program

We designed the training program for Junior high school students using a combination of our traditional training methods together with the kamishibai technique. The time for the program was set at 1 hour considering the concentration levels of junior high school students. The contents of the training program were designed focusing on the kamishibai technique. Therefore, the following three points were taken into account when planning the training so that the contents of the kamishibai story were easy to understand.

① To make it easier to understand the kamishibai story, the mechanism of sediment-related disasters were explained prior to the kamishibai.

②The explanation about the phenomenon and features of sediment-related disasters were limited to debris flows that occurred in the Nachi River basin during the Kii Peninsula flood in 2011



Fig. 5 Image for the explanation

③The place and phenomenon that appear in the kamishibai were explained in detail using images (Fig. 5).

As a result, the training program becomes a more effective education tool for sediment-related disaster prevention, which cultivates the ability to think and

act together.

4. Effects of the Program Based on Students' Opinions

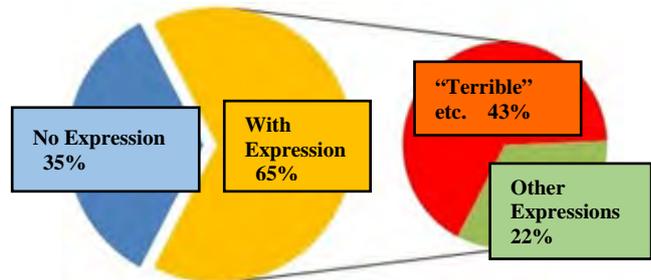


Fig. 6 Opinions about the program

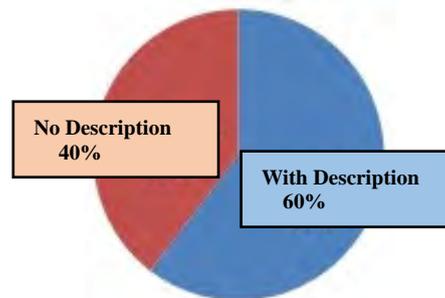


Fig. 7 Description of the Kamishibai scene

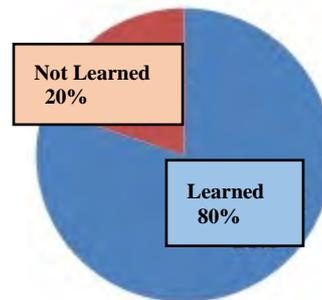


Fig. 8 Lessons learned

Opinions

A trial training session program was held at Kamiakizu Junior High School in Tanabe City, Wakayama prefecture. On the day, 31 first-grade students, 30 second-grade students, and 40 third-grade students participated. After the study session, participants' feedback on the program was analysed. The analysis was focused on the presence or absence of specific words, contents, and specific descriptions that appear in the opinions written by the students. The results are shown in Fig. 6-10. In Fig. 6, at least 65% of students are moved by the program. In addition, it can be seen that 43% feel

“fear” towards disasters using words such as “scary” and “terrible” from pictures of the kamishibai story and sediment related disasters. **Fig. 7** also shows

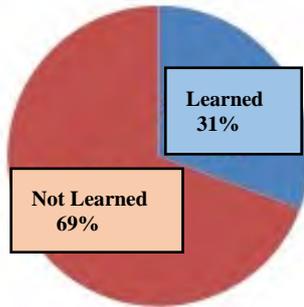


Fig. 9 Lessons for early evacuation

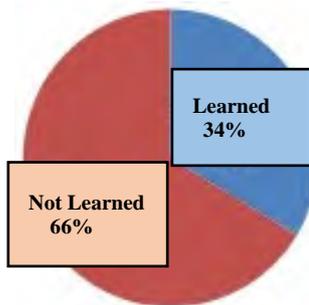


Fig.10 Lessons learned about disaster preparedness

that as many as 60% of the students listened to the kamishibai with high concentration levels and wrote specific descriptions of the kamishibai story in their opinions. There are many expressions of greatness and excitement for the survivor in the kamishibai. When all the above opinions are put together, it is clear that the kamishibai show performed by the victim inspired awe and reverence of nature and the survivor in the students. Finally, from handing down the lessons learned from disasters, which is the main purpose of this program, it can be seen that 80% of students have learned some lessons from the program (**Fig. 8**). There were opinions such as “Be careful when evacuating” and “Speak to neighbors and evacuate together”. As a result, the content of the current program seems to have achieved good results in passing on the lessons learnt. What we particularly wanted to convey in the program were lessons about “early evacuation” and “preparation for disaster”. However, as can be seen from **Fig. 9** and **Fig.10**, it was discovered that these lessons were in the 30% range and were not fully understood.

5. Challenges for Future Development

As is clear from the above discussions, it was found

that the decision for preferentially allocating more time to the kamishibai was correct when considering the program structure. As a secondary effect, it was found that as the disaster survivors talked about their miserable experiences, feelings of awe and reverence were prevalent among students, which is considered as the highest morality priority of school education. However, it must be said that the efforts of prompting “early evacuation” and “preparation for disasters”, which are currently called out, are not effective due to a low percentage of understanding. In the future, we would like to focus on the development of content that directly encourages students' evacuation and preparatory behavior while collaborating with the victim's feelings more than ever.

パルス法による山地河川における流砂量推定手法の高度化

元京都大学大学院工学研究科
三重大学生物資源学部
京都大学防災研究所
京都大学防災研究所

東 豊
堤 大三
宮田 秀介
藤田 正治

1. はじめに

山地河川への土砂供給量は、斜面での土砂生産や（例えば藤田ら，2005），直近に起こった土砂移動イベントの履歴などに依存するため（例えば Gintz et al., 1996 ; Turowski et al., 2009, 2011），時空間的に変動することが知られている。そのため，土砂供給量が限られ，河床に十分な土砂が存在しないような条件下では，流砂量式によって推定される流砂量は，過大評価となることが多い（例えば，Yager et al., 2012）。このため，土砂災害の防止・軽減や，流砂系における総合的な土砂管理を実践することを目的として，山地河川における土砂移動量を把握するためには，流砂量を実測することが必要となる。

流砂量を実測する手法は，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，プレートジオフォンシステムが開発され，スイスをはじめとして，アメリカ，イスラエル，イタリア，オーストリアなどのフィールドに数多く設置されている。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をインパルスに変換し，インパルス数と掃流砂量との線形関係を用いて掃流砂量を計測する（Rickenmann et al., 2014; Wyss et al., 2016; Rickenmann, 2017b）。一方，日本においてもプレートジオフォンの開発とほぼ同時期に，パイプハイドロフォンシステムの開発が進められ（栗原，宮本，1992；水山ら，1996），現在では日本の多くの河川で広く利用されている（星野ら，2004；中谷ら，2007など）。パイプハイドロフォンは，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をパルスに変換し，パルスの振幅が設定された閾値を超えた時に，流砂量に対応するパルス数としてカウントされる。構造がプレートとパイプ，検知する信号が振動と音響という違いはあるものの，スイスのプレートジオフォンと日本のパイプハイドロフォンはよく似たシステムといえる。ただ，パイプハイドロフォンはプレートジオフォンと違い，鋼鉄製のフレームを必要とせずパイプをコンクリートの河床に直接固定できることで，設置の手間やコストを比較的安く抑えることができる。また，検知できる掃流砂の下限値にも違いがあり，スイスプレートジオフォンでは10 mmであるのに対し（Wyss et al.,

2016b ; Rickenmann, 2017a），パイプハイドロフォンでは一般的な条件下で4 mmまで検知可能である（小田ら，2005）。一方で，プレートジオフォンは河床面と同一面に設置されるため，大径の礫の衝突に対しても耐性があり，強固なシステムであるのに対し，パイプハイドロフォンの場合は，河床面から凸状にパイプが露出しているため，巨礫が衝突すると簡単に变形，損傷することがあり，大きな流砂・洪水イベントの場合は流失してしまう脆弱さを持っている。

プレートジオフォンとパイプハイドロフォンによる掃流砂観測システムは，上記のようにそれぞれの長所・短所はある一方，最大の共通点としては，両者ともに間接法であることから，振動信号や音響信号といった間接的な信号は得られても，現実の掃流砂量を把握するためには，間接法と並行して，ポータブルサンプラー，トラップ型サンプラー，自動バスケット型サンプラー等の直接法によって掃流砂量を計測し，両者の相関を調査するキャリブレーションを実施する必要があるという点が挙げられる。キャリブレーションによってあらかじめ間接的な信号と掃流砂量との相関を求めておけば，直接計測を行わない期間でも間接法による連続的な掃流砂量の観測が可能になる（Rickenmann, 2014 ; 堤ら，2014 ; Tsutsumi et al., 2017）。

間接法による観測であっても，キャリブレーションを行うためには，限られた期間とはいえ直接法による掃流砂計測が必要になる点は，労力の観点からは短所といえる。この点を克服するため，いくつかの研究によって現地における直接法を併用したキャリブレーションを必要としない手法の開発が行われている。鈴木ら（2010）は，砂礫の衝突によって発生する音響波形から求められる音圧値と，掃流砂量と検出率の積の間に比例関係があることを実験的に確認し，数値シミュレーションによって，土砂粒子衝突頻度の増加に伴う検出率の低下を定量化することで，音圧値から掃流砂量を求める方法を提案している。この手法を用いて推定された掃流砂量と，山地河川において直接法によって計測された掃流砂量との比較が行われ，両者がよく一致することが示されている（Uchida et al., 2018）。また，Goto et al. (2014) は，パイプに衝突する土砂粒子のもつ運動量と，その際に発生する音響信号の最大振幅との間に比例関係があることを実験的に確認し，この関係によって得られる土砂粒子体積

と衝突粒子数の積として、掃流砂量を推定する手法を開発している。

このように、直接法を併用したキャリブレーション関係を用いずに掃流砂量を計測できる手法は実用化が進んでおり、特に鈴木らの音圧法は国土交通省が実施している掃流砂観測に広く用いられ、その有用性が認められている。しかし、音圧法で考慮されている検出率は、あくまでもパイプに衝突した砂礫数に対し音響信号によって検知されるものの割合であり、パイプに衝突せずに流下する砂礫については全くカウントされない点、パイプハイドロフォンの検知限界以下の小粒径の砂礫についてはカウントされていない点など、実際の流砂量の総量を計測できていないわけではないという課題も残されている。また、モンテカルロシミュレーションによって検出率を算出する手法は高度な専門性を必要とし、一般の利用者が観測条件の違いに合わせて容易に変更・修正することができないという煩雑さもある。

先に述べたパイプハイドロフォンを用いたパルス法による観測では、パルスを2, 4, 16, 64, 256, 1024倍の6段階の異なる率で増幅し(最近では10段階も採用されている)、それぞれの増幅率でのパルス数をカウントしている。それらの設定増幅率で得られたパルス数のうち、直接法で計測された掃流砂量と最も相関が良い増幅率を採用し、その相関から掃流砂量を推定することが一般的に行われている。しかし、掃流砂量とパルス数の相関は線形でない場合が多く、また最適な増幅率もイベントごとに変化するため、安定的に掃流砂量を推定できないという課題がある。本研究では、各増幅率に対応して検出される砂礫径に代表的な下限値があることを用いて、隣り合う二つの増幅率でのパルス数の差分と両増幅率に対応する検出下限粒径間の代表粒径から得られる砂礫質量の積の積算値を掃流砂量として求める方法を提案する。この際、サルテーションによってパイプを飛び越える砂礫の割合、パイプハイドロフォンの検知限界粒径以下の砂礫割合も考慮し、流砂量の総量を推定する。また、現段階では直接法であるスロットサンプラーによる掃流砂計測値を用いてパラメータの設定を行う必要があるが、将来的には直接法による掃流砂量の計測を必要としない手法となることを目指している。本手法は、一般に馴染み深く、多くの知見が蓄積されてきているパルス法を用いる点で既存の音圧法と異なる。さらに、パイプに衝突せずに流下する砂礫を考慮する点や、部分的ではあるが粒度分布の推定も可能である点は、これまでの手法にはなかった利点である。また、既存の推定法に加えて、複数の手法で異なる側面から流砂量を推定することは、流砂観測全体としての推定精度の向上や、異なる条件下で適した推定手法の選択肢が広がることなど、流砂観測研究分野の発展につながるものと期待できる。

2. パルス法による掃流砂総量の推定手法

2.1 掃流砂量推定手法の概要

パイプハイドロフォンに衝突する砂礫の持つ運動量と音響信号の振幅値が比例関係にあることは既往の研究によって明らかにされている(栗原・宮本, 1992; 鈴木ら, 2010; Goto et al., 2014)。また、砂礫の運動量は衝突時の速度よりも粒径(質量)によって大きく左右されることから(鈴木ら, 2010)、パルス数をカウントする際に設定する音響信号の増幅率は、検知できる砂礫の最小粒径と対応していると考えられる。つまり、低い増幅率設定でカウントされるパルスは、大粒径の砂礫衝突に限定されたものであり、高い増幅率でカウントされるパルスは、小粒径から大粒径までの広範囲の砂礫の衝突によるものといえる。

ここで、 n 段階の増幅率 A_k ($k=1, 2, \dots, n$; A_1 最小, A_n 最大) で、単位時間にカウントされるパルス数を P_k とする(後述の式において必要となるため仮想的に $P_0 = 0$ と定義する)。また、増幅率 A_k での検知対象となる粒径範囲を $d \geq d_k$ とする。隣り合う増幅率 A_k, A_{k-1} 間でそれぞれカウントされるパルス数の差分 ΔP_k を、

$$\Delta P_k = P_k - P_{k-1} \quad (1)$$

と表す ($k=1, 2, \dots, n$)。先に述べた通り、運動量に寄与する衝突速度の影響は小さいため、これを無視して、増幅率と粒径範囲の対応を考えると、 ΔP_k は $d_k \leq d < d_{k-1}$ の範囲にある砂礫粒子の衝突数と考えることができる。粒径範囲 $d_k \leq d < d_{k-1}$ の代表粒径 $d_{k,av}$ の砂礫質量を m_k とおくと、ハイドロフォンに衝突したこの粒径界の砂礫の総質量 M_k は

$$M_k = \Delta P_k \times m_k \quad (2)$$

と表せる。

一般的に、流砂量が多い場合、パイプハイドロフォンで計測される音響信号が重なり合うことで、個々の砂礫の衝突に対応するパルスが分離できなくなり、カウントされるパルス数が少なくなる現象が生じる。これをパルスの飽和と呼んでおり、パルス法における問題点のひとつである。パルスの飽和による検出率の低下は、砂礫の実衝突回数に依存するため増幅率によって異なる。そこで、各増幅率での検出率を $R_{d,k}$ ($0 \leq R_{d,k} \leq 1$) と定義する。式(2)において、パルスの飽和による検出率を考慮すると、

$$M_k = \frac{\Delta P_k}{R_{d,k}} \times m_k \quad (3)$$

と表される。

以上より、パイプに衝突した砂礫の総質量 M は、 k を積算して、

$$M = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta P_k}{R_{d,k}} \times m_k \quad (4)$$

と表せる。

式(4)で表される流砂量 M は、ハイドロフォンに衝突

して検知される砂礫の流砂量であるが、実際にはハイドロフォンで検知することができない砂礫が2種類存在する。ひとつは、サルテーションなどによってハイドロフォンに衝突することなくハイドロフォン上を通過する砂礫である。ハイドロフォンに衝突しなかった砂礫をパルス数としてカウントできないため、全体の流砂量を算出する場合これらを考慮に入れる必要がある。もうひとつは、ハイドロフォンが検出できる限界以下の小粒径の砂礫である。ハイドロフォンの規格により、検出できる粒径に違いがあるが、現地に設置され運用されるハイドロフォンで最高増幅率を採用した場合の下限値は一般に約4 mm程度である。増幅率を下げた場合は、下限値はさらに大きくなる。それ以下の粒径の流砂がハイドロフォンに衝突しても、パルス数として検出されない。以下に、これらのハイドロフォンでは検出できない砂礫を考慮する方法を述べる。

2.2 非衝突粒子の加算

サルテーションしハイドロフォンに衝突しない砂礫について考慮するために、砂礫の衝突率を導入する。粒径界 k (増幅率 A_k , 代表粒径 $d_{k,av}$) のハイドロフォンへの衝突率を γ_k とおくと、流砂量 M_k は、

$$M_k = \frac{\Delta P_k \times m_k}{R_{d,k} \times \gamma_k} \quad (5)$$

と表すことができる。ここで、 $0 \leq \gamma_k \leq 1$ である。よって、サルテーションによってパイプに衝突せずに流下する砂礫を含めた掃流砂の総量は、

$$M = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta P_k \times m_k}{R_{d,k} \times \gamma_k} \quad (6)$$

と表される。

本手法において γ_k は、Sklar and Dietrich (2004) により導かれたサルテーション運動の経験式より算出する。Sklar and Dietrich は、サルテーション運動の既往実験データを基に以下の経験式を導いている。

$$H_s = 1.44 \left[\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right]^{0.5} d \quad (7)$$

ここで、 H_s は砂礫の跳躍高さ[m]、 τ_* は無次元せん断力、 τ_{*c} は無次元限界せん断力、 d は砂礫粒子の粒径[m]である。簡単のため、サルテーションの様子を直線近似し、パイプ検知部の高さを D_h とすると、砂礫の衝突率 γ_k は、

$$\gamma_k = \frac{D_h}{H_s}; D_h < H_s \quad (8-1)$$

$$\gamma_k = 1; D_h \geq H_s \quad (8-2)$$

と表すことができる。この様に、パイプの検知部の高さよりもサルテーションによる跳躍高さが低い砂礫は全てハイドロフォンに衝突し、逆に高い場合、砂礫のサルテーションが直線軌道と仮定しているため、パイプに衝突する確率は跳躍高さとパイプの検知部高さの比となる。

2.3 検知限界以下の砂礫粒子の加算

ハイドロフォンで検知できない小粒径の砂礫を考慮に入れるため、流砂の粒度分布に対する検出限界以上の粒径界の割合 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) を導入する。パイプハイドロフォンの検知限界以下の砂礫も含めた流砂量は、

$$M = \frac{1}{\alpha} \sum_{k=1}^n \frac{\Delta P_k \times m_k}{R_{d,k} \times \gamma_k} \quad (9)$$

と表すことができる。 α は、流砂の粒度分布がわかれば、採用する増幅率 A_k で検知可能な砂礫粒径の下限値 d_k から指定できる。

2.4 補正係数の導入

式 (9) には、パルスの飽和による検知率、サルテーションによる衝突率、パイプハイドロフォンの検知限界以下の小粒径砂礫の割合という、経験上考えうる要因をすべて含んでいる。しかし、実際の観測ではそれ以外の未知の要因や、計測誤差が存在すると考えられ、式 (9) によって実際の流砂量を完全に推定できるわけではない。そこで、流砂量の推定精度を向上させるため、新たに補正係数 β_k , C を導入し、式 (9) を修正すると、

$$M = \frac{C}{\alpha} \sum_{k=1}^n \beta_k \frac{\Delta P_k \times m_k}{R_{d,k} \times \gamma_k} \quad (10)$$

となる。 β_k は各粒径界における流砂量 M_k に対する補正係数、 C は流砂量の総和 M に対する補正係数である。

以上の通り、流砂量 M を求めるための式 (10) に含まれる、パイプハイドロフォンの計測値 ΔP_k , 各増幅率の代表粒径に対応する砂礫質量 m_k , サルテーションにより低下する衝突率 γ_k , 粒度分布から求まる検知限界以上の流砂割合 α は既知であり、補正係数 β_k , C は直接法から実測した流砂量からチューニングすることが可能である。しかし、パルスの飽和によって低下する検出率 $R_{d,k}$ は、砂礫の衝突数に依存し、増幅率によって異なり、パイプ長や水理条件によっても変わるため、定量化することは簡単ではない。一般に、パルス飽和は高増幅率で発生しやすく、増幅率を下げると発生しなくなる場合がほとんどである。そこで簡単のため、パルス飽和が発生する高増幅率を採用せず、発生しない増幅率のレベル $k = n, us$ 以下のカウントのみを採用することとすると、すべて $R_{d,k} = 1$ となるので、式(10)は、

$$M = \frac{C}{\alpha} \sum_{k=1}^{n,us} \beta_k \frac{\Delta P_k \times m_k}{\gamma_k} \quad (11)$$

と表される。この場合 α の指定のために用いられる検知可能な砂礫粒径の下限値は増幅率のレベル $k = n, us$ の下限値 $d_{n,us}$ となる。最後に、パイプ長さ L で除して単位幅での流砂量推定値とする。

$$M_0 = \frac{C}{\alpha L} \sum_{k=1}^{n,us} \beta_k \frac{\Delta P_k \times m_k}{\gamma_k} \quad (12)$$

2.5 補正係数の決定方法

式(12)で求められる流砂量の計算値が実際の流砂量を正確に推定するため、補正係数 β_k 、 C をチューニングする必要がある。そこで、直接法で実測された単位幅流砂量 q_s と計算値 M_0 の差分を目的関数 F として設定し、 F を最小化する β_k 、 C を決定する。 N 個の実測データを採用するとすると、目的関数 F は、

$$F = \frac{1}{N} \sum |q_s - M_0| \quad (13)$$

式(13)を用いて補正係数 β_k 、 C をチューニングする際、 β_k 、 C にはそれぞれ制約条件を設定する。 β_k による補正を行わないとすると $\beta_k = 1$ である。極端に1から外れる値をとると、式(9)までの議論が無意味となることから、 β_k の制約条件は、 $0.5 \leq \beta_k \leq 1.5$ と設定する。一方、補正係数 C は算出される流砂量が正の値でなければならないため、 $C \geq 0$ とする。

2.6 粒度分布の推定

各粒径界 k の単位幅流砂量 $M_{0,k}$ は、式(12)から

$$M_{0,k} = \frac{C \beta_k}{\alpha \gamma_k L} \Delta P_k \times m_k \quad (14)$$

によって算出できることから、それらの比から $d \geq d_{n,us}$ の範囲における粒度分布を求めることができる。

3. 現地流砂観測への適用

3.1 現地流砂観測の概要

3.1.1 観測流域

現地観測は、神通川水系蒲田川の支流である足洗谷で実施した(図-1)。足洗谷は、活火山焼岳(標高:2,455 m)の北北西に位置する山地河川で、観測地点より上流側に約6.5 km²の流域面積を有している。流域内の年間平均降水量はおよそ2,500 mmで、平均的な流量は0.3 m³/sである。地質は、安山岩と火砕流堆積物による溶結凝灰岩が占めている。流域内には多数の裸地斜面が散在しており、活発な土砂生産活動に伴ってそれらの斜面から大量の土砂が流域に供給されている。そのため、融雪出水時や梅雨、台風による降雨出水時には、活発な土砂移動が見られ、数年から10年に1度、大規模な土砂流出イベントが発生する。

3.1.2 観測水路

流砂観測は、足洗谷の最下流部、岐阜県高山市にある京都大学防災研究所穂高砂防観測所の足洗谷観測水路(コンクリート製、幅:5 m、長さ:11 m、深さ:0.6 m、水路床勾配:1/20)で実施した。観測水路を図-2示す。

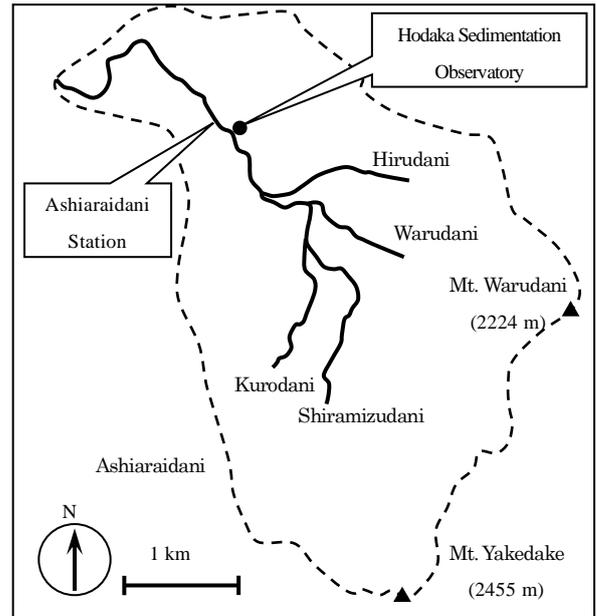


図-1 観測流域である足洗谷と足洗谷観測点

Fig. 1 Map of the Ashiaraidani watershed and location of the Ashiaraidani station.

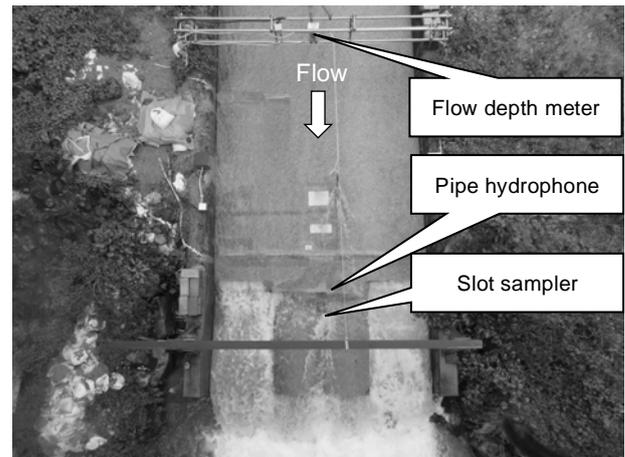


図-2 足洗谷観測水路と設置機器

Fig. 2 Observation channel and equipments at the Ashiaraidani station

2004年より、パイプハイドロフォンとスロットサンプラーによる掃流砂観測を継続して実施している。

3.1.3 計測機器

足洗谷観測水路には、パイプハイドロフォンをはじめ、スイスプレートジオフォン、またプレートタイプのハイドロフォンが複数設置されている。本研究で行う解析には、これらの中、水路中央・下流端部に設置されているパイプハイドロフォン、水路下流端の段落ち部に設置されているスロットサンプラー、水路中央部に設置されているレーダー式水位計によって計測されるデータを用いる(図-2)。ハイドロフォンはスロットサンプラーの直上流、流下方向に並んで設置されている。

ハイドロフォンは長さ $L = 27.5$ cm, 検知高さ $D_h = 2.5$ cm, 露出部分は頂上部から 1.25 cm である。増幅率 A_k は $A_1 = 2, A_2 = 4, A_3 = 8, A_4 = 16, A_5 = 32, A_6 = 64, A_7 = 128, A_8 = 256, A_9 = 512, A_{10} = 1024$ の $n = 10$ 段階に設定し, それぞれの増幅率に応じたパルス数を 1 分間積算して記録している。スロットサンプラーは, スロット幅を 0.2 m とし, スロットを通過した土砂がその下のピットに流入し堆積する構造である。ピット底面のスチールプレートの下にロードセルが設置されており, 堆積する土砂の重量を 1 分毎に計測し, その差分から流砂量を算出している。

3.2 パラメータの決定

3.2.1 訓練データと試験データの選択

できるだけ多くのデータを用いてパラメータを決定するため, パイプハイドロフォンの規格が一定となり, 安定的にデータが記録された観測期間である 2016 年 6 月 1 日から 2019 年 8 月 29 日を対象とした。この期間中に, スロットサンプラーが正常に稼働した土砂移動イベントは合計 13 回あり, それぞれのイベントで流砂量が実測されている。式(13)で示す目的関数 F が最小となるように補正係数 β_k, C を決定するが, そのために利用する流砂量 q_s の実測値は, これら 13 回のイベントの内から選択し, 訓練データと呼ぶことにする。一方, 決定した補正係数 β_k, C を用いて流砂量および粒度分布を求め, それら推定値がどの程度実測値と整合するかを検証するために用いるデータを試験データと呼ぶことにする。本研究では, 訓練データと試験データの独立性を保つため, 双方に共通するデータは用いないこととする。13 イベントのうち, スロットサンプラーのピットに堆積した土砂を採取し, その粒度分布を計測したイベントが 2 回あるので (2017 年 9 月 22–23 日, 2018 年 4 月 15–16 日), この 2 回を試験データとして採用し, 残りの 11 回のイベントを訓練データとした。

3.2.2 増幅率に対応する粒径範囲

Nonaka et al. (2015) は, 本研究で用いる足洗谷観測水路に設置されたパイプハイドロフォンを利用した現地実験を実施している。この実験では, 2-3, 3-5, 5-7, 7-10, 10-15, 15-30, 30-40, 40-60 mm の粒径の砂礫をそれぞれ

表 1 各粒径界の対象重量と対象粒径界

30 個を用意し, 1 秒間でハイドロフォンに衝突させ, 各増幅率で検出されるパルス数を調査し, 各増幅率の検知下限の土砂粒径を明らかにしている。その結果から設定した各増幅率に対応する対象粒径範囲と, その範囲の土砂粒子の代表質量を表-1 に示す。ここで, Nonaka et al. (2015) の現地実験で採用したハイドロフォンの増幅率は $A_k = 2, 4, 16, 64, 256, 1024$ の 6 段階であったが, 現行ではそれらの増幅率に 8, 32, 128, 512 を加えた 10 段階

表-1 各増幅率での土砂粒径の検知下限範囲と代表質量
Table 1 Lower limit range of grain size and their representative masses, detected by each amplification factor

Amplification range	Diameter range	Averaged mass
$A_k - A_{k-1} [-]$	d_k [mm]	m_k [g]
1024 - 512	3.0 - 5.0	0.15
512 - 256	5.0 - 6.0	0.22
256 - 128	6.0 - 7.0	0.29
128 - 64	7.0 - 8.5	0.65
64 - 32	8.5 - 10.0	0.91
32 - 16	10.0 - 12.5	1.96
16 - 8	12.5 - 15.0	3.01
8 - 4	15.0 - 20.0	6.91
4 - 2	20.0 - 30.0	10.81
2 -	30.0 -	50.39

の増幅率を設定しており, ずれが生じている。そのため, $A_k = 8, 32, 128, 512$ の対象粒径範囲と代表質量は, それぞれ隣接する増幅率における値の中間値を採用した。

3.2.3 検出限界割合の算定

既往の研究 (Tsutsumi et al., 2017; 堤ら, 2015) によると, パルスの増幅率 1024 の場合, 現地観測においてパルスの飽和が頻繁に起こることが示されている。増幅率 512, 256 の場合は, 通常はそれほど頻繁にパルスの飽和を起こさないが, 規模の大きな流砂イベントではパルスの飽和が発生することがある。本研究では, パルスの飽和がほとんど発生しない増幅率 64 以下の 6 段階の増幅率を用い ($n_{us} = 6$), それらに対応するパルス数を対象とすることで, 検出率 $R_d = 1$ として扱い, 式(10)ではなく式(11)を採用した。このため, 対象粒径範囲は表-1 より, 増幅率 64 の検出限界粒径の下限値 8.5 mm 以上となる。

前節でも示したが, 対象とする観測期間中, スロットサンプラーのピットに堆積した土砂を採取し, その粒度分布を計測したイベントが試験データ期間の 2 回と流砂観測が欠測であった期間の 1 回の合計 3 回ある。それぞれの粒度分布は異なるが, 簡単のため粒度分布の重ね合わせから平均的な粒度分布を求め, パイプハイドロフォンの対象粒径範囲の下限値 8.5 mm から, $\alpha = 0.21$ を決定した。

3.2.4 補正係数の算出

ここまでで決定したパラメータ, $m_k, \alpha, \gamma, n_{us}$ と式(12)から, 訓練データ観測期間における単位幅流砂量 M_0 が計算できる。計算値 M_0 が実測値 q_s を精度よく推定するよう, 式(13)で表す目的関数 F を最小化する β_k, C を決定した。その結果を表-2 に示す。目的関数最小化のため, ここではプログラミング言語 Python3 の線形近似法アルゴリズム (cobyla: Constrained Optimization By Linear

表-2 解析に用いた補正係数 β_k , C

Table 2 Correction factors β_k , C for the analysis

C	1.13
Amplification A_k	β_k
2	0.63
4	0.50
8	0.58
16	0.82
32	1.08
64	1.49

Approximation) を利用した。ただし、本手法では対象とする変数が多いことから、局所解に陥ることを避けるため、複数回計算を繰り返した上で目的関数が最小値になった β_k , C の組み合わせを大局解として採用した。具体的には、100 回程度計算を繰り返すと安定的な最小値を得ることができた。

確認のため、決定したパラメータ m_k , α , γ , n , us と目的関数 F を最小化する β_k , C の値を用いて訓練データから推定した流砂量とスロットサンプラーで実測された流砂量の関係を図-3 に示す。両者はほぼ 1:1 の直線関係にあることがわかる。原点を通る近似直線は、傾きが 0.99 となり、決定係数は $R^2 = 0.93$ と高い値を示した。

4. 流砂量・粒度分布の推定結果と考察

4.1 試験期間の掃流砂量と粒度分布の推定結果

4.1.1 期間1：2018年4月15-16日

期間中の流砂量実測値と推定値の時間変化を図-4 に示す。多少、過小・過大評価している箇所は見られるものの、ピークの位置や全体的な流砂量はおおむね精度よく計算されている。ここでは示さないが、横軸に実測流砂量、縦軸に推定流砂量をプロットし、最小二乗法により原点を通る近似直線を描いたときの傾きと決定係数 R^2 はそれぞれ、1.08 と 0.93 となり、両者がよく一致していることを示している。期間1でスロットサンプラーに堆積したと考えられる土砂を、2018年4月28日に採取し、粒度分布を計測した結果と、式(14)から算出された粒度分布の比較を図-5 に示す。推定粒度分布の粒径範囲は 8.5 mm 以上に限定されており、部分的な粒度分布ではあるが、その範囲内では実測された粒度分布と比較的よく一致していることがわかる。流砂量推定法において採用したハイドロフォンパルスの増幅率 $A_6 = 64$ 以下で検知できる最小粒径 8.5 mm での粒度の割合は、実測粒度分布では 0.73 であり、検知可能な粒径割合 $\alpha = 1.0 - 0.73 = 0.27$ となる。一方、推定粒度分布の場合、計算において検知可能な粒径割合 $\alpha = 0.21$ と設定した通り、最小粒径 8.5 mm での粒度の割合は 0.79 (= 1.0 - 0.21) となっている。この様に、推定手法においてあらかじめ設定した α の値が、実際の流砂の粒度分布での α の値に近いこ

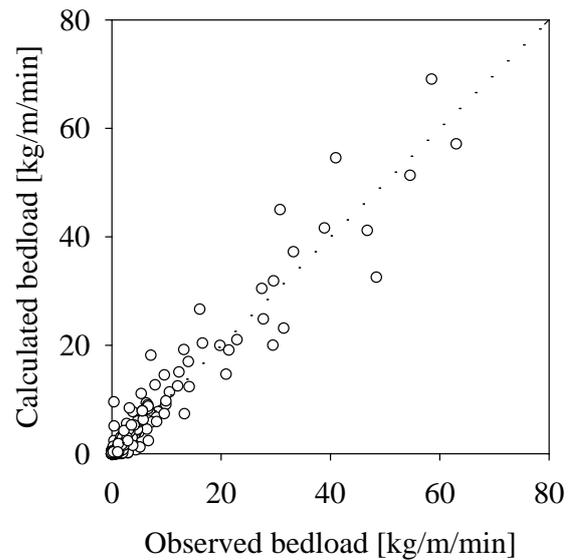


図-3 訓練データ期間における実測流砂量と推定流砂量の相関 ($R^2 = 0.93$)

Fig. 3 Relationship between observed and calculated bedload discharge during the train data period ($R^2 = 0.93$).

とが、比較的精度よく流砂量を推定できたひとつの要因であると推察される。

4.1.2 期間2：2017年9月22-23日

期間中の流砂量実測値と推定値の時間変化を図-6 に示す。推定された流砂量のピーク位置や全体的な変化傾向は、よく実測流砂量を再現しているものの、推定流砂量は実測流砂量を 40-50%程度過小評価している。

期間2でスロットサンプラーに堆積したと考えられる土砂を、2017年11月23日に採取し、粒度分布を計測した結果と、式(14)から算出された粒度分布の比較を図-7 に示す。推定粒度分布の粒径範囲が 8.5 mm 以上に限られているが、全体としてかなり実測粒度分布よりも過大評価していることがわかる。期間1と同様に検知可能な粒径割合 α を比較すると、実測粒度分布では、 $\alpha = 0.05$ となり、流砂量推定法で設定した $\alpha = 0.21$ よりもかなり小さな値であった。このことが、流砂量を過小評価した要因の一つであると推察される。

ここで、横軸に実測流砂量、縦軸に推定流砂量および残差(計算値-計測値)をプロットした散布図を図-8 に示す。原点を通る近似直線の決定係数 R^2 は 0.92 と高い値を示すものの、傾きは 0.43 と 1.0 から大きくずれている。このことを反映して、実測流砂量と残差には負の線形相関が表れている。一般的な回帰分析では、残差に規則性がなくランダムに分散している場合、等分散性に問題がなく、良好な推定ができたと判断される。一方、図-8 の様に、流砂量が増加するに伴い残差も増加するような規則性が見られる場合、想定した変数以外に有力な

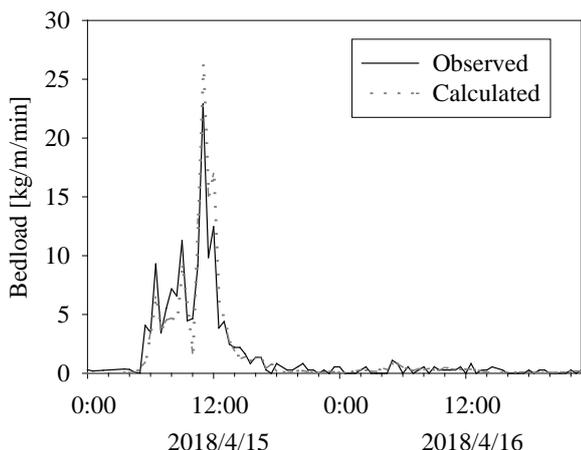


図-4 試験データ期間1 (2018年4月15-16日)における流砂量変化の実測値と推定値の比較

Fig. 4 Comparison of observed and simulated change of bedload discharge during the test data period No. 1 (From 15 to 16, April, 2018).

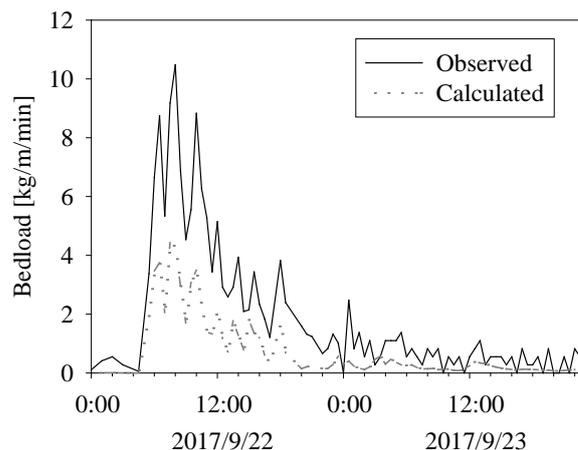


図-6 試験データ期間2 (2017年9月22-23日)における流砂量変化の実測値と推定値の比較

Fig. 6 Comparison of observed and simulated change of bedload discharge during the test data period No. 2 (From 22 to 23, September, 2017).

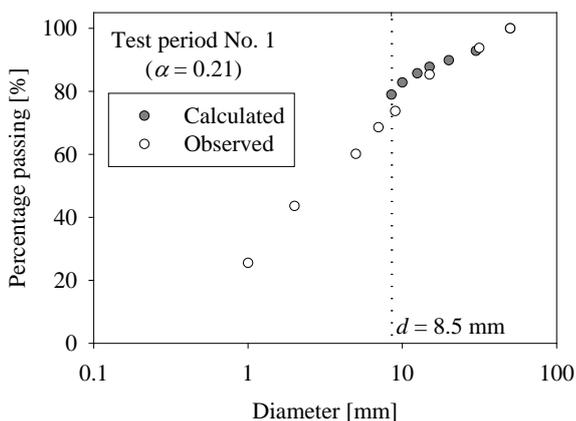


図-5 試験データ期間1 (2018年4月15-16日)における粒度分布の実測値と推定値の比較

Fig. 5 Comparison of observed and simulated grain size distribution during the test data period No. 1 (From 15 to 16, April, 2018).

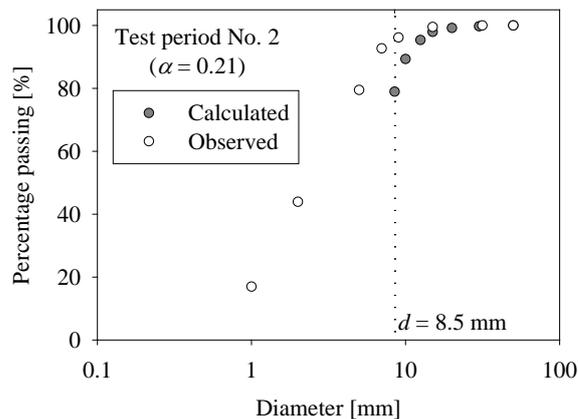


図-7 試験データ期間2 (2017年9月22-23日)における粒度分布の実測値と推定値の比較 ($\alpha = 0.21$)

Fig. 7 Comparison of observed and simulated grain size distribution during the test data period No. 2 (From 22 to 23, September, 2017) employing $\alpha = 0.21$.

説明変数が存在することを示唆している。図-4 から 7 について考察した通り、粒度分布から導かれるハイドロフォンで検知可能な粒径以上の流砂割合 α が実測値と推定に用いる設定値で一致している場合は、流砂量が比較的精度よく推定されるのに対し、 α が異なっている場合は流砂量の推定精度が低いことから、この有力な説明変数が α であることが想像される。本来、 α は流砂イベント毎に異なる上、イベント中にも刻一刻と変化すると考えられ、定数とならないが、本手法では簡単のため、スロットサンプラーに堆積した流砂の粒度分布の平均値を用い $\alpha = 0.21$ の一定値としている。 α は、式(12)の右辺全体を除している定数であり、この値が実際よりも大きく設定されていれば、その分流砂量が過小に算出される上、

実測値からのずれ(残差)は、流砂量に比例して大きくなることが明らかである。このことから、 α を変数とせず定数として与えていることが、期間2における流砂量および粒度分布をそれぞれ過小評価、過大評価したことの原因であると説明できる。

確認のため、式(14)において α を実測の粒度分布から得られる値 $\alpha = 0.05$ に設定して粒度分布を算出し、図-9 に示す。限られた範囲ではあるが、推定粒度分布は実測粒度分布と非常によく一致することがわかる。これらのことより、本推定手法においてハイドロフォンで検知可能な粒径の割合 α を説明変数として設定すれば、流砂量をイベントによらず高精度で推定できる上、粒度分布の推定も可能であるといえる。また、現状では推定される

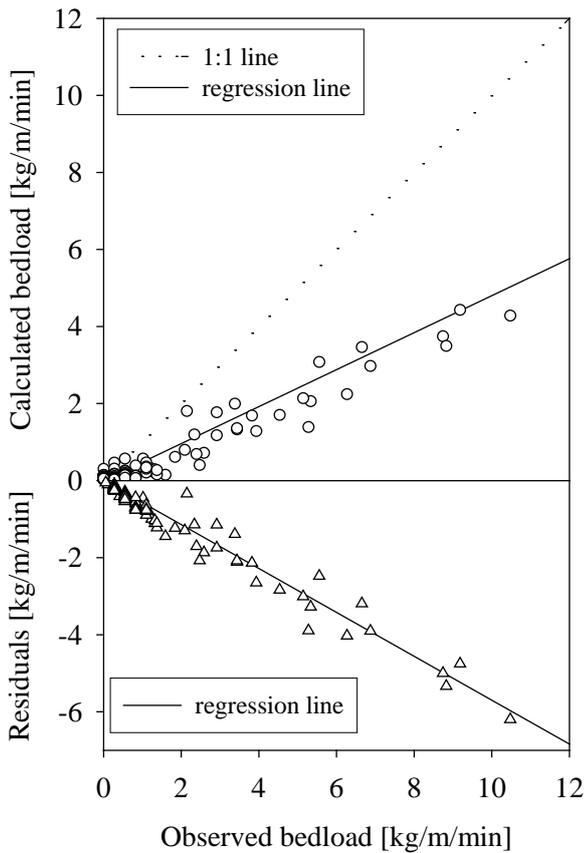


図-8 試験データ期間2（2017年9月22-23日）における実測流砂量と推定流砂量の相関（上段）および、実測値と残差（推定値－実測値）の関係

Fig. 3 Relationship between observed and calculated bedload during the train data period (upper), and relationship between observed bedload discharge and residuals (calculated - observed bedload discharge).

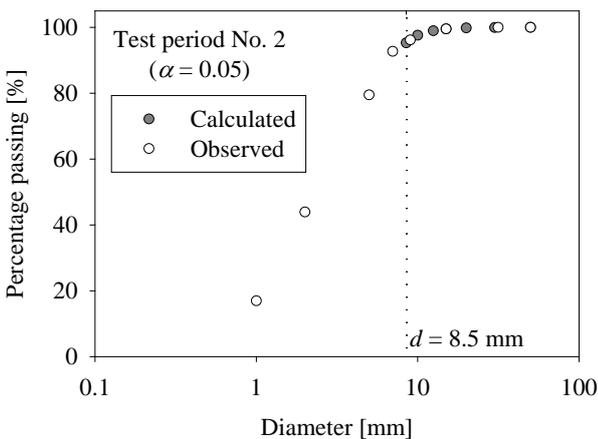


図-9 試験データ期間2（2017年9月22-23日）における粒度分布の実測値と推定値の比較（ $\alpha = 0.05$ ）

Fig. 4 Comparison of observed and simulated grain size distribution during the test data period No. 1 (From 22 to 23, September, 2017) employing $\alpha = 0.05$.

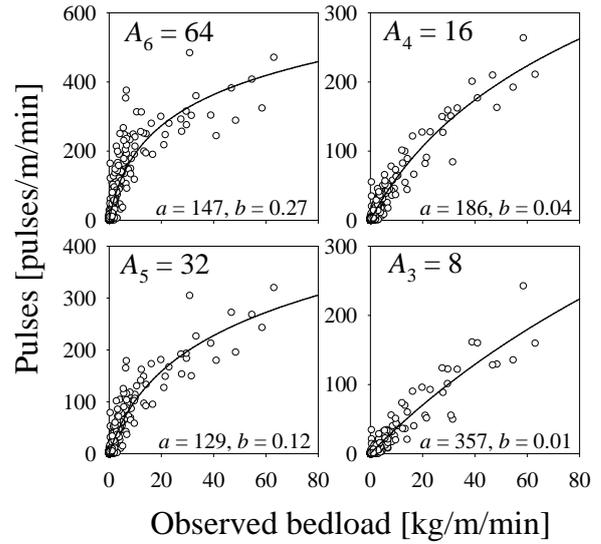


図-10 訓練データ期間における実測流砂量とパルス数の相関と近似曲線

Fig. 10 Correlations between observed bedload and pulses, and their approximated curves during the training data period.

粒度分布の粒径範囲は利用する増幅率に応じた検知可能粒径の下限値以上に限定される。パルスの飽和の問題をパイプの長さを短くする等、何らかの方法で解決し、高増幅率まで利用の範囲を広げることができれば、得られる粒度分布の情報を増やすことができると考えられる。

α を説明変数としてイベントごとに設定するためには、その時の粒度分布が必要であり、粒度分布の推定と α の設定は表裏一体である。現時点では、スロットサンプラーに堆積した土砂を採取して粒度分布を実測しているが、もし何らかの計測手法で流砂の粒度分布をテンポラリーにでも計測することができれば、本手法による流砂量の推定精度を向上させることができると期待される。

4.2 従来のパルス法との比較

本研究で開発した、パルス法を用いた新たな流砂量推定手法の有用性を検証するため、パルス法による既往の推定手法と比較する。訓練データ期間における実測流砂量とハイドロフォンで計測されたパルス数との関係を図-10に示す。ここで増幅率としては、流砂量との相関がよいことを条件として、パルスの飽和を起こさなかった $A_6 = 64$ 以下、 $A_5 = 32$ 、 $A_4 = 16$ 、 $A_3 = 8$ を採用した。この関係を、式(15)で表す指数関数で近似し、最小二乗法によって係数 a 、 b を決定し、既往の手法による流砂量推定式とした。

$$M_0 = \frac{1}{b} \left(e^{\frac{P_k}{a}} - 1 \right) \quad (15)$$

ここで、 P_k は増幅率 A_k ($k = 3, 4, 5, 6$)で計測されたパルス数である。決定された係数 a 、 b は図中に示す。

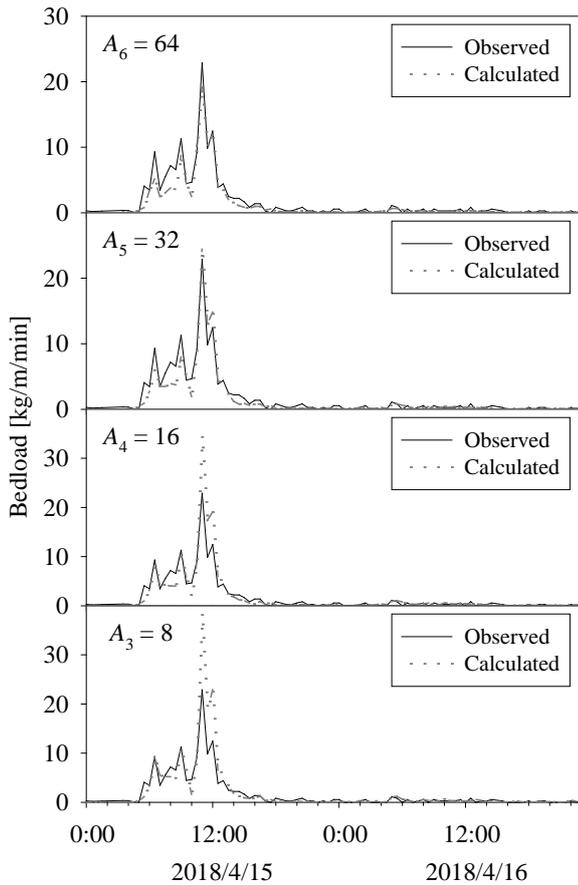


図-11 試験データ期間1 (2018年4月15-16日)における流砂量変化の実測値と推定値(既往法)の比較

Fig. 10 Comparison of observed and conventionally simulated change of bedload discharge during the test data period No. 1 (From 15 to 16, April, 2018)

試験期間1, 2において, 既往法である式(15)によって推定された流砂量をそれぞれ図-11, 12に示す。これらの図は, 本研究で提案した新手法で推定した流砂量を示した図-4, 6に対応するものである。図-11では, 増幅率 $A_6 = 64$, $A_5 = 32$ の推定値が実測値をよく再現しており, 増幅率が低下すると推定値は実測値を過大評価している。図-4と比較すると, 増幅率 $A_5 = 32$ の場合と同程度である。図-12では, 増幅率 $A_5 = 32$ の推定値が最も実測値をよく再現しており, $A_6 = 64$ では過大評価, $A_4 = 16$, $A_3 = 8$ では, 過小評価している。図-6と比較すると, 増幅率 $A_4 = 16$, $A_3 = 8$ の場合と同程度である。定量的に比較するため, 流砂量の実測値と推定値の間で平均平方二乗誤差(RMSE)と取ると, 新手法を表した図-4, 6ではそれぞれ1.86と1.89となったが, 図-11, 12で最小のRMSEとなる $A_5 = 32$ では, それぞれ1.49と0.96となり, 新手法よりも精度が高いことが示されている。

この様に, 増幅率によって違いはあるものの, 新手法と同じか, 増幅率によってはより高い精度で流砂量を推定できている。ここで, さらに比較対象を増やして検証

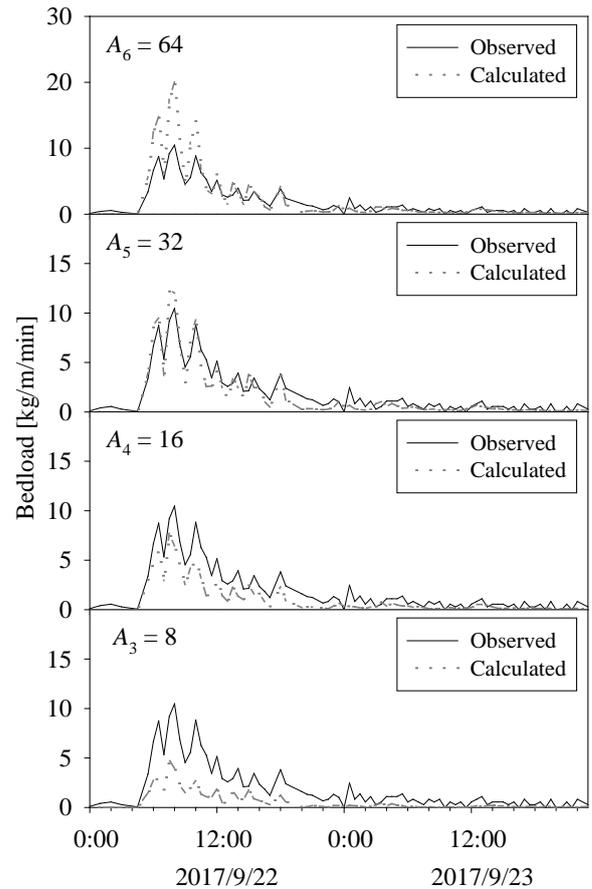


図-12 試験データ期間2 (2017年9月22-23日)における流砂量変化の実測値と推定値(既往法)の比較

Fig. 10 Comparison of observed and conventionally simulated change of bedload discharge during the test data period No. 2 (From 22 to 23, September, 2017).

するため, 試験データだけでなく, 訓練データも含めたすべてのデータで相関を調査し, 表-3にまとめた。ここで, RMSEの算出においては, 実測値, 推定値ともに流砂量の小さいデータが多数含まれることで, 計測期間の長いイベントに偏ってRMSEが小さくなってしまいうことを避けるために, 実測値と推定値がともに 0.5 kg/m/min 以下となるデータは省いている。表には, 訓練データと試験データの合計13イベントでのRMSEが示されている。表中の太字で示されたRMSEは, 各イベントにおいて推定手法を比較して最小のRMSEとなったものである。13イベント中, RMSEが最小となるのが新手法で4回と最多ではあるが, イベントごとにRMSEは最小となる手法が異なり, 必ずしも新手法が常に最小というわけではない。ただし, 各手法ごとにみると, 既往手法では, 一つの増幅率に絞ると, あるイベントではRMSEが最小となるが, 別のイベントでは逆に最大となることがあるなど, 推定精度が安定していない。一方, 新手法ではRMSEが最小ではないイベントでも比較的小さな値を保っており, 全体として, 安定的に高い推定精度であることがわ

表-3 実測流砂量に対する推定流砂量の二乗平均平方根誤差 (RMSE)

Table 3 Root mean square error (RMSE) of simulated bedload against observed bedload

Observation period		Number of data	RMSE [kg/m/min] *				Remarks	
			Present method	Conventional method				
Start time	End time			64	32	16	8	Amplification
2016/06/25 01:00	2016/06/25 05:00	9	4.39	14.10	10.24	8.44	11.77	Training data
2016/07/05 19:00	2016/07/11 11:00	128	0.37	0.99	0.46	0.44	0.58	Training data
2016/07/31 00:00	2016/08/02 17:30	36	3.58	6.61	4.25	2.93	3.34	Training data
2016/08/08 08:00	2016/08/30 12:30	18	3.81	2.08	1.74	2.22	3.62	Training data
2016/10/03 00:30	2016/10/30 23:30	95	2.21	2.20	2.39	2.34	2.54	Training data
2017/07/01 07:00	2017/07/01 17:00	20	4.97	4.90	5.47	5.59	6.22	Training data
2017/07/10 00:00	2017/07/28 02:00	93	0.45	0.70	0.63	0.83	1.04	Training data
2017/09/22 00:00	2017/09/26 05:30	75	1.89	2.09	0.96	1.37	2.14	Testing data
2018/04/15 00:00	2018/04/16 23:00	39	1.86	1.54	1.49	2.67	3.42	Testing data
2018/09/08 00:00	2018/09/08 07:30	16	2.11	13.23	6.86	1.99	2.29	Training data
2018/09/30 21:00	2018/10/01 05:30	18	2.07	6.07	3.94	2.10	1.67	Training data
2019/06/30 06:00	2019/06/30 07:30	4	2.18	4.15	4.04	4.82	6.00	Training data
2019/08/23 06:00	2019/08/23 07:00	3	9.33	37.88	29.34	4.64	10.07	Training data
Total		554	1.73	2.83	2.07	1.80	2.24	Mean value

* data lower than 0.5 kg/m/min are excluded

*minimum RMSE are indicated in bold

かる。表の最下段に、データ数で重みづけをした RMSE の平均値を示しているが、既往法のすべての増幅率の結果と比較しても最小の RMSE であり、新手法が安定的に高精度での推定ができることを裏付けている。

既往法は、ひとつの増幅率 A_k を基に流砂量を推定するものであり、それ以外の増幅率で得られたパルスの情報は反映されていない。そのためイベントごとの粒度の違いなどには詳細に対応できないため、推定精度にばらつきが生まれると考えられる。一方、本研究で開発した新手法では、前節で考察したように、イベントごとに粒度分布が異なることで推定精度が異なる課題はあるものの、既往法と違い、式(1)で示した増幅率間のパルスの差分として採用する増幅率のすべてのパルス数を情報として反映しているため、比較的安定して高い推定精度を保つことが可能であると考えられる。

4.3 全期間における掃流砂量推定結果

最後に、全観測期間 (2016 年 6 月 - 2019 年 8 月) における、新手法によって推定された流砂量とその積算値を図-13 に示す。毎年、夏季の降雨期間に大きな流砂量が見られる。最大値としては 280 kg/m/min の推定値が記録されている。3 年 2 か月の全観測期間の総流砂量は 536 t/m であり、水路幅 5 m をかけると 2,680 t である。流域面積 6.5 km² を考慮し、土粒子密度を 2,650 kg/m³ として、比土砂流出量を計算すると、51 m³/km²/year となった。日本のダムでの比堆砂量と比較すると、一般に土砂流出が少ない流域での基準値 100 m³/km²/year (芦田ら, 2008)

よりも少ない値ではあるが、堆砂状態の空隙を含めていない点や、観測期間中は、数年にいちど起こるような大規模な土砂流出イベントが含まれていない点を考えると、妥当な値であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、ハイドロフォンパルスの各増幅率で得られるパルス数の差分をとり、それらに対応する代表粒径 (質量) との積から流砂量を推定する新しい手法を提案した。この手法では、サルテーション等によってパイプに衝突せずに流下する砂礫の割合、ハイドロフォンの検知限界粒径以下の砂礫の割合を考慮した。既往のパルス法では、ひとつの増幅率によって得られるパルスの情報以外は用いないのに対し、複数の増幅率によって得られるパルスの情報を同時に用いることで、現地における流砂挙動の特徴変化に対応が可能であることや、流砂量だけでなく部分的にはあるが粒度分布を推定できることが、本手法の特徴である。

本手法の妥当性を検証するため、岐阜県高山市の足洗谷流域において 2016 年 6 月から 2019 年 9 月までの間に観測された流砂イベント 13 回の内、11 回を訓練データとして用いてパラメータを設定し、2 回の試験データを対象として実測された流砂量と粒度分布と推定値を比較した。その結果、対象イベントによって推定精度は異なり、精度はハイドロフォンの検知限界粒度以上の土砂割合 α の設定値に依存することが示されたものの、推定値

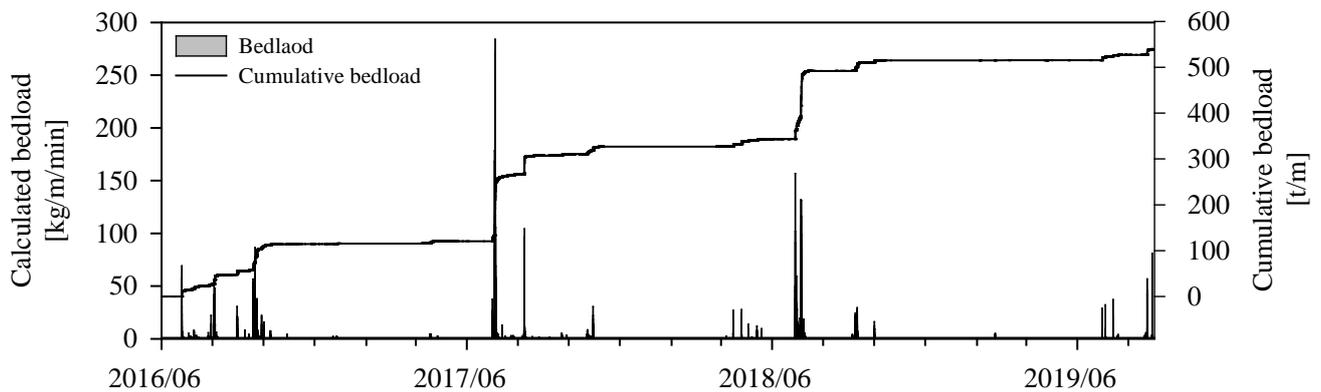


Fig. 13 Simulated change of bedload discharge and its accumulated value during the whole observation period

としては妥当な結果が得られた。また、同時に推定された粒度分布に関しても、流砂量推定値と同様に α に依存するが、おおむね妥当な結果が得られた。

本手法の推定精度の優位性を検証するため、既往のパルス法による推定法と推定精度の比較を実施した。その結果、イベント毎に比較すると必ずしも新手法が既往のパルス法よりも精度が高いわけではなく、増幅率によっても異なるが既往法の方が精度の高い場合もあった。しかし、既往法ではイベントごとのばらつきが大きく、あるイベントでは高精度で推定できて、別のイベントでは精度が大幅に減少する場合もあるのに対し、新手法では、安定的に高精度を維持でき、期間全体の平均値としては既往法よりも優位であることが示された。

観測期間全体を通して、新手法による流砂量の推定を行い、流域面積当たりの比流砂量を算出し、一般的な比堆砂量と比較したところ、一般的に土砂流出が少ない流域の比堆砂量と同程度であったが、堆積土砂の空隙率を考慮していない点や、対象期間に数年にいちど起こるような大規模な土砂流出が含まれていないことを考えると妥当な結果と判断できる。

本稿では、新手法の開発を目的として、直接法（スロットサンプラー）による現地での流砂観測の結果から、パラメータの設定を行い、推定値と実測値の比較によって精度の検証を行った。しかし、本手法は既往のパルス法のように現地での直接法による流砂量実測値を用いたキャリブレーションを必要とせず、鈴木らの音圧法と同様に、単独で流砂量を推定できる可能性がある。そのような方法により高精度で流砂量を推定するためには、実際の流砂の粒度分布から決定される α の値を適切に設定できるかが鍵となる。本研究では、スロットサンプラー内に堆積した土砂の粒度分布を実測した結果から α を設定したが、もし直接法による流砂観測を行わずとも、何らかの手法で短期間でも流砂の粒度分布を計測できることが可能であれば、イベントごとに α を設定でき、高精度

で流砂量を推定できると考える。現時点では、イベントごとに粒度分布を計測し α を設定することは困難である。そこで、 α の影響を軽減させるためには、極力小粒径の流砂も対象とした推定が望ましく、採用できる増幅率 A_k の範囲を広げるために、パルスの飽和を軽減するかパルスの飽和によって変化する検出率 $R_{d,k}$ を現地実験等で定式化することが、推定法の改善策として挙げられる。

本研究で開発した流砂量推定のための新手法においては、流砂量だけでなく粒度分布も推定できることがもうひとつの特徴である。しかし先にも述べた通り、流砂量推定精度の向上のためには、粒度分布を把握することが必要であり、推定精度向上のための α の値の設定と粒度分布の推定は表裏一体の事象である。そこで、直接法による流砂量観測によって実際の流砂量が既知である場合は、新手法による推定値が一致するように α の値をチューニングすることで、より正確な粒度分布を推定することも可能と考える。

参考文献

- 芦田和男・江頭進治・中川一（2008）：21世紀の河川学－安全で自然豊かな河川を目指して－，京都大学学術出版会，p. 265
- 藤田正治・澤田豊明・志田正雄・伊藤元洋（2005）：高原川流域における土砂生産特性，水工学論文集，49，p. 1075-1080
- Goto, K., Itoh, T., Nagayama, T., Kasai, M., Marutani, T. (2014): Experimental and theoretical tools for estimating bedload transport using a Japanese pipe hydrophone, *International Journal of Erosion Control Engineering*, 7(4), p. 101-110
- Gintz, D., Hassan, M. A., Schmidt, K. H. (1996): Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river, *Earth Surface Processes and Landforms* 21, p. 433-445
- 星野和彦・酒井哲也・水山高久・里深好文・小杉賢一朗・

- 山下伸太郎・佐光洋一・野中理伸 (2004) : 流砂等計測システム (六甲住吉型) と観測事例, 砂防学会誌, 56 (6), p. 27-32
- 栗原 淳一・宮本 邦明 (1992) : 音響を利用した流砂量計測装置について, 砂防学会誌, 44 (5), p. 26-31
- 水山高久・野中理伸・野中伸久 (1996) : 音響法 (ハイドロフォン) による流砂量の連続計測, 砂防学会誌, 49 (4), p. 34-37
- 中谷洋明・鶴田謙次・吉村暢也 (2007) : 手取川上流域でのハイドロフォンを用いた流砂量観測及び解析, 砂防学会誌, 60 (3), p. 20-25
- Nonaka, M., Mizuyama, T., Tsutsumi, D. (2015): Plate-type hydrophone installation technique for the bedload measurement, proceedings and poster of the 8th International Workshop on Gravel Bed Rivers
- 小田晃・長谷川祐治・水山高久・宮本邦明・野中理伸 (2005) : ハイドロフォンによる流砂量計測の水理模型実験への適用, 砂防学会誌, 58 (2), p. 15-25
- Rickenmann, D., Turowski, J. M., Fritschi, B., Wyss, C., Laronne, J. B., Barzilai, R., Reid, I., Kreisler, A., Aigner, J., Seitz, H., Habersack, H. (2014): Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams, *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, p. 928-942
- Rickenmann, D. 2017a.: Bedload transport measurements with geophones, hydrophones and underwater microphones (passive acoustic methods), *Gravel Bed Rivers: Processes and Disasters*, edited by D. Tsutsumi and J. B. Laronne, Wiley, p. 185-208
- Rickenmann, D. (2017b): Bed-load transport measurements with geophones and other passive acoustic methods, *Journal of Hydraulic Engineering*, 60th Anniversary State-of-the-Art Reviews, 143(6), 03117004-1-14, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001300
- Sklar, L. S., Dietrich, W. E. (2004): A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301
- 鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智・平澤良輔・長谷川祐治 (2010) : 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究, 砂防学会誌, 62 (5), p. 18-26
- 堤大三・野中理伸・水山高久・藤田正治・宮田秀介・市田児太郎 (2014) : 掃流砂観測におけるプレート型ジオフォンとパイプ型ハイドロフォンの比較, 京都大学防災研究所年報, 第 57 号 B, p. 385-390
- 堤大三・天野唯子・長谷川祐治・市田児太郎・野中理伸 (2015) : 鉛直分布を考慮した掃流砂観測手法の検討, 京都大学防災研究所年報, 第 58 号 B, p. 332-344
- Tsutsumi, D., Fujita, M., Nonaka, M. (2017): Bedload transport measurement with a horizontal and a vertical pipe microphone in a mountain stream: taking account of particle saltation, *Earth Surface Processes and Landforms*, 43 (5), <https://doi.org/10.1002/esp.4297>
- Turowski, J. M., Yager, E. M., Badoux, A., Rickenmann, D., Molnar, P. (2009): The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1661-1673. DOI: 10.1002/esp.1855
- Turowski, J. M., Badoux, A., Rickenmann, D. (2011): Start and end of bedload transport in gravel-bed streams, *Geophysical Research Letters*, 38, L04401, doi:10.1029/2010GL046558
- Uchida, T., Sakurai, W., Iuchi, T., Izumiyama, H., Borgatti, L., Marcato, G., Pasuto, A. (2018): Effects of episodic sediment supply on bedload transport rate in mountain rivers. Detecting debris flow activity using continuous monitoring, *Geomorphology*, 306, p. 198-209
- Wyss, C. R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J. M., Weitbrecht, V., Boes, R. M. (2016): Measuring bed load transport rates by grain-size fraction using the Swiss plate geophone signal at the Erlenbach, *J. Hydraul. Eng.* 142(5), 04016003_1-11
- Yager, E. M., Turowski, J. M., Rickenmann, D., McArdeell, B. W. (2012): Sediment supply, grain protrusion, and bedload transport in mountain streams, *Geophysical Research Letters*, 39, L10402, doi:10.1029/2012GL051654

奈良県赤谷西地区を対象とした地下水および渓流水の水質分析 による深層崩壊危険斜面抽出に関する検討

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、発生頻度は低いですが、天然ダム形成・決壊による土砂流出などをもたらし、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、溪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、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⁻、NO₃²⁻、HCO₃³⁻、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



図-1 調査地概要

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。溪流での採水は、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では溪流上部で3.3 mS/m、溪流下部で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。なお、ここには図示していないが、他のイオンやイオン状シリカ(SiO₃²⁻)は、イオン当量濃度とECに明瞭な関係は見られなかった。

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 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 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 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 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增大するプロセスがあると考えられる。

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

5. おわりに

今回の調査では、ボーリング孔から採取した地下

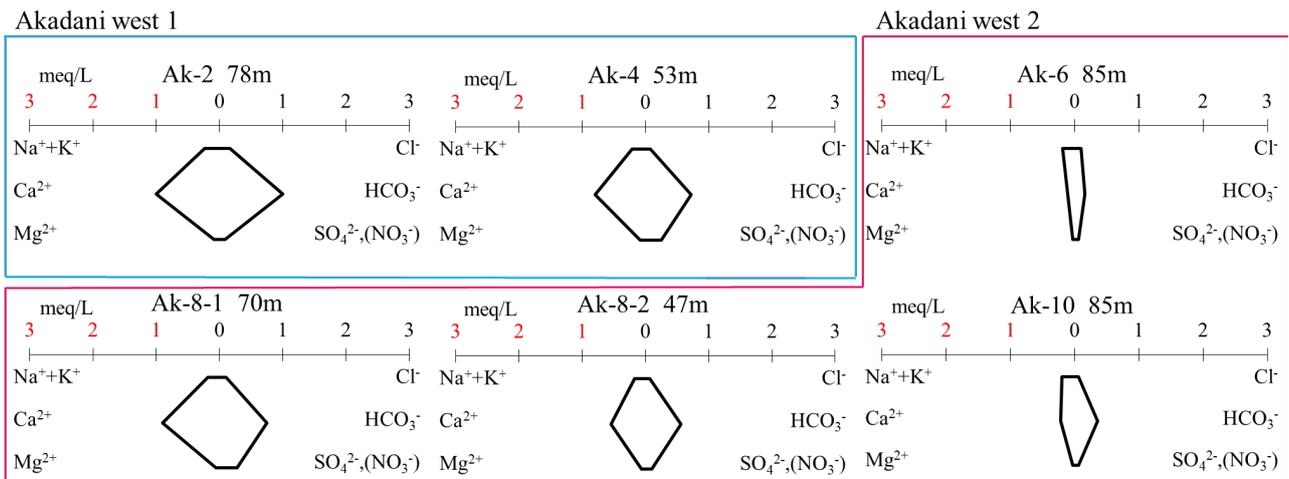


図-2 各ボーリング孔で採取した地下水のイオン当量濃度

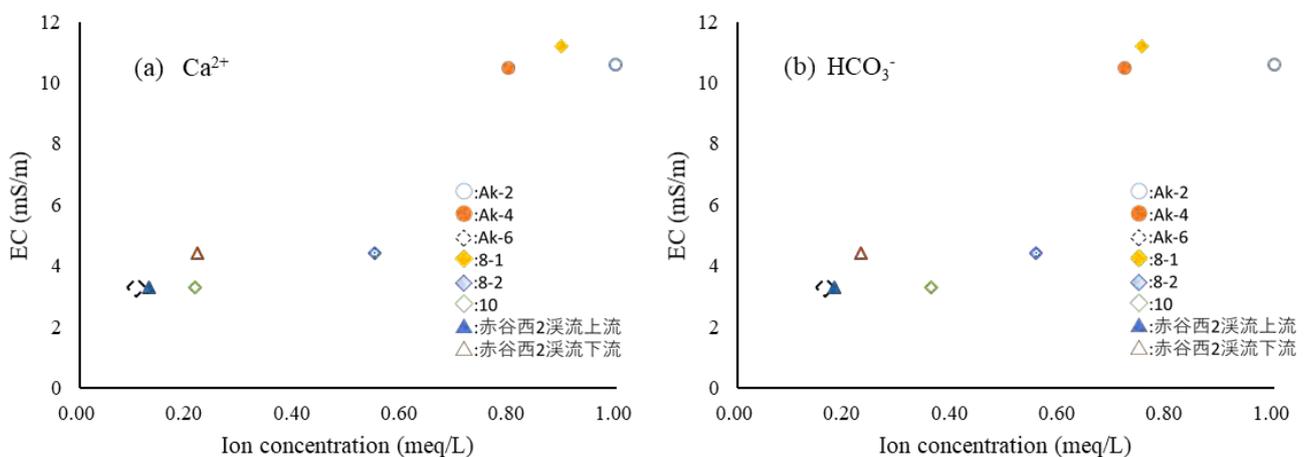


図-3 各ボーリングで採取した地下水のイオン濃度とECの関係 (a) Ca^{2+} 濃度, (b) HCO_3^- 濃度

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
平成23年紀伊半島大水害 河道閉塞（天然ダム）における対策	東繁光・服部浩二・追鳥裕樹	土木技術資料	Vol.61 No.3	論文	2019.3
空中電磁探査を用いた深層崩壊危険箇所の抽出技術	田中健貴、木下篤彦、内田太郎、桜井巨	土木技術資料	Vol.61 No.6	論文	2019.6
紀伊山系砂防事務所における河道閉塞（天然ダム）対策工事への対応	菅原寛明	砂防学会誌	Vol.72 No.1	論文	2019.5
土砂洪水氾濫の事例からみた発生場の特徴について	久保毅、島田徹、宮田直樹、澤村朱美、内田太郎、坂井佑介、菅原寛明、田中健貴	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5
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	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	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5
深層崩壊に対する警戒避難の発表ならびに解除に資する雨量データ解析	小杉賢一郎、千野佑輝、中谷加奈、正岡直也、小竹利明、菅原寛明、田中健貴	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5
「要因分析図」を用いた砂防施設配置計画の検証（続編）	西岡孝尚、南部啓太、菅原寛明、山下大雅	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5
地質特性を考慮した平成23年台風12号豪雨による斜面崩壊の要因分析	南部啓太、西岡孝尚、澁谷啓、菅原寛明、山下大雅	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5
赤谷西地区岩盤クリープ斜面の変動と空中電磁探査による比抵抗分布特性について	木下篤彦、田中健貴、桜井巨、内田太郎、林幸一郎、窪田安打、河戸克志、奥村稔	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5
紀伊山系栗平地区における地形変化と流出土砂量について（その2）	岡野和行、小竹利明、菅原寛明、木下篤彦、田中健貴、船越和也、柏原佳明、吉野弘佑、井之本信	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5
熊野川流域における流砂水文観測データに基づく土砂移動状況の把握	田中健貴、小竹利明、木下篤彦、菅原寛明、臼杵伸浩、岡野和行、井元成治、井之本信	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5
奈良県赤谷西地区の重力変形斜面におけるゆるみ域の性状と、変形機構の推定	林幸一郎、窪田安打、小松慎二、橋本裕司、菅原寛明、田中健貴、木下篤彦	2019年度砂防学会研究発表会概要集	No.84	論文	2019.5

3.2 学会発表

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
1	紀伊山系における土砂移動等を対象とした画像解析による検知・計測技術の開発	○水谷佑 五十嵐和秀, 松本定一, 池島剛, 菅原寛明, 田中健貴, 木下篤彦	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
2	土砂洪水氾濫の事例からみた発生場の特徴について	久保毅 島田徹, 宮田直樹, 澤村朱美, 内田太郎, 坂井佑介, 菅原寛明, 田中健貴	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
3	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	小川内良人 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	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
4	深層崩壊に対する警戒避難の発表ならびに解除に資する雨量データ解析	小杉賢一朗 千野佑輝, 中谷加奈, 正岡直也, 小竹利明, 菅原寛明, 田中健貴	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
5	「要因分析図」を用いた砂防施設配置計画の検証(続編)	西岡孝尚 南部啓太, 菅原寛明, 山下大雅	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
6	地質特性を考慮した平成23年台風12号豪雨による斜面崩壊の要因分析	南部啓太 西岡孝尚, 澁谷啓, 菅原寛明, 山下大雅	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
7	赤谷西地区岩盤クリープ斜面の変動と空中電磁探査による比抵抗分布特性について	木下篤彦 田中健貴, 桜井亘, 内田太郎, 林幸一郎, 窪田安打, 河戸克志, 奥村稔	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
8	紀伊山系栗平地区における地形変化と流出土砂量について(その2)	岡野和行 小竹利明, 菅原寛明, 木下篤彦, 田中健貴, 船越和也, 柏原佳明, 吉野弘佑, 井之本信	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
9	熊野川流域における流砂水文観測データに基づく土砂移動状況の把握	田中健貴 小竹利明, 木下篤彦, 菅原寛明, 臼杵伸浩, 岡野和行, 井元成治, 井之本信	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
10	奈良県赤谷西地区の重力変形斜面におけるゆるみ域の性状と、変形機構の推定	林幸一郎 窪田安打, 小松慎二, 橋本裕司, 菅原寛明, 田中健貴, 木下篤彦	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
11	那智川流域における斜面の水動態に対する考察(その2)	瀬戸康平 小竹利明, 木下篤彦, 菅原寛明, 田中健貴, 山田真吾, 江川真史, 孝子繪図, 島田徹	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
12	熊野川流域における土砂動態特性	井之本信 小竹利明, 菅原寛明, 木下篤彦, 田中健貴, 船越和也, 岡野和行, 横田潤一郎, 望月沙紀	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
13	那智川流域における地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険斜面の抽出に関する研究	榎原伴樹 崎山朋紀, 坂口武弘, 田中健貴, 木下篤彦, 野池耕平, 松澤真, 河戸克志	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5

	発表題目	発表者等	発表会名	発表年月
14	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	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	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
15	赤谷川・川原樋川合流点付近における土砂動態観測	臼杵伸浩 小竹利明, 菅原寛明, 木下篤彦, 田中健貴, 臼杵伸浩, 岡野和行, 井元成治, 吉野弘佑, 井之本信	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
16	プレート型ハイドロフォンの現地水路実験による校正試験	吉村暢也 小竹利明, 菅原寛明, 木下篤彦, 田中健貴, 鶴田謙次	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
17	支川からの土砂供給と本川河道の非一様性が土砂移動に与える影響	菅原寛明 小竹利明, 木下篤彦, 田中健貴, 船越和也, 岡野和行, 井元成治	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
18	SAR干渉画像を用いた崩壊危険斜面抽出手法とその適用範囲について	崎山朋紀 榎原伴樹, 坂口武弘, 田中健貴, 木下篤彦, 江川真史, 佐藤匠, 久保毅, 鈴木大和, 山下久美子	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
19	土砂災害の警戒意識向上に向けた地域波及効果の取組み支援について	池田一平 小竹利明, 菅原寛明, 田中健貴, 此松昌彦, 江種伸之, 松木敬	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
20	河川流量に基づく地域特性を反映した土砂災害警戒避難基準雨量	只熊典子 竹本大昭, 海原荘一, 木下篤彦, 田中健貴	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
21	360°映像を用いた防災学習コンテンツの検討	松木敬 小竹利明, 菅原寛明, 田中健貴, 坂口武弘, 山本賢一郎, 池田一平	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
22	降雨指標の確率を指標とした警戒避難基準雨量	竹本大昭 海原荘一, 木下篤彦, 田中健貴	平成31年度 砂防学会研究発表会	2019.5
23	地質境界が存在する斜面での地質構造や水文特性に着目した表層崩壊危険度評価手法の提案	榎原伴樹	2019年度河川技術に関するシンポジウム	2019.6
24	干渉SAR解析による崩壊危険斜面抽出手法とその適用範囲について	崎山朋紀	2019年度河川技術に関するシンポジウム	2019.6
25	14C年代測定による深層崩壊発生年代の調査方法	藤原美波, 小川内良人, 田中健貴, 横山修, 木下篤彦, 土佐信一	第58回(2019年度)日本地すべり学会研究発表会	2019.8

(1) 砂防学会研究発表会

岩手県盛岡市で開催された砂防学会研究発表会に参加し、研究発表を行った。

期 間：2019年5月21日(火)～23日(木)

会 場：盛岡市民文化ホール「マリオス」

(2) 日本地球惑星科学連合 2019 年大会

千葉市で開催された日本地球惑星科学連合大会 2019 に参加した。

期 間：2019年5月26日(日)～5月30日(木)

会 場：千葉県 幕張メッセ 国際会議場

(3) 2019 年度 河川技術に関するシンポジウム

東京大学で開催された 2019 年度 河川技術に関するシンポジウム—新しい河川整備・管理の理念と それを支援する河川技術に関するシンポジウム—に参加した。

期 間：2019年6月12日(水)～13日(木)

会 場：東京大学農学部弥生講堂

(4) 第 9 回 複合土砂災害に関する国際ワークショップ

三重県津市で開催された第 9 回 複合土砂災害に関する国際ワークショップ (MSD 9) に参加した。

期 間：2019年10月17日(木)～19日(金)

会 場：三重大学

4. 広報・啓発活動

(1) 地域講演会「考える、土砂災害」

和歌山県内で開催された、地域講演会「考える土砂災害」に参加し研究活動の報告等を行った。

日 時：2020年1月25日（土）、2020年2月1日（土）

会 場：日高川町防災センター等

5. 研修活動

(1) 土砂災害対策に関する研修活動

和歌山県を訪れた中国山東省・山東師範大学の学生に土砂災害についての研修の受け入れを行い研究指導を実施した。

日 時：2019年7月13日（土）

場 所：和歌山県土砂災害啓発センター

参 加 者：山東師範大学訪問団 71名

(2) 土砂災害対策に関する研修活動

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

日 時：2019年8月19日（月）～8月23日（金）

実施機関：国土交通省近畿地方整備局

研修実績：キャンプ砂防（参加人数 6名）

令和元年度 大規模土砂災害対策研究機構年報

発行 令和 2 年 12 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/>