

# 雪崩の警備に気象情報を活かす

飯倉 茂弘  
防災技術研究部  
(気象防災 主任研究員)

栗原 靖  
同  
(同 研究員)

鎌田 慈  
同  
(同 主任研究員)



いいくら しげひろ



くりはら やすし



かまた やすし

穴戸 真也  
同  
(同 研究員)

高橋 大介  
同  
(同 研究員)



ししど まさや



たかはし だいすけ

## はじめに

雪崩(なだれ)から鉄道施設を守ったり、運行の安全性を確保するために、雪崩止め柵やスノーシェッドなどのハード対策のほか、降積雪の状況に応じて雪崩警備や除雪作業および運転規制といったソフト対策が実施されています。これは、延長が長い鉄道沿線には多くの斜面があり、全ての雪崩危険箇所をハード対策によって防護することは困難なためです。

現在、多くの線区では、雪崩の発生履歴や過去の警備記録などから取り決めた経験的な判断に基づき、雪崩警備などのソフト対策を実施しています。雪崩の発生は、斜面の傾斜、植生、斜面形状などのほか、吹き溜まりや積雪が庇状となる雪庇(せっぴ)の原因となる局所的な地形の影響を受けるため、雪崩の発生履歴や経験をもとにした雪崩警備などのソフト対策の実施は有用であると考えています。しかし、この方法には、地域ごとに実施の可否に対する考え方が異なる可能性があることや、経験豊富な社員の減少による技術継承などの課題が潜在しています。そこで、斜面に積もった雪が滑りやすいか、否かを推定するための指標を検討するとともに、これらの指標を気象情報をもとに推定し、この結果を用いた雪崩の警備時期の設定方法に関するフローを考えました<sup>1)</sup>。

## 雪崩

斜面に降り積もった雪には、重力の方向に移動しようとする力(駆動力)が働きます。一方、降り積もった雪粒子どうしや雪と地表面との間には、移動を妨げようとする力(抵抗力)が働きます。通常、抵抗力の方が大きいため、斜面に積もった雪は滑ることなく留まっています。しかし、

降雪などによって駆動力が抵抗力を上回ると、斜面の積雪は目に見える速さで重力方向に移動を始めます。この現象が雪崩と呼ばれるものです。

雪崩の発生形態は、積雪の内部に滑り面があり積雪の上層が滑る表層雪崩と、地面から積雪表層までの全ての層が滑る全層雪崩の2つに大別することができます(図1)。このように雪崩の種類によって発生形態が異なるため、斜面積雪の安定性の指標も分けて考える必要があります。

## 警備時期の判定に用いる指標

雪崩の警備の体制を整えておく必要のある期間を客観的に判定するため、ここでは、①斜面の積雪深、②表層雪崩の危険性を判定するための積雪内の安定性、③全層雪崩の危険性を判定するための積雪底面の安定性の3つを指標として選定しました。

### (1) 斜面の積雪深(積雪の高さ)

雪崩が発生するには、斜面上に抵抗力を上回る駆動力を生じさせる積雪の存在が必要です。積雪深は駆動力の変化

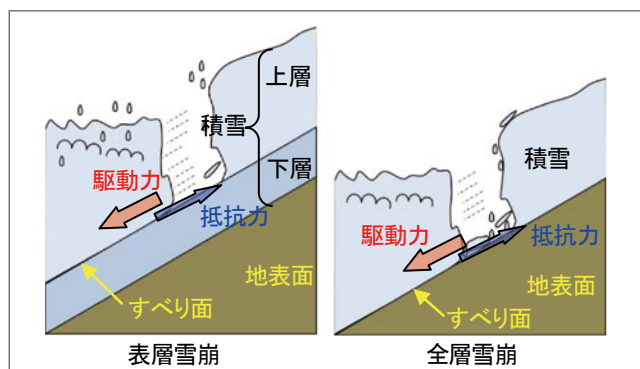


図1 雪崩の発生形態

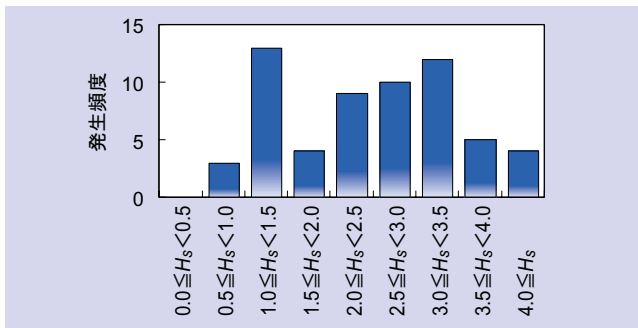


図2 雪崩発生時の積雪深 $H_s$

要因であるため、雪崩の発生に大きく影響を及ぼす要素として考えることができます。過去の60事例の雪崩発生時の積雪深を推定した結果、積雪深が0.5m未満では雪崩が発生する可能性はほとんど無いこと分かりました(図2)。この結果により、積雪深の大小が雪崩の発生に大きく影響すると考え、危険性を判断する1つの指標として用いることにしました。

積雪深を測定するための測定器を斜面ごとに設置することは困難であるため、対象斜面の積雪深は上記で用いた推定方法で求めることにしました。この方法は、粘性圧縮モデル<sup>2)</sup>という積雪のモデルを用いるものであり、粘性をもつ雪の層が重なったものを積雪と見なして、その深さを求めるものです。このモデルで積雪深を求めるためには、単位時間あたりの降雪量とその密度および気温が必要となります。この中で気温については一般の気象観測により容易に取得することができますが、降雪量とその密度を観測することは容易ではありません。そこで、降水時の気温を用いて雨と雪を判別して降雪量を推定することとし、降雪の密度に関しては、気温と降雪密度の相関分析の結果を用いて推定することにしました。

積雪モデルでは、1日ごとの降雪に対して、斜面上に単位面積あたりの、ある質量、ある密度の雪の層が1つできると仮定しています。日々の降雪によって作られる層の厚さの積算値が積雪深として求まりますが、積雪深は降雪によって増加するばかりではなく、自重や翌日以降の降雪の重さなどによって圧縮されて深さ(高さ)が減少し、密度が大きくなります。この圧縮による積雪深の減少については、日々増加する積雪各層の密度に応じた粘性係数を与えることで求めることができます。さらに、もう一つの積雪深の減少要因として融雪が挙げられますが、この量の推定には、気温から融雪量を推定するデグリー・デイ法と呼ばれる方法を採用しました。融雪量は積雪の最下層から流出するものとして積雪深の減少を表現します。例として、図3にある日(d)とある日の翌日(d+1)の積雪の状態

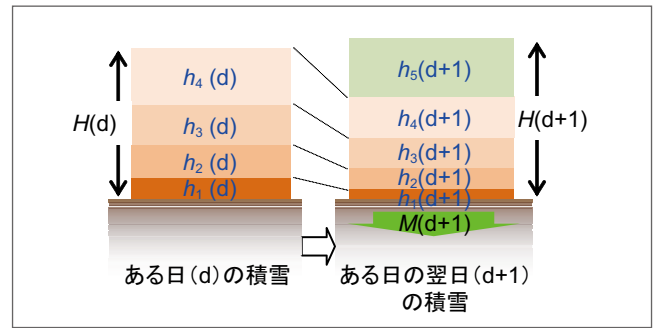


図3 積雪深の推定方法の模式図

を示します。左側のある日の積雪には、厚さが $h_1(d) \sim h_4(d)$ の4つの層があり、その合計が積雪深 $H(d)$ になります。翌日に雪が降り、積雪の一番上に $h_5(d+1)$ の厚さの層が形成されたとします。この層の質量で、ある日の $h_1(d) \sim h_4(d)$ の層は、それぞれの密度に応じた粘性係数で圧縮され、それぞれ $h_1(d+1) \sim h_4(d+1)$ の厚さに変化します。ここで、一番下の層に対しては、融雪量 $m(d+1)$ が流出したとして厚さを求めます。このようにして、翌日の5つの層の厚さが求まり、これらの合計値が積雪深 $H(d+1)$ となります。このようにして日々の変化する積雪の各層の厚さを合計して積雪深を求めていきます。

## (2) 積雪内の安定性

表層雪崩は、積雪内の滑動によって発生します。この危険性を判断する指標の1つとして積雪の駆動力 $\tau$ に対する抵抗力 $SFI$ の比で表わす $SI$  (Stability Index) という指標があります(式1)。

$$SI = \frac{\text{抵抗力 } SFI}{\text{駆動力 } \tau} \dots\dots\dots (1)$$

この $SI$ は、値が小さいほど抵抗力に対して駆動力が大きいことを表し、積雪内部の雪は不安定な状況にあるといえます。詳細な調査が行われている38事例の表層雪崩について雪崩発生日の $SI$ を調べた結果、この値が小さいほど表層雪の発生頻度が高いことが分かりました(図4)。なお、式1のうへでは、 $SI$ が1を下回らない限り積雪は安定

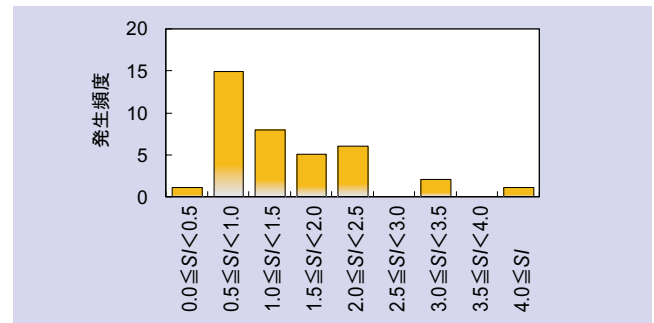


図4 雪崩発生時の積雪内の安定性 $SI$

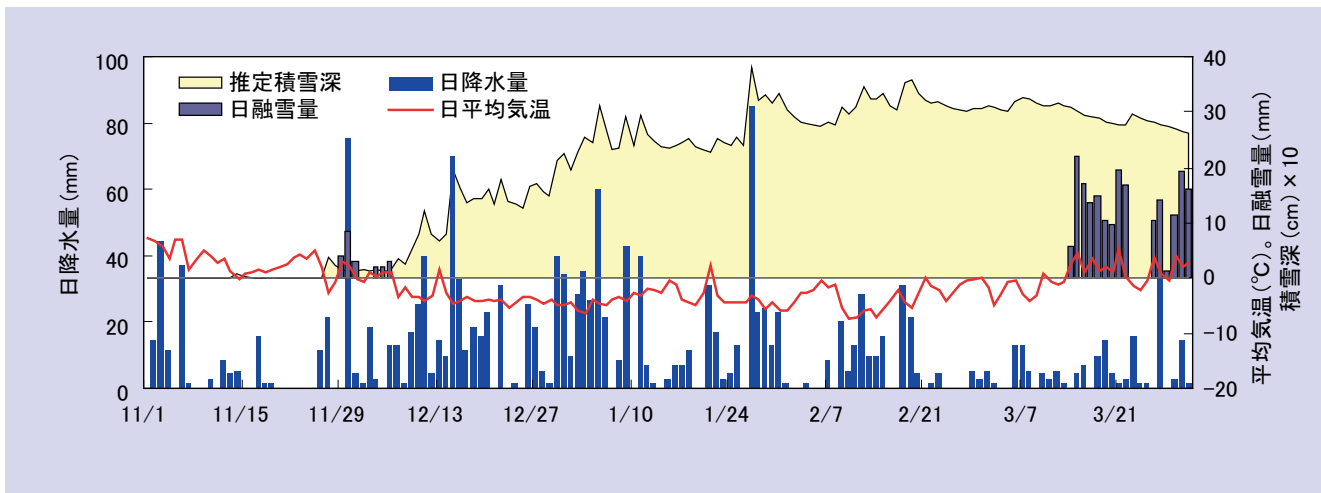


図5 全層雪崩発生時の気象状況の例

していることを意味しますが、駆動力や抵抗力を推定するときの誤差や外的要因が雪崩のトリガーになることがあるため、求めた値が1以上のときでも雪崩が発生しています。そこで、SIに適正なしきい値を設けることで、危険性を判断する1つの指標として用いることにしました。

SIを求める際に必要となる表層雪崩の駆動力は、積雪上層の雪の質量と斜面の角度から求められます。一方、抵抗力については、これまでに多くの研究者が実施した観測事例によって作られた積雪の密度を用いた経験式で求めることができます。すなわち、日平均気温と日融雪量が分かれば、駆動力と抵抗力とが求まり、その結果で積雪の安定度を推定することができます。

### (3) 積雪底面の安定性

全層雪崩は、春先の気温上昇とともに発生することが多くあります。これは、気温の上昇に伴い融雪水の量が多くなったり、降水に占める降雨の割合が増えることで地表面に供給される水の量が増加して、積雪底面が滑りやすくなるためです。22事例の全層雪崩について発生時の気象や積雪状況を調べた結果の一例を図5に示します。その結果、雪崩の発生当日もしくは数日前から気温が上昇し0℃を上

回っていること、ほとんどの事例で雪崩発生日の数日前から発生日にかけて連続的に融雪が生じていると推定されること、また複数の事例では同様の期間に1日に数mm程度の降雨の発生が推定されることなど、いくつかの共通した特徴を見いだすことができました。これらの特徴の中から融雪量に着目し、先述のディグリー・デイ法を用いて雪崩発生直前の3日間の積算融雪量を調べた結果(図6)、2事例を除く20事例については、発生前に連続的な融雪が生じており、さらに直前3日間の積算融雪量が5mm以上であると推定されました。このことから、連続的な融雪水の発生は、全層雪崩の危険性を示す目安になり得ると考え、ここでは前3日間の日融雪量の積算値を全層雪崩の指標として用いることにしました。

### 対象箇所の気温と降水量

雪崩の危険性を判断するため、前節までに斜面の積雪深、積雪内の安定性、積雪底面の安定性の3つの指標について説明しました。これらの指標については、いずれも気温と降水量から推定することができます。対象斜面の近くでこれらの観測を行っていただければよいのですが、行っていない場合、降水量については、対象斜面を囲む複数の鉄道沿線の観測点やアメダス観測点などで得られる値を用いて統計的な分析で推定するなどの方法があります。また、気温は、一般的に高度が高くなるに従い低くなるため、気象観測点と雪崩危険斜面との標高差から推定するなどの方法があります。これらのほか、気温や降水量の観測機器は比較的安価であり、また測定方法も容易であることから、雪崩の発生履歴がある斜面などから代表斜面を選定し、近くに観測点を新たに設けることも、データを取得するための選択枝のひとつとして挙げるすることができます。

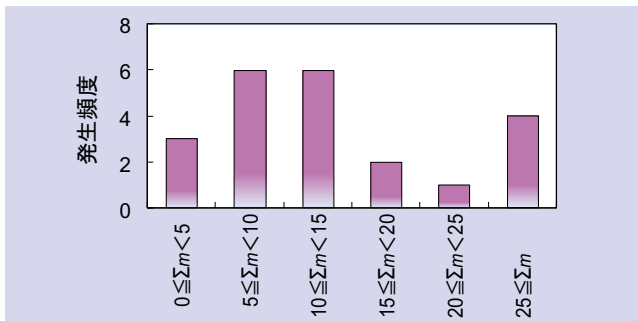


図6 雪崩発生前3日間の積算融雪量  $\Sigma m$

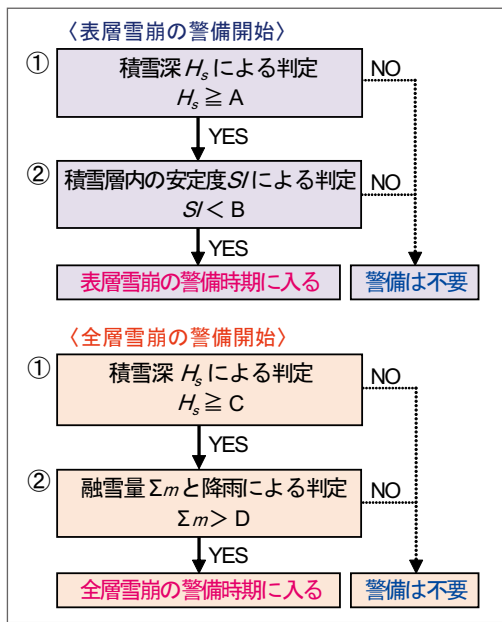


図7 雪崩に対する警備時期決定フロー

### 雪崩警備時期の設定方法

本節では前述した3つの指標を用いた雪崩警備時期の設定方法を説明します。はじめに、雪崩の発生が危惧される斜面ごとに図7に示すフローに沿って積雪深による雪崩の危険性の判定を行います。次に表層雪崩に対しては斜面の積雪内の安定性を推定し、また、全層雪崩に対しては積雪底面の安定性を推定します。図中のA～Dについては、それぞれの指標に対するしきい値であり、雪崩警備の対象区間の雪崩履歴やそのときの積雪や気象データから推定されたSIや融雪量を参考にして、それぞれの値を設定します。警備対象となる全ての斜面の中で、表層もしくは全層雪崩に対する警備開始日が最も早い日を雪崩に対する警備開始日として定めます。また、各斜面の積雪深が、設定したしきい値を下回る日を求めて警備解除日として定めることにします。

本州の多雪地域の山間線区を対象として、フローに従い警備時期を設定し、今回提案した方法の適用性を検討しました。図7のフローの中の各しきい値については、ここでは、過去の雪崩事例をもとに、AとC(積雪深)については0.5m、B(SI)については2.5、D(融雪量)については3日間で5mmという値を設定しました。また、警備解除の判定は積雪深が0.5m未満となった場合としました。本設定フローを適用した事例(図8)においては、対象線区内で全層、表層とも雪崩は発生しませんでした。表層雪崩については対象とした区間の近くの斜面で4件発生していることが確認されました(図中★印)。これらの雪崩が発生した日のSIは1.2～2.0であり、いずれもフローにより判定

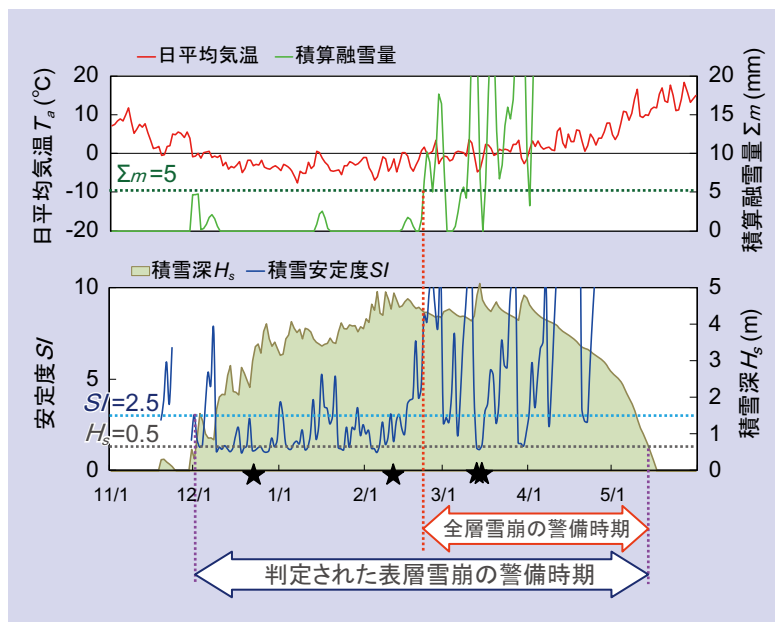


図8 フローの適用例

された警備時期内に発生していました。

この検討結果から、本成果を用いることで、客観的に警備時期を設定できると考えています。

### おわりに

気象情報を用いて雪崩の危険性を推定する方法を検討するとともに、これらの結果を用いた雪崩警備時期の設定方法の考え方について紹介しました。本方法においては、雪崩の危険性を推定するために必要な情報は、比較的入手が容易な気温と降水量のみであり、警備の対象箇所数が多い鉄道沿線においても比較的利用しやすいと考えています。しかし、雪崩が発生しやすい山間地は、尾根や谷などの局所的な地形の影響を受け、吹き溜まりが発生する箇所や、雪底が成長する箇所などがあり、このような箇所については、斜面の積雪の安定性だけでは危険性の評価が難しいため、今後、さらなる実用性の向上を図っていきたいと考えています。[RRR]

### 文献

- 1) 栗原 靖, 飯倉茂弘, 鎌田慈, 宍戸真也, 高橋大介, 河島克久: 客観的指標に基づく鉄道の雪崩警備方法の検討, 寒地技術講演・論文集, 第25巻, pp.77～82, 2009
- 2) 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, 日本雪氷学会誌「雪氷」, Vol.52, No.4, pp.267～274, 1990
- 3) 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