

# 仮設型雪崩検知装置の開発

佐藤 亮太\* 高橋 大介\* 飯倉 茂弘\*

## Development of Portable Type Avalanche Detector

Ryota SATO Daisuke TAKAHASHI Shigehiro IIKURA

We developed a device of detecting the avalanche by converting a load of avalanche that the pressure receiving portion of the device receives to electrical signal. This detecting device is attached temporary to the avalanche protection structures. As a result of processing the voltage of the electrical signal output from the device, the maximum voltages have a correlation with avalanche loads and the average voltages are correlated with a mass of flowing down avalanche. The developed avalanche detecting device uses two indicators of the maximum voltage and average voltage. The results of the test of the developed device by using the artificial avalanche, it was found out that the device successfully detected the small avalanche, and the detected information can be transmitted to the telephone within four minutes using a telephone cellular.

キーワード：雪崩，仮設，圧電素子，省電力

### 1. はじめに

鉄道沿線において、過去に雪崩が発生した斜面や雪崩危険度の高い要注意斜面（以後、雪崩危険斜面と記述する）の多くには雪崩防止林や雪崩止め柵などの予防工が、また雪崩走路となり得る斜面の谷筋等には雪崩減勢工や雪崩止擁壁などの防護工が整備されている。しかし大雪時には、これらの対策工が積雪に埋没する場合があります、その際には雪崩の発生抑止効果や線路設備や列車への防護効果が小さくなる。このような場合においても安全かつ安定的な輸送を確保するために、斜面積雪や雪庇などを除去するとともに、過去の雪崩履歴などをもとに降積雪や気象状況を考慮して巡回や警備が実施されている。しかし、全ての斜面について除雪などを行い、さらに巡回や固定的な警備員を配置することは困難である。そこで、巡回や固定警備の補助的手段として雪崩検知装置の設置が挙げられる。

国内の鉄道において、雪崩を検知して運行の安全性を確保する方法は古くから利用されている。雪崩警報装置は、鉄道省仙台鉄道局で開発され、1922年2月に奥羽本線赤岩・板谷駅間の6箇所（延長約200m）で初めて使用された<sup>1)</sup>。この装置は、雪崩危険斜面の線路脇に支柱を建て、そこに張られた電線（検知線）が雪崩により切断されることで雪崩が線路に流入したことを検知するものであり、現在も一部の線区で用いられている。

この他の雪崩の検知方法としては、雪崩の挙動を直接捉えて検知する方式のほか、画像解析やドップラーレーダーにより間接的に捉える方式などがある<sup>2)~15)</sup>（表1）。これらの方式の多くは商用電源や設置工が必要な常設

\* 防災技術研究部 気象防災研究室

表1 様々な雪崩検知方法

雪崩の挙動を直接的に捉える方法

種類	ワイヤー方式 <sup>2)</sup>	グライドメータ方式 <sup>3)</sup>	ワイヤーロープ方式 <sup>4)</sup>	振動センサー方式 <sup>5)</sup>
検知方法	ワイヤーの切断	積雪の移動量	ワイヤーの振動	ポールの振動

雪崩の挙動を間接的に捉える方法

種類	ドップラーレーダー方式 <sup>6)</sup>	地震計方式 <sup>7)~12)</sup>	マイクロホン方式 <sup>13)~14)</sup>	画像認識方式 <sup>15)</sup>
検知方法	雪の移動を検出	発生時の地盤振動を地震計で検出	低周波音波をマイクや気圧計で検出	画像解析による検出

設備である。しかしながら、雪崩危険斜面の多くは山間部であり、商用電源の使用や重機等による工事の実施は難しいと考えられる。

そこで、雪崩対策工が埋没するような大雪時に、雪崩危険斜面に人力によって仮設でき、沿線巡回や固定警備などの補助として役立つことができる仮設型の雪崩検知装置の開発に取り組んだ。

## 2. 雪崩検知装置の開発

### 2.1 開発コンセプト

鉄道沿線の雪崩危険斜面の多くには、前述したように予防柵や防護柵などの対策工が施工されていることが多いため、冬期間を通して平年値と同等の積雪状況であれば、雪崩の抑制もしくは防護効果があり雪崩による災害が発生する危険性は小さい。一方、対策工が埋没するよ

特集：防災技術

うな大雪時などには、発生した雪崩が線路に到達する危険性が大きくなると考えられる（図1）。

既存の対策工は大雪時にその背面が埋没したとしても対策工の前面の支柱などは露出していることが多いため、開発する雪崩検知装置はこのような鋼材を利用して設置することを想定する。考案した雪崩検知装置（以下、本装置と記述する）は、棒状の雪崩受圧部が既存の対策工よりも上に出るように仮設することで、埋没した対策工の上を通過する雪崩の衝撃力を利用して検知するものである（図1）。

また、本装置は雪崩の発生検知およびその規模に関する情報を伝送できるものとする。ここで雪崩規模に関する情報とは、雪崩の衝撃力の大小や流下質量の多寡であり、これらの情報は設備の破損や線路への支障判断に用いることを視野に入れたものである。これらの情報を伝送し、周囲の列車もしくは管理室に報知できる検知装置の開発に取り組むこととした。本装置の開発コンセプトをまとめると以下ようになる。

- (1) 重機等による施工が困難な山間部においても、人力で運搬および設置が可能なように、小型でかつ軽量であること。
- (2) 雪崩危険斜面は無電源地域が多いため、商用電源を必要とせず、極力省電力で稼働すること。
- (3) 検知装置の機構および検知アルゴリズムが単純であり、検知した雪崩情報を伝送できること。
- (4) 複数地点に仮設することも考慮し、比較的安価で製作できること。

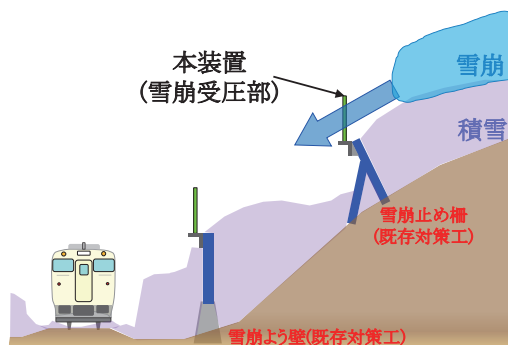


図1 検知装置設置イメージ

2.2 センサーの選定

雪崩の検知方法は雪崩の衝撃力を直接捉える方法であるため、雪崩によって受圧部が受ける衝撃荷重や変位を電気信号に変換する必要がある。衝撃による荷重測定方法としては、ひずみゲージ等を用いて受圧部に加わる衝撃によるひずみを電気信号に変換する方法や衝撃による物体の挙動を検出する方法がある。一般的に荷重計や加速度計などは電力の供給や、信号を増幅するための変換器が必要となるため、これらを監視装置に使用する場合には、センサーを動作させるための電力が常時必要となる。一方、本装置は省電力であることが必要なため、稼

働電力を必要としない圧電素子に着目した。

圧電素子は、動的な荷重や変形を加えると電荷を発生させる一方で、静的な荷重に対しては電荷が発生しないため、雪崩のような動的な現象を捉えるには適していると考えられる。これまでの一般的な圧電素子は動的な変形が生じたとしても発生する電荷量が少ないため、それを一般的な電圧ロガーで測定するためには高感度な増幅器が必要であった。しかし、近年では高い電荷量を出力可能なセンサーが開発されている。本装置への適用を検討した

のは、代表的な圧電素子であるチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）セラミックスをファイバー状に加工し、フィルムで挟み込んだシート状のもの（MFC：マイクロファイバーコンポジット）である（図2）。このMFCは一般的なひずみゲージと同様に薄いため、曲面にも接着でき、大きな変形に対する柔軟性も十分である。MFCからの出力電圧は増幅器などを用いることなく一般的な電圧ロガーで記録できること、さらに衝撃荷重と出力電圧の間には良い相関があり、とくに積雪の温度域である0℃以下においては温度による出力値の差異が小さいことが確認できたことから（図3）、本装置に適用できると考え、本センサーを選定した。

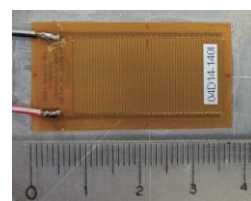


図2 使用した圧電素子

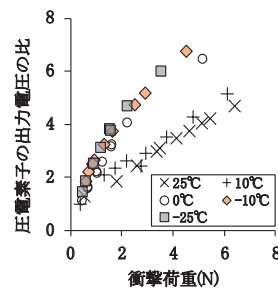


図3 圧電素子の出力特性（最大出力電圧の最小値を1とした）

2.3 雪崩受圧部の構造

MFCを用いて雪崩を検知するためには、雪崩受圧部が雪崩の衝撃荷重を受け、その荷重をMFCが検知する機構が必要である。考案した雪崩受圧部は、ポリウレタン製の棒（軽量、強靱でかつ安価なポリウレタン製の道路視線誘導標：およそ80cm）と2枚のステンレスプレート（水平プレートと鉛直

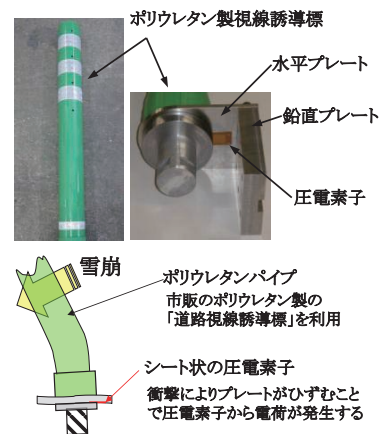


図4 雪崩受圧部の機構と検知の仕組み

プレート) およびMFCで構成される(図4)。棒状の雪崩受圧部に雪崩の衝撃が加わると、棒と水平プレートの接合点に大きなひずみが生じるため、この接合点付近にMFCを接着し、そこに生じるひずみを電気信号に変換して出力する機構とした。

#### 2.4 雪崩実験シュートを用いた出力確認試験

塩沢雪害防止実験所(新潟県南魚沼市)の構内に雪崩実験シュート(図5、6:長さ10.8m, 幅0.9m, 傾斜角度41°)を製作した。

出力確認試験は、シュート上端の集雪用バケツ(長さ1.8m, 幅0.9m)内に雪を入れ、バケツを傾けてシュート内に雪を流下させて小規模の人工雪崩を再現することで行った。シュート下部に設置した雪崩受圧部および衝撃力測定用の受圧装置(ロードセルにポリウレタン製の棒を半割にして取り付けたもの)に衝撃を加えた(図7)。各試験では圧電素子およびロードセルの出力を0.1msごとに記録した。雪崩の衝突速度はシュート下部の2箇所に取り付けられた光電センサーで測定した。

雪崩の密度はバケツ内の雪の密度を用いた。雪崩荷重の作用面積は、バケツ内の積雪の高さとポリウレタンパイプの直径から求めた。

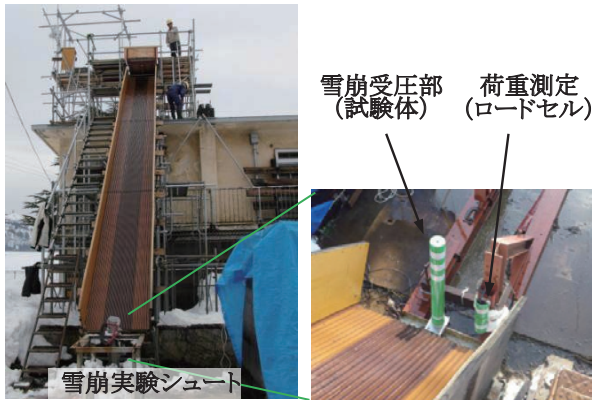


図5 雪崩実験シュート

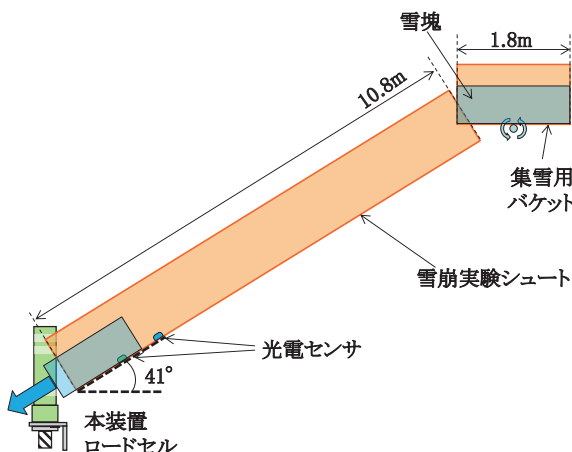


図6 雪崩実験シュートの側面図



図7 小規模雪崩通過前後の状況

#### 2.5 試験結果

出力確認試験はバケツ内の雪の高さを変えて18回行った。試験に使用した雪は、質量79~273kg, 密度494~606kg/m<sup>3</sup>のざらめ雪である。流下させた雪が雪崩受圧部に衝撃を与えたときに、圧電素子から出力された電圧信号およびロードセルで得られた荷重の測定例を図8に示す。

雪崩がポリウレタン製の棒に当たると同時に受圧部から出力された電圧信号が測定され、荷重が最大になるとほぼ同時に出力電圧も最大となった。また、雪崩が通過後、雪崩受圧部の自由振動が小さくなるまで電圧信号が測定された。他の試験でも、このような自由振動は雪崩通過後長くとも1.0秒以内で収束するとともに、その間の出力電圧は通過中の最大電圧を上回ることはなかった。

雪崩受圧部からの電圧信号と、雪崩規模を表す指標である衝撃荷重と流下質量との関係について調べた。出力電圧の最大値とそのときに雪崩受圧部に加わった最大衝撃荷重との関係を図9に示す。雪崩の最大衝撃荷重が大きくなるほど、出力電圧の最大値も大きくなり、両者には良い相関があることが確認できた。また、雪崩衝突後の一定時間内における出力電圧の平均値(サンプリングごとの電圧を積算して固定時間で除した値)は、ばらつきがあるものの、流下質量が増大するに従い、出力電圧の平均値も大きくなる傾向を示した(図10)。このように、本装置は雪の流下による衝撃を捉える事ができるとともに、その規模の大小を判別できることを確認した。

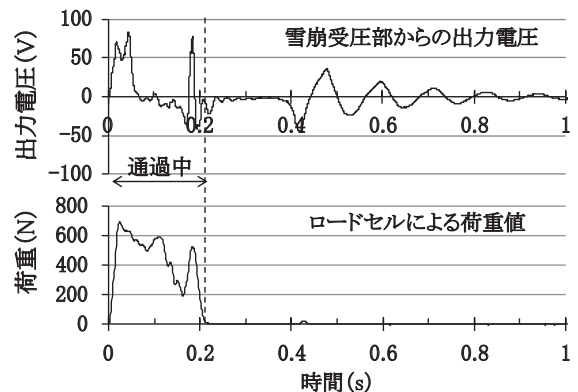


図8 試験データの例(密度:606kg/m<sup>3</sup>, 質量:195kg)

特集：防災技術

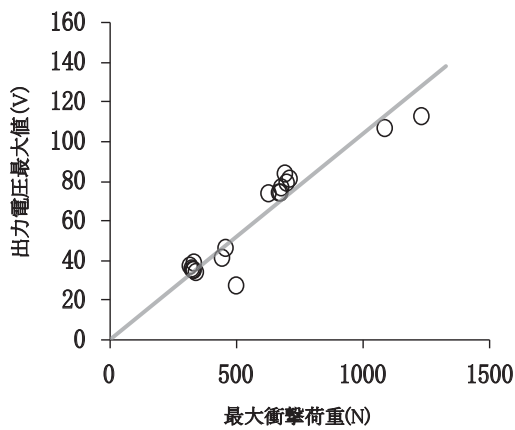


図9 最大衝撃荷重と最大出力電圧の関係

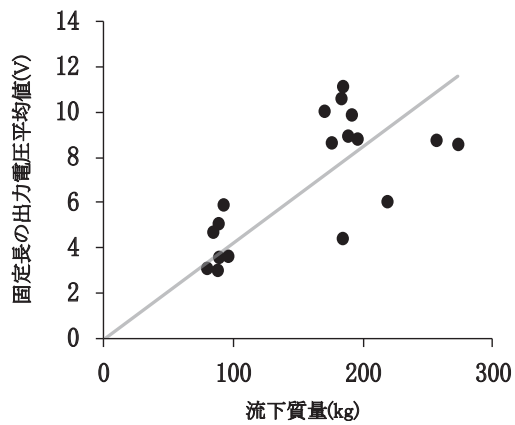


図10 流下質量と平均出力電圧の関係

3. 雪崩検知装置の試作

3.1 装置の構成

雪崩受圧部からの信号を処理して雪崩情報（雪崩の発生時刻および圧電素子の出力電圧を指標とした段階的な雪崩規模）を報知できる仮設型の雪崩検知装置を試作した（図11）。本装置のデータ処理部は20cm四方の筐体に格納されており、①電圧入力部、②処理部、③伝送部、



図11 雪崩検知装置（試作器）

および周辺機器（電源、アンテナ）から構成され、雪崩の発生および規模に関する判定を行い、その情報を伝送する機能を有する。なお、本装置はDC12Vバッテリーや大容量の乾電池で稼働するため、商用電源の無い場所においても容易に仮設して使用できる。

①電圧入力部

電圧入力部は、圧電素子からの出力電圧信号を処理し易いように変換するものである。圧電素子からの出力電圧は小規模な雪崩でも100Vを越えることがあるため、この信号を処理しやすいように出力電圧を1/100に減衰することとした。減衰した出力電圧は、出力電圧の最大値を常時更新して保持する（ピークホールド）信号（S1信号：雪崩の発生検知に使用）と、整流された信号（S2信号：雪崩の規模情報に使用）とに分けて事後の信号処理に用いることとした。

②処理部

処理部では、信号S1とS2を12ビットのA/D変換器によりデジタル値に変換する。A/D変換のサンプリング周波数は消費電力に直接影響するため2種類に分けており、一つは雪崩の発生を監視している待機状態（待機モード）の4Hz、もう一つは雪崩が発生した場合（計測モード）の10kHzである（図12）。

待機モードでは信号S1とS2に対して常時A/D変換を行っており、信号S1があらかじめ設定されたしきい値A以上となった場合には、その値（S1<sub>max</sub>）を保持するとともに、雪崩が発生したと判断し、計測モードに切

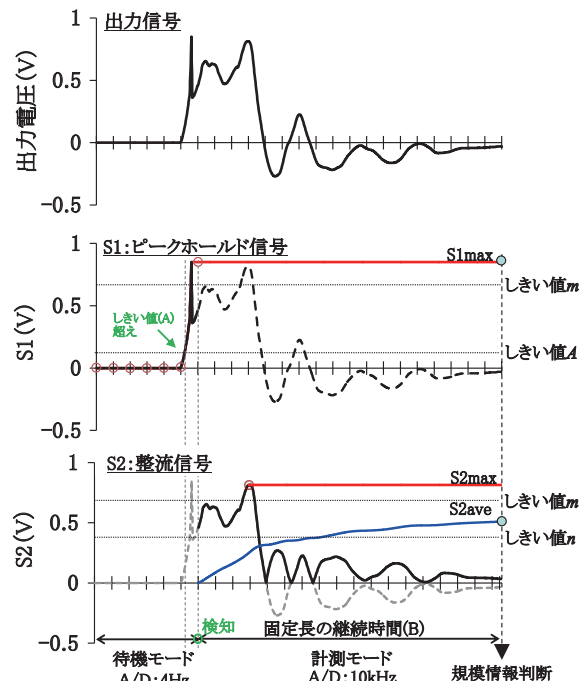


図12 出力電圧の処理

り替わる。待機モードでは4Hzという低い周波数でサンプリングしているものの、ピークホールドしたS1信号を用いることで、サンプリングのタイミングの間に出力電圧がしきい値Aを超えた場合でも雪崩の発生を取り逃すことなく検知することができる。一方、計測モードでは整流されたS2信号のみを扱い、計測モード中の最大値(S2<sub>max</sub>)を記録する。待機モード中のS1<sub>max</sub>と計測モード中のS2<sub>max</sub>を記録していることで、待機モードと計測モードの切り替わるタイミングで出力電圧が最大となった場合でもその最大値を取り逃すことがない。ここでは、雪崩の規模情報のうち雪崩荷重の大小については、S1<sub>max</sub>とS2<sub>max</sub>の大きい方を用いて判定することとした。

また、S2信号では計測モードが終了するまでの間(固定長の継続時間B)、出力電圧の積算処理が続けられ、最終的に平均電圧(S2<sub>ave</sub>) (データ処理上積算電圧(ΣV)を固定長の継続時間Bで除した値)として出力される。

上記の処理を行った後に、雪崩規模に関する判定を行う。判定は、S1<sub>max</sub>もしくはS2<sub>max</sub>とS2<sub>ave</sub>にそれぞれしきい値mとしきい値nを設けることで図13に示す4つに分類(雪崩フラグ1~4)される。ここで、しきい値mは雪崩の衝撃荷重(図9を参照)の大小に対応し、しきい値nは雪崩の流下質量(図10を参照)の大小に対応する。例えば、図12に示すような電圧信号が受圧部から出力された場合は、S1<sub>max</sub>とS2<sub>max</sub>を比較すると、S1<sub>max</sub>の方が大きく、かつしきい値mを超えている。さらにS2<sub>ave</sub>がしきい値nを超えているので、衝撃荷重、流下質量ともに大きな雪崩(雪崩フラグは4:図13中星印)と判定される。なお、しきい値A, m, nと計測モードの継続時間Bは使用者側で任意に設定できる。

③伝送部

伝送部は、処理部によって雪崩の発生が検知された場

合に、雪崩の発生時刻、処理部で判定された雪崩の規模に関する判定情報(雪崩フラグ1~4)、検知器検知装置番号(位置情報)、しきい値等の設定情報等(表2)を、携帯回線(FOMA)を介して配信する。また、雪崩発生時の他に、装置の稼働状況を確認するための定時通信機能も有している。

表2 検知情報の一例

送信データ	データの意味	
R=11:56	11時56分	雪崩検知時刻
N=00001	6.5秒	計測継続時間(6.5秒の倍数)
L=00511	0.62v	しきい値A(雪崩発生判断)
M=02657	3.24v	待機中の最大電圧の保持値
m=02315	2.83v	測定中(10kHz)のピーク値
X=02304	2.81v	フラグ用しきい値m (vs. 出力電圧の最大値(PS))
Y=00768	0.94v	フラグ用しきい値n (vs. 出力電圧の積算値(IV))
A=00005	5	出力電圧の平均値
F=00002	雪崩フラグ: 2	1: PSがしきい値以下, IVがしきい値以下
		2: PSがしきい値超過, IVがしきい値以下
		3: PSがしきい値以下, IVがしきい値超過
		4: PSがしきい値超過, IVがしきい値超過
S=00001	観測点1番	観測点番号

3.2 消費電力

本装置は、雪崩判定手順を先述のように単純化することで、低消費電力の8ビットのPIC(コントローラ)を用いることができるとともに、スリープ機能を組み込むことでPICの稼働時間を短縮している。これらにより待機時の消費電流は約1.1mA以下となった。一方で、雪崩発生後の定時通信時における消費電流は約15mAとなるものの、雪崩発生時の演算処理時間などを短くすることで(約100μ秒)省電力化を実現した。

稼働時の消費電流を机上で計算した結果、市販の大容量リチウム電池8本で2ヶ月以上使用できることがわかった。ただし、低温環境下では電池容量の低下が考えられるため、低温環境下での確認が必要である。

3.3 動作確認試験

試作した雪崩検知装置の動作確認試験を前述の2.3節に示した方法で行った。雪崩検知後、4分以内で雪崩情報(表2参照)をメールで送信できることを確認した。

また、本装置はWEBカメラのモジュールを接続することで雪崩の発生を検知したときに画像を送付する機能を付加することができる。動作試験では雪崩検知情報と同様に雪崩検知信号をトリガーとしてカメラを作動させ、取得画像が送付できることを確認できた。この画像情報は、現地の状況判断に有用であると考えられるが、画像取得を行うためには1回の画像撮影あたりおよそ760mA(12V)の電流を消費するため、別途バッテリーが必要となる。

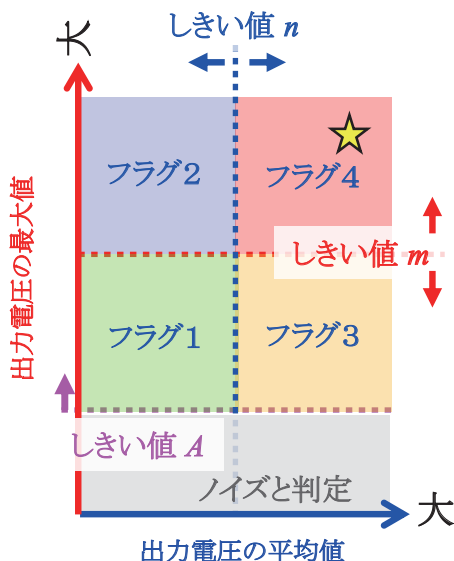


図13 雪崩規模の判定種別

特集：防災技術

4. まとめ

雪崩対策工などが埋没するような大雪時に仮設して用いる小型の雪崩検知装置を考案した。この装置は、ポリウレタン製の雪崩受圧部を雪崩対策工などの沿線の構造物に仮設し、この受圧部が受ける雪崩の荷重を圧電素子を用いて電圧信号に変換して雪崩を検知するものである。

雪崩実験シュートを用いた試験により、雪崩受圧部が受ける荷重の最大値と出力する電圧信号とに良い相関があること、また、ばらつきがあるものの雪崩の流下質量と電圧信号の平均値は相関があることが確認できた。

雪崩受圧部から出力される電圧信号を処理して、雪崩検知および雪崩規模に関する情報を携帯回線により送信できる雪崩検知装置を試作した。

試作した装置を用いて動作試験を行った結果、雪崩受圧部に雪崩の衝撃荷重が加わった場合には、即時に雪崩の発生を検知でき、その情報は携帯回線を介して約4分で送信できることなど基礎的な性能を確認することができた。この装置は、小型で持ち運びが可能であり、無電源地域においてもバッテリーや大容量の乾電池で稼働させることができるものである。

参考文献

- 1) 福島民報：赤岩，板谷駅間に崩雪報知機を装置，1922年2月10日記事，1922
- 2) 飯倉茂弘，和泉 薫，河島克久：鉄道における雪崩災害と雪崩警報装置の歴史，寒地技術論文・報告集，Vol.19，pp.844-851，2003
- 3) 山田穰，五十嵐高志，納口恭明：総合的雪崩予知システムの開発，豪雪地帯における雪害対策技術の開発に関する研究，科学技術研究開発局，pp.115-135，1988
- 4) Rice R., Decker R., Jensen N., Patterson R., Singer S., Sullivan C., Wells L. : Avalanche hazard reduction for transportation corridors using real-time detection and alarms. Cold Region

- Science and Technology, Vol.34, pp.31-42, 2002.
- 5) 飯倉茂弘，河島克久，遠藤徹，藤井俊茂：振動センサを利用した雪崩発生検知システムの開発，雪氷，Vol.62, No.4, pp.367-374, 2000
- 6) Macpherson J. : Railroad aims to predict alanche, <http://www.alaskarails.org/> , 2001.
- 7) 和泉薫，小林俊一：地震計に記録された表層雪崩，新潟大災害研年報，No.8, pp.99-104, 1986
- 8) Leprettre B., Navarre J-P., Panel J.M., Touvier F., Taillere A., Roulle J. : Prototype for operational seismic detection of natural avalanches. Annals of Glaciology, Vol.26, pp.313-318, 1998.
- 9) Sabot F., Naaim M., Granada F., Surinach E., Planet P., Furdada G. : Study of avalanche dynamics by seismic methods, image-processing techniques and numerical models. Annals of Glaciology, Vol.26, pp.319-323, 1998.
- 10) 今西伸行，関口辰夫，森谷武男，西村浩一，山田知充：雪崩によって生ずる地震動の観測（Ⅲ），2002年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集，p.30, 2002
- 11) 秋山一弥，武士俊也：雪崩震動を利用した雪崩自動観測システム（2），2002年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集，p.29, 2002
- 12) Bessason, B., Baldvinsson, G. I., Thorarinsson, O. : Detection and analysis of avalanches using wave measurements. In Hjorth-Hansen, E. Holand, I. Loset, S., Norem, H. Snow Engineering : Recent Advances and Developments, ed. Rotterdam, A.A. Balkema, pp.33-40, 2000.
- 13) Chritin, V., Rossi, M., Bolognesi, R. : Acoustic detection system for operational avalanche forecasting. Proceedings of International Snow Science Workshop, pp.129-133, 1996.
- 14) 谷本早紀，新井伸夫，岩國真紀子，村山貴彦，栗原靖，高橋大介，荒木啓司：全層雪崩に励起されたインフラサウンドの観測，雪氷研究大会（2013・北見）講演要旨集，p.223, 2013
- 15) 日本雪氷学会：3.27 左俣谷雪崩災害調査報告書。日本