

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Development of a snow avalanche warning system

(雪崩発生危険度予測システムの構築)

氏 名 小松 麻美

論 文 内 容 の 要 旨

日本では山岳地域のほか寒冷域のスキー場や道路においても雪崩が頻繁に発生し、毎年少なからぬ被害をもたらしている。一方、気象庁から発表される「なだれ注意報」は対象が広域であることに加えて積算深や降雪量と気温を用いた経験則に基づくものであるため、多くの場合道路管理者は斜面上や近傍観測点の積雪深を監視することで雪崩発生危険度を評価しているのが現状である。

特定の場所を対象に雪崩の発生危険度を高い精度で予測するためには、気象の推移による積雪構造の変化を表現可能なモデルの構築が不可欠である。すでにフランスやスイスでは精緻なモデルが開発されているが、多岐にわたる気象要素の入力が必要となる。国内では提供されていない要素もあるほか、降水量や気温などを除くと更新間隔も数時間毎であるため、ルーチンとしてユーザーへの情報提供は難しい。そこで、本研究では気温と降水量（降雪深）のみを入力することで、雪質、雪温、密度、せん断強度などの積雪構造を算出可能な簡易なモデル (Simple Snow-Cover Model: SSCM) の開発を実施した。広域を対象に細かい格子間隔、かつ短時間で計算するため、組み込まれる物理過程は大きく簡略化した。SSCM の出力を北海道内の 2 箇所（三国峠と霧立峠）で実施された積雪断面観測との比較を行った結果では、若干の差異は生じたものの十分に高い精度で積雪構造の再現が可能であり、スイスの SNOWPACK モデルに匹敵する結果が示された。続いてこれまでに国内で発生した雪崩 12 例について、気象データをもとに SSCM で計算を行った結果からは、積雪各層のせん断強度とそこに作用するせん断応力の比として定義される積雪安定度 (Stability Index: SI) の平均値は 2.4 (標準偏差は 1.1) と求められた。この値は雪崩発生時に国内外で観測された値と同程度であり、本モデルが雪崩発生危険度の推定に有効であることが示された。ただし地形が複雑で風の強い地域では、雪崩発生危険度を十分には再現できなかった事例もあった。これは麓の気象観測点で観測された降雪量は、雪崩発生域の積雪深を十分に反映していないことが原因と推察され、吹雪による吹きだまりの効果を考慮する必要性が示された。

そこで、次のステップとして、複雑な地形上での吹雪輸送と吹きだまりの効果を表現可能なモデルの開発を行い、これを SSCM に組み込む作業を実施した。対象領域として数多くのスキー場が存在し、独自の雪崩情報も発出されているニセコアンヌプリ山域を選定し、国土地理院発行の 50m メッシュの数値標高データを用いて計算を行った。本来、吹雪現象は雪粒子と空気の二相混相流であるが、本研究ではまず対象とする領域について気流場を解き、次にその気流場に基づいて飛雪場を解くという手順で数値シミュレーションを実施した。地形に沿った一般曲線座標系のもと、気流は乱流方程式を標準 $k-\epsilon$ モデルで、飛雪は雪面近傍の跳躍層での輸送量を下層の境界条件として与え、浮遊層内での輸送を拡散方程式により計算した。

求められた風の場合は、当地に設置された 6 台の風速計の記録、1/10,000 の地形モデルを用いた風洞実験、さらには風速計を含む多くの気象観測機器を搭載した移動観測車による計測結果などと比較検討が行われた。このうち発達した低気圧の接近や冬型の気圧配置の継続などの事例を数多く含む 2020 年 2 月の 1 ヶ月間について計算を実施し、山域内に設置された 6 地点での観測値と比較した結果からは、相関係数を含む各種統計値から気流場の計算、つまり対象域での風速場の計算が十分に実用的な精度を持つことが示された。

吹きだまり計算の検証は、発達した低気圧が北海道に接近しその後冬型気圧配置が強まった 2020 年 2 月 22 日から 24 日に至る期間を対象に実施した。対象領域内での吹きだまりの分布は 1 時間ごとに逐次算出されたが、風の終息後に得られた様子は、現地での目視観測で吹きだまりの形成が確認された位置とおおむね一致した。さらに活性白土を用いた風洞実験と計算結果の比較からも、定量的な検討は難しいものの、谷に加えて尾根の風下側の斜面上部への堆積状況が両者で定性的ではあるものの一致している様子が確認された。

上記の吹きだまりの計算結果から、ニセコで雪崩発生事例の多い 2 か所での吹きだまり量（積雪深）を抽出して SSCM で計算し SI を求めたところ、近傍の倶知安アメダスの観測値から求めた値より大きく低下し、より実態に即した結果が得られた。実際に北海道北部の稚内で強風の下で発生した雪崩を対象に、SSCM と吹雪・吹きだまりモデルを結合して雪崩危険度を算出した結果では、雪崩発生時刻と SI の低下により発生危険度の増加した時刻が高い精度で一致し、その有効性が確認された。

現在、気象協会ではすでに SSCM を用いて道路管理者宛に雪崩危険度情報をウェブサイト、メール、FAX 等を用いて発信しているが、今後、本研究で開発された吹雪・吹きだまり情報を結合させることで、予測精度がより一層向上することが期待される。また本システムは現時点では主として厳冬期の表層雪崩の発生を対象としているが、今後は SSCM に改良を加えることで、春先に発生する湿雪雪崩の発生予測への拡張も視野に検討を進めている。