

無線センサデバイスを活用した 道路管理手法について

紀南河川国道事務所¹・学産PJメンバー²

¹近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 (〒0739-22-4564 和歌山県田辺市中万呂142)

²リーダー：西山 哲 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 ジオフロントシステム工学講座
（株）地層科学研究所（幹事），（株）熊谷組，ワイマチック（株），可視化ビジョン
サンコーコンサルタント（株），明治コンサルタント（株）

本研究は、小型かつ安価な無線によって計測データをリアルタイムに配信するセンサデバイスを活用した計測システムに関するものであり、植生の影響を受けることなく高精度の計測値をより遠隔に配信する機能を付加する高度化に取り組んだ研究成果を報告するものである。事務所管内の現場において当計測システムの性能を検証し、任意の箇所に設置でき、いつでも、どこでも当該現場状況を綿密に監視できる計測ネットワークの実用化を実証した。

1. はじめに

日本列島は世界でも有数の変動帯に属しており、道路斜面の多くが複雑かつ脆弱な地盤で構成されている。また台風や地震といった天災も多く発生するため、これまで数多くの斜面災害によって人的および経済的な損失を被ってきた。その一方で、高度成長期に建設した対策工の老朽化も懸念されており、限られた財源と管理体制をより一層効率的かつ効果的に運用する道路の管理手法が求められている。しかしながら道路沿いの斜面の大半は地形上あるいは経済的な問題によって、抜本的な対策工を早期に実施することが困難であるため、モニタリングによる斜面監視が有効な手段として活用されている。その一方で、斜面モニタリングの技術には次のような課題が伴うため、これまで有効な計測システムの構築が困難であった。

- ・危険な箇所が広範囲にわたっており、それを網羅するために広い範囲を対象にする計測システムを構築すると、計測機器および計測費用の低コスト化が困難になる。
- ・計測機器が設置できたとしても、広範囲を計測の対象にした場合は、その維持管理に要するコストの低減化が困難になる。
- ・各地区ごとに崩壊形態が異なり、適切な計測機器の選択が難しいが、どのような崩壊形態であっても計測精度が高精度であることが要求される。
- ・岩盤崩壊や落石のモニタリングでは、前兆となる現象が現れてから崩壊に至るまでの時間が短いため、変位あるいは変状に関するデータをリアルタイムに出力する技術が要求される。

- ・計測システム自体が災害に対して頑強な構造でなければならない。

これまでの道路防災総点検以降の検討で災害が発生した箇所は、発生そのものや形態および規模が想定外であった事例が多かったことが報告されており、また災害発生箇所において何らかの対策工が施されていたケースも多数あることが報告されているが、これらの事例を考慮すると、従来のモニタリング手法に対して災害規模や到達範囲を想定するための技術の精度を向上させる必要があることを示唆しているものと考えられる。

本研究はこれらの背景を鑑み、利用者に安全かつ安心な道路を提供できるマネジメントの基本的な要素技術であるモニタリング手法の改善に取り組み、従来の手法の課題を克服を目指した計測手法の開発成果を報告するものである。本研究の特徴は、電子産業またはIT関連産業の最先端の技術を導入することにより、前記のモニタリング手法における課題を克服することである。我が国の電子産業はナノテクノロジーといった新技術の分野を築き、携帯電話に代表されるハードおよびソフト技術は日々進歩しており、世界でも確固たる地位を保持している。これら土木分野から見て異分野である電子・通信分野の技術と、これまで培った土木のノウハウを融合させるための官学産の取り組みを発足させ、それら最先端技術によって前記課題の克服に取り組んだものである。さらに事務所管内において、本研究による新しい道路防災（減災・避災）システム技術の有用性を検証した事例を報告し、本技術の道路管理手法への適用性を考察する。

2. モニタリング手法の概要

本研究において開発したモニタリング手法は、設置した箇所の挙動を高精度に計測するナノセンサデバイスとその計測データを無線によってリアルタイムに事務所に配信するシステムにより構成される。図-1は本研究によるシステム全体の概念を示すものであり、斜面に小型のセンサデバイスを設置すると、そのセンサが定期的に斜面の3次元挙動を検知して、その計測結果を無線によって基地局に伝え、さらに基地局が事務所に電子メールで結果を伝えたり、パソコンで計測結果を見ることができる監視画面を作る。センサデバイスは小型かつ安価であることから、これまでにない高密度な計測網を構築することができるだけでなく、有線部分がないことから任意の箇所に多数設置することができ、また台風や地震時の断線によって計測ができなくなる事態や落雷および誘雷によって機器が損傷することの心配が無い。

図-2はセンサデバイスの概観である。約50×60mmで高さ約35mmの寸法でリチウム乾電池2本が内蔵される。本センサデバイスは各種電子部品を基板上に一体化したものでMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) あるいはNEMS (Nano Electro Mechanical Systems) と称されており、本研究開発では0.1度の傾斜角を計測する分解能をもつ加速度センサと温度センサおよび湿度センサが搭載されている。この基板には計測結果を無線で配信するための機器も同時に組み込まれており、図-2のセンサデバイスからの計測データを収集して事務所に配信するための基地局は太陽電池で稼動するため、当計測システムは外部からの電源供給のための工事を必要としない。この計測システムは、既に図-3に示すように事務所管内の橋杭岩の挙動をモニタリングする手法として実用化している。その実績から、次の特徴をもつシステムであることが実証された¹⁾。

- ・当現場は天然記念物に指定されている景勝地であるが、センサデバイスは小型で有線が無いので、設置箇所の概観を害することが無い。
- ・数分間隔で計測しても、3年以上はセンサデバイスの電池を交換する必要が無く、受信機も太陽電池で駆動するので計測システムのメンテナンスが数年間不要である。
- ・0.1度の分解能で3方向の傾斜角を計測できるので、微小な岩盤の挙動を3次元的に捉えることが可能であり、崩壊現象の前兆をリアルタイムで把握することができる。

不連続面の状況あるいは崩壊によって発生するリスクの大きさを考慮し、必要となる岩盤の挙動を正確に把握できる位置を選択してセンサを設置し、計測された傾斜角が危険な値を超えるとモニタリング画面に警報が発せられるようにした。このように電子および通信分野の

最先端の技術とどのような管理基準値を設けたらよいかという土木分野の知識の融合により、これまでの計測手法の課題であった「メンテナンスに要する労力が多大である」、「高精度の機器を多数配置できないことにより発生する災害が把握し難い」および「計測機器自体が災害に弱い」などの欠点を克服する新しいモニタリング手法を実現させること画が可能となった²⁾。



図-1 センサネットワークシステムの概念

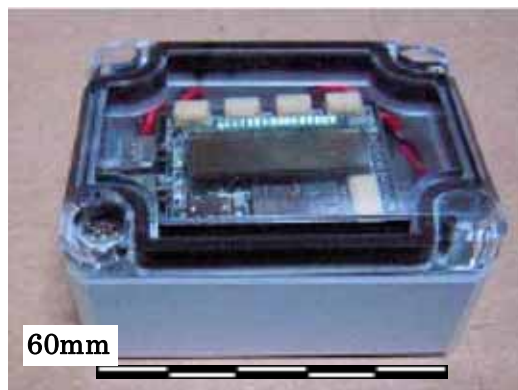


図-2 無線センサデバイスの概観



図-3 岩盤崩壊モニタリングシステムの実用例

3. 計測システムの高度化技術

本研究では前章で紹介した計測を、さらに次の特性をもつシステムに高度化することを試みた。

- これまでのセンサデバイスと計測データを収集する基地局間の通信距離は100mが限度であった。これを300m以上離れたセンサデバイスと基地局であっても双方向通信することを可能とし、計測システムの設計の自由度を向上させる。
- 無線を利用して計測データを配信するシステムは他にも実用化されているが、いずれも植生の多い現場に適用すると、遠隔まで電波が届かないあるいは植生による電波障害が発生するという欠点がある。本研究では、植生の影響を受けることなく基地局にデータを配信することができる仕様にし、どの箇所にセンサデバイスを設置してもモニタリングができるようにする。

これは本事務所管内の国道42号線沿いにおいては、**図4**のように植生に覆われた崩壊および落石危険箇所が多く、より広範囲を対象としたモニタリングに適用できるように高度化させる必要が生じたためである。その一方で、より遠隔にまでデータを伝送する計測技術も開発されているが、既存の技術を導入した場合は次のような欠点が発生することが判明した。

- 市販の無線機器に使用されている電波は2.45GHz帯であり、電波の直進性が大きく現れるために植生などによってセンサデバイスと基地局が直接見渡せる状態に無い場合は、伝送されるデータの出力が大きく低下し、より遠くに計測データが配信できない欠点がある。
- そこで、より遠くに計測データを無線で配信するためには、電波を中継して増幅させる機能をもつ中継器をセンサデバイスから基地局の間にいくつか設置することで対応するのが一般に普及している技術である。この方式は既に実用化されており数多くの実績も残している。しかしながら、この方式を導入した計測システムは各構成機器が常に稼働している状態に待機している必要があり、電池の消耗が激しくなるためメンテナンス作業を頻繁に行う必要があるという欠点がある。
- 上記の理由により、メンテナンスフリーの性能を発揮させるためには、センサデバイスと受信機が直接通信する方式が好ましい。この場合は、センサから発信させる電波の出力を向上させることで基地局をより遠隔に設置させることができる。ただし、この方式では計測データだけではなくノイズの出力も同時に大きくなるため、高精度での計測が不可能になる欠点がある。

このように目標とする計測システムの高度化を図るためには、市販の技術の応用ではなく、新しい無線センサ技術の開発に取り組む必要があった。その結果、**図5**に示すように電波の帯域幅を狭めることにより、伝送する計測データにおけるノイズに含まれる量を少なくする狭

帯域無線と言われる技術の開発に至った。これは無線の電波の出力を向上させてもノイズを増幅させる心配が無く、高精度の計測値を保持することが可能となる利点がある。ただしこの技術を実現するためには、温度に対して安定な水晶発振子の政策が必要である。本研究ではこの性能を満足する4mm角の発信子の製作に取り組み、無線電波の帯域が3KHzという狭帯域になることを可能とした。さらに、水晶振動子の製作技術の改良により、周波数帯としてGHzより低い429MHzでデータを配信する無線機器を製作しセンサと一体化した。すなわち、電波の波長を大きくすることで直進性を無くし、障害物に対する電波の回り込みを大きくすることが可能となり、その結果として植生の影響を受けることなく300m以上の遠隔に対して高精度でデータを通信するセンサが実現した。これらの成果により、本研究開発は目標とする高度化を達成し、これまで開発した省電力によるメンテナンスフリー計測の利点を活かしながらも、さらに植生の影響を受けることなく遠隔にまでデータを配信することが可能な計測システムの実用化を図ることができた。



図4 計測システムの適用箇所例

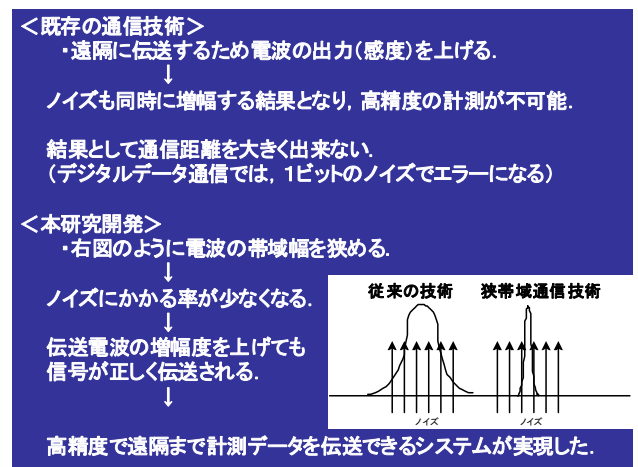


図5 狭帯域無線技術の概念

3. 現場への適用例

開発した計測システムを現場に適用した例を紹介する。現場は事務所管内の国道42号線沿いの見草地区で、本地区は流れ盤である急崖斜面において、剥離崩落の危険性がある高角度の割れ目が発達した岩塊が多数存在している。また道路周辺は波浪による侵食が進行しているために凹地が形成されており、自重によって岩盤が崩落しやすい構造でもある。このような背景をもとにして、本地区内の転石や浮石から成る岩塊にセンサデバイスを設置して、3方向の傾斜角の変化から当該岩塊の挙動をリアルタイムでモニタリングしている。またセンサの設置箇所の傾斜角の変化だけでなく、温度（分解能0.01℃）、湿度（分解能0.03%RH）の状況も同時にモニタリングする。これはセンサの感度が良好なため温度や湿度の変化に伴う治具の変位を捉えてしまうため、センサ信号から気温および湿度の影響を除去することで、真の岩塊の挙動を把握するためである。図-6～図-8は設置箇所の状況とセンサデバイスを設置した状況の例である。いずれも転石および浮石に赤丸で示したセンサデバイスを設置しているが、小型で任意の箇所に設置できる利点を活かして、各岩塊の挙動を把握できる箇所に、センサデバイスが水平に設置されるように治具を用いて固定している。

センサデバイスは10分間隔で岩塊の挙動をモニタリングして、図-9に示すような各センサデバイスから200m位の個所に設置した基地局に送信する。基地局では計測値をFOMA網を利用してサーバ設置拠点に伝送し、そこで岩塊の状態をWeb上に表示されるようにしている。基地局は本体と電源である太陽電池部は切り離され、電源だけを見通しの良い箇所に置くことで任意の箇所に本体は設置できる。岩塊の挙動を観測するWeb画面は1時間間隔で更新され、いつでも、どこでもパソコン画面上で岩塊の状態を監視することが出来る。図-10は現場の状態を監視する画面の例であり、センサデバイスを設置した箇所と当該箇所の挙動を画面上でチェックする例である。

図-11は岩塊の挙動の計測データの経時変化を示したものであり、水平2方向であるX軸とY軸そして鉛直方向のZ軸方向の傾斜角の変化（分解能0.1°）を表している。表示期間中は岩塊の挙動に変化がなかったため、傾斜角の変化は捉えられていない。ただし設置箇所全体は図-6～図-8に示すように植生に覆われていたが、設置箇所の3方向の傾斜変化の状態を良好にモニタリングできていることが示され、本研究の課題であった植生の影響を受けない無線センサデバイスであることが分かる。これまでの実績では、乾電池2本でのセンサデバイスの連続運転期間は約2,000日であり、その間はメンテナンスフリーのシステムとして稼動する。今後、さらに長期間のメンテナンスフリーが必要なときは、センサデバイスの電源を太陽電池に切り替えて対応することで対処する。



図-6 設置対象箇所の状況（上）と
センサデバイス設置状況



図-7 設置対象箇所の状況（上）と
センサデバイス設置状況



図8 設置対象箇所の状況（上）と
センサデバイス設置状況

構築に関する研究，平成21年度近畿地方整備局研究発表会，防災・保全部門No. 7，2009.

2) 西山哲，安藤佑治，山本剛：道路防災用センサネットワークの構築に関する研究，第28回日本道路会議論文集，2009.



図-9 基地局の概観

3. 結論

本研究において，次の特徴をもつ計測システムの開発を目指し，実用化を図った。

- ・ 植生の影響を受けない無線周波数帯があることを見出し，その周波数で計測データを配信するセンサデバイスを製作した。また狭帯域無線技術の導入によりノイズの影響を受けずに無線の出力を大きくすることが可能になった。その結果，センサデバイスおよび基地局共に任意の箇所に設置できる計測システムが完成した。
- ・ 当計測システムは植生の影響を受けない，メンテナンスフリーにて計測ができるなどの特徴を持ち，パソコン画面上にて，どこでも，リアルタイムに設置したセンサの値を監視することができるシステムが実現した。また現場において性能を検証した結果，高精度で岩塊の挙動を3次元的に捉えることが可能ながらも，低コストでシステムを構築できることが実証できた。本現場以外にも，対策工を実施するまでに長期間監視することが必要な現場等への適用に有用なシステムと考える。今後は管理基準値の設定などを考慮して，さらなる計測手法の高度化に取り組む予定である。

参考文献

1) 木村直樹：道路防災モニタリングネットワークシステムの



図-10 Web上でのモニタリング画面例

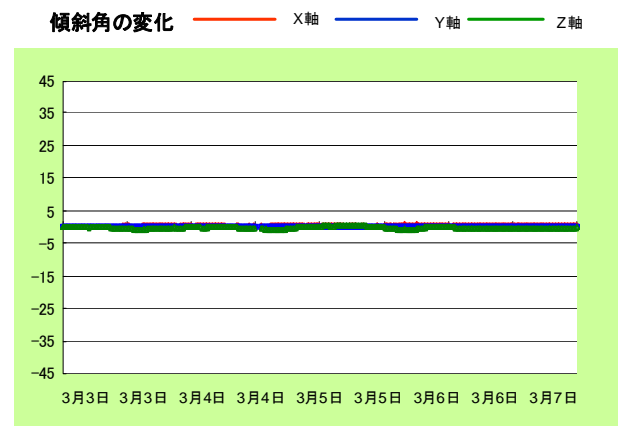


図-11 岩塊挙動のモニタリング例