

# 無線センサネットワークを用いた活動斜面の傾斜量のモニタリング

池川洋二郎<sup>1\*</sup>・小早川博亮<sup>1\*</sup>・澤田昌孝<sup>1\*</sup>

Ben A. Abbott<sup>2</sup>・David A Ferrill<sup>2</sup>・Alan P. Morris<sup>2</sup>・Ronald N. McGinnis<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

<sup>2</sup>Southwest Research Institute, USA.

\*E-mail:ikegawa@criepi.denken.or.jp

斜面活動のモニタリングは、維持管理技術や減災技術の機能や効果を評価するために重要である。モニタリングのコスト低減や、広域化には新しい技術の導入が必要である。無線センサネットワーク (WSN) は、数時間のインターバルで数ヶ月以上、バッテリーで動作する。WSN には無線データ通信と計測の両機能がある。WSN は基本的な機能を備えるが、既存の WSN は斜面のモニタリングにそのまま利用できなかった。新たに斜面の傾斜量をモニタリングするための WSN を開発した。また、活動斜面のモニタリングに適用することで、この WSN の基本機能を検証することで、実用性を示した。

*Key Words: Maintenance, disaster prevention, ground environment, monitoring, wireless sensor network*

## 1. 緒言

我が国のエネルギーや交通などの社会基盤は、ほぼ整備されてきている。今後、既存構造物の維持管理の合理化や豪雨や地震などへの防災・減災技術の整備が重要になる。同時に、維持管理や防災・減災技術の機能や効果をモニタリングで評価することが必要である。このため、モニタリングのコスト低減と広域化のために技術開発が望まれる。

無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) は、無線通信によるデータ収集機能とセンサ機能を持つモニタリング・システムである。モニタリングの対象により、利用センサ、計測精度、計測頻度、通信法などの組合せは様々<sup>1)2)</sup>である。斜面のモニタリングでは、傾斜量、変位量、地下水位などの計測項目を、最小インターバルが1時間ほどの計測結果を、随時、データ収集している。この斜面モニタリングをバッテリーで稼動する WSN で行えば、電源線や通信線の敷設や付随する道路や電柱の建設のコスト低減、モニタリング設備の設置工期の短縮による迅速な計測開始ができる。さら

に、これらの長所でモニタリング領域の広域化が期待できる。

本報告では、WSN を斜面のモニタリングに利用するためにに行った開発概要<sup>3)4)5)</sup>と、開発した WSN の実用性を検証するため、活動斜面に適用したので概要を報告する。

## 2. 斜面用の無線センサネットワークの開発概要

### (1) 利用の想定

図-1 には、道路の両側が斜面になっている谷地形で、WSN を用いたモニタリングの想定図を示す。道路沿いでは、既存の電源線と、LAN が利用できることを想定している。黒四角で示す WSN の親機は、電源と LAN が利用できる箇所に設置し、斜面内に白丸で示す複数の子機を設置する。子機はバッテリーで計測と無線通信を行う。親機に回収されるデータは LAN 経由で利用する。無線通信が可能な子機の設置が可能な領域を灰色で示す。

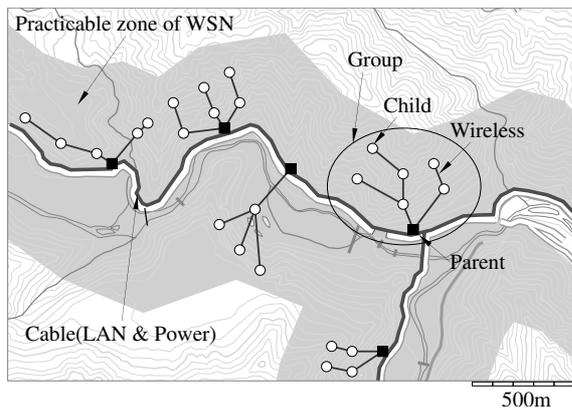


図-1 斜面モニタリングの想定図



図-2 通信試験の状況 (指向性のアンテナ)

### (2) 無線の通信障害の克服

利用する無線は、免許がいらず、利用場所が制限されない特定小電力無線によるデジタル通信である。周波数は 2.45GHz 帯でマイクロ波と呼ばれ、医療や産業機器の通信で汎用的に利用されている。利用環境は電波を反射するコンクリート面やアスファルト面が多い市街地である。

一方、利用する周波数帯は電子レンジで利用され、水分子を振動させて減衰するが、樹木中の水分などの影響が不明であった。また、地形の凸部は電波障害になる。米国などの大陸に比べ、わが国は樹木が多く、地形の起伏が大きいため、野外の自然環境での対策が重要である。

図-2 には、電波の受信強度を測定する通信試験の状況を示す。親機及び子機のアンテナ設置予定箇所にアンテナを置き、一対のアンテナ間毎に通信試験を行うことで、無線通信が可能な通信経路を検討した。一対のアンテナ間で得られる数分間のデータで無線通信の可能性を検討した。また、通信障害が少ない場合、データの欠落率がほぼ 0% になる最大通信距離は 300m<sup>4)</sup>である。この通信試験の結果、無線の中継機能を使って電波障害を避けることで、野外の自然環境でも無線通信が利用できることを確認<sup>4)</sup>した。

### (3) 無線通信の耐久性の検証

図-3 には、無線によるデータ収集機能が利用できる WSN の試作機を、地下水位のモニタリング・データの収集に適用した状況を示す。ここでは概ね 2 年間、利用することでデータ収集機能の信頼性や耐久性を検証した。温度などの自然環境の変化がハードウェアに影響が及ばないこと、無線通信に影響がないことを確認した。この間、直雷を受けた子機は損傷した。しかし、子機と子機の間ケーブルがないので、他の子機へは損傷が及



図-3 データ収集機能の耐久性を確認中の WSN 子機

ばなかった。これも無線の利点と考える。

### (4) バッテリーで利用するための節電

新緑や落葉で樹間の視界が開ける春や秋に、斜面の巡視を兼ねたバッテリーの交換を行うことを想定した。北側斜面や木陰などでは、太陽光パネルなどの補助電源が利用できない場合がある。そこで容量約 50Ah、重さ約 10kg の 6V の鉛蓄電池だけで利用する方法を検討した。

バッテリーで利用するには、消費電流が小さい電子部品を利用することが重要である。さらに、無線通信機能やセンサなどを使わない時は、こまめに電気の ON/OFF を繰り返して節電することが非常に重要である。

開発した装置の場合、最大の消費電流は約 30mA である。電気を切らないで通年利用するには、約 260Ah、52kg 相当のバッテリーが必要なので、斜面で運ぶには装

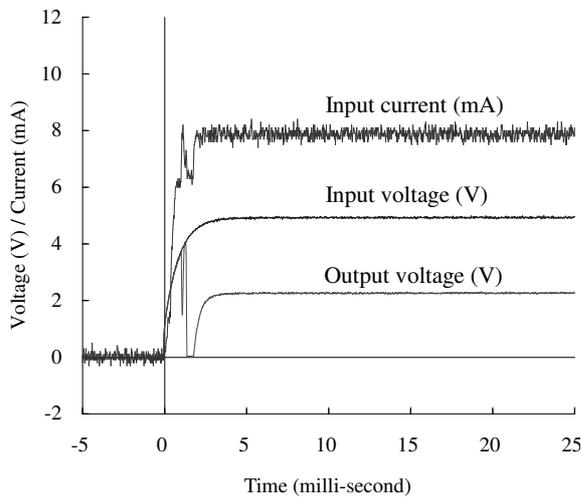


図-4 センサの起動時の出力変化

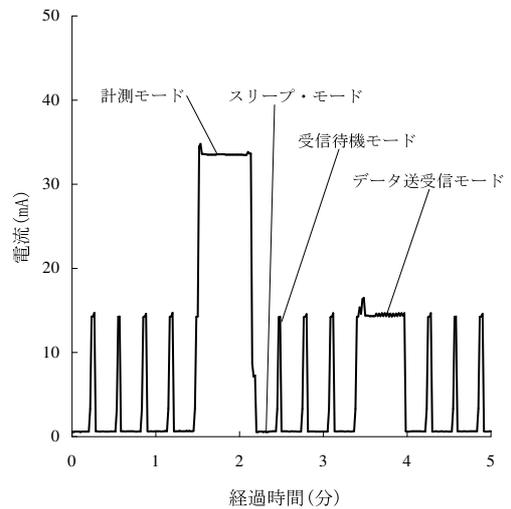


図-5 WSN の子機の時間 - 消費電流の関係

置の軽量化が重要である。また、従来の計測精度と計測信頼性を確保するため、従来の斜面のモニタリングで利用されているセンサ<sup>5)</sup>を利用することにした。多くのセンサの入力電圧は 12V 以下なので利用可能である。しかし、計測インターバルに合わせて、センサの ON/OFF を繰り返すため、センサの出力が短時間で安定することが必要である。

図-4 には、傾斜計を例に、センサに電気を入れた後の時間 - 電圧などの関係を示す。立上がり時に内臓アンプの影響で出力電圧が上下しているが、約 5 ミリ秒で出力電圧は一定になっている。この結果から消費電流が小さく、センサ出力が短時間で安定することから、この傾斜計は WSN で利用可能であると判定した。出力電圧は傾斜量に比例して変わる。

図-5 の計測時の消費電流は、2 軸で傾斜計を使った場合である。データ通信は、計測データを親機に送信している状態である。他の時間は、受信待機とスリープを 3 回/分で繰り返している。受信待機はデータの送信が必要であるか確認するもので、スリープは消費電流が最小の状態である。受信待機とスリープを繰り返すことで、節電を可能にするとともに、親機側から任意の時間にデータを回収することを両立させた。

### 3. 活動斜面のモニタリングへの適用

#### (1) 活動斜面のモニタリング概要

図-6 には、北向きに撮影した計測対象の斜面を示す。斜面は米国アイダホ州南部のスネーク川の支流にあり、約 10cm/年の変位量がある。地質構造は、表層に水平に広がる約 10m 厚の玄武岩があり、下部にシルト質の湖



図-6 計測対象の斜面 (北向き撮影)

沼堆積物が厚く堆積している。北流する河川の左岸頂部の玄武岩がベンチ状に沈下し、河川内の堆積物が西方向に円弧すべりを起こしている。図-6 の左下の堰止湖と頂部の標高差は約 100m である。

図-7 には、図-6 の計測対象にした斜面の航空写真を示す。傾斜量計測用の WSN の子機を設置した活動斜面先端になる 7 箇所を白丸で示す。東側の玄武岩頂部に南北に約 550 m の亀裂が生じている。白丸の位置は斜面の先端部である。斜面先端は河川で、活動する斜面の南側上流に堰止湖ができています。

図-8 には、モニタリング地点近く街の Twin Falls と、比較に札幌のものを示す。この地点はわが国の寒冷地に類似した気温であることが分かる。年降水量は 235mm と少なく、冬季に降水量が多い。冬季は表層約 10cm が凍結し、10cm 程の積雪があった。

図-9 には、ロガー機能や通信機能を持つ WSN 子機、

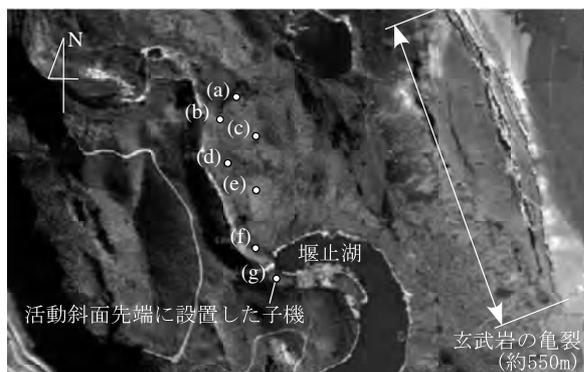


図-7 傾斜計の設置位置 (上は北、川幅は約 1km)

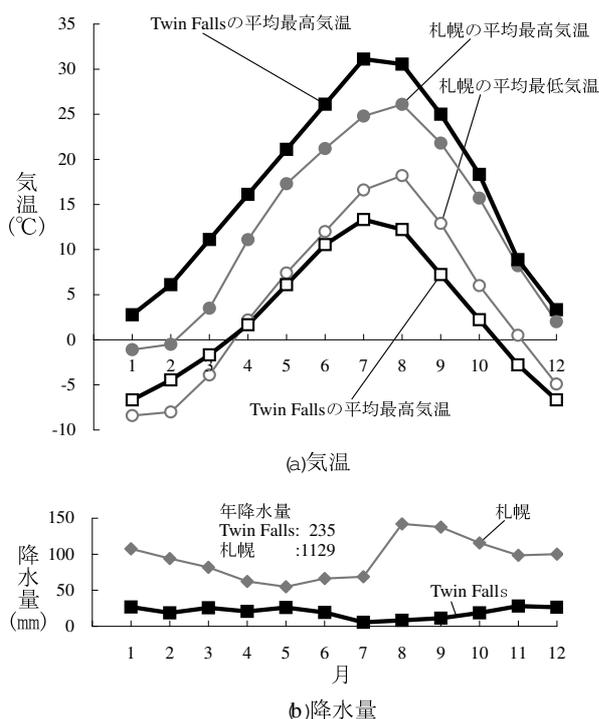


図-8 計測地点近傍の気温と降水量

バッテリー、傾斜計を入れたステンレス製の箱の埋設状況を模式図に示す。鋼棒の支柱に取付けた高さ約 2m の塩ビ管の頂部にアンテナを設置している。傾斜量は重力方向が基準である。車両が乗り入れ出来ない箇所でも人力で運搬・設置できる。バッテリーは、寒冷地の自動車などで利用され、低温でも信頼性の高いものである。しかし、温度の低下で、出力電圧が 10~20% 程低下するので温度が安定する地中に埋設した。

本地点では LAN などの既存の通信網が利用できなかったため、親機を 1~2 ヶ月毎に持ち込み、6 ヶ月間で計 4 回データを回収した。中継機能を利用すれば 7 箇所の子機のデータを一度に回収可能であった。しかし、(d) と (e) の間に尾根があり、尾根上に中継機能だけを用的子機が別に必要になるため、2 つのグループに子

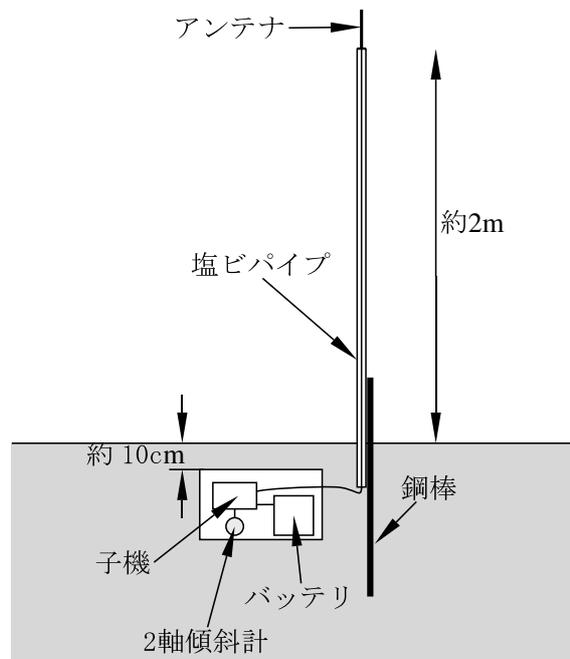


図-9 傾斜量計測用の子機の設置模式図

機を分け、グループ毎にデータ回収をした。親機を (b) の近傍に設置した場合は (a)~(d) のデータを回収し、親機を (f) の近傍に設置した場合は (e)~(f) のデータを回収した。計測は 2 回/日、受信待機は 3 回/分である。

## (2) 結果と考察

図-10 には 6 ヶ月間の 7 箇所の計測結果をベクトル図で示す。軸は上側が北で、単位はラジアンである。中心は初期値で、10, 11, 12, 1, 2, 3 は月を示し、月別にプロット線の濃淡を変えて示す。図の見方は、気泡式の水準器と同じで、最大の傾斜方向に動く気泡の位置をプロットするように描いた。

図-10 の 7 箇所の傾斜量の結果は、図-7 に示す傾斜計の配置と同じ配置に示す。斜面が円弧すべりすることで、傾斜計を設置した活動斜面の先端部が隆起することで、西側に勾配がきつくなる傾斜量の変化が生じている。また、図-7 で堰止湖の箇所は、最南に位置する 2 箇所の傾斜計の中間である。図-10 では、この堰止箇所が中心方向となるような隆起が生じる結果になっていて、原位置の現象とよく一致している。

(a)~(e) の 5 箇所には欠測はなく、平均最低気温が 5 ヶ月間、氷点下になる環境でも稼動した。しかし、日当たりが悪い (f) と (g) で、低温によるバッテリーの電圧低下で欠計が生じた。

子機の消費電流の室内での検証<sup>5)</sup>は、受信待機が 3 回/分、計測が 30 分毎、データ通信が 20 分毎、残りをス

リープの条件で利用した場合、受信待機の消費電流は75%、計測は8%、データ通信は10%、スリープは7%である。受信待機のインターバルを長くする対策で、消費電流が最も大きい受信待機の消費電流が半減できる。この対策で、計測とデータ通信のインターバルを1時間程、にした場合でも十分に利用可能と考える。

#### 4. 結語

本報告は無線センサネットワークを斜面のモニタリングに適用するための開発概要と、活動斜面への適用による実用性の検証概要を報告した。寒冷地対策や、子機の節電法の再検討が必要であるが、開発した装置は、ほぼ実用段階に達していると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 鬼村邦治, 気象・水文センサのネットワークセンシング, 計測と制御, 第43巻, 第9号, 2004.9.
- 2) 安藤繁, センサネットワーク技術 コピキタス情報環境の構築に向けて, 東京電機大学出版局, 2005.5.
- 3) 池川洋二郎, Steven D. Glaser, 唐崎 健二, 伊藤 一誠, 青木 寛, 澤田 昌孝: コピキタス地盤環境モニタリングの提案と通信試験の結果, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.383-388, 2006.1
- 4) 池川洋二郎, 坊田信吾, 青木寛, 三木和秀: 地盤環境モニタリング用の無線センサーネットワークの試作と地下水位計測への適用, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.207-212, 2007.1.
- 5) 池川洋二郎, 細谷真一: 地盤環境モニタリングの広域化とコストダウンのための無線センサネットワークの開発と検証, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.433-438, 2008.1.

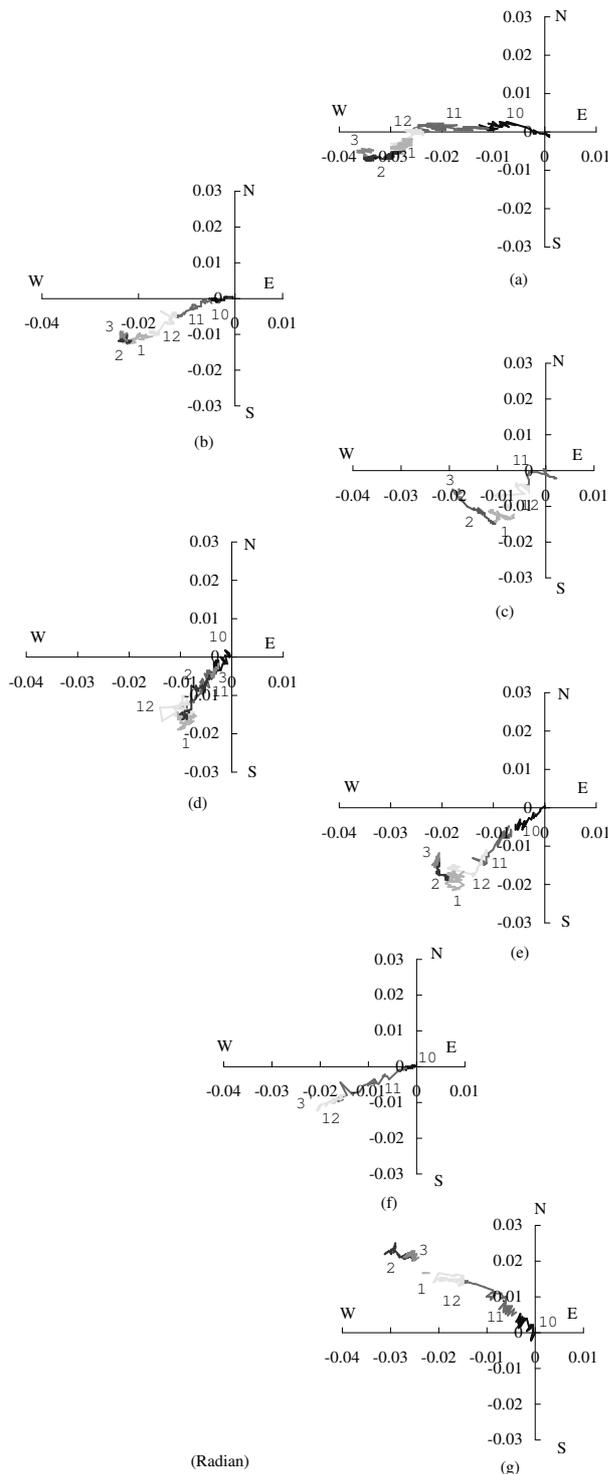


図-10 活動斜面先端部での傾斜量のモニタリング結果 (数字は月を示し, 月別にプロット線の濃淡を変えて示す.)

# MONITORING OF AN ACTIVE SLOPE BY WIRELESS SENSOR NETWORK

Yojiro IKEGAWA, Hiroaki KOBAYAKAWA, Masataka SAWADA,  
Ben A. Abbott , David A Ferrill, Alan P. Morris Ronald N. McGinnis

Monitoring slopes is important for estimating effects of maintenance technologies and functions of disaster prevention technologies. It is necessary to use new technologies to reduce monitoring costs and to enlarge applicable regions. Wireless sensor network (WSN) works by batteries for many months. The WSN has both wireless data communication and sensor functions. But, the existing WSN could not be applied for slope monitoring. The authors have developed a new tilt WSN for the slope monitoring. The basic functions were verified by applying for monitoring an active slope. As a result, practical use of the new WSN was confirmed.