

気象情報を用いた雪崩警備時期の決定方法

防災技術研究部 気象防災
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持つ機関毎に、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。本研究では、客観的な指標による雪崩警備方法の提案に向けて、既往の研究事例¹⁾を参考に過去の雪崩発生事例を用いて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。なお用いた雪崩発生事例は積雪期の空中写真判読で得られた東北地域の雪崩データ（発生斜面125箇所と非発生斜面125箇所）、中越地域の雪崩データ（発生斜面123箇所、非発生斜面123箇所）および学術文献等²⁾から得られた全国の雪崩事例(60件)である。

2. 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を用いた評価方法、および雪崩の発生が危惧される斜面の特徴（傾斜や植生）から、それぞれの斜面を採点し定量的に危険度を求める方法について、鉄道への雪崩警備への適用性を検討した。

2.1 見通し角度による斜面の抽出

見通し角度とは、評価対象箇所から近傍斜面の上端を見通した角度で、対象箇所が雪崩の到達範囲内か否かを判断する指標の一つである。表層雪崩の場合は見通し角度が18°以上、全層雪崩の場合は24°以上となる地点が一般的に雪崩の到達領域とされている。中越地域の雪崩データを用いて確認したところ、雪崩痕跡の流路末端から発生区までの見通し角度は、いずれの事例においてもこれらの値を上回っていた（図1）。このことから、見通し角度が18°以下の斜面については、雪崩の到達の可能性は小さいと判断し、危険斜面から除外するものとした。

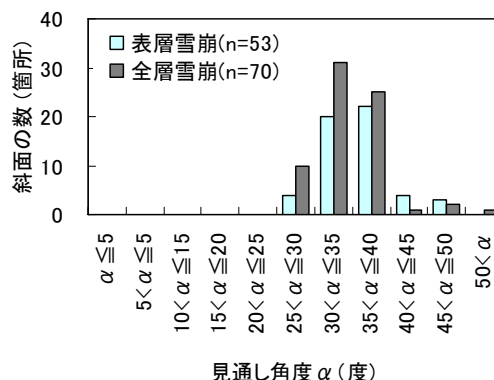


図1 中越地域写真データにおける雪崩発生斜面の見通し角度別箇所数

2.2 スコア表による斜面の抽出

雪崩の発生危険度を評価するため、東北地域の雪崩データを用いて雪崩の発生・非発生に影響を及ぼす要素を抽出して数量化Ⅱ類分析を行い、要素別・階級別のスコア表を作成した（表1）。作成したスコア表を用いて、東北地域の雪崩データの内部検証を行い、評価得点毎の雪崩の発生割合を求め、評価得点と発生確率との関係式を求めた（図2、式(1)）。

$$P_a = -5.67S^3 + 4.86S^2 + 46.02S + 40.92 \cdots (1)$$

スコア表と式(1)とを用いて、中越地域の雪崩データを評価した結果、雪崩発生斜面の99%は、評価得点 S が-0.8点以上(発生危険度10%以上)の斜面であった。この結果、危険度10%未満については雪崩の発生する危険性が小さいと判断し、雪崩危険斜面から除外することとした。

スコア表の要素は斜面の傾斜と植生であり、現場でこれらの状況を調査することで、斜面毎の評価得点 S (傾斜得点と植生得点の合計得点) が求められる。なお、統計解析に用いた雪崩斜面の積雪深は概ね1~4mの範囲にあることから、結果的に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。

3. 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、①斜面の積雪深、②積雪層内の安定度、③積雪と地表面との間の安定度を指標として用いた。安定度の評価は、統計的手法、および積雪の物性を考慮した経験式から推定するものであり、本手法の特徴は、気温と降水量の値のみでそれぞれの安定度を推定する点である。

3.1 積雪深を用いた安定度評価

雪崩の発生には、斜面上にある程度の積雪が存在することが条件となり、斜面上の積雪深が警備時期を設定する一つの指標になり得ると考えられる。そこで、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について統計解析を行った(図3)。発生時の積雪深が不明な事例については、気温と降水量を用いて対象地点の発生時の積雪深を推定した。表層雪崩および全層雪崩の発生時の最小積雪深は、それぞれ0.82m、0.69mであったことから、積雪深が0.5m以下の場合には雪崩の発生する可能性は小さいと判断するものとした。

3.2 積雪内部の安定度評価(表層雪崩)

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。自然に発生する表層雪崩(雪底の崩落等が発生要因では無い雪崩)については、斜面積雪の各層のせん断強度が分かれば、その上に積もった雪の上載荷重から求まるせん断応力との関係から予測できることになる。表層雪崩の発生の目安となる積雪安定度指標 SI (以下、 SI) は、斜面積雪の各層のせん断強度 SFI と、気温と降水量から推定されるせん断応力 τ との関係(式(2))から導くことができる。

表1 要素・階級別スコア表

要素	階級	得点	
傾斜	1	$0^\circ \leq \theta < 25^\circ$	-1.0099
	2	$25^\circ \leq \theta < 35^\circ$	-0.3382
	3	$35^\circ \leq \theta < 40^\circ$	0.2187
	4	$40^\circ \leq \theta < 45^\circ$	0.3718
	5	$45^\circ \leq \theta$	0.3559
植生	1	裸地・草地	0.7549
	2	樹冠密度30%未満	0.2349
	3	樹冠密度30%以上、樹高8m未満	-1.1027
	4	樹冠密度30%以上、樹高8m以上	-1.2251

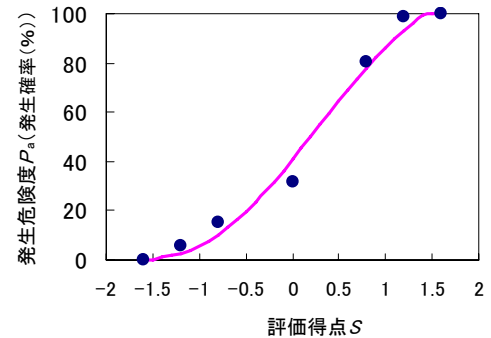


図2 評価得点と雪崩の発生危険度

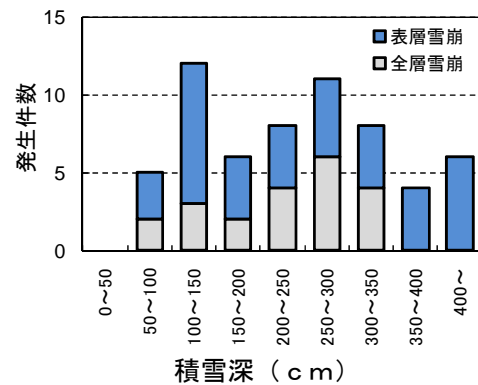


図3 雪崩発生時の積雪深

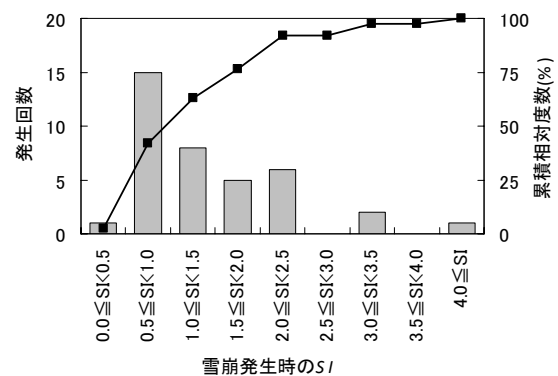


図4 雪崩発生時の SI と雪崩の発生件数との関係

$$\text{積雪安定度指標 } SI = \frac{\text{せん断強度 } SFI}{\text{せん断応力 } \tau} \dots (2)$$

せん断強度 SFI については、対象となる層の密度から経験的に求めることが可能であり、各層の密度は、積雪の粘性圧縮モデルを用いることで、せん断応力と同様、気温と降水量の値のみで推定できる。文献による雪崩事例から表層雪崩48事例を抽出して発生時の SI を計算した結果、3事例を除くと、 SI が3.0未満で発生しており（図4）、ここでは、 SI が3.0未満になると雪崩の発生する可能性が高まると判断した。

3.3 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、発生時の気象状況を調べた結果、ほとんどの事例で雪崩の発生数日前から気温が上昇し 0°C を上回っていることなど、いくつかの特徴を見いだすことができた。これは、気温の上昇に伴う融雪水や雨による降水の割合が増えることで地表面に供給される水量が増加し、積雪が滑りやすくなるためであると考えられる。

以上のことから、直前3日間の融雪量に着目し、この間の積算融雪量が 5mm 以上になると雪崩が発生する可能性が高まると判定することとした。ただし、降雨が推定される場合には、融雪量の有無に関わらず降雨観測日から全層雪崩に対する警備を開始する必要がある。また、日融雪量については気温と降水量から推定することが可能である。

4. 警備時期の設定に必要な気象要素の設定方法

雪崩の警備時期を設定するためには、警備の対象となる斜面の気温と降水量データが必要となる。気温や降水量は評価の対象箇所で直接測ることが望ましいが、電源確保や保守上の問題などがあり、斜面毎に実測することは難しい。そこで、斜面の比較的近傍で得られる既往の観測点の気象データから対象斜面の気温と降水量を推定する方法を検討した。

4.1 気温の推定方法

任意の地点の気温の推定方法を検討するため、東北北部・中部、上越地域において、標高差のある2地点のアメダス観測点を複数組選び、積雪期の気温減率を調べた。距離や地形によってばらつきがあるものの、多くの場合 $0.6\sim 0.7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ であった。このことから、国際標準大気での対流圏の気温減率である $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ を用いることで既存の観測点の気温から任意の斜面の気温を概ね推定し得ることが分かった。

4.2 降水量の推定

任意の地点の降水量の推定方法を検討するため、東北北部・中部、上越地域の複数のアメダス観測点で得られた日降水量の相関を調べた。この結果、ある地点の日降水量を近傍の1地点の降水量から推定するよりも、近傍の複数地点の日降水量を用いて推定する方がばらつきは小さく、決定係数が大きくなった。このことから、本研究では、隣接する複数地点の観測値から対象地点の降水量を推定することとした。

5. モデル線区への適用

雪崩危険斜面の抽出および雪崩警備期間の設定フローを作成し（図5、図6）、モデル線区に適用した結果、見通し角、スコア表を用いた斜面抽出方法により、沿線77斜面中23斜面が雪崩危険

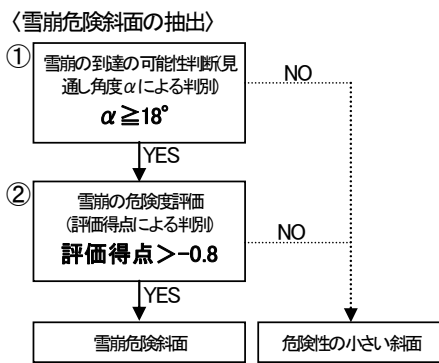


図5 雪崩危険斜面の抽出フロー

度の小さい斜面として抽出された。また、2005/06年冬期のデータについてフローにしたがって警備時期を設定した結果(図7)、線区近傍斜面において4回雪崩が発生していたが、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が 18° 以下の斜面を危険斜面から除外するものとした。また、雪崩が到達する可能性のある斜面については、斜面の傾斜および植生を階級分けしたスコア表を作成し、対象斜面の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た。その結果、気温および降水量のみから統計的手法および積雪の物性を考慮した数値計算を用いて斜面積雪の安定度を推定し、基準とする安定度をしきい値とすることで、これを下回る場合を警備時期として設定する方法を提案した。

7. おわりに

本研究では、雪崩警備箇所の抽出や警備時期の設定に関して、客観的な指標に基づく方法について提案した。しかし、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、斜面積雪の安定度に加えて雪崩の発生履歴など経験的な判断も参考に評価する必要がある。

【参考文献】

- 1) 倉島 取：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
遠藤八十一他：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 など
- 2) 阿部修他：2007年2月14日に八甲田山系前岳で発生した雪崩。雪氷、69、513-518。2007 など

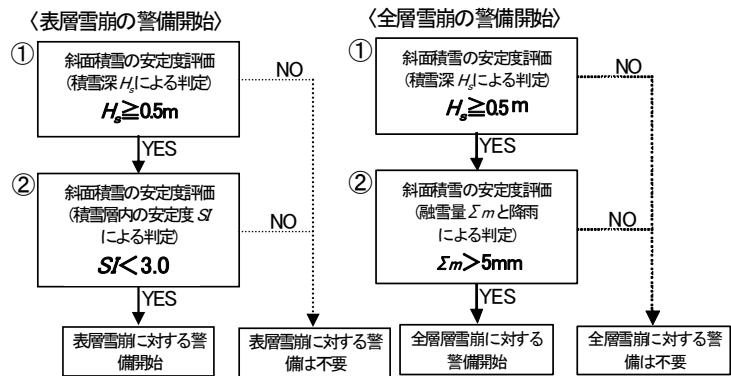


図6 雪崩の警備期間の設定フロー

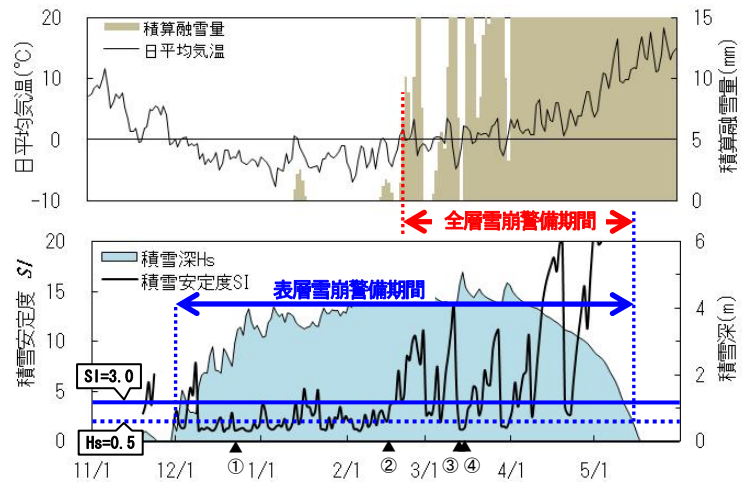


図7 モデル線区における雪崩警備期間の判定例
(▲は本文①～④の雪崩が発生した日を示している)