

無線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

Experimental Study on the Application of Wireless Sensor Network for Slope Disaster Mitigation

平井一弘¹・里見知昭²・酒匂一成³・深川良一⁴

Kazuhiro Hirai, Tomoaki Satomi, Kazunari Sako and Ryoichi Fukagawa

¹立命館大学大学院 理工学研究科創造理工学専攻 博士課程前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate student, Graduate School of Ritsumeikan University, Advanced Science and Engineering Major

²立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 博士課程後期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate student, Graduate School of Ritsumeikan University, Integrated Science and Engineering

³立命館大学准教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Reserch Organization

⁴立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

Slope failures during rainfall damage a lot of human lives and heritages. Therefore, constructing a warning system for slope failure is important. In order to quantitatively evaluate slope stability during rainfall, it is advisable to estimate seepage behavior in widespread slope. In our research group, the field monitoring system employed wire-communication has been used. However, this system has some problems such as: wire-damage by animals and difficulty of expansion, and so on. In this paper, a field monitoring system employing wireless sensor network is explained based on indoor and in-situ tests. Consequently, it was found that this system is useful to understand seepage behavior in widespread slope.

Key Words : *Wireless Sensor Network, Slope Failure, Tensiometer*

1. はじめに

わが国では、梅雨期や台風襲来期に、多くの降雨による斜面崩壊が発生している。斜面崩壊に対する危険度をリアルタイムで予測し、かけがえの無い人命や文化財を守ることは非常に重要である。斜面の安定度の変化には地盤内の水分挙動が大きく関連しており、これまで、斜面内の水分挙動を計測し、降雨時の斜面崩壊の定量的評価を行うためのモニタリングシステムを文化財後背斜面に設置し、長期計測を実施してきた¹⁾。

表1 無線化に伴う問題点の解決

従来の問題点	通信のワイヤレス化に伴うメリット
落雷時に全ての計測機器が破損・故障	⇒ 被害を直接受けたノードのみが故障。被害のないノードで新しいネットワークを形成
動物によるケーブルの破損	⇒ ワイヤレスなので配線そのものが不要
配線コストが高い	⇒ ノードを加えるのみで自動的にネットワークに加わる
システム変更は配線からやり直す必要がある	⇒ 広範囲にわたる計測が可能
計測範囲が配線範囲に制限される	⇒ チャンネル数の制限なし
計測機器の数がロガーのチャンネル数に制限される	

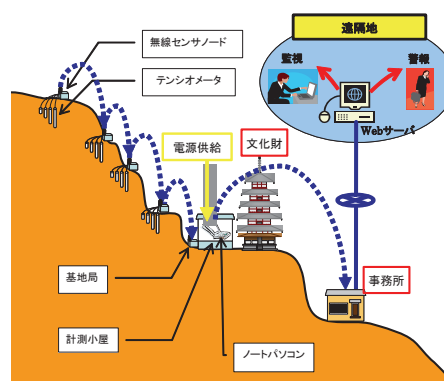


図1 無線システムのイメージ

しかし、これまでシステムを運営するなかで、落雷時に全計測機器が破損したことや、動物・自然劣化によるケーブルの断線、配線コストが高いなどの問題点や、計測項目の制限(ロガーのチャンネル数)、計測範囲の制限(配線の範囲)など、システムの拡張・変更に必要な制約があるという短所に直面してきた。本研究では、その対策として通信の無線化を提案し、表1に示すような解決を目指す。そこで、無線センサネットワークの斜面防災への適用性の検討をテーマとし、無線で取得されるデータの妥当性を確認するための室内降雨実験と、屋外環境への適用性を確認するための現地データ取得実験を行った。これらの実験を通じて、無線通信に関する問題を発見・解決する。将来的には、実用的な広域斜面モニタリングシステムを構築し、図1に示すように文化財の後背斜面に適用することで、地元住民・観光客・寺社職員の避難および移動可能な文化財の保護につなげる。

2. 無線センサネットワークの概要

写真1、写真2に本研究で使用するセンサ基板およびノードを示す。気象観測用基板(クロスボー社製MTS400)では湿度、温度、気圧、照度、加速度のセンサが搭載されている。外部センサ接続用基板(クロスボー社製MDA320)には外部センサを結線できる。これらの基板はセンサノード(クロスボー社製MPR2600J)に取り付けてデータの転送を行う。データとしては、それぞれの計測データに加え、ノードの電池残量や通信経路に関する情報を同時に取得できる。これらの情報はZigbee通信によって基地局となる基板に直接、または別のセンサを経由して間接的に送信される。Zigbee通信とは、無線LANよりも狭い範囲(数m~数十m)で用いられるネットワーク WPAN(Wireless Personal Area Network)の一種であり、表2に示すように通信速度はBluetoothやUWBに劣るものの、コストがかからず消費電力も少ないという特徴を持っている。これらのセンサは自己編成機能を持ち、通信状態に応じて最適な通信経路を選択することができる。本実験では、MDA320をテンシオメータのデータ取得用に、MTS400をノードの追加・削除に伴う通信状態の変化を観測するために、それぞれ使用している。なお、屋外データ取得実験2ではMDA320の代わりにMDA300を用いた。



写真1 気象観測用基板と 写真2 外部センサ接続用基板と
センサノード センサノード

表2 代表的な WPAN の種類と仕様

	Bluetooth	UWB	ZigBee
		(Ultra Wide Band)	
準拠仕様	IEEE802.15.1	IEEE802.15.3a	IEEE802.15.4
通信速度	1Mb/s	480Mb/s	250kb/s
使用周波数	2.4GHz	3.1-10.6GHz	2.4GHz
			868MHz(Europe) 915MHz(USA)
通信距離	10m-100m	10m(110Mbps) 4m(200Mbps)	10m-75m
消費電力	120mW	100mW	60mW

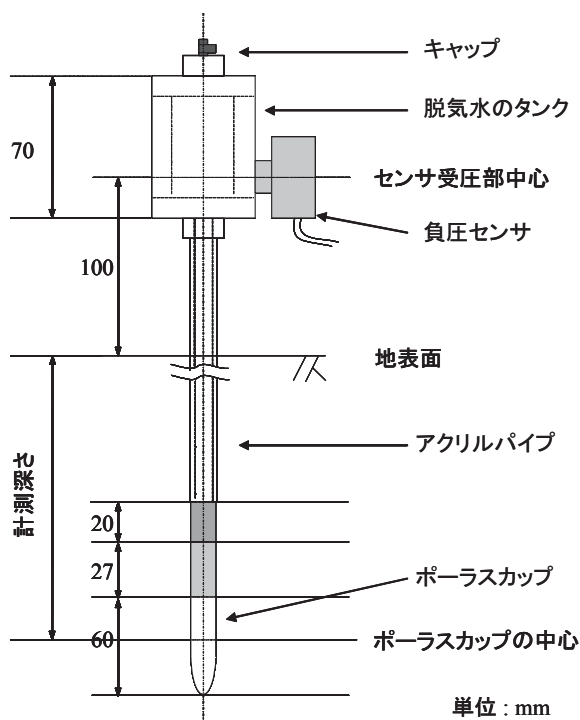


図2 テンシオメータ

3. テンシオメータ

テンシオメータの概観を図2に示す。テンシオメータは地盤内の間隙水圧の時系列変化を測定するために用いる装置であり、本研究室で用いているテンシオメータは、セラミック製のポラスカップ、アクリル

パイプ、脱気水タンク、キャップから構成され、脱気水タンクには負圧センサ(コパル電子PS7-102V)が付いている。テンシオメータのポラスカップはあらかじめ脱気されており、テンシオメータを不飽和土に埋設すると、土が水分を吸収しようとする圧力とテンシオメータ内の脱気水の水圧が、ポラスカップの間隙部分に充填されている脱気水と平衡する。この原理を用いて、テンシオメータ内の脱気水の水圧を土中の間隙水圧として計測している。このテンシオメータ内の脱気水の水圧の変化を負圧センサで感知し、電圧値として出力する。なお、負圧センサが水に濡れると故障する恐れがあるため、室内土槽試験ではビニール袋をかぶせる防水処置を、また屋外データ取得実験では温度変化による影響を軽減するために断熱キャップによる防水・断熱処置を施した上で設置している。

4. 室内降雨実験

土粒子密度 2.6g/cm^3 の信楽産まさ土を初期含水比5%に調整し、湿潤密度 1.6g/cm^3 、斜面勾配 45° の斜面を形成し、降雨強度 50mm/hr の雨を降らせた。図3に示すように、斜面部および斜面上部にテンシオメータを20、40、60cmの深さに設置し、4本、3本に分けて2つのMDA320によって2秒ごとにデータを取得した。なお、本実験ではMTS400は用いていない。

実験結果は図4に示す通りである。ここで、「手前」・「奥」とは斜面上部に設置したテンシオメータのうち、斜面正面から見て前列・後列に設置したものをそれぞれ示す。結果を見ると、雨水の浸透による間隙水圧の増加現象が設置深さの浅いほうから順に見られ、降雨の浸透によって間隙水圧は0付近まで上昇した。これは有線接続時²⁾と似通った傾向・値であり、このことから、無線によるデータ取得は妥当なデータであるといえる。しかし、出力されたデータの中には大きなノイズを含んでいるものが多くみられた。

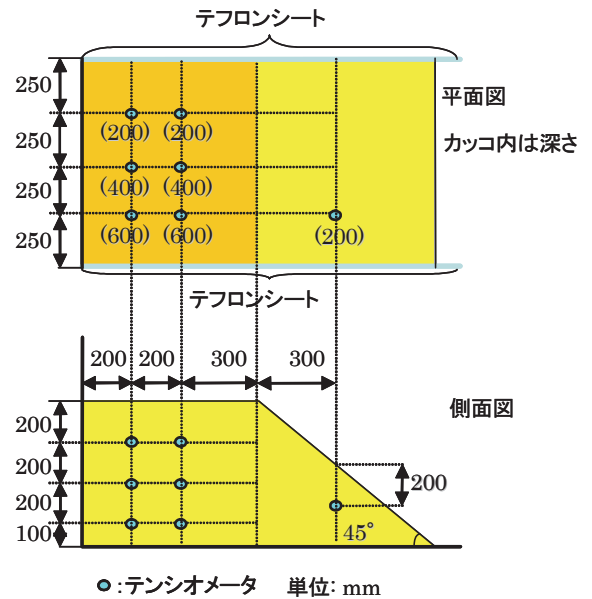


図3 斜面形状とテンシオメータの設置位置

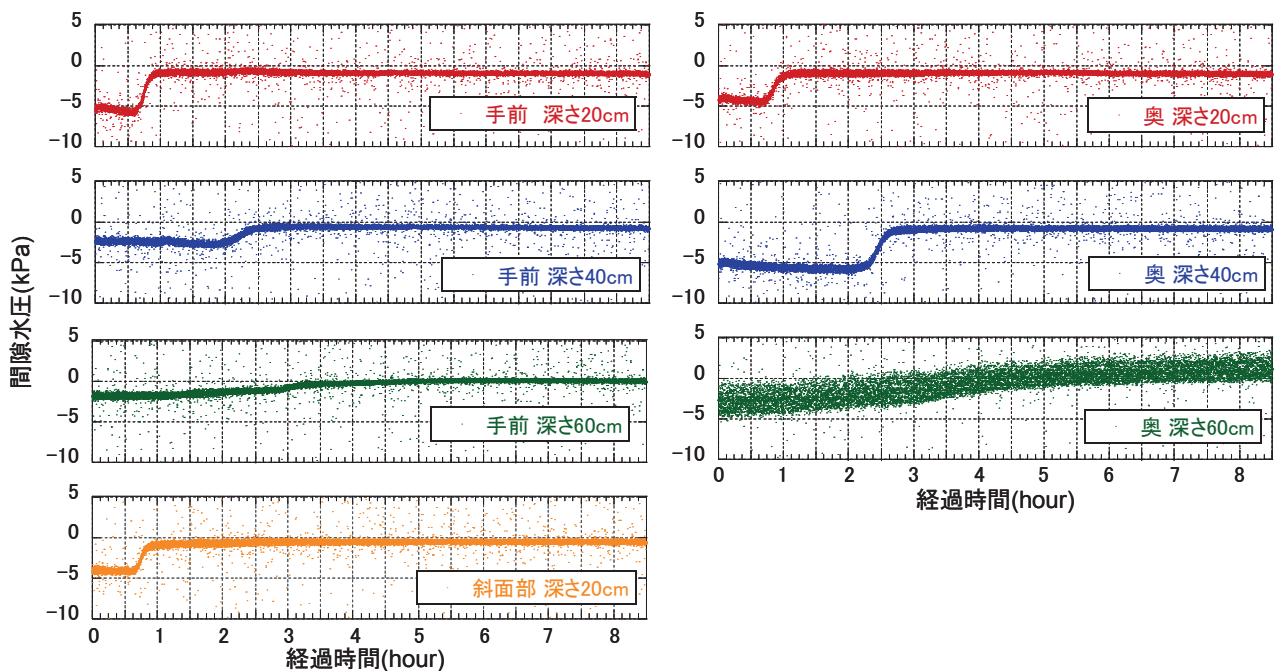


図4 室内降雨実験結果

5. 屋外データ取得実験1

ここでは屋外環境における無線センサノードの通信特性を明らかにする。まず、通信距離を設定するためにセンサノードを防水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。その結果、10m程度の間隔であれば問題なく通信できるが、15m程度では通信が不連続になることがわかった。このことから、斜面モニタリングシ

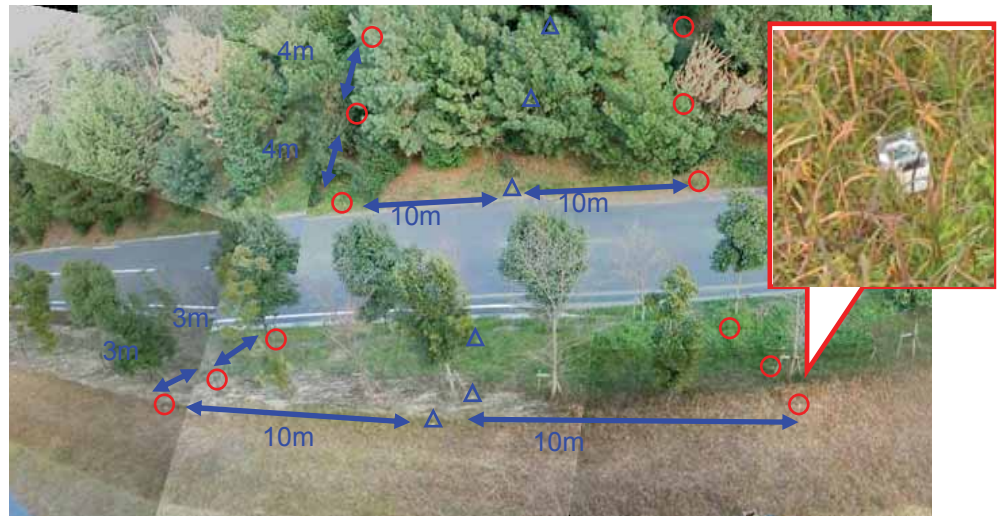


写真3 センサノードの配置状況

○ : MTS400
△ : MDA320

ステムの設置を想定する山中でのセンサノードの間隔は、安定したデータ取得が必要であることや、降雨時などに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。

次に、本研究ではMDA320とMTS400の2種の基板を用いたシステムを想定していることから、2種類以上の基板を1つのネットワークの中に混在させても両者とも正常に稼動するかどうかを調べた。また、ノード数が増加すると、通信が混み合うことでデータの取りこぼしが増加するのではないかと考え、多数のセンサノードからのデータを同時に取得できるかを確認した。実験は写真3のように道路を挟んだ斜面にセンサノードを1つのノードに中継が集中しないように格子状に配置した。なお、各センサノードから転送されてくるデータを受け取る基地局は写真撮影位置付近に設置し、最も近いセンサノードからの距離は15m程度である。また、計測間隔3分で、約24時間データ取得をおこなった。通信経路は、自己編成機能によって時々刻々と変化した。主な通信経路を図5に示す。2種類の基板とデータの込み合いに関して、特に大きな不具合は見られず、データ転送は問題なくできていた。自己編成機能の作動も確認できた。

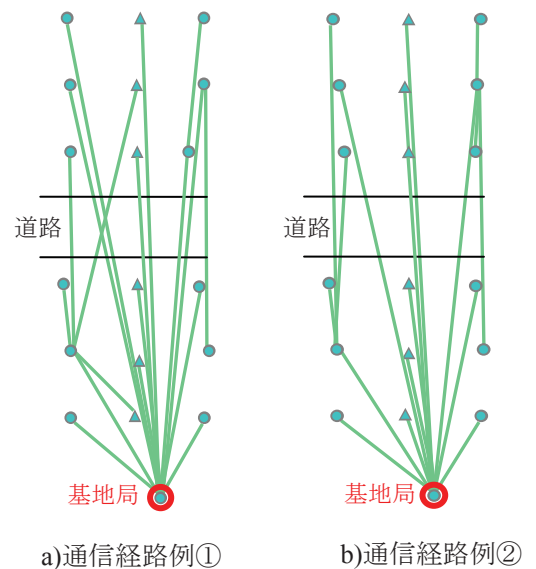


図5 主な通信経路の状況

6. 屋外データ取得実験2

この実験では、屋外データ取得実験1の検証結果をもとに、無線センサ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する。システムを写真4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と深さ20・40・60・80・100cmの5基のテンシオメータをMDA300に3本、2本に分けて接続し、設置した。これらの無線ノードは、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



写真4 システムの現地設置状況

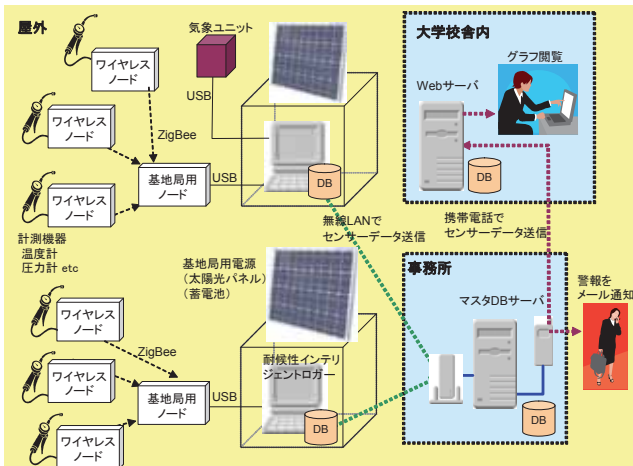


図6 システムの概要

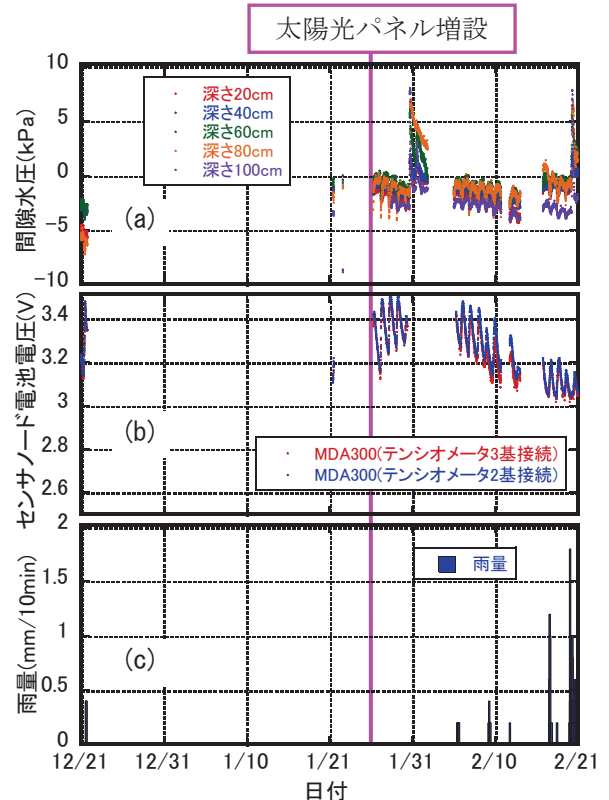


図7 ネットワークを通じて得られたデータ

- (a) 間隙水圧
- (b) センサノードの電池電圧
- (c) 雨量

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、センサノードとテンシオメータのエネルギー源としては、リチウム電池をそれぞれ2本、4本利用した。ここで、無線ノード、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。得られた無線ノードからのデータは図6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や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、無線センサ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。

次に結果を示す。図7はセンサ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-4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、数日間はデータの取得が可能であったが、その後、しばらくの期間、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ない期間については、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低下は図7(b)に示すようになった。センサ基板で取得するデータの精度を維持するは、MDA300で電圧2.7Vが必要となる。図7(b)から読み取れる電圧低下速度から、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、電圧低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5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、センサ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る。



写真5 防水BOXの結露

7. まとめ・今後の課題

本研究では、重要文化財後背斜面における斜面モニタリングシステムの無線化を目指した研究を実施した。以下に、本研究で得られた知見を示す。室内降雨実験からは無線センサを用いて得られたデータの妥当性が、屋外データ取得実験からは無線センサネットワークを用いた計測システムの稼動が、それぞれ確認された。室内降雨実験でみられたノイズは、屋外データ取得実験では確認されなかったことから降雨装置などの実験に用いた機器によるものである可能性が高い。実斜面での取得データに大きな影響を及ぼしていないことから、特に対策を講じる必要はないと考えられる。また、リチウム電池の交換は、最低でも3ヶ月程度に1度行えば良いので、システムの無線化に伴う大幅なメンテナンス頻度の増加はない。基地局部分の電源に関しては、現在、太陽光の発電量および基地局機器類の電力消費量を計測しており、今後、問題の解決に取り組む予定である。また、防水BOXの結露に関する課題もあわせて解決を目指す。本研究で提案する無線センサーネットワークを用いた斜面防災システムを用いることで、重要文化財後背斜面の広域的なモニタリングが、従来のシステムに比べより安価でかつ容易に実施することが可能であると考えられる。また、無線化によってモニタリングシステムの省スペース化が図られ、景観に配慮したシステムの構築が可能であるといえる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、立命館大学情報理工学部 講師 横田裕介氏、立命館大学情報理工学部 講師 原田史子氏には、たいへん有益な助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 酒匂一成,深川良一,岩崎賢一,里見知昭,安川郁夫:「降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング」,地盤工学ジャーナル,Vol.1,No.3 ,pp.57-69,2006.
- 2) 酒匂一成,須田剛文,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(土木学会西部支部),pp.21-26,2008.