

地域コミュニティにおけるIoTを用いた土砂災害に関する観測システムの開発

上山遥路^{†1} 畑山満則^{†2} 山内英之^{†3} 吉田信明^{†3} 河野 剛^{†4}

概要：行政機関は土砂災害発生の際に、市町村長の避難勧告発令や地域住民の自主避難の判断材料として土砂災害警戒情報を発令している。しかしながら、土砂災害は非常に予測が困難な災害であるため本情報は広域すぎる領域を対象としており、さらには適切なタイミングで発令できていない現状である。一方で、近年はクラウドサービスの充実化などの情報社会化が急速に進み、安価で地域コミュニティでも運用可能な観測環境と分析システムの構築が可能となりつつある。そこで本研究は、地域住民の自主避難を促進することを目的とするIoTを活用した地域内の局所的な気象・環境データを観測・可視化するシステムの開発を試みた。具体的には、急傾斜地源頭部における土壌水分量、対象地域の降雨量および小河川の水位を観測し、クラウド空間上にデータを集約ならびに可視化する。さらに、本システムの導入による地域住民の意識・行動への変化について報告する。

キーワード：土砂災害，自主避難，IoT，土壌水分量

Developing of Monitoring System for Local Community Related Sediment Disaster Using IoT

YOJI UEYAMA^{†1} MICHINORI HATAYAMA^{†2}
HIDEAKI YAMAUCHI^{†3} NOBUAKI YOSHIDA^{†3} TSUYOSHI KAWANO^{†4}

1. はじめに

我が国では土砂災害危険箇所が多数存在し、豪雨による土砂災害が例年多数発生している。人的被害の軽減のためには、周辺状況の変化や行政からの情報をもとに災害発生前に避難することが住民には求められる。特に砂災害は局所的かつ突発的な災害なことから、発生する予測は非常に困難であるため、地域住民の自主避難が重要になる。現在、気象庁と都道府県は土砂災害発生の際に、市町村の避難勧告発令や地域住民の自主避難の判断材料として土砂災害警戒情報を発令している。しかしながら、本情報は雨量データをもとに算出しているため、5kmメッシュを対象にしている。したがって、自宅周辺の斜面の危険度が知りたい住民にとって広すぎる情報である。さらには、地域住民は防災行動に対する行政依存意識がある一方で、仮に情報を取得したとしても、その情報に基づいた適切な行動を取っていない問題がある。そのため、地域住民が自主避難を促すことができるシステムや体制づくりが求められている。

そこで本研究は、近年のIoT技術や情報技術の向上を活かし、地域住民に自主避難を促すことを目的とした地域内

の気象・環境データの観測システムの開発および導入を試みた。具体的には、急傾斜地源頭部における土壌水分量、地域の雨量ならびに小河川の水位を計測する。ただし、地域の雨量と小河川の水位の計測に関しては、過去の研究や取り組みで行われているため、本稿では急傾斜地源頭部における土壌水分量の計測を主題として記述する。

2. 研究背景

2.1 我が国における土砂災害の被害

我が国では多種多様な自然災害が発生しているが、特に山地が多いため豪雨による土砂災害が例年多数発生している。さらには、土砂災害の原因となる斜面崩壊の規模には表層崩壊と深層崩壊の2種類が存在する。一般的に斜面は固く水を通しにくい基盤とその上に載るゆるい土壌で構成されている。表層崩壊とは降雨や地震などによって発生し、土壌が崩れる比較的小さな崩壊現象である。降雨による表層崩壊は、水の浸透によって土壌と基盤との境界での摩擦力が小さくなることが原因で発生する。一方、深層崩壊とは基盤ごと崩れる現象で、表層崩壊よりも発生する頻度は稀であるが、崩壊の規模は大規模になることが多い。

現在、政府は砂防施設の整備や警戒避難体制の構築など

^{†1} 京都大学大学院 情報学研究科
Kyoto University.

^{†2} 京都大学 防災研究所
Kyoto University

^{†3} 公益社団法人 京都高度技術研究所
ASTEM RI

^{†4} 株式会社イージーサービス
E.G.Service Corporation

が順次進められているが、全国の土砂災害危険箇所は約 53 万箇所と言われており、対応がまだ行き届いていないことがある[1]。また昭和 42 年から平成 24 年までの兵庫県南部地震を除いた自然災害による犠牲者数のうち、土砂災害による犠牲者数は約 4 割を占めている[2]。これは土砂災害が局所的かつ突発的に発生する災害であり、発生する予測が非常に困難であることが関係している。

2.2 土砂災害に関する避難情報の現状

そのため、土砂災害による人的被害を軽減するためには、住民自らが判断して避難する自主避難が求められる。そのためには災害情報の利活用が必要である。気象庁と都道府県は土砂災害発生危険度が高まった際に、市町村の避難勧告発令等や住民の自主避難の判断材料として土砂災害警戒情報を発表している。しかしながら、過去の運用成績によると、土砂災害警戒情報を発表した時に人および住宅に被害があった土石流またはがけ崩れ等が発生した割合は約 4%である[3]。つまり、土砂災害警戒情報は地域住民への避難を促す情報としては、確度の低い情報である。

この原因として、上述のように土砂災害は局所的に発生する特徴があるにもかかわらず、5km メッシュの範囲が対象であることが考えられる。土砂災害の外的な発生要因には現在の降雨量と土中に貯まっている水分量(土壌水分量)が大きく関わっていることから、タンクモデルと呼ばれるモデルを用いて斜面の土壌水分量に相当する土壌雨量指数を横軸に 60 分間積算雨量を縦軸にとって各時刻の値をプロットする(スネーク曲線)。座標上には、土砂災害発生の基準を示す臨界線(土砂災害発生危険基準線: CL)が引かれ、その右上の領域にスネーク曲線が侵入した時点で土砂災害が発生すると考えており、そのことが予測された場合に土砂災害警戒情報を発令する仕組みとなっている。

しかしながら、タンクモデルを用いた土壌雨量指数は現在の降雨量とあらかじめ設定された全国一律のパラメータから算出されている。つまり、スネーク曲線は現在の降雨量のみで引かれている現状である。降雨量はレーダー・アメダス解析雨量からの数値を用いており、これは 5km メッシュで出力するため、土砂災害警戒情報の対象範囲も 5km メッシュになるのである。

さらには、近年多発しているゲリラ豪雨のような局所的な集中豪雨については、いつどこで発生するのかを予測することに技術的な限界があり、雨の降り始めから災害の発生までが非常に短時間である。そのため、上述の土砂災害警戒情報の特性により、行政が災害情報、避難情報を適切に運用することは困難であると言える。

2.3 避難情報に対する住民の反応

しかし、行政による防災対応に限界があるにもかかわらず、住民の防災対応に関する行政依存意識が存在することが明らかである。例えば、片田らの調査によると、「避難勧告さえ出していればこのような被害にならなかった」との声

や、「避難情報を適切に発表してくれれば、それで何とかかなる」と思っている住民が高い割合で存在していることが報告されている[4]。そして、防災対応に関する行政依存は住民の主体的な防災行動を阻害する要因の一つであると指摘されている。

その一方で、仮に行政から十分な余裕時間をもった適切なタイミングで避難情報が発表され、住民がその情報を取得したとしても、期待されるような避難行動をとっていないことが、過去の被災地調査の結果より報告されている[5]。

すなわち、我が国の災害時の住民避難は、多くの住民が行政からの情報に依存しているにもかかわらず、仮に情報を取得したとしても、その情報に基づいた適切な行動をとっていない問題を有していると指摘できる。

2.4 超スマート社会の推進

政府は Society 5.0 の実現に向け、IoT や AI、クラウドサービスといった最新テクノロジーの活用に注力している。Society 5.0 とは、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会である。これによって、IoT 技術の進歩から観測機器を構成するセンサが安価となり、ユビキタス環境の整備とクラウドサービスの充実といった情報技術の進歩により、取得したデータの共有やタイムリーな分析結果取得が容易となった。つまり、小さい組織でも安価で容易に情報システムの構築・運用が可能となった。

3. 研究目的

地域と連携しながら土砂災害に対して自主避難を促すことができる地域内の気象・環境データを観測するシステムを開発・導入する。具体的には、IoT 技術、情報技術を用いて急傾斜地源頭部における土壌水分量、対象地域の雨量ならびに小河川の水位を計測する。それによって、政府の情報と比べて局所的で地域住民にとって親和性の高い情報が出すことができる。ただし、対象地域の雨量と小河川の水位については、既に過去の研究や取り組みで行われているため、本稿では急傾斜地源頭部における土壌水分量の計測について報告することを目的とする。

4. 既往研究

様々な企業や研究機関によって、土砂災害による人的被害を軽減するために土砂崩れといった自然現象を検知・予測するシステムの開発と情報の受け取り側である地域住民の意識や行動の変容を促す研究が存在する。

前者の具体的として、加速度センサを取り付けた杭を斜面に立てておき、杭の傾きから斜面崩壊を検知するスマート杭や、谷筋を横断する形でワイヤーを張り、そのワイヤーが土石流の流下により切断されることで検知するワイヤーセンサがある。また、土砂災害を予測するシステムとして、沖電気工業は傾斜センサ、土壌水分センサおよび無線

通信装置を取り付けた装置を設置し、一定間隔ごとに計測および無線通信するシステムを開発している[5]。さらには、NEC も土壤水分センサの取得データからデータ解析を行って土の特微量を算出し、斜面の安定解析式をリアルタイムに計算するシステムを開発している[6]。

一方で、片田や矢守らは災害のおそれのある地域で行政による公助に依存せず地域住民が主体となった自助力、公助力の向上を目的としたリスク・コミュニケーションを用いた取り組みを行っている。リスクコミュニケーションとは、リスクについて住民や自治体といった関係者間で情報や意見を交換し、その問題についての理解を深めたり、お互いによりよい決定ができるように合意を目指したりするコミュニケーションのことをいう。片田らは群馬県町栗沢地区を中心に数回、地域住民と土砂災害に関する懇談会を行ったのち、地域住民が主体となった防災マップや自主避難ルールの作成を行っている[7]。作成した自主避難ルールは大雨などの土砂災害発生危険時において、地域住民全員が危険箇所を把握する役割を担い、予兆現象が確認された場合には地域のリーダーにその事実を連絡する。そして、あらかじめ決めておいた一定量の予兆現象が確認されたとの連絡があった際には、地域住民全員に自主避難を促すものである。矢守・竹之内は三重県伊勢市中島学区において、気象台、自治体、住民の参加のもと地域気象情報の共同構築を行った[8]。地域気象とは、現在の専門性の高い膨大な気象情報を地域性の高い身近な表現を利用した情報に変換し、状況把握と危機意識の事前醸成を助け、早期の災害に対する対応行動へ結びつけることを目的としている。さらには、矢守・李らは高知県黒潮町や茨城県大洗町で、地域住民が災害直後から復興期に至るまでの間に直面した社会的課題を防災ゲーム「クロスロード」として自ら表現し発信する活動を支援している[9]。

しかしながら、片田らの前兆現象を活用した住民主導型避難体制の確立では、行政依存から払拭し主体的な自助意識の形成を促すことに大きく貢献できるものの、自主避難の判断材料としては未だ問題がある。具体的には、人間が予兆現象を確認できる範囲は狭隘であることや、予兆現象の規模が定性的な観測になってしまうこと、情報共有に時間を要すること、および区長が不在の場合は情報共有が不能になる可能性がある。また、沖電気工業の開発したシステムは、自社の駐車場にある斜面でテストと人工降雨中での通信実験のみで実際に土砂災害のおそれのある地域での導入には至っていない。また、NEC のシステムは、実験場において人工降雨による斜面崩壊実験や島根県津和野町をはじめ全国約 10 ヶ所で実証実験を行っているが、地域住民や自治体との協力のもとで実施していない。そのため、これらのシステムが実際の地域住民に対して、地域住民の主体的な自助力、公助力を向上させ、自主避難を促す効果があるのかは検証していない。

5. 地域コミュニティにおける IoT を用いた観測システムの提案

5.1 提案システムの概要

システム概念図を図 1 に示す。本システムは安価で地域コミュニティでも運用できる気象・環境データの観測システムを構築する。NEC のシステムのように斜面安定解析式を用いて、斜面崩壊を予測するのではなく、土壤水分量の異常値を監視し、それを地域住民と共有することで自主避難を促すものである。また、本システムでは発生頻度が高く地域住民にとって気掛かりになることが多い表層崩壊をターゲットとする。

5.2 急傾斜地源頭部における土壤水分量の観測

土壤水分量の観測はタンクモデルといった間接的に土壤水分量を求めるのではなく、土壤水分センサを用いて直接計測を行う。土壤水分センサを用いて土壤水分量を計測する場合、土壤水分センサと水圧計と併用して設置し、飽和状態でも計測できるようにするのが一般的である。しかし、水圧計は非常に高価であるため、今回は土壤水分センサだけを用い、それを表層付近、中間地点および基盤上部の 3 点の深度で計測することで土壤全体がどのように浸透・飽和していくのかを観測する。想定される大雨時の飽和の過程として、降雨の影響が最も大きい地表面がまず最初に飽和する。土壤内を浸透していった雨水は、やがて基盤に到達する。基盤は水を通しにくいいため基盤上を流下していき、流下する雨水が多くなると水位が形成され、基盤上部が飽和する。そして、降雨による浸透もしくは水位の上昇により、最後に中間地点が飽和される。

無線通信装置と土壤水分センサを有する IoT デバイスを地域の土砂災害発生の恐れがある急傾斜地源頭部等に設置する。見晴らしが良くかつ Wi-Fi 環境のある場所にゲートウェイを設置し、そこに土壤水分センサの計測データを集約およびクラウド空間上にアップロードする。

5.3 地域観測情報 DB 管理・可視化機能

計測されたデータは自動的にクラウド空間上に集約・保管される。集約されたデータは地域住民と共有するためにウェブサイト上に GIS ベースで地域観測情報の可視化を行

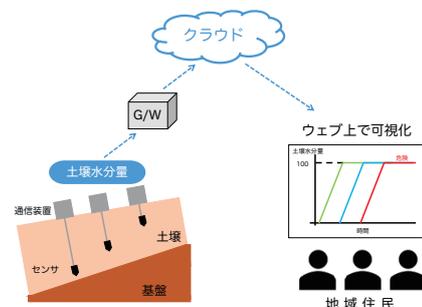


図 1 システムの概念図

う。

6. 提案システムの設計

6.1 土壌水分センサ

研究等の計測で用いられる土壌水分センサは一つ 15,000 円程度の高額で品質が保証されているものがよく用いられている。このようなセンサは出力電圧を体積含水率に変換する校正式をメーカーが公表している。しかし、本研究では、将来的には地域での運用や地域に数多く設置する目的からコスト面を重視しメーカーから校正式が公表されていない、一つ約 1000 円のセンサを用いた (図 2)。また、センサの電極部が剥き出しであるため、水分によるショートを防ぐ目的として電極部にコーキングを行った。

6.2 通信装置

通信は LPWA (Lower Power Wide Area) 方式の LoRaWAN を採用した。LoRaWAN は LoRa デバイス、ゲートウェイおよびネットワークサーバの 3 つで構成されており、日本では免許不要のサブギガ帯である 920MHz の特性を活かし、非常に低速ながら低消費電力で、長距離伝送することができる。具体的には、送信時の電力は 20mA 程度で、待機時はその 1/100 である。送信距離は規格上では 10~20km 程度で、日本において使用できる現状の最大無線出力では、実測では 1.5~6km 程度となる。またマルチホップ機能がないため、ゲートウェイの設置場所が重要である。

通信装置はスマートフォン用のモバイルバッテリーで稼働し、まずは稼働期間を十分に保たせるために 20 秒に 1 回計測および通信するように設定した。

7. 対象地域の概要

本研究での取り組みは、京都府京都市山科区安朱学区を対象に実施した。安朱学区は JR 山科駅周辺および駅の北側に位置し、図 3 のように山地に囲まれている地域である。その地形的特色から、急傾斜地や谷筋などといった土砂災害危険箇所が存在し、土砂災害警戒区域が 16 箇所、そのうち 12 箇所が土砂災害特別警戒区域に指定されている。全国で初めて特別警報が発令された 2013 年台風 13 号では、甚大な被害を受けている地域である。なお、本稿で紹介する取り組みは、山科区役所の担当者、自治連合会および地域唯一の小学校である安朱小学校と連携して実施している。本取り組みでは、まず安朱小学校舎屋上において 5 分間ごとの雨量を雨量計にて計測する体制は既に整えた。

8. 事前調査・実験

8.1 ハザードマップの確認

8.1.1 ハザードマップの作成方法

土砂災害ハザードマップとは、土砂災害警戒区域、土砂災害特別警戒区域や土砂災害発生の原因となる自然現象の種類 (急傾斜地の崩壊、土石流、地滑り) を表示した図面

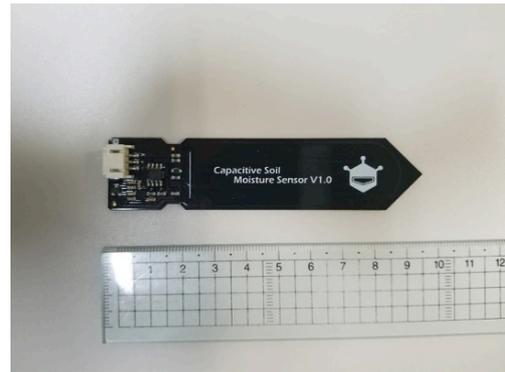


図 2 使用した土壌水分センサ



図 3 対象地域と周辺の地形

に、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 (土砂災害防止法) の第八条に規定された土砂災害に関する情報の伝達方法や避難場所等を記載したものである。これは、平常時における土砂災害警戒区域等の周知、防災知識の普及等に活用するとともに、警戒避難時には、災害時要援護者等への情報伝達や避難誘導等に活用されることに期待されている。土砂災害警戒区域、土砂災害特別警戒区域の指定には、都道府県ごとに土砂災害防止法の第四条および第五条で規定された基礎調査が実施される。

基礎調査は、急傾斜地の崩壊、土石流および地滑りの 3 種類それぞれにおいて、①調査対象箇所の抽出②区域設定のための調査③危害のおそれのある土地等の設定④危害のおそれのある土地等の調査、の手順で行う。調査対象箇所の抽出とは、土砂災害の危害をもたらされると予想される土地および土砂災害発生のおそれのある箇所を地形・地質条件と社会条件から抽出することである。①調査対象範囲は現況の土地利用状況や開発計画等の社会条件を考慮して選定され、抽出作業は主に縮尺 1/25,000 地形図を用いることを基本とする。次に②区域設定のための調査では①で抽出した調査対象箇所において、主に区域設定のための調査を実施する。概略を机上調査で行った上で、より詳細な地

形や地質および対策施設に関する調査を実施する。また、過去に発生した災害履歴を文献等で把握する。さらには、③危害のおそれのある土地の設定では「危害のおそれのある土地」および「著しい危害のおそれのある土地」の範囲を設定する。最後に④危害のおそれのある土地等の調査では、③で設定した当該区域内の人家戸数や公共施設等の実態調査を、机上ならびに現地調査により行う。

①調査対象箇所抽出において、どの種類であっても社会条件は共通で、その自然現象が発生するおそれのある範囲に人家等がある場合、もしくは現況の土地利用状況や開発計画等により人家等の立地が予想される場合が対象である。地形条件は自然現象ごとに異なっているが、1/25,000 地形図を用いて抽出することが一般的である。急傾斜地の崩壊の地形条件は傾斜度 30 度以上かつ高さ 5m 以上の急傾斜地が対象で、土石流の条件は谷型の地形をしているところである。具体的には、図 4 のように同一等高線上での谷幅を a、同一等高線上で最も奥に入った地点の奥行きを b としたとき、 $a \leq b$ になった地点を谷地形とする。もしくは、 $a > b$ であっても、土石流または土砂流の発生履歴がある溪流や、地形地質上、土石流発生のおそれがあると予想される溪流も谷地形とみなす。そして地滑りの地形条件は、地滑り地形を呈している箇所または地滑りの徴候が見られる箇所である。

8.1.2 対象地域のハザードマップ

京都市が発行している水害ハザードマップにおいて安朱学区は、土石流発生のおそれのある谷筋と急傾斜地が複数指定されている(図 5)。次に、安朱学区東側を 1/25,000 地形図で確認すると、大立寺東部にある谷筋は上述の谷地形ではなかった。したがって、過去に土石流または土砂流の発生履歴があったと推察できる。

8.2 実地踏査

ハザードマップを基にして、大立寺東部の谷筋と安朱学区東側の急傾斜地で実地踏査を行った。大立寺東部の谷筋は住宅から比較的近いところにあり、源頭部付近まで続いていることが視認できた。また、その谷筋に過去に崩れた形跡があることが確認でき、さらには、おおよそ 80 年前に土砂災害による被害が発生したことを周辺住民から聞くことができた。安朱学区東側の急傾斜地では、谷筋が多数発見され、中には大立寺東部の谷筋よりも遥かに大きい谷筋も確認された。

8.3 簡易貫入試験の実施

8.3.1 簡易貫入試験の目的と方法

簡易貫入試験とは地盤調査方法の一つで、地盤の固さから土壌厚さを推測するためのものである。50±0.05kg のおもりを 500±10mm の高さから自由落下させ、先端コーンが 10cm 貫入するために必要な回数(N 値)を計測する。N 値が 50 以上になると試験を終了し、一般的には N 値が 10 以上になると基盤に到達したと言われている。また、標準貫

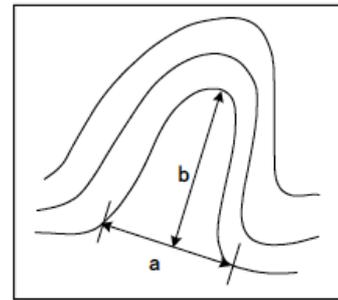


図 4 谷地形の定義



図 5 安朱学区のハザードマップ

入試験は 63.5±0.5kg のおもりを 76cm±1cm から自由落下させるため、簡易貫入試験は標準貫入試験よりも比較的容易で、山地などの急傾斜地でよく用いられている。

8.3.2 簡易貫入試験の結果

本研究では、ハザードマップで指定されている安朱学区東側の急傾斜地において、この試験をあらゆる地点で実施し、クリギング等を用いて土壌厚さを面的に補完する。そして、その結果から土壌厚さが大きく地下水が集まりやすい地形がある地点を判定し、その地点に IoT デバイスを設置することを検討した。

しかし、時間的都合から、大立寺東部の谷筋における急傾斜地源頭部と急傾斜地において確認された複数の谷筋で最も大きい谷筋の源頭部の 2 地点で簡易貫入試験を実施した(図 6)。各地点で複数回、試験を実施し、a 点が最も標高が低い地点で c 点が最も源頭部に近い地点であり、それぞれの地点ごとに約 2m 離れている。試験の結果を図 7、図 8 に示す。図より、大立寺東部の谷筋における土壌厚さはそれぞれ約 70cm、約 30cm、約 55cm であり、土壌厚さが小さいことが判る。つまり、過去の崩壊で土壌が無くなり、土砂災害発生のおそれが小さい、発生しても規模が小さいことが推察される。一方、急傾斜地における最も大きい谷筋の源頭部の土壌厚さはそれぞれ約 120cm、約 160cm と大立寺東部の谷筋と比べて土壌厚さが大きいことが判る。



図 6 簡易貫入試験の様子

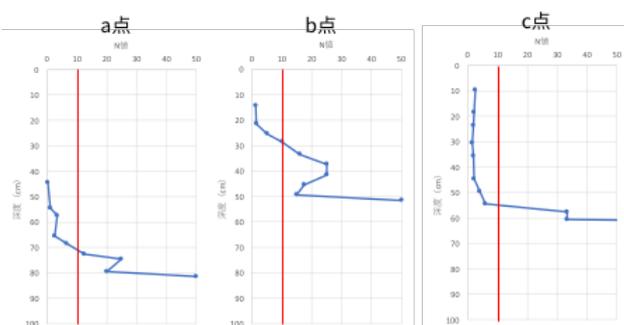


図 7 大立寺東部における簡易貫入試験結果

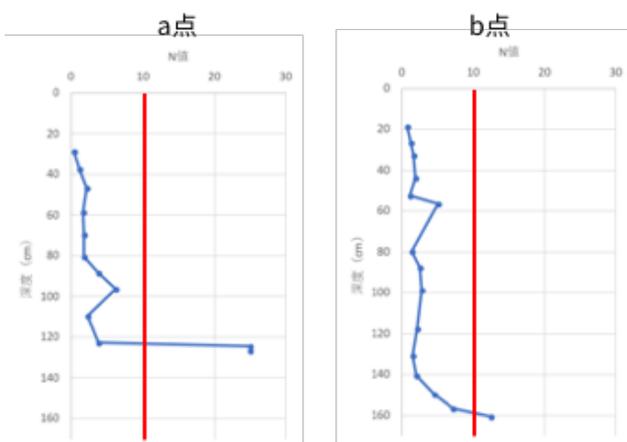


図 8 急傾斜地における簡易貫入試験結果

このことから、大立寺東部の谷筋よりも急傾斜地の谷筋の方が土砂災害のリスクが大きいことの可能性があることが示唆された。

8.4 土壌水分センサのキャリブレーション

用いた土壌水分センサはメーカーから公表された校正式がないため、校正式を作成するためにキャリブレーションを行った。

まず、センサの出力特性を把握するキャリブレーションを行った。高さ 30cm、直径 8cm の塩ビ管にソックスを履かせ、標準砂（豊浦砂）を一定の密度になるように詰めた。

次に、容器の中に移動させ、土壌水分センサを砂に挿した状態からゆっくりと水を容器の中に溜めていった。そうすることで、砂の中に水が徐々に吸い上げられ、乾燥状態から飽和状態まで計測することができる。計測の結果、この土壌センサは、線形出力であることが判明した。

次に、実際に設置するセンサを乾燥した砂ならびに水中での計測を行い、出力電圧のゼロ値と飽和値を得た。これにより、センサそれぞれの出力電圧に対して飽和度を求められるようになった。

8.5 通信実験

対象地域でのゲートウェイの設置場所を検証した。本設置までの IoT デバイスとゲートウェイの位置関係を図 9 にまとめた。まず、安朱ひろばに防災倉庫があったため、その屋根上に家庭用バッテリーで稼働させたゲートウェイと Wi-Fi ルーター（スマートフォンのテザリング機能を使用）を設置した。その地点から大立寺の墓地裏から通信テストを行うと、電波強度が安定しなかった（テスト 1）。周辺には高い樹木が多く生えており遮蔽物が問題であると考え、高い樹木は少ない源頭部において通信テストを試みた。その結果、電波強度は先ほどの墓地裏よりも大きくなったため、数日間通信を続けることにした（テスト 2）。ところが、ポータブルバッテリーが想定よりも早く 3 日ほどで充電切れとなる場合や、ゲートウェイの熱暴走が生じ、通信不能になった。そのため、ゲートウェイ、Wi-Fi ルーターさらにはゲートウェイを冷却するファンを常時稼働するための電源確保が必要となった。そこで、安朱小学校に許可をいただき、電源と小学校屋上を使用させてもらえるようになった。校舎屋上は住宅等の遮るものがなく通信は非常に安定していることが確認できたため、ゲートウェイを安朱小学校舎屋上に設置することにした（テスト 3）。

9. 提案システムの導入

9.1 IoT デバイスの設置

2018 年 5 月 31 日、大立寺東部の谷筋における急傾斜地源頭部で IoT デバイスの設置を試みた。まず、事前の簡易貫入試験の結果をもとに斜面に対して鉛直にドリル型の穴掘り器を用いて円柱状の穴を作成した。次に、底の蓋に土壌水分センサが通るだけの穴がある塩ビ管を円柱状の穴に差し込んだのち、塩ビ管に手を入れて土にセンサを挿し、塩ビ管に小さい穴があいた蓋をした。その穴から導線を塩ビ管から外に出すことができるため、耐候性に優れた屋外用ボックスに入れた通信装置と接続し、IoT デバイスの設置を実施した（図 10）。

9.2 ゲートウェイの設置

安朱小学校舎屋上にてゲートウェイの設置を行った。学校の屋外電源から延長ケーブルで屋上まで電源を供給するようにした。その電源から、ゲートウェイと冷却用ファンを接続し、雨水が浸入しないようにハウジングした。さら



図 9 通信テストの位置関係



図 10 IoT デバイスの設置写真

には、ハウス内の温度上昇を軽減するためにすだれを設けた。また、ゲートウェイ接続用のネットワークは、設置場所の関係により無線 LAN の環境が無かったため、携帯電話用の sim カードを利用したモバイル通信から無線 LAN に変換するルーターを利用した。

9.3 サーバの構築

土壌水分センサのリアルタイム計測データおよび過去データを安朱小学校舎の屋上に設置した雨量計のデータと共に可視化するサーバを構築した。今後は気象業務法に定められた範囲内で住民に公表する予定である。

10. 計測結果と考察

10.1 短期集中豪雨のデータサンプル

2018 年 6 月 30 日の 16 時頃に 1 時間約 80 ミリの短期集中豪雨が発生した。そのときの土壌水分センサ計測データと安朱小学校に設置した 5 分ごとの雨量データを図 11 に示す。図によると、雨量と連動して土壌水分量が大きくなっている。雨量のピーク時は土壌水分量もピーク時で、基盤上部の飽和度が 100%、中間地点は 90% 近くまで上昇している。地表面付近は他と比較して、あまり上昇せず、およそ飽和度 55% であった。また、ゲートウェイに使用していた安朱小学校の外部電源のブレーカーが落ちてしまったため、途中で土壌水分量の計測データは途切れてしまっている。

10.2 長期豪雨のデータサンプル

2018 年 7 月 5 日深夜から 6 日午後まで総雨量が約 260 ミリの長期豪雨 (平成 30 年 7 月豪雨) が発生した。同様に土壌水分量データと雨量データを図 12 に示す。ただし、基盤上部のデータの揺らぎが激しかったため、飽和度 0% 以下および 100% 以上の数値を除去することにした。グラフを見ると、同じく雨量の増加に合わせて土壌水分量が増加している。また、7 月 5 日 20 時ごろに中間地点が最も土壌水分量が大きいことが確認できた。この時点で安朱学区の住民が参加しているチャットにて、その異常値を報告すると自主避難をしたいという住民が数人現れた。このことから、土壌水分量を計測して地域住民に可視化・提供するシステムは自主避難を促す効果を持っている可能性があることが示された。

11. おわりに

本研究では、地域と連携して局所的な気象・観測データの計測システムを開発および土砂災害発生のおそれのある地域にて導入を行った。短期集中豪雨および長期豪雨の 2 種類の特徴的な豪雨にて土壌水分量と雨量を計測することができ、どちらの豪雨でも雨量の増加に合わせて、土壌水分量の増加を観察することに成功した。さらには、土壌水分データの異変を地域住民に対して提供することで、地域

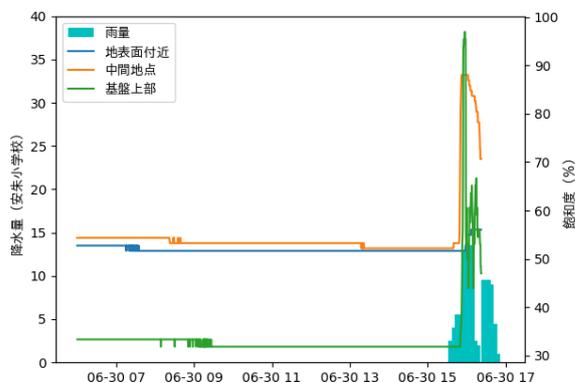


図 11 短期集中豪雨時の計測データ

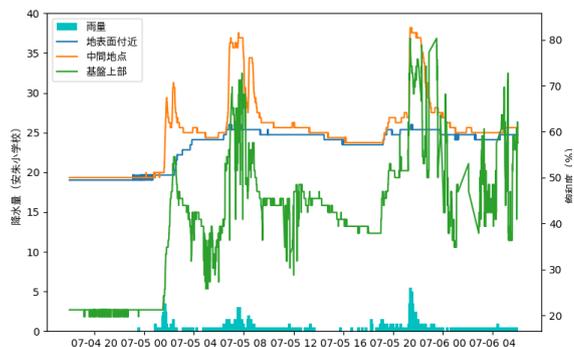


図 12 長期豪雨時の計測データ

住民に自主避難を促すことができた。

今後は導入後に発生した問題を解消する必要がある。具体的には、豪雨による安朱小学校外部電源のダウンとセンサ計測値の揺らぎがある。センサ計測値の揺らぎについては、センサが故障している場合は新しいものに取り替えや、設置場所が木の根などのノイズが入りやすい箇所であればIoT デバイスの設置場所を変更する必要がある。それでも揺らぎが解消しない時は、別のセンサでの運用を検討する必要がある。

また、現時点では本システムは自主避難を促す兆候が得られただけである。今後は、定量的な地域住民の意識・行動変容が評価するために、地域住民に対してアンケート調査を行う必要がある。

参考文献

- [1]国土交通省. 全国における土砂災害警戒区域等の指定状況. 2018. <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/jyoukyou-1803312.pdf>. (参照 2018-08-01).
- [2]国土交通省. 近年の土砂災害 被災者の傾向. 2012. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/dosya/24part1/24-1-shiryos3.pdf>. (参照 2018-08-01).
- [3]国土交通省. 土砂災害警戒情報の運用成績. 2012. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/dosya/24part1/24-1-shiryos3.pdf>. (参照 2018-08-01).
- [4]片田敏孝, 金井昌信, 児玉真, 及川康. ワークショップを通じた地域単位の避難対策の検討—埼玉県戸田市における事例—. 災害情報. 2010, no. 8, pp.12-15.
- [5]沖電気工業. 土砂災害危険斜面を見守る「斜面監視システム」販売開始, 2015, (参照 2018-08-06).
- [6]NEC. 土砂に含まれる水分量から土砂に斜面の崩壊の危険性が見える化する「土砂災害予兆検知システム」を発売, 2016, (参照 2018-08-06).
- [7]金井昌信, 片田敏孝, 吉岡琢郎. 2004.7.13 新潟豪雨災害時にみる住民の水害リスク認知と情報取得・伝達行動との関連分析. 日本災害情報第7回研究発表大会予稿集. 2005. pp.53-60.
- [8]片田敏孝, 金井昌信. 土砂災害を対象とした住民主導型避難体制の確立のためのコミュニケーション・デザイン. 土木技術者実践論文集, 2010, vol. 1, pp.106-121.
- [9]李フシン, 宮本匠, 近藤誠司, 矢守克也. 「羅生門問題」からみた被災地の復興過程—茨城県大洗町を例に—. 質的心理学研究会, 2015, vol. 14, pp. 38-54.