日本建設情報総合センター研究助成　成果報告会資料（2021.11.12）

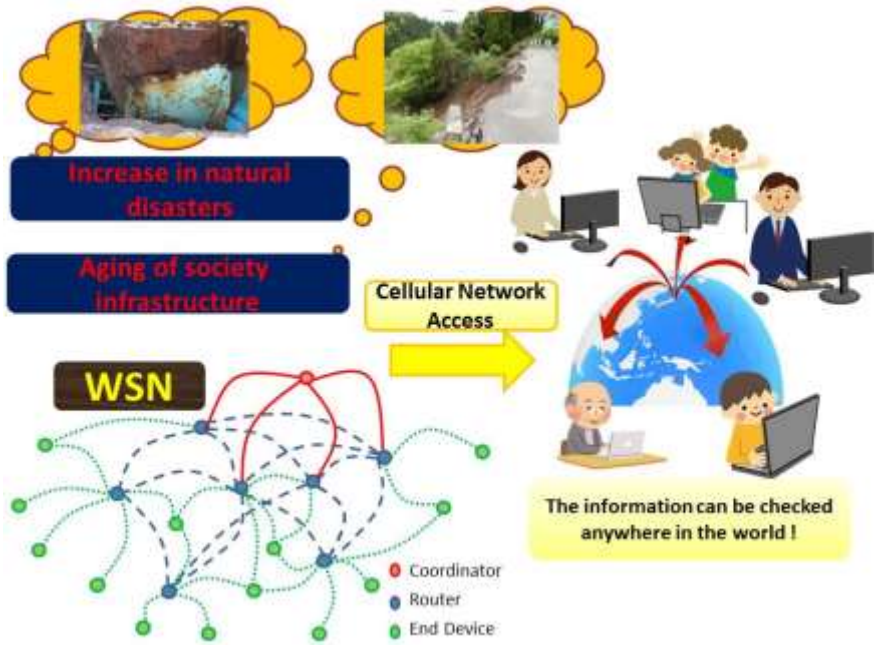
無線センサネットワークシステムを応用した IoT技術による屋外多点計測手法の実装のための調査研究

長崎大学大学院　杉本　知史・石塚　洋一

研究の目的・意義

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．

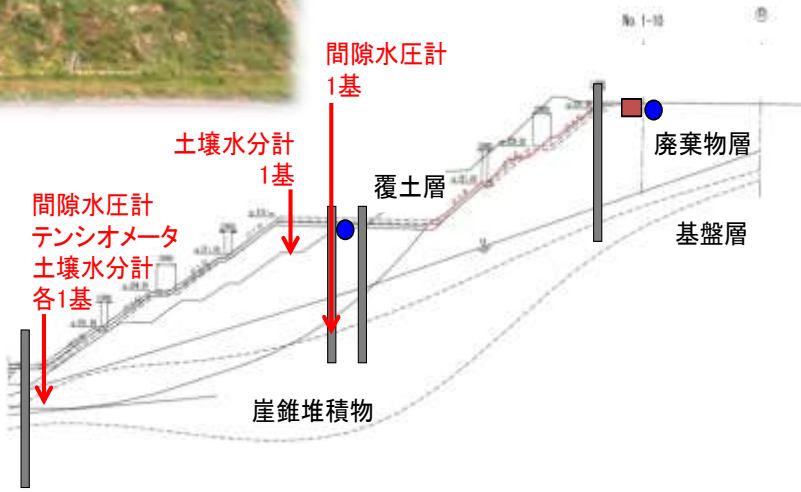
こうした技術開発は，汎用性が高く，このシステムが安価かつ安定的に運用できることが検証できれば，斜面崩壊の危険性の事前評価や河川堤防の侵食・破壊現象のメカニズム解明といった防災分野や，広域的な地下水流動のモニタリングといった水環境分野，営農における散水・施肥・農薬散布の最適化といった農業分野などへの応用にもつながり，広域的なデータ収集が実現できれば，これから得られるビッグデータの活用への展開にもつながることが期待される．

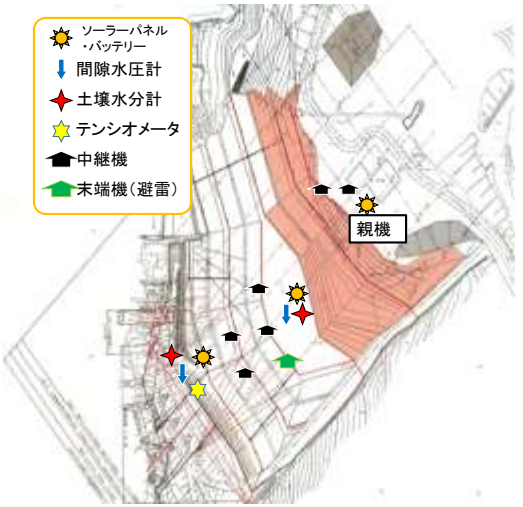


研究の目的・意義

　これまで申請者らは，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・検証を目的とする.

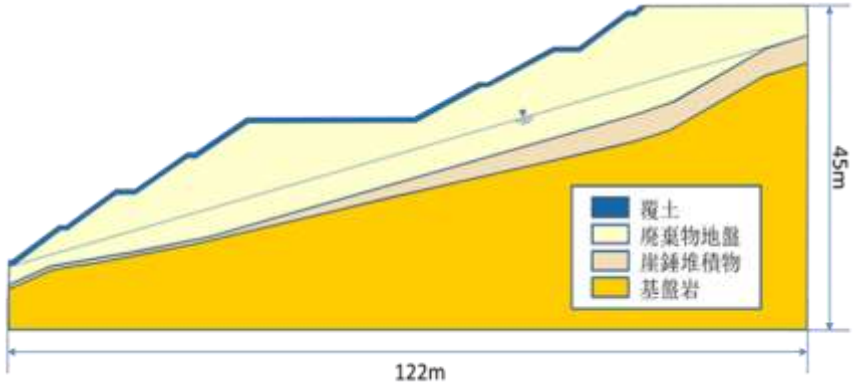




開発済みの多点計測用モジュールの屋外環境下での計測の適用性評価（斜面モニタリング）

●対象斜面の概要

- 佐世保市内の産業廃棄物最終処分場
- 約150m×約120m×約40m
- 地表から順に産業廃棄物，崖錐堆積物，基盤岩で構成
- 法面勾配1:1.5
- 最大傾斜：40°



対象斜面の断面図

・経緯

7年前：変状を確認

6年前：緩勾配化するための
土砂の切り返し工事，
雨水浸低減のための覆土工，
地下水位低下工

しかし、再度変状を確認

5年前：モニタリング開始

対象斜面上空写真

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（斜面モニタリング）

IoTモニタリングシステム
（降雨量・地下水位・土壌水分率・地表面変状量）

エンドデバイス(端末)

経由

ルーター(中継機)

転送

コーディネーター(親機)

携帯回線
(インターネット)

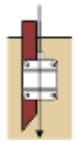
ブラウザ上で通信状況の確認やデータのダウンロードが可能

接続

土壌水分計

間隙水圧計

転倒マス型雨量計



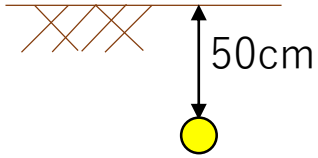
傾斜センサ

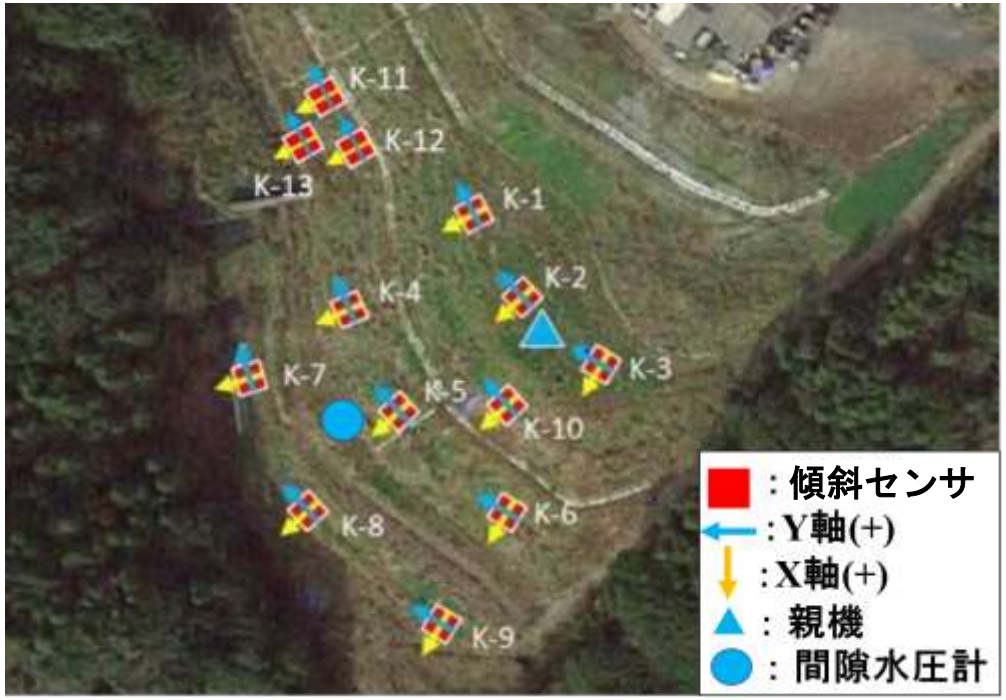
開発済みの多点計測用モジュールの屋外環境下での計測の適用性評価（斜面モニタリング）

傾斜センサ（2軸）

・1か月ごとの変状量の軌跡
・観測期間の変状ベクトル
・水位，降雨量に伴う変状量の比較

傾斜センサ



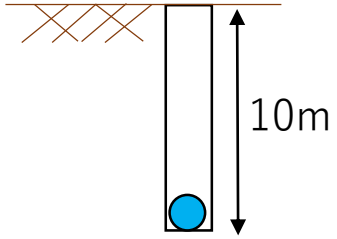


各センサの設置位置

間隙水圧計

・水位と降雨量の比較
・水位上昇に伴う変状量の比較

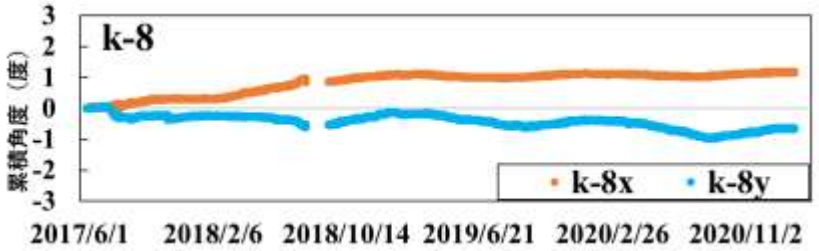
間隙水圧計



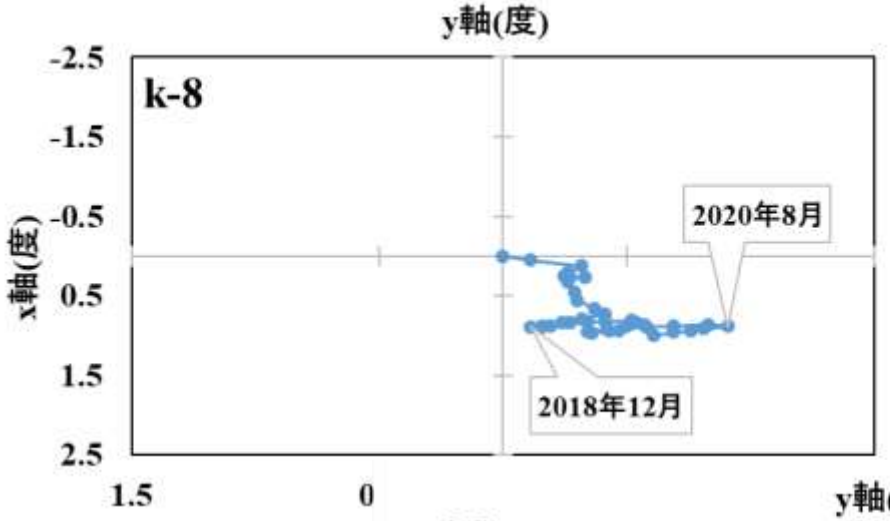
X軸 ↓ ：斜面に対し水平面内に直交な方向
Y軸 ← ：斜面に対し水平面内に平行な方向

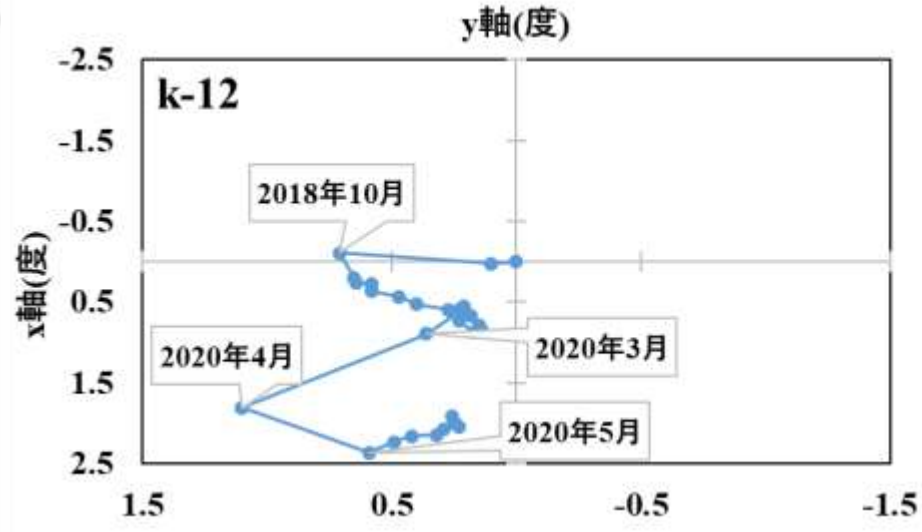
開発済みの多点計測用モジュールの屋外環境下での計測の適用性評価（斜面モニタリング）

累積角度の変化が特に大きいK-8とK-12に着目。



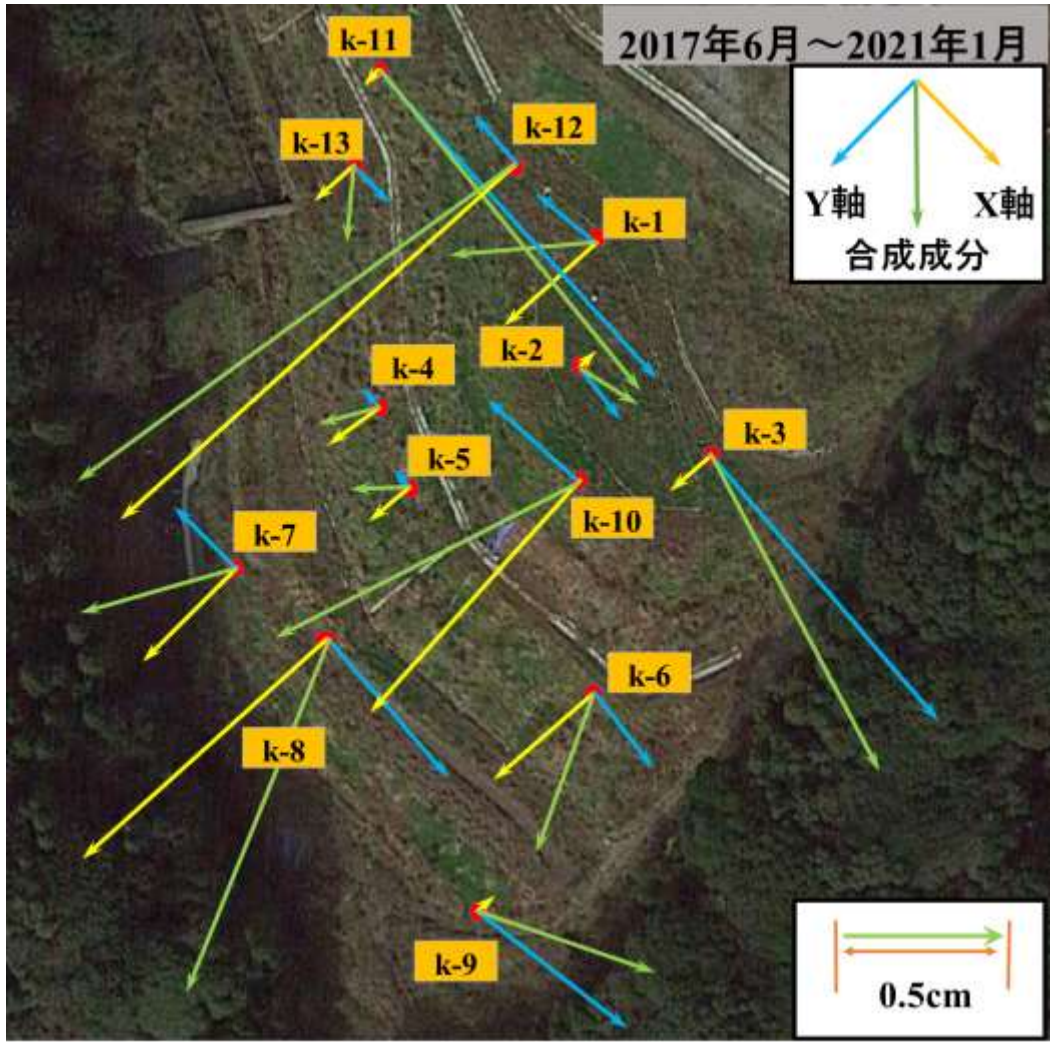
1カ月ごとの変状量の軌跡





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（斜面モニタリング）

変状ベクトルによる表現



●K-8,K-10

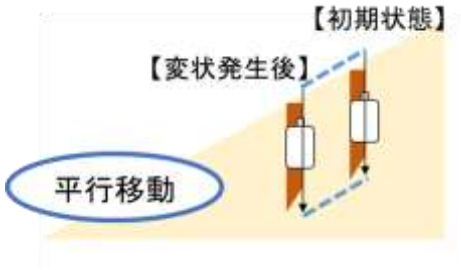
斜面中腹の変状に連動して下方の斜面も変状している可能性がある。

●K-11,K-12

斜面崩壊が進行しつつある斜面の近くに傾斜計を設置しているため大きな変状があったと考えられる。

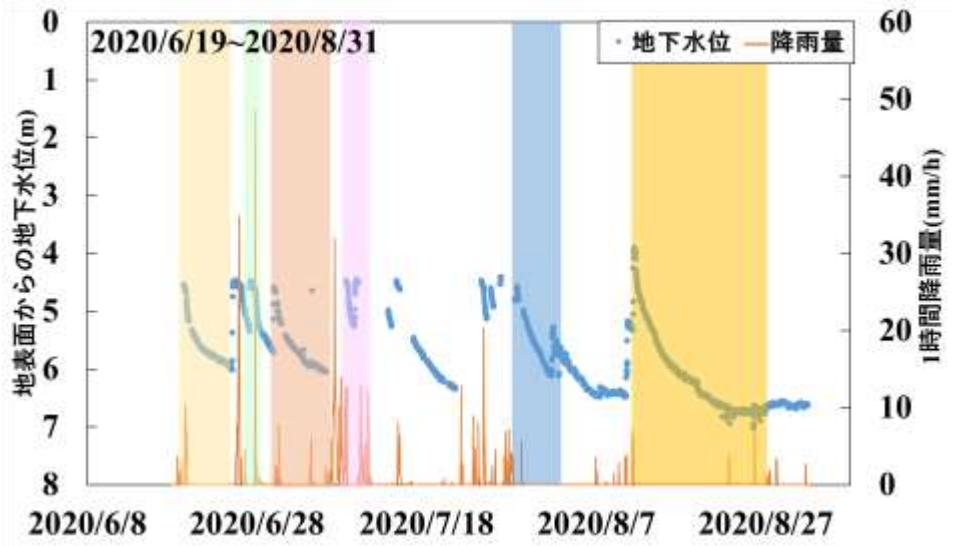
●K-4,K-5

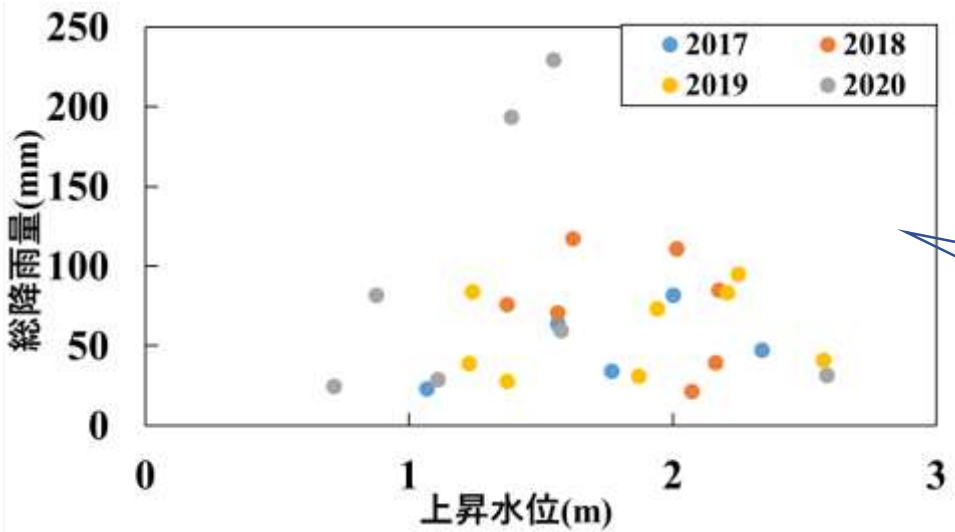
斜面の平行移動によりほとんど動いていないように見えている可能性がある。



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（斜面モニタリング）

降雨量と地下水位の関係について





2020年は特に雨量に対して上昇が小さかった

↓

時間が経つごとに水位の変化の仕方が変わっている

↓

- 降雨に対する地下水位の上昇量が年々低下傾向にある
  →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

縦軸を横軸で割ったものを
雨量計数（Cr）とする

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（斜面モニタリング）

雨量係数との関係について

雨量係数とは

降雨量と降雨によって上昇した地下水位の比で表されるもの

$$Cr=R/\Delta H$$

Cr:雨量係数、R:降雨量(mm)、
ΔH:降雨による地下水位の上昇量(m)

通常は…

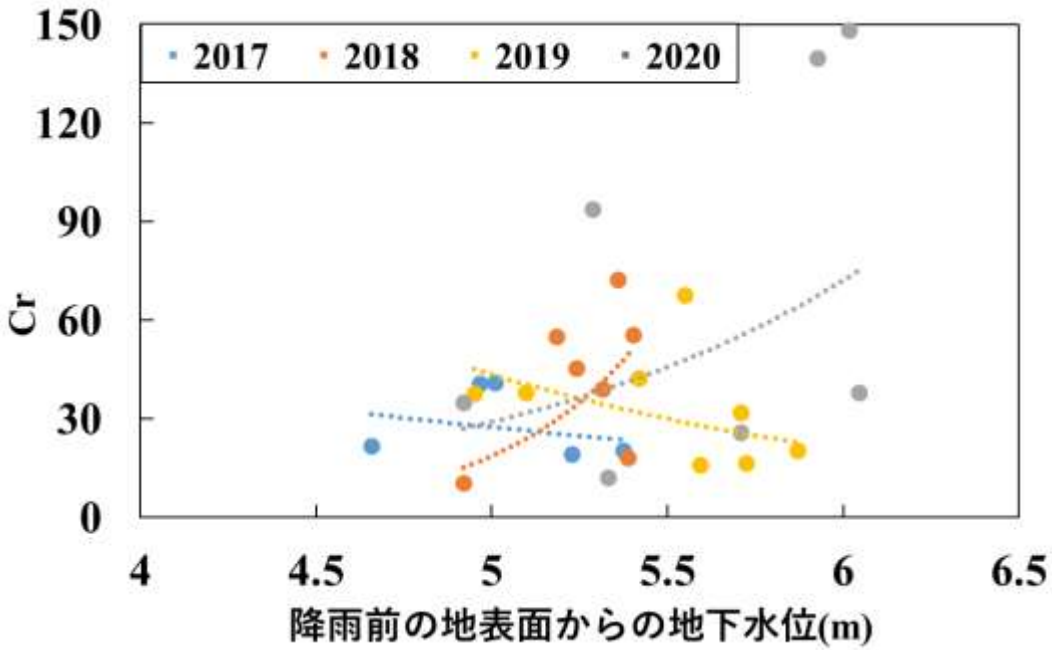
- 雨量が多いほど地下水の変化が大きい
- 降雨前の地下水位が低いほど水位の変化が大きい

→2017年，2019年のように右下がりになるものと考えられる

2018年，2020年では…

- 先行降雨に対し、水位が定常時まで下がり切らずに降雨が生じた

→上昇水位の変化に影響を与えたものと考えられる



今回の研究においては、Crと降雨前の地下水位の関係が不明確である

水位上昇と斜面の安定性評価との相関性をさらに検討することが必要と考えられる

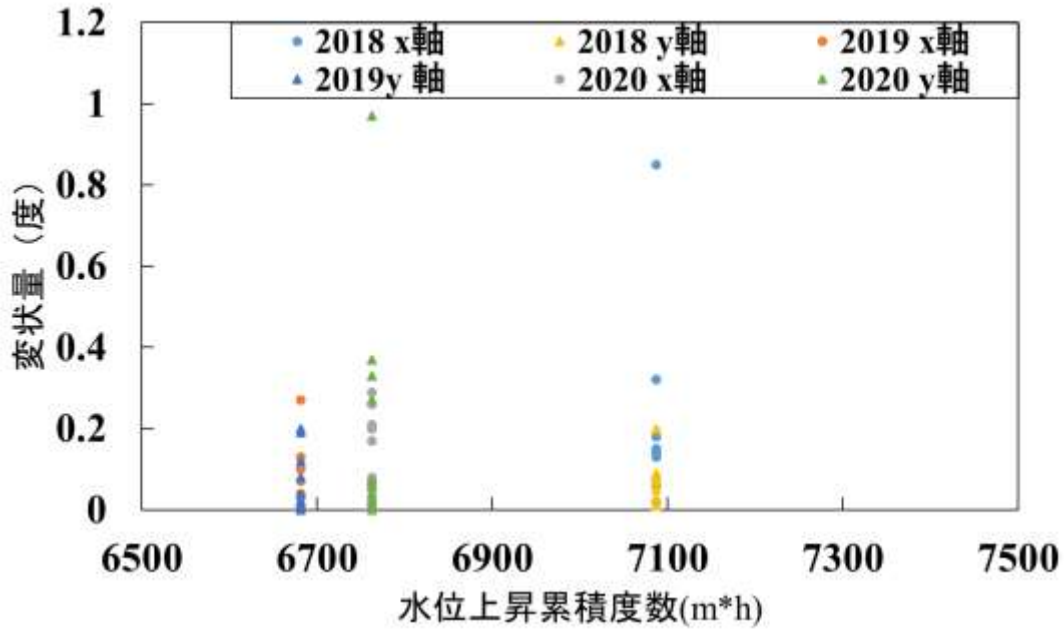
開発済みの多点計測用モジュールの屋外環境下での計測の適用性評価（斜面モニタリング）

水位上昇と変状量の関係について

水位上昇累積度数(m*h)とは

ある期間において基盤岩からの地下水位とそれに伴う時間を累積することで上昇水位の頻度を表したもの

X軸方向：2018年に大きな変状が確認された
Y軸方向：2020年に大きな変状が確認された



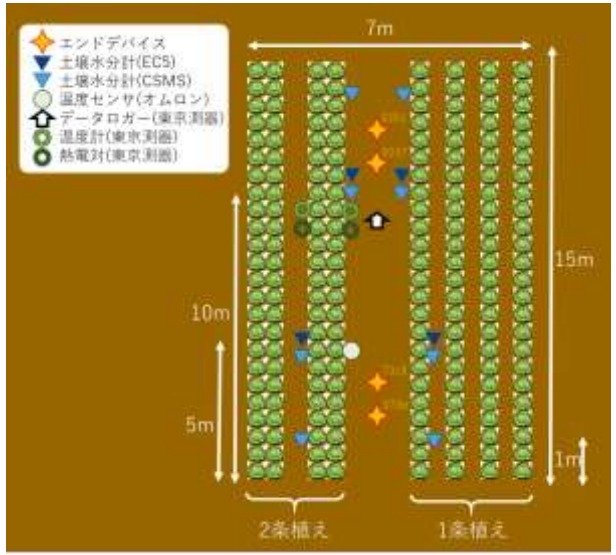
3 か月間の変状量と水位上昇累積度数の関係(6月～8月)

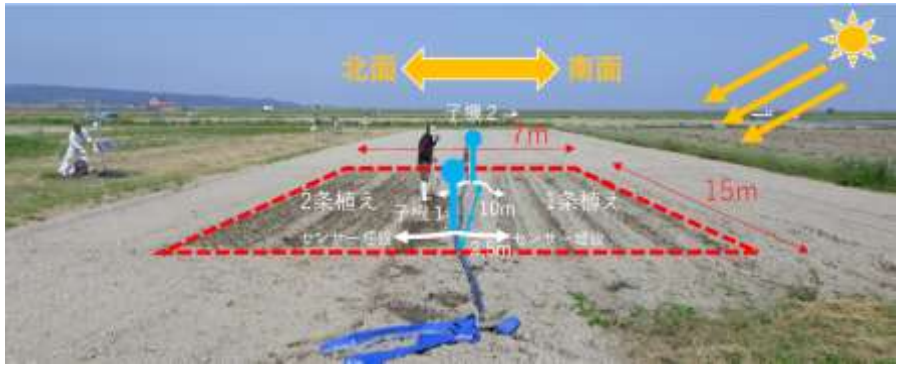
- 年によって動きやすい方向が異なるという傾向が明らかになった
- 水位上昇累積度数の値が相対的に小さくとも変状量に差が生じることが確認された

経年的な地表面変状量と地下水位上昇の程度のデータの蓄積に基づき、当該斜面の安定性評価につながるものと考えられる

適用環境に応じた計測センサの選定条件の解明（農地モニタリング）

諫早干拓内の畑地における各種物理量の計測実証実験





対象フィールド：諫早干拓地内
長崎県農業技術開発センター
計測対象：キャベツ畑周辺の
気温・地温・土壌水分率・降雨量

フィールド内における各種センサの動作安定性、無線通信の安定性、独立電源の安定性に着目して計測の適用性を検討した。

適用環境に応じた計測センサの選定条件の解明（農地モニタリング）

諫早干拓内の畑地における各種物理量の計測実証実験

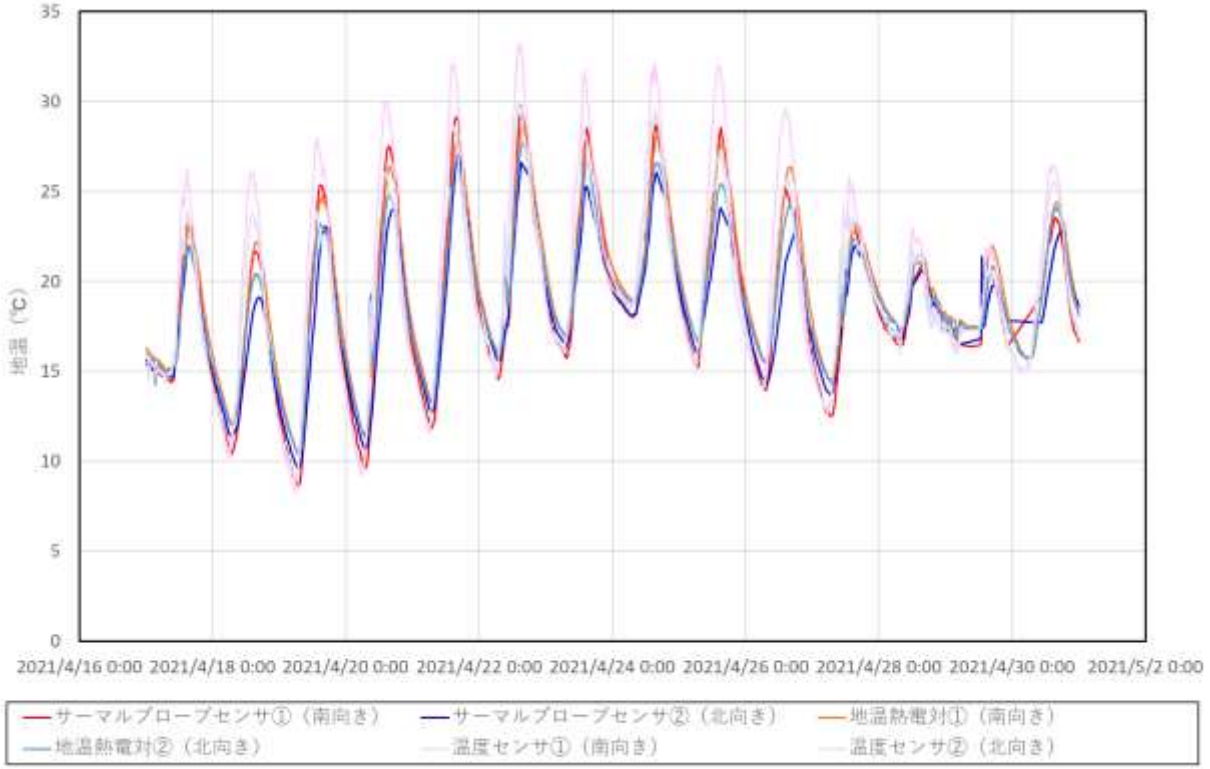
・使用した温度センサ

サーマルプローブセンサ(DS18B20)

熱電対(T-G-0.32)

4ゲージ温度センサ(KT-110A)

各種センサにおける気温・地温の計測例



従来から用いられている「熱電対」や「4ゲージ温度センサ」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、同程度の計測が可能であることが明らかとなった。

適用環境に応じた計測センサの選定条件の解明（農地モニタリング）

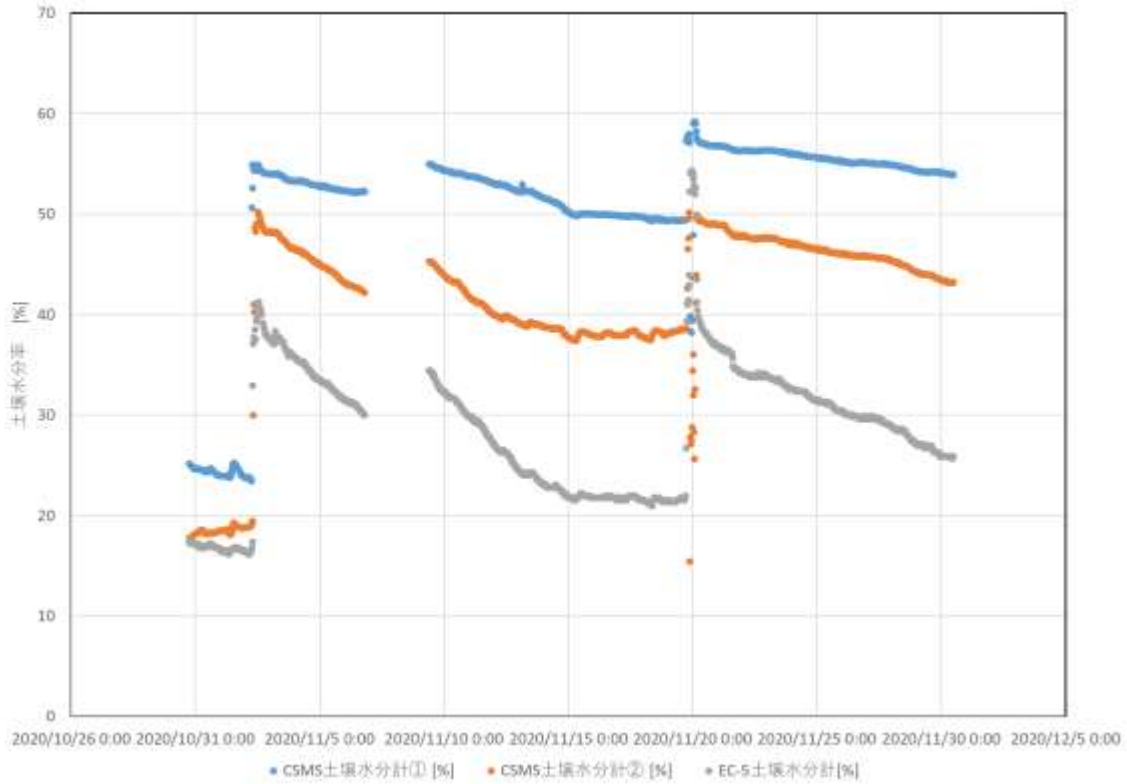
諫早干拓内の畑地における各種物理量の計測実証実験

・使用した静電容量型土壌水分計

土壌水分計(EC-5)

土壌水分計(CSMS-V1.2)

各種センサにおける土壌水分率の計測例

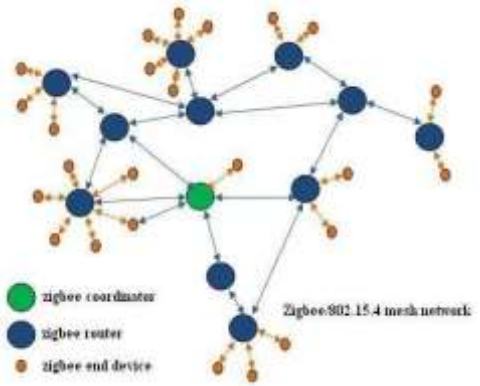


広く研究・実務で利用されている「土壌水分計（EC-５）」に対し、安価で多点観測への利用が期待される「土壌水分計(CSMS-V1.2)」において、特に高水分率における出力値の推移に乖離が確認された。
また畑地は、耕うん状態の差異が場所により大きいと考えられることから、個体差よりも設置条件に依存していると考えられる。近傍の個所で複数点での観測により、平均的なデータを収集する必要があるものと考えられる。

エネルギーハーベスティングに関する電力収支の検討
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

申請以前に利用を行っていた無線ネットワーク　**Zigbee (IEEE 802.15.4)**

採用理由：低消費電力，メッシュネットワーク（広範囲接続），LPWAと比較し高速伝送



Zigbeeを用いたメッシュネットワーク

設置端末の例（ 30W太陽光パネルや10Ahの鉛蓄電池）

10m程度の範囲に設置されたデバイス群（斜面地の例）

本研究を通して明確となった点

- LTE等の広域ネットワークへの取次点であるCoordinatorまでは，常にRouterを経由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。
- つまり，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，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。
- 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，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。

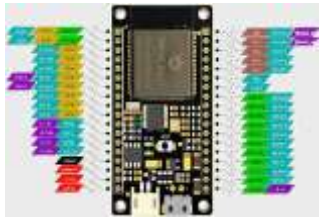
Standard	Zigbee	Wi-Fi
IEEE spec..	802.15.4	802.11a/b/g
Frequency band	68/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz; 5 GHz
Max signal rate	250kb/s	54Mb/s
Nominal range	10-100 m	100 m
Nominal TX power	-25) - 0 dBm	15 - 20 dBm
Number of RF channels	1/10;16	14(2.4GHz)
Channel bandwidth	.3/0.6 MHz; 2 MHz	22MHz
Modulation type	PSK (+ ASK), O-QPSK	BPSK, QPSK COFDM, CCK, M-QAM
Spreading	DSSS	DSSS, CCK, OFDM
Coexistence mechanism	)ynamic 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

https://www.researchgate.net/publication
https://www.rfwireless-world.com/

エネルギーハーベスティングに関する電力収支の検討
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

本申請により有効性を確認した無線ネットワーク　**WiFi (IEEE 802.11b)**

特徴：消費電力比較的大，Tree Network化可能（広範囲接続），高速伝送 (54Mbps)



導入したWiFi機能を持つ低価格マイコン (ESP32)

2W太陽光パネルと3Whのリチウムバッテリにより小型化を実現

本研究を通して明確となった点

- 見通しのきく200m程度の範囲内においてCoordinator(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Router一つを介する事により伝送可能である。
- センサー端末は，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Router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。
- WiFi **(IEEE 802.11b)**は，Zigbeeと比較し歴史も古く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。
- 54Mbpsの高速伝送による画像や動画伝送が可能となる。

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	BPSK (+ 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

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)

https://www.researchgate.net/publication
https://www.rfwireless-world.com/

研究成果のまとめ

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」～「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、斜面の地すべり的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。

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。

エネルギーハーベスティングに関する電力収支の検討
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。

おわりに

本研究遂行にあたり、研究助成を頂きましたことにこの場をお借りしてお礼申し上げますとともに、今回の成果を踏まえ、今後さらに私どもが開発・運用している遠隔モニタリングシステムの社会への実装・普及のために、研究活動を推進していく所存です。

また、本研究を遂行するにあたり、フィールド提供を頂いた長崎県農業技術開発センター様ほか、モニタリングシステム構築にあたり技術的なご協力を頂いた長崎大学　岩崎昌平シニアスタッフ、データ収集における技術的支援を頂いた中央開発㈱様、ならびに関係諸氏のみなさまに対し、ご協力いただいたことへの感謝の意を表します。