

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属		役職
	深川 良一 (ふかがわ りょういち)	立命館大学		教授
②研究 テーマ	名称	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		
	政策 領域	[主領域] 防災・災害復旧対策	公募 タイプ	タイプII 技術ブレークスルー型
		[副領域]		
③研究経費 (単位: 万円)	平成18年度	平成19年度	平成20年度	総合計
※端数切り捨て。	2,300	2,237	1,985	6,522
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属・役職 (※平成21年3月31日現在)			
島川 博光	立命館大学情報理工学部・教授			
大久保 英嗣	立命館大学情報理工学部・教授			
杉山 進	立命館大学理工学部・教授			
木股 雅章	立命館大学理工学部・教授			
小西 聡	立命館大学理工学部・教授			
横田 裕介	立命館大学情報理工学部・講師			
原田 史子	立命館大学情報理工学部・助教			
酒匂 一成	立命館大学グローバル・イノベーション研究機構・准教授			
鳥井原 誠	(株) 大林組技術研究所地盤岩盤研究室, 室長			
山本 彰	(株) 大林組技術研究所地盤岩盤研究室, 地盤グループ長			
菅野 幹人	三菱電機 (株) 情報技術総合研究所, チームリーダー			
桐村 綾子	三菱電機 (株) 情報技術総合研究所, 主任研究員			
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
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、収集すべき変量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の構築を目指した。即ち、1) 予算内で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。

上記の背景に対して、平成18年度～平成20年度の各年度に以下のような目標を立てた。

平成18年度：想定している斜面防災システムの実現可能性を確認する

- ・斜面安定評価システムの基礎設計
- ・センサーおよびセンサーネットワークの現状と課題の明確化
- ・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の構築および妥当性の検証
- ・斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの開発

平成19年度：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現地での適用性の向上を図る

- ・ワイヤレスセンサーネットワークシステム現地での適用性の検討
- ・センサーの電源、メンテナンスや耐候性などの検討
- ・室内土槽試験による斜面崩壊メカニズムの検討
- ・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
- ・構成再編可能型センサーネットワークシステムの開発

平成20年度：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、システムの試験運用、有効性の評価を行う

- ・現地斜面への機器設置およびシステムの試験運用
- ・複数のセンサー情報間の相関性を分析可能な斜面崩壊検知アルゴリズムへの高度化
- ・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
- ・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

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等(外注を実施している場合は、その役割等も含めて)について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

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。本研究は、大まかに3つに分けられる。それぞれの項目ごとに研究経過、目的の達成状況、役割などについて記述する。

1. 現地斜面における防災システムの検討

a) 道路管理者へのヒアリング調査に基づく斜面防災システムの提案およびコスト試算や技術面・運用面における実現可能性に関する検討

進捗状況：H18年度には国土交通省北海道開発局および西日本高速道路(株)徳島管理事務所、H19年度には青森県、H20年度には鹿児島県(危機管理局危機管理防災課、土木部砂防課)、鹿児島市(安心安全課、消防局警防課)の担当者にヒアリングを行い、防災システムの現状および問題点について意見交換を行った。規制解除を行うための指標、管理道路巡回時に目視とモニタリング結果の両面からの判断、システムの避雷性、警報伝達時の問題点などについて意見をいただき、提案する斜面防災システムの構成(規制解除に関する部分の追加)、移動端末によるデータ収集方法(巡回車両によるデータ収集)、収集データ可視化ツールの設計に役立てた。また、従来の計測システムの無線化によるコスト削減を確認した。

担当：斜面防災システムの検討およびコスト試算(深川、酒匂)

ヒアリング箇所の選定および実現可能性の検討(深川、酒匂、鳥井原、山本)、

移動端末によるデータ収集方法の検討(大久保、横田)

収集データ可視化ツールの設計(島川、原田、菅野、桐村)

b) センサーネットワークシステムの構築および斜面防災システムの有効性評価

進捗状況：H18年度は、2～3個のワイヤレスセンサーノードからなる小規模なネットワークシステムを構築し、室内土槽試験によりその有効性が明らかになった。H19年度には、9～18個のワイヤレスセンサーノードからなるネットワークシステムを構築し、学内の外周道路に設置し、無線通信の安定性、通信距離、データサンプリング間隔、植生の無線通信、耐候性に対する影響について検討し、現地モニタリングシステムの構築における設定条件を把握した。結果として、ノード間距離は、10m程度、データ取得間隔10分(降雨量により間隔の変更)、1つのノードにつき、圧力センサーを最大4個まで接続可能、避雷対策は、基地局のみに行うことなどの条件が決定された。H20年度は、滋賀県国道事務所の管理する国道161号琵琶湖湖西縦貫道路雄琴管理基地敷地内の法面において斜面防災システムの試験運用を実施し、通信の安定性、センサーやワイヤレスノードの電源、耐候性、斜面防災システムの動作性について検討した。結果として、基地局部の電源供

給部分にやや問題があるが、通信の安定性や耐候性、システムの動作性の確認やセンサーやワイヤレスノードの電源が少なくとも3カ月以上は問題がないことがわかった。

担当：室内土槽試験，現地試験，計測データの分析（深川，酒匂，鳥井原，山本），
ワイヤレスネットワークシステムの構築（大久保，横田）
データ収集・斜面安定性評価可視化ツールの設計（島川，原田，菅野，桐村）
可視化ツールの作成および太陽パネル電池の設置（原田，横田，外注：（株）ゴビ）

2. 斜面防災システムに関する検討

a) 斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの開発および高度化

進捗状況：H18年度は，斜面崩壊兆候検知アルゴリズムの基本的な仕組みを提案した。H19年度は，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。改良に当たっては，室内土槽試験結果に基づき，降雨データと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。H20年度は，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アルゴリズムの高度化を図った。この機能は，効果的な計測地点の抽出や斜面内の水みちの発見に役立てられる。また，室内土槽試験および現地試験のデータに基づいたタイムチューブの設定値および評価式の精度向上について検討した。

担当：計測・分析データの解釈（深川，酒匂，鳥井原，山本）
アルゴリズムの設計および試作（島川，原田，菅野，桐村）
土槽試験用レコーダの点検（外注：（株）東京測器）
斜面防災システムのユーザインターフェイス部分の改良（外注：（株）演算工房）

b) 斜面安定性評価システムの基礎設計

進捗状況：降雨時の斜面の安定度を定量的に評価する数値シミュレーションの開発を行った。有限要素法による不飽和浸透解析と斜面安定解析手法（ヤンプ法）を用い，雨水浸透時のせん断強度低下を考慮して解析を行った。土槽試験結果との比較により，より精度を高めるには，進行性崩壊に対応できる斜面安定解析手法や土質試験によりせん断強度を求める際に低拘束圧下におけるせん断試験の実施が必要であることがわかった。進行性崩壊に対応するためにSPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法の適用などを検討している。

担当：数値シミュレーション開発および実施（深川，酒匂）

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

a) 耐候性インテリジェントロガーの開発および高度化

進捗状況：H18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試験を実施し，ネットワークシステムの実現可能性を検討した。H19年度は，データの収集・分析・通信を行うための耐候性インテリジェントロガーの試作および室内での動作確認を行った。H20年度は，現地適用をかんがみたネ

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。現地試験において、その動作が正常であることが確認された。ただし、ロガーとして、今回の実験ではマイクロサーバではなく、ノートPCを代用した（実験段階の確認作業のため）。電源を太陽パネル電池で供給したが、雨天時に電源供給が停止し、PCが作動しなくなるケースがあった。しかし、これは、省電力のマイクロサーバの使用や通常、ロガーは道路沿いに設置し、電源を得る予定であることから、長期計測を行う際の電源問題は解決できるものと考えられる。耐候性については、6か月以上現地に設置しているが正常に動作しているため問題はないものと考えられる。

担当：インテリジェントロガーの設計（大久保，横田）

ネットワークシステムの実現可能性の検討（大久保，横田）

インテリジェントロガーソフトウェア部の設計（大久保，横田，島川，原田）

ソフトウェア部の試作（外注：（株）ゴビ）

b) 構成再編可能型センサーネットワークシステムの開発

進捗状況：H19年度に構成再編可能型センサーネットワークシステムの基礎設計を行った。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ため、このようなデータを一様な形式に保存でき、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なデータベーススキーマを作成した。また、移動端末によるデータ収集が可能とするため、P2Pデータポットと呼ばれるシステムを用いて収集機能の構築を行った。これらについては、実験により動作確認がなされ、実現可能となった。

担当：構成再編可能型センサーネットワークシステムの開発（大久保，横田）

c) ワイヤレスセンサー技術の調査・検討および現地適用性の向上に関する検討

進捗状況：H18年度は、既往のセンサーのワイヤレス化に関する検討を行った。伸縮計などに応用可能であることがわかった。H19年は、電源長寿命化やノイズ除去回路の設計試作、耐候性BOXに関する検討、テンシメータの自動給水装置の開発に取り組んだ。H20年では、それらの現地適用性について検討し、有効性が確認された。

担当：ワイヤレスセンサー技術の調査・検討（深川，杉山，木股，小西，酒匂，山本）

電源およびノイズに関する検討（深川，大久保，横田，酒匂）

自動給水装置に関する検討（深川，小西，酒匂）

耐候性に関する検討・耐候性（深川，大久保，横田，酒匂）

以上の内容をまとめたものを表-1に示す。

表-1 3カ年の研究内容

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 学内外周道路法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
		3-2. ワイヤレスセンサー技術の調査・検討	③ 低消費エネルギー型センサーに関する調査・検討 ④ メンテナンスや耐水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. 耐侯性インテリジェントロガーの開発	① 耐侯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侯性インテリジェントロガーの高度化	① 耐侯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

⑦中間評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

平成18年度

- (1) 斜面モニタリング結果を蓄積・分析することにより、斜面崩壊時の異常な挙動を抽出し、土砂災害警報基準を設定することであるが、研究期間内に設定できるのか。それとも研究終了後にも計測・解析を継続する必要があるのか。

(対応状況)

研究期間内に設定可能であると判断している。その理由は、室内モデル試験の実施によって、ある程度斜面崩壊とテンシオメータからの間隙水圧の発生パターンに関する情報が収集できる可能性が高いからである。さらに、現地斜面に関しても2004年より間隙水圧データの収集に努めており、少なくとも崩壊非発生に関する情報（負の事例）は収集・分析できる。事柄の性質上、期間終了後も現地データの収集・分析を継続し、アルゴリズムの改善を図る予定である。新たに開発するインテリジェントロガーは、そうした崩壊条件の変更にも柔軟かつ容易に対応可能であり、かつ誰でもシステム変更できるものとなる予定である。

- (2) 斜面崩壊兆候検知のための「タイムチューブ」を用いて「洗練」を行う際に必要な兆候のサンプル数はどの程度か。研究期間内に実用的なレベルまでの洗練はできるのか。

(対応状況)

サンプル数は一概には言えないが、正の事例（ポジティブデータ）は最低でも10件ほど、負の事例（ネガティブデータ）はその10倍ほど（つまり100件ほど）必要だと判断している。現地で正の事例を集めることは困難なので、室内土槽実験や小規模斜面での崩壊実験を通して、斜面崩壊時の種々のデータを取得していく予定である。

- (3) 道路管理の現場へのヒアリングより、斜面モニタリングのコスト面での適用条件が抽出されたが、本システムで達成可能なコストを比較しないと適用性の評価はできないのではないか。また、コスト面以外での現場の業務への適用性について検証していないが、実用化へ向けて課題はないのか。

(対応状況)

例えば、Crossbow社のセンサーネットワークシステムは、キット1式で50万円程度である。1ノードで最大4つのセンサーを接続することが可能で、かつ各ノード間、あるいはノードと基地局間は最大30m（現行製品では300m）程度をカバーする。したがって、直線的に領域をカバーするとすれば、この費用＋センサー費＋パソコン費でおおよそ200mをカバーすることになる。無線形式なので、ノードなどの設置には費用はほとんど発生しないし、かつプロに依頼する必要がない。現実的には、人件費や新たに開発するインテリジェ

ントロガーなどの経費（現状のパソコンとほぼ同等）を見込む必要があり、現時点では厳密なコスト評価や比較はできていない。しかし、量産化が図れば、現行のシステムより安価になることは確実であると判断している。また、実用化へ向けての課題は、耐候性・避雷性の確保、および電源問題である。

(4) 研究の目的・目標では、センサーやシステムの耐候性や避雷性の向上が挙げられているが、これについての検討がほとんど行われていないという印象を受ける。

(対応状況)

耐候性・避雷性の検討は現地での運用に関して非常に重要だと認識しており、継続して検討した。初年度はシステム全体の実現可能性の検討を優先させた。2年目以降に実施する現地での運用を通して耐候性・避雷性の確認を行った。ワイヤレスノードを防水BOXに入れ現地に長期間設置した。2008年12月に設置したが、現在でも問題なく稼働している。しかし、内部に結露が生じるため、更なる防水BOXの加工が必要であると考えられる。避雷性に関しては、コストとのバランスを考える必要があり、1つのノードごとに避雷対策を施すのではなく、基地局などの主要な部分のみに対策をすることとした。また、無線化は被雷した際の損傷を最小限にとどめることが期待される。

(5) メンテナンスの容易化が研究目的の一つとなっているが、テンシオメータの注水ロボットの開発だけしか手がけられていない。電力の安定供給など、多くの対策があるのではないか。研究事項における優先事項の絞り込みの過程がよく理解できない。

(対応状況)

メンテナンスの容易化は、センサーおよびセンサーネットワーク自体の長寿命化によっても達成されるものと認識している。センサーやワイヤレスノードの電源問題はもっとも重要であり、継続的に検討を進めてきた。そこで、センサーが計測を行うときのみに電力が供給されるような回路（電源省力化回路）を作成した。現地実験の結果、アルカリ単三電池4本でテンシオメータ4本分の電源を供給し、約10分間隔で計測した場合、最低でも3か月以上は計測可能であるという結果を得た。

(6) 斜面崩壊検知アルゴリズムの開発において、何を測定すればよいのかが絞りこまれていない。トレンドグラフの中から、ある特定パターンが現れると斜面崩壊につながる可能性があるという程度の見通しで、システムが組めるとは思えない。もっと科学的合理性に基づく方法を採用すべきではないか。

(対応状況)

斜面崩壊兆候検知のための対象情報としては、テンシオメータから測定された間隙水圧データを考えている。降雨開始から（表層すべり型）斜面崩壊に至るプロセスを考えれば、崩壊前に表層は飽和過程を経験し、飽和達成後ある程度の時間が経過してから、崩壊に至

るものと想定される。この間の間隙水圧変化プロセスが、開発したアルゴリズムの適用対象となる。以上のアルゴリズムによる崩壊予測と合わせて、浸透解析と安定解析を組み合わせた数値解析手法のプログラム開発を検討・実施している。

平成19年度

(1) Zigbeeによるアドホックな通信メッシュの形状や規模によっては、ネットワーク上にボトルネックが発生し、全体の通信能力低下を来す可能性はないでしょうか。可能性がある場合は、当該システムの適用が想定される条件において、その現象の影響度をどのように評価する計画でしょうか。

(対応状況)

ボトルネックが発生する可能性はある。

- ・ 通信方式(メッシュ形状等)に関しては、通信能力・通信効率の向上と低消費電力性がトレードオフの関係になるため、ここでは長期観測に向けた低消費電力性を優先した方式を用いることとしている。
- ・ ノード数とデータサンプリング間隔によってボトルネック発生の可能性は決まる。
特にノード数とサンプリング間隔の関係については、これまでに初期的な検討を行ってきており、各ノードが3分に1回データを送信する設定の場合、18ノードまではほぼ安定してデータを取得可能であることが確認できた。例えば、サンプリング間隔を10分と固定した場合において、安定したデータ取得が可能なノード数の最大値を検証するなどして、より正確なサンプリング間隔とノード数の関係を明らかにすることと、ノード数の規模に限界があることから、広範囲を観測するための手法として、観測区域を複数のネットワークに分割してセンシングを行い、各ネットワークで収集された結果を統合するシステムを構築することで対応する。

(2) 本システムの実装時に、実際に斜面崩壊が発生した後に、無線センサーを回収して再使用できる可能性はあるでしょうか。可能性がある場合は、回収センサーの再使用による費用削減効果を評価する計画でしょうか。

(対応状況)

回収し、再使用できる可能性はある。ただし、以下のような理由から、再使用による費用削減効果はあまり見込めないものと考えている。

機材のコストの安さ：無線センサーは、通信やデータ処理を行うノード部分と、テンシオメータなどの外部センサー部分に分けられる。いずれも、現時点でコストは単価が4～5万円程度であり、比較的安価である。

人的コストの高さ：無線センサーを回収するためには、危険性の高い地域に作業員を派遣し、崩壊後の状況で無線センサーを探す必要がある。さらに、その後回収した無線センサーの動作検証を行う必要がある。これらに要するコストは比較的高価になると思われる。

以上から、回収・再使用する場合と新規無線センサーを使用する場合のコストを比較すると、後者のほうがコストが低くなると考えている。そのため、再使用する場合の費用削

減効果の詳細な評価は今のところ予定していない。

- (3) 斜面安定性評価のパラメータ設定には、実運用においても実験等が必要でしょうか。必要な場合は、どの程度の費用が必要となるでしょうか。それは、無線センサーシステム自体の設置費用と比較して、どの程度になるでしょうか。

(対応状況)

タイムチューブ理論に基づく安定性評価に関する限り、実運用に際しての実験等の実施の必要性は低い。勿論、設置斜面より採取した土試料によりモデル斜面を作成し、様々な降雨条件下でのパラメータ評価が可能であれば、精度向上に繋がる。

・システムの実運用を開始する際は、まず、既に室内土槽試験より決定された設定値を用いて、計測および評価を開始する。

・次の段階においては、現地計測データの蓄積により、パラメータを変動させる。パラメータのアップデートについては、遠隔操作によるインテリジェントロガー内部のソフトウェアの書き換えを行う。将来的には、計測結果に基づいた学習によるパラメータの自動変動機能を持つアルゴリズムの開発も見込まれる。

- (4) 最終的に、斜面の安定性評価を行うためには、少なくとも室内土槽実験結果を正確に再現出来る安定解析手法の研究開発が不可欠と考えられる。平成20年度での成果に期待したい。

(対応状況)

ご指摘の通り、現状では、室内土槽実験結果を正確に再現できているとは言い難い。

現在、2次元不飽和・飽和浸透解析、斜面安定解析等のモデルの妥当性の検討および改良に取り組み、問題点を一つずつ着実に解決するために研究を行ってきている。また、有限要素法以外の手法による安定性評価手法の開発にも取り組んでいる。さらに、室内土質試験などによる解析パラメータの決定法についても、解析精度の向上に向けて検討中である。

- (5) ワイヤレスセンサーネットワークシステムの幅広い適用性について（提案システムの原位置での適用性を高めることとは別に）

(対応状況)

これまでに、ワイヤレスセンサーネットワークシステムは、屋外での生態系観測や、工場内の装置の動作状況の観測や、博物館等の施設内における案内システムなど、さまざまな場面において利用されてきている。

本プロジェクトでは、斜面崩壊という、屋外においても特に厳しい環境下でのセンサーネットワークの運用を可能にするために、ハードウェア・ソフトウェア両方の側面から頑健性・柔軟性を実現するための技術を開発してきている。

本プロジェクトで開発したシステムは斜面崩壊への適用を念頭において開発してきているが、汎用性を持ったシステムとして設計されているため、他の場面への利用も可能であると考えている。

特に、従来のセンサーネットワークシステムでは適用が困難であった、屋外での厳しい

自然環境や、機器設置が困難であるような場所における利用が可能になるため、より適用範囲が広がるものと考えている。

(6) 斜面安定性評価のための長期観測計画の必要性や具体的方法について

(対応状況)

長期観測計画の必要性：

- ① 本研究で提案する防災システムにおける安定性評価方法においては、計測データを長期間蓄積していくことにより、評価精度の向上が見込まれる。
- ② 長期観測によりハードウェアなどの問題点の抽出、改良が見込まれる。

具体的方法：

- ① 清水寺敷地内における長期観測を実施し、問題点を抽出する。
- ② 国道沿いの斜面（2～3箇所）における多点計測を実施し、運用面での問題点等を抽出する。
- ③ 段階的に、ソフトウェアおよびハードウェアのアップデートを行う。

⑧研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究で得られた知見、成果などについて、以下にまとめる。

1. 斜面防災システム

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。

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言われている。

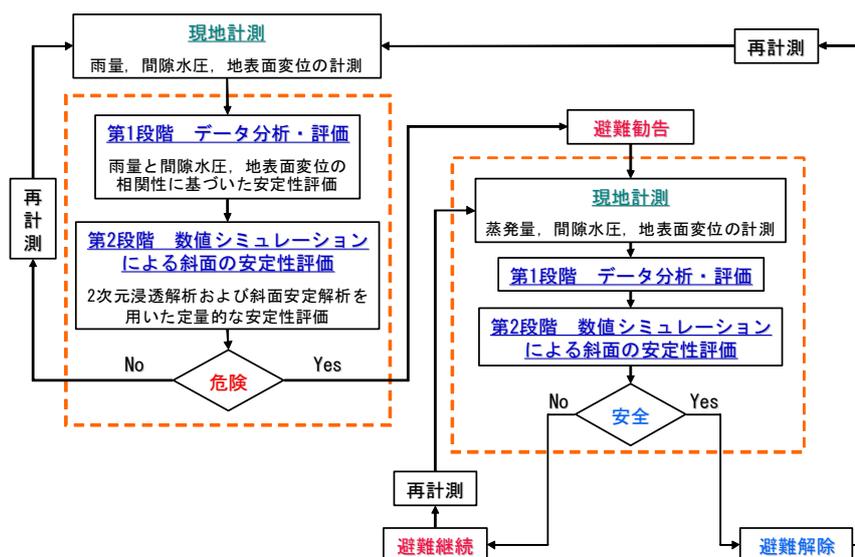


図-1 防災システムフロー

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（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。

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。図-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。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）においては“斜面崩壊兆候検知アルゴリズム”を、数値シミュレーション結果に基づく手法（第2段階）においては、“不飽和・飽和浸透解析と斜面安定解析を組み合わせた手法”を用いる。

また、本研究の特徴として、現地計測において、1) 予算内で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（インシャルコスト、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)などを目指しており、その実現のためにワイヤレスセンサーネットワーク技術を利用している。

過年度の研究成果において、現地斜面に適用するワイヤレスセンサーネットワークシステム

を利用した斜面防災システムの具体的な構成をまとめてきた。図-2に斜面防災システムの構成図を示す。本システムでは、計測データをワイヤレスセンサーノード間で無線通信させ、道路側面に設置した耐候性インテリジェントロガーに収集させる。斜面崩壊兆候検知アルゴリズムは、道路側面に設置された耐候性インテリジェントロガー内で、データ分析を行う。計測データおよび判定結果は、道路内に光ファイバが敷設してある場合には、光ファイ

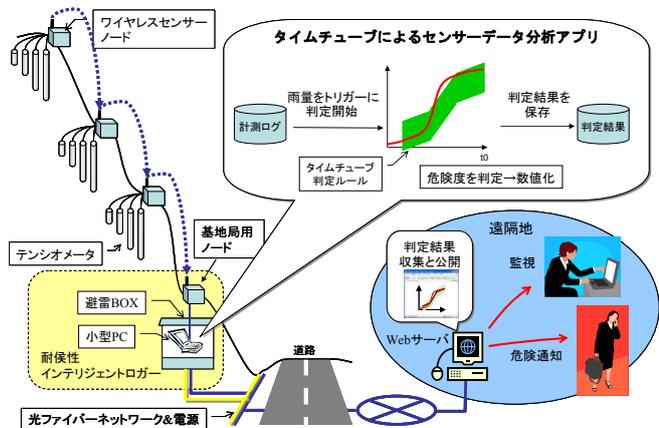


図-2 斜面防災システム構成図

バーにより管理事務所へデータを送信する。(IT環境が悪い場合は、携帯電話によるデータ通信、または移動端末(ノートPCなど)を用いた現地でのデータ収集を行う。)事務所内のサーバでは、数値シミュレーションの実行および判定結果に基づいた警報の通知などを行う。

また、ワイヤレスセンサーノードの設置において、過年度の研究成果では、以下のような条件を設定することが妥当であると報告した。

- ① データ取得間隔は、最短10分(降雨量により、間隔の変更)とする。
- ② ワイヤレスセンサーノードは、防水・防塵BOXに入れ、地面から20cm程度離す。
- ③ ワイヤレスセンサーノード1つにつき、外部センサー(テンシオメータなど)を最大4個までの接続とする。
- ④ ワイヤレスセンサーノードには避雷対策は行わず、ロガー部にのみ施す。



図-3 現地実験場所の状況

2. 現地斜面における斜面防災システムの概要

本研究では、滋賀国道事務所堅田管理維持出張所が管理する国道161号琵琶湖湖西縦貫道路「雄琴管理基地」内の斜面(図-3)において、提案するシステムの試験的運用を実施する。これまでの研究成果を現地システムに導入し、現地への適用性について検討する。

図-4は、斜面防災システム構成の全体像である。斜面防災システムは、屋外部分(観測システム部分)と屋内部分(データ収集・通信部分)とに分かれる。ここでは、斜面防災システムの各部の名称を定義する。斜面防災システムは、主にワイヤレスセンサーノード(テンシオメータ、温度計等のセン

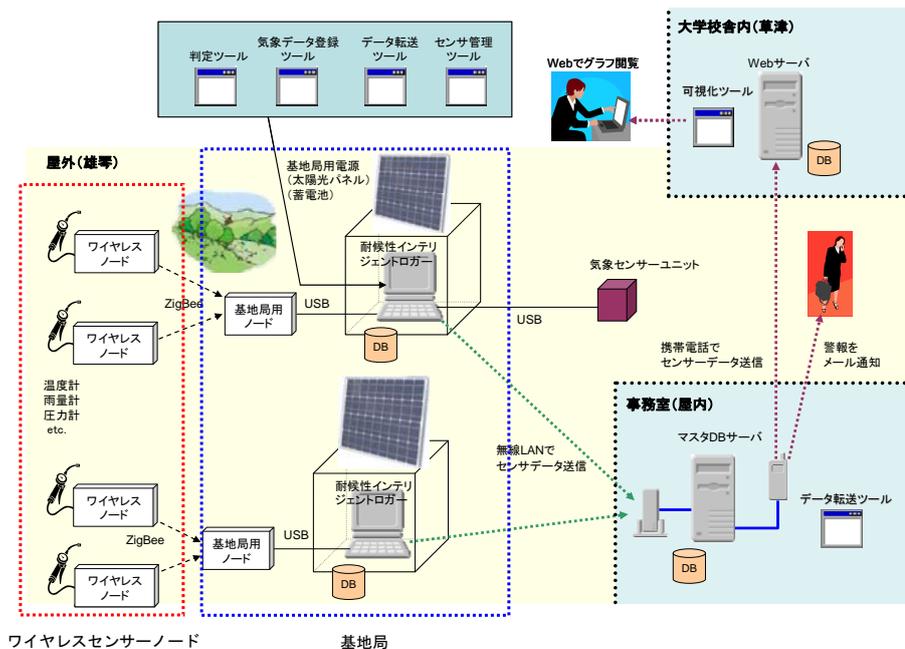


図-4 データ分析・集約システム



写真-1 現地観測システム設置状況

サーとワイヤレスノード部) ,
 基地局 (基地局用ノード, 耐
 候性インテリジェントロガ
 ー) ,
 気象センサーユニット, 基地
 局用電源 (太陽光パネルと蓄
 電池) , マスタDB (データベ
 ース) サーバ (データ転送ツ
 ールおよびデータベース) ,
 Web
 サーバ (可視化ツールおよ
 びデータベース) で構成さ
 れている。当初の予定 (図-2)
 では, 基地局は, 道路沿い
 に設置され, インテリジェ
 ントロガー等の電源は, 安
 定供給されると想定して
 いたが, 今回の実験では, 付
 近に電源がないことより
 厳しい条件下での実験を
 行うということで, 太陽電
 池パネルからの電源供給
 を試みた。

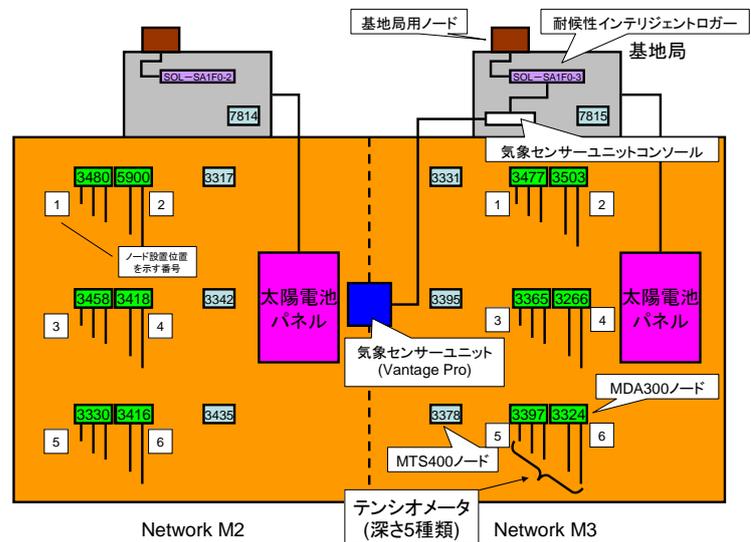


図-5 観測システム部の概要

定していたが, 今回の実験では, 付近に電源がないことより厳しい条件下での実験を行うということで, 太陽電池パネルからの電源供給を試みた。

図-5 に観測システム部の概要, 写真-1 に観測システム部の設置状況を示す。ここでの観測システム部とは, 図-4 におけるワイヤレスセンサーノードおよび基地局を示す。本研究においては, 斜面を左右方向で二つに分割 (M2, M3) し, それぞれ一つのワイヤレスセンサーネットワークを構築する。テンシオメータは, 1つのワイヤレ



写真-2 テンシオメータ設置状況



写真-3 センサーノード (MDA300 ノード : 3324)

センサーネットワークを構築する。テンシオメータは, 1つのワイヤレ

スセンサーネットワークにつき 6 カ所の計測地点に設置した。1 計測地点につき 5 種類 (20, 40, 60, 80, 100cm) の深さを計測するため、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、クロスボー社製の MDA300 を用いている (写真-2, 写真-3)。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。テンシオメータは横方向に 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ている。したがって、テンシオメータ用センサーノードは、1 つのワイヤレスセンサーネットワークにつき 6 ノード、計 12 ノード設置することになる。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 (写真-3)。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。

このほか、MTS400 基板を接続したノードを 1 つのワイヤレスセンサーネットワークにつき 4 ノード設置した。うち 3 つは斜面に設置し、1 つはラック内に設置して基地局内温度の観測に利用した。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った。このほか基地局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。これらのデータは、各ワイヤレスノードを経由して、各ネットワークの基地局用ノード (写真-4) まで送信される。その後、基地局内 (写真-5) のインテリジェントロガー (写真-6) に収集される。

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, 写真-7) を 1 台設置した。これはセンサー

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、ワイヤレスセンサーネットワークからのデータと同様に耐候性インテリジェントロガーのデー



写真-4 WSN 基地局
(Network M3)



写真-6 PC ラック内部
(Network M3)



写真-5 PC ラック
(Network M3)



写真-7 気象ユニット

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 : $79.2\text{Ah} \div \text{放電深度 (50\%)} \div \text{充放電効率 (80\%)} = 198\text{Ah}$

⑤ 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 : $5.95\text{A} \times 12\text{V} = 71.4\text{Wh}$

⑥ 結論

蓄電池は、約200Ah必要なので、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-9)。



写真-8 蓄電池



写真-9 太陽光発電装置

3. 計測データについて

計測データの一例として、2009年2月の気象センサーユニットのデータおよびNetwork M2の間隙水圧の時系列変化を示す。

図-6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。気象センサーユニットのデータについては、12月、1月のデータでは、太陽電池パネルの増設以前のため、気象ユニットおよびインテリジェントロガーの停止によるデータ欠損や動物にケーブルを噛みちぎられたことによるデータ欠損が見られたが、太陽電池パネルの増設、ケーブルの修理および保護管装着により、降雨中、降雨後のデータが比較的安定して取れ始めた。2月14日から16日のデータ欠損は、データ収集・転送ツールのメンテナンスによるデータ欠損である。2月7日から2月14日までは、全ての項目で取得できるようになった。しかし、一部で電源不足による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-7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、2月14日～16日において、データの欠損が見られる。この原因は、データ収集・転送に関するソフトウェアのメンテナンス期間によるものである。しかし、再度、システムが稼働したあと、ID3480の深さ60cmの値が急に正值を示した。これは、データ収集・処理部分のソフトウェア上でのセンサー校正值の設定ミスである可能性が高い。また、2月20日の間隙水圧が急激に上昇しているが、これは、テンシオメータの脱気水注入作業を行ったためである。

図-8は、ワイヤレスノードの電源電圧の低下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が3本接続されている。通常は、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低下が早くなるはずである

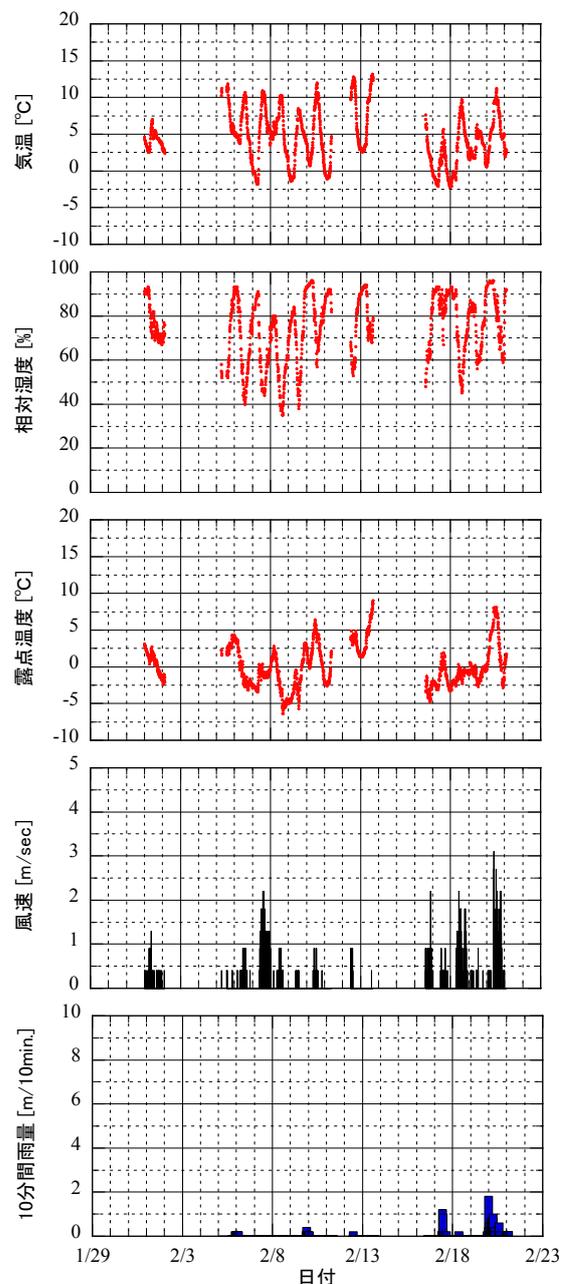


図-6 気象センサーユニットデータ (2009.2)

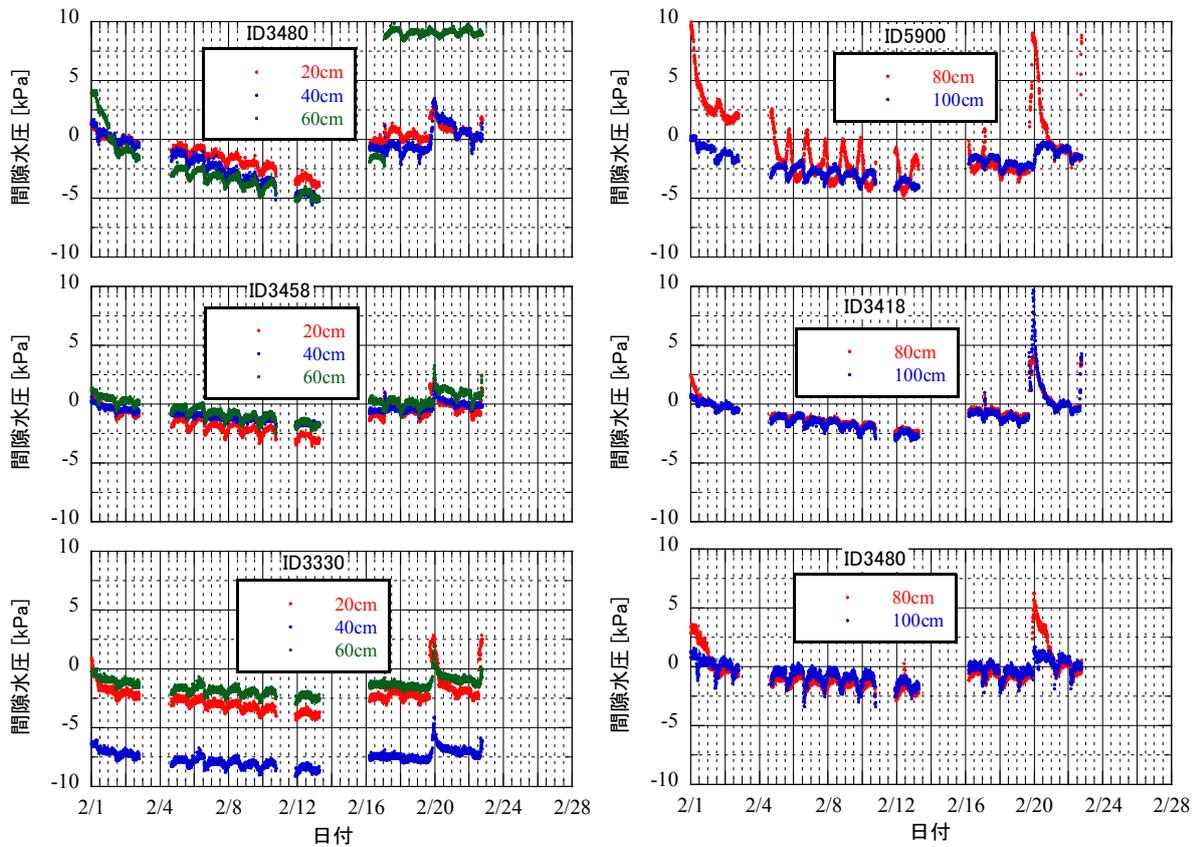


図-7 間隙水圧の時系列変化 (Network M2, 2009年2月)

が、今回は逆の結果が得られた。これは、ID3324のデータ取得間隔を10分よりも短く設定していたためであることが原因であった。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。しかしながら、10分間隔でデータを取るとすると、3~4ヶ月は少なくとも電池の交換が不必要であることがこの結果から分かった。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していく必要がある。

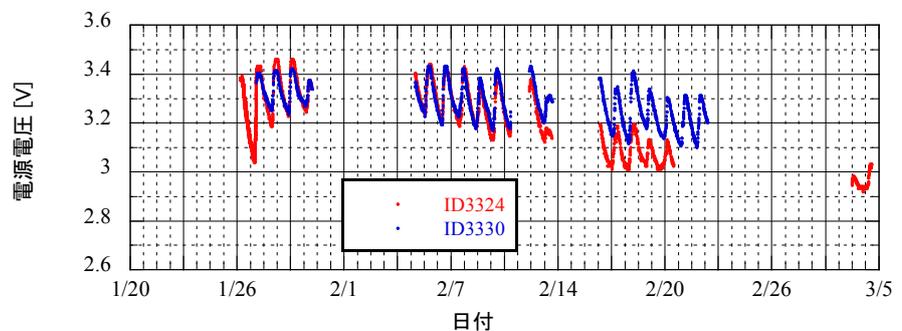


図-8 ワイヤレスノードの電源電圧の低下

4. データ分析・集約システムの概要

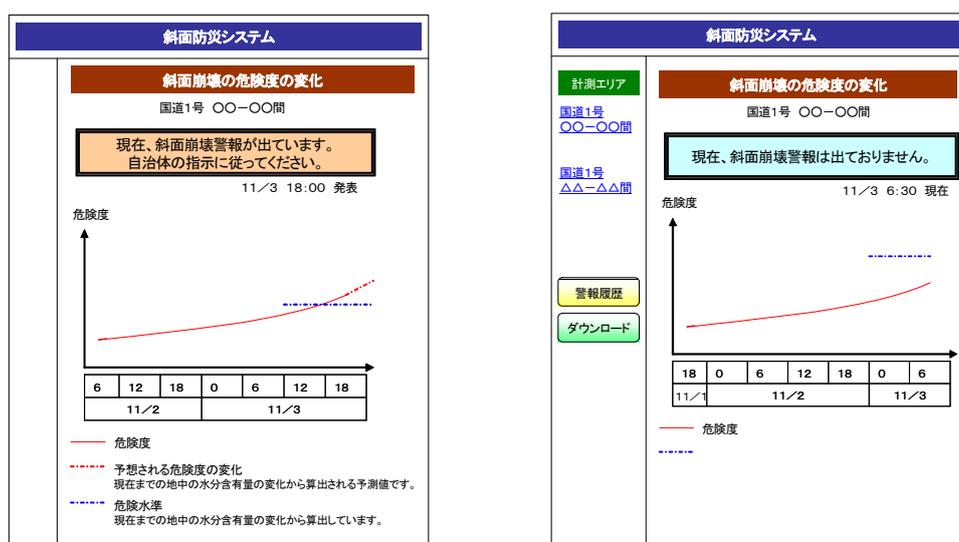
計測システムにより観測されるセンサーデータは、データ分析・集約システムを介して斜面崩壊情報として公開される。データ分析・集約システムは図-4 の通りである。本システムの主な機能は以下4つである。

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



(a) 警報発令時の公開ページ

(b) 平常時のシステム管理者用ページ

(データのダウンロードが可能)

図-9 分析結果・警報を可視化する Web ページのイメージ

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 -9 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。

5. 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ワイヤレスノードを介して、転送される際に値が変動することがあった。この影響について考慮していく必要がある。
2. 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。

(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。

(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、データ転送速度が低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増加し、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増加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低い場合にも未送信データ件数の増加は発生するため、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増加を検知する機能が必要といえる。

6. 学内外等のインパクト

研究成果発表状況にもあるように、多くのシンポジウム、学会において研究成果を公表してきた。他の参加者からも多くの質問があるなど関心を集め、高い評価をいただいた。また、立命館大学が主催する展示会において、本研究成果のデモンストレーションを行い、多くの一般人や企業の方々からの関心を集めた。

⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。)

シンポジウム(査読付き)

2009年度

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.

2008年度

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, WSEAS Int. Conf. on COMP., pp.115-121, July 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.

2007年度

1. 藤崎友樹, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: P2P データポット: センサーネットワーク向け分散型マイクロストレージアーキテクチャ, 第18回データ工学ワークショップ(DEWS2007), D1-1, 2007年2月.
2. 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.

口頭発表

2009年度

1. 平井一弘, 里見知昭, 酒匂一成, 深川良一: ワイヤレスセンサネットワークの斜面防災への適用に関する実験的研究, 土木学会全国大会第64回年次学術講演会講演概要集, 2009(掲載決定).

2008年度

1. 横田裕介, 陶山優一, 大久保英嗣: センサネットワーク向け協調ストレージシステムにおけるデータ管理方式, 第1回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM2009), 2009年3月.
2. 植田裕規, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークにおけるECAルールを用いたデバイス制御手法, 情報処理学会第71回全国大会, 1U-2, 2009年3月.

3. 加古崇文, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークの長期運用を考慮した経路決定法, 情報処理学会第 71 回全国大会, 5U-5, 2009 年 3 月.
4. 陶山優一, 植田裕規, 横田裕介, 大久保英嗣: 移動端末と DTN ルーティング手法を用いた災害情報システム, 情報処理学会第 71 回全国大会, 5ZA-1, 2009 年 3 月.
5. 富森英生, 横田裕介, 大久保英嗣: センサノードの自律的な協調処理のためのイベントを用いた問合せ処理, 情報処理学会第 71 回全国大会, 1U-3, 2009 年 3 月. (学生奨励賞)
6. 濱千代貴大, 金丸達雄, 横田裕介, 大久保英嗣: センサノードの実行履歴を用いた負荷予測に基づく DVS と DMS による協調型省電力手法, 情報処理学会第 71 回全国大会, 5U-6, 2009 年 3 月. (学生奨励賞)
7. 藤原秋司, 植田裕規, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークにおけるメタデータを用いた統一的問い合わせ手法, 情報処理学会第 71 回全国大会, 1U-4, 2009 年 3 月.
8. 陶山優一, 横田裕介, 大久保英嗣: 移動端末を用いた災害情報システムにおける DTN ルーティング手法, 信学技報, vol.108, no.399, USN2008-82, pp.117-121, 2009 年 1 月.
9. 富森 英生, 横田 裕介, 大久保 英嗣: ルールベースの問合せ処理機構による協調型センサネットワークの実現, 情報処理学会研究報告, 2009-MBL-48, pp. 57-64, 2009 年 1 月.
10. 加古崇文, 横田裕介, 大久保英嗣: 異種センサを統合したセンサネットワークにおける長期運用を考慮した経路決定法, 情報処理学会研究報告, 2009-MBL-48, pp.65-70, 2009 年 1 月.
11. 須田剛文, 酒匂一成, 里見知昭, 深川良一: 降雨による表層すべり型崩壊を対象としたモデル斜面崩壊実験, 第 43 回地盤工学研究発表会平成 20 年度発表講演集, pp.1959-1960, 2008.
12. 平井一弘, 酒匂一成, 深川良一, 横田裕介, 大久保英嗣: ワイヤレスセンサネットワークを用いた広域斜面モニタリングシステムの開発に関する基礎的研究, 平成 20 年度関西支部年次学術講演会講演概要, p.III-10, 2008.
13. K. Hirai, K. Sako, T. Satomi and R. Fukgawa : Study of field monitoring system using wireless sensor network for slope failure due to rainfall, The 7th Joint Japan-Korea Symposium on Geotechnical Engineering, pp.45-52, 2008.

2007 年度

1. 松尾 英治, 鈴木 和久, 横田 裕介, 大久保 英嗣: センサノード向け OS における消費電力の低減のための協調型タスクスケジューリング, 情報処理学会研究報告, 2008-ARC-176/2008-EMB-7, pp. 65-70, 2008.
2. 藤崎友樹, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: 無線アドホック通信を利用したセンサネットワーク向け協調ストレージシステム, 情報処理学会研究報告, 2008-MBL-44/2008-UBI-17, pp. 149-156, 2008 年 3 月.
3. 富森英生, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: センサノード上の時系列データに対するルールベースの問合せ処理, 電子情報通信学会 第 19 回データ工学ワークショップ, DEWS2008 D6-1, 2008 年 3 月.
4. 金丸 達雄, 横田 裕介, 大久保 英嗣: センサ・アクチュエータネットワークにおける仮想ネ

ネットワークの構成と資源管理機構, 情報処理学会研究報告, 2008-EMB-10, pp. 67-74, 2008 年 11 月.

5. 金丸達雄, 松尾英治, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークにおける通信モジュール再利用のためのクロスレイヤ処理機構, 情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集, 2Z-5, 2008 年 3 月.
6. 陶山優一, 藤崎友樹, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: 斜面防災システムにおける耐障害性を考慮した P2P レプリケーション手法, 情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集, 3T-1, 2008 年 3 月.
7. 横田裕介, 大久保英嗣: 広域に分散したセンサネットワーク群に対する問い合わせ処理機構, 情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集, 3E-1, 2008 年 3 月.
8. 村上貴彦, 松尾英治, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: アプリケーションの構造を視覚化する nesC 用開発環境の提案, 情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集, 1Q-8, 2008 年 3 月.

2006 年度

1. 後藤隼式, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークにおけるスケラビリティを考慮したクラスタ間マルチホップネットワークの構成, 情報処理学会第 69 回全国大会講演論文集, 第 3 分冊, 6V-4, 2007 年 3 月. (学生奨励賞)
2. 植田裕規, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークにおける Jini による柔軟なゲートウェイサービスの構築, 情報処理学会第 69 回全国大会講演論文集, 第 3 分冊, 6V-5, 2007 年 3 月.
3. 高原資史, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークにおけるトポロジの部分再構築方法, 情報処理学会第 69 回全国大会講演論文集, 第 3 分冊, 6V-6, 2007 年 3 月.
4. 鮫島清豪, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークにおける非線形連立方程式の解法による位置推定方式の実現, 情報処理学会第 69 回全国大会講演論文集, 第 3 分冊, 6V-7 2007 年 3 月.
5. 富森英生, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: 時間指定可能なクエリ処理システム, 情報処理学会第 69 回全国大会講演論文集, 第 3 分冊, 6V-8, 2007 年 3 月.
6. 高木敬介, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: TDoA 測位技術を利用した高精度時刻同期手法の実装, 情報処理学会第 69 回全国大会講演論文集, 第 3 分冊, 6V-9, 2007 年 3 月.
7. 横田裕介, 大久保英嗣: 疎結合による広域に分散したセンサネットワーク群の統合機構, 情報処理学会第 69 回全国大会講演論文集, 第 3 分冊, 1E-5, 2007 年 3 月.

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

立命館大学防災システム研究センター防災・情報システムシンポジウムにおける研究成果公開
(パネルによる展示および説明)

- ① 第4回 2007年1月26日、於：京都センチュリーホテル
「防災と安全のための複合システム研究拠点を目指して」
(学内：46名、学外：42名、合計：88名)
- ② 第6回 2008年1月18日、於：京都センチュリーホテル
「防災と安全のための複合システム研究拠点を目指して」
(学内：40名、学外：61名、合計：101名)
- ③ 第8回 2009年1月23日、於：ホテルグランヴィア京都
(学内：43名、学外：50名、合計：93名)
「災害の激化に備えるー防災システム研究センターの5年間の総括と展望」

立命館大学防災システム研究センター研究成果公開

(パネルによる展示および説明)；研究センター5年間の総括する記念行事

- ① 研究成果公開 2008年10月31日、於：立命館大学びわこ・くさつキャンパス
(学内：166名、学外：35名、合計：201名)

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

既述のように、本研究は、1) 現地斜面における防災システムの検討、2) 斜面防災システムに関する検討、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の大きく3つに分けられる。ここでは、それぞれの項目における今後の課題と展望について述べる。

1) 現地斜面における防災システムの検討

現地斜面において実施した計測結果に基づいた課題を以下にまとめる。

計測内容における課題として、ワイヤレスノードの電源低下が計測値の誤差を生じさせるケースが挙げられる。現在、販売企業に原因の特定を依頼中である。また、ケーブル部には保護管を巻くなどの動物対策が必要である。

次に、ワイヤレスセンサーネットワーク関連の課題であるが、一般にセンサーネットワーク

では、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ため、輻輳の発生によるデータの取りこぼしや通信量の増加にともなうノードの消費電力の増加といった問題が生じ、電力消耗の原因ともなる。そのため、ノードの省電力化は重要な課題の一つである。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。通信効率の悪化の可能性もあり、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し、通信効率の悪化を防ぐ必要がある。

データ収集・分析ソフトウェアに関する動作に関して、より大規模なネットワークを扱う際に“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”や、“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みえる不具合”などの動作事例が見られた。そこで、センサーノードの通信停止を検出し可視化する機能やデータ転送ツール（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。

2) 斜面防災システムに関する検討

斜面崩壊兆候検知アルゴリズムに関しては、アルゴリズムの精度を上げるために多くのデータでタイムチューブ理論の各種パラメータの洗練をする必要がある。また、検知アルゴリズムの今後の展開として、各テンシオメータ設置地点における間隙水圧変動を検知していくことで、水みちの有無や最適な計測地点の提案を行える可能性がある。

斜面の安定性の定量的評価手法に関しては、進行性崩壊のプロセスを考慮できる安定解析手法について検討する必要がある。また、入力パラメータ（特に、せん断強度）の設定や試験方法について検討していく必要がある。現在、進行性崩壊に対する解析手法として、SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法の適用などを検討している。

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

ワイヤレスセンサーの電源の長寿命化に関しては、本研究においても少なくとも3~4カ月は、電池交換が不要となるような回路の開発を行ってきた。現在は、ワイヤレスノードに太陽電池パネルと充電電池を装備したのもも製品として広まり始めており、今後の技術革新により、さらに長期の計測が可能となろう。耐候性については、雨水等の外部からの侵入は防げるが、内部の結露については、防水BOXの改良が必要である。テンシオメータの自動給水装置については、すべてのテンシオメータに設置するとコストや電力に負担がかかることから、脱気水の抜けやすい部分に限った方がよいと考えられる。また、ポラスカップの空気侵入値の高いものや形状の変更により、水の抜けを緩やかにし、設置の負担も軽減できる可能性がある。

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

従来のシステムよりも、安価で、設置が容易で、センサーの追加・削除の自由度が高い本システムを用いることで、多地点での道路法面の安定性評価に必要なデータの蓄積が容易となる。また、本研究で用いた技術は、計測対象が異なる場合にもすぐに応用できる。さらに、得られたデータの傾向をデータベースに蓄積し、モデルのパラメータを洗練していくことにより、斜面の変状を高い確率で検知することができたり、最適な計測箇所を判断できたりすることができる。

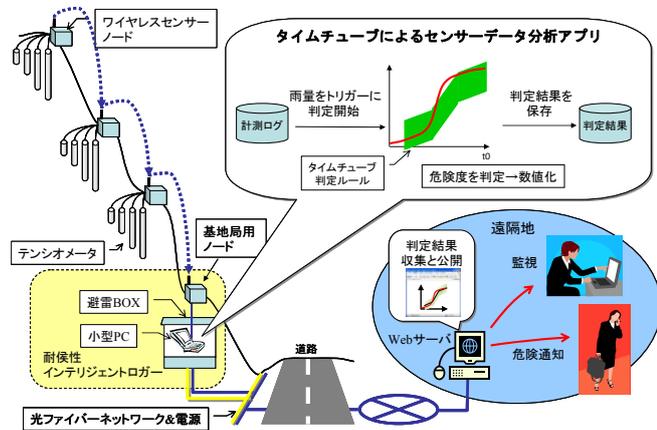


図-10 斜面防災システム構成図

⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今後の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

研究目的の達成度：

道路管理者へのヒアリング、コスト試算、斜面安定評価手法の検証、ワイヤレスセンサーネットワークシステムの現地適用に向けた開発、テンシオメータのメンテナンス手法の提案、室内および現地斜面における試験運用などを実施した結果から、当初の斜面防災システムにワイヤレスセンサーネットワークシステムを利用し、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という目的を十分達成することができた。

研究成果：

斜面安定評価システムに関しては、基本設計を行い、試験結果を用いた妥当性の評価および各種パラメータの設定方法などについて検討した。また、センサーネットワークシステムに関しては、段階的に改良を加えながら、最終的に現地斜面へ適用することができ、従来の有線システムと同等の計測をより安価に実施できることが確認された。ワイヤレスセンサーに関しては、新たな機器の開発には莫大な費用がかかることが判明し

たため、本研究では、既存の機器を組み合わせることで対応した。これまで斜面モニタリングで使用されてきた伸縮計などの機器のワイヤレス化などに成功した。以上のことから、ほぼ計画通りの成果を得ることができた。

今後の展望：

斜面防災システムに関して、斜面崩壊兆候検知アルゴリズムは、データの蓄積による精度向上が期待される。また、斜面内の水分挙動の分析により最適な計測地点や計測数などの提案を行えるような機能を追加できる可能性がある。また、定量的な評価手法として、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) などの新たな解析手法を取り入れることで、より多くの斜面崩壊モードの定量的評価を実施できる。ワイヤレスネットワークシステムに関しては、ワイヤレスノードの電源部分の太陽電池パネル化など技術開発が進んできており、より安定したシステムの構築が可能となる。以上のことから、本研究成果のさらなる発展や適用範囲の拡大が見込める。

道路政策の質の向上への寄与：

従来の降雨量などに基づく斜面監視に、地盤特性の影響を受ける間隙水圧の変動挙動を加えることで、より斜面の状態を把握できるようになると考えられる。また、システムのワイヤレス化により、従来よりも安価な導入・運用コストで耐候性が高く、観測点の追加・変更・段階的な規模の拡大などが容易な柔軟性のあるシステムが構築できるといったメリットがある。

研究費の投資価値：

道路管理者の斜面モニタリングにおけるニーズに対応するシステムを構築することができ、研究成果としても現地斜面におけるシステムの試験運用まで実施し、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の実現可能性に関する多くの知見を得ることができた。よって、研究投資価値は、非常に高いものとする。