ISSN 1342-3983

EICA

Journal of EICA

環境システム計測制御学会

The Society of Environmental Instrumentation, Control and Automation

●第33回環境システム計測制御学会(EICA) 研究発表会報告

全体報告／奨励賞受賞論文と講評／セッション報告

未来プロジェクト TSUNAGU 21 II　研究発表

●特　集　災害時における最新のモニタリングおよび予測技術〈後編〉

特集によせて

現地モニタリングを用いた斜面崩壊監視システム

土砂災害における衛星リモートセンシングの活用

住宅地に隣接した土石流危機渓流のセンシング

2011年紀伊半島大水害で深層崩壊により発生した
河道閉塞箇所の監視・観測手法

適正な災害廃棄物管理のためのドローンの適用事例

災害廃棄物の発生予測と災害時情報集約支援チーム(ISUT)

●連　載　自治体環境職種エキスパートの目

●エッセイ　オーストラリア大陸横断の旅

2022
Vol.26 No.4

EICA

〈特集〉

住宅地に隣接した土石流危険渓流のセンシング

土田　孝[1]，大町正和[2]，橋本涼太[3]，梅本秀二[4]

[1] 広島大学防災・減災研究センター
（〒739-8527　東広島市鏡山1-4-1　E-mail:ttuchida@hiroshima-u.ac.jp）

[2] ㈱計測リサーチコンサルタント
（〒732-0029　広島市東区福田1丁目665-1　E-mail:oomachi@krcnet.co.jp）

[3] 広島大学大学院　先進理工系科学研究科
（〒739-8527　東広島市鏡山1-4-1　E-mail:ryotahashimoto@hiroshima-u.ac.jp）

[4] ㈱計測リサーチコンサルタント
（〒732-0029　広島市東区福田1丁目665-1　E-mail:umemoto@krcnet.co.jp）

概　要

土砂災害警戒区域内にある住宅地の防災を目的として，土石流危険渓流に設置する地盤変位センサーと計測システムを開発した。さらに2018年に土石流が発生した広島県熊野町川角地区大原ハイツ上流の渓流内の5か所にセンサーを設置し，地盤変位の観測を約2年間実施してきた。この間，累積雨量322 mmの豪雨においてもすべてのセンサーで有意な地盤変位は観察されなかった。計測したデータの通信に低コストであるLPWAのLoRa方式を採用したが，通信の不調による欠測が高い比率で発生したため改善を図る必要がある。

キーワード：土石流，土砂災害警戒区域，自然渓流，センシング，早期避難
原稿受付　2022.1.4
EICA: 26(4) 54-59

1. 住宅地を対象とした土石流危険渓流のセンシングの必要性と課題

2018年7月の西日本豪雨によって，広島県では県の南部を中心に広い範囲で甚大な土砂災害や洪水災害が発生し，死者109名，行方不明者5名という甚大な人的被害が発生した。土砂災害（主に土石流）による死者は87名にのぼり死者の約80%を占めた[1]。2014年8月の広島土砂災害でも74名が犠牲となっており，近年豪雨災害が頻発する状況で，土石流など土砂災害による人的被害の軽減が大きな課題となっている。土石流による犠牲者の多くは土砂災害警戒区域に居住する住民であり，災害リスクが高い地域に住む人々に早期避難を促す効果的な方策が求められている。

この観点から，筆者らは住宅地の上流にある土石流危険渓流の地盤変位を常時センシングして住民に提供するシステムを開発し，試行的なセンシングを2年間実施してきた。土石流災害を対象とした渓流のセンシングはこれまでも研究例があるが，土砂災害警戒区域の住民の防災を対象とした渓流センシングはまだ実用化されていない。

危険渓流の土石流のセンシングに最も多く使用されているのは，ワイヤーセンサーである[2]。これは，土石流がワイヤーを切断すると警報が出る仕組みであるが，地形条件が厳しい渓流内では，設置や張り替えに手間を要したり，誤動作の発生といった課題が指摘されている。ワイヤーセンサーの設置事例をみると，危険渓流で工事を実施する際の安全確保など数か月程度のセンシングが多く，住宅等を対象とした長期のセンシングの例はあまりみられない。ワイヤーセンサー以外では，土石流の流下によって発生する地盤振動を検知するセンサーが開発され，火山灰が堆積した地域における土石流の検知に使用されている[3]。また，光や音響を用いたセンサーの研究も実施されているが実用には至っていない[4]。

住宅地を対象とした土石流対策としてのセンシングを考える場合，危険渓流に設置したセンサーは，設置後長期間継続的に住民に渓流の情報を提供する必要がある。さらに，センシングシステムの設置と維持に係わる費用は自治体等の補助があるとしても受益者である住民が負担する必要がある。このため，工事の安全確保を目的とする場合に比べ費用が低廉であることが強く求められる。

以上の観点から，筆者らは傾斜計を使用して低コストで地盤の変位を計測できるセンサーを用いて土石流の兆候をセンシングすることとした。渓流内の土石流の流路を予測し，渓流内の適切な位置に上記の地盤変位センサーを配置し，取得したデータをIoT通信技術を活用してワイヤレスでクラウドに集約することにより，住民がいつでもどこでも簡単に渓流内の地盤変

位の情報を確認できるシステムを開発した。本システムの適用性，有効性を調べるため，広島県の熊野町川角地区大原ハイツの背後の渓流にシステムを設置し2020年1月よりセンシングを開始した。

2. 土石流のセンシングの考え方と傾斜計を用いた地盤変位センサー

2.1 地盤変位による土石流のセンシングのねらいと効果

一般に土石流が渓流を流下するときの速度は時速30～40 kmとされている。流下する渓流の長さを500～1,000 mとすると土石流はこの距離を1, 2分で移動するので，渓流内でその移動を感知しても避難が間に合わないと考えられる。防災を目的とする土石流のセンシングを考える場合，この点が大きな問題であった。しかし，土石流災害を調査した結果，人命が失われる大きな土石流災害が発生する場合，上流での斜面のすべり破壊と渓流への流入およびそれらの土砂が土石流として移動する現象が複数回発生している可能性が高いことがわかってきている。

Fig. 1は2014年の広島土砂災害における安佐南区八木3丁目県営緑が丘住宅付近の土石流の氾濫状況である[5]。図のように土石流は3回に分けて流出して堆積したと推定され，最初の土石流は氾濫が上流にとどまったものの，2回目，3回目では先行した土石流堆積物の存在により氾濫開始点が下流に移動し，大きな被害をもたらした。同様に八木3丁目阿武の里団地の渓流においても，2回目の土石流が先行した土石流堆積物の存在により方向を変えて氾濫し大きな被害をもたらした。いずれも渓流の上流に複数の源頭部（土石流のトリガーとなったと考えられる崩壊斜面）が確認されている。このように，複数回の土石流によって被害が拡大したと考えられる被災事例は，西日本豪雨災害でも多数みられた。したがって，土石流の流出特性を考慮して適切な位置に地盤変位センサーを配置することで，最初の土石流による渓流内の異常な地盤変位をとらえることができれば，大きな被害が発生する前に避難できる可能性がある。

Fig. 1　Inundation of debris flow near Yagi 3-chome in the 2014 Hiroshima landslide disaster

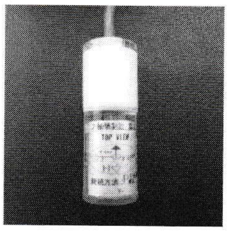
渓流のセンシングによる期待される効果として，早期避難の意識の向上が考えられる。多くの住民にとって住宅地から離れ急峻な場所にある渓流はほとんど立ち入る機会がなく，無関心になりがちである。しかし，渓流内の地盤変位の情報に日常的にアクセスすることにより，豪雨が予想される状況において早期避難の意識が高まると考えられる。広島大学地理学研究グループによると，2018年西日本豪雨において，航空写真から読み取った土石流相当の土砂移動箇所数は広島県内で8,604であり，広島県が発表した土砂災害発生箇所数597の10倍以上であった[6]。これは被害が発生しない土砂移動が渓流内で多数発生していたことを意味しており，センシングを行って豪雨時に早期避難した際に，渓流内の異常な地盤変位が観測されたが住宅地は無被害というケースがあると予想される。この場合，無被害でも地盤変位により渓流内での土砂移動があったことを知ることで早期避難の意義が確認でき，継続的な早期避難に繋がると考えられる。

2.2 地盤変位センサーの仕様の検討

渓流内で継続的に計測し住民の早期避難，緊急避難に使用するためには，観測システムの必要要件として以下が挙げられる。

1）自然渓流の厳しい自然条件において安定して長期間計測でき，メンテナンスフリーで降雨が多い6月～10月の間にバッテリー交換の必要がない。
2）中規模の土石流等の流出までは観測できる頑丈さを有する。
3）土石流の防護対象が住宅地であるため，システムの費用は受益者である住民が負担する（行政の補助は考えられる）。このため費用をできるだけ低廉にする必要がある。

検討の結果，傾斜計を用いて地盤変位を計測するセンサーを採用した。**Fig. 2**にセンサーに使用した傾斜計の外形を示すが，寸法は直径2.5 cm，長さ6.4 cmであり，傾斜角度の最小分解能は0.015°，計測可能範囲は－30°～＋30°である。水深100 m（1 Mpa）の水



測定範囲	－30°～＋30°
分解能	0.015°/mV
電源電圧	DC6～15 V
消費電流	無負荷時4 mA
防水・耐衝撃性	水深100 m，100 G以上
本体寸法	φ25×H64 mm
重量	42 g

Fig. 2　Specifications of tiltmeter used to measure ground displacement

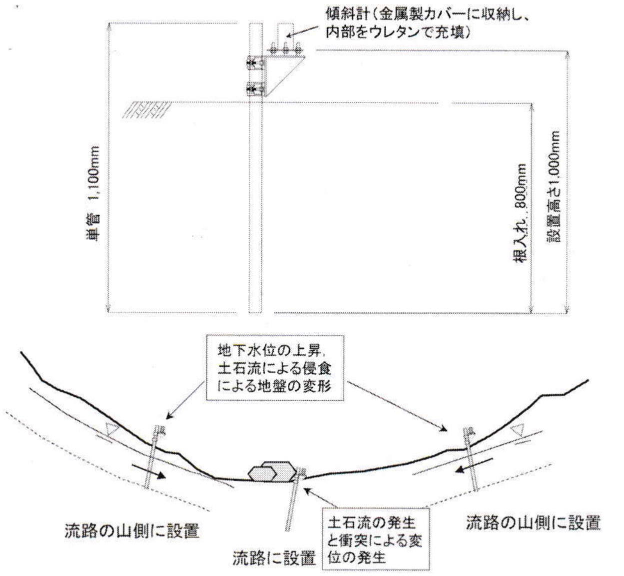


Fig. 3 Structure of debris flow sensor using inclinometer and measurement of ground displacement in mountain stream

圧まで防水機能が維持され耐衝撃は 100 G である。

Fig. 3 は，傾斜計と治具を組み合わせたセンサーの構造と渓流に設置して変位を計測するイメージ図である。図に示すように，長さ 110 cm の鋼製パイプに傾斜計を固定し，地盤内に 80 cm 埋め込む。傾斜計はカバーに収納して地盤から 20 cm の高さに設置しカバー内は止水と衝撃緩和のため発泡ウレタンを充填した。センサーは危険渓流における土石流の流路となる箇所および流路の山側に設置した。流路への設置は土石流の衝突による変位の観測，山側は地下水位の上昇と土石流の侵食による地盤の変形を計測することを想定した。本センサーにより傾斜計で測定した傾斜角を地盤変位量に換算すると最小変位量は 0.26 mm，計測範囲は±50 cm である。

なお，本システムにおける計測機器のコストは，傾斜計と治具を合わせて約 48 千円，送信機 1 台（センサー 2 点用）約 220 千円，受信機約 250 千円，パソコンと通信装置約 200 千円である。なお，2022 年 1 月に改善のため受信機と送信機をゲートウェイと IoT デバイスに交換するが，この新機材を当初から使用すると計測機器全体のコストが 30% 縮減できる。以上のコストは実装を想定しても実現性の高い費用と考えられる。

送信機で送信した各測点における地盤変位量は受信機を経てコンピュータによりクラウド上にアップロードされ，随時データを閲覧することができる。データの通信には，通信速度は低いが低消費電力で必要な範囲をカバーできる LPWA（Low Power Wide Area）の LoRa 方式を採用した。また，測定間隔は機器によるデータの送信時間とバッテリー消費量を考慮し 10 分とした。

2.3　土砂災害危険渓流への設置

センシングシステムの有効性を検証するため，土砂災害警戒区域の渓流に設置することを検討し，2018 年西日本豪雨災害の被災箇所である広島県熊野町川角地区大原ハイツの上の渓流に設置することとした。

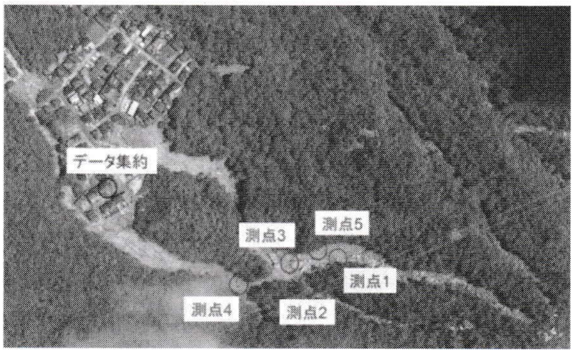
センシングシステムを渓流に設置するまでの検討事項と手順は以下の通りである。

1）センサーは多いほど安心であるが，現実性のある設置費用の範囲を考慮し，センサー 2 台とそれらのデータを送信できる送信機 1 台を一組とする測点を 5 か所設置することとした。

2）渓流内の設置位置を検討するため，土石流シミュレーションシステム Hyper KANAKO を用い[7,8]，2018 年西日本豪雨において土砂が発生した渓流源頭部から 1,000 m^3の土砂が流出するとして土石流の流路を検討した[9]。土石流の流路から設置条件を考慮して 5 か所の測点を選択し，各測点で流路上と流路の山側とにセンサーを設置した（**Fig. 4**）。

3）木々に囲まれている渓流では安定した通信の確保が重要であり，通信条件が比較的良好な住宅（**Fig. 4**）に依頼して受信機を設置した。

4）2019 年 12 月にセンサーを 5 測点 10 か所に設置した。**Fig. 5** は渓流内の地盤に設置した土石流センサーの状況，**Fig. 6** は測点⑤におけるセンサーと渓流源頭部との位置関係，**Fig. 7** はセンサー位置から約 20 m 離れた樹木に送信機を固定した状況である。



(Photo : Geospatial Information Authority of Japan Geographical Survey)

Fig. 4 Measurement stations and receiver installed in the mountain stream of Kawasumi Ohara Heights, Kumano Town

Fig. 5 Displacement sensor is installed in the ground

Fig. 6　Positional relationship between the position of the sensors at station 5 and the debris flow source head

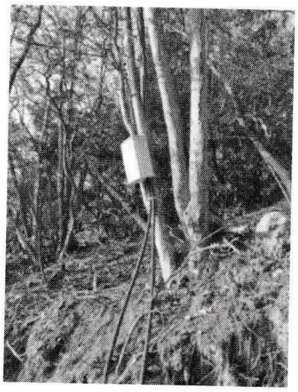


Fig. 7　Transmitter fixed to a tree

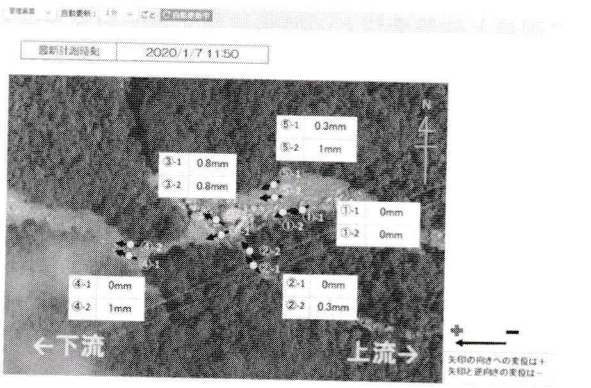


Fig. 8　Display of ground displacement map in mountain stream

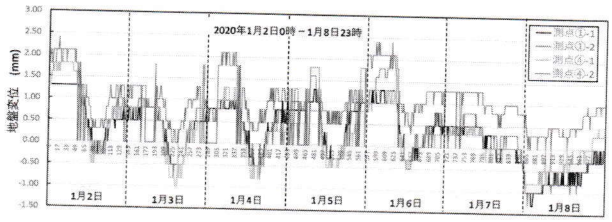


Fig. 9　Displacement fluctuations every 10 min. from Jan. 2–8, 2020

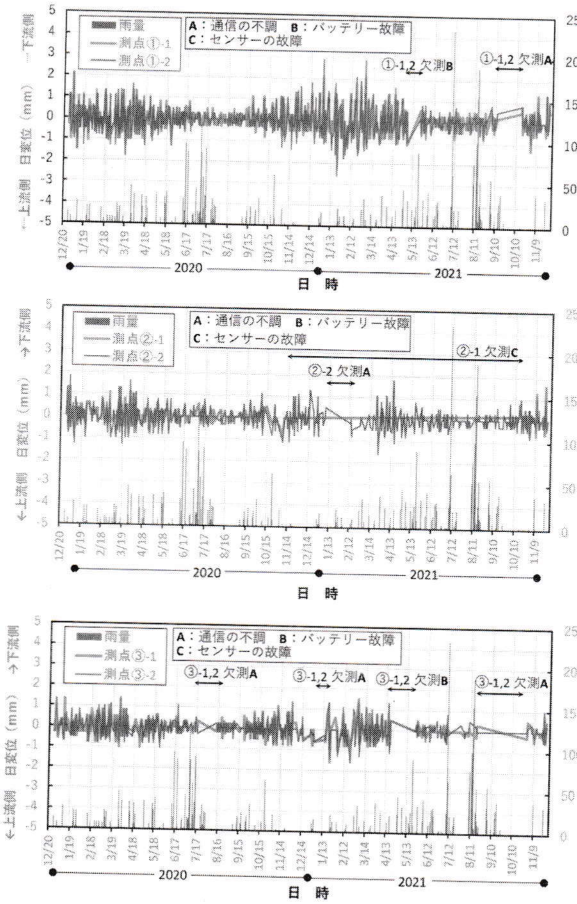


Fig. 10　Daily rainfall from Jan.. 2020 to Nov. 2021 and daily displacement of stations 1, 2 and 3

所定の Web サイトでログイン ID とパスワードを入力することでクラウドと接続し，地盤変位の情報をパソコンあるいはスマートフォンで確認できる。**Fig. 8** は現在の地盤変位のパソコン画面での表示で，5 か所 10 計測点における地盤の変位を mm 単位で，下流側に変位した場合＋，上流側に変位した場合は－に表示している。本システムによって，急に降雨の状況が悪化した場合でもスマートフォンから渓流の地盤変位を確認することができる。

3.　降雨と地盤変位の計測値との関係

計測は 2020 年 1 月から開始した。**Fig. 9** は 1 月 2 日 0 時 00 分から 1 月 8 日 23 時 50 分の，測点①-1，①-2，④-1，④-2 の 10 分ごとの変位の推移である。変位の計測値は日変動し，変動幅はいずれも ± 約 2 mm の範囲であった。日変動は傾斜計の温度による変動としてほぼ説明できる。

各計測日の 0 時のデータを抽出し，前日の 0 時からの 24 時間の間の変位量を日変位として算出した。5 測点の 10 点のセンサーの日変位を，雨量計による日降雨量とともに，**Fig. 10**（測点①，②，③）と **Fig. 11**（測点④，⑤）に示した。図中の棒グラフが 2 年間の日降雨量（熊野町に設置された広島県の雨量計による）である。図中の「欠測」は 0 時のときに計測が不調であったことを示す。

図のように，2020 年，2021 年とも 6 月から 8 月に大きな降雨が集中しており，2020 年は 7 月 6 日の 129 mm が日降雨量としては最大で，7 月 3 日から 7 日にかけて 256 mm の累積降雨があった。2021 年は 7 月 8

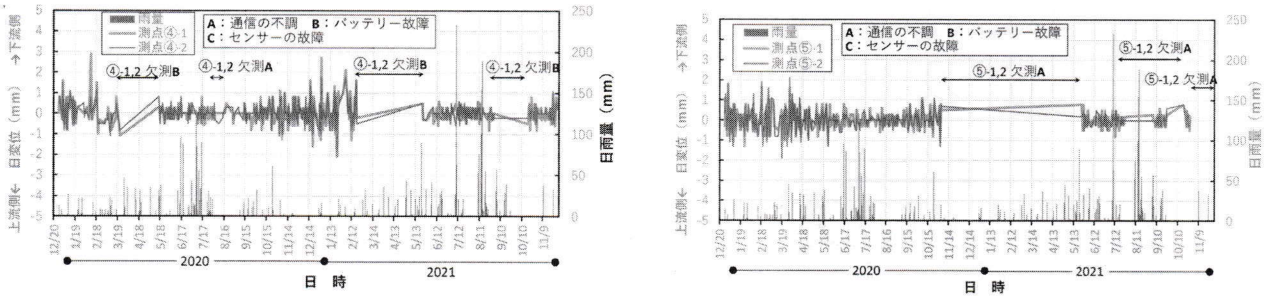


Fig. 11 Daily rainfall from Jan.. 2020 to Nov. 2021 and daily displacement of stations 4 and 5

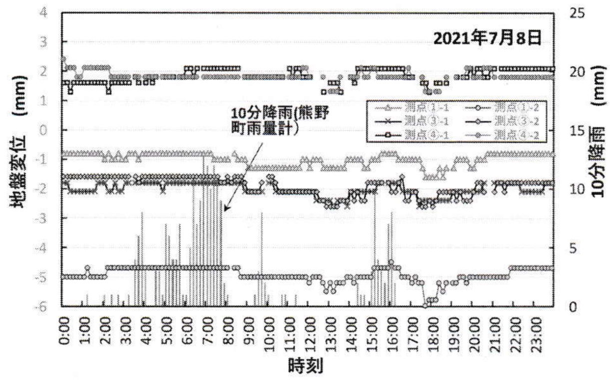


Fig. 12 Relationship between 10-minute rainfall and ground displacement on July 8, 2021

日の 233 mm が最大であり，7 月 7 日から 9 日にかけて累積雨量 322 mm の降雨があった。この 7 日から 9 日（場所によっては 13 日まで）にかけての豪雨では，広島県全体で公共土木施設に約 100 億円の被害が発生した。この 7 月豪雨で広島県内で観測した累積雨量は多い順に廿日市市矢草南 452 mm，庄原市古頃 409 mm，竹原市仁賀 333 mm であったと報告されており，熊野町の 322 mm は県内全体からみても累積降雨量が多い箇所であった。

Fig. 10，**Fig. 11** をみると，2020 年 7 月，2021 年 7 月とも，日雨量と各測点の日変位にはほとんど関係がみられず，雨量によらず渓流の地盤はほとんど変位していないといえる。**Fig. 12** はもっとも降雨が多かった 2021 年 7 月 8 日における 10 分降雨量と地盤変位の関係を示した。図のように 10 分降雨量は午前 7 時頃に最大 13 mm に達しておりこれは時間 78 mm に相当する強い雨である。しかしながらいずれの測点でも地盤変位は雨によって全く変化していない。降雨期が終わった 10 月 15 日に渓流と傾斜計の周辺を観察したところ測点付近に変化は見られず，2018 年の災害後に下流に建設された砂防ダムにも堆砂がみられなかった。したがって，2021 年 7 月の豪雨において地盤変位が全く観測されなかったことは，本渓流で土砂の流出が無かったためと考えられる。

2 年間センシングを継続した中で，もっとも大きな課題は **Fig. 10**，**Fig. 11** の図中に示すように間欠的に発生する欠測であった。この原因の多くは送信機と受信機間の通信の不調によるもので，主に樹木など障害物の存在が原因と考えられ，LoRa 方式の通信の課題ともいえる。地盤変位の異常を正しく判断するためには平常時において安定して計測できていることが不可欠であるので，この点を改善するため，受信機と送信機を，ゲートウェイおよび新たに開発した IoT デバイスにそれぞれ交換することを計画している。これらの機器を使用すると，通信性能を向上させるとともに計測機器の費用を 30% 低減できる。

以上，これまでの 2 年間の計測結果を示したが，課題である計測の安定性を向上させるとともに，今後さらに雨量と地盤変位との関係に関するデータを蓄積し，センシング結果を住民の防災に活用する方策を検討する必要がある。

4. ま と め

土砂災害警戒区域内にある住宅地の防災を目的として，土石流危険渓流に設置する地盤変位センサーと計測システムを開発した。開発したセンサーを，2018 年に土石流が発生した広島県熊野町川角地区大原ハイツ上流の渓流内の 5 か所に設置し，地盤変位の観測を約 2 年間実施してきた。本年 7 月には累積雨量 322 mm の豪雨がありすべてのセンサーで降雨中有意な地盤変位は観察されなかった。豪雨後に調査した結果から渓流全体で土砂の流出はなかったことを確認しており，観測結果は渓流の状態を反映していたと考えられる。

本研究を通じて，防災を目的とした自然渓流の観測の難しさを感じた。計器を設置して長期観測を行うためには，設置個所の地権者の了解を得る必要がある。しかし，土石流が発生する渓流の多くは私有地であり，土地所有者を調べることも個人情報保護の関係で容易ではない。さらに調べた結果土地の境界が未確定である箇所もあった。今回は熊野町役場に地権者を調べていただき，さらに研究の趣旨を説明していただいたため，短時間で円滑に了解が得られた。行政の協力が得られなかった場合は，計器の設置は難しかったと思わ

れる。また，厳しい自然環境の中で通信やバッテリーの不調等による欠測が高い割合で発生したことも大きな課題である。豪雨が続く時期は渓流内への立ち入りも危険となるので，防災上の判断に使用する上で計測の安定性は本質的に重要であり，さらなる技術開発によって改善を図る必要がある。筆者らは，今後も住民の方々や熊野町役場の協力を得て，計測システムを改善しつつセンシングを継続し，社会実装を目指したいと考えている。

謝　辞

本研究の実施には，川角大原ハイツ自主防災会，大原ハイツ復興の会，技術士会中国本部防災委員会，熊野町町役場に多大なご協力をいただいている。深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

1）土田 孝：2018年7月の西日本豪雨による土砂災害の特徴，地盤工学会誌，Vol. 67，No. 7，pp. 1-3（2019）
2）山田 孝，南 哲行，水野秀明：土石流災害防止のためのセンサー開発の現状と今後の課題，砂防学会誌，Vol. 50，No. 5，pp. 60-64（1998）
3）吉永子規，清水武志，藤村直樹，石塚忠範，武澤永純：可搬型振動センサーを用いた土石流振動の現地計測，砂防学会誌，Vol. 68，No. 1，pp. 52-59（2015）
4）武澤永純，田中秀基，山越隆雄：振動検知式土石流センサーの検知基準値の設定方法，土木技術資料，Vol. 47，No. 4，pp. 32-37（2005）
5）土田 孝，森脇武夫，熊本直樹，一井康二，加納誠二，中井真司：2014年広島豪雨災害において土石流が発生した渓流の状況と被害に関する調査，地盤工学ジャーナル，Vol. 11，No. 1，pp. 33-52（2016）
6）竹内 峻，後藤秀昭，熊原康博，村田 翔，岩佐佳哉，山中 蛍，元吉梨奈子，中田 高，内山庄一郎：広島県の斜面崩壊の詳細分布図，2019年度日本地理学会春季学術大会，（2019）
7）長谷川祐治，中谷加奈，海堀正博，里深好文：土砂災害警戒区域内の住宅地における土石流の危険度分布の検討，土木学会論文集B1（水工学），pp. I_181-I_186（2019）
8）林 聖也，中谷加奈，小杉賢一朗，長谷川祐治，里深好文：平成30年7月豪雨で発生した土砂移動・土砂流出の数値シミュレーション，砂防学会研究発表会概要集，pp. 485-486（2019）
9）土田 孝，橋本涼太，大町正和，梅本秀二：土石流災害を対象としたワイヤレスセンサーを用いた渓流監視システムの開発，地盤と建設，Vol. 38，No. 1，pp. 77-82（2020）