

地盤環境の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

池川洋二郎^{1*}, 細谷真一²

¹ 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)

² 正会員 ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業本部 (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町 2-272-3)

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

斜面などの維持管理や防災・減災技術の適用による効果や機能をモニタリングで合理的に評価することは重要である。このモニタリングを低コストで広域化する要求に対し、無線通信によるデータ収集機能とセンサ機能を合わせ持つ無線センサネットワーク (WSN) の適用方法を検討している。これまで野外の自然環境で通信距離を伸ばすため、特定小電力無線の通信特性の調査や、特定小電力無線が使えるバッテリー稼動する WSN の試作機のデータ収集機能の信頼性・耐久性を検証している。今回は 1 日数回のモニタリングを対象に、従来の計測精度の確保を目的に既存センサが利用できる WSN の開発、利用可能なセンサの性能調査、WSN の通信機能の検証を行ったので概要を示す。

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

1 緒言

我が国ではエネルギーや交通などの社会基盤がほぼ整備され、既存構造物の維持管理や、豪雨や地震などの自然災害に対する防災・減災技術の整備の重要性が増す。このため、維持管理の合理化や防災・減災技術の適用による機能や効果をモニタリングで評価することが重要である。

このモニタリングには、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 技術による微細・省電力化でバッテリー稼動し、無線通信によるデータ収集機能とセンサ機能を合わせ持つ無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) の応用が始まっている。

この WSN が、斜面の変位や地下水位など、1 日数回計測する地盤環境のモニタリングに利用できれば、電源や通信ケーブルの敷設費や付随する道路や電柱の建設費のコスト低減、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、さらにコストが理由でモニタリングが困難な箇所に、WSN を適用することでモニタリング

の広域化が期待できる。

そこで野外で WSN を利用可能にするため、免許なしで使える特定小電力無線で通信距離を伸ばすことが考えられた。しかし、地形の起伏や植生などで電波の減衰が顕著になる自然環境での通信特性が不明だったので、通信試験で得た特定小電力無線の特性から利用可能であることを示している¹⁾。

また、特定小電力無線が使える、バッテリー稼動する WSN を試作し、野外のモニタリングで得られたデータの収集に適用した。これにより地形や植生などの通信障害を回避したデータ収集経路が野外に構築できることを事例²⁾で示している。同事例のデータ収集を 1 年以上行うことで、試作した WSN の耐久性や信頼性を検証²⁾している。

本報告では、WSN を斜面等のモニタリングに適用するため、従来の計測の精度や信頼性を確保することが望まれた。そこで、斜面等のモニタリングに使われている既存センサが利用できる WSN を新たに開発したので、2. に概要を示す。

一方、この WSN の仕様とバッテリー容量により、利用

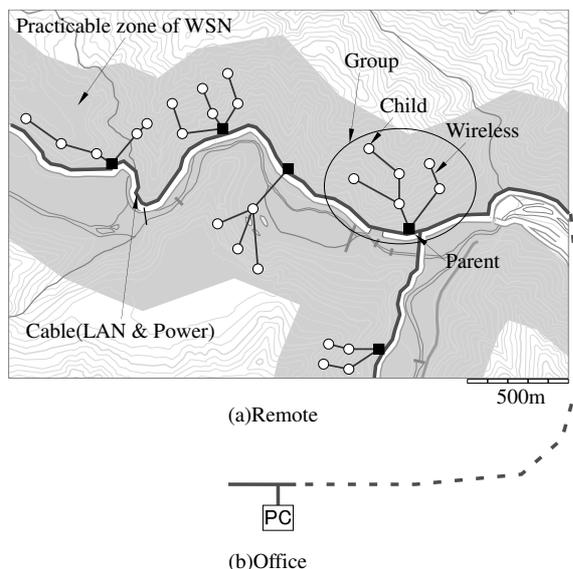


図-1 WSN を用いたモニタリングが可能な領域 (LAN や電源が利用可能な道路沿いでは、ケーブル敷設が不要)

可能なセンサが制約される．そこで傾斜計を事例に電気特性を試験し，利用可能なセンサの性能を評価したので概要を 3. に示す．

また，この WSN の子機をバッテリーで動作させるため，時計以外の機能を停止させるスリープ・モードを利用して省電力化している．このスリープ動作が加わったデータ収集機能は，親機側にデータが逐次増えることで動作が確認できている．しかし，個々の子機間の連携した動作が不明のため，問題点抽出や修正事項の検討ができなかった．そこで調査した傾斜計を子機に繋ぎ，複数の子機の消費電流を同時に計測することで WSN の連携動作を室内で検証したので概要を 4. に示す．

2 WSN の概要

図-1 には，想定する WSN を用いたモニタリングの模式図を示す．図-1 中の黒四角で示す WSN の親機 1 台と白丸で示す複数台の WSN の子機で，図-1 中の楕円で囲む 1 つのグループが構成され，WSN のグループが複数併設できる．子機は無線通信が可能な箇所であれば場所を選ばない．親機は電源や LAN が利用できる道路沿いに設置することを想定している．

図-2 には，PC と新しい WSN の親機の写真を示す．PC には，WSN 用のソフトウェアを導入し，WSN のグループの動作設定を行う．この設定による WSN の動作の概要を 4. に示す．親機は特定小電力無線，有線 LAN，不揮発性メモリ，CPU などの機能を持つ電子基板で，防

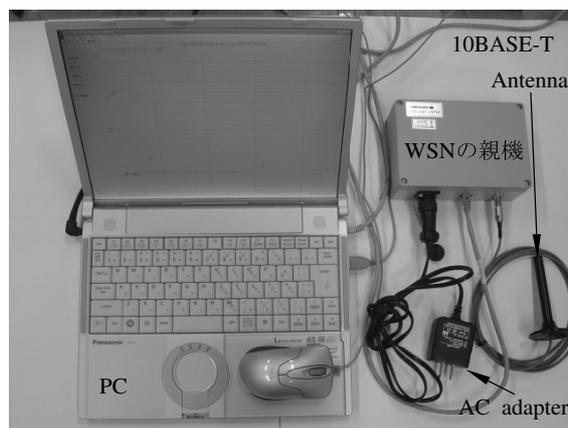


図-2 PC と WSN の親機

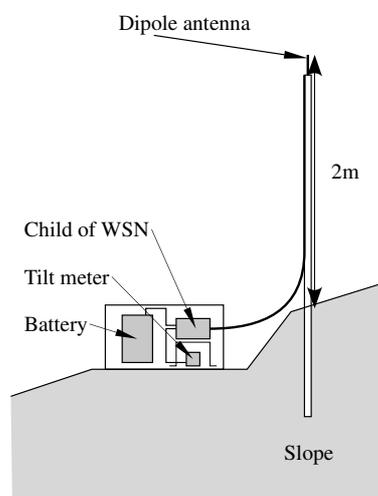


図-3 傾斜計測の想定図

水ボックスに収めている．これに AC 電源のアダプタ，LAN ケーブル，無線通信のアンテナを接続する．

図-3 には，斜面の傾斜量のモニタリングを目的にした場合の子機の設置模式図を示す．平坦に整地した箇所に，WSN の子機，傾斜計，バッテリーを入れた防水ボックスを設置し，近傍に高さ 2m 程のアンテナを立てる．図-3 では電源や通信ケーブルの敷設はいらない．

図-4 には，図-3 の中にある WSN の子機の写真を示す．子機は無線通信，A/D 変換，CPU，不揮発性メモリなどの機能を持つ電子基板で，防水ボックスに入れている．このボックスには，バッテリーからの電源ケーブル，アンテナ用の同軸ケーブル，センサ用のケーブルを接続する．図-5 には，図-3 の WSN の子機の下側に設置した 2 軸の傾斜計の写真を示す．

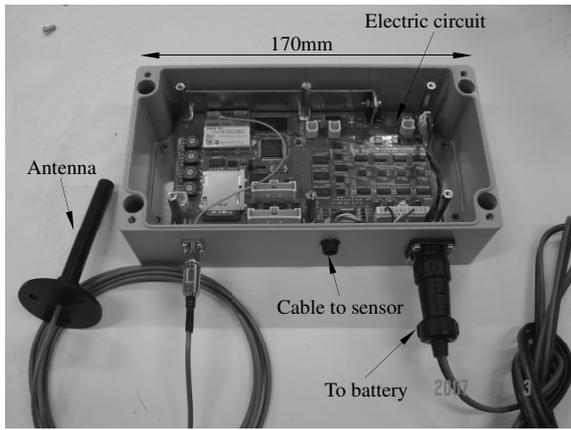


図-4 WSN の子機

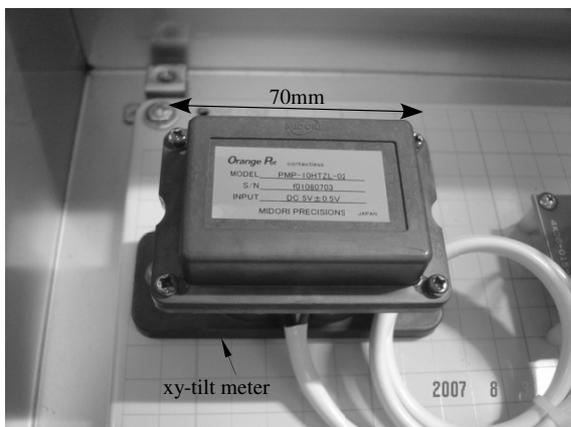


図-5 2 軸傾斜計 (図-4 に接続)

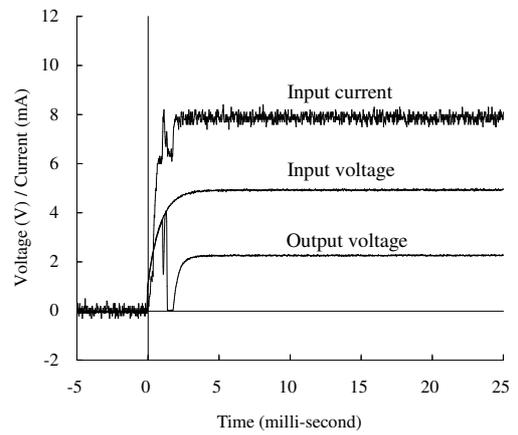


図-6 出力安定時間の測定 (PMP-S10HL)

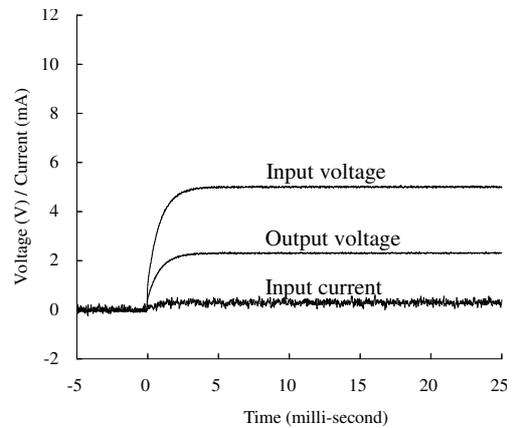


図-7 出力安定時間の測定 (PMP-S10LX)

3 利用可能なセンサ性能

(1) 概要

この WSN で利用可能なセンサは、電圧あるいは電流が出力されるアナログ・タイプである。一方、PC の RS232C ポートなどからセンサの出力値を取得するようなデジタル式のセンサも利用可能である。しかし、機種毎に通信手順が異なるので個別のプログラムと検証が必要になり、煩雑で時間が必要になるため、ここでは対象外とする。

また、WSN の仕様やバッテリー容量の制約で、10mA 程度の消費電流で稼動し、電源投入と同時に出力値が安定するセンサの利用が考えられた。そこで、事例として 2 種類の傾斜計 (緑測器 PMP-S10HL, PMP-S10LX) の電気特性を調べ、この WSN で利用可能なセンサ性能の評価を行った。

電気特性は、この WSN の子機にセンサに接続し、入力電圧を 5V にした場合の消費電流と出力電圧をデジタ

ルスストレージオシロスコープで計測した。

(2) 結果

図-6 と図-7 には、PMP-S10HL と PMP-S10LX との時間-電圧、電流の関係の計測例をそれぞれ示す。PMP-S10HL と PMP-S10LX は、両方ともセンサの電源投入後、数ミリ秒でセンサの出力電圧は安定していることが分かる。PMP-S10HL の消費電流は約 8mA に対し、PMP-S10LX は約 0.1mA で消費電流の点では優れている。

図-6 では、電源投入直後の数ミリ秒、出力電圧が上下した後一定になっている。これは、PMP-S10HL に内蔵されるアンプの起動時の影響と思われるが、許容値未満で問題無い範囲である。

図-8 には、傾斜計の角度と出力電圧の関係を示す。PMP-S10HL と PMP-S10LX の傾斜角と出力電圧には、ともに線形の比例関係がある。ここに PMP-S10HL の方が、傾斜角の変化に対する電圧変化が大きく、より感度がいいことが分かる。

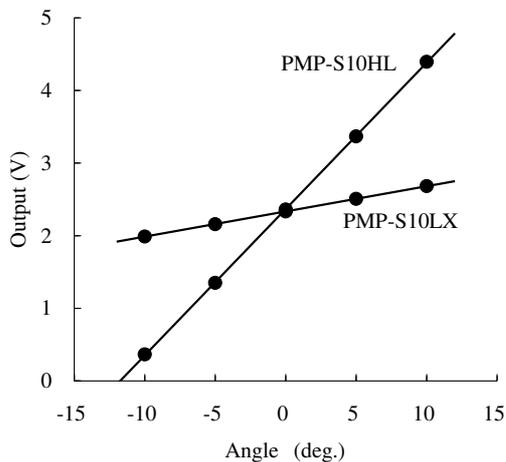


図-8 傾斜計の角度と出力電圧の関係

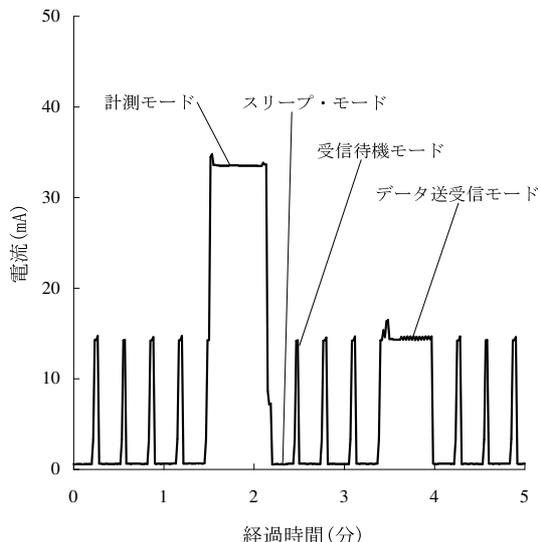


図-9 子機の消費電流の変化

(3) 考察

消費電流が 10mA 以下のセンサを約 1 年間利用するとして、バッテリーの容量を検討すると、市販の鉛蓄電池を使える。よって、消費電流の点では、PMP-S10LX の方が優れているが、PMP-S10HL も利用可能である。

出力電圧は反対に PMP-S10LX より、PMP-S10HL の方が感度が優れ、センサの仕様と整合しているため、この WSN において感度が優れた PMP-S10HL の方が適している。

図-8 で PMP-S10LX の感度は、センサの仕様より悪い結果であった。原因としては、この WSN の負荷抵抗 (100kΩ) が、センサの要求する負荷抵抗 (10MΩ) に対して小さいために生じたものと考えられる。これは、音響機器でインピーダンスがマッチしていない場合、スピーカ音量が十分に得られない現象に類似している。

以上より、本 WSN で利用可能な性能として、消費電流が 10mA 程度以下であること、インピーダンスがマッチして十分な出力感度が得られるもの、電源投入時に許容以上のスパイクが生じないもの、汎用の 6V あるいは 12V のバッテリー電圧で動作するものなどが知見として得られた。

4 無線センサネットワークの動作検証

(1) WSN の動作と検証の概要

図-9 に子機の消費電流の時間変化の例を示す。図-9 の消費電流のパターンから、約 20 秒で 1mA 程のスリープ・モードと、約 5 秒の 15mA 程の受信待機モードを繰り返していることが分かる。そして設定した時刻にセンサの出力値を収集する約 40 秒で 35mA 程の計測モード、約 40 秒で 15mA のデータ送受信モードで構成され

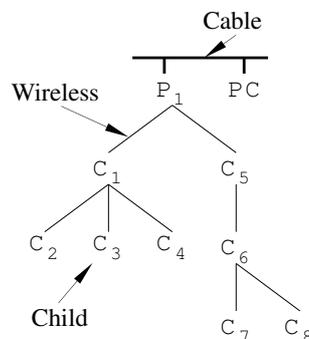


図-10 データ収集ネットワーク

ていることが分かる。

ここにセンサ出力を収集する計測モードと、収集したデータの送信や他の子機のデータの転送を行うデータ送受信モードが同時に重なる場合が生じる。この場合は、計測モードを優先し、データの送受信は途中で中止し、次のデータ送受信モードに合わせて行うようにしている。

図-10 には、検証に用いたデータ収集ネットワークを模式的に示す。P₁ は親機、C は子機で下付の添え字で子機の ID を示す。例えば、C₈ で計測したデータは、逐次 C₆、C₅ が無線中継を行い、P₁ に送信されることを示す。他の子機も同様に、図-10 の経路の通りデータが P₁ に送信される。

既存の WSN ではデータ収集経路は、ソフトによって自動的に最適化される。しかし、8 機ほどの子機を使った場合、野外の通信障害を避けた通信経路を複数選択できることは稀で、通信可能な経路は 1 つに限定される。この場合、データ収集経路の自動最適化は消費電力を増



図-11 動作試験の状況

やすのみになるので、消費電力の低減を優先させ、図-10のように通信経路を固定させている。

図-10で示すWSNのグループの動作はPC上で設定し、この動作は親機側のデータが逐次増えることで確認できる。しかし、動作時に子機間でどのように連携して動作しているか不明のため、課題の抽出や修正項目の検討ができなかった。そこで、図-11のようにWSNのグループを構成する8台の子機の消費電流を同時に、計測インターバルを1秒で計測した。

(2) 結果

図-12には、子機の消費電流の計測結果を示す。横軸は時間で1時間の計測結果を示す。縦軸は電流値で、上からC₁~C₈のグラフである。図-12中の上向き矢印は、始点の子機から終点である親機にデータが収集されることを示す。なお、終点には子機のIDを示す。また、スリープ・モードなどの各モードは引き出し線で説明を加える。

子機のデータは、C₁,C₂,C₃,C₄,C₅,C₇,C₈,C₆の順に、2分毎に収集する。例えばC₈の上向きの矢印を見ると、C₅,C₇,C₈の3つが同時にデータ送受信モードになっていることが分かる。この時、最初にC₅が送受信モードになり、順次C₇とC₈が送受信モードになる。C₅,C₇,C₈が送受信モードになった時、C₈のデータが親機に送信され、終わるとスリープ・モードと受信待機モードを繰り返している。この動作は、図-10の設定通りである。

また、3回目のC₈の送受信モードの場合、同時刻に計測モードが始まり、データ転送モードは無視されることが分かる。計測モードは30分毎に設定し、8台が同時に計測モードになっている。これは子機の時計が送受信モード時に時刻が毎回修正され、計測を最優先モードにしているためである。

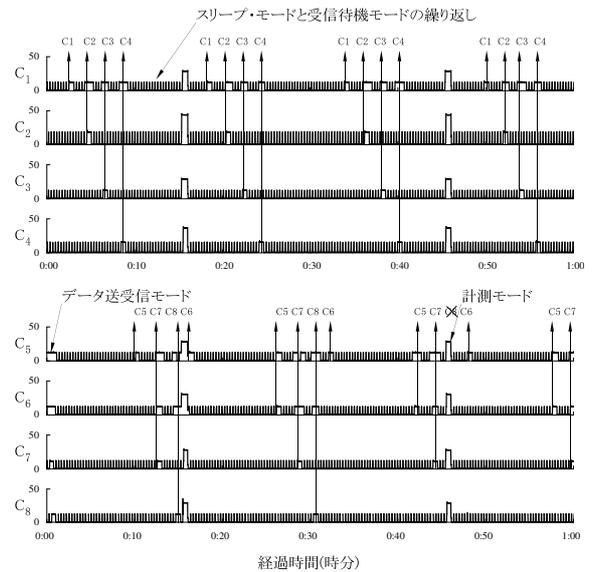


図-12 電流計測による子機間の連携 (ネットワークは図-10参照)

以上、図-12より、図-10の設定のようにWSNが動作していることが確認できる。

(3) 考察

図-12のように、8台の子機のデータを親機が2分毎に収集する設定の場合、8台のデータ収集には16分必要となる。この収集時間を短くするには、収集インターバルを小さくすれば良いが、時間当たりの送受信モードの回数が増えるため、消費電力が増える。

C₈を例に、またスリープ・モードの時間を長くして小電力化を考えた場合、受信待機モードを待つ時間が長くなるため、C₅,C₇,C₈すべてが送受信モードになるまでの時間が長くなり、送受信モードでの消費電力が増える。

以上のように互いにトレード・オフの条件があるため、各モードの長さを固定し、消費電力及びデータの収集時間の両面で満足できる設定を探すことが重要である。しかし、実際の運用では計測対象の斜面の滑動状況などを考慮し、計測間隔やデータ収集時間の要求が優先されると思われ、状況に合わせた設定変更が必要になると思われる。

5 結語

本報告では、斜面のモニタリングのように野外の自然環境で、1日数回のモニタリングのコストダウンと広域化を目指したWSNを開発したので概要を示した。また、WSNの仕様やバッテリー容量の制約で、利用可能なセンサが限定されるため、傾斜計を事例に電気特性を用いた利用可能性の調査で、要求されるセンサの性能を

示した。さらに、調査した傾斜計を WSN に接続し、この WSN のデータ収集における子機間の連携動作を確認した。

本報告の結果と、従来の特定小電力無線のデジタル・データ通信試験の結果¹⁾や WSN の試作機²⁾を用いた地形の起伏や植生などの通信障害を回避した通信経路の構築事例や、WSN のデータ収集機能の耐久性の結果を合わせると、今回の WSN が野外の自然環境でのモニタリングに十分に適用可能と考える。

今後は、活動斜面等のモニタリングに適用し、本 WSN の信頼性の検証と、実際の運用で生じた問題点の改良が必要と考える。

参考文献

- 1) 池川洋二郎, Steven D. Glaser, 唐崎 健二, 伊藤 一誠, 青木 寛, 澤田 昌孝: ユビ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
- 2) 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.
- 3) 尾造宏之, 高橋健一, 宮下充史, センサーネットワーク技術の現状と電気事業への適用, 電力中央研究所調査報告, R03011, 2004.3.

A DEVELOPMENT AND ITS VERIFICATION OF WIRELESS SENSOR NETWORK FOR MONITORING GROUND ENVIRONMENTS TO ENLARGE APPLICABLE REGIONS AND REDUCE ITS COST

Yojiro IKEGAWA, Shinichi HOSOYA

It is important to estimate the efficiency and its functions of maintenance technology of slopes based on monitoring. We are considering applying wireless sensor network (WSN) in order to reduce monitoring cost and enlarge applicable regions. Thus characteristics of license free radio had been tested to make transmitting distance longer. A prototype of WSN, which can use the license free radio and battery, had been applied for data collections at the field. Its reliability is ensured for more than one-year usage. In this paper, a developed WSN that can use existing sensors to keep measuring accuracy, performance of useable sensor with the WSN and verification of the data collecting function of the WSN are described.