

高密度土砂移動モニタリングのための無線式簡易振動センサの構築 及び屋外試験への適用

Development of a Wireless Simple Vibration Sensor for High-density Sediment Movement Monitoring
and its application to Field Tests

寒地土木研究所 ○正員 阿部孝章 (Takaaki Abe)
寒地土木研究所 正員 藤浪武史 (Takeshi Fujinami)

1. はじめに

我が国は環太平洋造山帯に属しており、地震や火山、これらに付随する災害が多発している。北海道においてもこれは例外でなく、十勝岳や樽前山、有珠山、駒ヶ岳、雌阿寒岳など多くの火山が存在する。積雪地域における火山災害では、火砕流または火山噴出物により積雪が融解し、多量の水分が発生することにより泥流化する所謂「融雪型火山泥流」が発生する懸念がある。過去、実際に十勝岳において1926年に発生した同種の災害では144名の死者がもたらされた。そのため融雪型火山泥流の発生メカニズム¹⁾やその規模の予測²⁾に関する検討がなされてきている。

こうした火山地域における土砂災害を早期に検知することは、その後避難勧告等の発令など防災活動開始の迅速化に繋がる。積雪地域でかつ融雪型火山泥流の発生及び流下が想定される沢に対して、写真-1のようにワイヤセンサが設置され土砂移動監視が実施されているのであるが、積雪寒冷地域特有の課題として、積雪の沈降力による切断と誤検知、寒冷環境下での腐食等の問題が存在する。こうしたワイヤセンサ特有の課題を補うために、振動センサによる土砂移動のモニタリングも行われているものの、導入費用面ではやや障壁が高いのが現状である。



写真-1 積雪環境下で十勝岳に設置されているワイヤセンサ (2015/5/12 撮影)

さて、近年ではMEMS等の半導体技術の発展により、安価かつ小型なセンサの活用が急速に拡大してきている。これに応じ構造工学や地震工学分野においては、建設構造物の健全性把握を目的として、小型センサによる振動のモニタリングが試みられている^{3), 4)}。こうした考え方を土砂移動の検知に応用することができれば、従前よりも安価で高密度に土砂移動のモニタリングができる可能性があるが、実現象の検知を想定した取り組みは一部存在する⁵⁾ものの、依然として少ないのが現状である。こうした背景から、著者らのグループでは積雪層上の土砂移動に焦点を絞ったセンサの構築や室内試験を行ってきたが、多点観測を想定した無線センサの構築には至っていなかった⁶⁾。本稿では、積雪環境下での土砂移動検知を目的とした無線センサを構築し、これを屋外実験に適用したものを報告する。

2. 手法

高密度の土砂移動モニタリングを実施するためには個別のセンサは簡易かつ安価に製作することが必要である。そのような観点から本稿では、オープンソースハードウェア基盤と無償の統合開発環境(IDE)から構成される汎用小型マイコンボード Arduino を用いることとした。このボードは入手性、拡張の容易性から近年急速に注目を浴びており、豪雨災害予測⁷⁾をはじめとして様々な分野で活用されてきている。採用したのは表-1に示す Arduino UNO R3 互換ボード(SainSmart, 米国)である。振動を検知するための小型センサとしては静電容量型の

表-1 Arduino UNO の主な仕様

項目	詳細・範囲
マイクロコントローラー	ATmega328
動作電圧	5V
推奨入力電圧	7-12V
定格入力電圧	6-20V
デジタルI/Oピン数	14 (内6がPWM出力対応)
アナログ入力ピン数	6
デジタル出力負荷電流	40 mA
3.3Vピン負荷電流	50 mA
フラッシュメモリ	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
クロック周波数	16 MHz

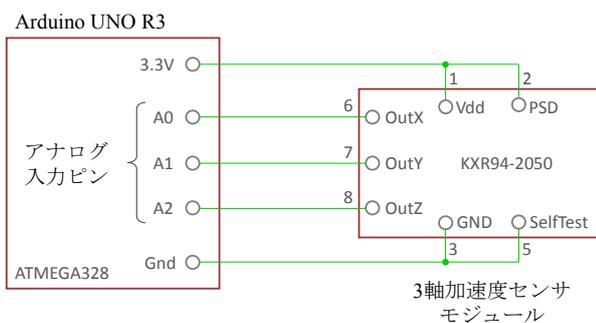


図-1 製作した小型振動センサ回路図の主要部分



写真-2 構築した小型振動センサ検知部の外観

MEMS 3 軸加速度センサ KXR94-2050 (Kionix, Inc., 米国)を用いることとした。このセンサは電子部品店・通販等で容易に入手可能である。

前述の通り Arduino はオープンソース設計のハードウェアシステムであり、制御に関しては C 言語ベースの開発環境⁸⁾が無償公開されているというのも特長の一つである。試作機の構築にあたり、本稿では MEMS センサの 3 軸加速度出力値及び、加速度に応じた振動レベルを 0.2 s 間隔で記録するプログラムをマイコンのメモリ上に書き込み計測に使用した。Arduino により制御される回路の主要部分を図-1 に示す。

振動センサの無線通信については、汎用部品として入手可能な XigBee 規格を実装した XBee ZB モジュールを用いた。通信距離の公称値は 120 m である。より通信距離の長い XBee Pro モジュールも市販されているが、本稿では消費電力や経済性の観点から XBee ZB モジュールを使用することとした。Xbee ZB モジュールはモードの設定により 1 対 1 や 1 対 N などの通信ネットワークを構築することが可能であるが、本稿の各実験では、最も単純な構成として 1 対 1 の組み合わせとした。設定を単純化するため一方をネットワーク管理用の Coordinator、他方をデータ転送用の Router として設定した。Coordinator にはワイヤアンテナ型モジュール、Router には u.fl アンテナ型モジュールを用いた。時系列的なデータを送信することが可能なセンサ検知部の外観を写真-2 に示した。3 層の小型基盤から構成されており、上から順に加速度センサ基盤、XBee ZB モジュールを接続した通信用基盤、そして最下層が Arduino UNO R3 互換マイコンボードである。Arduino はこのように「シールド」と呼ばれる基盤を上部に重ね接続することで

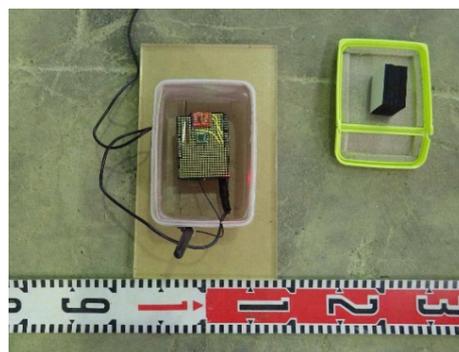


写真-3 耐寒保護を施した後の外装（上段が振動検知及び送信部、下段が受信部）

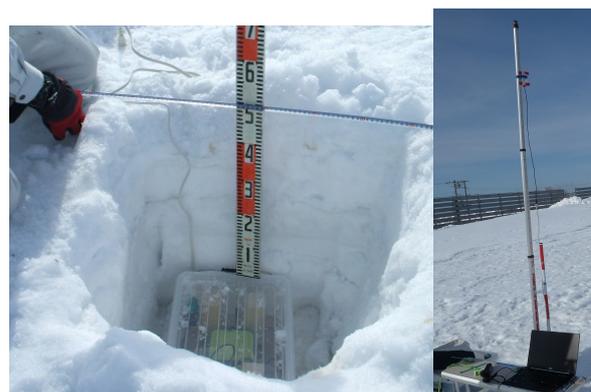


写真-4 屋外試験での設置状況の例（左が振動検知及び送信部、右が受信部）

様々な機能を本体に付加することが可能である。

以上から構成される無線式簡易振動センサであるが、製作に要した材料費は 2015 年現在で 1 台当たり 10,000 円程度、制作時間は 1 時間程度であり、性能検証を通じて実用性が確認されれば、他の市販品と比較して大きなコスト低減効果が見込める可能性がある。なお同タイプの加速度センサを室内の水路実験に適用し、市販の地震計と比較しても良好に振動加速度を検知可能であることは別報にて報告している⁶⁾。

屋外試験の条件としては、以下のように設定した。場所は寒地土木研究所が所有する石狩水理実験場である。雪面上または積雪層下に無線式簡易振動センサを設置し、雪面上のケースでは通信距離を 60 m~250 m、積雪層下のケースでは 50 cm の積雪層下で通信距離を 10 m~50 m までと設定した。屋外実験においては吹雪等悪天候の影響も想定されたため、写真-3 のように無線式簡易振動センサを構成する検知及び送信部と受信部を断熱材

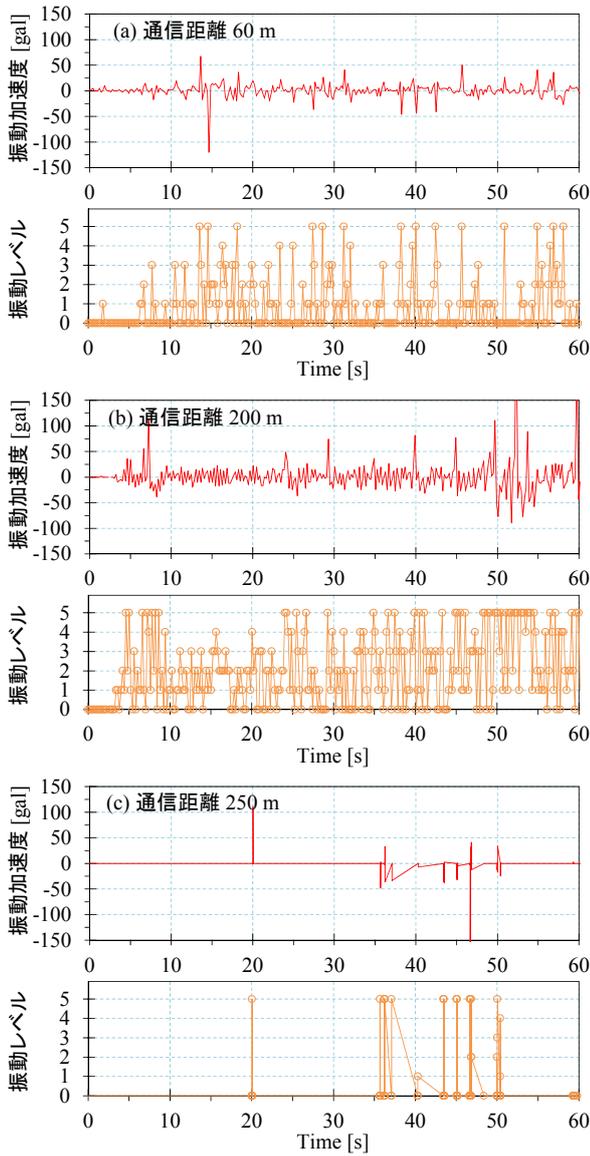


図-2 通信距離別の加速度計測結果及び振動レベルの時系列変化

で保護した上で防滴ケースに封入した。その上で、写真-4のように屋外試験に用いた。右側写真のように、受信部はポールに括り付け地上から高さ約2.4 mの箇所を設置した。

3. 結果及び考察

図-2に示したのは、屋外試験において通信距離を変化させた場合の時系列的な加速度計測結果及び、これに応じた振動レベルの変化である。本稿において、振動レベルとは前回の計測時刻からの加速度変化の絶対値として10 galごとにレベルが1上がるものとし最大値を5と設定した。(a)が通信距離60 m、(b)が通信距離200 m、(c)が通信距離250 mの場合である。時刻0 sにおいて無線式簡易振動センサのごく近傍で振動を発生させ、これを60 s間継続させた。(a)の60 mのケースでは時系列的に欠測は見られず、継続的に振動を検知し、その情報を受信部に送信することに成功している。設定した5段階

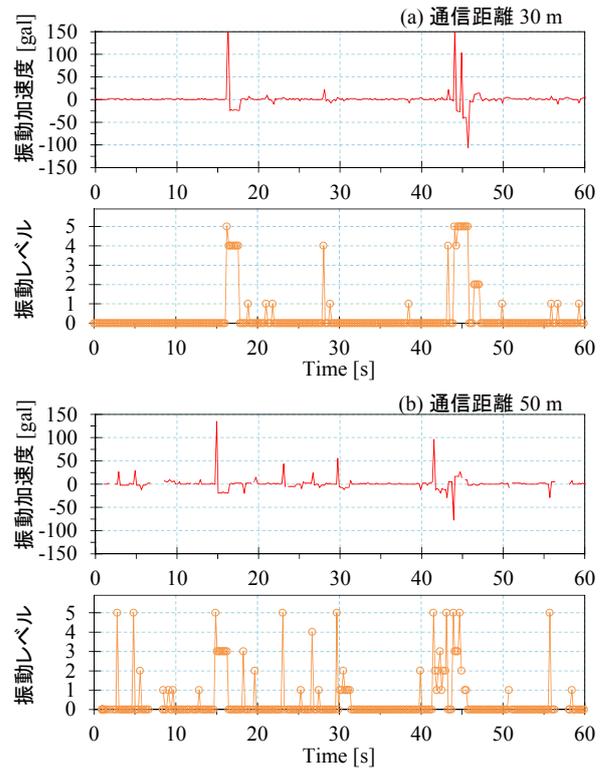


図-3 50 cmの積雪層を介した場合の加速度計測結果及び振動レベルの時系列変化

の振動レベルの変化にも追従できており、実際の溪流に設置しても所定の振動レベルを超えた場合に警報を発するといった用途にも適用できる可能性がある。

同図(b)に示したのは通信距離を200 mとしたケースであり、時系列的な加速度波形を捉えることに成功しており、振動レベルとしても5段階の変動を捉えている。検知の性能としては60 mの場合に比較しても大きな変化は見られない。一方で、(c)に示したのは通信距離を250 mと設定したケースである。実験中のほとんどの時間帯で欠測となっており、振動加速度のグラフより間欠的に振動を検知しているものの、振動レベルはほとんどの時間帯で最大のレベル5となっており、時間的な変化を捉えることはできていない。200 mと250 mでこのように大きな差異が生じた理由としては、距離が離れることで雪面形状変化の影響を強く受け、通信モジュールの送信が阻害されたことが原因として考えられた。対策としては受信器側の設置高を2.4 mより高い位置に設定することや、市販されている、より出力の大きいXBee Pro等の無線モジュールに変更するなどが考えられた。

また、本稿の実験を実施した際の天候は全て晴れまたは曇りであった。悪天候を想定した条件、例えば降雪、降雨、吹雪の場合に上記のような通信性能が得られるかについて追加検討を行うことが望ましいと考えられる。

次に、積雪環境を考慮したもう一つの想定として無線通信のための送信機側が積雪層に深さ50 cmまで埋設したケースの実験結果について示す。起振方法は、埋設箇所付近においてハンマーによる打撃とした。図-3に示したのは、積雪層を介した場合における加速度計測結果及び振動レベルの時系列変化である。この時の通信距離

表-2 振動検知及び通信試験の結果

実験条件	通信状況
雪面上 通信距離60m	○
雪面上 通信距離90m	○
雪面上 通信距離130m	○
雪面上 通信距離150m	○
雪面上 通信距離200m	○
雪面上 通信距離250m	△(間欠)
積雪層50cm下 通信距離10m	○
積雪層50cm下 通信距離20m	○
積雪層50cm下 通信距離30m	○
積雪層50cm下 通信距離50m	△(間欠)

とは埋設箇所と受信器との平面距離である。(a)の通信距離 30 m のケースでは、実験開始から 17 s 付近、44 s 付近において若干の欠測が見られるものの、概ね時系列の振動加速度を捉え発信することに成功している。(b)の通信距離 50 m のケースにおいても、欠測の時間帯は見られるものの、概ね時系列変化を捕捉しており、振動レベルの送信にも成功している。なお、これ以上通信距離を延長した場合には十分な通信をすることが困難であったことを別途確認している。

以上から、振動検知及び送信部が雪面上にあれば、比較的長距離の無線通信も可能であったが、積雪層下に埋設した場合には通信可能距離は高々 50 m 程度で、積雪環境下での設置の際には留意すべき事項と考えられる。上記の他に全ての実験ケースに対して、検知部が振動加速度を時系列的に計測し、受信器が振動レベルを受信できたかどうかの観点で通信状況を整理したのが表-2 である。無線モジュールの通信性能を確保するためには見晴らしが良く、距離が 200 m 程度以内であること、積雪層に埋設していないことが条件であると考えられる。

本稿のセンサは安価であり構成も単純で多点同時観測に適用することも可能である。実務上は、重要な観測点に対しては土砂移動検知実績のあるセンサを設置しておく、コスト的にこれらで網羅することが困難な観測点においては、本稿で提案するようなセンサを多数設置し検知箇所を補完する用途とすることが考えられる。このように複数タイプのセンサを相互補完的に用いることで多点同時観測を行い、従来よりも高精度に土砂移動を検知することができれば、今後より信頼性の高い土砂災害対策に活用できる可能性がある。

4. まとめ及び今後の課題

本稿では、無線式簡易振動センサを構築し、積雪環境下での振動検知を想定した屋外実験に適用してその振動検知及び無線通信機能に関して検討を行った。その結果、積雪の影響により通信性能の低下は見られたものの、安価かつ小型な構成でありながらも振動検知や振動レベルの推定に活用できる可能性が示された。振動レベルの推定結果は泥流発生時の流量規模推定にも活用できることを想定しており、今後継続的な試験や現地フィールドへの適用を行っていく予定である。

但し、本稿においては、例えば悪天候時の通信試験、1ヶ月以上の長期にわたるモニタリング試験、山間地など植生の影響が無視できない場合の試験などは行っておらず、これらの点に関する追加検討が今後の課題と考えられる。

参考文献

- 1) 堤大三, 藤田正治, 宮田秀介, 志田正雄, 長野快, 噴火による融雪型火山泥流の発生機構に関する基礎的検討, 京都大学防災研究所年報, No.54(B), pp.593-601, 2011.
- 2) 阿部孝章, 三浦敦禎, 伊藤丹, 融雪型火山泥流の発生規模予測に関する実験的研究, 平成 25 年度 砂防学会研究発表会概要集 B, pp.140-141, 2013.
- 3) 小野祐輔, 清野純史, 小林望, 新垣芳一, 高橋天平, 小型センサーを用いた構造物の地震被害の即時判定法の提案, 土木学会論文 A1(構造・地震工学), Vol.65(1), pp. 705-709, 2009.
- 4) 門田峰典, 宮森保紀, 綿崎良祐, 三上修一, 齊藤剛彦, 実損傷を有する横断歩道橋の補修によるモード形状の変化, 構造工学論文集 A, Vol.61A, pp.143-152, 2015.
- 5) 水谷佑, 木下篤彦, 高原晃宙, 石塚忠範, 能和幸範, 堤大三, 宮田秀介, 佐藤勇, 斎藤一裕, 安価かつ簡素な土砂移動発生時刻記録装置の開発と現地検証の試み, 平成 26 年度 砂防学会研究発表会概要集 B, pp.390-391, 2014.
- 6) 藤浪武史, 阿部孝章, 船木淳悟, 積雪層を介した土砂移動の振動検知に関する実験的検討, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.13-18, 2014
- 7) 森山聡之, 西山浩司, 和泉信生, 森下功啓, 渡辺亮一, 武蔵泰雄, 河喜多勝, 分散型多目的市民ダムの開発について, 西部地区自然災害資料センターニュース, No.50, pp.41-45, 2014.
- 8) Arduino - HomePage, URL: <https://www.arduino.cc/> (2015 年 12 月 10 日参照).