

(一財)日本建設情報総合センター
研究助成事業実績報告書

助成番号:第 2020-3 号

無線センサネットワークシステムを応用した IoT 技術による屋外多
点計測手法の実装のための調査研究

2021年12月

長崎大学大学院 工学研究科

杉本 知史 ・ 石塚 洋一

研究者紹介

杉本 知史 (すぎもと さとし)

現職：長崎大学大学院 総合生産科学域 システム科学部門 准教授 (博士 (工学))

共同研究者紹介

石塚 洋一 (いしづか よういち)

現職：長崎大学大学院 総合生産科学域 電気・情報科学部門 教授 (博士 (工学))

目次

第1章 研究の背景・目的	1
第2章 開発済みの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	
2.1 はじめに	2
2.2 対象斜面の概要	2
2.3 遠隔モニタリングシステムの概要	3
2.4 斜面表層の変状検知センサの概要	5
2.5 モニタリングデータの取得および分析	5
2.6 おわりに	10
第3章 適用環境に応じた計測センサの選定条件の解明	
3.1 はじめに	11
3.2 諫早干拓内の畑地における各種物理量の計測実証実験	11
3.3 計測環境の概要	11
3.4 各種温度センサによる計測データの比較	13
3.5 各種土壌水分計による計測データの比較	14
3.6 おわりに	15
第4章 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	
4.1 はじめに	17
4.2 導入した無線センサネットワークシステムの規格	17
4.3 実際に本研究を通して明確となった点	17
4.4 802.11b (Wifi)の導入検討	18
4.5 おわりに	19
第5章 結論と今後の展望	20

第1章 研究の背景と目的

ここ数年、IoT技術の急速な進歩により、気象、農業、医療、福祉、建設など、幅広い分野で各種物理量のモニタリングが盛んに行われるに至り、さらなる社会実装へのステップアップの時期にある。特に屋外にて長期間、広範囲、高頻度な計測を要する場合は、当該計測システムの長期運用における堅牢性の強化と低コスト性が求められ、防災・建設・水理・農業分野においては、このような課題を解決しない限り、技術の普及には繋がらない。

例えば、斜面地盤の防災の観点では、主に集中豪雨に起因する地盤災害が国内各地で発生しているが、数万年オーダーの成り立ちの歴史を経た地盤がもつ不均質性や偏在性といった素因に加え、局所的なゲリラ豪雨のような誘因が絡むことで、事前に災害発生個所をピンポイントで予測することは困難である。そのため、降雨量や地盤への浸透水の分布、地下水位の変動、地表面変位などを広域的かつ継続的なモニタリングが、個々の斜面の危険性予測につながる。しかしながら、現在提案されている技術は、高価なデバイスや信頼性に基づく必要以上の精度をもつセンサが使用されており、例えば医療・福祉分野では経済的に成立しても、防災・建設・農業分野のような環境においては、その多くが実装には至らない状況にある。

これまで、斜面地における降雨による地盤内の水の浸透と地下水位の変化を無線センサネットワークにより観測するためのシステムを構築し、継続的なデータ収集と分析を通して斜面変状の進行や力学的安定性の定量的評価手法の提案に取り組んできた。本申請ではこの取り組みをもとに、同システムを活用した広域的な多点動的データ計測を念頭におき、斜面やインフラ構造物、農地環境にそれぞれ適した動態観測手法の開発と実装を目指し、分野を横断した研究の実現可能性と各分野におけるシステムの最適化に関する調査検証を行う。また、本研究分野の動向についても調査を行い、類似点や相違点を分析・整理する。

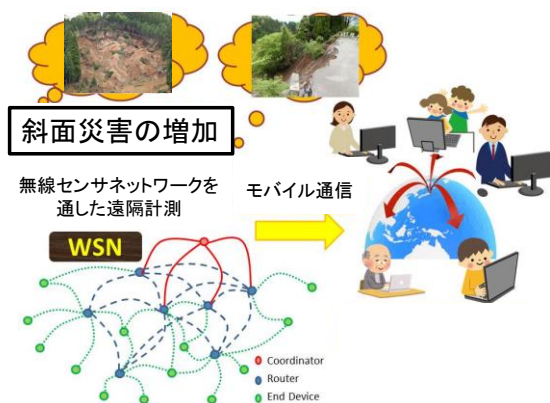


図-1.1 モニタリングシステムのイメージ



図-1.2 モニタリングシステム構築の様子

第2章 開発済みの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

2.1 はじめに

近年、局地的な集中豪雨や梅雨時期の長雨などのような異常気象が頻発しており、通常安定している斜面が雨水浸透により崩壊する事例も多発している。わが国は、国土の約7割を山地が占めるという地理的特徴から、土砂災害の危険性のある箇所に居住地域や道路などが近接している地域も数多く存在しているため、斜面防災をさらに強化していく必要がある。そこで本研究では、人工的に盛り立てられた佐世保市内の斜面を対象として、降雨による地盤内の水の浸透と地下水位の変化を無線センサネットワークシステムにより遠隔モニタリングを行う手法を提案している。この方法のメリットとして、データ収集において人的労力が削減できること、機器間の配線が不要なため機器の設置場所を自由に選択できることなどが挙げられる。継続的なデータ収集と分析を通して斜面変状の進行を明らかにすること、雨量と土壌水分率、地下水位の変化、地表面の変状量との相関性を明らかにすることを目的としている。

2.2 対象斜面の概要

既往の研究で開発した無線センサネットワークシステムを実証する対象は、図-2.1 ならびに写真-2.1 に示すような、佐世保市内の産業廃棄物処理場で奥行が約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。約5年前に大雨を原因とする変状が生じ、斜面下方でせり出し、斜面中段付近でのクラックが発生した。その対策として、抑え盛土や土砂の切り返しによる緩勾配化、表層50cm程度の覆土による遮水工が施されている。現在の斜面形状は、法面勾配1:1.5、最大傾斜約40°となっている。

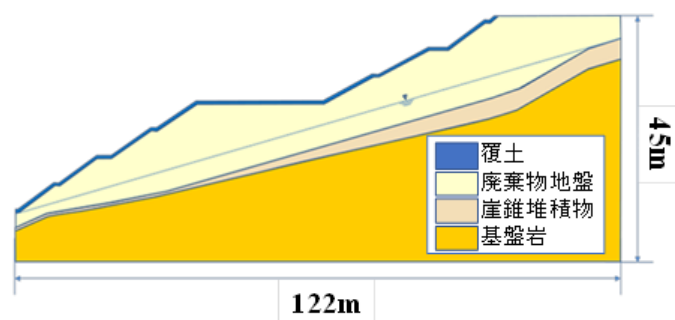


図-2.1 対象斜面（断面図）

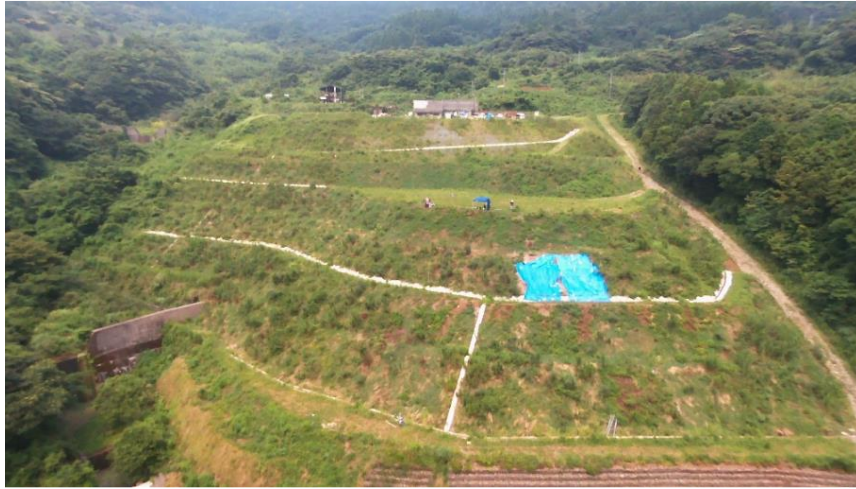


写真-2.1 対象斜面遠景

2.3 遠隔モニタリングシステムの概要

図-2.2 に各種観測機器とその設置場所を示す。本研究で構築したモニタリングシステム4)は、エンドデバイス（端末）、ルーター（中継機）コーディネーター（親機）の三つで構成している。コーディネーターはセンサネットワーク内に1台だけ存在し、ネットワークの制御を行う端末である。コーディネーターに設定された無線モジュールはネットワークを形成し、各ノードにアドレスを配布し、またネットワークを定義し、セキュリティを守り、そして正常な状態に保つためのその他の機能を管理する。ルーターはデータ中継機能を持ち伝送先のアドレスに応じて適切な通信経路を選択できる機能を持つ ZigBee 端末である。既存のネットワークに参加し、情報を送り情報やルート情報を受け取ることができる。ルーターは直接情報やり取りできないほど離れている別のデバイス間の通信をとりもつメッセージングとしての役割をもつためシステム内に複数基設置されており、システム構成のブロックとしては代替が効く。エンドデバイスは中継機能を持たない ZigBee 端末である。エンドデバイスは、基本的にルーターの機能縮小版である。ネットワークへ参加し、情報を送受信できるが、上位に位置するルーターに対して、一対一の通信方式をとる。このため、ほかのデバイス間のメッセージングとして働くことはできず、より安価なハードウェアを使用し、間欠的に自分の電源を切って一時的に非応答のスリープモードに入ることによってエネルギーを節約することができる。ZigBee ネットワークでは任意の数のエンドデバイスを持つことができる。

図-2.3 に各通信端末を示す。エンドデバイスには土壌水分計・テンシオメータ・間隙水圧計・転倒マス型雨量計を接続しているこれらより得られる出力電圧を、増幅回路を通すことで分解能を調整し、無線ネットワークを介し、コーディネーターに通信する。その際モニタリングエリア内に適宜設置したルーターを経由することで安定した通信品質を確保するようにしている。



図-2.2 各種観測機器の設置場所



図-2.3 各通信端末の近景

このシステムの通信は、IEEE 802.15.4 通称 Zigbee を採用している。この規格の特徴として以下の4つが挙げられる。

- ①低消費電力 通常使用する乾電池でも年単位の寿命を持たせることが可能
- ②ローコスト デバイス価格だけでなく、無線化する事によりシステム配線のコストも低減可能
- ③相互接続性 シンプルなプロトコルで、相互作用できるようなネットワーク構築を行うことが容易
- ④マルチホップ 単一ノード間の接続ではなく、複数のノードを経由したネットワークを構築する事ができ、送信電力を抑制する事が可能。

各端末の通信時に要する消費電力は同様のワイヤレス PAN である Bluetooth と大差はないが、エンドデバイス（端末）のスリープモードを利用することで必要な周期のみエンドデバイスを起動させデータを収集することができるので、その消費電力を抑制することができる。さらに、マルチホップを利用した無線通信により複数の通信経路を利用することができるのでシステム全体の柔軟性、安定性が向上する。土壌水分計・間隙水圧計を含む土木計

測機器や雨量計のセンサ類および電力源として太陽光パネルを接続したエンドデバイスがある。センサ端末は、地質内の各種物理量をゲージ計にて検出し、電圧値に変換し電圧値がデータとして出力される。エンドデバイスによって取得された電圧値データは、フィールド各所に設置されたルーターを経由することで斜面地上段部に設置されているコーディネーターにデータが送信される。コーディネーターまで送られたデータは、そこからLTEルーターとLAN接続されており、これを介してインターネット網へと送信され、通信状況の確認やデータのダウンロードが可能である。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。さらに、太陽光発電を利用し各端末にソーラーパネルと二次電池を接続して、自立的にシステムを運用している。

2.4 斜面表層の変状検知センサの概要

同モニタリング現場に斜面変状を検知するための傾斜計を、別途設置した。傾斜計の外形・内装とその設置場所をそれぞれ図-2.4と図-2.5に示す。同システムは斜面崩壊などの地盤変位の発生場所と発生時刻を把握することを目的に設置する変状検知センサである。機器内部に傾斜角を検知する二軸傾斜センサと、受信機に定期的に計測データを配信する無線通信装置を備えている。計測間隔10分でデータを取得し、受信機(親機)へ送信し、インターネット上でグラフの閲覧と数値データのダウンロードが可能である。

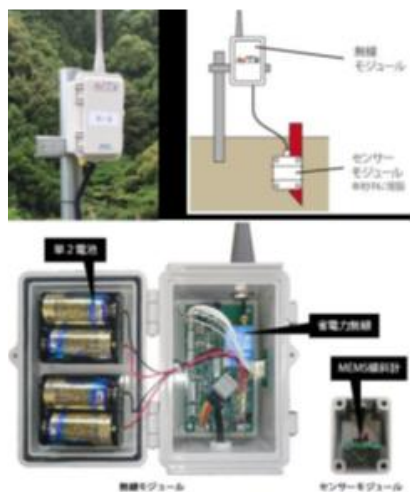


図-2.4 変状検知センサ



図-2.5 変状検知センサの配置

2.5 モニタリングデータの取得および分析

今回は2017年6月13日～2021年1月31日のデータより、傾斜計については軌跡グラフの作成、設置後からの変状データをベクトル図で示した。間隙水圧計については降雨と地下水位の関係や地下水位と変状量との関係について分析した。

2.5.1 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、携帯電話を通じて、ブラウザ上で確認することができる。今回は 2017 年 6 月 13 日から 2021 年 1 月 31 日のデータより、特に変状量が大きい図-2.5 中の k-8 と k-12 を取り上げて、期間中のデータを分析した。図-2.6 に累積角度の推移を示す。また、図-2.7、図-2.8 に 1 か月ごとの累積角度の軌跡を示す。これより、k-8 については、1 か月毎では大きな変状は見られないが、断続的に斜面に垂直な向きの変状になっていることが確認できる。k-12 に関しては、2018 年と 2020 年に大きな変状が見られ、経年的に変状量が増大している。

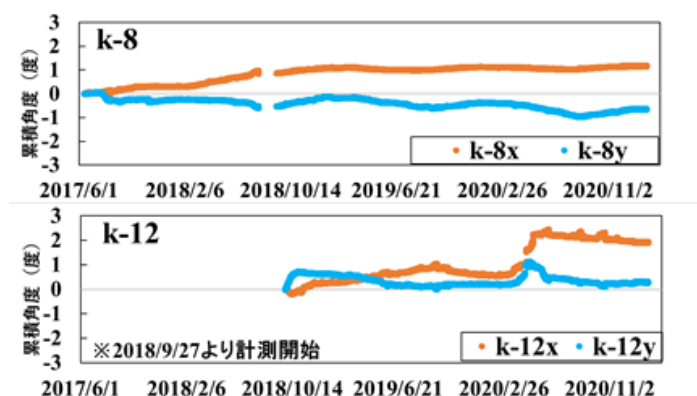


図-2.6 累積角度の経時変化 (k-8, k-12)

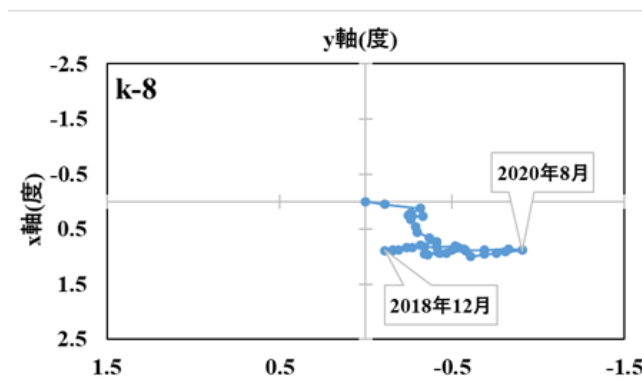


図-2.7 傾斜計の 1 か月ごとの累積角度の軌跡 (k-8)

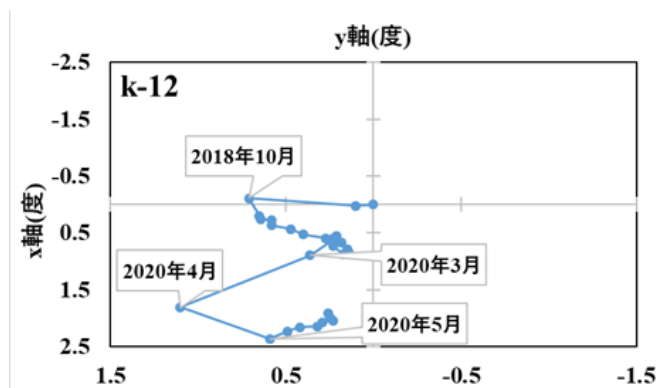
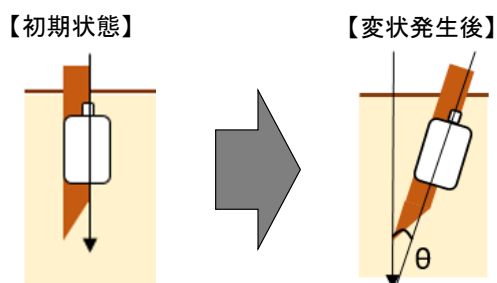


図-2.8 傾斜計の 1 か月ごとの累積角度の軌跡 (k-12)

また、斜面に垂直な向きに変状が大きいことが確認できる。この斜面表層の変状量をベクトルで表し斜面の動きを視覚化したものを図-2.9に示す。これより、相対的な変状の大小が確認できる。また、ベクトル表示するために図-2.10のように傾斜計の回転軸を下端と仮定した。図-2.9より、k-3やk-8などの南東側の斜面と、k-11、k-12付近では比較的大きな変状があることがわかる。一方でk-2やk-7などの北西側では変状量が小さいことが確認できる。この斜面全体の変状傾向として、斜面中腹の変状に連動して下方も変状していることが考えられる。一方で変状量の小さな箇所は実際には動いているが、斜面が平行移動することで傾斜計が静止しているように見えることも考えられる。また、k-11、k-12の変状が大きいのは、実際に崩壊が進行しつつある斜面付近に傾斜計が設置してあるので変状が起りやすいことがわかる。これより、斜面の局所的な変状傾向を面的にとらえることができている。



回転軸を下端と仮定

図-2.9 傾斜計回転軸の考え方

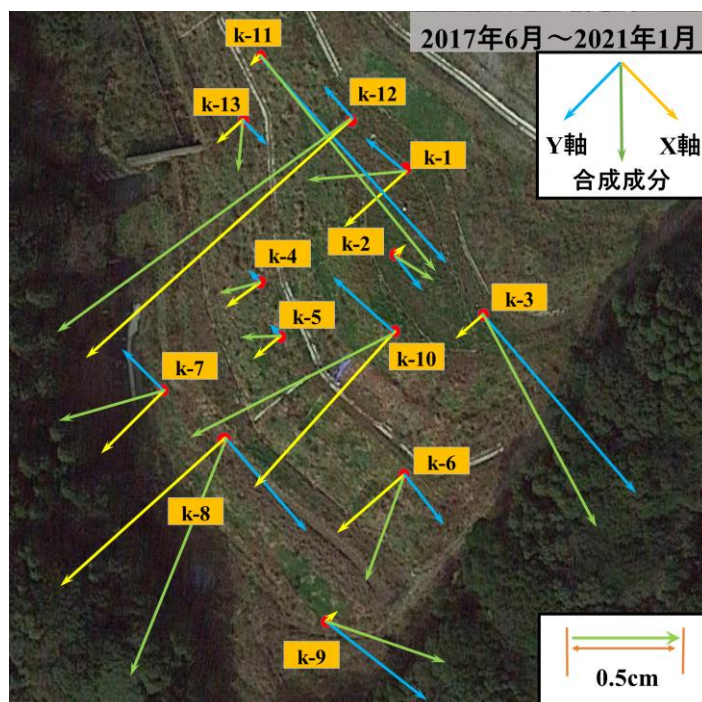


図-2.10 斜面の変位ベクトル図 (2017年～2021年)

2.5.2 降雨による地下水位変動について

図-2.5 に示した斜面下段に設置した地表面から約 10m の深さで計測を行っている間隙水圧計について、2017 年～2020 年のデータを用い、降雨量に対する地下水位の変化の関係について分析した。まず、降雨量と地下水位の関係より、例として 2020 年の降雨量と地下水位のグラフを図-2.11 に示す。平常時の地表面からの地下水位が 6～6.5m ほどの範囲に水位が存在していることが確認できるが、降雨に伴い、地下水位の上昇が約 1m～3m の間で見られる。これは地表面から約 3.5～4m の位置まで地下水位が上昇することがわかる。このグラフより、色のついた期間の最高水位と最低水位の差とその期間内の総降雨量をグラフに表したものを図-2.12 に示す。これは、同様に 2017 年～2020 年のそれぞれの期間も表している。このグラフより、降雨に対する地下水位の上昇量が年々低下傾向にあることが伺える。これは、地下水位が流下する層の透水性が高まる傾向を示しているものと考えられる。また、降った雨の一部が地中に浸透せず、表面に流出している可能性も考えられる。次に杉山らの研究にならい、雨量係数 C_r と降雨前の地表面からの地下水位の関係について分析した結果を図-2.13 に示す。図-2.13 は図-2.12 と同様の期間を対象としている。ここで、雨量係数(C_r)とは、降雨量と当該降雨後の上昇した地下水位の比で表されるものである。2019 年は近似曲線が下降しているのに対して 2018 年、2020 年は上昇している。雨量が多いほど地下水位の変化が大きくなることや降雨前の地下水位が低いほど水位の変化が大きいたことが考えられる中で、2019 年のような下降している近似曲線が通常考えられる傾向である。それに対し、2018 年や 2020 年の近似曲線が上昇している要因として、先行降雨に対し、水位が定常時まで下がりきらずに降雨が生じたことによって上昇水位の変化に影響を与えたことが考えられる。今後よりデータが蓄積されることによって、降雨と地下水位の変化から、斜面内の水位上昇と降雨量との間の相関性を明らかにできるものと考えられる。

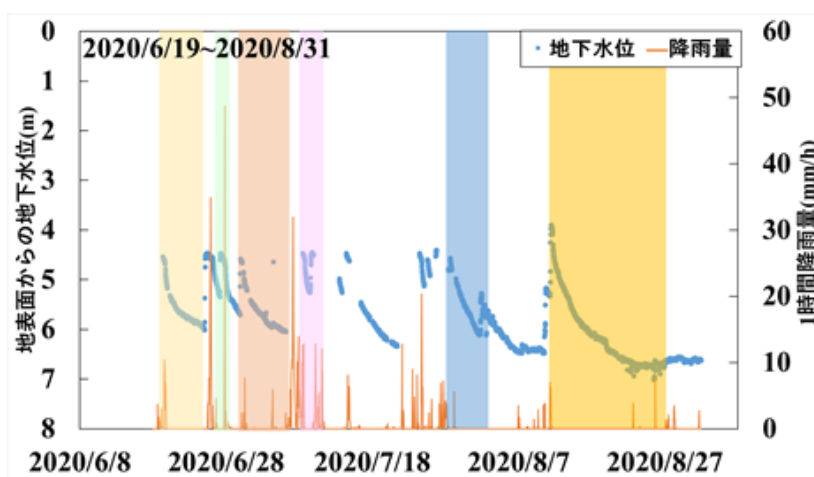


図-2.11 降雨量と地下水位の関係

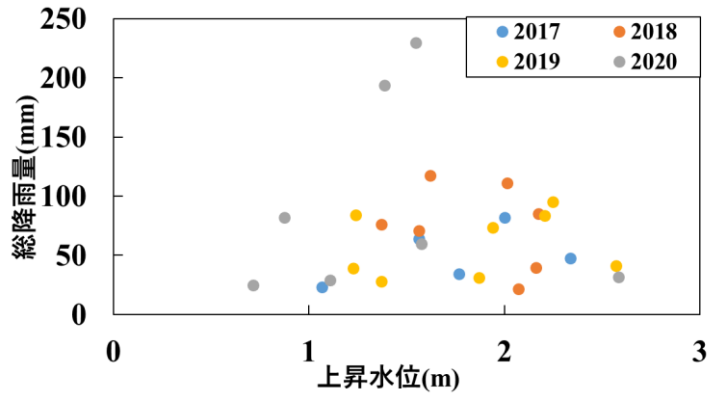


図-2.12 降雨量と水位上昇の関係

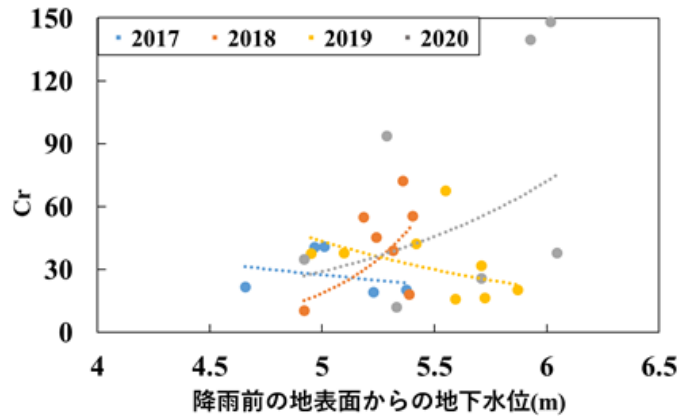


図-2.13 降雨前の地下水位と雨量係数との関係

2.5.3 地下水位の変化と斜面変状の関係

地下水位と変状量の関係について、2018年～2020年までの期間における6月～8月までの水位上昇累積度数とx、y軸の傾斜角の変状量を図-2.14、水位上昇累積度数と1か月毎の変状量を図-2.15に示す。ここで水位上昇累積度数(m*h)とは、基盤岩からの地下水位をある期間ごとに累積して水位上昇の頻度を求めたものである。1か月ごとの変状量と水位上昇累積度数の関係では年ごとに水位上昇累積度数に関わらず変状量に差が生じていることがわかる。6月～8月までの3か月間の関係では、2018年ではx軸方向に斜面に対して直行方向に変状が大きいことが確認されたが、2020年ではy軸方向に変状が大きいことが確認された。これは年によって動きやすい方向が異なるという傾向があることが分かった。これらにより年によって同程度の水位の変化があったとしても斜面の変状の方向が必ずしも一様ではないということが分かった。今後、データの蓄積により、斜面の動きやすさと方向、斜面のどの辺が動きやすいかが明らかにすることができれば変状対策を行う上で意味のある情報が得られると考えられる。

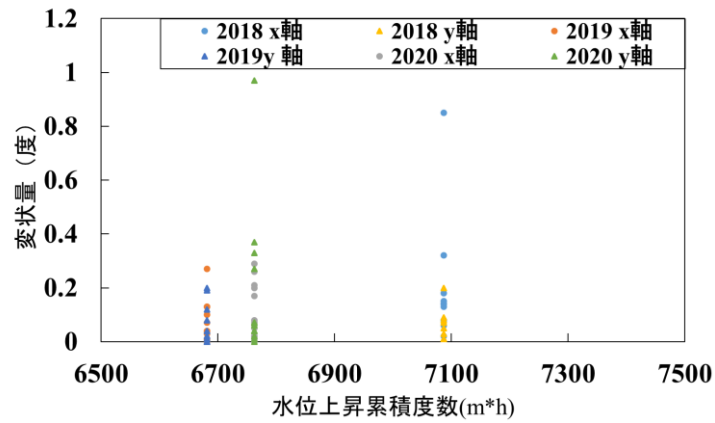


図-2.14 水位上昇累積度数と変状量との関係（各年6月～8月のデータ）

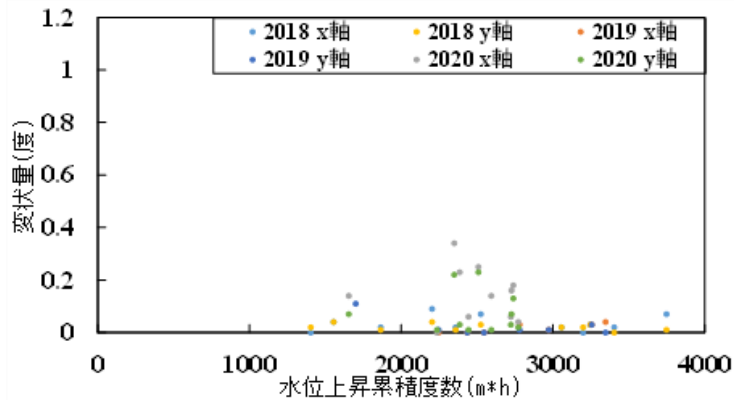


図-2.15 水位上昇累積度数と変状量との関係（1か月毎のデータ）

2.6 おわりに

斜面地を用いた遠隔モニタリングで得られた降雨量、地下水位、地表面変状量の各種物理量に基づき、相互の関連性について分析を行った。特に、降雨量に基づく雨量係数と地下水位との関係、水位上昇累積度数と地表面変状量との関係により、斜面の地すべりの挙動を定量的に評価する手法の提案を行った。これらの結果は、計測モジュールが遠隔モニタリングシステム上で、データ計測に対し十分な性能を発揮していることは明らかであり、今後、経年的かつ複数個所でのデータの蓄積とその分析により、これらの適用性をさらに検証していくことが必要と考えられる。

第3章 適用環境に応じた計測センサの選定条件の解明

3.1 はじめに

防災、農業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条件を検討する。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、多点計測実現のためこれらを明らかにする。

3.2 諫早干拓内の畑地における各種物理量の計測実証実験

第2章で先述した遠隔モニタリングシステムを諫早干拓内の畑地へ適用した事例をもとに、土壌の各種物理量の計測を通したセンサの選定条件の検討を行った。本事例は、キャベツの1条植えないし2条植えの条件において、生育の個体差が事前に確認されていたことから、その原因を明らかにすることを目的として、日照条件、温度、水分率を各種センサで計測することを試みたものである。キャベツなどの葉物野菜は、通常成長過程での累積温度の大きさから、収穫の目安を決定しているものの、本来は植物が接している地温の変化が成長に直接影響していることから、特に地温に着目している。また、植物の成長に要する水分は、直接土壌水分率の変化が大きく影響することから、土壌水分率も重要な計測対象となる。

本研究では、特にキャベツ個体付近の地温ならびに土壌水分率を計測するセンサについて、従来から使用されているものと、近年普及しつつあるMEMSタイプの低価格センサを比較し、多点観測にこれらが適用可能かを計測データから確認した。

3.3 計測環境の概要

図-3.1 に示すように、幅7m、奥行き15m程度の畑地内が計測対象であり、東西方向にキャベツの1条植えならびに2条植えを図-3.2のように配置することで、日照条件の差異を意識している。また、両者の差異を明らかにするため、植物周辺の南北方向の地温ならびに土壌水分率の変化を比較計測することができるよう、3種類の温度センサ、2種類の土壌水分計をそれぞれ図のように設置した。これらのセンサは、すべて先述の遠隔モニタリングシステムに接続し、30分おきに計測した物理量をサーバーに記録するように設定した。要する電力も、斜面でのモニタリングと同様、ソーラーパネルと鉛バッテリーの組み合わせによる自立型電源を構成し賄っている。写真-3.1に遠隔モニタリングシステム設置後の様子を示す。

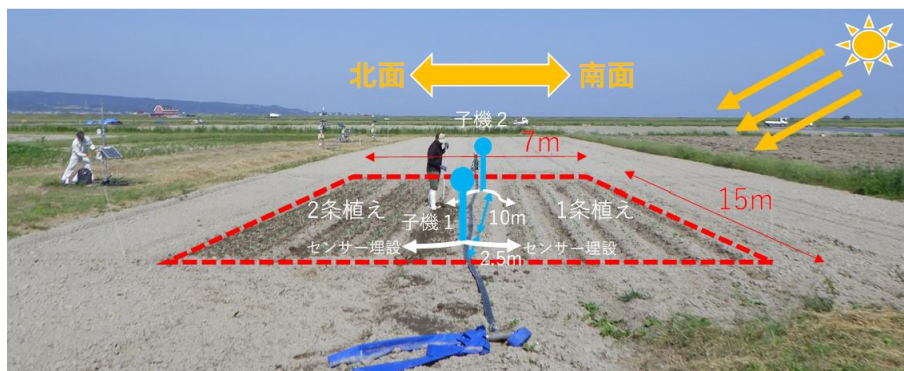


図-3.1 計測対象の遠景と日照条件

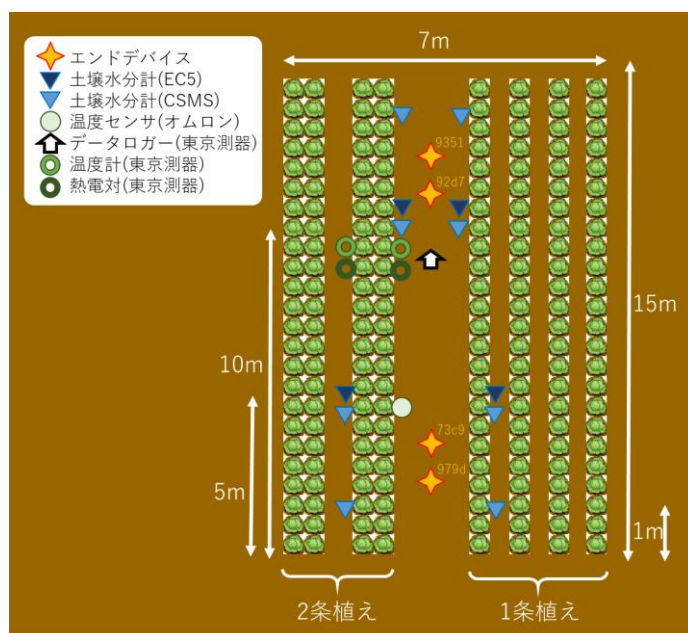


図-3.2 キャベツの作付配置と各種センサの設置位置



写真-3.1 遠隔モニタリングシステムの設置の様子

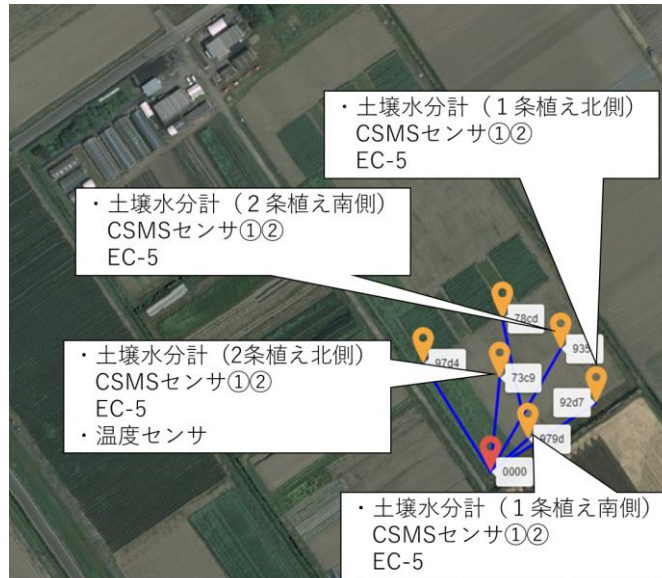


図-3.3 無線センサネットワークの接続状況の例

図-3.3 に、現地で構築されている無線センサネットワークの接続状況を示す。赤のバルーンが通信親機、オレンジの複数のバルーンがそれぞれ通信子機を表し、一部の子機に温度センサならびに土壌水分計が接続されている。通信モジュールを介して、親機に収集データを送信し、携帯回線を通して長崎大学のサーバーにデータを転送している。

3.4 各種温度センサによる計測データの比較

本研究では、写真-3.2 に示す3種類の温度センサを同農地の計測に適用した。(a)は安価なMEMS式のサーマルプローブセンサ(DS18B20:Uxcell製)、(b)は従来から様々な分野で利用されている熱電対(T-G-0.32:株東京測器研究所製)、(c)はホイートストンブリッジ回路を利用した高精度の4ゲージ式温度センサ(KT-110A:株東京測器研究所製)である。

図-3.4 にこれら3種類の温度センサを使用して一定期間地温を測定した結果を示す。それぞれ、キャベツの作付配置に対して南向き、北向きの同条件で設置した結果である。北向き設置のデータ推移と比べると、南向き設置の方が3種間で相対的に大きなばらつきが生じ、最大で10%程度の差異が確認されたものの、特に高温時において「(b)熱電対」<「(a)サーマルプローブセンサ」<「(c)4ゲージ式温度センサ」の大小関係となっており、最も安価なMEMS式のセンサが、従来から利用されている熱電対と高精度センサの中間の温度を示した。従来から用いられている「熱電対」や「4ゲージ式温度センサ」に対し、安価で多点観測への利用が期待される「サーマルプローブセンサ」においても、実用上同程度の計測が可能であることが明らかとなった。



(a)サーマルプローブセンサ
(DS18B20)



(b)熱電対(T-G-0.32)



(c)4ゲージ式温度センサ
(KT-110A)

写真-3.2 本研究で使用した各種温度センサ

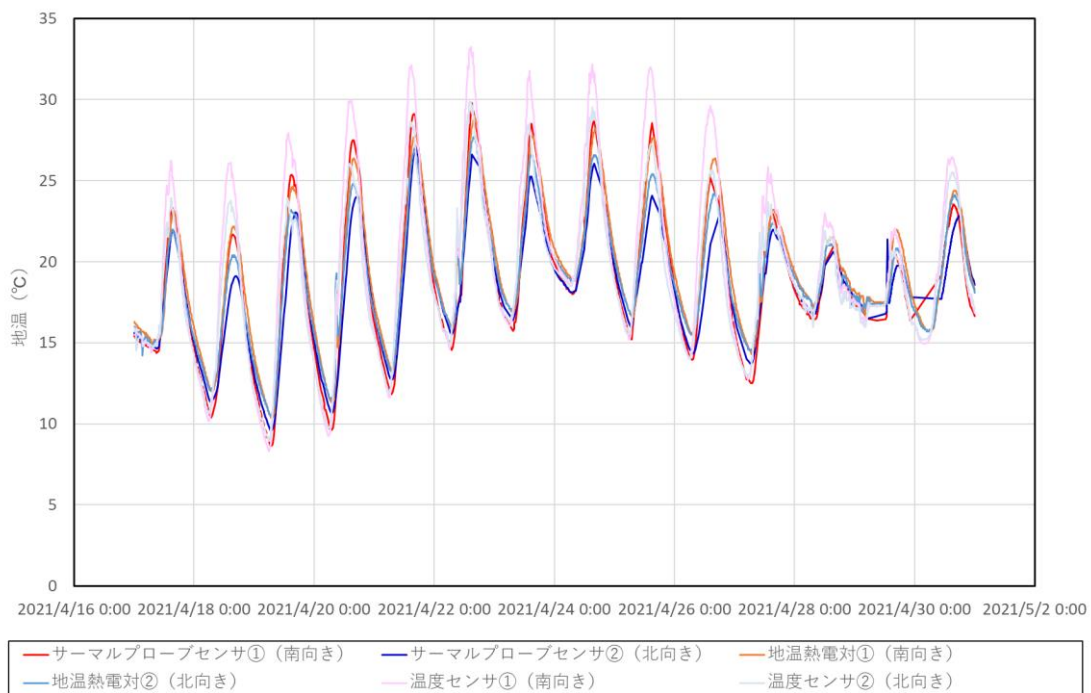


図-3.4 各種センサによる地温の計測例

3.5 各種土壌水分計による計測データの比較

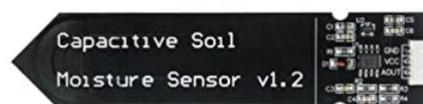
本研究では、写真-3.3 に示す 2 種類の土壌水分計を同農地の計測に適用した。両者とも静電容量型のセンサであるが、従来から農地の土壌や斜面の土質の水分量変化を計測するのによく用いられる (a)土壌水分計(EC-5: METER 社製)に対し、(b)土壌水分計(CSMS-V1.2: KeeYees 社製)は、1 基当たり約 50 分の 1 程度の安価なセンサであり、主に園芸用に用いられている。

図-3.5 に、これらの土壌水分計を使用して一定期間土壌水分率を測定した結果を示す。広く研究・実務で利用されている「土壌水分計 (EC-5)」に対し、安価で多点観測への利用が期待される「土壌水分計(CSMS-V1.2)」において、特に高水分率における出力値の推移に乖離が確認された。また畑地は、耕うん状態の差異が場所により大きいと考えられることから、

個体差よりも設置条件に依存していると考えられる。近傍の個所で複数点での観測により、平均的なデータを収集する必要があるものと考えられる。



(a) 土壌水分計(EC-5)



(b) 土壌水分計(CSMS-V1.2)

写真-3.3 本研究で使用した2種の静電容量型土壌水分計

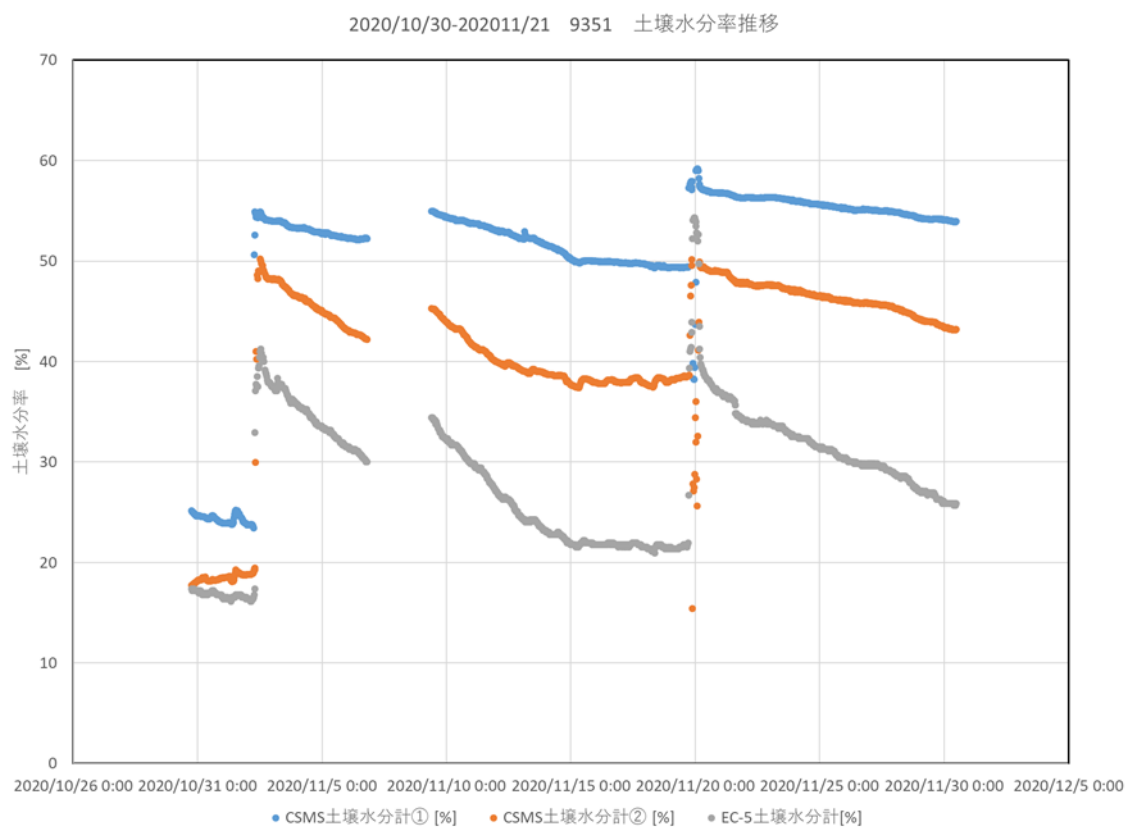


図-3.5 2種の土壌水分計による土壌水分率の計測例

3.6 おわりに

農地を対象に、地温や土壌水分率の計測を中心とした遠隔モニタリングシステムの構築とデータ収集を行った。地温に関しては、低廉なセンサにおいても安定した出力が確認さ

れたが、土壌水分率については従来型のセンサに対し低廉なセンサにおいて、特に高水分率の領域で出力値の乖離が確認された。測定対象地盤の不均質性が高いことも影響していると考えられることから、センサの設置個所数や設置方法について、平均値を得られるような工夫が必要であると考えられる。

第4章 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

4.1 はじめに

無線センサネットワークシステムは、通常各センサ付き端末であるエンドデバイスやこれらの中継するルーターさらにセンサの遠隔管理やデータ収集およびインターネット回線であるLTE通信網への中継を行うコーディネーターなど相互が距離を持った場所に設置され構成される。これらのデバイスは、当然の事ながら電力を必要とし、電力供給源を必要とする。本章では、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観測エリアにおけるの通信品質との関連性について検証結果を示す。

4.2 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-4.1)。我々もこれらの特徴が本システムの方角性に合致していると考え、同規格の導入を行った。

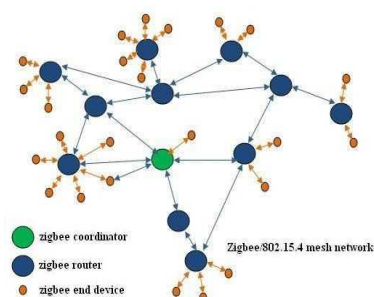


図-4.1 Zigbee を用いたメッシュネットワーク

4.3 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-4.1に示す



写真-4.1 設置端末の例（30W太陽光パネルや120Whの鉛蓄電池）



写真-4.2 10m 程度の範囲に設置されたデバイス群（斜面地の例）

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-4.2)、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的に不向きであると結論付けた。

4.4 802.11b (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。

表-4.1 802.15.4 と 802.11b との比較

Standard	Zigbee	Wi-Fi
IEEE spec..	802.15.4	802.11a/b/g
Frequency band	868/915 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	FSK (+ 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

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-4.1)。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。

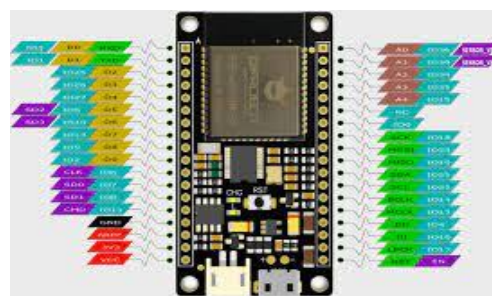


図-4.2 導入した WiFi 機能を持つ低価格マイコン (ESP32)

図-4.2 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-4.3 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-4.1 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。



写真-4.3 2W 太陽光パネルと 3Wh のリチウムバッテリーにより小型化を実現

本件証では、見通しのきく 200m 程度の範囲内(図-4.3)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。

4.5 おわりに

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 Local 5G の利用も検討を進めて行く予定である。



図-4.3 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)

第5章 結論と今後の展望

本研究において、以下の成果を得ることができたのでこれを述べる。

(1) 開発済みの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

斜面地を用いた遠隔モニタリングで得られた降雨量、地下水位、地表面変状量の各種物理量に基づき、相互の関連性について分析を行った。特に、降雨量に基づく雨量係数と地下水位との関係、水位上昇累積度数と地表面変状量との関係により、斜面の地すべりの挙動を定量的に評価する手法の提案を行った。今後、経年的かつ複数個所でのデータの蓄積とその分析により、これらの妥当性をさらに検証していくことが必要と考えられる。

(2) 適用環境に応じた計測センサの選定条件の解明

農地を対象に、地温や土壌水分率の計測を中心とした遠隔モニタリングシステムの構築とデータ収集を行った。地温に関しては、低廉なセンサにおいても安定した出力が確認されたが、土壌水分率については従来型のセンサに対し低廉なセンサにおいて、特に高水分率の領域で出力値の乖離が確認された。測定対象地盤の不均質性が高いことも影響していると考えられることから、センサの設置個所数や設置方法について、平均値を得られるような工夫が必要であると考えられる。

(3) 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

無線規格の消費電力と無線通信距離にはトレードオフがあり、計測対象に対する計測頻度等の計測条件により、そのデバイス選択・設計方法が異なる。本研究により、Wifi(IEEE 802.11b) 機器が伝送能力（スピードや容量）、開発の容易性、機器の設置性などから30分に一度程度の計測であれば現状最適である事が確認できた。

屋外長期計測に対し、安価で比較的高精度な計測システムの開発により、多数の観測点の設置や、時空間にわたって高解像度のデータの集積により、幅広い分野での将来予測やシミュレーションへの応用に展開できる。こうした技術開発は、汎用性が高く、このシステムが安価かつ安定的に運用できることが検証できれば、斜面崩壊の危険性の事前評価や河川堤防の侵食・破壊現象のメカニズム解明といった防災分野や、広域的な地下水流動のモニタリングといった水環境分野、営農における散水・施肥・農薬散布の最適化といった農業分野などへの応用にもつながり、広域的なデータ収集が実現できれば、これから得られるビッグデータの活用への展開にもつながることが期待される。