



【様式4】

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成果報告レポート  
No. 18-3

研究テーマ

センサーネットワークを利用した  
次世代型斜面防災システムの構築

研究代表者：	立命館大学教授	深川 良一
共同研究者：	立命館大学教授	島川 博光
	立命館大学教授	大久保 英嗣
	立命館大学教授	杉山 進
	立命館大学教授	木股 雅章
	立命館大学教授	小西 聡
	立命館大学講師	横田 裕介
	立命館大学助教	原田 史子
	立命館大学准教授	酒匂 一成
	(株)大林組	鳥井原 誠
	(株)大林組	山本 彰
	三菱電機(株)	菅野 幹人
	三菱電機(株)	桐村 綾子

平成21年6月

新道路技術会議

# 目次

概要 .....	1
第1章 はじめに .....	3
第2章 現地斜面における防災システムの検討 .....	8
2.1 斜面防災システムに関するヒアリング調査について .....	8
2.2 有線システムおよび無線システムにおける設置コストの試算 .....	8
2.3 ワイヤレスセンサーネットワークシステムの構築と現地試験による有効性評価 .....	10
第3章 斜面防災システムに関する検討 .....	19
3.1 斜面崩壊兆候検知アルゴリズムに関する検討 .....	19
3.2 斜面安定性の定量的評価手法に関する検討 .....	24
第4章 センサーネットワークシステムおよびワイヤレスセンサーに関する検討 .....	29
4.1 耐候性インテリジェントロガーに関する検討 .....	29
4.2 構成再編可能型センサーネットワークシステムに関する検討 .....	31
4.3 センサーノードの現地適用性の向上に関する検討 .....	33
第5章 おわりに .....	39
付録 .....	46

## 研究 成果 概要

平成 18 年度採択分  
平成 21 年 6 月 23 日作成

---

**研究課題名 センサーネットワークを利用した次世代型斜面防災システムの構築****研究代表者及び共同研究者**

- ・研究代表者：深川良一（ふかがわりょういち）<sup>1</sup>
- ・共同研究者：島川博光（しまかわひろみつ）<sup>2</sup>，大久保英嗣（おおくぼえいじ）<sup>2</sup>，杉山進（すぎやますすむ）<sup>1</sup>，木股雅章（きまたまさあき）<sup>1</sup>，小西聡（こにしさとし）<sup>1</sup>，横田裕介（よこたゆうすけ）<sup>3</sup>，原田史子（はらだふみこ）<sup>4</sup>，酒匂一成（さこうかずなり）<sup>5</sup>，鳥井原誠（とりいはらまこと）<sup>6</sup>，山本彰（やまもとあきら）<sup>7</sup>，菅野幹人（かんのみきと）<sup>8</sup>，桐村綾子（きりむらあやこ）<sup>9</sup>

**所属研究機関・役職**

<sup>1</sup>立命館大学理工学部・教授，<sup>2</sup>立命館大学情報理工学部・教授，<sup>3</sup>立命館大学情報理工学部・講師，<sup>4</sup>立命館大学情報理工学部・助教，<sup>5</sup>立命館大学グローバル・イノベーション研究機構・准教授，<sup>6</sup>（株）大林組技術研究所地盤岩盤研究室・室長，<sup>7</sup>（株）大林組技術研究所地盤岩盤研究室・地盤グループ長，<sup>8</sup>三菱電機（株）情報技術総合研究所・チームリーダー，<sup>9</sup>三菱電機（株）情報技術総合研究所・主任研究員

---

**【研究の概要】**

本研究は、降雨時の表層すべり型斜面崩壊による緊急時における道路管理を高度化するための道路斜面を対象とした効果的なモニタリング技術の開発を行うものである。そこで、降雨量と地盤内の負の間隙水圧のモニタリングより崩壊兆候を検知することを中心とした斜面防災システムをベースとし、モニタリングシステムにワイヤレスセンサーネットワークシステムの技術を利用してコスト削減、メンテナンスの容易化、耐候性・避雷性の向上、網羅的観測を実現することを目的としたものである。

**【キーワード】** ワイヤレスセンサーネットワーク， 斜面崩壊**（研究開始当初の背景・動機・目的）**

限られた資源で斜面崩壊を予知し災害を未然に防ぐためには、危険性をはらむ斜面上での点的な計測から面的な計測への転換が重要である。しかし、現行では計測点の

多点化には莫大なコストがかかる。また、収集すべき変数が監視過程で新たに追加されることがあるが、現状のデータロガーはこれに対応していない。さらに、交流電源などを使用しにくい山間地斜面の場合は、

安定的に情報を収集することも困難である。本研究では、降雨量と地盤内の負の間隙水圧のモニタリングより崩壊兆候を検知することを中心とした斜面防災システムをベースとし、モニタリングシステムにワイヤレスセンサーネットワークシステムの技術を利用してコスト削減、メンテナンスの容易化、耐候性・避雷性の向上、網羅的観測を実現することを目的とする。

### (研究の主な成果)

本研究では、降雨時の表層すべり型崩壊を対象としたものである。

本研究では、**図-1**、**写真-1**に示すようなワイヤレスセンサーネットワークシステムを構築した。その中で、ワイヤレスセンサーノードの電源、通信、耐候性・避雷性、設置コスト、メンテナンスの容易化に関して検討を行い、本計測システムの有用性が確認された。

また、データ収集・分析を行うツールとして、インテリジェントロガーおよび斜面

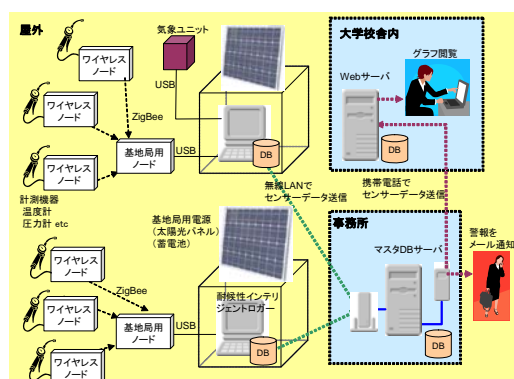


図-1 システムの概略図



写真-1 現地設置状況

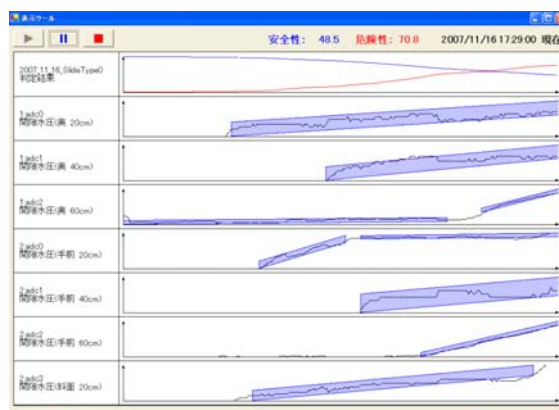


図-2 アルゴリズム実行画面

崩壊兆候検知アルゴリズムの開発に取り組み、現地実験への適用や可動性および操作性の検証を行った。斜面崩壊検知アルゴリズムでは、タイムチューブ理論を提案し、現地や室内土槽の計測結果をもとに、斜面の安定性評価方法について検討した。

### (主な発表論文)

1. 深川良一, 酒匂一成, 横田裕介, 大久保英嗣, 島川博光, 原田史子: 降雨時の表層すべり型崩壊に対するセンサーネットワークを利用した計測システムに関する研究, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2008, pp. 21-26, 2008.

2. K. Kajimoto, Y. Yokota, F. Harada and H. Shimakawa: Sensor Network to Monitor Underground State Transition against Mud Slide Disaster, the 12th WSEAS International Conference on COMPUTERS, pp.115-121, July 2008.

### (今後の展望)

本研究成果により、無線通信技術を援用した長期斜面モニタリングの実現可能性が明らかになった。今後、ワイヤレス機器の技術の進歩、現地計測結果の蓄積により精度向上が見込まれる。また、タイムチューブ理論による評価手法は、最適な計測地点の設定などにも適用できると考えられる。

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景と目的

平成16年度には観測史上最多の台風10個がわが国の本土に上陸し、また北陸・四国を中心とする多くの地域において集中豪雨が発生した。これらに起因して斜面崩壊が多発し、多数の人命が失われるとともに、社会にも甚大な被害を与えた。激化・広域化する集中豪雨に対しても、斜面崩壊の兆候が検知できれば、少なくとも人的損失は防げる。限られた資源で斜面崩壊を予知し災害を未然に防ぐためには、危険性をはらむ斜面上での点的な計測から面的な計測への転換が重要である。しかし、崩壊可能性のある斜面は往々にして急で作業者の侵入を阻むような地形であることが多く、現行では計測点の多点化には膨大なコストが掛かる。また、収集すべき変数が監視過程で新たに追加されることがあるが、現状のデータロガーはこれに対応していない。さらに、交流電源などを使用しにくい山間地斜面の場合は、多種のセンサーを使って安定的に斜面防災情報を収集することも困難である。

こうした現状に鑑み、本研究では、以下に掲げるような特徴を有する新たな斜面防災システムを提案する。即ち、1) 低コストのモニタリングによる斜面防災対策の効率的な実施と運用（イニシャルコスト、ランニングコストの削減）、2) 急斜面など従来型防災設備の設置やメンテナンスが困難な場所への対策（運用の容易化）、3) センサー、通信システムの耐候性や避雷性の向上（システムの信頼性の向上）、4) 点的な計測から面的な計測による斜面状況の監視精度向上（網羅的監視）などを特徴

とし、地盤工学、センシング技術、情報通信技術に関わる大学研究者および民間企業技術者が、その専門知識と経験を融合して設計・製作・評価するシステムである。

本研究では、上記の各項目に関して検討を行い、降雨量と地盤内の負の間隙水圧のモニタリングより崩壊兆候を検知することを中心とした斜面防災システムをベースとし、モニタリングシステムにワイヤレスセンサーネットワークシステムの技術を利用してコスト削減、メンテナンスの容易化、耐候性・避雷性の向上、網羅的観測を実現することを目的としており、降雨時の表層すべり型斜面崩壊による緊急時における道路管理を高度化するための道路斜面を対象とした効果的なモニタリング技術の開発を行う。

## 1.2 斜面防災システムの概要

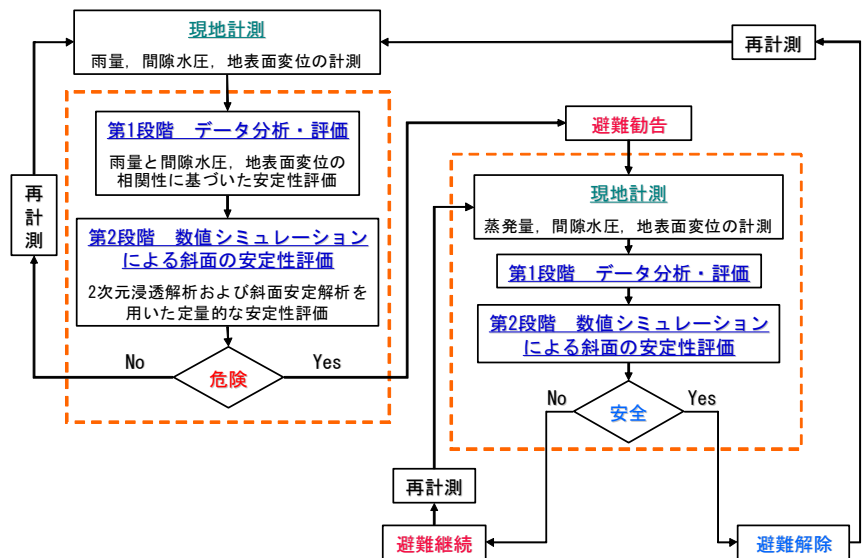


図-1.1 防災システムフロー

本研究では、降雨時の表層すべり型崩壊を対象としている。降雨時の表層すべり型崩壊の主な原因は、1)雨水の浸透による土塊自重の増加、2)土中の飽和度の増加に伴うせん断強度パラメータの低下、3)地下水の上昇に伴う浸透力の増加であると定性的に言われている。これらのことから雨量や斜面内の間隙水圧を把握することが重要であることがわかる。従来の斜面崩壊予測システムとしては、雨量指標<sup>1)</sup>(時間雨量、連続雨量、実行雨量、土壌雨量指数など)を用いたシステムが実用化されている。しかしながら、地盤や地形特性の反映が不十分であることなどから、警報の空振り率が高いことが問題とされている。また、面的、線的な斜面モニタリングとして光ファイバセンサーを用いた地表面変位計測に関する研究が行われてきており、降雨時の斜面崩壊の兆候を捉えた成果が得られてきている<sup>2)</sup>。

本研究では、降雨時の斜面崩壊は、「降雨浸透→斜面内の水分量の増加→斜面土塊の自重増加、せん断強度の低下、地下水位の上昇→地盤の変位→斜面の崩壊」という順序で発生するという崩壊過程を考慮し、雨量と間隙水圧に着目した斜面防災システムの構築を目指している。

本研究では、北村らの提案するシステム<sup>3)</sup>をベースに降雨時の通行規制・避難および降雨後の規制解除を行うことのできる斜面崩壊予知システム(以降、防災システム)の構築を行っている。図-1.1に研究でイ

メージする斜面安定評価フローを示す。図-1.1の左側は降雨継続中の警戒警報発令のための評価システム、右側は降雨がおさまった後の警戒警報解除のための評価システムを示している。いずれも、主として雨量データなどの現地斜面モニタリング結果に基づいた手法(第1段階)と数値シミュレーション結果に基づいた手法(第2段階)の2段階で斜面の安定性評価を行う。

これまでに、著者らは現地モニタリングシステムとして、雨量計、間隙水圧を計測するためのテンシオメータ、光ファイバセンサーを有線で結び、データの収集を行ってきた。図-1.2にモニタリングシ

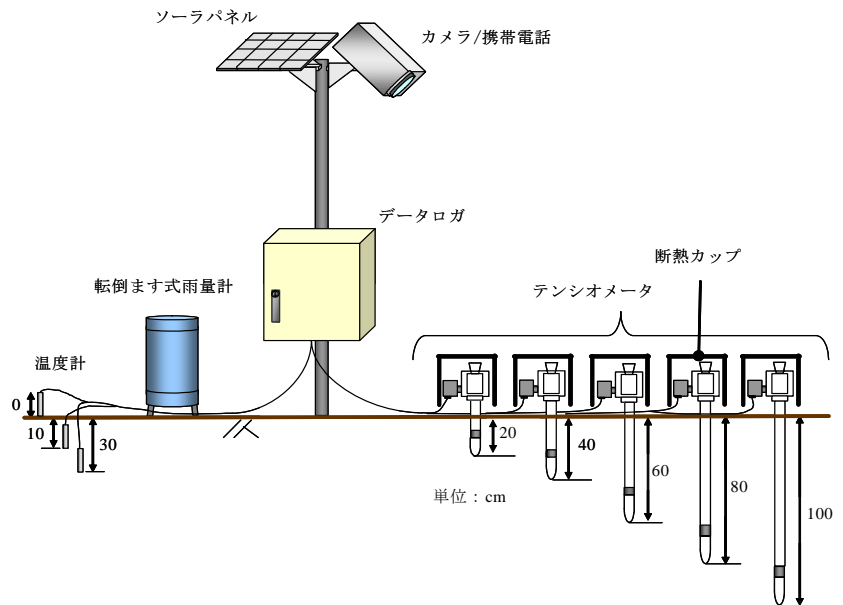


図-1.2 斜面モニタリングシステム

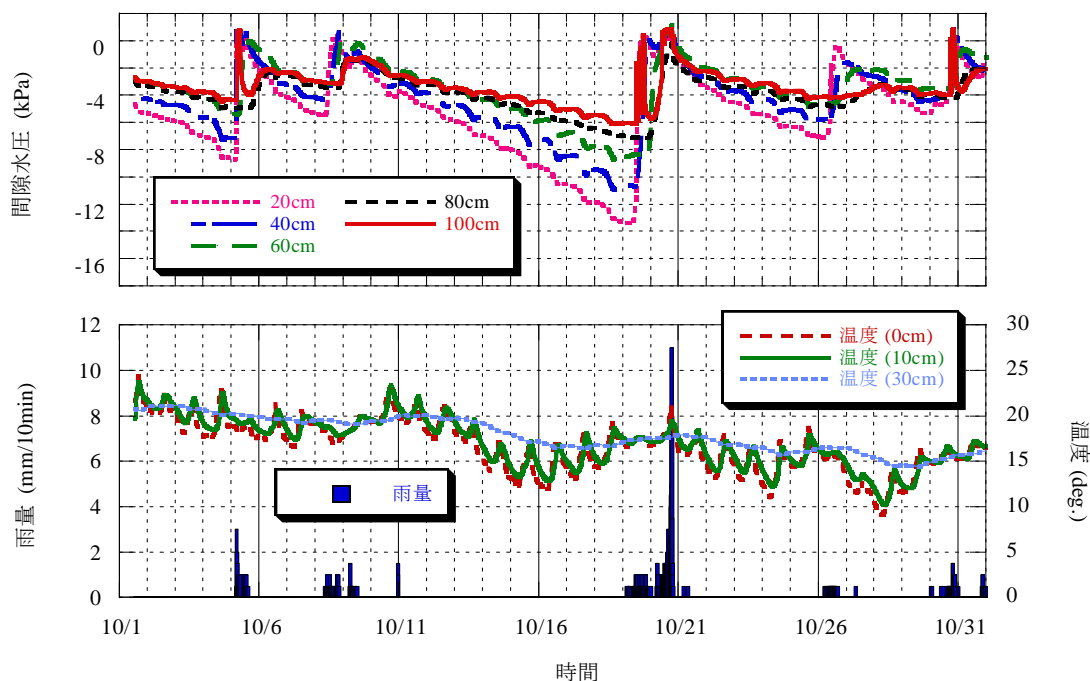


図-1.3 テンシオメータより得られた間隙水圧、雨量などのトレンドグラフ

テムの一例を示す。また、土中の間隙水圧を評価するセンサーであるテンシオメータより得られた間隙水圧、雨量計より得られた10分間雨量および温度計より得られた地上・地中温度のトレンドグラフを図-1.3に示す。また、同じ斜面で光ファイバセンサーによる地表面変位も計測している。これらの斜面モニタリング結果（間隙水圧、温度、雨量、地表面変位）を蓄積・分析することにより、雨量と間隙水圧、地表面変位などとの関係を継続的に調査している。有線システムの運用段階で以下に示すような多くの問題に直面してきた。

- ・センサーとデータロガーを結ぶケーブルが動物や草刈り作業により切断されることがある。
- ・被雷により、機器の故障が発生する。また、ケーブルを電気が伝い、被害が拡大する。
- ・計測数や種類を増やそうとしても、データロガーのch数に制限があるため、簡単には拡張できない。
- ・ケーブルの長さなど計測地点を決定してから決めるため、設置後の計測地点の移動が困難である。
- ・晴天が続くとテンシオメータ内部の脱気水が抜けてしまう可能性があるため、脱気水の補充が必要である。

以上のような問題に対して、無線通信技術を利用したシステムの開発およびテンシオメータのメンテナンス性の向上に取り組む。1.3節では、本研究で取り組んだ内容について簡単にまとめる。

### 1.3 実施内容

本研究は、平成18～20年度の3ヶ年にわたって実施されてきた。

平成18年度は、想定している斜面防災システムの実現可能性の確認を主目的として研究を遂行した。まず、現地モニタリング結果と数値シミュレーション結果に基づいた斜面安定評価システムの基礎設計を行った。これらの斜面安定評価システムの技術面、運用面での実現可能性を検証するため、ヒアリングや文献調査などにより現行の防災システムおよびシステムを構成するセンサーおよびセンサーネットワークの現状と課題を明らかにした。さらに、既往のセンサーやロガーを用いて、想定するセンサーネットワークを構成し、その妥当性を検証した。合わせて、斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの開発に取り組んだ。

平成19年度は、平成18年度の成果を受けて、ワイヤレス化されたセンサーネットワークシステムの原位置での適用性を高め、さらに改善された機器・システムに基づいて、1つの斜面全体に設置されたセンサーネットワークからの情報を、比較的アクセスの容易な場所で集約・分析する装置・システムを開発することを目的として研究を行った。そこで、通信機能を有する既存のセンサーノードに接続されたセンサー、市販の機器に若干の改良を加えて作成したインテリジェントロガーを用いて、現地斜面にワイ

ヤレスセンサーネットワークシステムを設置・運用した。さらに、センサーの電源、メンテナンスや耐侯性などの問題を解決するための工夫を施し、システムの信頼性の向上について検討した。また、提案したハードウェア（ワイヤレスセンサーシステムおよびインテリジェントロガー）とソフトウェア（斜面安定評価システムおよび斜面崩壊兆候検知アルゴリズム）の連携を試み、防災システムの構築によって現地斜面における試験的運用を実施し、防災システムの運用性などについて検討した。

平成20年度は、これまでの研究成果をもとに現地道路斜面を想定した広域・多点条件下における防災システムへの高度化を行うと共に、システムの試験運用、有効性を評価した。また、システムを構成する機器・システムの原位置での適用性をさらに高めることを目的として研究に取り組んだ。

本報告書の構成について述べる。表-1.1に平成18～20年度の3ヶ年の研究内容を示す。これらの研究内容に対する研究成果を“第2章 現地斜面における防災システムの検討”、“第3章 斜面防災システムに関する検討”、“第4章 センサーネットワークシステムおよびワイヤレスセンサーシステムに関する検討”で報告する。

“第2章 現地斜面における防災システムの検討”では、主に、提案する防災システムの現地斜面での試験運用を通じた技術面・運用面の検討および道路管理者から道路管理の現状や問題点をヒアリングし、提案手法の実現可能性について検討している。

平成18年度は、道路管理の現状および問題点について、道路管理者へのヒアリングを行った。そして、少数のセンサーからなるセンサーネットワークを立命館大学敷地内に設置し、その耐侯性、電力、通信、コストなどについて実証的実験を行った。

平成19年度は、平成18年度に構築した小規模なセンサーネットワークを用いた情報収集システムによる検討成果を踏まえ、多数のセンサーからなる情報収集システムの構築に関して検討した。また、平成18年度の検討成果および機器の試作を踏まえ、斜面防災システムを構築するとともに現地斜面における試験運用を行った。この際、山中における無線の通信状態や距離などに関するワイヤレス通信性能の検証、大量のセンサー情報から防災システムに必要なデータを抽出するためのデータ収集・処理性能、本システムで得られた斜面モニタリング結果の妥当性について検証した。さらに、これまでに斜面管理システムを運用してきている斜面管理者に対して運用上の問題点などについてヒアリングした。

平成20年度は、過年度に構築した多数のセンサーからなる斜面防災システムの研究成果を踏まえ、現地斜面へ機器を設置して試験運用を行い、斜面防災システムの技術面および運用面における実現可能性や改善点について検討した。試験運用にあたり、広範囲に及ぶ実斜面の観測を念頭におき、複数の斜面防災システム間の連携に関する動作検証を実施した。また、現地斜面における試験運用を通じ、斜面管理

表-1.1 研究内容

種別	細別		実施計画内容
1. 現地斜面における防災システムの検討	平成 18年度	1-1. 斜面防災システムに関するヒアリングと実証的検討	① 道路管理者の意見聴取, システムの基礎設計, コストの試算
		1-2. 少数のセンサー情報の効率の収集システムの構築	② 技術面・運用面におけるフィジビリティや改善点についての実験的検討
	平成 19年度	1-1. 多数のセンサーからなるセンサーネットワークシステムの構築	① 具体的なシステムの全体構成に関する検討 ② 学内外周道路路面における屋外実験
		1-2. 現地での実験によるシステムの有効性評価	③ 道路管理者(青森県)へのヒアリング
	平成 20年度	1-1. 実斜面における斜面防災システムの検証	① 現地斜面への設置 ② 斜面防災システムの技術面および運用面における実現可能性や改善点に関する検討
		1-2. 斜面防災システムの有効性の評価	③ システムの試験運用および道路管理者へのヒアリングによる有効性の評価
2. 斜面防災システムに関する検討	平成 18年度	2-1. 斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの開発	① センサーから得られた情報を分析するためのアルゴリズムの試作
		2-2. 斜面安定評価システムの基礎設計	② 現地斜面モニタリング結果による斜面安定評価手法の構築および妥当性の検討
	平成 19年度	2-1. 多数のセンサー情報に対応した斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの高度化	① 斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの開発および室内土槽試験結果のデータ分析 ② 室内土槽試験による降雨時の斜面崩壊挙動に関する検討
平成 20年度	2-1. 現地観測結果に基づくアルゴリズムの高度化	① 斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの高度化 ② 室内土槽試験および現地計測結果による設定値および評価式の高精度化	
3. センサーネットワークシステムおよびワイヤレスセンサーシステムに関する検討	平成 18年度	3-1. 既往のセンサーやロガーを用いたセンサーネットワークシステムの検討および検証実験	① ワイヤレス通信技術のフィジビリティの検討 ② 今後の機器開発に向けての問題点および解決手法について調査・検討 ③ 低消費エネルギー型センサーに関する調査・検討
		3-2. ワイヤレスセンサー技術の調査・検討	④ メンテナンスや耐候性などの問題を解決するための最新技術に関する調査
	平成 19年度	3-1. 耐候性インテリジェントロガーの開発	① 耐候性インテリジェントロガーの開発
		3-2. 構成再編可能型センサーネットワークシステムの開発	① 構成再編可能型センサーネットワークシステムに関するソフトウェアの作成 ② 移動端末によるデータ収集
		3-3. センサーノードの現地適用性の向上に関する検討	① バッテリーの長寿命化 ② 外部センサー用電源の省力化 ③ テンシオメータの自動給水装置の作成 ④ 現地適用性の検討
	平成 20年度	3-1. 現地適用に向けた耐候性インテリジェントロガーの高度化	① 耐候性インテリジェントロガーの現地適用 ② 長期間の稼働を見据えた検証
3-2. 現地実験結果に基づくワイヤレスセンサーシステムの改善		① 現地斜面への導入 ② 現地斜面への適用性の評価	



者からの意見を集め、有効性評価を行った結果およびそれに伴うシステムの改良について検討した。

“第3章 斜面防災システムに関する検討”では、斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの開発および斜面安定評価システムに関する内容について記述している。

平成18年度は、斜面崩壊の兆候を捉えるためのアルゴリズムの基本的な仕組みや斜面安定評価システムの手法について検討した。

平成19年度は、過年度に開発した斜面崩壊兆候検知アルゴリズムについて、多数のセンサーから得られた情報に対応可能なアルゴリズムへの改良を行った。アルゴリズムの改良にあたっては、人工降雨装置を用いた室内モデル斜面崩壊試験結果に基づき、降雨量データおよびテンシオメータによる間隙水圧データを精査し、斜面崩壊の兆候について検討した。また、室内実験での計測データの分析にあたっては、土木工学における既往の研究結果および平成18年度の“斜面安定評価システムの設計”で実施した数値シミュレーション結果を踏まえた分析を行うとともに計測データ分析結果と数値シミュレーション結果との整合性について検証を行った。

平成20年度は、過年度までに開発した個別のセンサー情報による斜面崩壊兆候アルゴリズムの成果を踏まえ、現地観測による計測結果を用いて複数のセンサー情報間の相関性を分析することができる斜面崩壊検知アルゴリズムへの高度化を図った。また、室内土槽試験および現地計測結果に対するアルゴリズムを用いた分析および安定性評価結果に基づいたタイムチューブの設定値および評価式の高精度化に関する検討を行った。

“第4章 センサーネットワークシステムおよびワイヤレスセンサーシステムに関する検討”では、ワイヤレス通信技術の検証実験や電源、耐候性・避雷性、メンテナンスなどの問題について取り組んだ内容について述べる。

平成18年度は、既存のセンサーやロガーを用いたセンサーネットワークシステムによる室内土槽試験を実施し、センサーネットワークシステムの実現可能性について検討した。また、ワイヤレスセンサー技術の調査・検討や既存の機器にワイヤレスセンサ

ーを接続し、その適用性の検討、計測機器のメンテナンス問題への具体的な改良方法の検討を行った。

平成19年度、平成18年度の成果をもとに、データの収集・分析・通信を行うためのインテリジェントロガーについて検討を行った。また、システムの観測条件やパラメータ設定などを遠隔操作で行うことができる機能を持つ構成再編可能型センサーネットワークシステムの開発について検討した。さらに、本研究で構築するセンサーネットワークシステムおよびワイヤレスセンサーシステムにおける避雷性を含み耐候性および消費エネルギーの低減を中心としたメンテナンスフリー化について検討した。

平成20年度では、平成19年度に実施してきたインテリジェントロガーの試作、操作性・耐候性の向上に関する成果を踏まえ、現地適用を鑑みたネットワークシステムおよび斜面崩壊兆候検知アルゴリズムを組み込んだインテリジェントロガーの作成および長期稼働を見据えた検証に取り組んだ。また、これまでのワイヤレスセンサーの電源の長寿命化、耐候性に関する成果を踏まえるとともに、現地斜面への適用を鑑みた、省スペース化、小容量化、省コスト化を目的にハードウェアおよびソフトウェアの最適化を図り、現地への導入を行った。

最後に、本研究から得られた知見・成果について第5章にまとめる。

## 参考文献

- 1) (社)地盤工学会 降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究委員会編：降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究報告書，2006.
- 2) 加藤俊二，小橋秀俊，古谷充史：斜面表層崩壊の監視・管理および崩壊予測手法の提案，降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関するシンポジウム，pp.45-50，2006.
- 3) R. Kitamura, K. Sako, K. Matsuo: A research strategy for prediction of slope failures due to heavy rain, Proc. of 12<sup>th</sup> Asian Regional Conference, pp.1535-1538, 2003.

## 第2章 現地斜面における防災システムの検討

### 2.1 斜面防災システムに関するヒアリング調査について

本節では、道路管理者への斜面防災システムに関する現状と課題などについてヒアリングを行った結果をまとめる。

今回、国土交通省北海道開発局、西日本高速道路(株)・徳島管理事務所、青森県(下北郡風間浦村易国間国道279号線道路監視システム)、鹿児島県(危機管理局危機管理防災課、土木部砂防課)および鹿児島市(安心安全課、消防局警防課)の担当者に対するヒアリングを行った。国土交通省北海道開発局、西日本高速道路(株)・徳島管理事務所、青森県で管理している道路法面の計測は、自記水位計、孔内傾斜計、テスター水位、アンカー緊張力測定などによる地下水位および地盤変位の計測が主であり、基本的に従来型のセンサーとデータロガーによって実施されていた。データは、主に計測員が定期的に収集することが多く、電話回線等を利用した自動計測は所轄する地域全体でも数箇所で行っているのみであった。管理基準(交通規制)は、現在のところ降雨量によって設定されている。また、警報の空振りを減らすために地下水位および地盤変位のデータを計測し、斜面の状態のモニタリングを行っていた。鹿児島県および鹿児島市では、気象庁と連携し、土壌雨量指数に基づく防災システムを採用し、鹿児島県と各市町村との情報共有を図っていた。独自に雨量観測システムを設置し、光ファイバおよびADSLにてデータの収集を行っている。

以下にヒアリング調査時に得られた意見をまとめる。

- ・現状では、規制解除をする際の判断が非常に難しいため、現場としては、規制解除する指標がほしい。→斜面内の水分量をモニタリングすることで、斜面の安定性の回復を見ることが出来る可能性があるのではないか。
- ・管理者の立場からすると、斜面を目視することによる管理も重要である。

→巡回の度に斜面に登って、データを計測するのは非効率であることから、提案しているシステムでは、路肩に車を止めて、データ取得することも可能である。

- ・切土斜面の計測は、完成後約10年程度行われる。10年間正常動作するシステムの開発が必要である。
- ・道路法面の観測は、ある部分は詳細に、ある部分は大まかにする必要がある。
- ・目視に加え、斜面内の状況がわかれば、管理する側としても安心感が増す。
- ・落雷により、数回システムが損傷し、数百万円の損害が出た。  
→無線ネットワークでは、一部が故障しても正常なノードを選択し、通信を続けることが可能である。システムのワイヤレス化は、落雷などによるシステムダウンに対するリスク回避をすることができ、耐候性改善に効果があると考えられる。
- ・変位計測による管理の場合、風による振動や樹木の接触により、誤報が発せられる場合があった。また、計測間隔内に崩壊が生じると検知することができない。
- ・監視地点は、急な斜面が多く、電源用ケーブル、通信用ケーブル、計測小屋などが設置されていた。ワイヤレス化することで、設置費用を抑えることができるのではないかと。

### 2.2 有線システムおよび無線システムにおける設置コストの試算

本研究で使用するセンサーノードによるネットワークシステムの設置コストについて述べる。ここでは、清水寺に設置している現地モニタリングシステム(有線)との比較を行う。

例として立命館大学深川研究室が清水寺境内に設置しているシステムで現状の有線接続と無線接続に切り替えた場合のイニシャルコスト(ハードウェアと工事費の合計)は以下のように比較される。なお、

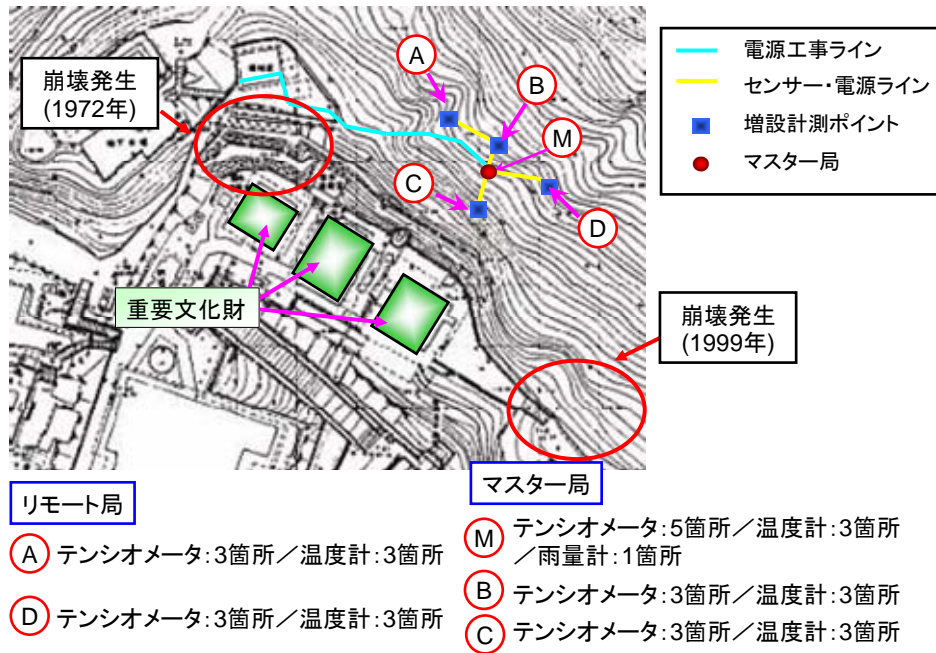


図-2.1 多点現地計測システムの設置位置

表-2.1 清水寺システムの設置コスト

総額 (円)					4,555,000
内容					
計測機器					855,000
地点	項目	個数	単価	計	
メイン局	テンシオメータ	5	35,000	175,000	
	温度計	3	10,000	30,000	
	雨量計	1	110,000	110,000	
	計:			315,000	
リモート局	テンシオメータ	12	35,000	420,000	
	温度計	12	10,000	120,000	
	計:			540,000	
情報ボックス					1,822,600
地点	項目	個数	単価	計	
メイン局	BOX	1	300,000	300,000	
	CPU	1	129,000	129,000	
	電源	1	19,000	19,000	
	Enter	1	165,000	165,000	
	A/D	2	83,000	166,000	
	マスタユニット	1	49,000	49,000	
	アダプタ	1	13,200	13,200	
	電源	1	9,800	9,800	
	計:			851,000	
	リモート局	BOX	2	150,000	300,000
中継BOX		2	10,000	20,000	
A/D		4	83,000	332,000	
アナログユニット		4	75,000	300,000	
電源		2	9,800	19,600	
計:			971,600		
工事費					1,042,400
地点	項目	個数	単価	計	
全体	工事費	1	720,000	720,000	
	電源配線 (1m単価)	200	252	50,400	
	防護配管 (1m単価)	200	610	122,000	
	配線材料	1	150,000	150,000	
通信機器					835,000
全体	無線ユニット	2	276,000	552,000	
	ケーブル (1m単価)	100	330	33,000	
	パソコン	1	250,000	250,000	

ここではイニシャルコストのみの比較となるため、維持費およびソフトウェアの費用は除くものとする。

表-2.2 ワイヤレスセンサーシステムの設置コスト

総額 (円)					3,244,500
内容					
計測機器					855,000
地点	項目	個数	単価	計	
メイン局	テンシオメータ	5	35,000	175,000	
	温度計	3	10,000	30,000	
	雨量計	1	110,000	110,000	
	計:			315,000	
リモート局	テンシオメータ	12	35,000	420,000	
	温度計	12	10,000	120,000	
	計:			540,000	
情報ボックス					834,500
地点	項目	個数	単価	計	
メイン局	BOX	3	10,000	30,000	
	インテリジェントロガー	1	200,000	200,000	
	無線基盤	3	28,500	85,500	
	汎用性センサー基盤	3	50,000	150,000	
	基地局	1	15,000	15,000	
	計:			480,500	
リモート局	BOX	4	10,000	40,000	
	センサーノード	4	28,500	114,000	
	汎用性センサーノード	4	50,000	200,000	
	計:			354,000	
工事費					720,000
地点	項目	個数	単価	計	
全体	工事費	1	720,000	720,000	
通信機器					835,000
全体	無線ユニット	2	276,000	552,000	
	ケーブル (1m単価)	100	330	33,000	
	パソコン	1	250,000	250,000	

設備などの比較条件は以下の通りである。

- ・ システムは、メインの計測地点 (M 地点) に 4 地点 (A~D 地点) からなる。
- ・ それぞれの地点にテンシオメータ、温度計が設置されており、M 地点のみ雨量計が設置されている。テンシオメータは計 17 本、温度計は計 15 本設置されている
- ・ B 地点と C 地点に設置されている計測機器は、M 地点に設置されている情報ボックスに直接接続

されている。また、A 地点および D 地点の計測機器は、配線の長さによる電力低下を防ぐためそれぞれの地点に情報ボックスが設置されており、そのデータは、有線で M 地点の情報ボックスに転送されている。

- M 地点に集められた全データは、A 地点に設置された無線 LAN アクセスポイントにより、約 200m 離れた寺務所へ転送されている。電源は、斜面付近の機械室から得ている。
- 計測機器費、工事費(配線関連費を除く)、通信機器費は同額のものとして計算する。
- 維持費およびソフトウェアの費用は除くものとする。

表-2.1に清水寺システムの設置コストを示す。計算内容は、ハードウェアと工事費のみの計算となっている。表より、情報ボックスおよび配線工事などにかかりのコストがかかっていることがわかる。

次に、現状の清水寺モニタリングシステムをワイヤレスセンサーシステムに変えた場合のコストを表-2.2に示す。全ての地点でワイヤレス化したため、配線関連の費用を削減することができている。ここで、両者を比較すると、ワイヤレス化することによって、情報ボックス費、現地工事費のコストが大きく軽減されていることがわかる。このように、従来の機器よりも設置コストが減少することで、より多くの地点での計測も可能となる。

## 2.3 ワイヤレスセンサーネットワークシステムの構築と現地試験による有効性評価

### (1) ワイヤレスセンサーネットワークシステム

図-2.2 にワイヤレスセンサーネットワークシステムの概要図を示す。センサーネットワークは、センシング機能およびワイヤレス通信機能を有する複数のセンサーノードから構成されるネットワークである。センサーノードは、演算処理装置、データおよびプログラムの記憶領域、バッテリーを持つ自律的に動作可能な超小型コンピュータシステムであり、効率的なデータ収集・配送を実現する。図-2.2 においては、テンシオメータや温度計などのセンサーとワイヤレスノードで構成されるセンサーノードが示されている。写真-2.1 は、本研究で用いたセンサーノードを示しており、(a)は温

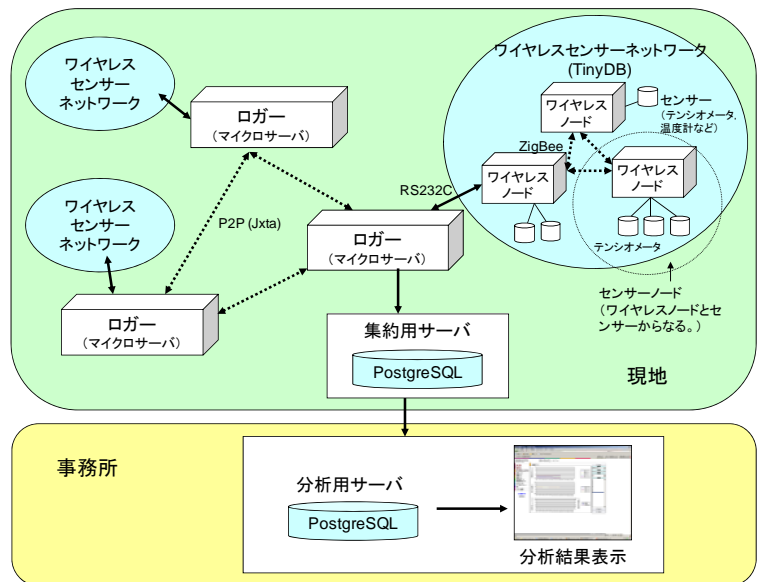
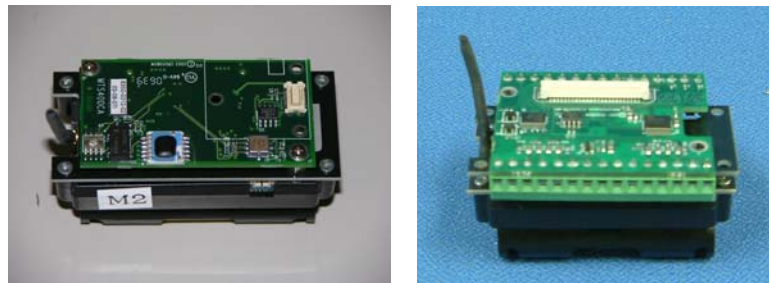


図-2.2 無線センサーネットワークシステム概要図



(a) センサーノード：MPR2600J（ワイヤレスノード）と MTS400（センサー基板）  
 (b) センサーノード：MPR2600J（ワイヤレスノード）と MDA320（外部センサー基板）

写真-2.1 ワイヤレスセンサーノードとセンサー基板

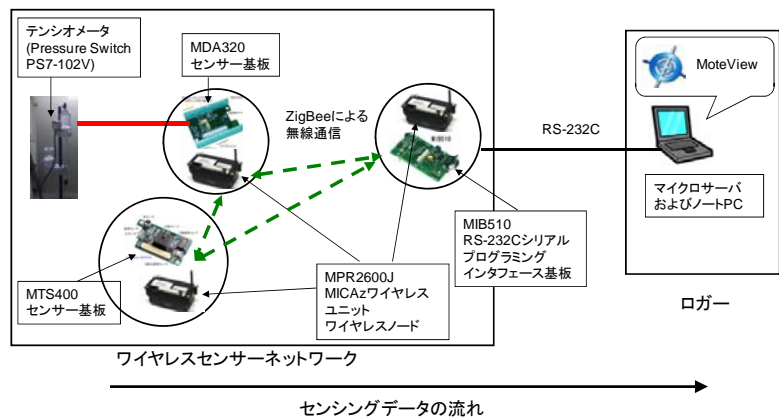


図-2.3 ワイヤレスセンサーネットワークの一例

度、湿度、光度、加速度などが計測できるセンサー基板（型式：MTS400）、(b)はテンシオメータなどの外部センサーを接続できる外部センサー用基板（型式：MDA320）がワイヤレスノード（型式：MPR2600J）に装着されている状況を示している。なお、外部センサー用基板（写真-1 (b)）には、最大 8 個の外部センサーが接続可能である。



写真-2.2 試験土槽



写真-2.3 降雨装置

図-2.3 に写真-2.1 のセンサーノードを組み合わせたワイヤレスセンサーネットワークの一例を示す。これは、図-2.2 におけるワイヤレスセンサーネットワークとロガーの部分に対応する。また、ロガーに接続されたセンサーノードを基地局とする。今回使用したネットワークはアドホック無線ネットワークであり、無線通信とネットワークングの双方の機能を持ち合わせた端末の集まりである。アドホックとは「様々な形態を取り得る」ということを意味し最も通信状態の良いセンサーノードを自動的に選んで通信する機能（自己編成機能）を持ち、適応性を備えているため、形成されていたネットワークが管理者なしで勝手に違った形態のネットワークを形成できる。つまり通信の障害となる要素が新たに生じてもデータの通信経路を自動的に変更してデータを転送してくれるという長所があり、また固定のネットワークを必要としないため、中継基地局や電話線・固定ルータも不要なインフラレスのネットワークである。さらに、センサーノードからロガーの距離が離れていて直接通信できない場合でも他のセンサーノードを中継ノードとしてデータを取得することができる。センサーノード間は ZigBee による近距離用無線通信（数 m～数十 m）であり、1 つのネットワークに最大 255 台の機器を接続できるという仕様である。これらは、有線接続の場合に比べ、配線に伴う制約やコストが生じないため、より自由度の高いセンサーノードの配置が可能となる。

ロガーは、一つのワイヤレスセンサーネットワークに対し一台設置され、対応するワイヤレスセンサーネットワークが収集したデータを保管、分析することができる小型コンピュータシステムである。また、ワイヤレスセンサーネットワークを制御する機能や複数のロガー間でのデータ転送および共有を可能とする無線 LAN（規格：IEEE802.11、通信距離：最大 100～500m）による通信機能を持っている。サーバは、現地（斜面）と事務所にそれぞれ分かれており、現地に集約用サーバが設置され、事務所には現地から得られたセンサーデータを分析するためのサーバが設置される。集約用サーバは、センサーネットワークから得られるデータを未加工のまま一時保管する機能を持つ。一方、分析用サーバでは、計

測データの加工および蓄積を行い、また、変化傾向などの分析を行うことができる。現地から事務所へは、光ファイバや携帯電話などの通信手段を用いてデータの転送を行う。ここで述べたワイヤレスセンサーネットワークシステムを第 1 章で述べた斜面防災システムに組み合わせることにより、より効果的・効率的な防災システムを構築することができる。

## (2) 小規模なワイヤレスセンサーネットワークシステムを用いた室内土槽試験

### a) 試験概要

写真-2.2 は、本試験に用いる試験土槽を示している。試験土槽は、横 150cm×奥行き 100cm×高さ 100cm の大きさを持ち、底面と側面には多孔質の板が敷設されている。写真-2.3 は、降雨装置を示している。雨量は、タンクから供給される水量によって制御されており、150cm×150cm の範囲に注水することができる。本試験では、まさ土を用いて作成した斜面勾配 45° の盛土に時間降雨量 50mm/hour 相当の注水を

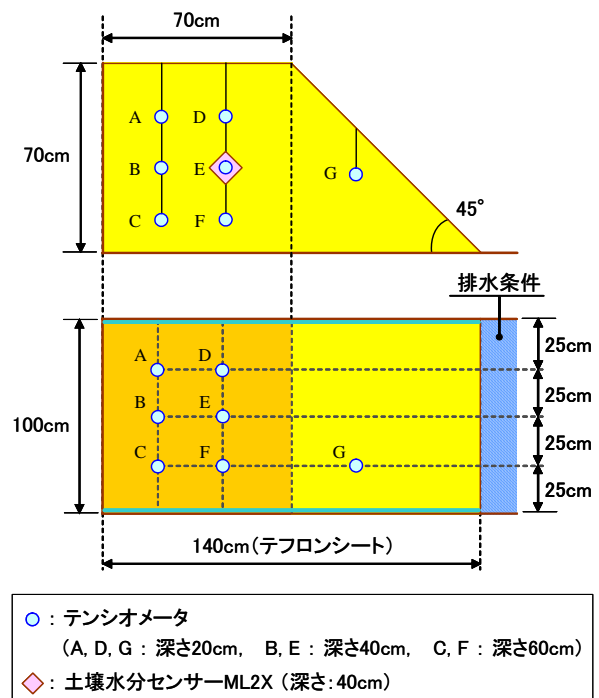


図-2.4 盛土形状、計測機器の設置位置

表-2.3 試験条件

境界条件	上面	注水
	底面	非排水
	背面	非排水
	法面	注水
初期条件	含水比	5%
	設定湿潤密度	1.60(g/cm <sup>3</sup> )
	斜面勾配	45(°)
降雨条件	時間降雨量	50(mm/hour)



写真-2.4 降雨開始約123分後

8時間30分の間行った。表-2.3に、境界条件、初期条件および降雨条件を示しており、背面と底面では非排水条件、法面では排水条件となっている。盛土初期条件としては、含水比5%、湿潤密度1.60g/cm<sup>3</sup>として形成した。

図-2.4に斜面形状と計測機器の設置位置を示している。7個のテンシオメータを深さ20cm~60cmに設置し、盛土内の負の間隙水圧を計測している。また、土壌水分センサー：ADR（型式：ML2X）を深さ40cmに設置し、体積含水率の計測を行っている。試験土槽の側面には摩擦を最小限にとどめるため、テフロンシートを貼り付けた。底面には、透水性の多孔質板が設置されているが、盛土底部を非排水条件にするためにビニルシートを敷き、盛土法先前方は水溜りを防ぐためにシートを取り除いて排水条件とした。

計測システムとして、写真-2.1(b)のセンサーノードを2台使用し、テンシオメータ(7個)、ADR(1個)をそれぞれのノードに接続し、小規模なワイヤレスセンサーネットワークを構築した。データ取得間隔は2秒で、データは図-2.3に示すようにPCに接続されたワイヤレスノード(基地局)を介してPCに取り込まれる。

b) 試験結果と考察

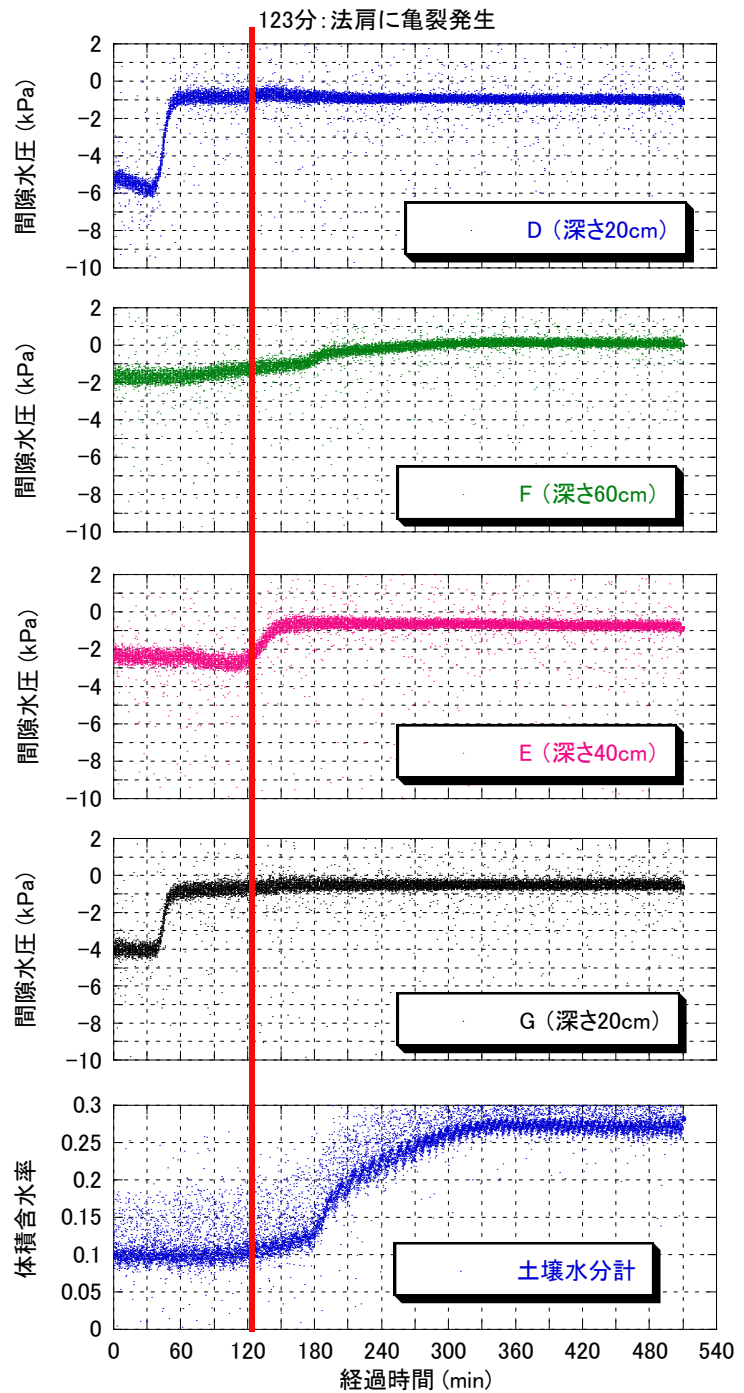


図-2.5 間隙水圧、体積含水率の時系列変化

図-2.5にテンシオメータ(D, E, F, G)および土壌水分センサーにより計測された結果を示す。図より、浅い部分に設置されたセンサーから順に間隙水圧の増加が見られる。このことから、盛土表面から注水された水の浸透挙動を把握できているものと考えられる。また、間隙水圧が約0kPa程度に達するとそのまま一定に保たれ、盛土内が飽和していることが分かる。体積含水率の時系列変化は、注水開始直後は、約0.1程度で一定となっているが、約144分を過ぎたあたりから体積含水率は増加し、約360分以降は約0.25~0.3程度で一定の値を示した。

盛土の変形挙動については、注水約123分後に法肩から背面へ向かって5cm~10cmの位置に亀裂が生

じた(写真-2.4)。これは、注水約123分後には20~30cmの深さまでは雨水が浸透しており、土塊の自重の増加およびせん断強度の低下により亀裂が生じたものと考えられる。以降、法肩部分において約4cmの沈下が生じたが、法面の崩壊は生じなかった。これは、法先前方部分を排水条件としたため、盛土内の地下水の上昇が抑制されたためであると考えられる。法先前方部分を非排水条件とした場合は、法先部分が最初に崩壊し、徐々に法面が崩れていく進行性破壊を生じるといった結果が得られている<sup>9)</sup>。

図-2.5に示す計測データは、大きなノイズを含んでいることが分かる。この現象はほぼ同じ条件で行った有線接続システムにおいては見られなかった。ノイズと考えられる部分以外のデータはこれまでの有線による試験結果から正常な範囲の値を示しているといえる。このようなノイズは、周辺環境やセンサーそのものの精度が問題であると考えられるが、ほとんどの計測値が正常な範囲を示していることやテンシオメータおよび土壌水分計のどちらの結果にも含まれていることから、ノイズの発生には周辺環境が大きく関わっていると考えられる。その対策手法としては、できるだけワイヤレスノードとセンサー間のケーブル長を短くすることや保護管を使用すること、また、取得データを最小二乗法などの方法で平滑化すること、回路の一部にノイズ除去回路を追加することなどが考えられる。現在、センサーノ

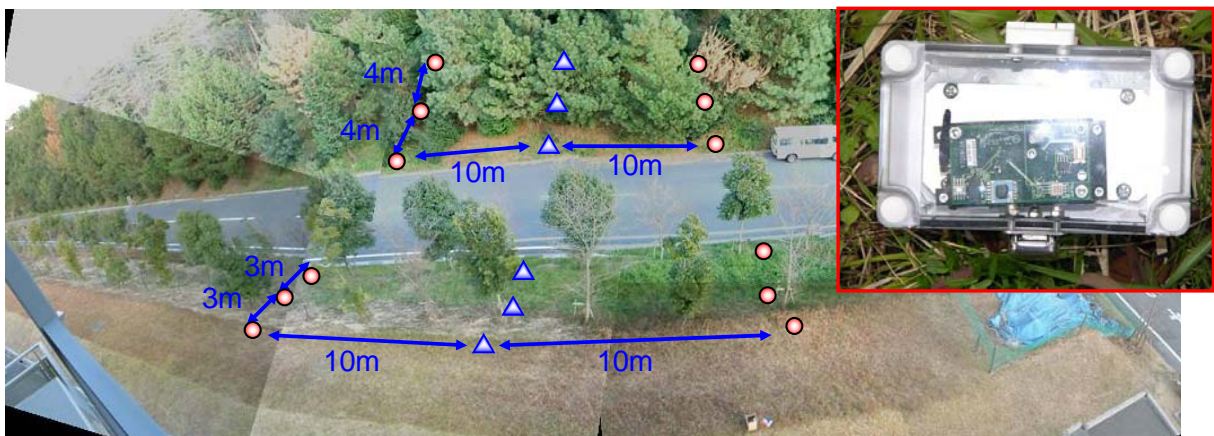
ードへのノイズ除去回路の追加を検討しており、これにより計測データの信頼性の向上が見込めるのではないかと考えられる。

### (3) 学内斜面におけるワイヤレスセンサーネットワークシステムの現地適用性に関する検討

ここでは、ワイヤレスセンサーネットワークシステムの実斜面への適用性(通信距離、植生の影響、通信の安定性)を確認するために、屋外環境下において実験を行った。実験は立命館大学敷地内の外周道路法面で実施し、9ケース行った。表-2.4に実験条件を示す。センサーノードとして、写真-1に示す気温、気圧、湿度、照度、加速度(X方向、Y方向)を計測するためのセンサー基板(MTS400)とテンシオメータ等の外部センサーを接続することができる外部センサー用基板(MDA320)の2種類を使用し、これらにワイヤレスノード(MPR2600J)を接続してワイヤレスセンサーネットワークを構築した。ワイヤレスノードの通信距離は、仕様書によると30~40mである。なお、実験ではテンシオメータなどの外部センサーは接続しなかった。図-2.6にCase9時の実験状況を示す。各センサーノードは、図-2.6に示すように防水加工されたボックス内に入れ、地面に直接設置した。計測データは、図-2.7に示すように道路法面沿いの建物にロガー(マイクロサーバ)を設置して収集した。ロガーに接続されたワイヤレ

表-2.4 屋外実験条件

	使用したセンサー・個数	設置斜面	設置間隔	目的
Case1	MTS400(写真-2.1(a))のみ、9個	建物側の1斜面	横方向約3m, 縦方向約2m	通信距離・植生の影響について
Case2			横方向約8m, 縦方向約2m	
Case3			横方向約15m, 縦方向約2m	
Case4	MTS400(写真-2.1(a))のみ、18個		横方向約10m, 縦方向約3m	ノード数増加に伴う通信の安定性
Case5			横方向約10m, 縦方向約3m	道路を挟んだ場合の通信の安定性
Case6	MTS400(写真-2.1(a)), 18個 MDA320(写真-2.1(b)), 2個	建物側と道路を挟んで向かい側の2斜面	横方向約10m, 縦方向約3m	異なる種類のセンサーノードを用いた場合の通信の安定性 (MDA320の場所をそれぞれ変更)
Case7			横方向約10m, 縦方向約3m	
Case8	MTS400(写真-2.1(a)), 12個 MDA320(写真-2.1(b)), 6個	建物側の1斜面	横方向約10m, 縦方向約3m	外部センサー用基板(MDA320)を増加した場合の通信の安定性
Case9		建物側と道路を挟んで向かい側の2斜面	横方向約10m, 縦方向約3~4m	



● : MPR2600J(センサーノード)+MTS400(センサー基板)→温度、湿度、光度、加速度

▲ : MPR2600J(センサーノード)+MDA320(外部センサー基板)→テンシオメータの接続を想定

図-2.6 学内外周道路法面における実験状況 (Case9)

スノード（基地局）と最も近い場所にあるセンサーノード間の距離は約15mである。以下に、実験で得られた結果についてまとめる。

Case1～3においては、通信距離および植生の影響について検討を行った。通信距離を確認するためにセンサーノードを防水BOXに入れ、草木が生い茂った場所に置き、間隔を徐々に広げていった（3m, 8m, 15m）。その結果、10m以内の間隔であれば問題なく通信できるが、15mでは通信が不連続になることがわかった。仕様では、ワイヤレスノードの通信距離は30～40mとなっているが、植生の影響により通信状況が良くな

なかったため10m以上の通信が不安定になったものと考えられる。このことから、斜面モニタリングシステムの設置を想定する山中でのセンサーノードの間隔は、安定したデータ取得が必要であることや、降雨時や植生などにより通信性能が低下するおそれがあることから10m程度が妥当であると判断できる。

Case4においては、センサーノード数が増加し、通信が込み合うことによりデータの取りこぼしも増加するのではないかと考え、実験を行ったが、センサーノード数が20個程度なら計測間隔を1分より大きくすることで大きな問題は生じないことが分かった。これまでに行ってきた現地計測では、データ取得間隔を10分としており、より多くのセンサーノードを一つのネットワークとして組み込むことができると考えられる。

Case5では、道路（約13m）を挟んだ2つの法面にセンサーノードを設置して実験を行ったが、問題なくデータを収集することができた。基地局とセンサーノードの距離が30m以上離れた箇所でも直接通信が行われている場合もあり、通信方向の見通しがよければ、仕様どおりの通信距離が発揮されることが分かった。また、道路法面の一方は、図-2.6からも分かるように樹木が生い茂っているが、本実験では問題なく通信が行われた。

Case6～9では、2種類以上のセンサー基板が混在するネットワークの問題に関して実験を行ったが、今回の試験では大きな問題点は生じなかった。外部センサー用基板（MDA320）のデータが気象データ計測用基板（MTS400）を経由して転送される状態が多数確認されたが、大きな問題は生じなかった。逆に気象データ計測用基板（MTS400）の計測データが外部センサー用基板（MDA320）を経由する例は全データ中1データのみ（図-2.8の破線で囲まれた部分）しかなかったが、通信が確認された。この結果は異種の基板を持つセンサーノード同士の通信は同種の基板を持つセンサーノード同士の通信に比べれば通信状態が劣る、あるいはセンサーノード同士が



図-2.7 ロガーの設置状況

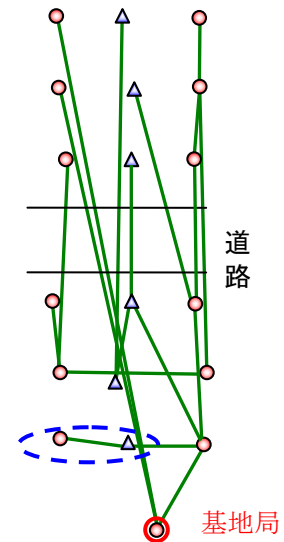


図-2.8 Case9での通信経路例

できるだけ同一のセンサー基板を持つもの同士で通信しようとするのではないかと考えられる。その場合でも通信できる同種の基板を持つセンサーノードが無い場合や最もよい通信をするセンサーノードが異種の基板を持つセンサーノードである場合には問題なく異種のセンサーノードを通して通信できることが今回の実験で分かった。また、Case9では、3分間隔で24時間計測を実施したが、問題なくデータ取得することができた。今後、これらの成果をもとに、長期現地計測を行うことができるワイヤレスセンサーネットワークシステムの構築が可能となると考えられる。

#### (4) 国道161号琵琶湖湖西縦貫道路雄琴管理基地敷地内法面における斜面防災システムの試験運用

本実験では、学内斜面における検証結果をもとに、ワイヤレスセンサーネットワークを実際に屋外に設置し、長期にわたりモニタリングすることで、システム全体の妥当性を検証した。システムを写真-2.5のように配置した。ここでは、斜面を左右に二分割し、二つのネットワークを構築した。各ネットワークには斜面の上部・中部・下部の3箇所に計測地点を設け、各計測地点にはMTS400（写真-2.1(a)）と深さ20・40・60・80・100cmの5基のテンシオメータをMDA300（写真-2.1(b)）に3本、2本に分けて接続した。これらのワイヤレスノードは、防水BOXに入れ、乾燥剤を封入した状態で、テンシオメータの断熱キャップの上部に固定し、植生などの影響を極力少なくした。また、右側のネットワークには気象ユニット(Davis社製Vantage Pro2)を設置している。ここでは、斜面崩壊の予知および警報の解除に必要な要素として、温度、湿度、風速、日射量、雨量などを計測する。基地局は、基地局の電源確保が困難な状況を想定し、斜面上部のラックに設置し、太陽光発電（太陽光パネル・蓄電池）によってエネルギーを得ている。また、センサーノードとテンシオメータのエネ





写真-2.5 システムの現地設置状況

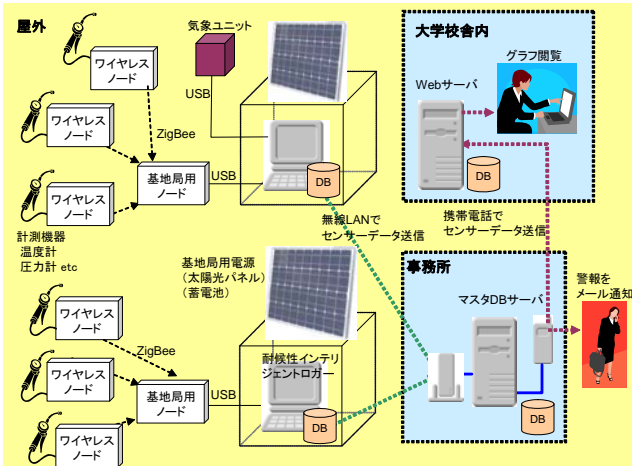


図-2.9 システムの全体像

ルギー源としては、リチウム電池をそれぞれ2本、4本利用した。ここで、ワイヤレスノード、気象ユニットのデータ取得間隔は10分に設定して実験を行った。得られたワイヤレスノードからのデータは、図-2.9に示す経路でWebサーバに届けられ、遠隔地からのデータの閲覧と警報の通知が可能なものとした。また、テンシオメータの電源として、リチウム電池の電圧低下を最低限にするため、計測時のみ通電させる回路を組み込んだ。同時に室内降雨試験でのノイズの一因として、電磁波によるものを想定し、高周波成分を除去する回路を組み込んだ。なお、メンテナンスを容易にするため、ワイヤレスセンサーノードとテンシオメータはプラグ型のコネクタを利用し、取り付け・取り外しを容易にするとともに、接続不良によるデータの乱れや欠損を防止した。

次に、計測結果を示す。図-2.10は、センサーネットワークを通じて得られたデータのうち、1測点(写真-2.5の○印の地点)と気象ユニットのデータである。システム設置後、数日間データ取得が可能であったが、その後、しばらくの間、データが取れなくなった。この原因は、基地局の電力不足であった。このため、太陽光発電パネルの増設を行った。その結果、データ取得状況は大きく改善したが、現時点で欠損なくデータを取得できる状況には至っていない。

一方で、太陽光発電による電力供給ができてい

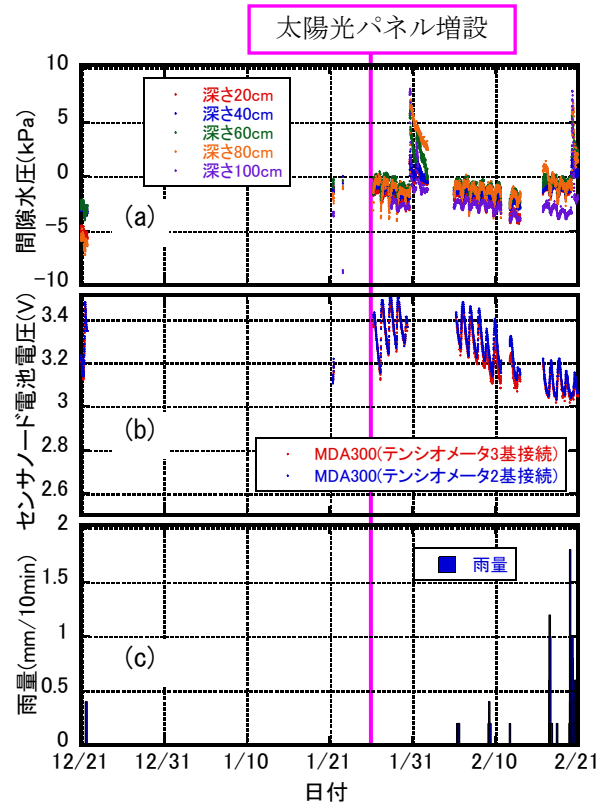


図-2.10 ネットワークを通じて得られたデータ

- (a) 間隙水圧
- (b) センサーノードの電池電圧
- (c) 雨量

期間については、問題なくシステムからのデータ取得が行えるという結果になった。これより、システムそのものは有用なものであるといえる。

次に、リチウム電池の電圧降下は図-2.10(b)に示すようになった。センサー基板で取得するデータの精度を維持するためには、MDA300で電圧2.7Vが必要となる。図-2.10(b)から読み取れる電圧降下速度から、現時点での電池の交換頻度は3ヶ月に1度程度にすることが妥当であるといえる。また、テンシオメータを接続する数は、電圧降下に大きく影響しないことが分かった。なお、この実験では、室内降雨実験に見られたノイズが見られなかった。このことから、室内土槽試験特有のノイズ原因が存在するか、今回導入したノイズ対策が有効なものであったということが考えられる。

また、新たな問題として、写真-2.6に示すように、防水BOX内部に結露が見られ、内部に水が溜まる現象が発生した。この水は、ワイヤレスノードの破損につながる恐れがあるため、水抜き対策が必要とな



写真-2.6 防水BOXの結露

る。

今回の現地計測で得られた2008年12月から2009年5月までのデータは、巻末の付録にまとめる。

### (5) 現地計測結果からの課題

#### a) 計測内容における課題

前節で述べた計測結果を基に、計測に関する部分の今後の課題は、以下の通りである。

- ・ワイヤレスノードの電源電圧の変動がテンシオメータ計測値に与える影響を検討する必要がある。これまでにワイヤレスノードの電源電圧が低下すると、テンシオメータの出力値が基地局に転送される間に変動していくことがあった。この影響について考慮していく必要がある。現在、ワイヤレスノードを作成している会社にこの部分の問題に対する解決を依頼している。
- ・複数の地点で、間隙水圧の値が異常と考えられるデータが合った。これらは、センサーとワイヤレスノードの接続不良が原因のひとつと考えられる。また、テンシオメータの一部に密閉が不十分な箇所があり、水漏れがあった。
- ・気象センサーユニットのケーブルが動物に噛みちぎられていた。保護管を巻くことによって対策を取った。また、テンシオメータに被せてある断熱キャップも動物に倒されていたため、固定具を取り付けた。
- ・気象センサーユニットのデータなどに関して、機器の校正が必要である。
- ・地盤調査および土質試験を行い、間隙水圧の値および変化傾向が妥当か確認する必要がある。

#### b) ワイヤレスセンサーネットワーク関連の課題

センサーノードから基地局へ無線によってデータを送信する部分については、基本的に問題なく稼働していることが確認された。多数のノードを用いて短い時間間隔でセンシングを行う場合、通信の輻輳によって設定したセンシング間隔でデータを取得できないことがあるが、今回の観測実験では1センサーネットワークあたり10ノード、センシング間隔10分という比較的余裕のある設定だったため、このような問題は発生せず、各ノードに関してほぼ10分間隔でのデータ取得ができていることが確認できた。

また、今回利用したセンサーノードでは、電源として単3型リチウム電池2本を用いている。電池交換作業などの管理コストを削減する上でも、ノードを長期間稼働させ、電池の交換間隔を短くすることは重要な課題である。今回は、一般によく用いられるアルカリ電池に比べ3倍程度の長期利用が可能なりチウム電池を用い、さらに、ネットワークの動作

モードとしてHP (High-Power mesh networking mode) ではなく LP (Low-Power mesh networking mode) を用いることで、ノード電源の省電力化を図った。表-2.5は、40日程度ノードを稼働させたときの、各ノードの1日あたりの平均電圧降下量である。これより、少なくとも40日以上は問題なく稼働すること、および十分な省電力が実現されていることが確認された。

一般にセンサーネットワークでは、複数のノードを経由するマルチホップ通信を用いることによってノード単体での通信可能距離を超えた広範囲に渡る観測を可能にしている。しかし、マルチホップ通信を用いると、ノード数が増えた場合に基地局近辺のノードの通信量が多くなる可能性がある(図-2.11)。このとき、次の2種類の課題を検討する必要がある。

#### ①輻輳の発生によるデータの取りこぼし

無線通信における時間あたりのデータ転送量には限界があるため、基地局付近のノードが多数のノードからのデータを中継する必要がある場合、データの取りこぼしが発生する可能性がある。これを基地局から見た場合、あるノードからのデータがあらかじめ定められた時間間隔で届かない状況が発生したことになる。輻輳の発生の有無はノード数、センシング間隔およびノードの配置方法によって決まると考えられる。今回の現地計測では問題は発生しなかったが、今後様々な異なる環境での観測を行う場合に備え、輻輳の発生条件の具体的な検討を行うことが望ましいと考えられる。

表-2.5 各ノードの1日あたりの平均電圧降下量

ノードID	1日あたりの電圧降下 (mV/day)	ネットワーク名	センサー基板種別
3330	5	M2	MDA300
3416	3.8	M2	MDA300
3418	3.6	M2	MDA300
3458	2.9	M2	MDA300
3480	7.1	M2	MDA300
5900	3.7	M2	MDA300
3317	7.9	M2	MTS400
3342	4.1	M2	MTS400
3435	5.6	M2	MTS400
7814	7.3	M2	MTS400
3266	12.1	M3	MDA300
3324	4	M3	MDA300
3365	12.5	M3	MDA300
3397	12	M3	MDA300
3477	11.9	M3	MDA300
3503	N/A	M3	MDA300
3331	3	M3	MTS400
3378	0	M3	MTS400
3395	10.7	M3	MTS400
7815	0.05	M3	MTS400

注:ノード3503は、動作異常が見られたため計測対象外とした。

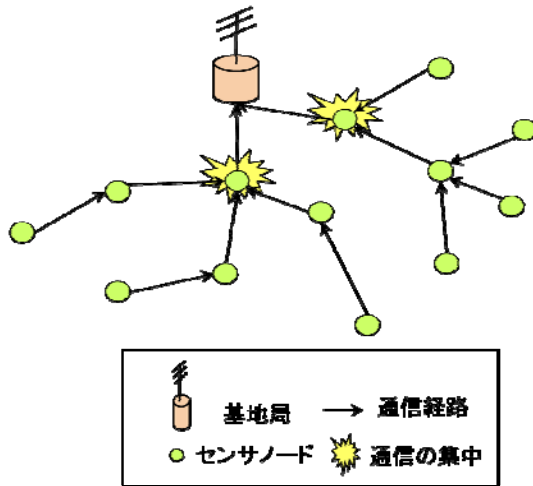


図-2.11 通信の集中の発生

②通信量の増加にともなうノードの消費電力の増加  
 センサーノードは主に乾電池等のバッテリーによって動作する。一方、センサーノードはメンテナンスのコストを抑えるため、できるだけ長期にわたって動作することが求められる。そのため、ノードの省電力化は重要な課題の一つとなっている。センサーノードにおいて通信は大きな電力を消費する動作であるため、できるだけ通信量を抑える必要がある。基地局付近のノードは必然的に通信量が増加するため、他のノードに比べ電力消費が激しくなる可能性がある。輻輳の発生条件の場合と同様、ノード数、センシング間隔およびノードの配置方法と基地局付近のノードの電力消費の関連について、検討を行うことが望ましい。

また、すでに稼働しているセンサーネットワークに対してノードをあとから追加した場合に、追加したノードの通信が円滑に開始されることも運用上重要な点である。追加ノードが通信を開始するまでに長い時間を要したり、手作業による設定が必要であったりすると、利便性の低下や柔軟性の欠如を招くことになる。今回の実験では、ノードを追加した場合、および稼働中のノードを一旦停止して再度電源を投入した場合それぞれについて、十分短い期間内にノードがネットワークに自動的に参加し、基地局へのセンシングデータの送信を開始したことが確認された。これによって、センサーネットワークの構成の変更に対する柔軟性、および通信動作の安定性が確認できた。

さらに、複数のセンサーネットワークを同時に使用することによって観測可能範囲を拡大することも今回の実験の目的の一つであるが、このときの課題として、異なるネットワーク間での通信の干渉が挙げられる。各ネットワークの通信データは異なるネットワーク ID を用いて識別されるため、データの混信などは発生しないが、同じ周波数を用いて通信を行うと、ノードのアンテナが他のネットワークの通信も受信してしまい、通信効率が悪化する可能性が

ある。そこで、本実験ではネットワークごとに ID だけではなく通信に用いる周波数も異なるものを割り当てることにより、通信効率の低下を防いだ。具体的には、二つのネットワークのうち片方に 2405MHz、もう片方に 2475MHz を割り当てることによって対処を行った。多数のネットワークを同時に稼働させる場合は、安定性の向上のため、このように隣接するネットワークが異なる周波数を用いるよう設定することが重要である。

### c) データ収集・分析ソフトウェア関連の課題

データ収集・分析ソフトウェアに関する動作に関して検証する。本ソフトウェア群の主たる動作は以下に分類される。

- (動作 1) センサーデータを分析して判定結果を計算する。
- (動作 2) 各種データをインテリジェントロガーから Web サーバまで送信する。
- (動作 3) 判定結果を通知および公開する。

各動作について現地計測結果に基づいて検証したところ、ソフトウェア群が設計書通りに動作することが確認された。

今回構築した斜面防災システムは、センサーネットワークが 2 つ、1 ネットワークあたりの計測地点が 3 箇所という比較的小規模なセンサーネットワーク群を扱っているが、より大規模なネットワークを扱う際に問題なりうる動作事例がいくつか見られた。適切な対処機能を実装することにより、本システムの有用性を高められるといえる。以下に、必要な対処機能を該当する動作事例とともに示す。

- (動作 1) センサーノードの通信停止を検出し可視化する機能

現地での斜面防災システム運用中、ある時点以降特定のセンサーノードからの基地局へのデータ送信が停止する状況が数度発生したことから、本システムを今後長期運用するに当たって、同様の状況が発生することが充分考えられる。通信停止の原因はハードウェアの問題、電池切れなど様々であるが、いずれの場合も現地での確認が必要である。しかしながら現状では、遠隔環境下における通信停止の発見は手間がかかる。システムの管理者用 Web ページにアクセスしてセンサーデータをダウンロードし、CSV ファイルの目視により、現時点における全センサーノードからのデータ到着の有無を直接確認するしかない。センサーノード数が多い場合、この確認作業に時間がかかりメンテナンスコストが増大すると考えられる。そこでインテリジェントロガー、マスタ DB サーバ、あるいは Web サーバにおいて、データ転送ツール、判定ツール、あるいは可視化ツールの改良により、通信停止を検知し、それを可視化する機能があるとよい。いずれのツールもその動作するマシン上のデータベースにアクセスする。アクセス時、過去のデータのセンサー ID と新しいデータのセンサー ID の比較により、特定のセンサー ID を持つセンサーからのデータが現時点で到着しているかどうかを判定できる。システムのスケーラビリティ

表-2.6 1 センサーネットワークあたりの期待送信データ件数

データ取得目的	センサーノード種別	1ノードあたり データ件数	合計 データ件数
ラック内の温度・湿度計測	MTS420	9件	9件
1地点の計測	深度20cm	MDA300 テンシオメータ3本	20件
	深度40cm		
	深度60cm		
	深度80cm	MDA300 テンシオメータ2本	
	深度100cm		
温度・湿度等測定	MTS420	9件	
斜面崩壊危険度・安全度判定	-	-	1件
警報(発令時のみ)	-	-	1件
気象データ計測*	気象センサーユニット	6件	6件

\*気象センサーユニットは1ネットワークに1台ではなく、1システムに1台とする

を考慮すると、通信停止を検知する機能はインテリジェントロガー上に、それを可視化する機能は Web サーバの可視化ツールに実装するのがよいと考えられる。

(動作2) データ転送ツール(マスタ DB サーバ)における未送信データ件数の発散の検出機能

動作事例を述べる前に、まずデータ転送ツールの動作について説明する。マスタ DB サーバ上のデータ転送ツールは、10分に1回ダイヤルアップし、データベースの送信テーブル内に書き込まれた各センサーデータ、判定結果、および警報データを Web サーバに送信し、送信完了後ダイヤルアップを切断する。送信時、送信済みデータを送信テーブルから削除しつつ、送信テーブルが空になるまで、データを1件ずつ送信する。ここで、各センサーノードはおよそ10分に1回センシングを行って基地局にセンサー値を送信し、インテリジェントロガーは10分に1回マスタ DB サーバにセンサーデータを送信する。センサーデータは取得時刻、センサーノード、およびセンサー種別ごとに個別に作成され、マスタ DB サーバの送信テーブル内に追加される。

現地斜面防災システムの構築初期、Web サーバへのデータ転送が停止したように見える不具合が見られた。この原因は、データ転送速度が小さいためにデータベースの送信テーブル内にある未送信データ件数が発散し、センサーデータ取得から Web サーバへのデータ到着までの遅延時間が増加したことにあった。この不具合はデータ転送ツール上でダイヤルアップモデムのデータ送信速度を大きくすることで解消された。しかしながらこの事例から、不具合対策として未送信データ件数の発散を検出する必要があるといえる。今回の現地計測結果より、データ1件当たりの平均送信時間は0.48秒であることがわかった。したがって、ダイヤルアップ切断後から次のダイヤルアップまでに送信テーブルに追加される平均データ件数が1250件以内でなければ、次のダイヤルアップで全データを送信完了できない。そうでない場合、未送信のデータが送信テーブル内に残

ったまま新たなデータが送信テーブルに追加されていくため、未送信データ数が徐々に増加し発散する。1 センサーネットワークが送信する期待データ件数は、表-2.6の通りである。マスタ DB サーバに2ネットワークを接続し、10分に1回マスタ DB サーバから Web サーバに送信する場合、1ネットワークあたり最大30地点までしか計測できない。これより多くの地点を計測する大規模なセンサーネットワークを構築する場合、センサーノードでのセンサーデータ取得頻度を低くするか、Web サーバへのデータ送信頻度を高くするなどの対処が必要である。また前述した動作事例にもあったように、マスタ DB サーバから Web サーバへのデータ転送速度が小さい場合にも未送信データ件数の発散は発生するため、かかる調整が必要となる。大規模センサーネットワークの運用において生じる、不適切なデータ送信頻度調整を回避するため、送信テーブル内のデータ数の変化を監視し、未送信データ件数の発散を検出する機能が必要といえる。

## 参考文献

1. 平井一弘, 里見知昭, 酒匂一成, 深川良一: 無線センサーネットワークの斜面防災への適用に関する実験的研究, 歴史都市防災論文集, Vol.3, pp.99-104, 2009.
2. 深川良一, 酒匂一成, 横田裕介, 大久保英嗣, 島川博光, 原田史子: 降雨時の表層すべり型崩壊に対するセンサーネットワークを利用した計測システムに関する研究, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2008, pp.21-26, 2008.
3. 酒匂一成, 里見知昭, 深川良一, 北村良介: 降雨によるまさ土斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験, 第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.21-26, 2008.
4. 深川良一, 島川博光, 大久保英嗣, 横田裕介, 酒匂一成, J.C.Wells: センサーネットワークを利用した斜面モニタリングシステムに関する基礎的研究, 斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム, pp.155-160, 2007.

## 第3章 斜面防災システムに関する検討

### 3.1 斜面崩壊兆候検知アルゴリズムに関する検討

#### (1) 斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの概要

降雨時の斜面崩壊の問題には斜面の特徴に合わせた斜面崩壊の兆候の正確な検知が不可欠である。しかし、現在の斜面崩壊防災システムでは、地域ごとに計測される降雨量をもとに斜面崩壊の可能性を判断しているため、斜面ごとに斜面崩壊の可能性の正確な予知ができていたとは言い難い。そこで、本研究では、道路斜面防災のために、斜面崩壊が起こる前にその兆候を検知するシステムの構築を目指す。そのためには、斜面崩壊を引き起こす要因となる斜面地下で起きる現象を地中に設置したセンサーで観察し、得られた時系列データを分析し傾向を把握することが必要である。道路斜面に設置されたセンサー群から収集されるデータを分析するための、専門家に理解しやすい手法を開発する。

斜面に合わせた斜面崩壊の予知の精度を高めるために新たな要素として地中の水分量を示す間隙水圧とそれを取得するセンサーネットワークを考える。間隙水圧を用いることで斜面ごとの詳細なデータの取得が可能になる。地中の水分量がいかに変化しているかをつぶさに調べるために、ひとつの斜面の多数の地点に間隙水圧を測定するためのセンサーを設置する。各地点について、間隙水圧は複数の深度で計測される。このようにセンサーを配置することにより、三次元での間隙水圧の時間の経過にもなる変化をとらえることができる。

このようなセンサーを無線通信でつなげたセンサーネットワークから得られる時系列データを複合的に評価するためにタイムチューブを提案する。そこで、ある斜面の状況に対応する斜面崩壊可能性の評価指針と、その状況下での間隙水圧の遷移特性を示すタイムチューブを用意する。これらのタイムチューブからの実観測データのずれをもとに斜面崩壊の発生の可能性が計算される。タイムチューブを用いることでセンサーネットワークから得られた時系列

データをもとに斜面崩壊が発生する可能性を定量的に計算する手法を提案する。上記の手法を以って、より斜面ごとに合わせた斜面崩壊の可能性の正確な予知を行うことができると考えられる。以下に、斜面崩壊兆候アルゴリズムに関する概要をまとめる。

#### a) 4次元計測による危険性と安全性の評価

はじめに、“ワイヤレスセンサーネットワークによる3次元計測”に関して述べる。本研究では、斜面内の間隙水圧についてセンサーネットワークを用いて多点・多深度で計測し、そのデータを時系列的に分析することで斜面崩壊の発生可能性を評価する手法を提案している（詳細は、次項を参照されたい）。

間隙水圧とは、地中の砂・土の隙間の水圧のことである。これを用いることで地中の水分の飽和度を把握することができる。間隙水圧は、テンシオメータを地中に挿入することで計測できる。複数の長さのテンシオメータがあり、計測する深さを変えることで地中への水分の浸透度を計測する事ができる。

複数のテンシオメータを計測したい斜面上の各点に設置し、このような点を面状に複数個設ける。これをひとつのセンサーノードとして計測したいそれぞれの斜面に配置し、センサーネットワークを形成する。このセンサーネットワークを用いることで斜面に対して複数のテンシオメータを用いた面での間隙水圧の計測に加え、テンシオメータの長さの違いを利用した深さによる計測も可能になる。これを以て、評価範囲をブロックに分けた点での計測により、さらに正確な、面状に配置したテンシオメータに深さを加えた3次元の計測を行うことが可能である。

上記のワイヤレスセンサーネットワークを用いた降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの全体像について、図-3.1で説明する。本システムでは、斜面に設置されたセンサーネットワークで得られた間隙水圧のデータをノード間通信によって集中管理を行う基地局へ送る。基地局では設置された小型PCによりリアルタイムで送られてきたデータの解析が行われる。解析された結果は Webサーバ内に保存され、図-3.1に示されるインターネットを經由した遠距離

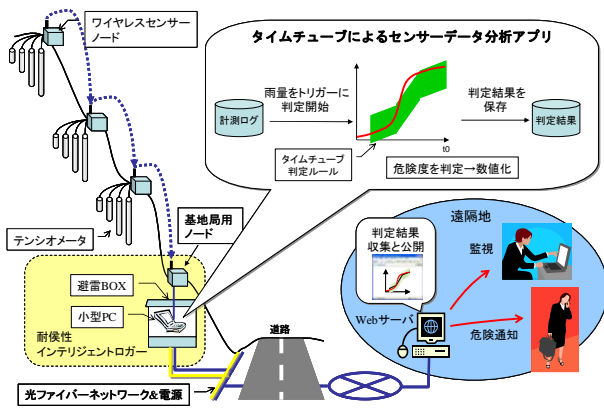


図-3.1 ワイヤレスセンサーネットワークを用いた防災システムの全体像

からの斜面の状況の監視、斜面崩壊の可能性の高い地域にいる人への警告などといったサービスを提供する。本研究で対象とするのは、基地局に設置された小型PCにおける間隙水圧データの解析である。

次に、“タイムチューブによるデータ分析”についてまとめる。前節のセンサーネットワークで得たデータの時間経過の中でのふるまいを解析する手法として、タイムチューブを提案する。

タイムチューブとは、複数の時系列データを解析することを可能とする技法である。図-3.2に示すように $n$ 個のデータ値が周期的、あるいは非周期的に収集されている監視対象の斜面を考える。監視対象の状態は、 $n$ 次元の超平面上の点として表される。時間経過とともに状態は変化する。この時間経過の中での監視対象の状態遷移を、時間軸を加えた $(n+1)$ 次元の超空間内の軌跡として捉えることができる。また、状況を監視対象が満たすべき条件が関連付けられた時間セグメントの並びであると捉える。これは時間セグメントの長さに加えて、 $n$ 個のデータ項目の値に対する不等式で指定される。これを以って設定された条件は  $n$ 次元の超平面上の領域として捉えることができる。図-3.2に示すように、 $(n+1)$ 次元の超空間では、時間方向に時間セグメントの長さだけこの領域を平行移動してできるチューブ状の部分空間を得ることができる。このチューブ状の部分空間に監視対象の状態遷移の軌跡が含まれると仮定する。それは監視対象が指定された時間セグメントで条件を満たすことを意味する。この部分空間をタイムチューブと呼ぶこととする。以下に例を示す。

$n$ 個のデータ項目 $d_1$ から $d_n$ が与えられており、時間セグメントの長さとして各々に関連付けられた $k$ 個( $k \leq n$ )のデータ項目についての不等式でタイムチューブ $T$ が表されているとする。タイムチューブで指定した状況の発生を検知するために、監視対象から得られた時系列データ $(v_1, \dots, v_n)$ がタイムチューブ $T$ の中で指定された条件を満たすかどうかを検査される。条件を満たす時系列データの数は、タイムチューブが検査するデータ項目 $k$ およびデータ項目上の条件により変化する。条件が緩いとき、すなわちタイムチューブが太く短いときは、その軌跡がタイムチュ

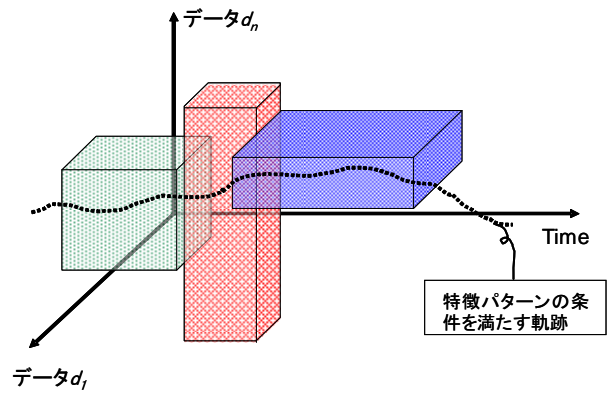


図-3.2  $(n+1)$ 次元超空間とタイムチューブ

ーブ内に含まれる状態遷移の数が多くなる。反対に、条件が厳しいとき、すなわちタイムチューブが細く長いときは、タイムチューブに適合する状態遷移の数が少なくなる。本手法を用いることで互いに独立したデータ項目 $(d_1, \dots, d_n)$ のそれぞれの値を複合して評価することが可能になる。

タイムチューブの本手法への適用を考える。タイムチューブを斜面崩壊の可能性の危険と安全の境界線として設定したと想定する。テンシオメータが全部で $n$ 個設置されているとする。 $i$ 番目のテンシオメータから計測されたデータをデータ $d_i$ とする。ある時刻 $t$ でのデータ項目 $d_n$ の値を $v_i(t)$ とする。ベクトル $(v_1(t), \dots, v_i(t), \dots, v_n(t))$ は $n$ 次元の超平面上の一点であると考えることができる。このデータが時間と共に移り変わっていくとき、全体のデータは $t$ に合わせて $(n+1)$ 次元の超空間上に軌跡を描く。この軌跡が任意の時点でのタイムチューブの中に収まるとき、この計測データはタイムチューブが対応する条件、すなわち斜面崩壊の発生可能性が危険と安全の境界を満たしているとして判定される。

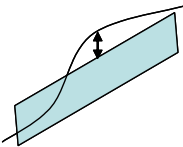
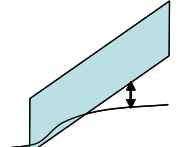
#### b) 危険性と安全性の判定を用いた複合的な評価

間隙水圧が上昇するにつれ土の中の水が増し、斜面崩壊の可能性が高まるということ、下降するにつれ土の中の水が抜け斜面崩壊の可能性が低くなるということがわかっている。タイムチューブが対応する条件は、タイムチューブの設計者によって決定される。このとき設計者の意図する条件は以下の3パターンに分類される。

- ① タイムチューブ内を間隙水圧のトレンドグラフが通るとき、斜面崩壊が起きる可能性が高い。
- ② タイムチューブ内を間隙水圧のトレンドグラフが通るとき、斜面崩壊が起きない可能性が高い。
- ③ タイムチューブは、斜面崩壊の可能性の危険と安全の境界線である。

①のとき、斜面崩壊が起きない可能性を評価する指針として安全性という評価指標を導入する。②のとき、斜面崩壊が起きる可能性を評価する指針として安全性という評価指針を導入する。また、斜面崩壊が起きるときと起きないときの境界線を設計したタイムチューブによる評価は、上記の安全性と危険性

表-3.1 トレンドグラフと危険性、安全性の変化

	トレンドグラフ	危険性	安全性
上に ずれた 時		危険性の増加 危険度: タイムチューブから上方へのずれに関する指標	安全性の低下
下に ずれた 時		危険性の低下	安全性の増加 安全度: タイムチューブから下方へのずれに関する指標

の指標を同時に使用することで行う。両評価での加減点は、タイムチューブの中心値とデータの差の絶対値に重みを付けて行う。最終的な斜面崩壊の可能性は、二つの評価を複合して導き出す。

危険性の評価では、計測データが $(n+1)$ 次元空間でタイムチューブよりも原点よりも遠い位置、すなわち、上方に計測データがプロットされるとき、水分が土の中から抜けていないので斜面崩壊の危険度は高いと考えられる。表-3.1に示すように、上方へのずれが大きいほど危険性は高くし、下方にずれたときには危険度がやや下げる。

安全性の評価では、安定時タイムチューブよりも下方に計測データがプロットされるとき、水分が土の中より早く抜けていることになる。表-3.1に示すように、安全性を下方に軌跡がずれたときに大きく増大させ、上方にずれたときにやや下げる。

そして、複合的な評価では、危険性と安全性とそれぞれ複数個の地点、深度で算出し危険性と安全性のそれぞれで統計する。統計された危険性と安全性の時間的推移を示すトレンドグラフの交差点は危険性と安全性が逆転する時点となる。危険性が安全性を上回る時点で警報を出し、安全性が危険性をうわまわる時点で警報を解除する。この評価によって点での瞬間的な数値から評価を行う現在のシステムよりも確実な判定を行うことができる。

斜面崩壊のデータのトレンドグラフを斜面ごとにタイムチューブを用いて検査するに当たって、2つの手法を提案する。それぞれタイムチューブの設計に関する設定であり、以下に内容を示す。

#### ① 通過領域の検査

領域を検査するタイムチューブではある特定の領域をタイムチューブとして事前に設定しておき、データに対して斜面崩壊の可能性の検査を行う。過去のデータの統計の取りやすさから、安全性の高い領域を設定しやすく、安全性の判定に対して主に有効である。

#### ② 形状の検査

形状を検査するタイムチューブでは事前にタイム

チューブの形状のみを設定しておき、タイムチューブが超平面上で占める領域をデータに合わせて動的に変動させて検査する。超空間上でのタイムチューブの位置がトレンドグラフの形状に合わせて動的に変化するので、過去のデータからの統計の取りにくい危険性の判定に特に有効である。

#### c) トレンドグラフ特性の検査手法の実装

上述したトレンドグラフ特性の検査手法を実装した。本システムは、主に以下の要素で成り立つ。

##### ① システム内部

- ・ オンラインデータベースから斜面崩壊の可能性をリアルタイムに判定するオンライン機構
- ・ タイムチューブの設計や細かい調整をしながら斜面崩壊の可能性を判定するオフライン機構

##### ② システム外部

- ・ タイムチューブのパラメータ設定を記述したXMLファイル
- ・ 算出した結果を出力するためのEXCELファイル
- ・ オフラインで計算する際の間隙水圧のデータを収めたEXCELファイル

斜面ごとの特徴によって異なるタイムチューブのパラメータの設定には、XMLファイルを用いる。以下、各設定について述べる。

##### ① 解析プログラムの開始条件の設定

解析プログラムを常に起動し斜面崩壊の解析を行うことはコンピュータの電力的な効率を悪くする。したがって、解析プログラムを起動させるための開始条件を設計する必要がある。また、タイムチューブの作成を開始する間隙水圧を用いた閾値を設定し、閾値を越えた際に間隙水圧の解析を開始する。閾値は閾値を持つテンシオメータの現在の時間から過去の任意の時間までの間隙水圧の平均値とする。

##### ② 安全性と危険性の初期値の設定

斜面崩壊の可能性は、場所によって異なる。よって、安全性と危険性の初期値が一定とは限らないため、斜面に合わせて設定を行える必要がある。

##### ③ タイムチューブのパラメータの設定

タイムチューブのパラメータには、タイムチューブの種類（通過領域を検査するのか、形状を検査するのか）、傾き、値幅、時間幅、タイムチューブを上へ抜けたときの処理と下に抜けたときの処理が必要である。

以上の設定をもとに、本システムを含めた全体像を図-3.3に示す。なお、本システムは、データベースと能動機能を用いることを想定して設定されている。そのシステムのふるまいについて、図-3.4のシステムの実効画面全体を用いて説明する。図-3.4の①から④の表示内容を次に示す。

- ① 表示時刻時点でのタイムチューブでの解析結果を複合評価したものがそれぞれ表示されている。
- ② 各テンシオメータのノードID、テンシオメータを挿入した深さが表示される。複合評価の場合は使用しているXMLファイルの名前が表示される。

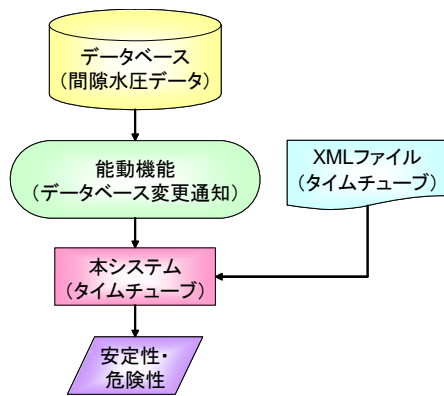


図-3.3 実装したシステムの全体像

- ③ 危険性と安全性の時間経過における変化のグラフが描かれる。このグラフが交差したときを危険水準に達した時間と設定する。
- ④ ②に対応するテンシオメータの基準時刻を右端に過去のデータとタイムチューブをグラフ表示する。

(2) 現地計測結果を用いた安定性評価結果

現地計測結果に対する斜面崩壊兆候検知アルゴリズムを用いた分析および安定性評価を行う。

図-3.5に、2009年1月30日から2月1日にかけて現地計測結果から得られた間隙水圧データを示す。1月31日と2月1日早朝に降雨があったが斜面崩壊は発生していない。本データはセンサーネットワークM2のセンサーノード3480, 3418, 3330に対応する。

このように、現地では斜面崩壊時の間隙水圧データが得られる可能性が低く、降雨後間隙水圧が徐々に低下するような安全時のデータが多く得られる。また、土槽試験では間隙水圧のサンプリング周期が30秒から1分程度と短く、計測を経るにつれて徐々に間隙水圧が上昇していた。一方、現地斜面防災システムでは、サンプリング周期が10分に1回と室内土槽試験に比べて長い為、ある時点からの少数の計測を経て、急激に間隙水圧が上昇したように見える。急激な上昇後、間隙水圧は多少の振れ幅を持ちつつ飽和しているか、あるいは緩やかに下降している。現地への斜面防災システム適用においては、斜面崩壊兆候の検知は勿論であるが、降雨時に安全である事例のほうが多いと考えられることから、空振り警報を発令しないことが重要である。そこで、今回は空振り警報発令の回避に着目したタイムチューブを作成した。タイムチューブ作成において、急激に間隙水圧が上昇した後の間隙水圧の変化に着目する。間隙水圧の振れ幅よりタイムチューブの値幅が大きくなるように値幅を設定した。タイムチューブの傾きは間隙水圧の平均変化率を元に決定した。時間幅は3時間を目安とした。判定開始条件は間隙水圧に閾値を定めることで決定した。閾値は間隙水圧が急激な上昇を始めてから終わるまでの平均値前後とした。タイムチューブ内の間隙水圧データを基準にして、形状による判定を行うこととした。安全度の初期値



図-3.4 実行画面

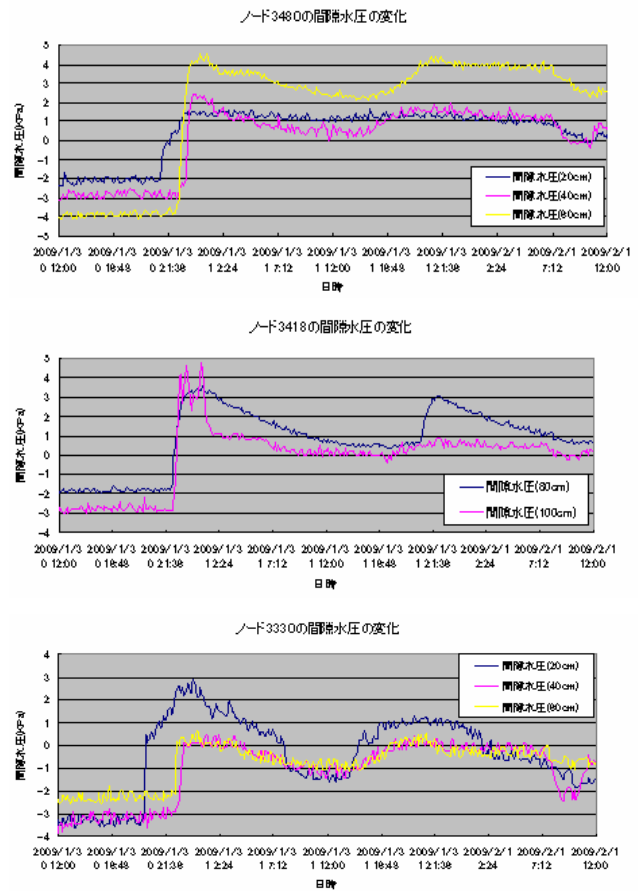


図-3.5 降雨時の間隙水圧の変動 (センサーネットワークM2, ノード3480, 3418, 3330)

は90、危険度の初期値は10とした。空振り警報発令を回避するため、間隙水圧がタイムチューブ内にあるときは、安全度および危険度が変化しないように評価式を設定した。表-3.2～表-3.4に本研究で設定した斜面崩壊兆候検知判定条件、タイムチューブ設定値および評価式の一覧を示す。

作成したタイムチューブを適用し、2009年2月12日から1ヶ月程度斜面防災システムを運用した。図-3.6, 図-3.7に現地計測のセンサーネットワークM2, M3における判定結果を示す。この期間に強い降雨が



表-3.2 斜面崩壊兆候検知判定条件

センサーネットワーク	ノードID	チャネル	深度(cm)	判定開始の閾値	閾値との比較用に平均値を計算するデータ数
M2	3330	adc0	20	0	10
M3	3477	adc0	20	0.28	10

表-3.4 タイムチューブ評価式

安全性	上限を超えたときの減少値	タイム・チューブ内にあるときの変化値	下限を下回ったときの増加値
	$0.05 \times (\text{上限からの差分})$	0	$0.05 \times (\text{下限からの差分})$
危険性	上限を超えたときの増加値	タイム・チューブ内にあるときの変化値	下限を下回ったときの減少値
	$0.05 \times (\text{上限からの差分})$	0	$0.05 \times (\text{下限からの差分})$

表-3.3 タイムチューブ設定値

計測位置				タイム・チューブ			
センサーネットワーク	ノードID	チャネル	深度(cm)	現在時刻からの戻り時間(分)	時間幅(分)	傾き(kPa/10分)	値幅(kPa)
M2	3480	adc0	20	18	18	0.004	0.5
		adc1	40	15	15	0.01	0.5
		adc2	60	10	10	0.06	0.3
	3418	adc0	80	10	10	0	0.7
		adc1	100	10	10	0	3
		adc0	20	18	18	0.35	1
	3330	adc1	40	15	15	0.02	0.7
		adc2	60	18	18	0.03	0.9
		adc0	20	18	18	0.02	0.9
M3	3477	adc1	40	18	18	0.03	1.2
		adc2	60	18	18	0.09	0.5
		adc0	20	18	18	0	1.4
	3365	adc1	40	18	18	0.02	1
		adc2	60	18	18	0.03	0.9
		adc0	20	18	18	0.02	0.8
	3397	adc2	60	15	15	0.02	4
		adc0	80	15	15	0	1
	3266	adc0	80	15	15	0	1
		adc1	100	18	18	0.02	1

見られたが斜面崩壊は発生しなかった。この期間の安全度および危険度は、それぞれ初期値と同じ90および10で変化せず、警報発令はなかった。この理由は、降雨後間隙水圧の急な上昇はあったが、その後の間隙水圧はタイムチューブ内に収まっていたためと考えられる。以上のように、空振り警報を回避するようなタイムチューブを作成し、その有用性を確認できた。

### (3) タイムチューブの設定値および評価式の高精度化

前節では、空振り警報発生を回避するようなタイムチューブが作成できたことを述べた。さらに、安全性が危険性を上回ることを保証しつつ、両者が変化するようなタイムチューブおよび評価式を設定することにより、斜面崩壊兆候の有無に応じて変動する危険性および安全性を生成する手法を示し、現地計測データを用いて各種パラメータを設定することでより精度の高い安定性評価ができる。

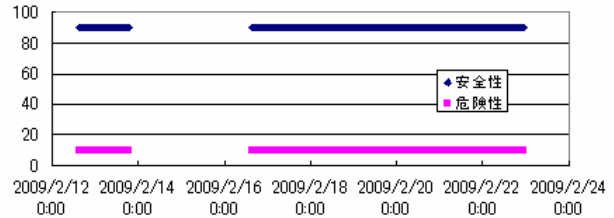


図-3.6 センサーネットワークM2の判定結果 (抜けている箇所は計測不良)

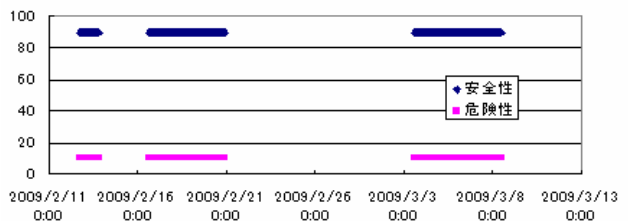


図-3.7 センサーネットワークM3の判定結果 (抜けている箇所は計測不良)

今後、多量の降雨時のデータが得られることから、通過領域による判定を行うことで各種パラメータが洗練され、さらに精度向上が見込める。以下、具体的な設定方法を述べる。

- ・タイムチューブの時間幅として、前節で述べた期間を採用する。
- ・閾値、タイムチューブの傾きおよび値幅は、各降雨時のデータから前節で述べた手法で計算した各値の平均値あるいは最大値を採用する。
- ・タイムチューブの開始値は、間隙水圧が急激に上昇した直後の数点の間隙水圧の平均値を採用する。
- ・評価式は、タイムチューブの傾きと値幅から、判定開始時に90および10の値を持つ安全度および危険度が、間隙水圧がタイムチューブの中心線と一致したときに60および40程度になるように作成する。

### 3.2 斜面安定性の定量的評価に関する検討

#### (1) 安定性評価手法の概要

これまでに、降雨に伴い時々刻々と変化する斜面の安定性評価を定量的に評価するために、2次元浸透解析と斜面安定解析を組み合わせた数値シミュレーションの開発を行っている。そこで、プログラムを開発してきており、室内土槽試験の結果を用いて、数値シミュレーションの妥当性の検討を行った。

図-3.8は、斜面安定評価のフローを示している。まず、土の間隙比、密度、粒度などを基本物性試験から得る。また、保水性試験、透水試験、一面せん断試験を行う。これらのデータを数値力学モデルの入力データ、妥当性検討用データおよびフィッティング用データとして用いる。

数値シミュレーションでは、水分移動モデルによる計算を実施し、不飽和・飽和浸透解析に必要な水分特性曲線および飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を求める。また、粘着モデルにより、飽和度-見掛けの粘着成分を求める。

求められた水分特性曲線と飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を用いて、有限要素法(FEM)を用いた2次元不飽和・飽和浸透解析を行うことにより、斜面内の間隙水圧(または、サクション)の変化を計算する。浸透解析の初期値および境界条件は、現地計測データ(間隙水圧、雨量)などから決定される。浸透解析後に、斜面安定解析(円弧すべり法、非円弧すべり法など)を行う。斜面安定解析では、潜在すべり面を変化させ、最小の安全率を求めている。また、雨水浸透によるすべり土塊自重の増加、せん断強度の低下、地下水水位の上昇による影響を考慮するために、浸透解析結果に基づき、土塊自重の計算、飽和度-見掛けの粘着成分の関係からの粘着成分の選定、地下水水位による水圧の計算を逐次行っている。ここで、内部摩擦角は、飽和度の変化によって変化しないと定義している。

上記の手法により、時々刻々と変化する斜面の安定性を評価することができる。以下に、計算手法について、室内土槽試験結果を用いた妥当性の検討と合わせて述べる。

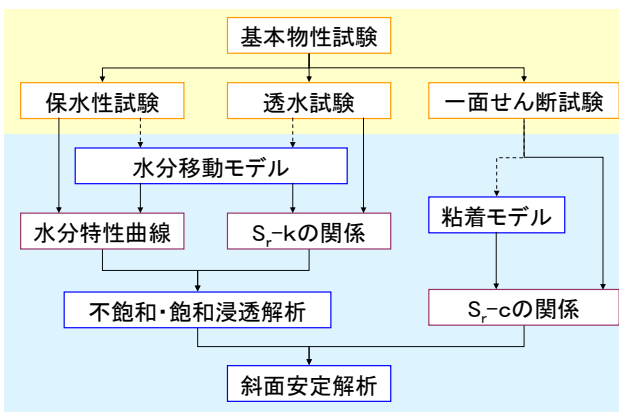


図-3.8 斜面安定評価フロー

#### (2) 室内土槽試験の概要

解析で用いたまさ土を用いた室内土槽試験の概要について述べる。試験では、図-3.9に示すような斜面勾配45°の1層モデルの盛土に時間雨量50mm/hourの注水を行っている。表-3.4に境界条件、初期条件および降雨条件について示す。背面と底面では非排水条件、法面では排水条件となっている。盛土初期条件としては、含水比5%、湿潤密度1.60g/cm<sup>3</sup>として形成している。図-3.9には、斜面形状のほかに計測機器の設置位置を示している。盛土内には、7個のテンシオメータが20cm~50cmの深さに設置されており、盛土内に生じる間隙水圧を計測している。設置深さを数種類設定することにより、浸透挙動をより正確に計測することができる。また、底面に間隙水圧計(株式会社共和電業:PGM-02KG)を設置して、地下水水位を確認するために間隙水圧を計測している。

試験時の浸透状況を写真-3.1~写真-3.4に示す。写真は、注水開始後、30分毎の浸潤面の位置を示している。盛土上端および斜面部より、注水されているため、浸潤面の形状も斜面の形状に沿った形になっていることがわかる。また、時間とともに、浸潤

表-3.4 試験条件

境界条件	上面	注水
	底面	非排水
	背面	非排水
	法面	注水
初期条件	含水比(%)	5
	設定湿潤密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.6
	斜面勾配(°)	45
降雨条件	時間雨量(mm/hour)	50
土槽モデル	1層モデル	

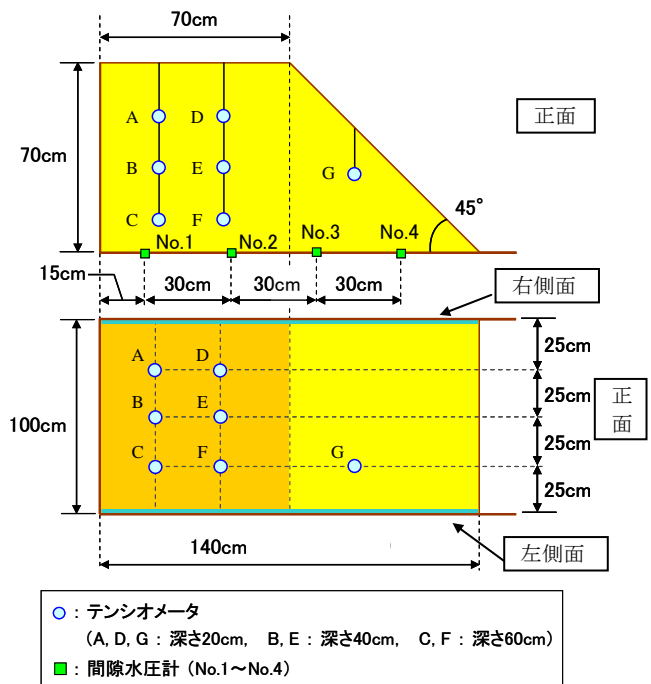


図-3.9 盛土形状・計測機器設置位置

面が下方に移動していることがわかる。

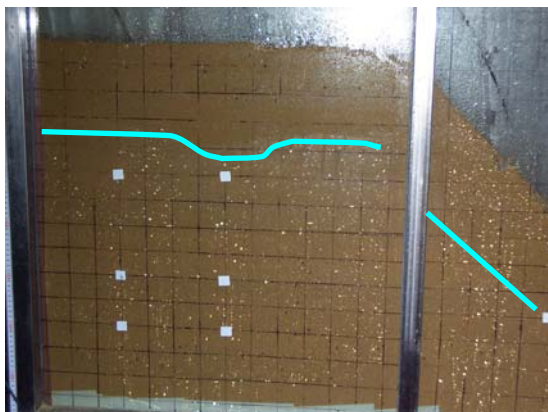


写真-3.1 浸透状況（注水 30 分後）

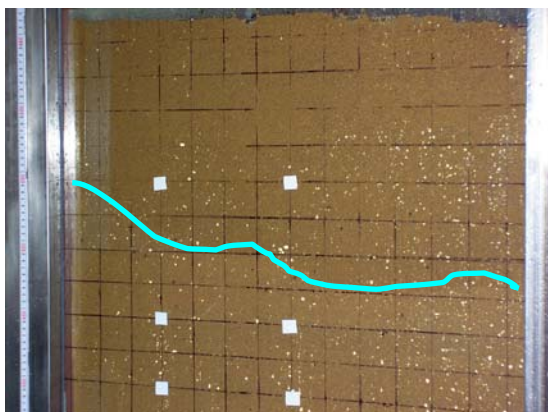


写真-3.2 浸透状況（注水 60 分後）

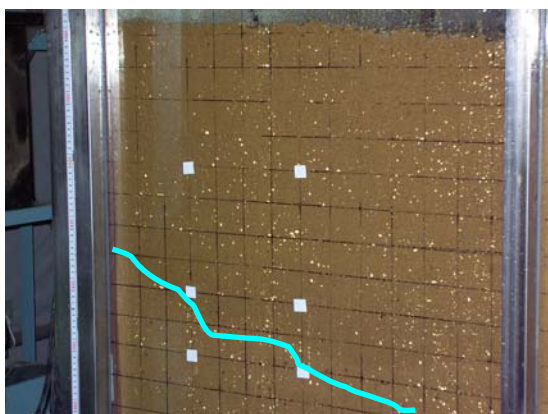


写真-3.3 浸透状況（注水 90 分後）



写真-3.4 浸透状況（注水 120 分後）

次に、試験時の崩壊状況について写真-3.5～写真



写真-3.5 崩壊状況（注水 32 分後）



写真-3.6 崩壊状況（注水 115 分後）



写真-3.7 崩壊状況（注水 147 分後）



写真-3.8 崩壊状況（注水 165 分後）

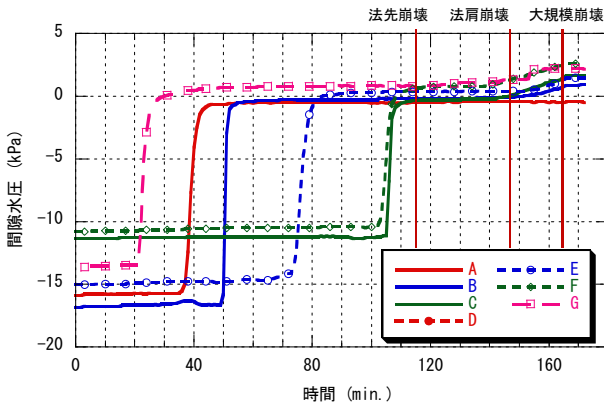


図-3.10 間隙水圧の時系列変化

-3.8 に示す。写真-3.5 は、注水 32 分後に斜面部のセンサー設置位置上部にひび割れが入っている状況を示している。次に、写真-3.6 では、注水 115 分後に法先から崩壊が生じていることがわかる。そこから少しずつ進行性破壊が生じ、注水 147 分後に法肩からの崩壊が生じた。また、165 分後には、斜面全体が大規模な崩壊を起こした。

図-3.10 に盛土内に設置したテンシオメータで計測された間隙水圧の時系列変化を示している。間隙水圧の挙動について説明を行う。間隙水圧は、雨水が浸透することにより、上昇し始める。図より、盛土表面に近いセンサーから順に間隙水圧の上昇が見られる。ここで、D (深さ 20cm) のデータは、センサー異常のため図中には示されていない。また、上昇した後、0kPa 付近で一定の値となり、深い位置のセンサー (C, F) が反応し、浸透水が底面に達し、地下水を形成し始めると深い位置のセンサーから順に間隙水圧が再上昇し始める (注水後約 147 分)。

以上のような浸透挙動と破壊状況との比較を行う。まず、深い部分のセンサーが反応した後に法先崩壊が生じている (注水後約 115 分)。その後、進行性破壊が生じていた。そして、落ちていていた間隙水圧が再上昇し始めた注水後約 147 分後に法肩からの崩壊が発生した。さらに、注水後約 165 分後には、法面全体の大規模崩壊が発生した。

この結果より、間隙水圧が反応し、一定値を取る時間に着目することで、避難警報の基準を提案することができるのではないかと考えられる。

### (3) 数値シミュレーション

図-3.8 に示した計算の流れに則り、斜面内の雨水の浸透挙動および斜面の安定性の定量的評価を行う。表-3.5 および図-3.11 に室内土質試験により求められた室内土槽試験に使用した試料 (信楽産まさ土) の土質パラメータを示す。

次に、水分移動モデルについてであるが、2次元不飽和・飽和浸透解析を行うに当たり、不飽和土の浸透特性 (水分特性曲線、飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係) を把握することが重要になる。水分特性曲線を求めるモデルとして、van Genuchten 式<sup>1)</sup>や Brooks&Corey 式<sup>2)</sup>などが良く使われる。また、不飽和透水係数を推定するためのモデルとして、

表-3.5 土質パラメータ

試料	まさ土
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.63
水の表面張力 (N/m) (水温15℃時)	73.48×10 <sup>-3</sup>
水の粘性係数 (Pa・s) (水温15℃時)	1.138×10 <sup>-3</sup>
間隙比	0.75
粒径加積曲線データ	15個
見掛けの粘着成分(kPa) (飽和度10.8%時)	5.63
内部摩擦角(deg.)	18.9

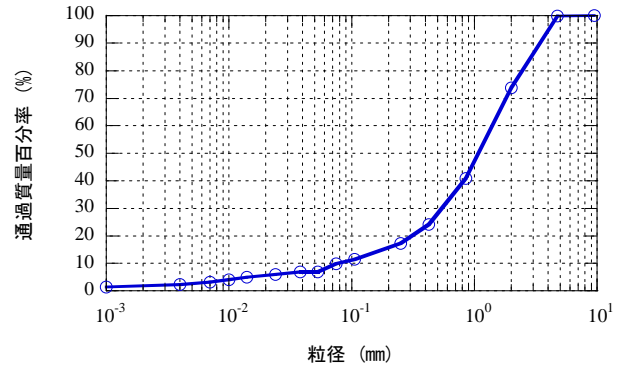


図-3.11 粒径加積曲線

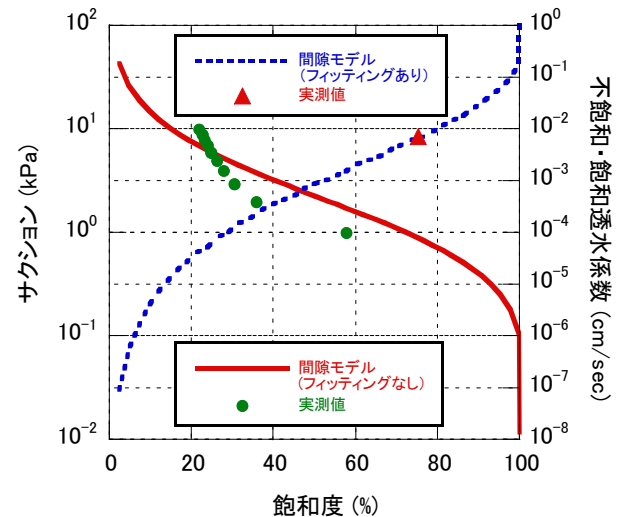


図-3.12 水分特性曲線および透水係数 (まさ土)

Burdine<sup>3)</sup>や Mualem<sup>4)</sup>モデルが用いられている。また、簡単な土質パラメータのみから水分特性曲線と不飽和透水係数を求めることのできる北村らによるモデル (以降、間隙モデルと称す) が提案されている<sup>5)</sup>。ここでは、間隙モデルを用いた解析を行った。

また、飽和度の変化に伴う見掛けの粘着成分の変化を計算するために粘着モデル<sup>6)</sup>を用いた。

図-3.12 に表-3.5 と図-3.11 のデータから間隙モデルを用いて得られた水分特性曲線および飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を示す。また、図中では、土質試験結果との比較を行っている。水分特性曲線については、良好な結果を得ていることがわかる。また、透水係数については、計算値が実測値よりも数オーダー大きくなったため、実測値とのフィッティングを行った<sup>7)</sup>。図-3.13 に粘着モデルから得

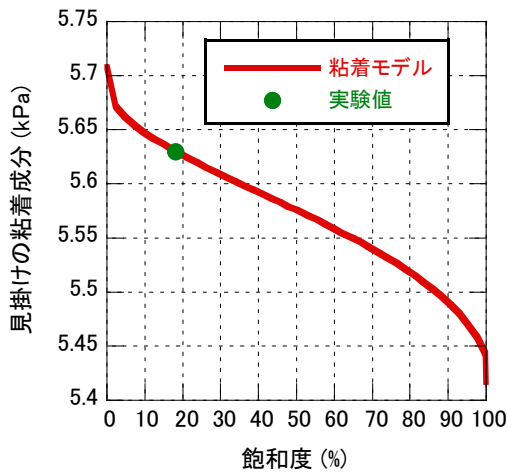


図-3.13 飽和度-見掛けの粘着成分関係

られた飽和度-見掛けの粘着成分の関係を示す。図より、飽和度が増加すると見掛けの粘着成分が減少していく様子が見られる。よって、降雨に伴い土中のサクションが低下（飽和度が増加）し、見掛けの粘着成分が減少する。一方で、すべり土塊の自重が浸透水により増加することにより、安全率が減少することが予想できる。

以上のデータを用いて、不飽和・飽和浸透解析および斜面安定解析を行う。図-3.14 に 2 次元不飽和浸透解析および安定解析を行う解析領域を示す。図中の丸印は、土中の負の間隙水圧を測定するための埋設型テンシオメータの設置位置を示している。また、図には、安定解析を行う領域が示されており、解析では、Janbu法を用いて領域内の最小安全率を求めている。

まず、浸透解析に用いる斜面内の圧力

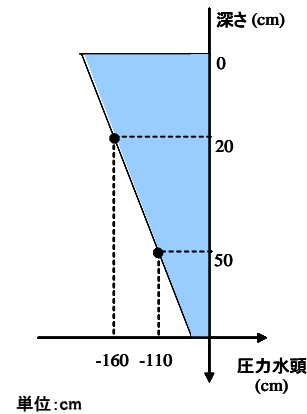


図-3.15 初期条件の設定

	(cm)							
	0	20	40	60	80	100	120	140
Slope side	Rainfall per hour (mm/hour)	66	58	32	32	32	26	18
		34	44	18	28	34	28	16
		56	48	24	28	34	36	40
		34	24	30	16	34	60	40
		20	34	28	22	26	46	48
Average rainfall (mm/hour)	42	41.6	26.4	25.2	32	39.2	32.4	
	Back side							

図-3.16 土槽内部の各エリアにおける時間雨量

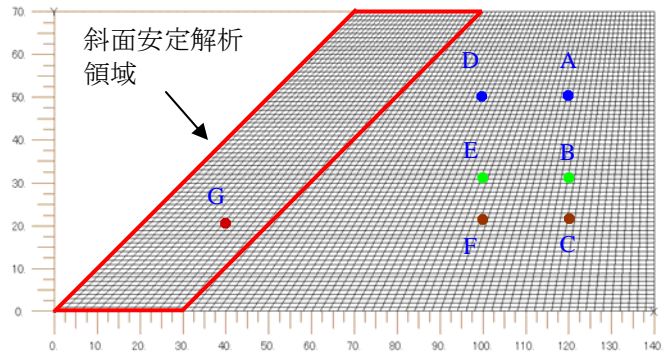


図-3.14 解析領域

水頭の初期値について検討した。本土槽試験は土槽作成から約 24 時間経過後に試験開始したため、初期水頭にばらつきが生じた。そこで、図-3.15 のように深さ 20cm と深さ 50cm における土壌水分計の計測データを用いて、深さ方向について線形に近似して初期水頭を与えた。次に、本土槽試験では、降雨装置で時間雨量 50mm/hour と設定して注水を行っていたが、土槽内部を図-3.16 のように分割して、それぞれのエリアに転倒ます型雨量計を設置して時間雨量を計測すると、時間雨量にばらつきがあることがわかった。図-3.16 に示すエリア内の数値は計測した時間雨量(mm/hour)である。不飽和・飽和浸透解析は 2 次元で行うため、X 方向のそれぞれの区間の平

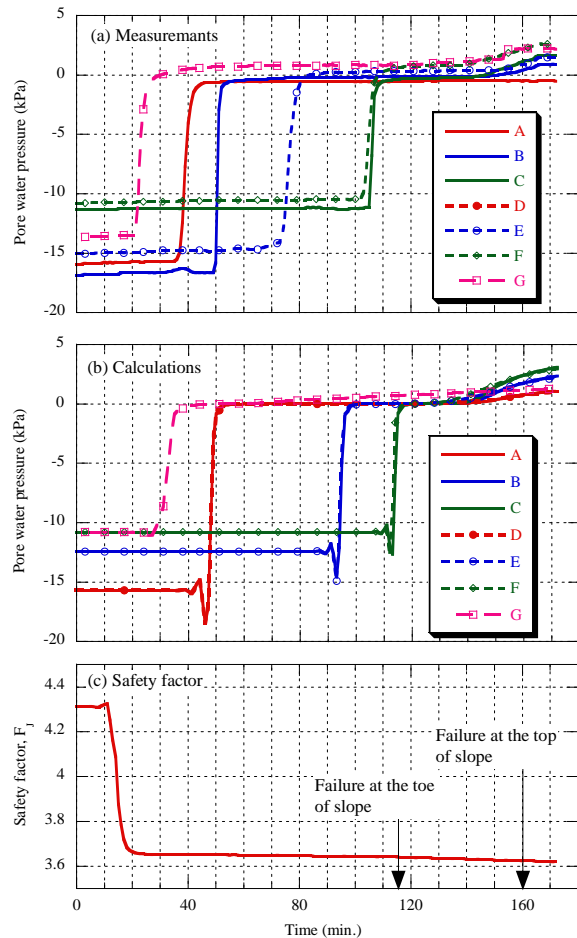


図-3.17 間隙水圧、安全率の時系列変化

均値を算出して、境界条件とした。

図-3.17 に室内土槽試験で計測された負の間隙水圧（サクション）の結果および数値解析から得られた間隙水圧および安全率の時系列変化を示している。

図より、間隙水圧の時系列変化の実験結果と計算結果を比べてみると、深さ 20cm 部分に当たる A においては、実験結果と計算結果が一致していることがわかる。深さ 40cm 部分に当たる B, E のデータにおいて、大きな相違が見られる。また、実験結果および計算結果では、間隙水圧上昇後、約 0kPa 付近で一定となり、しばらく経ったあと、再び上昇していく様子が見られている。

安全率の時系列変化においては、間隙水圧の上昇に伴い、安全率の低下が見られている。しかしながら、安全率の値が、非常に大きくなっている。これは、室内土質試験では土槽試験における応力レベルよりも大きい拘束圧力でせん断試験を行うことになり、せん断強度が過大評価されている可能性があることで安全率が大きくなると考えられる。また、室内土槽試験では、約 115 分ごろに法先崩壊が生じ、進行性の破壊を起こした。現状の安全率の計算では、進行性破壊についての計算ができないためこのような大きな安全率が得られたと考えられる。

今後、進行性破壊を表現できる安定解析手法および低拘束圧力下でのせん断試験を実施する必要がある。

## 参考文献

- 1) van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science of America Journal*. Vol. 44. No.5. pp.892-898.
- 2) Brooks, R. H. and Corey, A. T. : *Hydraulic Properties of Porous Media*, Hydrol. Pap. No.3, Colorado State Univ., Fort Collins, 1964.
- 3) Burdine, N. T. ; *Relative Permeability Calculations from Pore-size Distribution Data*, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, Vol.198, pp.71-77, 1953.
- 4) Mualem, Y. : *A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media*, *Water Resour: Res.*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 5) Kitamura, R., Fukuhara, S., Uemura, K., Kisanuki, j. and Seyama, M. 1998. A numerical model for seepage through unsaturated soil. *Soil and Foundations*. Vol.38. No.4. pp.261-265.
- 6) Sako, K., Kitamura, R., Yamada, M.: A consideration on effective cohesion of unsaturated sandy soil, *Proc. of The Fourth International conference on Micromechanics of Granular Media, Powders and Grains 2001*, pp.39-42, 2001.
- 7) Sako, K. and Kitamura, R.: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, *Soil and Foundations*, Vol.46, No.5, p.595-604, 2006.

# 第4章 センサーネットワークシステムおよびワイヤレスセンサーに関する検討

## 4.1 耐候性インテリジェントロガーに関する検討

### (1) 耐候性インテリジェントロガーの概要

図-4.1に本研究で提案する斜面防災システムの構成概要を示す。システムは現地に設置されるデータ収集システムと、屋内に設置されるデータ分析システムの二つのサブシステムに分けられる。屋外に設置されるデータ収集システムは、複数のワイヤレスセンサーネットワークと耐候性インテリジェントロガーから構成される。ワイヤレスセンサーネット

ワークは、センシング機能および無線通信機能を有する複数のワイヤレスセンサーノード（センサー+ワイヤレスノード）から構成されるネットワークである。ワイヤレスセンサーノードは演算処理装置、データおよびプログラムの記憶領域、バッテリーを持つ、自律的に動作可能な超小型コンピュータシステムであり、他のノードと協調動作を行うことにより効率的なデータ収集・配送を実現する。各ノードには複数個の外部センサーを接続することができる。観測を行う場合、観測対象地域に外部センサーを接続したセンサーノードを必要数設置することによ

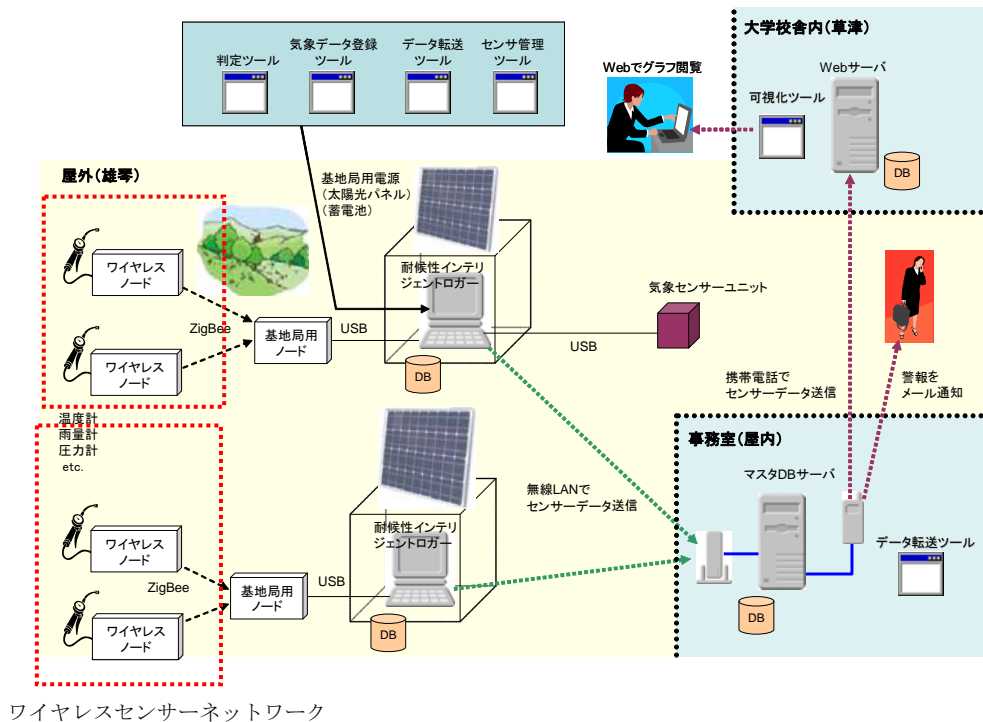


図-4.1 斜面防災システムの構成概要

て、一つのワイヤレスセンサーネットワークを構成する。観測されたデータは基地局まで配送する必要があるが、ワイヤレスセンサーノードと基地局間の距離が離れている場合、複数のノードを経由してバケツリレー式にデータを配送する（マルチホップ通信）ことが可能なため、設置の際には隣接するワイヤレスセンサーノードとの通信が可能であるかどうかのみを考慮すればよい。有線接続の場合に比べ、配線に伴う制約やコストが生じないため、より自由度の高いノードの配置が可能になる。ここで述べた基地局内に設置されているものがインテリジェントロガーである。

耐候性インテリジェントロガーは、1つのセンサーネットワークに対し1台設置され、対応するワイヤレスセンサーネットワークが収集したデータを保管する役割を担う、マイクロサーバと呼ばれる小型コンピュータシステムである。ワイヤレスセンサーノードと比較すると演算能力、記憶領域のサイズともに大きなものとなっており、システム全体の安定運用を実現するための様々な機能を持たせている。耐候性インテリジェントロガーは、ワイヤレスセンサーネットワークの末端の基地局用ノードとRS-232CもしくはUSBによって有線接続されており、ワイヤレスセンサーネットワーク内の各ノードから配送されてきたデータを基地局用ノードを経由して取得し、自身が持つ二次記憶装置上のデータベースに蓄積する。

また、耐候性インテリジェントロガーは、ワイヤレスセンサーネットワークを制御する機能を持ち、ワイヤレスセンサーネットワークに対してセンシングデータの収集方法を指定することができる。例えば、各ノードが持つ気温センサーのデータ収集間隔を10分に1回とするような指示が可能である。この指示はシステム稼働中に動的に変更することが可能であり、観測対象地域の状況に合わせてデータ収集間隔の変更指示を行うことができる。

さらに、ロガーは無線LAN機能による通信機能を持ち、マスタDBサーバへデータを転送することができる。また、複数のロガー間でのデータ転送および共有、さらに協調動作が可能になっている。ロガー間の通信ネットワークの構築にはP2Pと呼ばれる方式を採用しており、各ロガーの役割は同等になっている。これによって、一つのロガーが故障した場合でもシステム全体の動作が止まることを防いでいる。また、事前の設定作業無しにすぐに通信を開始することが可能であり、システム稼働中に新規にロガーを追加する場合も、システムを止めることなく拡張していくことができる。なお、今回の現地適用においては、ロガーの数が2台であり、ネットワーク規模が最小限の構成となっているため、P2Pネットワーク機能は利用していない。この機能は、ロガーからマスタDBサーバ間の距離が大きく、直接通信ができないような広範囲の観測を行う場合や、多数のロガーを一元的に管理したいような場合に有効である。

以上のように、耐候性インテリジェントロガーは、

ワイヤレスセンサーネットワークが収集したデータを保管、分析、転送する役割を担っている部分であり、マイクロサーバと呼ばれる小型コンピュータシステム内で判定ツール、気象データ登録ツール、データ転送ツール、センサー管理ツールなどによって、動作している。

インテリジェントロガー上で常時動作するソフトウェア群を以下に示す。④および⑤は気象センサーユニットに関連するソフトウェア群であるため、気象センサーユニットが接続されたインテリジェントロガー上でのみ動作する。

①PostgreSQL 8.0.0-rc1: インテリジェントロガー上にデータベース管理システムを構築する。

✓ データベーストリガ: センサーネットワークから取得した値（電圧値）を計測値に変換する。また、予め登録されたセンサーデータと判定結果をデータベースの送信テーブルにコピーする。

②MoteView 2.0F: センサーネットワークからセンサーデータを収集し、データベース内に書き込む。なお、このデータは電圧値である。

③判定ツール: データベースから間隙水圧データを読み出し、3.1節にて説明した斜面崩壊兆候検知アルゴリズムにしたがって分析し、判定結果をデータベースに書き込む。

④WeatherLink 5.8.0: 気象センサーユニットから送信された気象データを指定されたファイルに書き込む。

⑤気象データ登録ツール: WeatherLinkが気象データを書き込んだファイルを読み込み、ファイル内の各データをデータベースに書き込む。

⑥データ転送ツール: データベースの送信テーブル内のデータをマスタDBサーバに転送する。転送が成功したデータを送信テーブルから削除する。

## (2) 長期稼働を見据えた検証

ここでは、第2章2.3節で示した現地計測結果に基づいて耐候性インテリジェントロガーの長期稼働について検証を行う。そこで、長期稼働において必要な電源や耐候性について以下にまとめる。

### a) 電源について

本研究では、本来、基地局（耐候性インテリジェントロガーは、写真-4.1中のノートPC）は道路脇や近くの施設内に設置され、その電源は道路沿いの電線や施設から供給するものと計画されていた。今回の現地計測では、設置現場の都合により、耐候性インテリジェントロガーの電源は、太陽光パネルを用いて供給されており、当初の計画よりも厳しい条件での実験を行った。実験中には、太陽光パネルの充電力不足などで耐候性インテリジェントロガーが停止し、データが欠損してしまう事態が何度か生じた。本実験では、インテリジェントロガーの動作性の確認を行うためにロガーとしてノートPCを使用しているが、マイクロサーバなどのより省力化されたサー



バを用いることでこの問題はかなり改善されることが予想される。また、本来の計画の通り、道路沿いや施設に設置し、電源を安定的に供給することができれば、長期計測を行う際の電源の問題はほとんど無いものと考えられる。

#### b) 耐候性について

インテリジェントロガーの耐候性を高めるために、本研究では、耐候性BOX内にインテリジェントロガーを据え付けている（写真-4.1）。これまでに5年にわたる長期計測を実施してきたほかの現場では、耐候性BOXにロガーを据えて、冷却用ファンを取り付けており、何の問題も無く稼働している実績がある。

本現地観測システムは、2008年12月から本格的に稼働しているが、2009年3月上旬時点では、問題なく稼働していることが確認された。稼働中に確認された一つの懸念材料は、蟻などの昆虫類が機器の中に侵入してしまうことである。現在は、防虫剤などを設置する対策を採っており、不具合は生じていない。また、基地局内の温度であるが、観測機関が冬であったため、温度の大幅な上昇は見られず、機器類への影響は少なかった。夏期の場合は、冷却用ファンなどの設置が必要になる可能性がある。また、避雷対策であるが、現在は何も対策を取っていないが、今のところ落雷の被害は受けていない。

以上のことから、インテリジェントロガーの耐候性は、本研究で用いた機器類で十分に発揮されるものと考えられる。

## 4.2 構成再編可能型センサーネットワークシステムに関する検討

### (1) 構成再編可能型センサーネットワークシステムの概要



写真-4.1 基地局（耐候性インテリジェントロガー）

現地斜面において長期計測を行う場合、より詳細なデータを得るためにセンサーの設置箇所の移動、追加、削除などの必要が出てくる。有線による現地計測では、配線やロガーのチャンネル数を設置前に正確に設計する必要があり、設置後は、センサーの移動、追加などを行う場合、多くのコストがかかっている。そこで、本研究では、センサーの追加や削除を行う場合にセンサーノードを設置や撤去するだけでインテリジェントロガーがセンサーノードの追加や削除を認識し、自動的に設定できるようなシステムの開発を行うことを目的としている。

本研究において、平成18年度に試作されたインテリジェントロガーは、現在は市販センサーネットワークのセンサーノードを利用したものである。現状のロガーで収集されたデータは、コストと実現可能性の評価を第一に考えたため、市販センサーネットワークに特化されたデータ形式を持っている。これは、多くの計測情報を効率的に収集し、分析を行うためやセンサーの追加・削除を行った場合にも設定が容易になるようにするためにデータ表現の一元化が必要であるためである。

さまざまなセンサーから収集されたデータは、その値の表現方法が千差万別である。このようなデータを一律な形式で保存でき、また、システム運用後にセンサーが追加・削除されても分析サーバは改修しなくても済むように、分析サーバとして働く関係データベースのスキーマ（データ形式）は表-4.1に示されるようなものとした。このスキーマの基本は、収集時刻、変数名、サンプル値の組であり、サンプル値はすべて整数の値とスケールで表すこととした。

表-4.1 センサーログテーブル項目

項目名称	内容	列名	型	長さ(byte)
データ取得時刻		TIME	timestamp	8
チャンネルID	network(5)+node(3)+sensor(2)	CHANNEL_ID	char	256
値		VALUE	integer	4
スケール	値の小数点以下の桁数	VALUE_SCALE	integer	4
フラグ		FLAG	integer	4

表-4.2 テーブル内容

No.	日本語テーブル名	テーブル名称	備考
1	センサー種別マスタ	M_KBN_SENSOR	センサーの種別を名称や単位（℃，kPa等）毎に登録する。
2	チャンネルマスタ	M_CHANNEL	センサー毎にチャンネルに登録する。
3	ログ情報	T_LOG	各チャンネルの計測データを時刻毎に登録する。

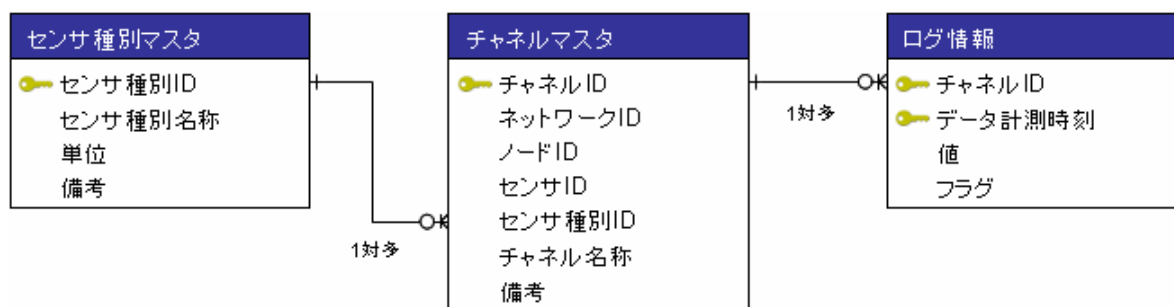


図-4.2 各テーブルの関連性

例えば、値n、スケールkの場合、実際の値は $n \times 10^{-k}$ となる。このようなデータ表現により、いかなるセンサーからのデータも同一形式で表現できるようになり、センサーが追加・削除されても分析サーバ全体を書き換える必要はない。また、値はすべて整数で表現されているため、複数のサンプル値から導出値を計算しても誤差が発生しない。このようなデータ表現を採用することは分析用サーバの性能の観点からは望ましくないが、本研究での分析用サーバの用途においては、データの挿入間隔は最短でも1分程度であり頻度は十分に低い。また、検索性能は挿入時に索引付けすることによって著しく改善できるため問題ないと判断している。

また、これまでに開発してきたセンサーネットワークシステムにおけるデータベースは、今後のセンサーネットワークとの接続とその規模の拡大を想定し、表-4.2のような3個のテーブルをもつ。

それぞれのテーブルの関連性は、以下のとおりである。ツール上でチャンネルの選択を容易にするため、各チャンネルを温度、水圧など、大まかにグループ分けするマスタテーブルとして「センサー種別マスタ」を定義した。このテーブルには、計測対象の種別（＝センサーのタイプ）毎の名称や表示する単位（℃，

kPa等）に登録する。チャンネルマスタのセンサー種別IDには、同じ種類のチャンネルであれば、同じIDに登録する。

また、「チャンネルマスタ」には、センサーネットワーク及び、ノードを特定するための「ネットワークID」「ノードID」という項目を設けた。これらのIDを用いることにより、将来的にシステム規模が拡大したときには“地域による絞込み”も可能となる。

## (2) 移動端末によるデータ収集

ロガー部の計算機は、最終的には小型・省電力のマイクロサーバ、無線LANによる通信機能、データベース機能を備えるシステムとして実現することを想定している（現在は主にノートPCを用いている）。このシステムを我々はP2P Data Potと呼んでいる。このシステムによって実現される機能の一つとして、移動体端末によるセンシングデータの収集機能がある。これは、ネットワークのインフラが存在しないような環境でセンシングを行っている際に、現地に設置されたロガー付近まで移動体端末を持っていくことで、無線通信によって自動的にデータを収集するものである（図-4.3）。

これによって、従来はロガーに内蔵されたフロッ

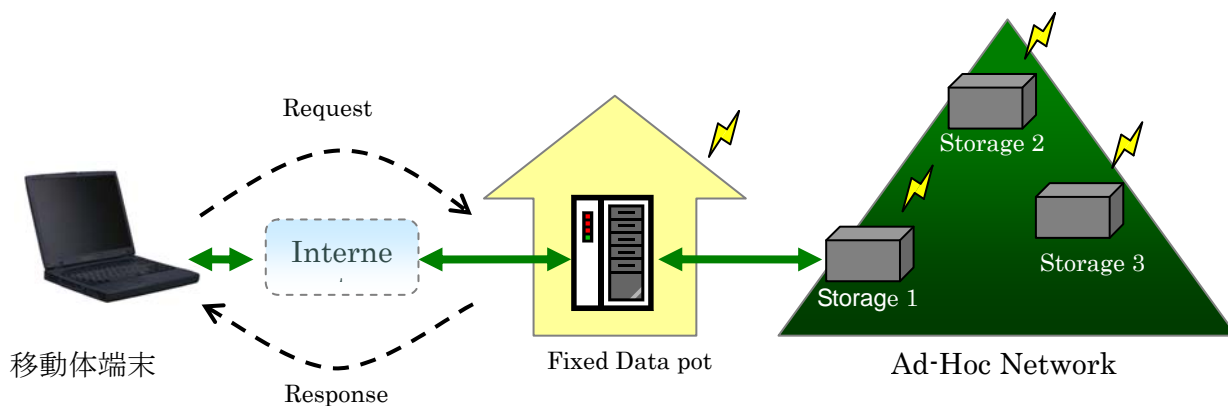


図-4.3 移動体端末によるセンシングデータの収集機能の概略図

ピーディスクなどを回収することによって行っていたデータ収集作業のコストを大幅に下げることが可能になる。また、インターネット環境にない地域によるデータ取得についても用いることができる。

このデータ収集システム (Mobile Data Collector) のプロトタイプシステムを開発し、実験によって自動データ収集が可能であることを確認した。

### 4.3 センサーノードの現地適用性の向上に関する検討

#### (1) 電源の長寿命化

本研究で使用している無線センサーノード (MPR2600J) および外部センサーは、アルカリ電池で作動している。これをリチウム電池に置き換えることで、4倍程度の長寿命化が見込めることを確認した。また、データ取得間隔を10分と考えており、計測・通信時のみ電源がONされるようなプログラムを無線センサーノードに書き込むことで、電源の省力化が見込める。さらに、長期無降雨時においてデータ取得間隔を延ばすプログラムを追加することで、電源の長寿命化が可能である (この場合、データ取得間隔の設定変更を降雨量データに基づいて変更する)。

過去に清水寺で行った現地計測において、リチウム電池4本でテンシオメータ5本、温度計3本、雨量計1台の電源を供給し、10分間隔で計測を行ったところ、1年以上電池交換を行わずに計測することができた。このことから、本システムでも、上記のような対策を行うことで1年間は電池の交換を行わずに済むと考えられる。今後、長期計測による更なる検証を予定している。

最終的には、無線センサーノードを現地計測に適用するために必要な最小限の電力を計算することによって、太陽電池を電源として採用でき、電源問題を解決できるのではないかと考えている。今回の実験で用いたテンシオメータの圧力センサー (コパル電子 PS7-102V) は必要な入力電圧は12Vと比較的高く、ワイヤレスセンサーノードの電源を直接使用し

た場合、ノードのバッテリー寿命が非常に短くなることが予想された。そのため、ノード用電源とは別に、圧力センサー用に専用の電源を用意する方針とした。この電源もセンサーノードと同様乾電池を用いるが、乾電池と圧力センサーを直結すると、常時電力を消費してしまい、単3乾電池8本 ( $1.5V \times 8 = 12V$ ) を用いた場合でも数時間程度のきわめて短い動作時間となってしまう。たとえばセンサーノードが10分に1回のセンシングを行う場合は、この動作タイミングに合わせ、10分に一度、センシングを行う短い期間だけ電力を供給すれば十分である。そこで、ノードのセンシング動作と協調して圧力センサー用電源のON/OFF制御を行うために、センサーノード用ソフトウェアおよび電源制御用ハードウェアの設計・開発・実装を行った。

センサーノード用ソフトウェアには、圧力センサー用電源のON/OFFを制御する機能の追加を行った。ベースとなるソフトウェアとして、クロスボー社が提供するセンサーネットワークシステム開発環境 MoteWorks 2.0Fに含まれるMDA300センサー基板用ソフトウェアを用いた。このソフトウェアに、センシング直前に電源ONを指示する信号を送信し、センシングを行った後、電源OFFを指示する信号を送信するためのプログラムを追加した。また、標準のMDA300用ソフトウェアは、多数の外部入力に対応していない。今回の実験では、1ノードあたり最大3本のテンシオメータを接続する。また、圧力センサー用電源の昇圧前・昇圧後の2種類の電圧をモニタリングし、電池の消耗状況を観測する必要がある。そのため、計5種類の外部入力に対応するようソフトウェアを変更した。MoteWorks 2.0Fを用いることで、PC向けデータ収集用ソフトウェアであるMoteView 2.0Fとの互換性が保たれるため、データ収集用ソフトウェアを改めて開発する必要がないという利点がある。

電源制御用ハードウェアは、圧力センサー用電池からの電圧をセンサーの駆動に必要な12Vまで昇圧する機能、およびセンサーノードからの電源ON/OFFの制御信号を受け取り、圧力センサーへの電力供給を制御する機能が中心的な機能となる。この二つの

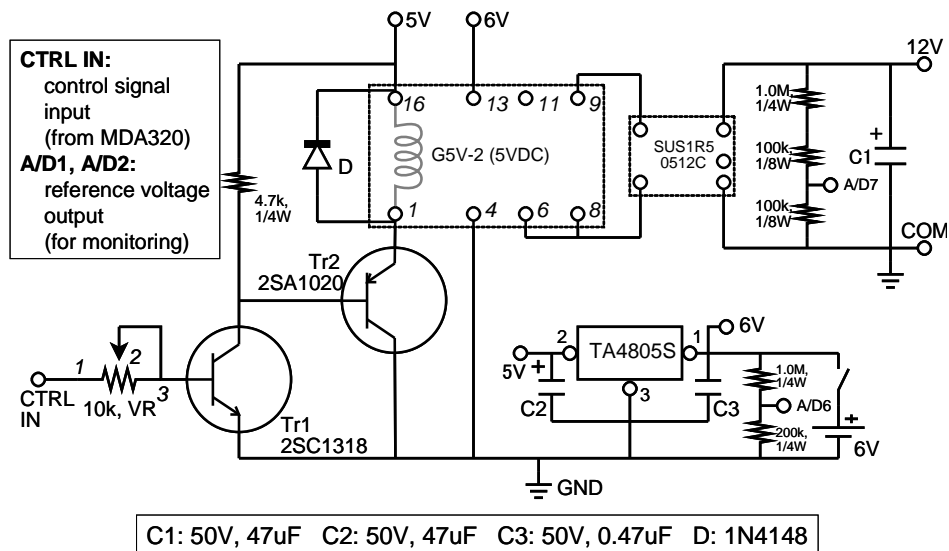


図-4.4 電源制御部分の回路図

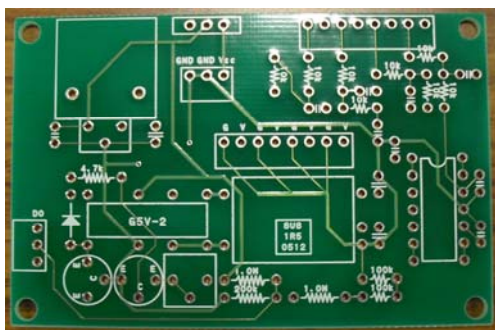


写真-4.2 電源制御基板

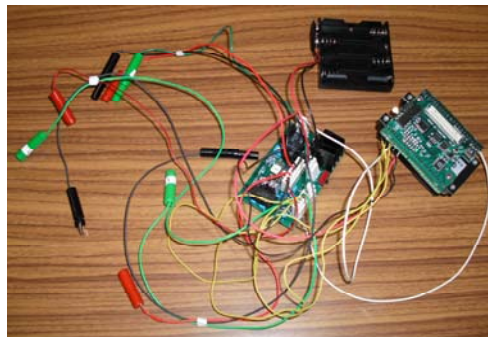


写真-4.3 電池ボックス・センサーノード・電源制御基板を接続した状況

機能に対応する回路を図-4.4に示す。使用する電池の本数を減らし、軽量化・省スペース化を計るため、使用する電源は単3乾電池4本とした。これにより入力電圧が6Vとなるため、DC-DCコンバータを用いて12Vに昇圧している。電力供給の制御にはリレーを用いている。このほかに、このハードウェアにはローパスフィルタを用いたノイズ除去回路を実装している。これは、圧力センサーから取得された値にノイズが含まれることが事前の実験において確認されたためである。圧力センサーからの出力は、直接センサーノードに入力せず、いったん電源制御基板上のノイズ除去回路を経由した上でセンサーノードに入力するよう配線している。

写真-4.2に、電源制御基板、写真-4.3に部品を実装した電源制御基板・電池ボックス・センサーノードを接続した状況を示す。写真-4.3における配線の末端部分を圧力センサーと接続することで、テンシオメータのセンシングデータが取得可能になる。

第4章4.1節で述べたハードウェアおよびソフトウェアを実際に現地で運用したところ、問題なく動作することが確認された。また、消費電力も低く抑えることができおり、電源制御機構の有効性が確認された。これまでのところ少なくとも40日程度は連続動作することが確認できている。今後さらに長期間にわたる動作検証を行い、電力の消費状況を調

査する予定である。

今回の実験において、ワイヤレスセンサーノードおよび圧力センサーのために用いた電池はいずれも単3型の乾電池である。通常はアルカリ電池を使うことが多いが、本実験ではアルカリ電池の3倍程度の寿命を持つ単3型リチウム電池を利用した。使用したワイヤレスセンサーノードは単3アルカリ電池を用いた場合に数ヶ月から半年程度の動作期間が見込まれるが、リチウム電池を用いることでこの3倍程度の動作期間が期待される。圧力センサー用電源についても、これと同程度の動作期間を実現することを目標としている。

この電源制御基板の有効性を以下のようにして確認した。まず、屋内実験で、電源制御ハードウェアにおいて、リチウム電池からの入力電圧(6V前後)から12Vへの昇圧のみを行い、電源のON/OFF制御を行わず常時給電状態として、電力の消費状況を確認した(図-4.5)。リチウム電池の電圧は、当初は6Vあたりを示し、その後、緩やかに下降していくが、5V前後から急激に下降し始め、DC-DCコンバータの最低入力電圧である4.5Vを過ぎた時点で圧力センサーへの電力供給が停止した。結果として、単3型リチウム電池4本を電源制御無しで用いた場合、1日程度で完全に消費することが確かめられた。次に、電源

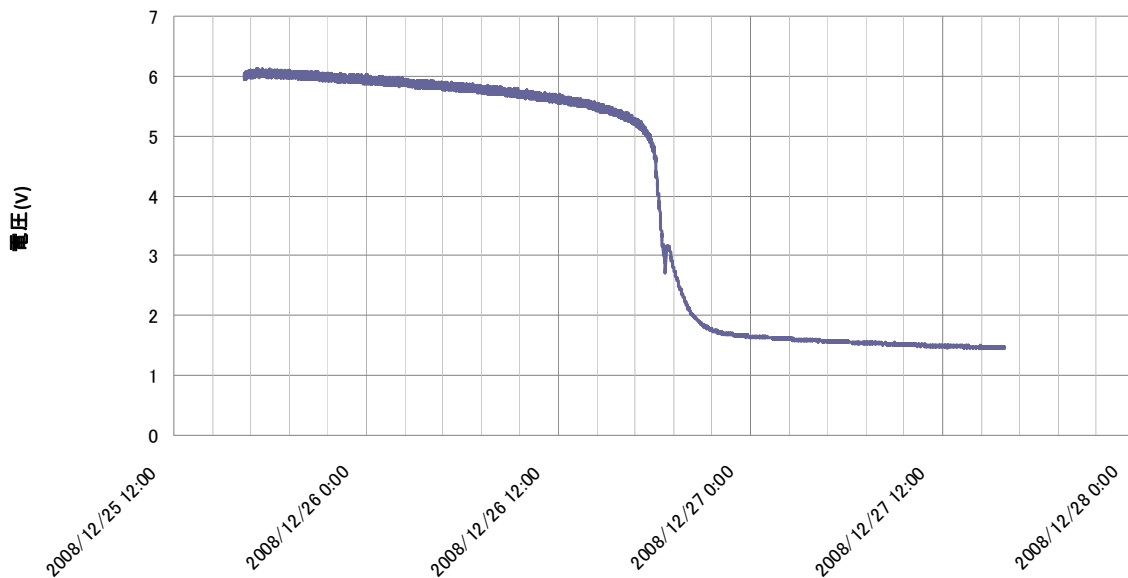


図-4.5 圧力センサー用電源の電圧変化（電源制御無し）

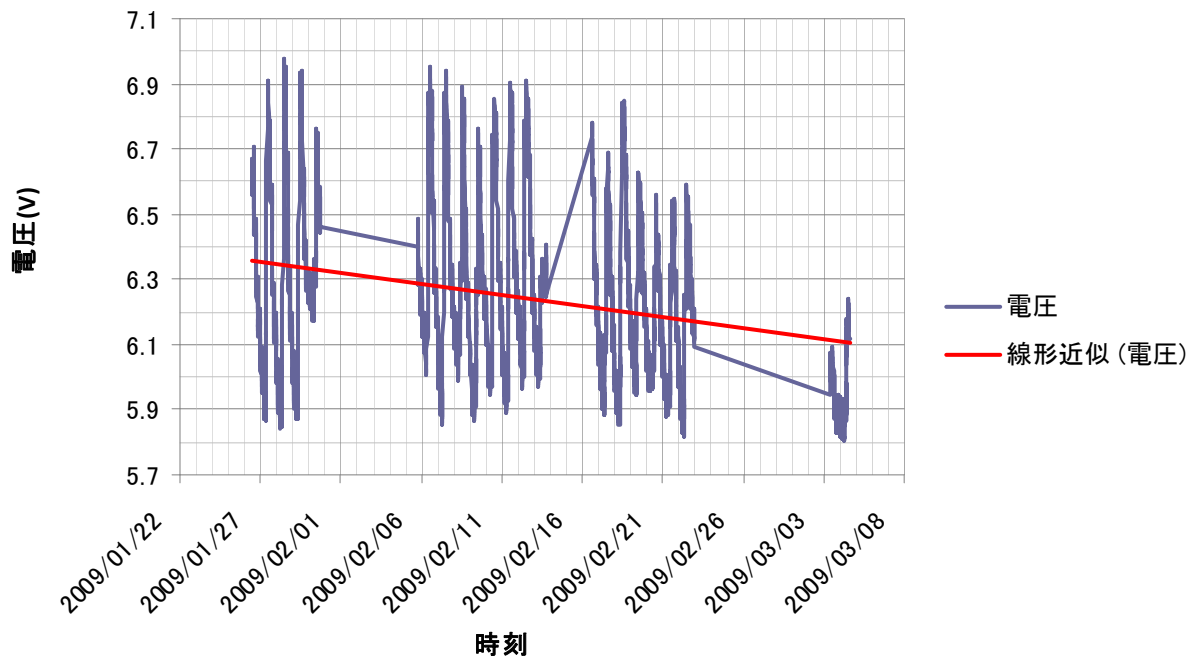


図-4.6 圧力センサー用電源の電圧変化（ノード ID 3458）

制御を有効にした場合における電圧変化を図-4.6に示す。これは、40日間程度屋外でテンシオメータによる観測を行ったワイヤレスセンサーノード12個のうちの一つ（ノードID 3458）の圧力センサー用電源の電圧変化である。図中に電圧が計測されていない期間が存在するが、これはロガー側の不具合によってデータが収集できなかった期間であり、センサーノード自体はこの間も稼働し続けている。リチウム電池の初期電圧は一般に1.5Vよりもいくらか高いことが多いため、4本直列接続した場合の初期電圧は6～7V程度になる。電圧の計測値には、ほぼ1日単位での周期的な振動が見られるが、これは、気温の低下にともなう圧力センサー用電池の電圧低下が一因

と考えられる。ここでは、得られた計測値の線形近似を行うことによって電圧変化の状況を把握することとする。図-4.6における電圧の線形近似によると、1日あたり約6.8mVの電圧低下が発生していることが分かった。電源制御を行った場合、少なくとも40日以上動作することは確かめられているため、電源制御を行わない場合に比べ、大幅な動作時間の長期化を実現していることは確かめられた。また、図-4.5より、5V程度まではほぼ線形に電圧が降下しており、その後急激に降下し始めることから、図-4.6における初期電圧を6.36V程度と見積もり、ここから5Vまではリチウム電池は線形に電圧が降下し、その直後に動作停止すると仮定した場合、200日程度は動作す

ることになる。これはあくまで概算であるため、実際にどの程度の期間稼動するかについては、今後の長期運用による実験で検証を行う必要があると考えている。

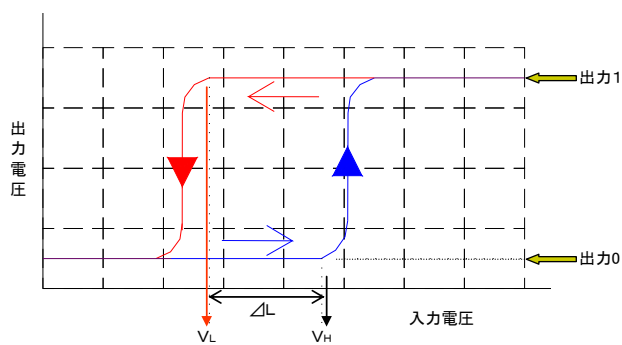
## (2) テンシオメータ自動給水装置の開発

テンシオメータは、土壌中の水分量を計測するために用いられるセンサーである。テンシオメータの正常動作のためには一定量以上の脱気水をセンサー内に確保しておく必要がある。特に夏場に水がセンサー内から抜け易いため、作業者が水の補給を行っているのが現状である。広域・多地点条件下でモニタリングシステムによる計測を行うためには、センサー数を増やす必要があるが、現状の人的な水補給手法を採用している限りその実現には限界がある。また、テンシオメータの設置場所はアクセスの容易でない場所も多く、テンシオメータへの自動注水システムの実現は、土中水分量のリモートモニタリング技術向上に重要な効果があると考えられる。

昨年度は、自動給水システムの実現に向けて二段階のステップを設定し研究を行った。第1段階は、写真-4.4に示すようなエネルギー源として電池などの電源を用いて、センサー（水位検知センサー）、アクチュエータ（電磁弁、もしくはポンプ）の駆動を行



写真-4.4 電磁弁を用いた注水システム概略図



$V_L$ : 入力電圧が減少するときの閾値  
 $V_H$ : 入力電圧が増加するときの閾値  
 $\Delta V$ :  $V_L$ と $V_H$ の差・ヒステリシスの幅

図-4.7 シュミット回路における入力電圧と出力電圧の関係

うシステムである。第2段階は、将来的にエネルギー源の使用を極力抑え、構造的に自動注入メカニズムを実現することに関する検討である。

第1段階の電磁弁を用いた注水システム（写真-4.4）を基にしたテンシオメータの自動給水装置の開発に取り組んだ。電磁弁を用いた注水システムは、計測タンク内の水量の減少を水位センサーが感知し、水位センサーの導通が切れ電磁弁が開放され、電磁弁が開放されると貯水タンク内の水が計測タンク内へ供給され、計測タンク内の水位が戻るという原理になっている。

そこで、テンシオメータの計測タンク内の水位が低下した際に電磁弁を開放し、タンク内に水が満たされたあと電磁弁を閉じるシステムをテンシオメータの圧力センサーによって計測される電圧変動によって制御する。制御には、シュミット回路という技術を用いる。シュミット回路とは、図-4.7に示すように入力電圧の増減に対して、出力電圧がヒステリシスを持つ回路のことであり、波形の整形および電圧レベル検出などに使用されるものである。よって、図-4.7に示すように、 $V_M$  ( $V_L$ と $V_H$ の中間値)と $\Delta V$  (ヒステリシスの幅)を設定することでそれぞれの閾値が設定される。

そこで、電磁弁開閉のための閾値設定に関する実験を行い、現地のメンテナンスにおける4段階の状態変化（具体的には、①大気開放時、②タンクに水を満たしたとき、③蓋の取り付け（バルブは開けたまま）、④蓋のバルブを閉じたとき）を想定してメンテナンス時にどのような電圧の挙動があるのかについて調べた。

ここでは、ポーラス部分を空中に露出した状態、豊浦標準砂（含水比2%）に埋めた場合、ベントナイト（自然含水状態）に埋めた場合の3つのケースについて行った（写真-4.5）。ベントナイトに差し込んだ状態のものは、高サクションが得られることから、短期間で脱気水が抜けていく過程を再現できるため、メンテナンス回数に対する閾値の安定性について検討した。表-4.3にベントナイトを使用したケースについての実験結果を示す。

表-4.3中のメンテナンス過程①～③は、上記の状態変化に対応する。また、最終的な計測の限界とは、脱気水がテンシオメータの圧力センサー受圧部以下



写真-4.5 試験状況

表-4.3 ベントナイト中のテンシオメータの電圧挙動 (単位: V)

		1回目	2回目	3回目
メンテナンス過程	①	1.072	1.061	1.065
	②	1.065	1.055	1.058
	③	1.062	1.050	1.054
最終的な計測の限界		1.926	1.774	1.780

になったことを示す。実験結果より、テンシオメータの値が1.7V程度になるとタンク内の脱気水が抜けること、脱気水を補給するためにテンシオメータの蓋を開け大気開放したときの値から約0.01V値が低下した場合に脱気水が満たされることがわかった。これらの値を用いて、電磁弁の開閉を行うことで、脱気水の自動供給が可能となる。現在、現地設置用の自動供給システム装置を開発中であり、今後、現地への設置を行い、検証を行う予定である。

### (3) 耐候性に関する検討

耐候性について、主に防水性および避雷性について検討を行ってきている。これらの耐候性の問題について、道路管理者やセンサー開発業者へのヒアリングを実施したところ、その対策について苦慮しており、技術的には可能であるが、コストがかかるといった意見が得られている。

そこで、清水寺で行っている長期現地斜面計測およびワイヤレスセンサーネットワークシステムの現地実験における経験に基づいて検討を行った。

まず、清水寺における現地計測において、テンシオメータ付属の圧力センサーは、2005年2月に降雪時(気温-3.2℃)の影響により2本故障したが、多点計測を開始しテンシオメータを17本設置してから、約2年間一度も圧力センサーの故障はない。テンシオメータ付属の圧力センサーは防水加工されていないが、塩ビ製のキャップをテンシオメータに被せるという工夫を行っている。雷による故障については、過去

に2度、データ集積部分(ロガー)がダメージを受けた。しかし、それ以外のセンサー部分の故障は確認されていない。今回の青森県の現場においてもロガー部分の雷による故障が報告されており、ロガー部分については避雷対策が必要であると考えられる。

また、ワイヤレスセンサーネットワークシステムの現地実験では、センサーノードを写真-4.6に示した防水・防塵BOX((株)タカチ電機工業社製)に入れ、1日野外に設置したが、機器に問題はなかった。防水・防塵BOXの保護等級は、IP65(粉塵が内部に侵入せず、いかなる方向からの水の直接噴流によっても有害な影響を受けない)を使用している。

以上のことから、本研究で提案するワイヤレスセンサーネットワークシステムでは、以下のような対策を講じることを検討している。

- ・テンシオメータには、従来の塩ビ製キャップを用いた防水を行う。
- ・センサーノードについては、防水・防塵BOXに入れる。また、通信の安定性向上も兼ねてノードを10~20cm程度地面から話して設置し、水没するような状況を作らない。
- ・避雷性については、コストや、無線ネットワークの利点として、一つのノードが故障しても、正常なノードを選択し、通信を続けることが可能であること等から、センサーノードには避雷対策は行わず、雷によって故障したら交換するものとする。ただし、基地局などの重要な箇所については、避雷対策を施す。

今回は(株)タカチ電機工業製のSPCM型防水・防塵ポリカーボネートボックス(サイズW125×D125×H100mm)を利用した。電源制御基板、電池ボックス、センサーノードをこのボックスにおさめた状況を写真-4.6に示す。これによって、十分な耐候性が実現され、雨天時の観測も可能となった。ただし、屋外環境は1日における温度の変化が大きいため、結露が発生するという問題がある(写真-4.7)。



写真-4.6 ハードウェアを耐候性ボックスに収めた状況

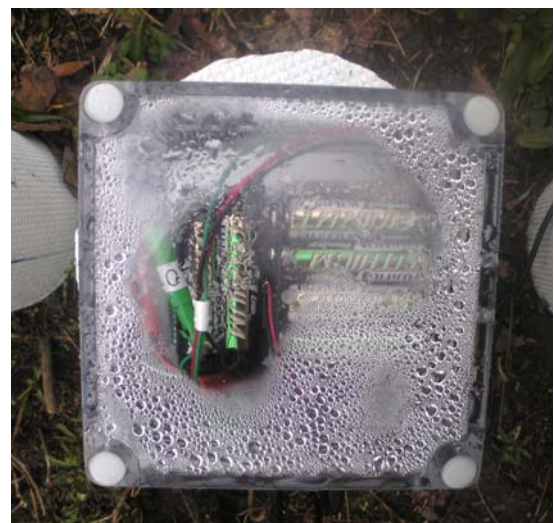


写真-4.7 防水ボックス内の結露

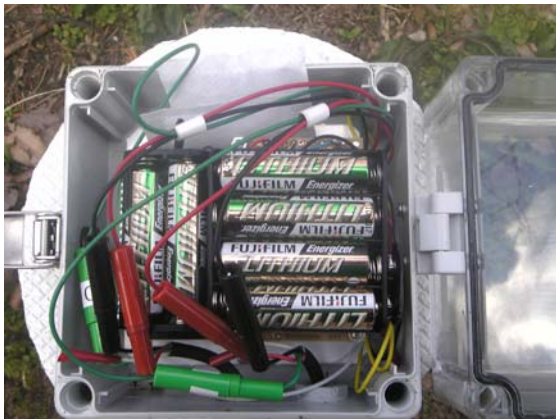


写真-4.8 除湿剤同封状況  
(ワイヤレスセンサーノード)

ボックス内部で結露が発生した場合、水滴が半導体部品部分に付着することにより、誤動作や故障が発生する可能性がある。今回の実験においては、除湿



写真-4.9 除湿剤同封状況  
(基地局用ノード)

剤をボックス内に同封することで対処（写真-4.8、写真-4.9）を行い、40日程度の期間、問題なく連続稼働することを確認した。



## 第5章 おわりに

本研究では、1) 低コストのモニタリングによる斜面防災対策の効率的な実施と運用（イニシャルコスト、ランニングコストの削減）、2) 急斜面など従来型防災設備の設置やメンテナンスが困難な場所への対策（運用の容易化）、3) センサー、通信システムの耐候性や避雷性の向上（システムの信頼性の向上）、4) 点的な計測から面的な計測による斜面状況の監視精度向上（網羅的監視）などを特徴とするワイヤレスネットワークシステムを利用した斜面防災システムを提案した。本研究は、平成18～20年度の3ヶ年にわたって、地盤工学、センシング技術、情報通信技術に関わる大学研究者および民間企業技術者が、その専門知識と経験を融合して設計・製作・評価してきた。

平成18年度は、想定している斜面防災システムの実現可能性の確認を主目的として研究を遂行した。まず、現地モニタリング結果と数値シミュレーション結果に基づいた斜面安定評価システムの基礎設計を行った。これらの斜面安定評価システムの技術面、運用面での実現可能性を検証するため、ヒアリングや文献調査などにより現行の防災システムおよびシステムを構成するセンサーおよびセンサーネットワークの現状と課題を明らかにした。さらに、既往のセンサーやロガーを用いて、想定するセンサーネットワークを構成し、その妥当性を検証した。合わせて、斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの開発に取り組んだ。

平成19年度は、平成18年度の成果を受けて、ワイヤレス化されたセンサーネットワークシステムの原位置での適用性を高め、さらに改善された機器・システムに基づいて、1つの斜面全体に設置されたセンサーネットワークからの情報を、比較的アクセスの容易な場所で集約・分析する装置・システムを開発することを目的として研究を行った。そこで、通信機能を有する既存のセンサーノードに接続されたセンサー、市販の機器に若干の改良を加えて作成したインテリジェントロガーを用いて、現地斜面にワイヤレスセンサーネットワークシステムを設置・運用

した。さらに、センサーの電源、メンテナンスや耐候性などの問題を解決するための工夫を施し、システムの信頼性の向上について検討した。また、提案したハードウェア（ワイヤレスセンサーシステムおよびインテリジェントロガー）とソフトウェア（斜面安定評価システムおよび斜面崩壊兆候検知アルゴリズム）の連携を試み、防災システムの構築によって現地斜面における試験的運用を実施し、防災システムの運用性などについて検討した。

平成20年度は、これまでの研究成果をもとに現地道路斜面を想定した広域・多点条件下における防災システムへの高度化を行うと共に、システムの試験運用、有効性を評価した。また、システムを構成する機器・システムの原位置での適用性をさらに高めることを目的として研究に取り組んだ。

本研究成果により、降雨時の表層すべり型崩壊に対する減災・防災に貢献できるシステムの提案が行えたものと考えられる。

以下に、本研究で得られた知見や成果品についての説明、それらの適用例（現地実験のまとめ）や今後の課題などについてまとめる。

### (1) 適用条件

本研究で提案している現地観測内容（テンシオメータによる間隙水圧の測定、降雨量など）および安定性評価手法は、降雨時の表層すべり型崩壊を対象としたものである。特に土砂系斜面における崩壊厚さが数十 cm～数 m の斜面崩壊を対象としている。

観測システムにおいて、耐候性インテリジェントロガーおよびマスタ DB サーバ部において電源を安定的に供給できることが望ましい。また、マスタ DB サーバ部分においては、光ファイバーまたは ADSL 通信ができるほうが望ましい。

### (2) 成果品およびその内容

#### a) ハードウェア

- ・ワイヤレスセンサーネットワークシステム  
地盤内の間隙水圧を計測するテンシオメータを

中心とした計測システムのワイヤレス化を図った。本研究では、Crossbow社のMoteを使用することにより、計測システムのワイヤレス化を実現し、現地実験へ導入した。また、センサーおよびワイヤレスノード部分の電源の省力化のため、センサー用電源制御用装置およびワイヤレスノード内のソフトウェア改良を実施した。現地実験では、リチウム電池を用いた10分ごとのデータ計測および通信の条件で、3ヶ月以上計測が可能であることを示した。

・ 耐候性インテリジェントロガー

耐候性インテリジェントロガーは、ワイヤレスセンサーネットワークシステムで計測されたデータの収集・転送および安定性評価のための分析を行う部分に分けられる。データ収集を行うためにCrossbow社のMoteViewを基礎としたデータ収集ソフトの改良および計測機器の追加・削除を行うための構成再編可能型センサーネットワークシステムの開発、データ送信のための転送ツールなどが開発された。また、データ分析を行うための斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの開発を行った。これらのソフトウェアをマイクロサーバ（ノートPC）に導入し、現地実験へ適用した。

現地実験により、電源が安定的に供給されることで長期稼動が可能であることが確認された。

・ 外部センサー用電源制御用装置

テンシオメータ用電池からの電圧をセンサーの駆動に必要な12Vまで昇圧する機能、およびセンサーノードからの電源ON/OFFの制御信号を受け取り、テンシオメータへの電力供給を制御する機能が中心的な機能となる。このほかに、圧力センサーから取得された値にノイズが含まれることが事前の実験において確認されたため、ローパスフィルタを用いたノイズ除去回路を実装した。現地実験および室内試験により、これらの機能の長期作動および有効性が実証された。

・ テンシオメータ自動供給システム

テンシオメータ内の脱気水の漏れに対するメンテナンスの負担を軽減するために、脱気水の自動供給システムの開発を行った。テンシオメータ内の脱気水の水位の変動時の圧力変化を基にしたシュミット回路による電磁弁開閉システムを試作した。現地実験では、テンシオメータの水漏れがほとんどなく有効性が確認できなかったため、室内実験を実施し、シュミット回路の稼働状況を確認した。また、脱気水が漏れにくくするため、先端部のポーラスカップのよりきめの細かいものを試作し、その有効性を確認した。

b) ソフトウェア

・ 斜面崩壊兆候検知アルゴリズム

センサーを無線通信でつなげたセンサーネットワークから得られる時系列データを複合的に評価するためにタイムチューブ理論を提案した。室内土槽試験および現地実験結果により、タイムチューブの幅や傾き、安定度評価式を設定し、センサーネットワークから得られた時系列データをもとに

斜面崩壊が発生する可能性を定量的に計算する手法を提案した。

・ 構成再編可能型センサーネットワークシステム

センサーの追加・削除を行うためのシステムの開発を行った。今回使用したワイヤレスノードの機能を使用しつつ、特にデータ管理ツール（ID番号、計測内容、データ取得時間など）の開発を実施した。現地実験、室内実験において、その操作性について検証した。

・ 計測データおよび分析データの可視化ツール

計測データおよび斜面崩壊兆候検知アルゴリズムにより分析されたデータの可視化ツールを作成した。また、斜面の危険度が高まった場合には、携帯電話などへ警報が送られるシステムなどが開発された。これらのツールは、現地実験へ適用され、その可動性および操作性について検討した。

c) その他

・ 耐候性について

耐候性について、主に防水性および避雷性について検討した。過去の現地計測およびヒアリング結果を基に、避雷対策はインテリジェントロガー部分についてのみ実施することが効果的であることがわかった。また、防塵・防水BOXに機器類を入れることで降雨時でも通常通り稼動することが確認された。

(3) 適用例

次に、開発された成果品の現地適用例を以下に示す。

a) 現地実験の概要

場所：国道161号湖西道路「雄琴管理基地」内 斜面



図-5.1 現地実験場所の状況

機器設置の目的：

より現場に近い環境での無線センサーノードの耐候性・電源・メンテナンス・安定性および通信の確実性に関する検討や問題点の抽出

b) 計測システムの概要

(システムの全体像)

斜面を左右方向で二つに分割し、それぞれ一つの

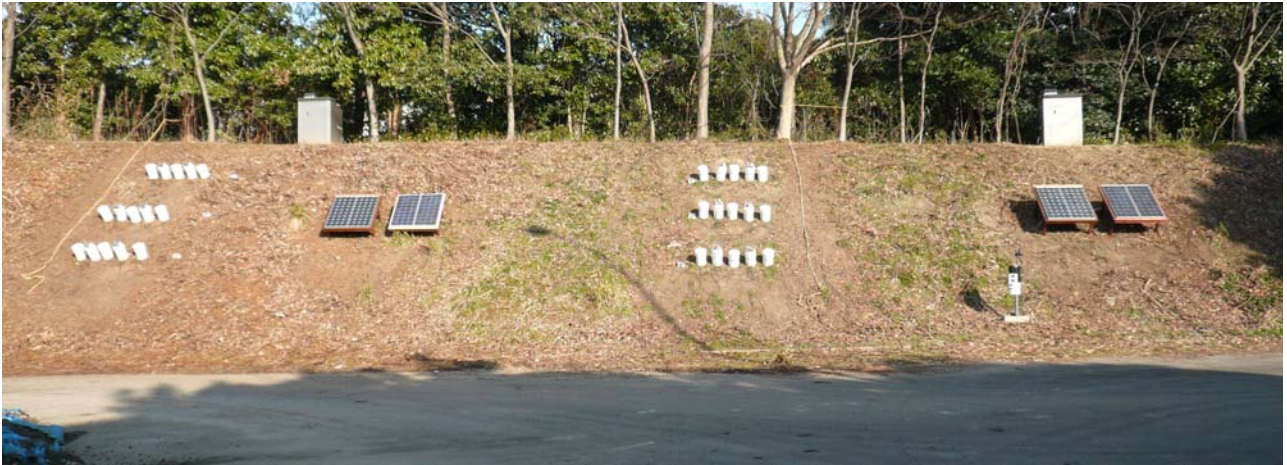


写真-5.1 現地観測システム設置状況

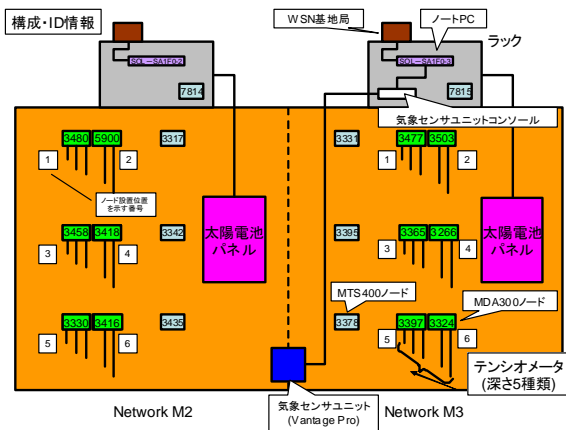


図-5.2 計測システム部の概要

センサーネットワークを構築した。

テンシオメータは1斜面につき6カ所の計測地点に設置される。1計測地点につき5種類の深さ(20, 40, 60, 80, 100cm)を計測するため、5本のテンシオメータを設置した。テンシオメータを接続するセンサー基板として、MDA300を用いる。テンシオメータ用センサーノードは最大4個のテンシオメータを接続することを想定してハードウェアまわりを設計したため、今回は1計測地点に2ノードを設置し、それぞれテンシオメータを3本・2本接続した。テンシオメータは左から0, 40, 60, 80, 100cmの順に5本並んでいるが、左側3本を1つのノードに、右側2本をもう1つのノードに接続した。

したがって、テンシオメータ用センサーノード1つのセンサーネットワークにつき6ノード、計12ノード設置した。

このほか、MTS400基板を接続したノードを1斜面につき4ノード設置する。うち3つは斜面に設置し、1つはラック内に設置してラック内温度の観測に利用する。したがってMTS400基板を接続したノードは計8ノード設置することになる。このほかラック内で太陽電池パネルや充電電池の電圧を計測したいという要求もあるが、実現方法については今後検討する。

また、雨量計・風速計などを持つ、専用の気象センサーユニット(Vantage Pro)を1台設置する。これは



写真-5.2 テンシオメータ設置状況



写真-5.3 センサーノード (MDA300 ノード : 3324)



写真-5.4 PCラック (Network M3)



写真-5.5 WSN 基地局 (Network M3)



写真-5.6 PCラック内部 (Network M3)



写真-5.7 気象ユニット

センサーネットワークとは独立のシステムである。このシステムを右側ラック内のノートPCに接続し、センサーネットワークからのデータと同様にPostgreSQLデータベース上に記録する。

#### (基地局の電源について)

基地局の電源は、太陽光発電より供給する。無日照でも5日間動作することができるように蓄電池の容量および充電に必要な太陽電池発電容量を以下の計算により求めた。

#### ① 負荷計算

- ・ PC : 30W + その他制御電源 : 10W = 40W
- ・ 負荷利用率を60%として :  $40\text{W} \times 24\text{時間} \times 60\% = 576\text{wh}$

#### ② 負荷電流の計算

- ・  $40\text{W} \div (100\text{V} \times 75\%) = 0.53\text{A} \approx 0.6\text{A}$
- ・ \* 75%はインバータの変換効率

#### ③ 蓄電池の必要容量

- ・ 5日間動作に必要な電流容量 :  $0.6\text{A} \times 24\text{時間} \times 5\text{日 (無日照)} \times 1.1\text{ (安全率)} = 79.2\text{Ah}$
- ・ 電池の容量 :  $79.2\text{Ah} \div \text{放電深度 (50\%)} \div \text{充放電効率 (80\%)} = 198\text{Ah}$

#### ④ 太陽電池発電容量計算

- ・ 1日の必要電流量 :  $0.6\text{A} \times 24\text{時間} \times 1.1\text{ (安全率)} = 15.84\text{Ah}$
- ・ 発電容量 :  $15.84\text{Ah} \div (3.5\text{h (平均日照時間)} \times 80\% \text{ (冬の場合)} \times 95\% \text{ (太陽電池劣化考慮)}) = 5.95\text{A}$
- ・ 必要発電容量 :  $5.95\text{A} \times 12\text{V} = 71.4\text{Wh}$

#### ⑤ 結論

蓄電池は、約200Ah必要なため、108Ahのタイプを2個使用。  
太陽電池のパネルは、110Wタイプを使用。

実際に、現地において実験を行った結果、上記条件では、冬季は消費量よりも発電量が少ないため、十分に充電できていないことがわかった。そのため、太陽電池パネル110Wタイプを各センサーネットワークに2枚ずつ設置することにした。



写真-5.8 太陽光発電装置



写真-5.9 蓄電池

#### (計測データ)

計測データの一例として、間隙水圧データ (Network M3) を示す。

図-5.3に間隙水圧の時系列変化を示す。降雨が少なかったため、設置後間隙水圧は減少している。また、冬期のため、蒸発量が少なく、間隙水圧の減少が緩やかに生じている。無線通信に関しても、全てのセンサーノードからデータが基地局へ届いていることがわかる。しかし、ID3397のデータがばらついていて、これは、テンシオメータとワイヤレスノードを接続する部分のはんだ付けが不十分であった

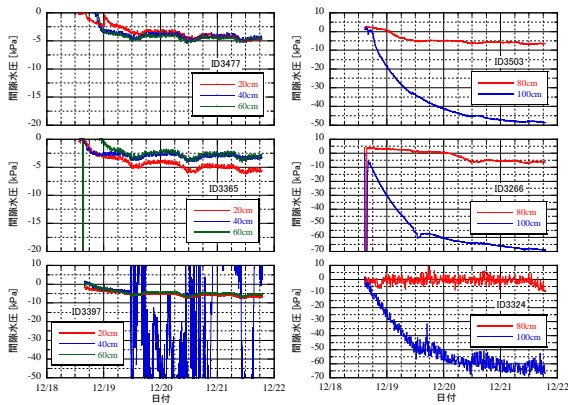


図-5.3 間隙水圧の時系列変化 (2008年1月)

めであった。

(データ分析・集約システムの概要)

計測システムにより観測されるセンサーデータは、データ分析・集約システムを介して斜面崩壊情報として公開される。データ分析・集約システムは図-5.4の通りである。本システムの主な機能は以下4つである。

① 斜面崩壊予測のためにセンサーデータを分析する機能

計測システムの各ワイヤレスセンサーネットワーク M2, M3 における基地局ノート PC 上で動作し、該当するワイヤレスセンサーネットワークのセンサーデータが斜面崩壊の兆候を示すか否かを判定する機能である。センサーデータと判定結果は基地局ノート PC のデータベース内に保持される。

② センサーデータと分析結果、警報をワイヤレスセンサーネットワークの基地局 PC → マスタ DB サーバ → Web サーバへ転送する機能

まず基地局ノート PC 上のセンサーデータと判定結果を現地に設置されたマスタ DB サーバのデータベースに集約する。これは基地局ノート PC 上で10分に1回の間隔 (この間隔は調整可能) で動作するデータ転送アプリケーションにより実現される。また、マスタ DB サーバ上で10分に1回の間隔 (この間隔は調整可能) で動作するデータ転送アプリケーションは、基地局ノート PC より転送されたセンサーデータと判定結果を Web サーバのデータベースに転送する。基地局 PC - マスタ DB サーバ間は無線 LAN で接続される。マスタ DB サーバは Web サーバへのデータ転送時のみ携帯電話網を用いてインターネットに接続し、インターネットに常時接続している Web サーバに各データを送信する。データの公開は Web サーバ上で行われ、マスタ DB サーバと基地局 PC は関与しない。これは斜面防災システムが設置される環境によって、常時接続のインターネット網完備が保証されないケースを想定しているためである。

③ 斜面崩壊が予測される場合に警報を通知する

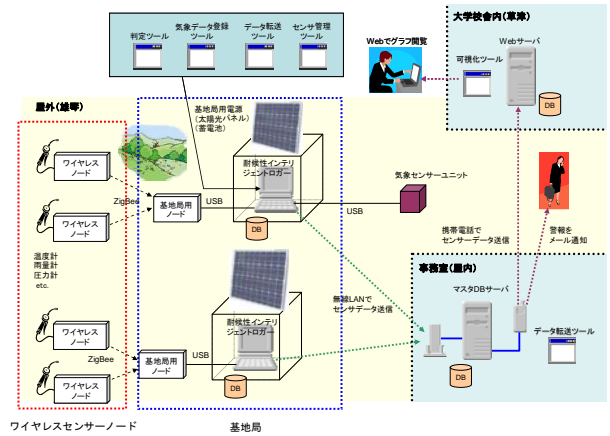


図-5.4 データ分析・集約システム

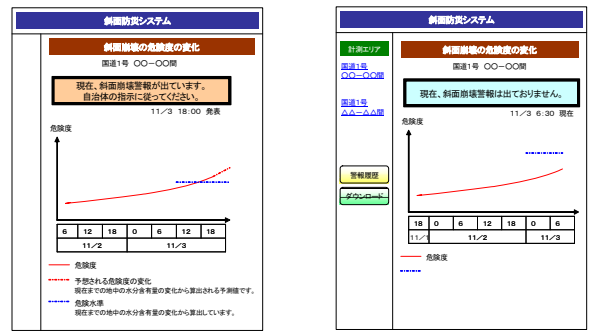


図-5.5 分析結果・警報を可視化する Web ページのイメージ

機能

マスタ DB サーバ上に実装される。基地局ノート PC より受信した判定結果が斜面崩壊の兆候を示す場合、予め指定されたアドレスに斜面崩壊警報メールを送信する。また、この警報データは②の機能により Web サーバに送信される。

④ センサーデータと分析結果を Web サーバ上で可視化する機能

斜面崩壊情報を公開するために判定結果と斜面崩壊警報を可視化する機能と、システム管理者による警告発令時のデータ確認を可能にするセンサーデータダウンロード機能よりなる。この機能は Web アプリケーションとして実装される。Web サーバは受信した最近の判定結果をグラフ化して描画し、発令中・解除直後の斜面崩壊警報を表示する図-5.5のような Web ページを生成する。グラフ生成時、通信切断等によるデータ欠損は補完される。このページは Web 上に公開され誰でも閲覧できる。一方、Web サーバはユーザ認証を行いシステムの管理者によるセンサーデータのダウンロードを可能にする Web ページも提供する。

(危険時のシステム動作)

機能①により斜面崩壊の兆候が予測される場合、マスタ DB サーバのデータベースに斜面崩壊が予測

されることを示すデータが書き込まれる。マスタ DB サーバは機能③により、予め定められた一つ以上のアドレスに警報メールを配信する。機能②により、警報データは Web サーバに転送される。Web サーバは機能④により、警報に関する情報を明示した Web ページを生成する。また、ユーザ認証ページにおいて、警報発令時付近のセンサーデータ、判定結果をダウンロードするための Web ページも生成する。以上により斜面崩壊兆候の通知・公開が可能になる。警報が解除された場合、Web ページ上には解除された旨が明示される。

#### (4) 今後の課題

現地実験に基づく今後の課題について以下に示す。

##### (計測内容における課題)

1. ワイヤレスノードの電源電圧の変動がテンシオメータ計測値に与える影響を検討する必要がある。これまでにワイヤレスノードの電源電圧が低下すると、テンシオメータの出力値が基地局に転送される間に変動していくことがあった。この影響について考慮していく必要がある。
2. 複数の地点で、間隙水圧の値が異常と考えられるデータが合った。これらは、センサーとワイヤレスノードの接続不良が原因のひとつと考えられる。また、テンシオメータの一部に密閉が不十分な箇所があり、水漏れがあった。
3. 気象センサーユニットのケーブルが動物に噛みちぎられていた。保護管を巻くことによって対策を取った。また、テンシオメータに被せてある断熱キャップも動物に倒されていたため、固定具を取り付けた。
4. 気象センサーユニットのデータなどに関して、機器の校正が必要である。
5. 地盤調査および土質試験を行い、間隙水圧の値および変化傾向が妥当か確認する必要がある。

##### (ワイヤレスセンサーネットワーク関連の課題)

一般にセンサーネットワークでは、複数のノードを経由するマルチホップ通信を用いることによってノード単体での通信可能距離を超えた広範囲に渡る観測を可能にしている。しかし、マルチホップ通信を用いると、ノード数が増えた場合に基地局近辺のノードの通信量が多くなる可能性がある。このとき、次の2種類の課題を検討する必要がある。

1. 輻輳の発生によるデータの取りこぼし  
無線通信における時間あたりのデータ転送量には限界があるため、基地局付近のノードが多数のノードからのデータの中継する必要がある場合、データの取りこぼしが発生する可能性がある。これを基地局から見た場合、あるノードからのデータがあらかじめ定められた時間間隔で届かない状況が発生したことになる。輻輳の発生の有無はノード数、センシング間隔および

ノードの配置方法によって決まると考えられる。今回の現地計測では問題は発生しなかったが、今後様々な異なる環境での観測を行う場合に備え、輻輳の発生条件の具体的な検討を行うことが望ましいと考えられる。

2. 通信量の増加にともなうノードの消費電力の増加

センサーノードは主に乾電池等のバッテリーによって動作する。一方、センサーノードはメンテナンスのコストを抑えるため、できるだけ長期にわたって動作することが求められる。そのため、ノードの省電力化は重要な課題の一つとなっている。センサーノードにおいて通信は大きな電力を消費する動作であるため、できるだけ通信量を抑える必要がある。基地局付近のノードは必然的に通信量が増加するため、他のノードに比べ電力消費が激しくなる可能性がある。輻輳の発生条件の場合と同様、ノード数、センシング間隔およびノードの配置方法と基地局付近のノードの電力消費の関連について、検討を行うことが望ましい。

さらに、複数のセンサーネットワークを同時に使用することによって観測可能範囲を拡大することも今回の実験の目的の一つであったが、このときの課題として、異なるネットワーク間での通信の干渉が挙げられる。各ネットワークの通信データは異なるネットワーク ID を用いて識別されるため、データの混信などは発生しないが、同じ周波数を用いて通信を行うと、ノードのアンテナが他のネットワークの通信も受信してしまい、通信効率が悪化する可能性がある。そこで、本実験ではネットワークごとに ID だけではなく通信に用いる周波数も異なるものを割り当てることにより、通信効率の低下を防いだ。具体的には、二つのネットワークのうち片方に 2405MHz、もう片方に 2475MHz を割り当てることによって対処を行った。多数のネットワークを同時に稼働させる場合は、安定性の向上のため、このように隣接するネットワークが異なる周波数を用いるよう設定することが重要である。

##### (データ収集・分析ソフトウェア関連の課題)

データ収集・分析ソフトウェアに関する動作に関して検証する。本ソフトウェア群の主たる動作は以下に分類される。

(動作1) センサーデータを分析して判定結果を計算する。

(動作2) 各種データをインテリジェントロガーから Web サーバまで送信する。

(動作3) 判定結果を通知および公開する。

今回構築した斜面防災システムは、センサーネットワークが2つ、1ネットワークあたりの計測地点が3箇所という比較的小規模なセンサーネットワーク群を扱っているが、より大規模なネットワークを扱う際に問題となりうる動作事例がいくつか見られ

た。適切な対処機能を実装することにより、本システムの有用性を高められるといえる。以下に、必要な対処機能を該当する動作事例とともに示す。

(動作1) センサーノードの通信停止を検出し可視化する機能

現地での斜面防災システム運用中、ある時点以降特定のセンサーノードからの基地局へのデータ送信が停止する状況が数度発生したことから、本システムを今後長期運用するに当たって、同様の状況が発生することが充分考えられる。通信停止の原因はハードウェアの問題、電池切れなど様々であるが、いずれの場合も現地での確認が必要である。

(動作2) データ転送ツール(マスタDBサーバ)における未送信データ件数の発散の検出機能

現地斜面防災システムの構築初期、Webサーバへ

のデータ転送が停止したように見える不具合が見られた。この原因は、データ転送速度が小さいためにデータベースの送信テーブル内にある未送信データ件数が発散し、センサーデータ取得からWebサーバへのデータ到着までの遅延時間が増加したことであった。この不具合はデータ転送ツール上でダイヤルアップモデムのデータ送信速度を大きくすることで解消された。しかしながらこの事例から、不具合対策として未送信データ件数の発散を検出する必要があるといえる。また、マスタDBサーバからWebサーバへのデータ転送速度が小さい場合にも未送信データ件数の発散は発生するため、調整が必要となる。大規模センサーネットワークの運用において生じる、不適切なデータ送信頻度調整を回避するため、送信テーブル内のデータ数の変化を監視し、未送信データ件数の発散を検知する機能が必要といえる。

# 付録

## I. 計測データの結果および考察

図-付1に現地に設置した観測システム部分の概要図を示す。MDA300ノードでは、テンシオメータ (20, 40, 60, 80, 100cm深さ) を計測しており、MTS400ノードでは、温度、相対湿度、気圧、照度、2軸加速度を計測している。また、気象センサーユニットでは、気温、相対湿度、降水量、気圧、日射量、風速などを計測している。以下に、2008年12月から2009年3月までのデータを示す。

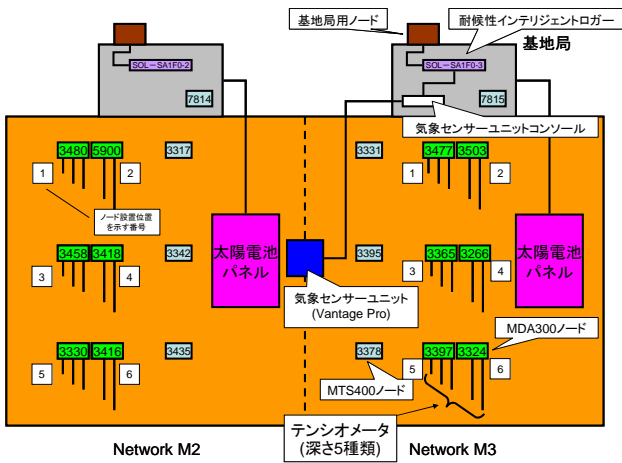


図-付1 観測システム概要図

### a. 2008年12月

図-付2は、気象センサーユニットの2008年12月のデータである。気象ユニットは、12月14日に設置され、計測を開始した。気温、相対湿度は、一般的な傾向を示していることがわかる。12月17日の正午ごろの相対湿度を見ると、他の日より高いことがわかる。これは、早朝に雨が降ったためと考えられる。また、日射量も他の日より低いことから、曇りであったことがわかる。降雨は、3日のみで少

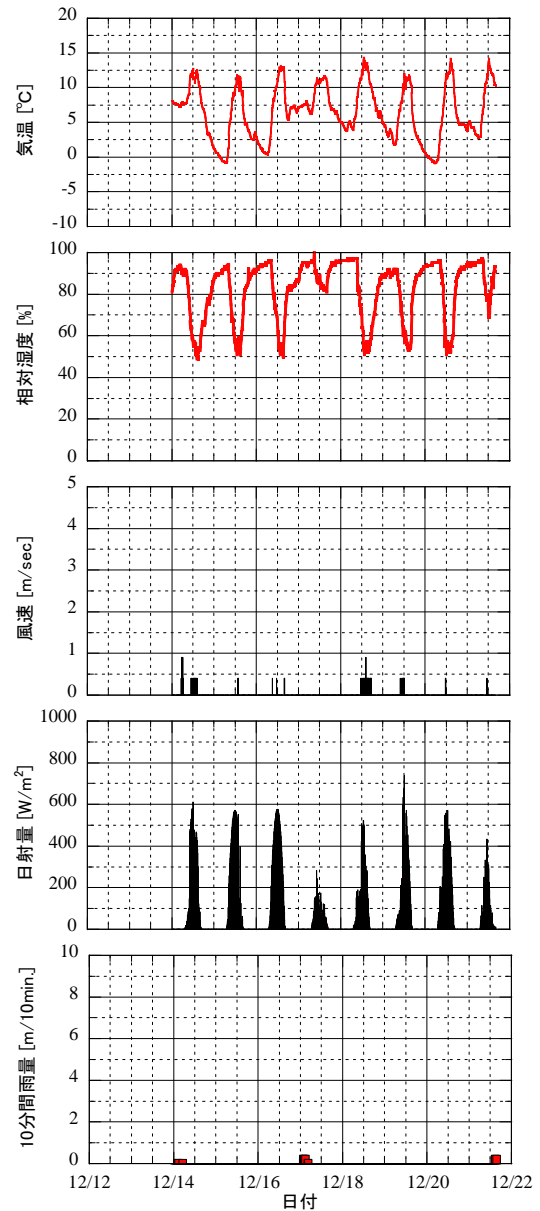


図-付2 気象センサーユニットデータ (2008.12)



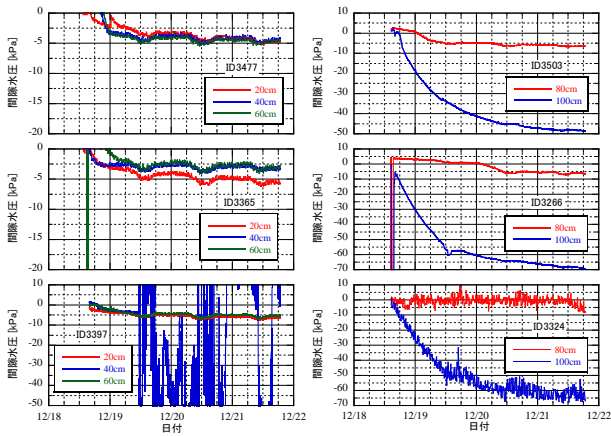


図-付3 間隙水圧の時系列変化 (Network M3, 2008.12)

量であった。また、太陽光の照度は、通常、 $32\text{klx} \sim 100\text{klx}$  ( $47 \sim 146\text{W/m}^2$ ) 程度といわれていることから、日射量は全体的にやや高い値を示していることがわかる。今後、機器のキャリブレーションが必要である。

また、データは、12月22日で停止している。これは、太陽パネル電池の電源不足と気象センサーユニットのケーブルが動物に噛みちぎられたためである。現在は、ケーブルに保護管を巻いている。

図-付3に間隙水圧の時系列変化を示す。降雨が少なかったため、設置後間隙水圧は減少している。また、冬期のため、蒸発量が少なく、間隙水圧の減少が緩やかに生じている。無線通信に関しても、全てのセンサーノードからデータが基地局へ届いていることがわかる。しかし、ID3397のデータがばらばら

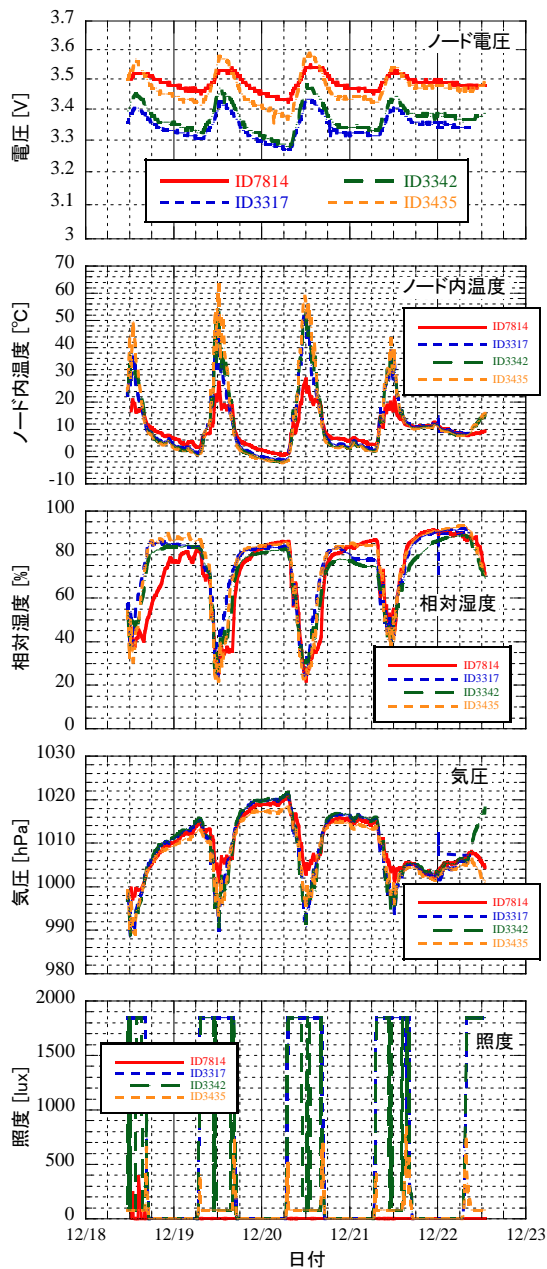


図-付4 MTS400 観測データ (Network M2) (2008.12)

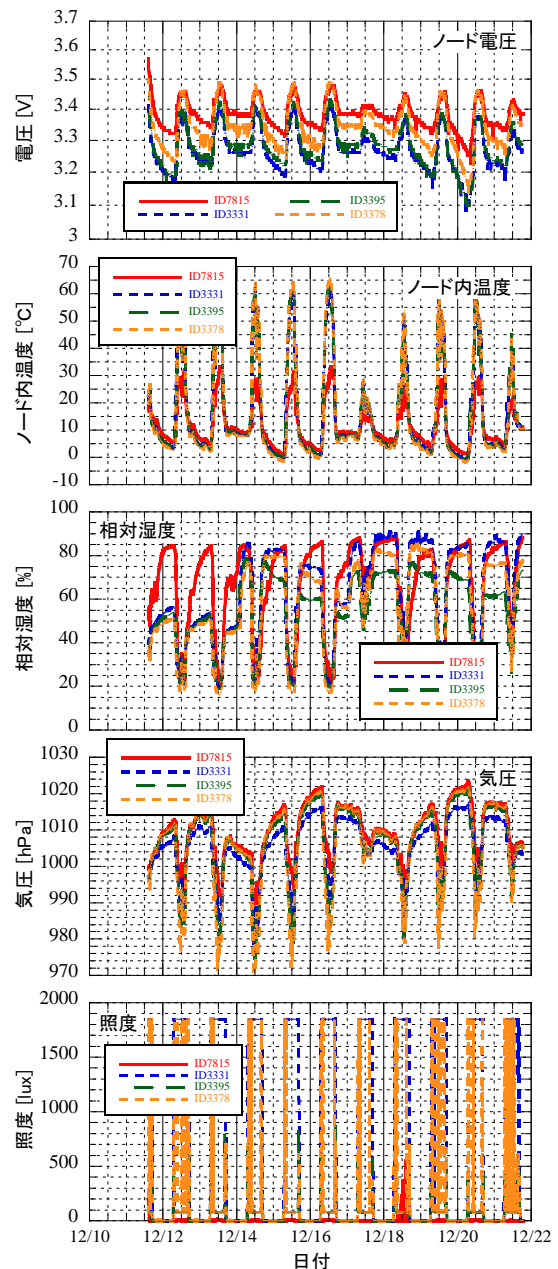


図-付5 MTS400 観測データ (Network M3) (2008.12)

ている。これは、テンシオメータとワイヤレスノードを接続する部分のはんだ付けが不十分であったためであった。

図-付 4 は、ネットワーク M2 に設置されている MTS400 で計測された気象データである。

温度や照度等は、直射日光の影響で値が大きくなっていることがわかる。また、電源は、温度の影響で変動しているが約 3.3~3.6V の間で安定している。12 月 22 日は、降雨のため温度の変化が少なくなっていることがわかる。

MTS400は、地面に直接設置したが、全てのノードでデータが取れていることが確認された。

図-付 5 は、ネットワーク M3 に設置されている MTS400 で計測された気象データである。

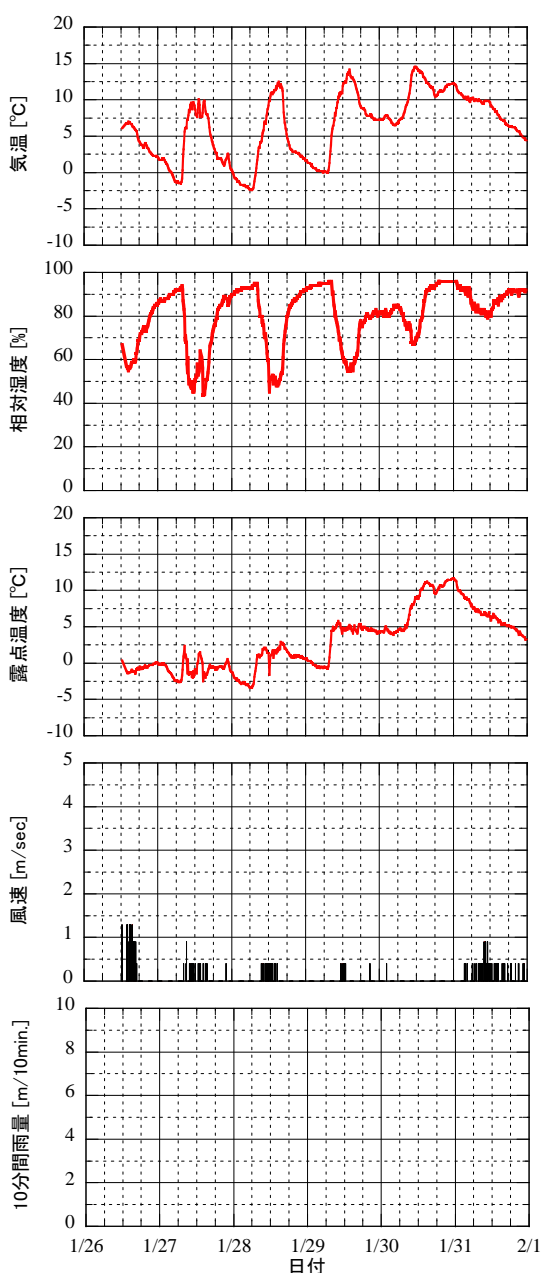


図-付 6 気象センサーユニットデータ (2009.1)

MTS400 は、地面に直接設置したが、全てのノードでデータが取れていることが確認された。ただし、12 月 22 日以降、太陽光パネルによる充電が不足したため、耐候性インテリジェントロガーが停止したため、データが取れていない。

また、ネットワークM2に比べて、日当たりが良いため、温度変化が非常に大きくなっている。

## b. 2009 年 1 月

図-付 6 に気象センサーユニットから得られた気象データを示す。1 月上旬は、太陽光パネルの充電不足および気象センサーユニットのケーブルが動物に噛みちぎられたため、データ欠損となっている。

気温および相対湿度の日較差は、明確に現れている。降雨データについては、データ取り込み時の不具合により、正常に取得することができていなかった。

図-付 7 にネットワーク M2 における間隙水圧の時系列変化を示す。1 月上旬は、太陽光パネルの充電不足により、耐候性インテリジェントロガーが停止したため、計測データが収集できなかった。そこで、太陽光パネルを増設し、1 月 27 日から計測を再開した。計測データを見ると冬のため、蒸発量が少ないため、間隙水圧の変動はそれほど大きくない。1 月 31 日には、雨が降ったため、各テンシオメータの値が上昇していることがわかる。いくつかの点で間隙水圧が正圧を示している部分があるが、これが計測機器やデータ処理の問題か通信の問題なのか、今後、確認する必要がある。

図-付8は、ネットワークM3における2009年1月の間隙水圧の時系列変化を示している。冬のため、間隙水圧の変化の範囲は小さい。また、間隙水圧には、日変動が見られ、日射の影響を受けていることがわかる。ID3324の深さ80, 100cmおよびID3397の深さ40cmについては、センサーノードとの接触不良ではないかと考えられる。

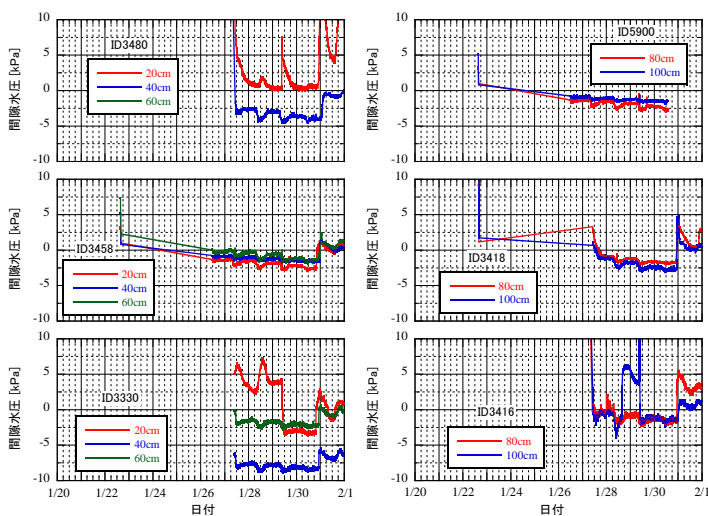


図-付 7 間隙水圧の時系列変化 (Network M2, 2009.1)

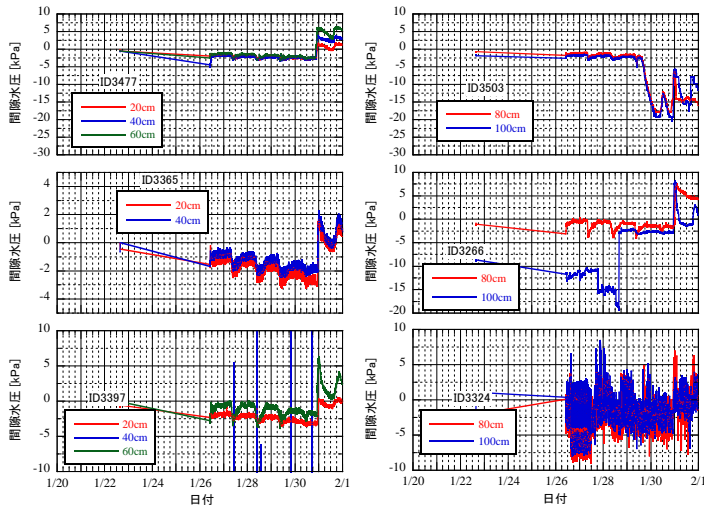


図-付8 間隙水圧の時系列変化 (Network M3, 2009.1)

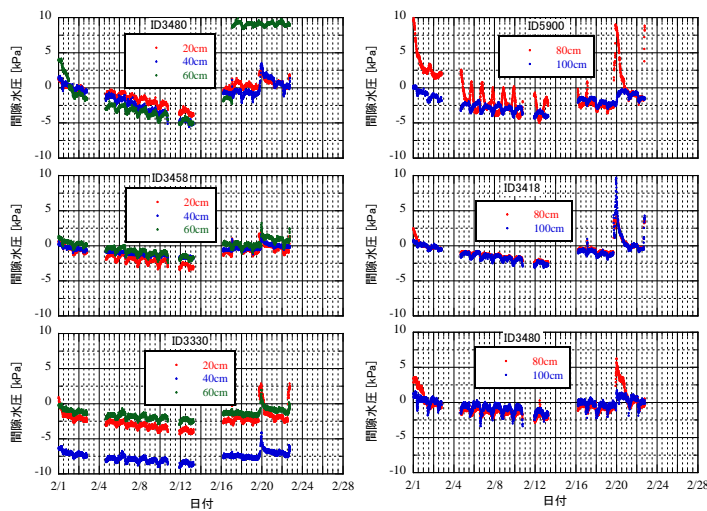


図-付10 間隙水圧の時系列変化 (Network M2, 2009.2)

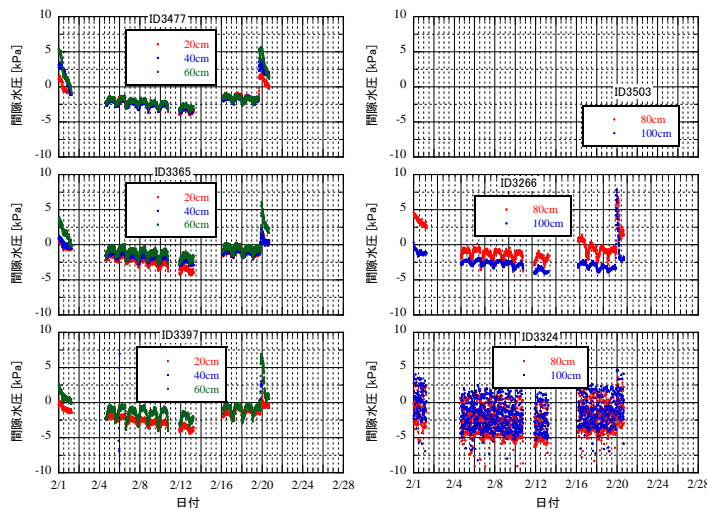


図-付11 間隙水圧の時系列変化 (Network M3, 2009.2)

c. 2009年2月

図-付9 に気象センサーユニットから得られた2009年2月の気象データを示す。気象センサーユ

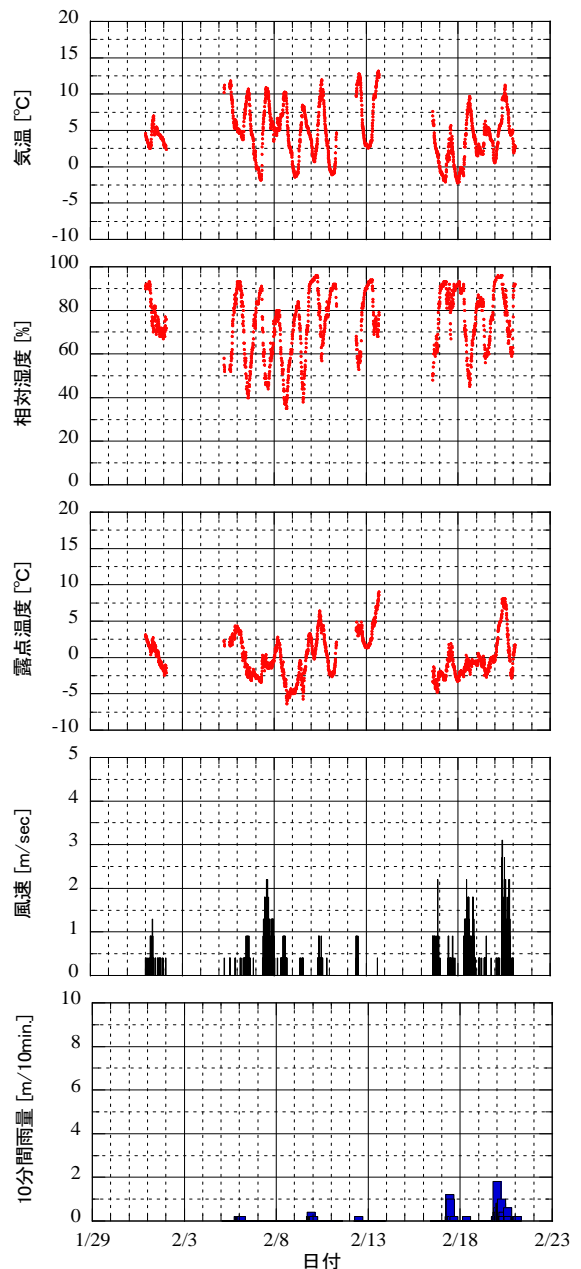


図-付9 気象センサーユニットデータ (2009.2)

ットのデータについては、2月5日以降、全ての項目で取得できるようになった。しかし、一部でデータ収集・転送ツールや耐候性インテリジェントロガーの停止のため、データ欠損期間が見られる。

図-付10は、Network M2における2009年2月の間隙水圧の時系列変化を示している。12月、1月に比べ、間隙水圧の変化傾向が落ち着いてきており、テンシオメータと地盤の密着性が高まってきたのではないかと考えられる。しかし、一部でデータの欠損も見られる。これらの原因は、データ収集・転送に関するソフトウェアにあるものと考えられる。ID3480の深さ60cmの値が急に正値を示している部分については、現在、検討中である。データ収集・処理部分のソフトウェアなどに原因があるものと考えられる。

図-付11は、ネットワークM3における2009年2月の間隙水圧の時系列変化を示している。冬のため、間隙水圧の変化の範囲は小さい。また、間隙水圧には、日変動が見られ、日射の影響を受けていることがわかる。ID3324の深さ80、100cmおよびID3397の深さ40cmについては、センサーノードとの接触不良ではないかと考えられる。また、2月に入り、ID3503からのデータ通信が途絶えた。現在、原因を検討中である。

d. ワイヤレスノードの電源電圧の消費

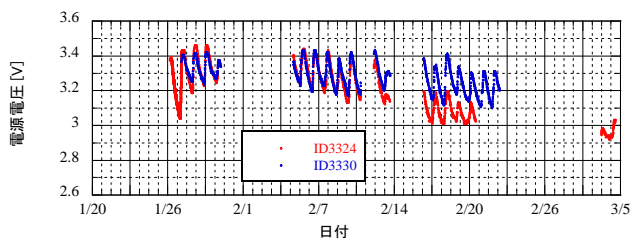


図-付12 ワイヤレスノードの電源電圧の消費

図-付12は、ワイヤレスノードの電源電圧の消費を表したものである。ワイヤレスノードには、単三型のリチウム電池が使用されている。ID3324にはテンシオメータ2本、ID3330にはテンシオメータ3本接続されている。これまでも明らかになっていたように、多くのデータを転送するワイヤレスノードの電源電圧の消費が早くなっていることがわかる。また、気温の変動に対しての変動も大きくなっている。電源電圧が2.8V以下になるとデータ通信が不可能になることが多いことを考えると、ID3324に関しては3月上旬には電池の交換が必要であると考えられる。今回のデータから、ワイヤレスノードの電池は、2～3ヶ月で交換の必要があるといえる。また、室内の実験では、ワイヤレスノードの電源電圧の変動がテンシオメータのデータ値を変動させてしまうことがあったため、今後、ワイヤレスノードの電源電圧の変動が与える計測結果の影響についても検討いく必要がある。