

## 論文

# 振動センサを利用した雪崩発生検知システムの開発

飯倉 茂弘<sup>1)</sup>, 河島 克久<sup>2)</sup>, 遠藤 徹<sup>2)</sup>, 藤井 俊茂<sup>1)</sup>

## 要 旨

鉄道を雪崩災害から守るためには、さまざまな雪崩予防工や防護工を設置するハード対策とともに、場所によっては雪崩の発生を的確に検知し、列車の運転を確実に抑止するソフト対策も必要である。そこで本研究では、雪崩発生時の適切な列車の運転抑止と迅速な点検・除雪作業を支援する雪崩発生検知システムを開発した。このシステムの雪崩検知方法は、雪崩危険斜面を有する線路の脇に検知ポール（小型振動センサ内蔵）を設置し、雪崩発生時に雪がポールに当たることによって生じる振動をとらえて雪崩を検知するものである。この方法の特徴は、検知原理が単純であり、その結果、簡単かつ安価にシステムを構成できることである。本システムは、雪崩の発生を検知する機能に加えて、発生した雪崩の規模に応じた4段階のレベルの警報を出力する機能を有しているため、列車の運転抑止に有用であるのみならず、警報レベルを保線区等の監視局に伝送することによって、現地の線路除雪作業や点検作業の必要性の有無およびそれらの作業規模等を早期に判断することができる。本システムを黒部峡谷の雪崩多発地に設置し、一冬季間を通して稼働試験を行った結果、発生した全ての雪崩を正常に検知でき、実用性の高さが確認された。

キーワード：雪崩発生検知システム、列車の運転抑止、雪崩規模、線路除雪

Key words: snow avalanche detection and alarm system, suspended train operation, scale of avalanche, permanent snow removal

## 1. はじめに

鉄道沿線における雪崩の発生は小規模でも重大事故につながる可能性があるため、雪崩の危険斜面の多くにはさまざまな雪崩対策工が設置されている。しかし、雪崩対策工のみで延長が長い鉄道を完全に雪崩の被害から守ることは不可能であり、場所によっては雪崩の発生を誤動作なく的確に検知し、列車の適切な運転抑止を行う必要がある。そこで著者等は、振動センサを用いた簡易な手法で雪崩の発生を検知するシステムを新たに開発した。このシステムには雪崩の発生を検知する機能のみならず、発生した雪崩の規模に応じた段階的な警報を出力する機能をも付加させており、

雪崩発生現場の点検・除雪体制を迅速に整える上での判断を支援することができる。本論文では開発したシステムの雪崩検知方法や雪崩規模の評価方法などの特徴を述べるとともに、フィールドにおける稼働試験の結果に基づき、その実用性能を示す。

## 2. これまでの雪崩発生検知の方法

日本の鉄道では、雪崩危険斜面の線路脇に支柱を立て、そこに張られた電線が雪崩の通過によって切断されることで雪崩を検知する雪崩警報装置が古くから使用されており（川瀬，1942），現在でも一部の線区に設置されている（図1）。この方式は、電線を長く張ることにより検知すべき延長を長くとることができる利点がある。しかし、電線が積雪中に埋没した場合には雪崩を検知できないことや積雪の沈降力によって電線が切断されて

1) 財鉄道総合技術研究所 防災技術研究部  
〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38  
2) 財鉄道総合技術研究所 塩沢雪害防止実験所  
〒949-6408 新潟県南魚沼郡塩沢町大字塩沢1108-1

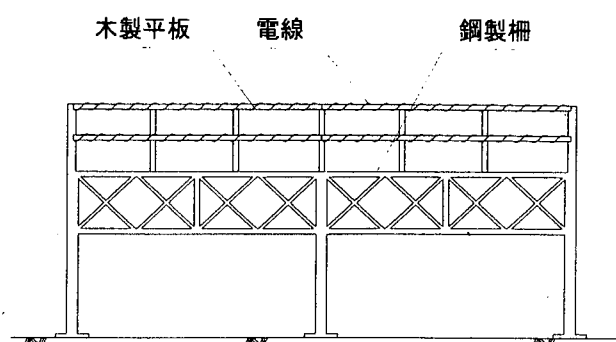


図1 鉄道沿線の雪崩危険斜面に設置されている雪崩警報装置（センサ部の構造）

誤検知する恐れがあること、雪崩の規模によっては電線が切断されないこと等の弱点がある（上津・田口，1990）。

道路や集落における雪崩対策の一つとして、雪崩の危険がある地域の積雪深、降雪強度、気温等の気象要素を観測し、得られたデータを解析して雪崩危険度の評価を行う雪崩監視システムが一部の地区で採用されている（寺田，1993）。このシステムは雪崩災害の未然防止という点では有用であるが、雪崩の発生を時間的・場所的に限定して予知することが困難であるため、列車の運転抑止を主目的としたシステムとしては必ずしも有用ではない。

その他に未だ実用化はされていないが、近年新たな手法に基づく雪崩検知・予知システムが開発されつつある。その一つは、全層雪崩の前兆現象としてよく知られている斜面積雪のグライドの活発化をグライドメーターと呼ばれる計測器でとらえることによって全層雪崩の予知を行うものである（山田ら，1988）。また、地震計を用いて雪崩発生時の地盤振動をとらえ雪崩の発生を検知したり、大規模な雪崩の予知を行う方法も最近注目を集めている（和泉・小林，1986；Leprettre *et al.*, 1998）。

### 3. 雪崩発生検知システムに要求される事項

鉄道に適用する雪崩発生検知システムには、次にあげるような諸事項が求められる。まず、雪崩発生検知システムを用いて列車の運転を抑止する場合、厳しい設置環境の中で誤動作することなく確実に雪崩を検知しなければならない。また、雪崩災害が懸念される線区は、多くの場合、厳しい

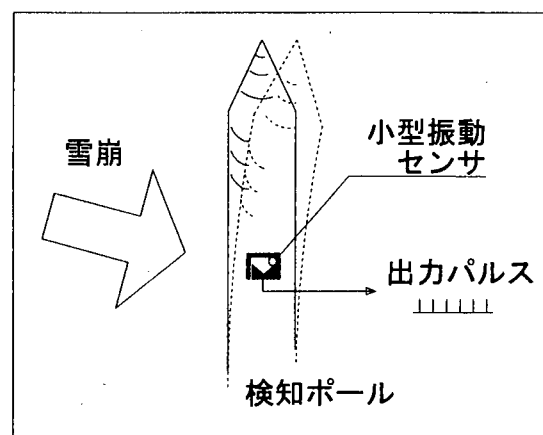
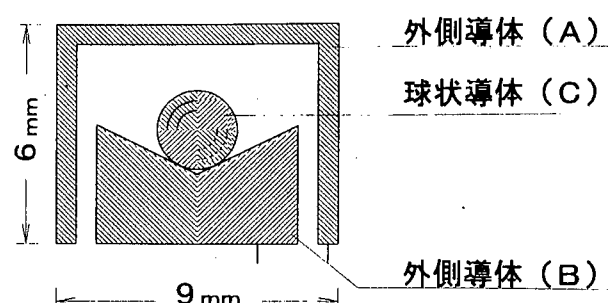


図2 小型振動センサの構造とパルス出力のイメージ

経営状態にあるローカル路線であり、雪崩対策に莫大な投資をすることは困難であるので、安価なシステムを開発する必要がある。さらに、このようなシステムの設置個所の多くが山間部であるため、現場施工が容易なシステムとすることが望まれる。

### 4. 考案した雪崩発生検知の方法

著者らが新たに考案した雪崩の検知方法は、検知ポールを線路脇に設置し、雪崩発生時の雪の衝突による検知ポールの振動を検出することで、即時に雪崩の発生を検知するものである。検知ポールの振動の検出はポールに内蔵された小型振動センサで行う。振動センサとしては、安価なシステム構成を実現させるために出力信号が単純なものを選択した。採用した振動センサは2つの外側導体（図2のA、B）、および球状導体（図2のC）から構成されており、外側導体間には電圧が負荷されている。静穏時には外側導体間には絶縁されているが、振動が生じた場合には球状導体が移動することによって、外側導体間に短絡と絶縁が繰り返し生じパルス信号が得られる。図3に示すよう

に、パルス信号の出力の有無は、センサの振動周波数と変位量に依存する。高い振動周波数では、小さな変位量でもパルス信号が出力されるが、振動周波数が低くなるにつれてより大きな変位量を与えないとパルス信号が出力されないという特性がある。

## 5. 雪崩規模の評価と警報レベルの設定

雪崩発生時に検知ポールの振動によって振動センサから出力されるパルス信号の総数は、雪崩が検知ポールに与える衝撃力と雪崩の継続時間とに依存する。雪崩の衝撃力が大きい場合には、検知ポールの変位量が大きくなるので、その結果パルス信号が出力される周波数領域が広がる(図3)。雪崩の継続時間が長い場合には、検知ポールが長時間振動するので出力されるパルス信号の数も多くなる。したがって、ひとつの雪崩で得られるパルス信号の総数は雪崩の規模を表す指標とみなすことができる。そこで本システムでは、このパルス信号の総数に4段階のしきい値(しきい値1<しきい値2<しきい値3<しきい値4)を設けて、以下に示す方法で雪崩の規模を評価し、段階的な警報(警報1、警報2、警報3、警報4)を出力することとした(図4)。ここでは警報の番号が大きくなるほど発生した雪崩の規模が大きいことを意味する。

まず、雪崩が発生した際に振動センサから出力される一連のパルス信号の数を、5秒間以上継続してパルス信号が出力されなくなるまで積算す

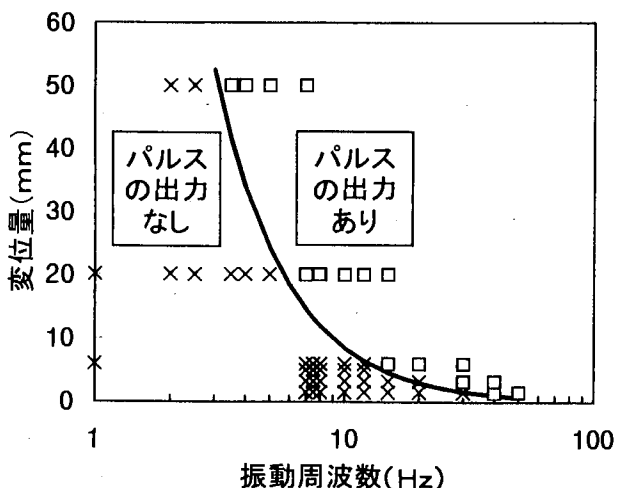


図3 振動センサのパルス出力の有無と振動周波数および変位量との関係

る。5秒間以上パルス信号が出力されないと、ひとつの雪崩が終了したものとみなす。出力されたパルス信号の総数がしきい値1に達しない場合は雪崩が発生したとは判断しない。これは、強風、地盤振動、列車の運行の障害にならない小規模の雪の崩落等によって検知ポールが振動した場合の警報出力(誤検知)を防ぐためである。

次にパルス信号の総数がしきい値1以上2未満の場合には警報1を発する。同様にパルス信号の総数がしきい値2以上3未満の場合には警報2を、しきい値3以上4未満の場合には警報3を、しきい値4以上の場合には警報4を発する。

## 6. 開発した雪崩発生検知システム

### 6.1 システムの構成

開発したシステムは検知ポール、信号変換器および表示装置で構成されており(図5)、鉄道沿線へ適用した場合には図6のような配置となる。

検知ポールは、FRP製の中空パイプ(外径11 cm, 内径10 cm, 1 mあたりの質量1.8 kg)を用いており、図2に示した振動センサが内蔵され

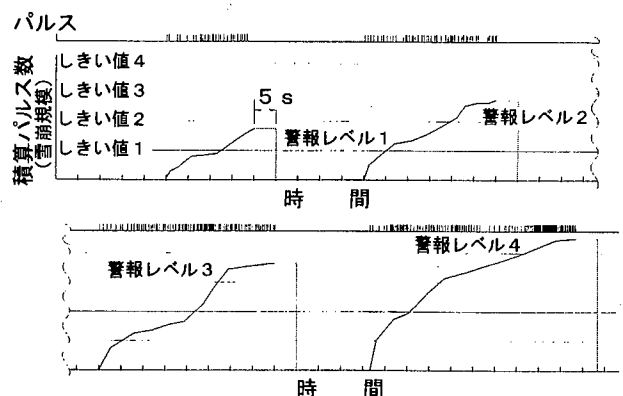


図4 パルス信号の積算処理と警報レベルの判定方法の模式図

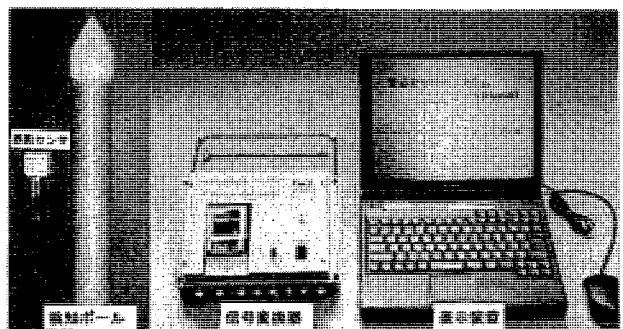


図5 雪崩発生検知システム

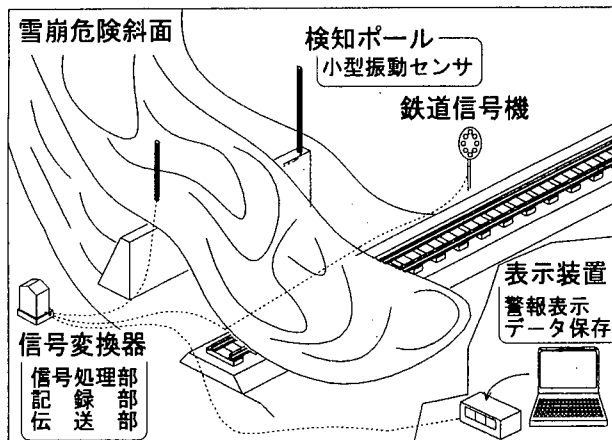


図6 雪崩発生検知システムを鉄道沿線に設置した場合のイメージ

ている。検知ポールの長さは、設置個所において積雪の深さが最大になった場合でもポールの先端が1m程度は雪面上に出るように考慮し決められる。さらに、検知ポールの設置にあたっては、起こりうる雪崩の走路を十分に考慮したうえで最適な場所を選定することが重要である。

信号変換器（外寸  $25 \times 17 \times 10$  cm, 質量 2.7 kg）は信号処理部、記録部および伝送部に分れている。信号処理部は、検知ポールから出力されたパルス信号の数を0.1s毎にカウントし、そのパルス信号の総数を求め、あらかじめ設定されたしきい値に基づいて警報レベルを判断する。その他、次節に示すように検知ポールの折れ曲がりや信号変換器と検知ポールとを結ぶケーブルの断線等の異常を監視する機能も信号処理部に付加されている。伝送部は雪崩の発生時刻、0.1s毎のパルス数、パルス信号の総数および判断された警報レベルを表示装置へ送信するとともに、折れ曲がり等の異常が生じた場合には、その情報についても送信する。また、雪崩が検知された場合には、伝送部を介して現地の鉄道信号機を制御することもできる。記録部では表示装置に送信されたものと同じデータがメモリカードに保存される。1台の信号変換器には、最大6本の検知ポールを接続することができ、各検知ポール毎に上記の処理を個別に行うことができる。

表示装置（PC）は信号変換器から送信されたデータおよび異常情報を受信し、画面表示とデータの保存を行う。また、各しきい値の入力や変更も表示装置で行うことができる。

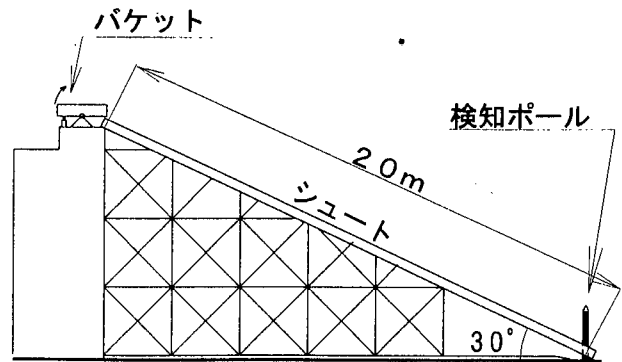


図7 雪崩実験シュートの概略図

## 6.2 故障等の監視方法

本システムには、万一検知ポールが折れ曲がったり、振動センサのケーブルが断線した場合を考慮して、それらの異常を監視する機能が付加されている。検知ポールが折れ曲がり、内蔵されてる振動センサにある角度以上の傾きが生じた場合、図2に示す球状導体（C）が移動し、外側導体（A）と（B）が常時短絡した状態となる。一定時間以上短絡した状態が継続すると、信号変換器は検知ポールに折れ曲がりが発生したと判断する。また、信号変換器と振動センサを接続するケーブルの断線の検知に関しては、振動センサと並列に組み込まれた抵抗を通して微弱な電流を常時流すことによってケーブルの導通が確認されており、その電流が遮断された場合には断線が生じたと判断される。

## 7. システムの動作確認試験

開発した雪崩発生検知システムに関して、雪崩の衝撃による検知ポールの振動とパルス信号の出力との関係を明らかにするとともに、パルス信号の総数を用いた雪崩規模の評価方法の検証を目的として、システムの動作確認試験を行った。

### 7.1 試験方法

試験は図7に示す雪崩実験シュート（幅1.7m, 長さ20m, 傾斜30°）を用いて行われた。シュート上端部のバケット内に雪（濡れざらめ雪、密度  $430 \sim 670 \text{ kg/m}^3$ , 含水率5~16%）を入れ、バケットを傾けてシュート内に雪を流下させた。このようにして人工的な雪崩を発生させ、シュート下部に固定された検知ポール（長さ3m）に衝撃を加えた。検知ポールは下端50cmのみが固定さ

れており、その固定部から 80 cm 上部に振動センサが取り付けられている。流下させた雪の質量は 130 kg ~ 1150 kg であり、質量の異なる 30 回の試験を行った。

各試験では、振動センサから出力されるパルス信号の数の変動を信号変換器で記録するとともに、検知ポールの振動センサ取り付け高さにおける変位量をレーザ距離計で測定した。また、一部の試験では、雪が衝突した際の検知ポールの振動周波数を調べるために、応答性のよい加速度センサをポールに取り付け振動加速度を測定した。

## 7.2 試験の結果と考察

### 7.2.1 雪の衝突による検知ポールの挙動とパルス出力の関係

雪の衝撃による検知ポールの振動とパルス信号の出力状況の一例として、1150 kg の雪を流下させた場合の検知ポールの変位量、振動センサから出力されたパルス信号、および積算パルス数の時間変化を図 8 に示す。この事例では、ビデオの映像から判断して、雪が検知ポールに衝突している時間は約 0.76 秒間であった。検知ポールは雪の衝突中（時間 0 ~ 0.76 s）に激しく振動し、雪が通過した後もしばらくの間振幅を減少させながら振動している。振動センサからのパルス信号は、衝突の 0.06 s 後から出力され始め、検知ポールが最も大きな変位量を示す時間帯（衝突後 0.35 ~

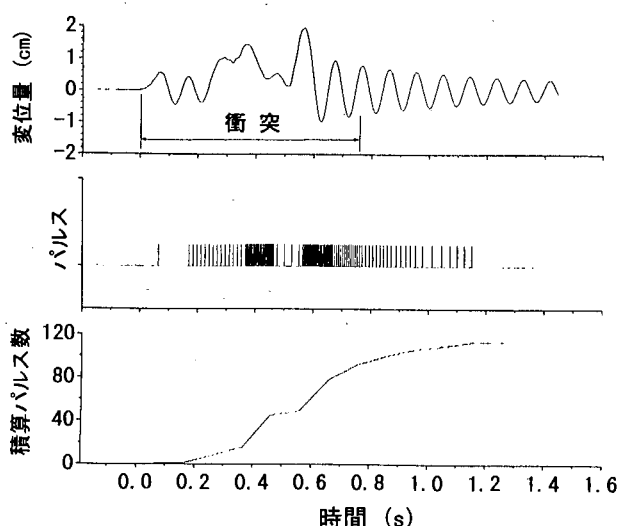


図 8 1150 kg の雪を流下させたときの検知ポールの変位量、振動センサから出力されたパルス信号、および積算パルス数の時間変化。雪が検知ポールに衝突した時点をも時間 0 とする。

0.65 s) にその出力数も多くなっている。また、雪の衝突終了後に検知ポールが減衰振動に移行すると、出力されるパルス信号の数も急激に少なくなり、衝突後 1.15 s 以降はポールが振動していてもパルス出力はみられない。他の試験結果もこれと同様であり、大部分のパルス信号は雪の衝突中に出力されることが明らかになった。

### 7.2.2 検知ポールの振動特性

雪の衝突に伴う検知ポールの振動特性を明らかにするため、ポールの振動加速度の高速フーリエ変換 (FFT) を行い、パワースペクトルを求めた (図 9)。その結果、検知ポールの振動には 7.9 Hz 付近に最も大きく卓越した周波数成分があり、20 ~ 60 Hz の周波数領域がこれに次いでいる。また、130 Hz 付近にも卓越した成分がみられる。これらの卓越周波数の中には検知ポールの固有振動数が含まれていると考えられる。そこで、検知ポールの固有振動数を、下端が固定された片持梁構造の振動数方程式 (小堀, 1978) によって算出した。計算の結果、今回用いた検知ポールでは、1 次、2 次、3 次の固有振動数はそれぞれ 7.8 Hz、48.8 Hz、136.5 Hz となり、FFT 解析でみられた卓越周波数とはほぼ一致する。しかし 20 ~ 60 Hz の周波数領域では全体的にパワースペクトル密度

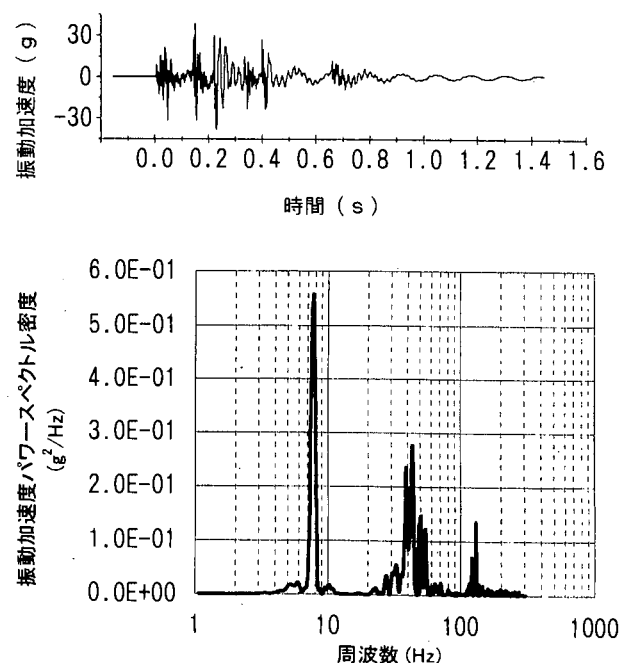


図 9 試験で得られた検知ポールの振動加速度の変動とその FFT 解析の結果

が大きくなっているのです, この領域は, 2次の固有振動数を含むものの, 全体としては雪の衝突による検知ボールの振動に対応するものと考えられる. 図3よりこの20~60 Hzの周波数領域では, 検知ボールの変位量が比較的小さくてもパルス信号が出力されることがわかる. したがって, 雪の衝突による検知ボールの振動周波数が20~60 Hzであるということは, 検知ボールの変位量が小さい小規模な雪崩も本システムで確実に検知できることを示唆している. 一方, 雪の衝突終了後にパルス信号の出力がほとんど見られないのは, 減衰振動に移行した後の検知ボールの振動では, 1次の固有振動数が卓越するために, 変位量がある程度大きくないとパルス信号が出力されないことによるものと判断できる. このことは雪崩通過後には検知ボールが振動してもパルス信号がほとんど出力されないことを意味しており, パルス信号の総数を用いて雪崩の規模を評価する上で好都合であるといえる.

### 7.2.3 雪崩規模の評価方法の妥当性の検討

流下させた雪の質量とパルス信号の総数との関係を図10に示す. データにはばらつきがみられるが, その原因の一つとしては, 流下させた雪の密度や検知ボールとの衝突速度が試験毎に多少異なることがあげられる. しかし, 全体的な傾向としては, 図中に示した近似曲線のように, 流下させた雪の質量が大きくなると, すなわち雪崩の規模が大きくなると, パルス信号の総数が急激に増加する傾向がみられる. このことは, パルス信号の総数を用いることによって雪崩規模を評価する

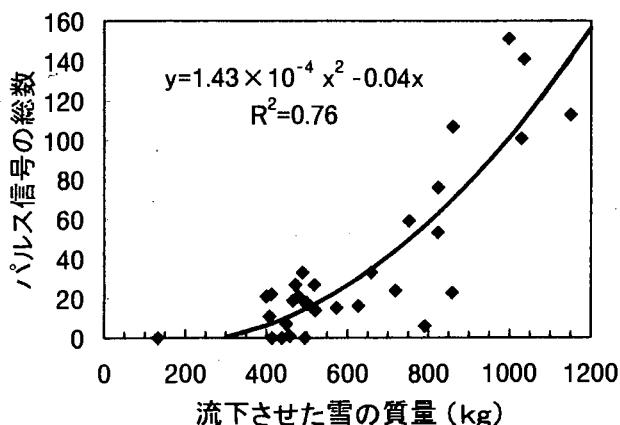


図10 流下させた雪の質量とパルス信号の総数との関係

ことが可能であることを表しており, 5章で述べた警報レベルの判定方法の妥当性を示すものである.

## 8. 黒部峡谷志合谷における稼働試験

1998年11月25日から1999年6月4日の期間に, 黒部峡谷志合谷の雪崩多発斜面において, 開発したシステムの稼働試験を行った. この斜面は大規模な乾雪表層雪崩が多発すること知られており(清水, 1977), 1970年代前半から富山大学や北海道大学等が中心となって雪崩の観測設備が整えられている. 稼働試験は, 観測機器の設置用の架台(川田ら, 1989)により製作されたBマウントに2本の検知ボールを取り付けて行われた(図11). 信号変換器と表示装置は, この架台直下のトンネル内にある観測小屋に設置された.

一冬季間にわたる稼働試験において, 1999年1月29日および2月2, 3, 11, 13日に合計8回の雪崩が検知された(表1). 志合谷に近い上市(富山県)のアメダスデータ(図12)から, 志合



図11 黒部峡谷志合谷における検知ボールの設置状況

表1 本システムによる雪崩検知日時と北大等の観測による雪崩発生日時との比較

雪崩発生検知システムで記録されたデータ				北大等の観測で 得られた雪崩の 発生日時刻
雪崩検知 月 日 時刻	雪崩継続 時間(s)	パルス信号 の総数		
1月29日 22:18	5.2	719		22:30*
2月2日 15:46	3.4	123		15:46
2月3日	3:07	2559		3:07
	4:14	4062		4:13
	9:46	34		9:46
2月11日 22:21	5.2	823		22:19
2月13日	3:13	535		3:11
	3:52	596		3:51

\*1月29日までは北大等の計測器の時計が未調整であったため、本システムの検知時刻との間に12分のずれが生じている。

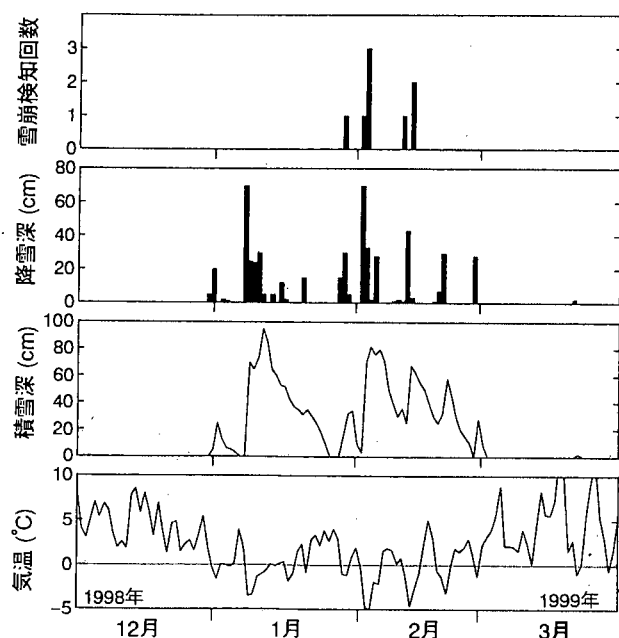


図12 黒部峡谷志合谷における雪崩の日別検知回数および上市(富山県)の気象データ

谷で雪崩の発生が検知された日は、2月11日の1事例を除いて、当日あるいは前日に多量の降雪がもたらされており、乾雪表層雪崩が発生しやすい気象条件であったと考えられる。表1に示すように、パルス信号の総数や雪崩の継続時間はそれぞれの雪崩で大きく異なり、さまざまな規模の雪崩が発生したことを表している。

本システムで得られた雪崩の検知日時と北海道大学等が同地点に設置している雪崩衝撃圧測定装置やビデオカメラ等のデータから判断された雪崩発生日時とを比較した結果、本システムによる雪崩の見逃しは全くなく、しかも両者から得られた雪崩の発生日時刻もほぼ完全に一致していた。さら

に、強風等による誤検知も全くみられず、信頼性が確認できた。

## 9. 本システムを用いた列車抑止および除雪体制の支援

開発したシステムは、雪崩の発生を検知する機能に加えて、発生した雪崩の規模に応じた4段階のレベルの警報を出力する機能を有している。本システムでは、積算パルス数がしきい値1に達した時点で雪崩が発生したと判断されるので、即座に現地の鉄道信号機を制御することで、列車の運転を抑止することができる。列車の運転抑止を行う上で最適なしきい値1の値は、設置箇所の地形、雪の量、除雪状態、設置箇所において発生する雪崩の種類や規模、および検知ポールに取り付け状態等に応じて異なる。したがって、システムを設置してからしばらくの期間は、試験的な稼働を行った上で経験的にしきい値1を決める必要がある。

また、雪崩が検知された際に、その警報レベルが即時に保線区や指令等の監視局に伝送されるようにしておけば、現地の除雪体制等を迅速かつ適切に整える上で役立つものと考えられる。警報レベルは、現地の線路上に堆積した雪(デブリ)の量や各種鉄道施設の被災の度合いを推定する一つの目安として活用することができるので、現地の線路除雪や点検等の必要性の有無や作業規模の早期判断を支援することができる。ただし、この場合もしきい値1~4を如何に設定しておくかが問題であり、やはり、設置箇所毎に経験的に最適値を決定しなければならない。

## 10. おわりに

本論文では、振動センサを用いた簡易な手法で雪崩の発生を検知するシステムについて述べた。このシステムの特徴は、検知原理が単純であることであり、その結果、システム構成を簡単化できるため製作コストが低いことである。また、振動センサが非常に小さいことに加えて、耐候性のよいFRP製のポールを使用しているのも、検知ポール部分を小型軽量化でき、現場施工が容易であることも特徴である。一方、性能の面でも、稼働試験によって誤動作なく確実に雪崩を検知できる

ことが確認されており, 実用化レベルに達している  
と判断される. 今後は, 落石, 土砂崩壊, 土石  
流等に対する監視システムとしての応用も視野に  
入れて, さまざまな設置環境や使用目的に対応で  
きるよう性能の向上を図りたい.

### 謝 辞

黒部峡谷志合谷での稼働試験では, 富山大学の  
雪崩観測施設を使用させて頂いた. 稼働試験の実  
施にあたり, 川田邦夫博士 (富山大学), 飯田肇  
氏 (立山カルデラ砂防博物館), 西村浩一博士・  
伊藤陽一氏 (北海道大学) および山田穰氏 (長岡  
雪氷防災実験研究所) には格別なる便宜を図って  
頂いた. また, 西村浩一博士と伊藤陽一氏からは,  
博士らが黒部峡谷で観測された雪崩の発生時刻に  
関するデータを提供して頂いた. (財)鉄道総合技術  
研究所の吉岡博室長からは FFT 解析に関しての  
ご指導をいただいた. 以上の各氏に心より感謝の  
意を表する.

### 文 献

- 和泉 薫・小林俊一, 1986: 地震計に記録された表層  
雪崩. 新潟大災害研年報, **8**, 99-104.  
川田邦夫・会津敏一・佐藤幸生・成田英器, 1989: 雪  
崩観測マウントの製作と設置. 黒部ホウ雪崩—黒部  
峡谷乾雪表層雪崩の研究— (Contributions to Moun-  
tain Science, No.2), 20-23.  
川瀬源一, 1942: 雪と鉄道 (其四). 雪氷, **4**, 18-20.  
小堀与一, 1978: 実用振動計算法, 東京, 工学図書株  
式会社, 197-200.  
Lepretre, B., Navarre, J.-P., Panel, J.M., Touvier, F., Taille-  
fer, A., Rouille, J., 1998: Prototype for operational  
seismic detection of natural avalanches. Annals of  
Glaciology, **26**, 313-318.  
清水 弘, 1977: 黒部ホウ雪崩. サイエンス, **7** (3),  
25-36.  
寺田秀樹, 1993: 雪崩管理システム. 砂防学講座第 8  
巻雪崩対策, 東京, 山海堂, 115-127.  
上津和雄・田口雄三, 1990: JR 東海における冬への対  
策. 新線路, **44** (11), 8-10.  
山田 穰・五十嵐高志・納口恭明, 1988: 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, 115-  
135.

### Snow avalanche detection and alarm system using a vibration sensor

Shigehiro IKURA<sup>1)</sup>, Katsuhisa KAWASHIMA<sup>2)</sup>, Toru ENDO<sup>2)</sup>, Toshishige FUJII<sup>1)</sup>

1) Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540

2) Shiozawa Snow Testing Station, Railway Technical Research Institute,  
1108-1, Shiozawa, Shiozawa-cho, Minami-uonuma-gun, Niigata 949-6408

**Abstract:** To improve the safety of railways in snowy regions, a new system for detecting  
avalanches has been designed and developed. This system consists of a detecting unit, a signal  
conversion device and a display device. The detecting unit installed on a slope subject to  
avalanches detects vibrations due to the avalanche impact with a built-in vibration sensor. Oper-  
ating tests of the new system were carried out using an artificial avalanche chute 20 m in length.  
The tests revealed that the system can not only detect the occurrences of avalanche but also  
judge the scale of the avalanche. In addition, field tests in Shiaidani valley in Kurobe Gorge  
showed that the system is of much practical use, because it could accurately detect the occur-  
rence of natural powder snow avalanches throughout the winter season of 1998/99.

(2000 年 4 月 1 日受付, 2000 年 5 月 26 日改稿受付, 2000 年 6 月 7 日受理, 討論期限 2001 年 1 月 15 日)