

土石流災害を対象としたワイヤレスセンサーを用いた溪流監視システムの開発

Installation of Wireless Sensor for Monitoring Debris Flow Disaster

土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学防災・減災研究センター)
橋本涼太	Ryota HASHIMOTO	(広島大学大学院先進理工系科学研究科)
大町正和	Masakazu OMACHI	(株式会社計測リサーチコンサルタント)
梅本秀二	Shuji UMEMOTO	(株式会社計測リサーチコンサルタント)

広島県の土石流災害の特徴から、多くの住宅が立地する土砂災害警戒区域の土石流危険溪流内に設置する土石流センサーを開発した。さらに熊野町川角の大原ハイツの溪流の5か所に開発した土石流センサーを設置し、地盤変位を定期的に観測する防災監視システムを構築した。センサーの設置と計測開始が2019年12月末であり、2020年6月までの半年間は大きな降雨がなかったこともあるが、定常的な変化を越える変位は観測されていない。少なくとも3年間本システムによる観測を稼働し、社会実装するための有効なデータが得られることを期待している。

キーワード：土石流，センサー，現地観測，豪雨

(IGC：C-07，E-07)

1. はじめに

2018年7月5日から7月8日にかけて降り続いた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¹⁾³⁾。このうち土砂災害（主に土石流）による死者は87名にのぼり死者109名の約80%を占めた。広島県では2014年8月の広島豪雨災害においても土砂災害によって74名が亡くなった⁴⁾。近年頻発する豪雨に対して、土砂災害による人的被害をいかに軽減するかは、広島県において大きな課題となっている。

2018年西日本豪雨災害の直後に広島県は豪雨時の避難行動に関するアンケート調査を行ったが、それによると土砂災害警戒区域内の住民で、何らかの避難行動をとった人は30%であり、内訳は避難所あるいは親戚友人宅への避難が13%、自宅内避難が17%であった。一方、土砂災害警戒区域の住民の70%は避難行動をとっていないかった。また、避難の時期に関する回答によると、避難した人のうち災害発生前に避難した人は21%で65%は災害発生後の避難であった⁵⁾。この結果は、2014年8月豪雨災害の経験にも関わらず、約4年後の2018年西日本豪雨において、早期の避難を実施した人の割合がきわめて少なかったことを示している。

近年、日本各地においてこれまで経験したことのない規模の豪雨により深刻な水災害、土砂災害が発生しているが、砂防堰堤などのハード対策には多大な時間と費用を要するため、当面は早期避難を実施することによって被害軽減を図らざるをえない。土砂災害警戒区域など土砂災害のリスクがある地域の住民に、豪雨時に早期避難

を促す策が強く求められているといえる。本研究では、土石流危険溪流において溪流の状態を常時モニタリングすることにより、豪雨時に住民に早期避難を促すシステムの開発を行った。

土石流危険溪流における土石流のモニタリングには、これまでワイヤーセンサーが多用されてきた⁶⁾。土石流がワイヤーを切断すると警報が出る仕組みで構造が簡単で検知が確実であるが、連続して発生する土石流が検知できないこと、動物がワイヤーを切断することなどによる誤警報、地形条件が厳しい溪流内で設置や張り替えに手間を要するという短所も指摘されている。これまで設置された例のほとんどが溪流で工事を実施する際の災害防止（災害復旧工事のときは二次災害の防止）など限定された期間の安全確保を目的としており、多くの場合目的が終了すると撤去されている。このほかに、振動、光、音響センサー等が開発されてきたが、振動センサー⁷⁾⁹⁾の使用実績が少数ある以外は実務ではあまり使用されていないのが現状である。

広島県の土石流災害はそのほとんどが県内に9,964か所ある土石流危険溪流で発生しており、本研究はこれらの溪流による土砂災害警戒区域の住民の安全安心を目的とした土石流センサーの開発を目的とした。この場合センサー設置後は長期間継続して使用し、常時住民に溪流の情報を提供するシステムとすることが必要であり、システム設置や維持に要する費用も低廉であることが必要になる。このような条件を満足する土石流監視システムはまだ実用化されていない。

本研究では、土石流の動きを予測して溪流内に傾斜計を用いた土石流センサーを広範囲に配置し、取得したデータを最新の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、地域住民がいつでもどこでも簡単に溪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。

次に、本システムを熊野町川角地区大原ハイツの背後の溪流に設置し、2019年12月末より情報提供を開始した。ここでは、開発したシステムの概要と土石流危険溪流における設置方法、観測データの提供方法について報告する。

2. ワイヤレス土石流センサーの開発と計測システムの設計

広島における土石流災害の特徴は、小規模な谷地形(溪流)において豪雨により土石流が発生すること、県内の危険箇所数が多く(9,964か所)土砂災害警戒区域(土石流)に多数の住宅が存在することである。警戒区域に居住する住民の安全に貢献できる土石流センサーの目的として以下の3つが考えられる。

- (1)住民が、近接する土石流危険溪流の地盤変位情報に日常的に接することによって警戒の意識が高まり、豪雨時の早期避難の実践に結びつくことが期待できる。
- (2)2018年西日本豪雨で広島県内の土砂災害発生箇所は1242か所とされているが、溪流内で被害発生に至らない大きな土砂移動が多数発生していることが明らかになっている。図-1は後藤らが航空写真により土砂の移動量から求めた土石流発生箇所と斜面崩壊地点であるが両者は計9,155か所であった¹⁰⁾。このことは豪雨によって被害が発生しないが溪流内では大きな土砂移動が起こる場合が少なくないことを示しており、センサーにより溪流内の土砂移動を把握できれば早期避難の必要性和効果を確認できる。
- (3)溪流のモニタリング結果により避難が遅れた住民に対して、土砂の動きが発生したことを通知し直ちに危険回避行動を促す緊急情報を発する。ただし、この使い方は、観測により有効性を実証した後でないと危険であるので当面は避けるべきである。

本研究で開発する土石流センサーは、溪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ことを目的としており、以下の条件を設定してセンサーの開発を行った。

- (1)自然溪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)広島県において土石流災害における土砂流出量は3,000～30,000m³であるが、段階的に土石流が発生すると想定し1,000～3,000m³程度の土石流の流出があるまで地盤変位を観測できる頑丈さを有する。
- (3)モニタリングによる防護対象が住宅地なので設置と維持管理を住民が負担する必要がある(行政からの一部補助は考えられる)。この観点から設置費と維持費は

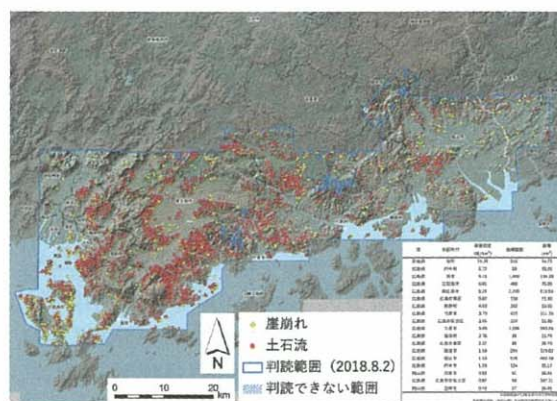


図-1 広島県内の土石流発生地点と斜面崩壊地点¹⁰⁾



測定範囲	-30° ~ +30°
分解能	0.015° / mV
電源電圧	DC6~15V
消費電流	無負荷時4mA
防水・耐衝撃性	水深100m, 100G以上
本体寸法	Φ25 × H64mm
重量	42g

図-2 地盤変位の計測に用いた傾斜計とその仕様

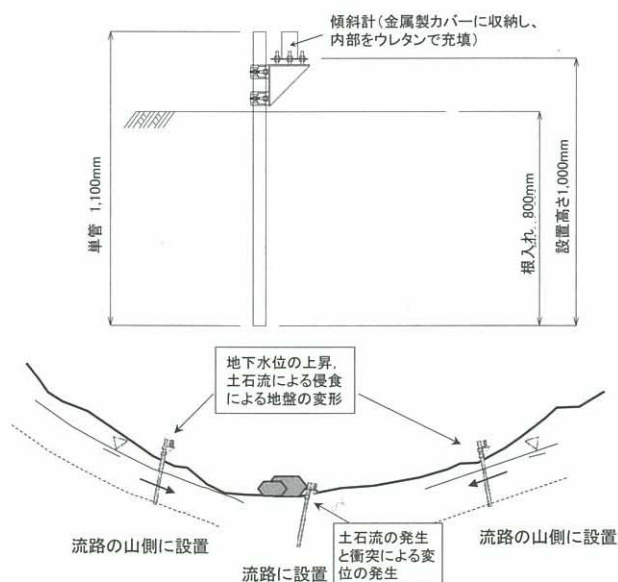


図-3 傾斜計を用いた土石流センサーの構造と溪流における地盤変位の計測

低廉にする必要がある。

検討の結果、傾斜計を用いて地盤の変位を測定するセンサーとしてその構造を設計した。図-2に使用した傾斜計とその仕様を示す。センサーの最小分解能は0.015°、計測できる範囲は-30°～+30°である。図-3は、傾斜計と治具を組み合わせたセンサーの構造と溪流に設置して変位を計測するイメージである。図に示すように、長さ110cmの鋼製パイプに傾斜計を固定し、地盤内に80cm埋め込む。傾斜計はカバーに収納して地盤から20cm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。センサーは危険溪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 0.26mm，計測範囲は±50cm である．

本センサーのコストは傾斜計と治具を合わせて 1 個約 48 千円であり，送信機（2 点を送信）の費用は 1 台あたり約 220 千円でバッテリー（約 30 千円/個）を 6 か月に 1 回交換する必要がある．受信機を加えた設備全体の費用は約 200 万円であった．これらは実装を想定しても現実性のある費用であると考えられる．

次に，溪流に設置したセンサーが計測した地盤の変位量を監視するため，図-4 に示す計測システムを構築した．図のように，各測点における地盤変位量は送信機で送信し，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る．これによって，管理者だけでなく地域住民の方々も随時データを閲覧することができる．

データを通信する方法として，消費電力は大きいものの高速通信・大容量であるモバイル通信（LTE や 5G）と，通信速度は低いが低消費電力である程度広い範囲をカバーできる LPWA（Low Power Wide Area）がある．本システムではセンサー設置箇所である溪流内に電源を準備することは現実的ではないため，LPWA を使用した低消費電力のシステムとした．地盤変位量の測定間隔は使用した機器によるデータの送信時間とバッテリーの消費量等を考慮して 10 分とした．豪雨によって急速に溪流の状況が変化する場合，測定間隔を小さくすることが必要になる可能性があるが今後検討したいと考えている．

3. センサーを設置する溪流と設置位置の検討

本研究の目的を達成するためには開発したセンサーを土砂災害警戒区域を有する危険溪流に設置し，モニタリングを継続しその有効性を検証する必要がある．2018 年西日本豪雨災害の調査結果をもとに本センサーを設置する溪流に関する検討を行った．

西日本豪雨災害で 12 名が犠牲になった熊野町大原ハイツの土石流では，土砂災害警戒区域を指定するために実施した基礎調査による想定発生土砂は 4,868m³であったが，実際には 12,100m³と 2 倍以上の土砂が発生した．図-5 は，2014 年以降の基礎調査に基づく土砂災害警戒区域と特別警戒区域である．図のように土砂の発生を想定した溪流は 1 本で，特別警戒区域は氾濫開始点の近傍に設定されており，住宅のある地域は含まれていなかった．図-6 に土石流の発生状況を示すが，図のように源頭部の崩壊箇所だけで少なくとも 3 か所あり，このことから本溪流で発生した土石流は複数回に団地内に流入したと考えられる．

図-5 と図-6 では土石流発生規模が大きく乖離しているがその一因として，設定した氾濫開始点が基礎調査



図-4 クラウドを用いた計測システム



図-5 熊野町大原ハイツ上の溪流の特別警戒区域と警戒区域の指定（被災前，広島県防災 Web）



図-6 熊野町大原ハイツの土石流（写真：平成 30 年 7 月西日本豪雨に関する情報，国土地理院）



図-7 熊野町の被災後の状況

での想定と実際の災害で異なっていたことがあげられる．図-5 では溪流内の比較的高い位置が氾濫開始点となっているが，2018 年西日本豪雨災害の豪雨は土石流発生後も強い降雨が継続し土石流の流動性が高まり氾濫開始点がより下流に移動した可能性が考えられている⁵⁾．図-7 は発災後の被害の状況であるが，図のように土石流には巨石が非常に多く含まれていた．

このように熊野町大原ハイツにおける土石流災害は，土砂災害防止法による警戒区域，特別警戒区域の指定に



図-8 二次元土石流シミュレーションの結果例
(土石流を赤で表示, 上から下へ流出過程を示す.
写真は国土地理院による)

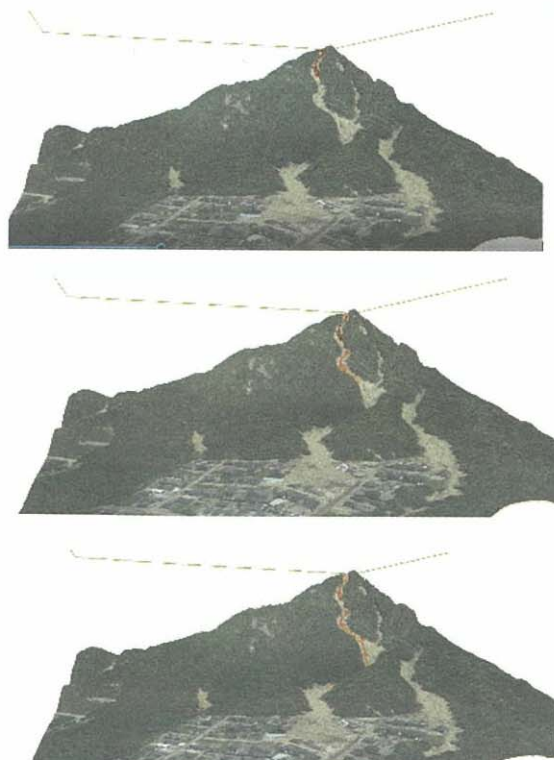


図-9 三次元土石流シミュレーションの結果例
(土石流を赤で表示, 上から下へ流出過程を示す.
写真は国土地理院による)

において想定した土砂発生量を大幅に上回ったが、土石流は複数回にわたって発生しており大規模な土石流の発生に先立って小規模な土石流や地盤の変位が発生したと推測された。このような災害発生状況であった場合、開発した土石流センサーで地盤変位を観測することは、初期の土石流発生による地盤の変位から溪流内の異常発生を検知し、緊急的な避難情報を出すことが期待できる。

土石流センサーの設置位置を検討するため、GIS と連携した土石流シミュレーションシステム Hyper KANAKO を用いて、シミュレーションを実施した^{11,12)}。2018 年西日本豪雨においてもっとも多く土砂が発生した溪流の源頭部から 1,000m³ の土砂を流出させ土石流の流路を検討した。図-8 に二次元シミュレーション、図-9 には三次元シミュレーションの結果例を示した。人命や住宅に大きな被害をもたらす土石流の総流出量は 3,000m³ 以上であるが^{2)・4)}、本センサーは被害発生前の土石流の検知を目的としているため流出量を 1,000m³ とし、これらが通過する可能性の高い箇所という観点で設置位置を検討した。これらの結果をもとに、土石流センサーの設置位置を図-10 のように決定した。



図-10 熊野町川角大原ハイツの溪流におけるセンサー・送信機と受信機の設置位置 (写真は国土地理院による)



図-11 溪流の地盤内に打ち込んで設置した土石流センサー

4. 土石流モニタリングシステムの実装

本システムを実装するための手続きと設置作業を以下のように実施した。

(1) センサー設置箇所は 5 か所とし、1 か所にセンサー 2

点と送信機 1 台を設置した。

(2) 土石流シミュレーションの結果より決定したセンサー設置位置について、溪流を踏査して設置条件を確認

した。受信機(1台)との通信状態を確認し、受信機の設置場所の候補を選定した。

(3)センサーを設置して実証実験を実施したい旨を熊野町危機管理課に説明し、協力依頼を行った。その結果、協力をいただけることになった。本研究の目的を考えるとモニタリングは少なくとも3年程度は継続して実施する必要があるため、センサーの設置には土地所有者の了解を得る必要がある。今回は、熊野町の多大な協力と支援により、土地所有者から了解をいただくことができた。

(4)センサーを設置する溪流では広島県により砂防ダム2基の建設工事が進められていたため、広島県庁に土石流センサーの設置を説明し協力を依頼して承諾を得た。

(5)事前踏査の後、2019年12月24日に土石流センサーを5か所各2点(全体で10点)に設置した。図-11は溪流内の地盤に打ちこむことにより設置した土石流センサーの状況である。図-12は測点5における土石流センサーと本溪流の源頭部との位置関係を示している。

図-13はセンサー位置から約20m離れた樹木に送信機を固定した状況である。

(6)設置した溪流は山に囲まれているため、受信機と送信機の間で安定した通信状態の確保が重要になる。本研究では、大原ハイツ復興の会の役員の方の自宅が通信の条件が良好であったので、了解を得て受信機を設置した(図-14)。

(7)川角大原ハイツ自主防災会と大原ハイツ復興の会の役員の方々、熊野町危機管理課、協力者である技術士会中国支部防災委員会に対して、センサーの設置と計測開始を報告し、パソコンによる計測データ表示システムに関するヒアリングを実施した。計測データの表示方法に関して説明会で指摘された意見に基づき、改善を行った。

クラウドを用いて計測した地盤変位に関わる情報を、パソコンからクラウドに接続し簡単に入手するシステムを構築した。

図-15は現在の地盤変位の状況を表示している。図のように、5か所10計測点における地盤の変位をmm単位で表示する。計測は10分間隔である。図-16は地盤変位の経時変化図である。計測は2019年12月末から開始したが6月20日までの間で各センサーの日変動が観測された。変動量はいずれも±約2mmであるが、これは傾斜計の温度による変動としてほぼ説明できている。図-17に熊野町に設置された広島県の雨量計による日降雨量を示すが、最大は6月14日の96mmあった。図-18は6月11日から18日の測点1の2つの計測点の地盤変位であるが、降雨は変位に全く影響していない。

本システムは、設置した溪流の住民に使用してもらうことを目的としているので、地盤観測データ提供方法について、川角大原ハイツ自主防災会と大原ハイツ復興の会の役員の方々よりヒアリングを行った。意見の要約を以下のものであった。



図-12 溪流の地盤内に打ち込み設置した土石流センサーと溪流内の位置(測点5)



図-13 樹木に固定した送信機



図-14 受信機の設置状況

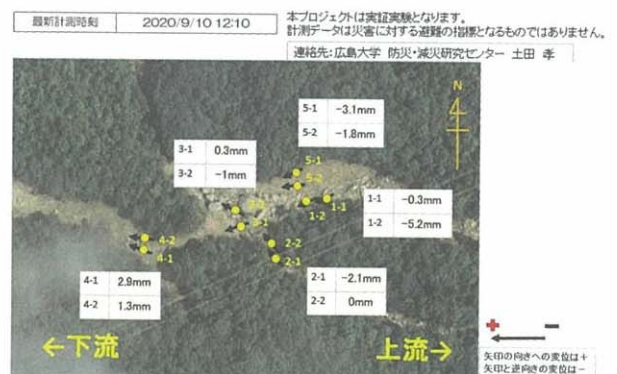


図-15 溪流内の地盤変位の表示例(写真は国土地理院による)

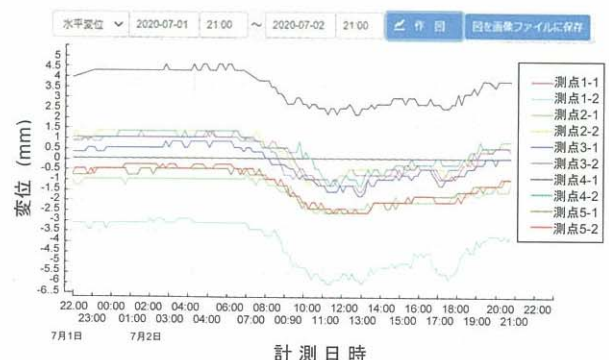


図-16 溪流内地盤変位経時変化図の表示例

- ・パソコンだけでなくスマートフォンから溪流内の地盤変位の情報を随時得られるようにしてほしい。
- ・地盤変位が異常が生じた場合に直ちにわかるように色を変えるなどの表示をしてもらいたい。
- ・本溪流の直下で熊野町町役場により温度と降雨が計測され住民に提供されている。これらを利用し降雨と温度のデータを併せて表示するとわかりやすい。

これらの意見のうち、スマートフォンによる本情報へのアクセスは7月上旬に可能になった。また、地盤変位の異常を判定し避難の情報として活用するには、指標(閾値)が必要であるが、現段階では根拠のある指標の設置ができていない。このため図-15に示す地盤変位表示画面においても「計測データは避難の指標となるものではありません。」とした。計測を継続し指標を明らかにすることが研究の目的と考えている。

5. まとめ

多くの住宅が立地する土砂災害警戒区域の土石流危険溪流に設置する傾斜計を用いた土石流センサーを開発した。本センサーを熊野町川角の大原ハイツの溪流の5か所に設置し、地盤変位の観測を開始した。今後、地元の方々の協力を得て観測を続け、社会実装のため以下の点を明らかにしていきたい。

- ・溪流内を多量の水が流れる状況でどのような地盤変位が観測されるか。
- ・今回の計測方法により豪雨時に溪流内の土石流規模の土砂の動きを捕捉できるか。
- ・計測点の選定は妥当であったか。

謝辞

川角大原ハイツ自主防災会、災害後に結成された大原ハイツ復興の会、熊野町危機管理課、技術士会中国本部防災委員会から多大な協力をいただいた。土石流シミュレーションは広島大学防災・減災研究センター長谷川祐治准教授に実施していただいた。本研究は科学技術振興機構による競争的研究資金 A-STEP 機能検証フェーズの予算で実施した。ご協力とご支援をいただいた方々に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) 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溪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.
- 3) 橋本涼太，森脇武夫，土田孝：平成30年7月西日本豪雨災害における地域ごとの地盤災害の特徴(中国・広島その1)，地盤工学会誌，Vol.67, No.7, pp.10-

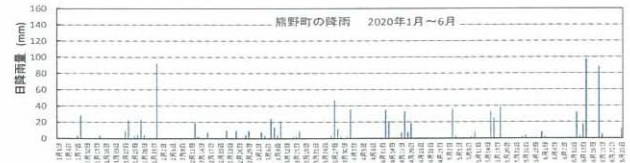


図-17 2020年1月～6月の熊野町の日降雨量

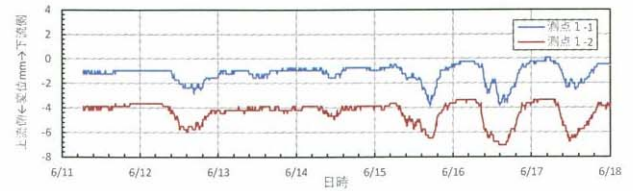


図-18 2020年6月11日～18日における測点1の動き

13, 2019.

- 4) 広島県：平成30年7月豪雨災害を踏まえた今後の水害・土砂災害対策のあり方検討会，第2回砂防部会資料3-1，土砂災害警戒区域等における検討事項(参考資料)(参考2019.12.10)，<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/332033.pdf>.
- 5) 土田孝，森脇武夫，後藤順治，今井卓也，川本暁，橋本涼太：平成30年7月西日本豪雨災害における地域ごとの地盤災害の特徴(中国・広島その2)，地盤工学会誌，Vol.67, No.7, pp.14-17, 2019.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 桜井亘，泉山寛明，高原晃宙，倉島優一，叶嘉星，樋口哲也，小林健：AI(機械学習)を活用した土石流検知センサー，2019年度砂防学会研究発表会概要集，No.84, pp.307-308, 2019.
- 10) Goto, H., Kumahara, Y., Uchiyama, S., Iwasa, Y., Yamanaka, T., Motoyoshi, R., Takeuchi, S., Murata, S. and Nakata, T.: Distribution and Characteristics of Slope Movements in the Southern Part of Hiroshima Prefecture Caused by the Heavy Rain in Western Japan in July 2018, Journal of Disaster Research, 14, pp. 894-902, 2019.
- 11) 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_847-I_852, 2019.
- 12) 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.

(2020年6月26日 受付)