

# 住宅地の土石流対策のための傾斜計を用いたセンサーによる危険溪流監視システムの現地試験

FIELD TEST OF MONITORING SYSTEM OF MOUNTAIN STREAM WITH TILTMETERS TO MITIGATE DEBRIS FLOW DISASTER IN HOUSING AREA

土田 孝<sup>1</sup>・橋本 涼太<sup>2</sup>・大町 正和<sup>3</sup>・梅本 秀二<sup>3</sup>

Takashi TSUCHIDA, Ryota HASHIMOTO, Masakazu OMACHI and Shuji UMEMOTO

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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: ryota-hashimoto@hiroshima-u.ac.jp

<sup>3</sup>株式会社計測リサーチコンサルタント (〒732-0029 広島県広島市東区福田 1-665-1)

E-mail: oomachi@krcnet.co.jp

<sup>3</sup>株式会社計測リサーチコンサルタント (〒732-0029 広島県広島市東区福田 1-665-1)

E-mail: umemoto@krcnet.co.jp

**Key Words:** debris flow, monitoring system, tiltmeter, field test, heavy rain

## 1. はじめに

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<sup>1)</sup>。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。近年頻発する豪雨に対して、広島県では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。広島県内の土砂災害警戒区域(土石流)は 16,812 か所存在し、全国最大の箇所数である。土石流による犠牲者は主に土砂災害警戒区域の住民であり、土砂災害のリスクが高い地域の住民に早期避難を促す効果的な方策が強く求められている。本研究では、土石流災害による住宅地の被害軽減を最終目的として、住宅地の上流にある土石流危険溪流の地盤変位を常時モニタリングして住民に提供するシステムを開発した。

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く用いられてきた<sup>2)</sup>。

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、地形条件が厳しい溪流内で設置や張り替えに手間を要する(設置と維持のコストが大きい)こと、誤動作の発生という短所も指摘されている。実際にワイヤーセンサーが設置された事例をみると、ほとんどは危険溪流で工事を実施する際の災害防止など限定された期間の安全確保が目的となっており、必要な期間が終了すると撤去されている。ワイヤーセンサーのほかに、土石流の流下によって発生する地盤振動によって検知する振動センサーが開発されており火山灰が堆積した地域における土石流の検知などに使用されているが<sup>2)</sup>、豪雨時における住宅地の安全の観点から自然斜面のモニタリングに適用された例はほとんどない。このほか、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<sup>3)</sup>。

住宅地を対象とした土石流のモニタリングを考える場合、危険溪流に設置したセンサーは長期間継続的に住民に溪流の情報を提供する必要がある、システムの設置と維持に要する費用が低廉であることが

求められる。この観点から、ここで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によって土石流の兆候をモニタリングすることとした。そして、溪流内の土石流の流路を予測して溪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。

本システムの適用性、有効性を調べるため、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 月末よりモニタリングを開始した。

## 2. 溪流監視システムの考え方と傾斜計を用いた地盤変位センサーおよびその通信方法

溪流の地盤の変位をモニタリングすることが土石流による災害を軽減する上で有効と考える理由として以下の 3 つが挙げられる。

第一は、大きな土石流災害において溪流に面した地盤のすべりと土石流相当の土砂移動が複数回発生している可能性が高いことである。2014 年 8 月の広島土砂災害、2018 年 7 月の西日本豪雨災害において大きな被害が生じた溪流を調査した結果、発生した土石流は 1 回ではなく、複数回であった可能性が高いことがわかった。図-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<sup>4)</sup>。図のように土石流は 3 回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ため被害は小さいが、2 回目、3 回目となるにつれて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溪流においても土石流が 2 回発生し、後続の土石流が先行した土石流堆積物の存在により住宅に接近した箇所方向を変えて氾濫し、大きな被害をもたらした。いずれの場合も溪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）が存在することが確認されている。

西日本豪雨による土石流災害においても複数回の土石流によって被害が拡大したと考えられる事例が複数みられた。図-2 は広島県熊野町で 12 名の死者をもたらした土石流であるが<sup>5)</sup>、上流において複数の土石流が発生し合流して被害を拡大した。最初に発生した土石流は基礎調査で想定した氾濫開始地点に近い箇所で氾濫を開始するが、後続の土石流は先行した土石流による堆積土砂の影響を受けるため、氾濫開始点がより下流の住宅地に近い地点に移動す

る。このため、後続の土石流ほど大きな被害をもたらしている。以上の知見より、土石流の流出特性を考慮して適切な位置にセンサーを配置して地盤の変位を観測することで、大きな災害をもたらす前の最初の土石流による溪流内の地盤変位をとらえ、危険を早期に予測できる可能性が高いと考えられる。

第二は、被害が発生しない場合でも溪流内で大きな土砂の移動が起こっており、これを把握することに重要な意味があるという点である。広島県が発表した 2018 年西日本豪雨による県内の土砂災害発生箇所は 597 か所と発表されているが、広島大学の地理学研究グループによると、航空写真から読み取った土石流相当の土砂移動箇所は 8,604 か所と 10 倍以上であったと報告されている<sup>5)</sup>。このことは、被害の発生に至らないものの土石流相当の土砂移動が溪流内で多数発生していたことを意味している。豪雨時に早期避難を行ったが住宅地は無被害という場合でも、センサーによって溪流内で大きな地盤の変位が観測される場合があると予想されるが、このことは早期避難の意義を確認することになり、継続的な早期避難につながると考えられる。

第三は、住民が溪流内の地盤変位の情報に日常的に触れることにより、豪雨が予想される状況で早期



図-1 2014 年広島土砂災害における八木 3 丁目付近の土石流の氾濫



図-2 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）

避難の意識が向上する、と考えられることである。

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) 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）。このため設置費と維持費は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。図-3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2.5cm、長さ6.6cm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100m（1Mpa）の水圧まで防水機能が維持され耐衝撃は100Gである。

図-4は、傾斜計と治具を組み合わせた地盤変位センサーの構造を示している。図のように、長さ110cmの鋼製パイプに傾斜計を固定し、地盤内に80cm埋め込む構造とした。広島県内の危険溪流の風化層の厚さは概ね50cm～2mの範囲にあるので80cmは風化層全体の変位を測定する観点から設定した深さである。傾斜計はカバーに収納し地盤から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。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±500mmである。なお、本センサーのコストは傾斜計と治具を合わせて約48千円であり、送信機の費用は1点当たり約110千円である。また、送信機のバッテリー（約30千円/個）を6か月に1回交換する必要がある。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-5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山中に設置した送信機で送信され、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が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、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）を使用した。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消費量を考慮し10分とした。



図-3 地盤変位の計測に採用した傾斜計

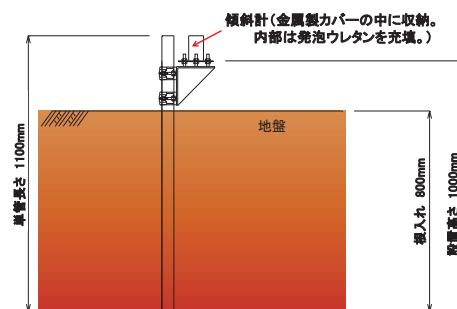


図-4 傾斜計を用いた地盤変位センサー

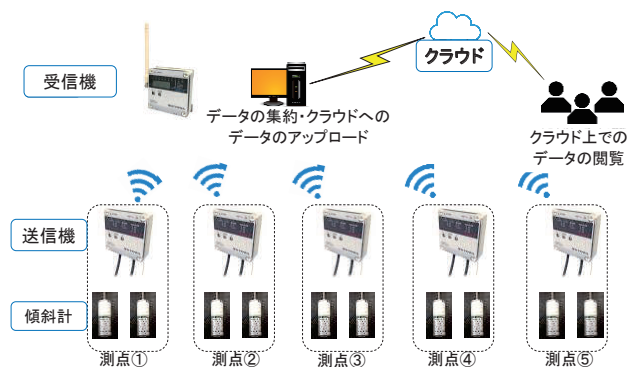


図-5 クラウドを用いた地盤変位の収集・閲覧システム

### 3. 熊野町三石山の溪流における土石流監視システムの設置

モニタリングシステムの有効性を検証するため、土砂災害警戒区域を有する危険溪流に設置することを検討し、広島県熊野町川角地区大原ハイツの上の溪流に設置することとした。

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4,868m<sup>3</sup>の2倍以上である12,100m<sup>3</sup>の土砂が発生し、団地を襲った。図-2に土石流の発生状況を示しているが、源頭部の崩壊箇所だけで少なくとも3か所あり、本溪流では土石流は複数回住宅団地内に流入したと考えられる。

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<sup>6),7)</sup>。2018年西日本豪雨においてもっとも多く土砂



図-6 溪流内のセンサーの設置位置

が発生した溪流の源頭部から 1,000m<sup>3</sup> の土砂が流出するとして土石流の流路を検討した。これらの結果をもとに、流出する土石流の付近の地盤変位観測点を図-6 のように決定した。

本システムを溪流に設置する手続きと作業は以下の通りである。

- 1) センサーは多いほど溪流全体をカバーできるが、設置予算の範囲で検討し、センサー2 か所と 2 つ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 か所設置した。各測点では、土石流の流路となる可能性の高い 2 か所を選定して地盤変位センサーを設置し、溪流の外の樹木に固定した送信機とケーブルで繋げた。
  - 2) 溪流を踏査して設置条件を確認し、受信機の設置場所を選定して通信状態を確認した。
  - 3) モニタリングを長期間（当面は 3 年）継続す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。熊野町の多大な支援によりスムーズに了解を得ることができた。
  - 4) 山に囲まれている溪流では通信環境の確保が重要となる。住民の方の協力を得て、通信条件が良好な個人の住宅に受信機を設置することとした。
  - 5) 2019 年 12 月 24 日にセンサーを 5 測点 10 か所に設置した。図-7 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-8 は測点⑤におけるセンサーと溪流源頭部との位置関係を示している。図のように、源頭部から土石流が流下した際に、地盤変位として検知されると想定される個所にセンサーを設置した。図-9 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。
- クラウドを用いて計測した地盤変位の情報をパソ



図-7 センサーを地盤内に設置した状況



図-8 センサーの位置と源頭部の関係(測点⑤)



図-9 樹木に固定した送信機

コンあるいはスマートフォンから誰でも簡単に入手するシステムを構築した。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する。図-10 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、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。計測は 10 分間隔である。図-11 は全観測点の地盤変位の経時変化図であり、任意の時間の地盤変位の変動を図示する。以上の情報はスマートフォンでも閲覧が可能である（図-12）。このように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があれば溪流の地盤変位を確認することができる。本システムを避難のための情報として活用するには、指標（閾値）が必要となる。しかし、根拠のある指標の設置は现阶段では困難であり、それ自身が研究の目的の一つであると考えている。

#### 4. これまでの地盤変位の観測結果

計測は 2020 年 1 月から開始したが 6 月 20 日までの間で各センサーの日変動が観測された。図-13 は 1 月 2 日 0 時 00 分から 1 月 8 日 23 時 50 分のセンサー①-1、①-2、④-1、④-2 の 10 分ごとの変位の推移である。図のように変位の計測値は日変動しており、その幅はいずれも±約 2 mm の範囲にある。これらの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。図-14 は、同じセンサー①-1、①-2、④-1、④-2 について、6 月 10 日から 19 日までの 10 分ごとの変位である。図をみると、それぞれのセンサーで変動の幅は図-13 とほぼ同じであるが、①-2 は上流側に 5 mm、④-1 は下流側に 2.5 mm 程度変位している。これは天候に関係なく 6 か月間に変位が少しずつ進行しているためであり、現時点でこの原因は不明である。なお、④-1,2 において欠測箇所があるがこれはバッテリートラブルによるものである。

各計測日の 0 時のデータを抽出し、前日の 0 時からの変位量を日変位として算出した。10 点のセンサーの日変位と、熊野町に設置された広島県の雨量計による日降雨量とを比較して図-15 に示した。図の

ように、観測システム設置後の最大日雨量は 6 月 14 日の 96 mm であり、2 日以上連続した大きな降雨は発生していない。図をみると、雨量と各測点の日変位にはほとんど関係がみられない。したがって、観測を開始してからこれまで大きな雨量がなかったため



図-10 溪流内の地盤変位図の表示例

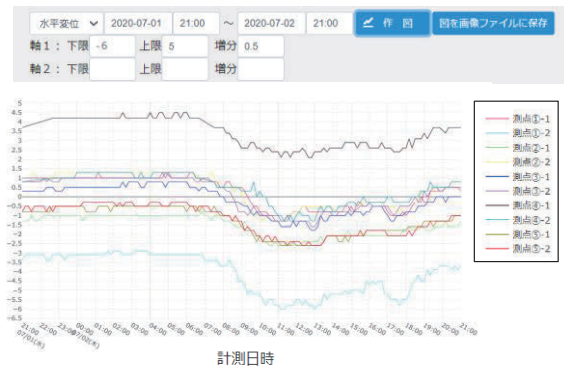


図-11 溪流内全観測点の地盤変位図の表示



図-12 スマートフォンの画面への表示

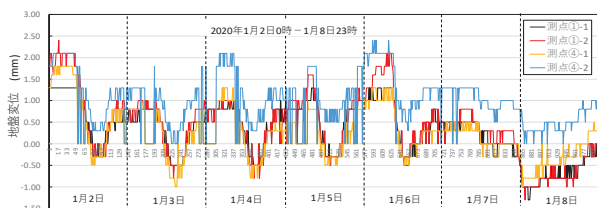


図-13 1月2日～8日の10分ごとの変位の変動

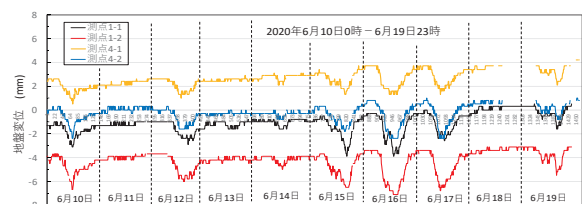


図-14 6月10日～19日の10分ごとの変位の変動

溪流の地盤の変形量にも異常がなかったと考えられる。広島県では、過去の豪雨による土砂災害は、梅雨に入った6月から9月に多く発生しており、今後雨量と地盤の変位との関係を注意深く検討していく必要がある。

## 5. まとめ

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流危険溪流に設置する地盤変位センサーを開発した。さらに熊野町川角地区大原ハイツの上流にある溪流内の5か所に開発したセンサーを設置し、地盤変位を随時観測する防災監視システムを構築した。その費用は行政から一定の補助があれば(現在は住宅強靱化の助成がある)住民が負担可能な範囲に収めることができたと考えている。センサーの設置と計測開始が2019年12月末であり2020年6月まで観測を行った。この間大きな降雨がなかったこともあるが、定常的な変動を越える変位は観測されていない。地権者から3年間計測を続けることについて了解を得ており、住民の方々と熊野町役場から協力を得て本システムを稼働し、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。

**謝辞：**本研究の実施に当たり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から多大な協力をいただいた。熊野町町役場からも一貫して支援をいただいた。被災地における現地観測システムの構築は、これらの方々の理解と協力がなければ到底実現できなかった。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A-STEP機能検証フェーズの予算によって実施した。ここに記して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) 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.
- 3) 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.
- 4) 土田孝，森脇武夫，熊本直樹，一井康二，加納誠二，中

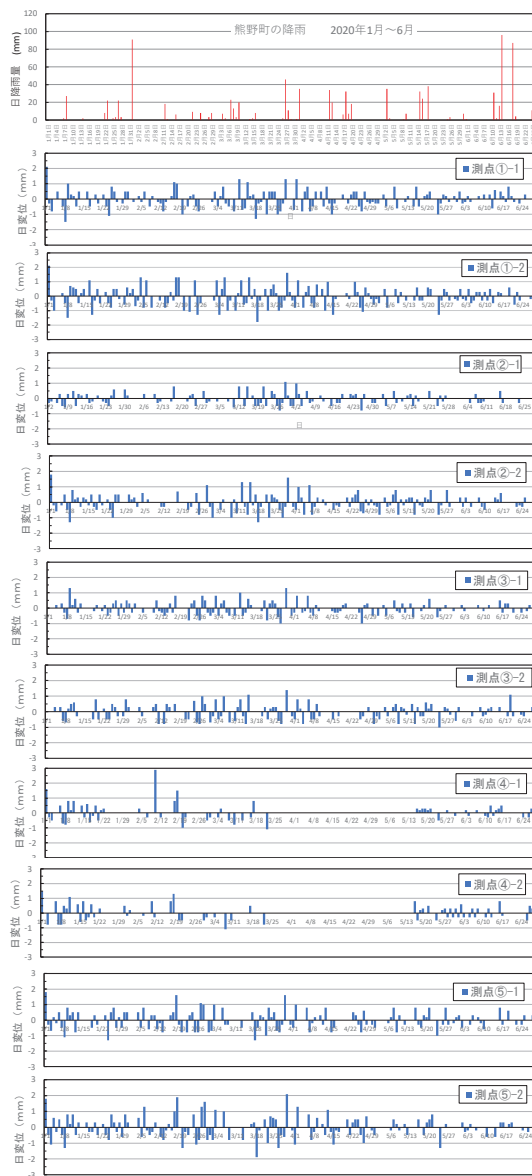


図-15 2020年1月～6月の熊野町の日降雨量と計測点の日変位

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.

- 5) 竹内峻，後藤秀昭，熊原康博，村田翔，岩佐佳哉，山中蛭，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.
- 6) 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.
- 7) 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.

(2020.7.1 受付)