

建設・環境テレメトリング手法への遠隔モニタリングシステムの適用に関する基礎研究

Research on the application of remote monitoring systems to construction and environmental telemetry methods

長崎大学大学院 准教授 杉本知史

（研究計画ないし研究手法の概略）

本研究の目的は、Internet of Things (IoT) 技術を活用した建設・環境テレメトリング手法を展開するための課題抽出と、同技術の普及のための実用的提案にある。長期間・広範囲・高頻度の計測を要する建設・環境・防災などの「地盤」が関わる各分野に着目し、各用途において求められる適切な機器選定や整えるべき設置環境条件について、これまで研究代表者らが行ってきた基礎的研究の実績に基づき、具体的な課題抽出を行い、改善手法の提案とその実証を行う。また、今後利活用が期待される利用者のIoT技術への理解が進まなければ、技術の普及には繋がらないと考えられる状況が実務上散見されることから、これらを解決するための以下の内容に取り組む。

① 多点計測用モジュールの屋外環境下での計測の適用性評価

建設・環境・防災分野におけるモニタリングに焦点を当て、これらの適用環境に応じた計測センサの選定が必要である。低価格かつ高性能のMEMSセンサにより、圧力、導電率、温湿度、照度など様々な物理量を計測することが可能であるが、耐候性や耐久性をはじめ、センサの感度や感応範囲により、必要とするデータの計測や収集の可否が決まることから、多点計測用モジュールの屋外環境下での適用性について、これらを明らかにする。

② エネルギーハーベスティングに関する電力収支の検討

センサより取得したデータの原位置での収集やモバイル回線を通じた外部へのデータ通信のために運用する親機や、子機端末から親機までの通信の際に相当量の負荷がかかると想定される中継機において、安定した計測・通信の確立のために一定量の太陽光発電ならびに夜間向けの蓄電を要することが見込まれる。過大な装備を避けるため、原位置に実装することを想定した検討を行う。

③ 観測エリア内の無線センサネットワークシステムの通信品質の評価

センサを接続した子機端末が単独でデータを取得した場合でも、その際に端末間で通信が確立されなければ、取得データの欠損が生じた場合、収集データによる発生事象の定量的評価ができない恐れがある。通信品質は、各端末に取り付けられている指向性アンテナの設置方向や周辺の電波遮蔽物（斜面もしくは植生など）の存在に依存することから、これらを加味した原位置における適切な端末の配置や通信品質の評価を行う。

④ モニタリングシステムのユーザビリティ向上のための事例調査

モニタリングシステムは、端末のセンサを交換することにより、様々な分野の物理量測定



モニタリングシステムのイメージ

に展開することが可能である。申請者らはこれまで5年超にわたり斜面防災のためのモニタリングシステムの運用を行うとともに、その他農業関連での農作物育成管理や、文化財関連での地震に伴う被災石垣の変状監視に展開してきた。本研究ではこれらの実績を踏まえ、施設管理者や関係する建設技術者に対し、従来の手法に対する遠隔モニタリングシステムのユーザビリティについて意見収集を図り、各事例における利便性や課題について調査を行う。

(実験調査によって得られた新しい知見)

① 多点計測用モジュールの屋外環境下での計測の適用性評価

・モニタリング対象斜面について

図-1 の対象斜面は佐世保市内の産業廃棄物処分場跡地で、奥行きが約 150m、幅約 120m、高さ約 40m である。地表面付近に土砂主体の産業廃棄物、その下に崖錐堆積物、基盤岩で構成されている。2014 年に変状が確認され、翌年の 2015 年に緩勾配化するための土砂の切り返し工事、雨水浸透低減のための覆土工、地下水水位低下工を行った。しかし、再度変状が確認されたため 2016 年にモニタリングを開始した。

・モニタリングシステムの概要

図-2 に各種観測機器とその設置場所を示す。現位置での観測機器（土壌水分計、水圧計、雨量計など）を利用して観測したデータを、無線センサネットワーク（以下、WSN）を通じて中継機で収集し、携帯回線を通して通信する。これにより、遠隔地にてモニタリングを行うことができ、対象斜面の安全の確保やセンシングデータの解析によるリアルタイムの現状分析が可能となる。また、同所に別途、斜面変状を検知するための傾斜計を対象斜面の 13 箇所の地表面下 0.5m に設置している。なお、x, y 軸はそれぞれ斜面に対し、水平面内の直交、平行な方向を示す。

・WSN による斜面表層の変状モニタリング

傾斜計により水平面内の累積角度や変状量を 10 分間隔で記録し、携帯回線を通じて、ブラウザ上で確認することができる。今回は 2017 年 6 月～2022 年 11 月のデータより、2022 年に入って特に変状量の大きい図-2 中の k-4 と k-7 を取り上げて、期間中のデータを分析した。図-3 に累積角度の推移を示す。また、図-4 に 1 か月ごとの累積角度を示す。k-4 については、2021 年までは変状は緩やかだが、2022 年に入ってから大きな変状が発生していることが確認できる。k-

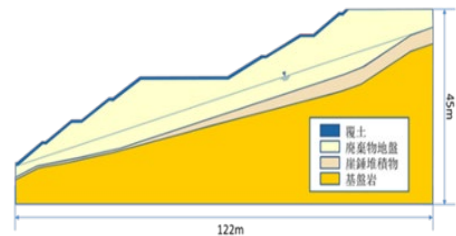


図-1 対象斜面断面図

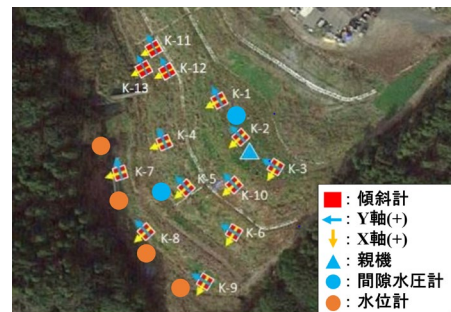


図-2 観測機器設置位置

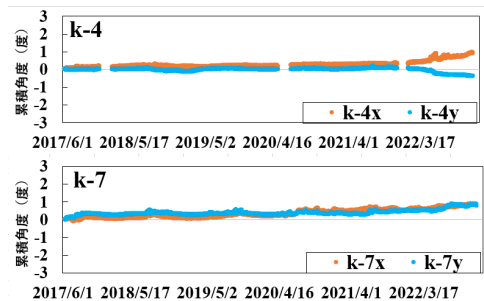


図-3 累積角度の経時変化

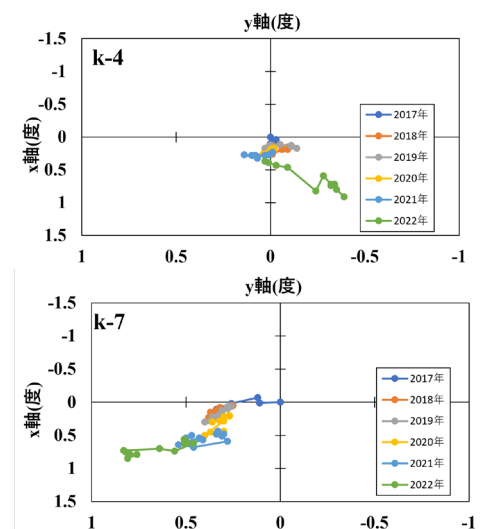


図-4 累積角度の推移(k-4, 7)

7に関しては、2020年の中ごろから徐々に変状が見られ、経年的に変状量が増大していることが確認できる。

・降雨による地下水位変動

図-2に示した斜面下段に設置した間隙水圧計について、2017年～2022年にかけてデータを集積し、降雨量に対する地下水位の変化について分析した。図-5に2022年の降水量と地下水位の推移を示す。図-5で色分けしている箇所は地下水位が急激に上昇したポイントであり、降雨が開始して地下水位がピークに達するまでを1つの降雨期間として抜き出し地下水位と降雨の関係について検討を行った。斜面の水はけを示す値として降雨期間中の総降雨量を降雨前後での水位差で割った値を雨量係数⁽¹⁾とし、降雨前の地下水位との関係を示したものが図-6である。雨量係数は高いほど水はけがよいため、縦軸下方向かつ横軸左方向にあるほど斜面崩壊のリスクが高い降雨期間だと言える。斜面下段で使用している間隙水圧計は地表面から10mの深度に設置しているため、比較的深い地点まで測定が可能であるが、人力では設置ができず多点に設置してデータを集めることは難しかった。そこで、2022年から図-2に示したように斜面の末端部の4つの地点で人力による設置が可能で2mまで測定できる水位計を設置した。図-7に斜面下段の間隙水圧計と末端の水位計の測点における地下水位の時間変化を重ね合わせたグラフを示した。図-7より2測点における地下水位が概ね同様の傾向であることを確認した。よって新たに設置した水位計についても運用は可能と判断した。

・地下水位の変化と斜面変状の関係

観測した中でも大きな斜面変状を確認した2022年5月のk-4のx軸方向の地表面の変状量 ds と、同じ期間の地下水位の変化量 GL の関係を図-8に示す⁽²⁾。地下水位の変化量が1m付近までは地表面の変位はほとんど見られないが、1m付近を境に地下水位の変化量に比例するように ds が変化しており、地下水位と地表面変状の間には相関性があると考えられる。

・まとめ

本研究ではWSNを活用した斜面のモニタリングを通じて斜面地盤の変動挙動の分析を行い、降雨による地下水位の上昇関係や、それに伴う斜面表層の変状を確認し、斜面地盤の変性傾向を定量的に評価した。

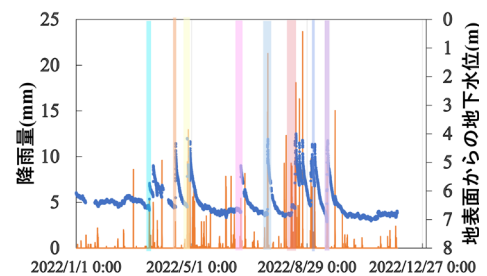


図-5 2022年の斜面下段での地下水位と降雨量の関係

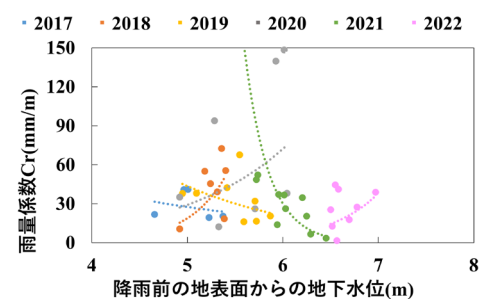


図-6 年別の雨量係数と降雨前の地下水位の関係

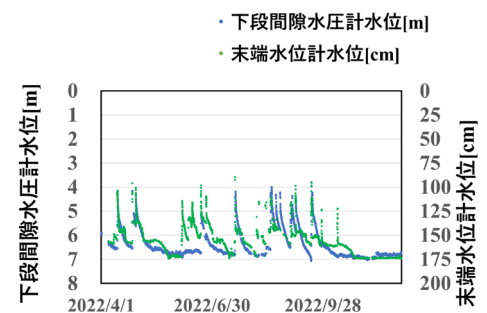


図-7 斜面下段部と末端部の2測点間の地下水位の比較

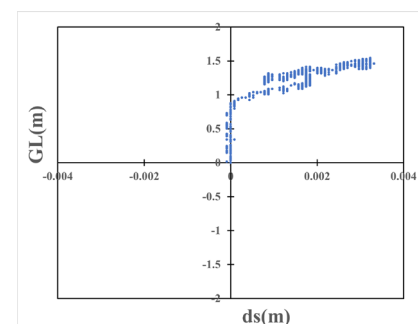


図-8 k-4における地下水位変化と地表面変位の関係 (2022年5月計測時の例)

② エネルギーハーベスティングに関する電力収支の検討 ならびに

③ 観測エリア内の無線センサネットワークシステムの通信品質の評価

・ 導入した無線センサネットワークシステムの規格

無線センサネットワークシステムの導入においては、複数存在する無線ネットワーク規格の中から IEEE 802.15.4 (Zigbee)がその低消費電力性と相互接続（メッシュネットワーク）を構築可能な理由により採用される事が多い(図-9)。我々もこれらの特徴が本システムの方向性に合致していると考え、同規格の導入を行った。

・ 実際に本研究を通して明確となった点

Zigbee を導入し得られた知見は、各デバイスを駆動する電源容量と大きな関係が存在し、それは独立型電源の設計に大きく影響する点である。判明した点は以下の通りである。

- LTE 等の広域ネットワークへの取次点であるコーディネーターまでは、常にルーター（場合によっては複数のルーター）を経由（ホップ）するネットワークを随時形成する必要がある。
- 30 分に一度程度のデータ収集を行う申請者らのシステムにおいても、ネットワークの形成およびデータ収集に 10 分程を要した。この時間は、形成するネットワークの大きさに応じて肥大化する。この時間帯は、低消費電力モード（スリープ）が利用できずに、逆に高消費電力状態を長時間維持する結果となる。
- 雨天時などは電波環境が悪化する場合も多くネットワーク形成に時間を要し、写真-1 に示すような電力供給源である太陽光発電が悪化する状況にもかかわらず消費電力が増加する悪循環に陥る事もわかった。
- 中継に端末を複数要し、山野でのメンテナンスも困難であった。

以上をまとめると、独立型電源駆動の無線ネットワークシステムにおいて Zigbee は、デバイス単体の消費電力は小さいものの送信距離がその分抑制されており(写真-2)、上記のようなネットワーク形成を随時行う必要があり、結果的に消費電力の節電が困難である事がわかった。また、上記のような特性を持つために必要以上にルーター数がネットワーク形成時間さらにメンテナンス作業の増加につながり、屋外での無線センサネットワークとしては現実

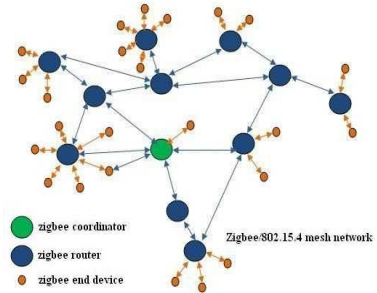


図-9 Zigbee を用いたメッシュネットワーク

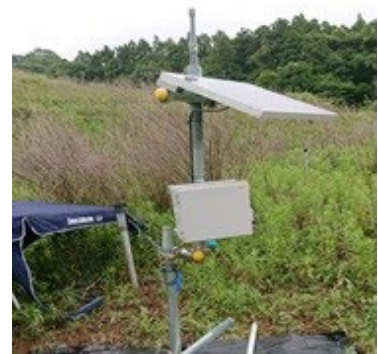


写真-1 設置端末の例（30W 太陽光パネルや 120Wh の鉛蓄電池）



写真-2 10m 程度の範囲に設置されたデバイス群（斜面地の例）



写真-3 小型化の例

的に不向きであると結論付けた。

・802.11b (Wifi)の導入検討

前節で示した通り、低消費電力性を重視した Zigbee は、広範囲な屋外利用では十分にその特性を活かす事ができない結果である事がわかった。これらの結果を元に、本研究では改めて他規格の採用を検討し、その結果 IEEE 802.11b (WiFi) の検証を行った。本規格の特徴は、消費電力は比較的大きく、Tree Network 化可能（広範囲接続）、高速伝送（54Mbps）である(表-1)。また他の通信規格との大きな違いは、Zigbee と比較し歴史も古くノート PC やスマートフォン等の様々な市販デバイスに搭載されており、システムの拡張性が高い。また、スマートフォンを用いた状態確認が可能となり、現場での設置やメンテナンス時の利便性が高い。図-10 に今回検証に利用した Wifi モジュールを搭載した Espressif 社のマイコン ESP32 の評価ボードレイアウト図を示す。また、写真-3 が上記評価ボードを搭載したエンドデバイス端末である。写真-1 に示した Zigbee を利用したシステムと比較して体積として約 1/10 程度へ小型化が可能となった。本検証では、見通しのきく 200m 程度の範囲内(図-11)においてコーディネーター(LTE 等の広域ネットワークへの取次点)までは、ほぼ直接もしくは1点のルーターを介する事により伝送可能である。

・まとめ

センサ端末は、駆動時に Zigbee の 10 倍以上の消費電力を要するが、センシングデータの1分に満たない駆動時間のみで、その他の時間はネットワーク維持不要のため休止状態を維持可能となるため結果的に大幅な低消費電力化が可能であった。さらにシステムの小型化を実現した。一方ルーターのみを常時通電とし、同端末への電力供給を集中的に比較的大きな電力供給源を用意すれば良い。今後 Wifi の伝送周波数 2.4GHz/帯域幅 22MHz の高速伝送能力を活かし、画像や動画伝送も検証する予定である。その際は、現在 LTE 回線を利用している WAN 側についても 5G や Local5G の利用も検討を進めて行く予定である。

表-1 802.15.4 と 802.11b との比較

Standard	Zigbee	Wi-Fi
IEEE spec..	802.15.4	802.11a/b/g
Frequency band	368/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz; 5 GHz
Max signal rate	250kb/s	54Mb/s
Nominal range	10-100 m	100 m
Nominal TX power	(-25) - 0 dBm	15 - 20 dBm
Number of RF channels	1/10;16	14(2.4GHz)
Channel bandwidth	0.3/0.6 MHz; 2 MHz	22MHz
Modulation type	PSK (+ ASK) O-QPSK	BPSK, QPSK COFDM, CCK, M-QAM
Spreading	DSSS	DSSS, CCK, OFDM
Coexistence mechanism	Dynamic freq. selection	Dynamic freq. selection transmit power control (802.11h)
Basic cell	Star	BSS
Extension of the basic cell	Cluster tree-mesh	ESS
Max number of cell nodes	> 65000	2007
Data protection	16-bit CRC	32-bit CRC

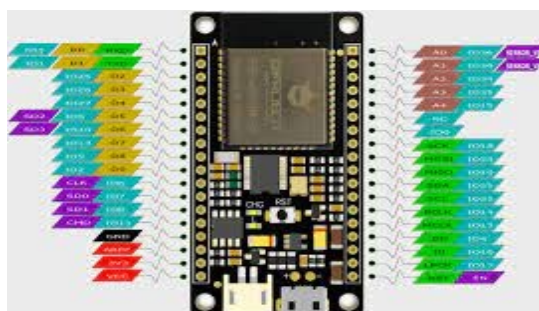


図-10 導入した WiFi 機能を持つ低価格マイコン (ESP32)



図-11 数十 m 程度の距離ごとに設置されたデバイス群 (農地の例)

④ モニタリングシステムのユーザビリティ向上のための事例調査

これまで申請者らが取り組んできた遠隔モニタリングシステムを活用した斜面防災にかかわる現場、農業にかかわる現場ならびに史跡文化財（城郭石垣）にかかわる現場におけるテレメトリング手法の適用に関する研究においては、それぞれ所有者、施設管理者ならびに建設技術者との協力のもと、多点観測における利便性や課題について議論を重ねてきた。これらを踏まえ、実際の事例に基づいたモニタリングシステムのユーザビリティ向上に資すると考えられる事例について、要約したものを以下に示す。

【質問項目】

- 1)最近使用したモニタリングシステムについて、従来手法より優れていた点。
- 2) 1)に関し、システムを利用する上で不便だった点、不自由だった点。
- 3)普段の現場において、今後モニタリングシステムの活用が期待される場面や、関係される方々の要望。

<斜面防災関連>

- 1)多種の計測機器をシステムに組み込むことができ、計測地点数を増やすことができた。また、遠隔操作が可能となった。
- 2)計測地点数が限られ同じシステムを複数導入する必要があり、多種の計測では複数のシステム導入が必要でコストがかかるため不自由な面があった。
- 3) 災害発生現場での安全管理モニタリング、土砂災害発生時の避難指示を目的としたモニタリングシステム、映像による地盤変位モニタリングシステムなどが挙げられる。

<農業関連>

- 1)接続できるセンサの数や種類が多いことなど拡張性が高い。またデータがクラウドに保存され、随時確認ができ必要に応じて測定データのダウンロードができること。
- 2) データの欠損が生じていた時に、収集したデータを確認しないとわからないこと。
- 3) 圃場の温度や降水量のデータを使った農作物の生育予測や、降雨の有無や降水量の通知による、農作業計画の立案。（遠方の圃場を見に行かなくても判断できる）

<史跡文化財関連>

- 1)これまで、石垣においては変状をリアルタイムで確認・把握する手法がなかったため、非常に便利だと感じた。
- 2)場所の影響や、電源を使用しないなどの制約のために、通信状況等に不具合があり、観測できていない時間帯があった。
- 3)今後、石垣のモニタリングが公開している城跡の管理をする上で、重要になると思われるので期待している。地震による被災石垣が崩落する前兆をいち早く把握するためには、計測対象箇所を適切に選定する必要がある。

以上より、モニタリングシステムのユーザビリティに関し、多点で種々の物理量をリアルタイムで計測、記録、遠隔での閲覧ができる利便性がある一方、実用上ではコスト面やデータ収集の安定性に課題があるなど、異なる分野で広く共通していることが明らかとなった。

（発表論文）

福島世韻，杉本知史，蔣宇静，大嶺聖，石塚洋一，岩崎昌平：遠隔モニタリングによる斜面地盤の地下水位と地表面変状の関係に関する一考察，令和4年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.467-468，2023.4.