

## 雪崩の警備への気象情報の活用

防災技術研究部 気象防災研究室

主任研究員 飯倉 茂弘

### 1. はじめに

雪崩の発生は、斜面の特徴や降・積雪および気象状況、さらには周辺地形などの影響を受ける。このため、鉄道における雪崩危険斜面の選定や警備の発令・解除は、雪崩の危険がある線区を受けもつ部署ごとに、雪崩履歴などを参考とした経験的な判断に基づいて行われることが多い。このような判断方法は、線区内の個々の斜面状況などが反映されるため実用的である反面、他の地域との判断方法の相違や、経験的判断方法の継承などの課題がある。本研究では、既往の研究事例や過去の雪崩発生事例の分析から、客観的な指標による雪崩危険斜面の抽出や警備時期の設定方法を検討した。危険斜面の抽出についてはスコア表を用いた採点方式を、また警備時期の設定については斜面積雪の安定度の推定結果を用いた方法を提案した。

### 2. 事例解析に用いたデータ

雪崩発生事例は積雪期の空中写真判読で得られた中越地域の雪崩データ（発生斜面123箇所と非発生斜面123箇所）および東北地域の雪崩データ（発生斜面185箇所、非発生斜面145箇所）と学術文献等から得られた中部地方～東北北部にかけて発生した雪崩事例(60件)である。

### 3. 雪崩危険斜面の抽出方法

客観的に雪崩危険斜面を抽出する方法として、鉄道設備からの見通し角度のみを用いて1次ふるいを行い、抽出された斜面について、傾斜や植生などをスコア表を用いて採点し、それぞれの斜面の危険度を評価する方法を検討した。

#### 3.1 見通し角度による斜面の抽出

見通し角度（ $\alpha$ ）とは、評価対象箇所から近傍斜面の上端を見たときの仰角で、対象箇所が雪崩の到達範囲内か否かを判断する評価指標<sup>1)</sup>の一つである。中越地域および東北地域の雪崩の発生箇所のデータについて、雪崩痕跡の流路末端から発生区までの見通し角度を調べたところ、表層雪崩は25～53°、全層雪崩は20～60°の範囲であった（図1）。ここでは、雪崩の形態に関係なく、見通し角度が20°未満の斜面については、雪崩の到達の可能性は小さいものと判断した。

#### 3.2 スコア表による危険度評価

鉄道構造物に雪崩が到達する可能性がある斜面については、どの程度、雪崩が発生する危険度が有るかを評価して警備の要否や優先度を定める必要がある。そこで、中越地域および東北地域の雪崩データを用いて、それぞれの斜面の特徴と雪崩の発生・非発生との関係を調べ、採点方式

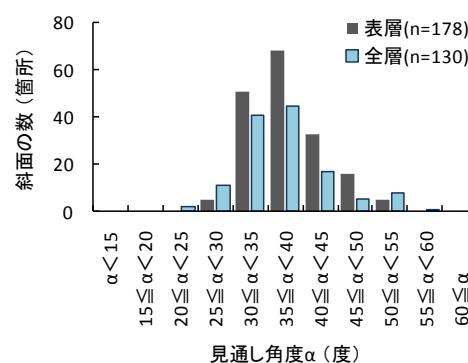


図1 見通し角度別の雪崩発生斜面数

による評価方法<sup>2)</sup>を用いることとした。ここでは斜面の特徴を表す要素として空中写真や地形図から判読できる斜面の傾斜、方位、形状、植生を選択した。これらの要素について、雪崩の発生・非発生を外的基準として数量化Ⅱ類分析を行い、雪崩の発生への影響度を調べた結果、傾斜、植生、形状、方位の順に影響度が大きいことがわかった。斜面の傾斜や植生

表 1 要素・階級別スコア表

要素	階級	得点	
傾斜	1	$0^\circ < \theta \leq 20^\circ$	-1.6264
	2	$20^\circ < \theta \leq 35^\circ$	-0.3619
	3	$35^\circ < \theta \leq 45^\circ$	0.2826
	4	$45^\circ < \theta$	0.3898
植生	1	裸地・草地	0.7852
	2	樹冠密度 $\leq 30\%$	0.2140
	3	$30\% < \text{樹冠密度} \leq 60\%$	-0.9731
	4	$60\% < \text{樹冠密度}$	-1.1595

に比べて、形状や方位は影響度が著しく小さいことから、斜面の傾斜と植生状況の2つの要素を選定して、再度数量化Ⅱ類分析を行った。この結果から得られた要素別・階級別のスコア表を表1に示す。スコア表の階級の得点が0よりも小さい値の場合は雪崩の非発生に寄与し、0よりも大きな値では雪崩の発生に寄与することを意味する。雪崩の危険度評価は、2つの要素の合計で表すことができ、合計得点（評価得点）が高いほど雪崩の発生危険度が高く、低いほど雪崩の発生危険度が低い斜面と考えることができる。このスコア表の相関比（級間平方和/全平方和）と発生・非発生の的中率（的中数/全サンプル数）は、それぞれ0.70と92%であることから、発生・非発生を比較的良く判別できているものと考えられる。

作成したスコア表の要素は斜面の傾斜と植生のみであり、現場調査あるいは航空写真や地形図からこれらを判読することで、それぞれの斜面毎の評価得点を求めることができる。なお、統計解析に用いた対象斜面の積雪深は概ね1~4mの範囲にあることから、ここでは積雪がこの範囲にあるときの雪崩の発生危険度を示している。

この方法による雪崩の警備箇所抽出フローを図2に示す。はじめに、前節で述べた見通し角度を用いて、対象箇所が雪崩の到達範囲にあるか否かを選別し、到達範囲にある箇所については、スコア表を用いて近傍のそれぞれの斜面の雪崩危険度を評価する。見通し角度については、3.1節の調査結果から20°以上は雪崩の到達する可能性があるとし、評価得点については、3.2節の分析結果から評価得点が0点以上は雪崩が発生する可能性があるとした。

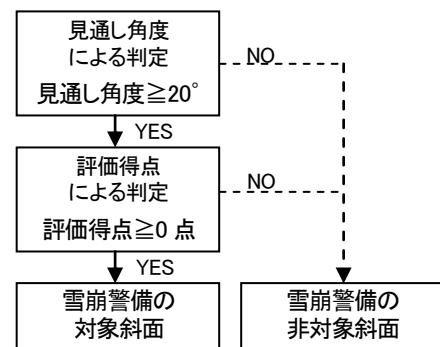


図 2 雪崩危険斜面の抽出フロー

#### 4. 雪崩警備時期の設定方法

雪崩警備時期の設定方法については、斜面積雪の滑動のし易さの目安として、対象とする斜面の①積雪深、②積雪内の安定度、および③融雪量を推定して指標の候補を検討した。これらの指標については、既往の研究事例を参考にして、雪崩データの分析および積雪の物性を考慮した経験式から推定する方法とした。また、各指標の推定にあたっては比較的取得が容易な気温と降水量とを用いる方法を検討した。

##### 4.1 斜面の積雪深

学術文献等から得られた60件の雪崩事例の発生時の積雪深を調べた（図3）。なお、発生時の積雪深が不明な事例については、積雪の粘性圧縮モデル<sup>3)</sup>を用いて推定

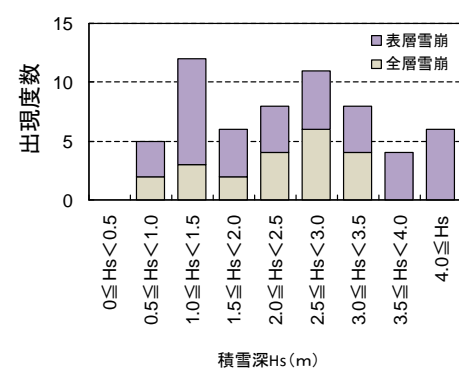


図 3 雪崩発生時の積雪深

した。このモデルは、単位時間あたりに積もる雪を均質な粘性体の層と考え、その後に積もった雪の質量を上乗荷重とし、密度の関数で与える粘性係数<sup>4)</sup>を用いて時間とともに変化する各層の厚さを求め、その合計値を積雪深とするモデルである。なお、積もった雪の初期密度は短時間に積もった雪の密度の観測値をもとに気温の関数で与えている。ここでは、雨雪の判別、初期密度、降雪量は、いずれも気温と降水量とから推定できる。雪崩事例60件について積雪深を調べた結果、最小積雪深は、表層雪崩0.82m、全層雪崩0.69mとなった。ここでは、積雪深が0.7m未満の場合は雪崩が発生する可能性は小さいと判断することとした。

#### 4.2 積雪内の安定度

表層雪崩は、斜面に平行な積雪のせん断破壊によって発生する。せん断破壊が起こるか否かは、斜面積雪の各層のせん断強度と、その上に積もった雪の上乗荷重から求まるせん断応力との関係から推定でき、これが積雪の安定度を示す指標 $SI$ となる(式(1))。式中のせん断応力については、降った雪の質量と斜面の角度から求め、せん断強度 $SFI$ については、積雪各層の密度から経験式を使って概ね推定することができることが既往の研究事例<sup>5)</sup>によってわかった。このときの積雪各層の密度は、前節の積雪深の推定方法と同じく積雪の粘性圧縮モデルを用いることで、気温と降水量から推定することができる。文献による雪崩事例から

$$SI = \frac{\text{せん断強度} SFI}{\text{せん断応力} \tau} \dots (1)$$

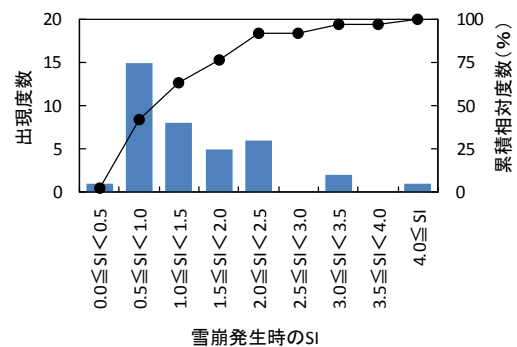


図4 雪崩発生時の $SI$ と雪崩の発生件数との関係

表層雪崩38事例の雪崩発生時の $SI$ を求めた結果、3事例を除き、 $SI$ が3.0未満で発生していることがわかった(図4)。 $SI$ が1を超える場合は、せん断応力と比べてせん断強度が大きいことを意味するが、計算に反映されない地形の凹凸、式中の値を推定するときの誤差、および強風や雪庇崩落などにより、推定地点の $SI$ の値が1を超える場合にも雪崩が発生しているものと考えられる。ここでは、 $SI$ が2.5以上になると表層雪崩が発生する可能性が小さいと判断することとした。

#### 4.3 積雪と地表面との安定度評価(全層雪崩)

全層雪崩は、地面までの積雪全層が一度に崩落する雪崩のことであり、春先の気温上昇とともに発生することが多い。文献による雪崩事例から全層雪崩を抽出(16事例)して、発生時の気象状況および気温から推定される日々の融雪量<sup>6)</sup>や降雨量を調べた。その結果、多くの事例で雪崩の発生数日前から気温が $0^{\circ}\text{C}$ を上回る傾向を示しており、連続的に融雪水が生じているものと考えられた。各事例の直前3日間の融雪量に着目し、この間の積算量を比較すると、3日間の積算融雪量が $5\text{mm}$ 以上になると雪崩が発生する割合が大きくなることがわかった。これらの傾向から、全層雪崩については、3日間の融雪量推定値を目安とすることとし、ここでは、積算融雪量が $5\text{mm}$ 未満の場合には全層雪崩が発生する可能性は小さいと判断することとした。

この方法による雪崩の警備

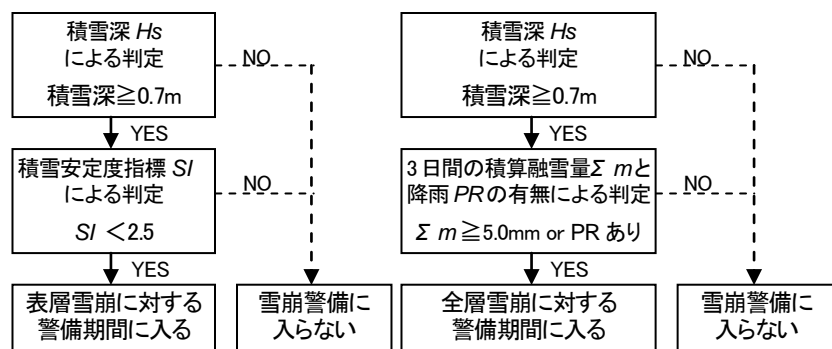


図5 雪崩の警備期間の設定フロー

期間の設定フローを図5に示す。はじめに、対象斜面の積雪深の推定値を目安として判断し、次に、斜面積雪の安定度  $SI$  の推定値および融雪量などの推定値から、雪崩の危険性が高まっているか否かを判定する。ここでは、それぞれ積雪深  $H_s$  が  $0.7\text{m}$  以上、積雪の安定度指標  $SI$  が  $2.5$  未満、積算融雪量  $\Sigma m$  が  $5.0\text{mm}$  以上の場合、雪崩の危険性があると判断することとした。また、それぞれの値が目安値を下回った場合には警備期間を終了するものとする。

### 5. モデル線区への適用

本州の山間線区において、2005/06年冬期の近傍アメダスの気温と降水量データを用いて、図5に示すフローにしたがって警備時期を設定した結果(図6)、線区近傍斜面において、警備期間初旬から中旬にかけて4回の雪崩が発生していた。警備期間の前後に余裕があるものの、いずれの雪崩も設定された警備期間内に発生していることが分かった。

### 6. まとめ

- (1) 雪崩危険斜面の選定については、評価対象箇所から沿線斜面上端までの見通し角度に基づき雪崩の到達範囲であるかを判断し、到達範囲と推定された箇所については、斜面の傾斜および植生のスコア表から、雪崩の発生危険度を評価する方法を提案した。
- (2) 雪崩警備時期の設定方法については、既往の研究事例等を参考として斜面積雪の安定度を指標とする方法を検討し、気温および降水量から斜面積雪の安定度を推定し、これらの値をもって警備時期を設定する方法を提案した。

雪崩の発生は本方法で指標とした斜面積雪の安定度の他、場所によっては、吹き溜まりや雪庇の崩落などの局所的な地形や気象の影響を受けることがあることが知られている。これらの箇所に関しては、現状では客観的な指標による評価が難しく、本方法とともに雪崩の発生履歴などの情報を活用して、多方面から総合的な評価することが重要である。

### 参考文献

- 1) 池谷浩, 吉松弘行, 南哲行, 寺田秀樹, 大野宏之: 砂防・地すべり・がけ崩れ・雪崩防止工事ポケットブック, 山海堂, pp311-333, 2001
- 2) 倉島 収: なだれ発生斜面の発生危険度の判定基準モデルについて, 交通工学, Vol.20, No.2, pp.9~23, 1985
- 3) 遠藤八十一, 小南裕志, 山野井克己, 竹内由香里, 村上茂樹, 庭野昭二: 降水量データから積雪深と密度を推定する方法, 雪氷, vol.66, pp17-25, 2004
- 4) 遠藤八十一, 大関義男, 庭野昭二: 低密度の雪の圧縮粘性係数と密度の関係, 雪氷, Vol.52, No.4, pp.267~274, 1990
- 5) 遠藤八十一: 降雪強度による乾雪表層雪崩の発生予測, 日本雪氷学会誌「雪氷」, Vol.55, No.2, pp.113~120, 1993
- 6) 河島克久, 飯倉茂弘, 杉山友康, 遠藤 徹, 藤井俊茂: 気温を用いた融雪量の簡易推定方法の開発, 鉄道総研報告, pp.35~40, Vol.16, No.8, 2002

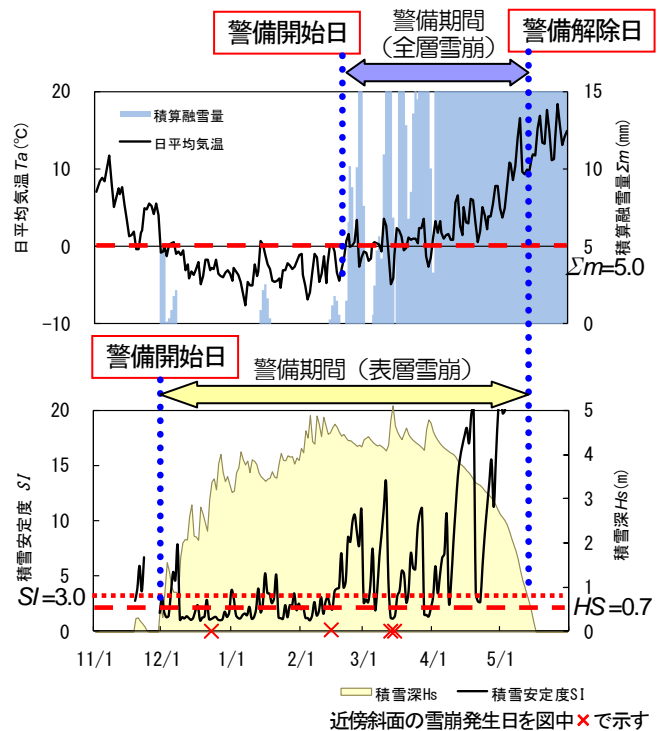


図6 モデル線区における雪崩警備期間の判定例