

# 無線センサネットワークを利用した長期斜面 モニタリングに関する課題と改善

PROBLEMS AND IMPROVEMENT ON LONG-TERM SLOPE MONITORING  
USING WIRELESS SENSOR NETWORK

酒匂 一成<sup>1</sup>・梅田 和明<sup>2</sup>・的場 洋平<sup>3</sup>・深川 良一<sup>4</sup>・北村 良介<sup>5</sup>

Kazunari SAKO, Kazuaki UMEDA, Yohei MATOBA, Ryoichi FUKAGAWA

and Ryosuke KITAMURA

<sup>1</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: sako@oce.kagoshima-u.ac.jp

<sup>2</sup> 西松建設株式会社西日本支店 (〒540-8515 大阪市中央区釣鐘町 2-4-7)

E-mail: kazuaki\_umeda@nishimatsu.co.jp

<sup>3</sup> 立命館大学大学院理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: rv007077@ed.ritsumei.ac.jp

<sup>4</sup> 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: fukagawa@se.ritsumeikan.ac.jp

<sup>5</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: kitamura@oce.kagoshima-u.ac.jp

**Key Words:** slope monitoring, wireless communication, suction, tensiometer

## 1. はじめに

降雨時に表層崩壊を生じるような斜面の安定性を評価するためには、斜面内の浸透挙動を把握することが重要であると考えられる。そこで、著者らは、文化財の背後にある自然斜面において、地盤内の水分挙動を把握する観測システムを設置し、長期計測を実施してきた<sup>1)</sup>。その際に有線接続によるシステム(以降、有線計測システムと称す)を使用しており、設置コストやセンサ数および計測範囲の制限、落雷による故障などの問題があった。これらの問題を解決するため、近年では、無線通信技術を用いた斜面観測の実用化に関する研究が行われてきており、例えば、小泉ら<sup>2)</sup>は、スリープ機能を持った無線計測システムを屋外斜面へ適用し、電源の長寿命化に関する検討、通信の安定性、機器の精度などについて、また、瀬古ら<sup>3)</sup>は、斜面の

変動を傾斜計と無線計測技術を用いて観測してきている。

著者らも、計測システムの設置および運用の容易化、信頼性の向上、多点計測による斜面状況の監視精度向上、コスト削減を実現するために無線センサネットワークを利用した計測システム(以降、無線計測システムと称す)について研究を行ってきた<sup>4),5)</sup>。また、無線計測システムで得られたデータの妥当性を検討するために有線計測システムとの比較を行った<sup>6)</sup>。一連の研究において、無線計測システムの屋外での長期運用において、センサおよび無線通信ノードの電源供給や機器類の耐候性に関して、改良の余地があることが分かった。

本論文では、無線計測システムの屋外での長期運用に関する電源供給および耐候性の課題を示し、それらの問題を改善するための室内土槽の斜面ならびに立命館大学内の屋外斜面における検証試験を実施した。

## 2. 無線計測システムの概要と課題

### (1) 無線計測システムの概要

無線計測システムの現地適用性を検証するために滋賀国道事務所聖田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（滋賀県大津市）の敷地内にある人工盛土斜面で長期計測を実施した<sup>5)</sup>。本現地計測では、降雨時の斜面内の間隙水圧および温度、湿度、風速、日射量、雨量などの気象データの観測を行った。

写真-1に計測機器の設置概要および図-1に無線計測システムの概要図を示す。間隙水圧を計測するためにテンシオメータと無線ノードが接続された無線センサノードを使用した。試験で使用した無線ノード（Crossbow社製、MPR2600J）を写真-2に示す。また、無線ノードに接続可能な外部センサ接続用のセンサ基板（Crossbow社製、MDA300、写真-3）を使用した。

現地斜面には、二つのネットワーク（M2、M3）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、各計測地点には深さ20、40、60、80、100cmの5基のテンシオメータを2つの無線ノードに3本、2本に分けて接続し設置した。これらの無線ノード部分および電源部分は、防水BOXに入れられ、乾燥剤を封入し設置した（写真-4）。計測データとして、間隙水圧値、ノードの電池残量や通信経路に関する情報が得られ、それらは基地局のノートPCへZigbee通信により送信される。また、M3ネットワークには気象ユニット（Davis社製、Vantage Pro2）を設置し、温度、湿度、

風速、日射量、雨量などを計測する。ワイヤレスノードからのデータは図-1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。

機器の電源について、基地局は、基地局の電源確保が困難な状況を想定し、太陽光発電（太陽光パネル・蓄電池）によってPCおよび気象ユニットの電力を供給している。また、センサノードの電源としては、リチウム電池を2本利用した。テンシオメータ（印加電圧12V）の電源はリチウム電池4本（6V）を昇圧して供給した。なお、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ており、テンシオメータには計測時のみ電源を供給するような回路を作製した。

図-2にM3ネットワークの中段に設置したテンシオメータおよび気象ユニットで計測された2009年2月19日

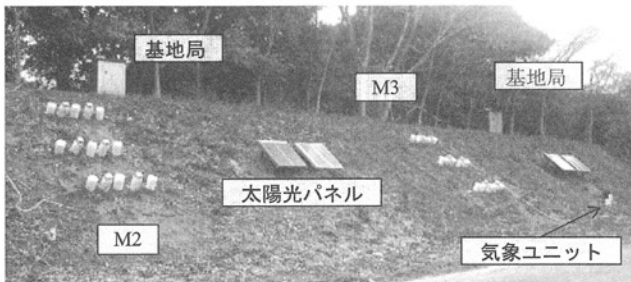


写真-1 無線計測システムの設置概要

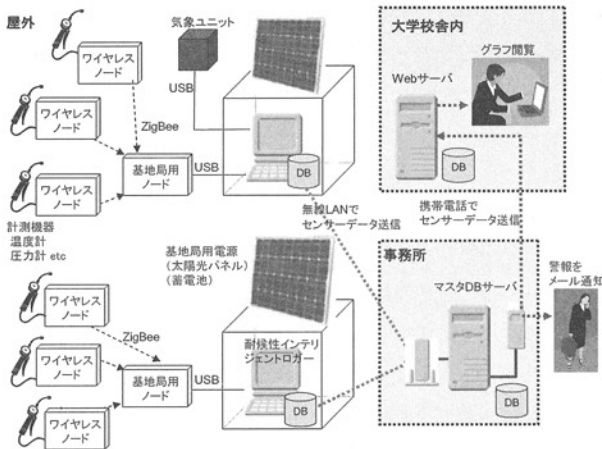


図-1 無線計測システムの概要図



写真-2 無線ノード（型式：MPR2600J）

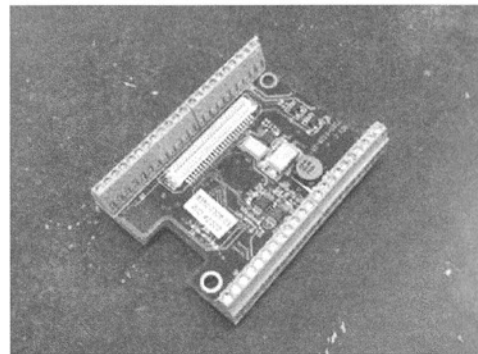


写真-3 センサ基板（型式：MDA300）

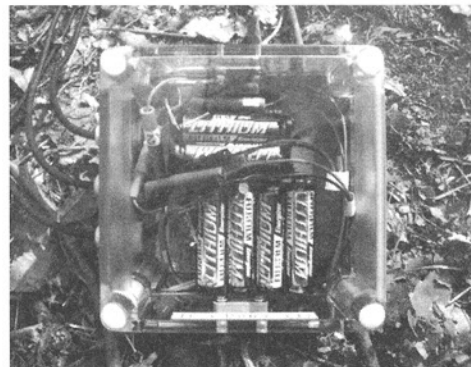


写真-4 防水ボックスと電源

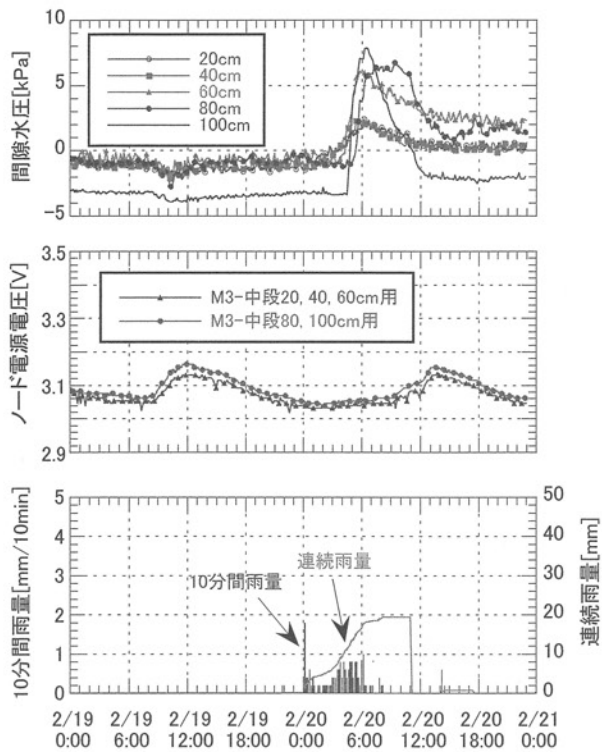


図-2 間隙水圧、ノード電源、雨量の時系列変化 (M3)

から2月20日のデータを示す。図より、降雨に伴い晴天時に負の値を示していた間隙水圧が正值を示すようになっていることがわかる。しかしながら、本計測地点の地質が粘土質であり、自然含水比も常に高いことも影響しているが、間隙水圧の値が全体的に高いと思われる。この原因として、無線ノードの電池残量に着目してみた。これは、室内土槽試験などで無線ノードの電源電圧が低下した際に、テンシオメータの出力値の増加が時折見られたためである。しかしながら、図-2に示すように、電圧値が3.0V以上の安定した状態であり、特に計測結果に影響を与えているとは考えられない。また、的場ら<sup>9)</sup>が無線計測システムで得られたデータの妥当性を検討するために有線計測システムとの比較を実施したが、無線計測システムでの計測結果の妥当性を確認できているため、間隙水圧の値が全体的に高くなっている原因は現在のところ未解明である。

## (2) 無線計測システムの長期運用における課題

ここでは、上述した無線計測システムを用いて、長期斜面観測を行う場合の課題についてまとめる。これまで電源用電池としてリチウム電池を用いてきたが、需要の低下に伴い、入手困難になってきている。そこで、アルカリ電池やニッケル水素電池の適用を現在試みている。アルカリ電池などを用いると長期計測では、無線ノードおよびテンシオメータへの電源供給において、時間とともに電池の電圧が低下する問題がある。その一例として、

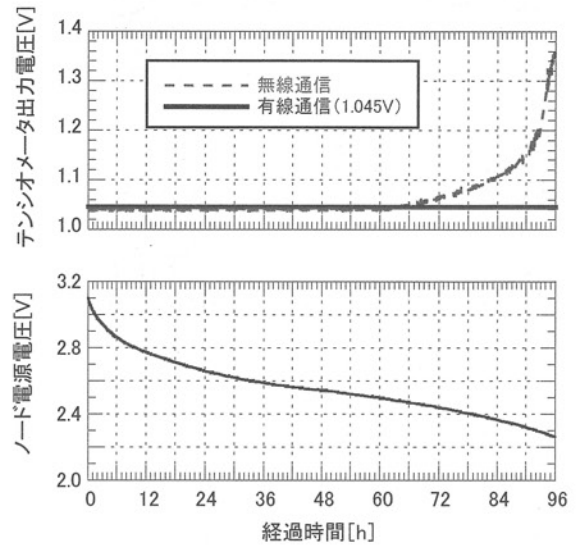


図-3 無線ノード電源電圧とテンシオメータ出力電圧の関係

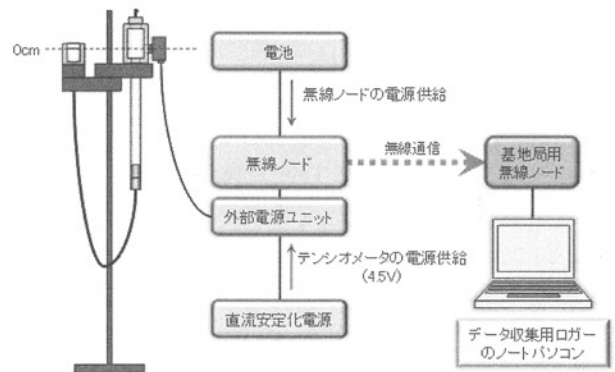


図-4 電源供給問題に関する確認試験装置の概要

図-3に無線ノード電源電圧の変動とテンシオメータ出力電圧の関係を示す。図-3には、有線計測システムで得られたテンシオメータの出力電圧も示されている。また、図-4に試験装置概要を示す。この試験では、テンシオメータの電源は直流安定化電源から常に4.5Vを供給し、外部電源ユニット内にある昇圧回路で12Vを供給している状態で、無線ノード電源電圧が低下した際に、無線通信でパソコンに記録されたテンシオメータの出力電圧値がどのように変動するかを確認した。図-3より、有線計測システムでの計測結果は、常に一定であるが、無線計測システムでの計測結果は、ある程度無線ノード電圧が低下した際にテンシオメータの値も変動する結果が得られた。このことから、長期斜面観測結果の管理を行う上で、無線ノード電圧値についてどの程度低下した場合に計測結果が変動し始めるかについて検討する必要がある。

次に、無線ノード、センサ基板および電源電池が収納された防水ボックスに関する課題を示す。雄琴管理基地での長期斜面観測は、約1年かけて行われた。その間、防水ボックスの内部には乾燥剤を封入したが、季節に関

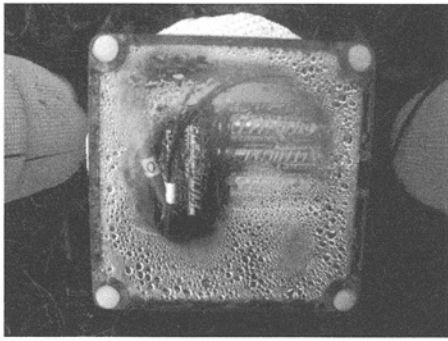


写真-5 防水ボックスの結露

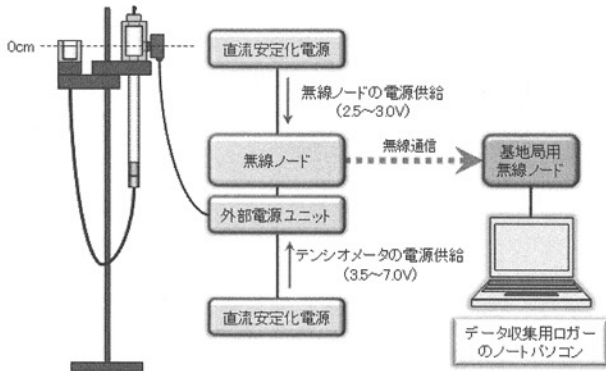


図-5 電源電圧検証試験の概要

係なく結露が発生していた. その中でも冬期においては, 写真-5に示すような結露が防水ボックスの内側に発生し, 最終的にはボックスの半分くらいまで水が溜まった. テンシオメータの配線の引き込み穴が原因の1つであると考えたが, 引き込み穴を設けていない気象観測用無線ノードの防水ボックスにも結露が生じたことから, 他に原因が存在すると考えられる. ここで結露した水が防水ボックスの内部に溜まると, 無線ノードや外部電源制御ユニットの破損に繋がる恐れがある. そのため, 結露した水を抜く穴を設けるか, 結露を引き起こさない構造に改良する必要がある. ただし, 前者の対策では, 防水機能が損なわれるという問題点がある. また, 後者の対策では, 防水性能を高めながらメンテナンスが容易に行える構造を目指す必要がある. また, 夏期においては, 基地局用のラックおよび防水ボックスの内部温度が非常に高くなった. 特に日中の最高温度は, 防水ボックス内部が約60~80℃であった. この高温状態が長期で続くと, 機器が故障する恐れがある. 特に, センサ基板の動作範囲は, 0~60℃であることから温度の上昇を抑える対策を取らなければならない.

本論文では, 無線ノード電圧に対するテンシオメータの値の変動および防水ボックスの結露対策について, 3章および4章にまとめる.

### 3. 電源供給に関する検証実験

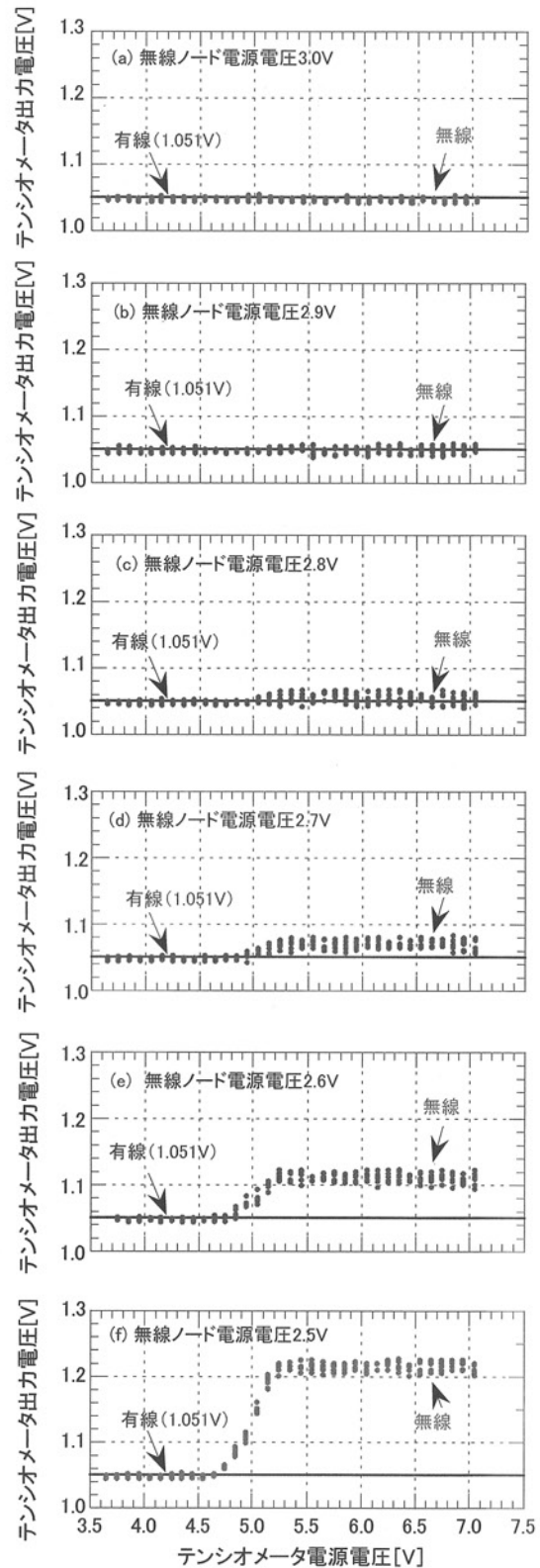


図-6 無線ノードおよびテンシオメータの電源電圧の影響

ここでは, 現在使用している無線ノード (MPR2600J) の電源電圧がどの程度低下すると, テンシオメータの出力電圧値 (計測値) に影響を及ぼすかについて検証試験を実施した. また, テンシオメータに供給する電源電圧の影響についても検証した. 図-5に検証試験装置の概要を示す.

本試験では、無線ノード (MPR2600J) およびテンシオメータの電源として、共に安定化電源装置を用いた。また、テンシオメータの出力値が無線ノード電源電圧以外の外的要因によって変動してしまうことを防ぐために、テンシオメータのキャリブレーションの台を用いて水頭差を 0cm に固定して試験を行った。本検証試験の基準値として、有線計測システムでテンシオメータの出力電圧値を計測した。試験条件として、無線ノード (MPR2600J) の電源電圧を 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0V の 6 つのパターンに設定した。また、各々のパターンでテンシオメータの電源電圧を 7.0V から 0.1V ずつ低下させて、テンシオメータの出力値を計測した。

試験結果を図-6 に示す。無線ノードの電源電圧が 3.0V の場合、テンシオメータの出力値は自身の電源電圧に関わらず基準値と等しくなった。しかし、無線ノードの電源電圧を 2.9V から 2.5V に低下させていくにつれて、テンシオメータの出力値は徐々に基準値よりも高くなる傾向にあった。また、テンシオメータ電源電圧が高いほど、無線ノード電源電圧が低い場合の影響が大きくなった。

この結果より、無線ノードの電源電圧が低く、テンシオメータの電源電圧が高い状態であると出力値、つまりテンシオメータの計測値に大きな誤差が生じるということがわかった。よって、システムのメンテナンス時における電池交換が計測に大きく影響する恐れがあるということに注意しなければならないといえる。この原因として、無線ノードに内蔵されている AD コンバータ (計測されたアナログ値をデジタル値に変換) は、無線ノード電源電圧を基準電圧としているが、電源電圧が変動することで、基準電圧より出力電圧が高いか低いかの判断に誤差が生じたためと思われる。つまり、無線ノードの電源電圧が常に 3.0V 以上の一定であれば電圧変動による計測誤差は生じないといえる。そこで、今回使用した無線ノード (MPR2600J) を用いる場合、安定回路を組み込んだり、電池本数を増加したりするなどの改良が必要となると考えられる。

#### 4. 耐候性に関する検討

ここでは、無線ノード、センサ基板や電池等が詰め込まれた防水ボックスに関する耐候性向上に向けた検討を行った。そこで、季節に関係なく生じる結露と夏期における日中の内部温度を抑えるために、発泡ポリエチレン製の断熱材を防水ボックスの周囲に貼り付けた。改良効果を検討するため、断熱材付きと断熱材無しものを同一箇所に設置した。この検証試験では、防水ボックス内に温湿度データログ (型式: TR-72U) を入れ、現地斜面に設置し、ボックス内の温度および湿度の計測および結露の有無に関する観察を夏期 (2011 年 6 月 25 日～29 日) と冬期 (2011 年 12 月 12 日～16 日) に行った。図-7 に夏期の計測期間における防水ボックスの内部温度の計測結果を示す。図よ

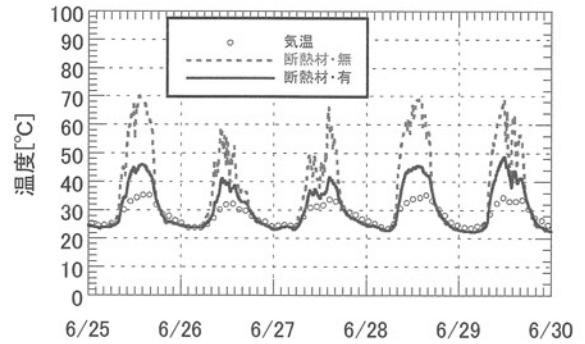


図-7 夏期 (2011 年 6 月 25 日～29 日) の防水ボックス内の温度

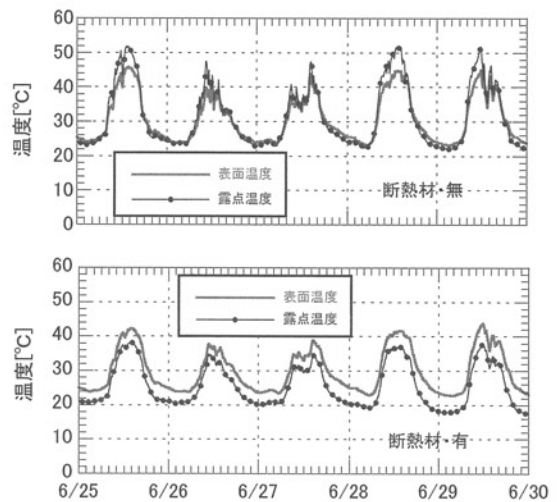
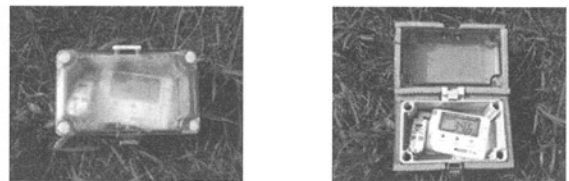


図-8 防水ボックス内部の表面温度と露点温度 (夏期)



(a) 断熱材・無し

(b) 断熱材・有り

写真-6 防水ボックスの結露状況 (夏期)

り、日中の最高温度が約 35°C であったが、防水ボックス (断熱材・無) の内部の最高温度は約 70°C まで上昇しており、センサ基板の仕様温度 60°C を超えているため、故障する恐れがあるといえる。一方、防水ボックス (断熱材・有) の内部の最高温度は約 49°C であり、断熱材によって内部温度が 20°C 近くも抑えられたことがわかる。

次に、防水ボックスの結露対策について考察する。結露は暖かい空気が冷たいものに触れると起こる (表面結露)。つまり、壁などの表面温度が露点温度よりも低くなると結露が発生する。そこで、露点温度および表面温度について算出した。ただし、表面温度には建築資材に対して用いる計算方法<sup>7)</sup>を用いており、算出結果に多少の誤差があると思われる。まず、夏期の防水ボックス内部表面温度と露点温度を図-8 に示す。防水ボックス (断熱材・無) は、日中に表面温度が露点温度より低くなるために、結露が起こ

りやすい状態となっていた。一方、防水ボックス（断熱材・有）は、昼夜問わず表面温度が露点温度よりも高い状態であったことから、結露の発生はないといえる。実際に、写真-6によると、断熱材無しの場合は防水ボックスに水滴が多く付着しているのに対し、断熱材を施した場合は水滴が全く見られなかった。

次に、冬期の防水ボックス内部表面温度と結露温度を図-9に示す。テンシオメータ用防水ボックス（断熱材・有）は、ほとんどの時間帯で表面温度が露点温度よりも高くなっていた。その他の防水ボックスでは、断熱材の有無に関係なく、表面温度と露点温度の温度差がほとんど無くなっていたことがわかる。また、断熱材無しの場合の方が、断熱材有りの場合よりも表面温度が高くなっていた。そこで、目視による観察では、テンシオメータ用無線ノードの防水ボックスには水滴が全く見られなかったのに対し、その他の防水ボックスには水滴が多く付着していた。

この2つの防水ボックスにおいて、結露が発生したものと発生しなかったものがあつた理由として、テンシオメータ用無線ノードの防水ボックスには開口部が存在していることが挙げられる。これはテンシオメータの配線差込口であり、それが換気口としての役割を果たしているのではないかと考えられる。換気を行わない場合、表面温度が外気に影響され、徐々に下がり、内部の湿度が高いために露点温度も高くなり、結露が起こりやすい状態となる。計測された2つの防水ボックス内部の湿度を比較すると、テンシオメータ用無線ノードの防水ボック

スの方が10%近く低かつたことから、配線差込口で換気されていた可能性が高いといえる。

以上より、防水ボックスに断熱材および通気口を施すことにより結露が生じにくくなるものと思われる。

## 5. まとめ

本論文では、無線センサネットワークを利用した長期斜面観測における電源および耐候性問題を指摘し、問題の発生原因および対策方法について検討を行った。本論文で得られた知見として、電源問題については、無線ノードの電源電池の低下により、計測値の変動が生じることが分かった。また、耐候性問題については、無線ノード、センサ基板および電池が詰め込まれている防水ボックスに生じる結露対策として、断熱材と通気口を施すことが有効であることが分かった。

謝辞：本研究に対して、科学研究費補助金（若手研究(A)，課題番号：24686056，（代表：酒匂一成））の援助を受けた。また、無線ノードの検証について、立命館大学情報理工学部横田裕介准教授には、多くの貴重なご助言をいただいた。ここに謝意を表します。

## 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，pp57-69，2006。
- 2) 小泉圭吾，小田和弘，平田研二，藤田行茂，上出定幸：スリープ機能を持った無線センサネットワークの斜面災害監視への適用，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010，pp.119-126，2010。
- 3) 瀬古一郎，王林，内村太郎，東畑郁夫，福田穰：斜面崩壊を対象とした監視ネットワークの構築とその危険予測について，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.251-256，2007。
- 4) 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。
- 5) 平井一弘，深川良一，酒匂一成，横田裕介，原田史子，里見知昭：ワイヤレスセンサネットワークを用いた斜面モニタリングシステムに関する一考察，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2009，pp.19-24，2009。
- 6) 的場洋平，酒匂一成，梅田和明，檀上徹，深川良一：無線通信技術を利用した斜面モニタリング結果の妥当性評価，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2011，pp.15-18，2011。
- 7) 山田雅士：建築の結露—その原因と対策，井上書院，pp.29-64，1979。

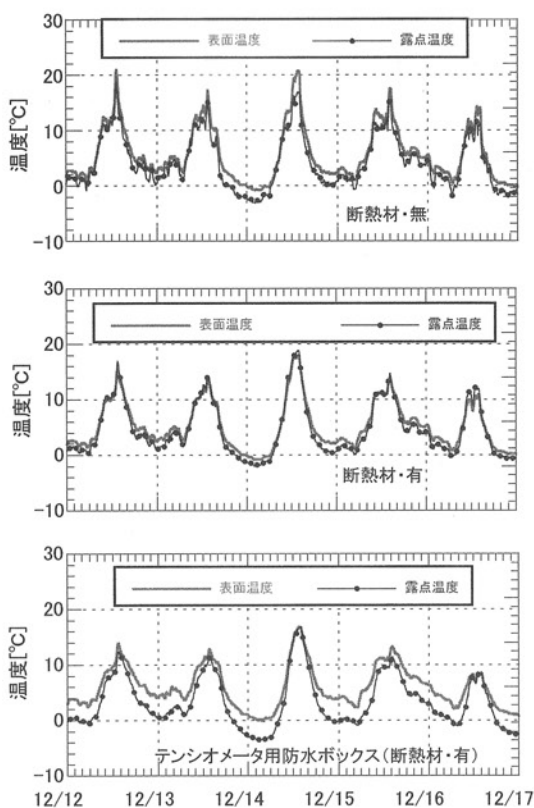


図-9 防水ボックス内部の表面温度と露点温度（冬期）

(2012.5.9 受付)