表層雪崩発生予測手法の開発

西村浩一、平島寬行、佐藤篤司(防災科研)、馬場恵美子(北大低温研)

はじめに

雪崩の発生は、昨今の気候変動にともない、 発生地域と時期、さらには質的変化を伴って いるが、依然として毎年少なからぬ災害をも たらしている。特に近年は、スキー場管理区 域外でのスキー、スノーボード滑走が活発に なり、こうしたバックカントリーでの雪崩事 故が増加している。一方、気象庁から発令さ れる「雪崩注意報」は、気温と積雪深のみを 基準としており(例えば北海道の石狩・空知・ 後志地方では、24時間降雪の深さが 30cm 以 上となるか、積雪の深さが 50cm で日平均気 温が 5℃以上)、地方自治体の関係者、道路や スキー場管理者等からはよりきめこまかな発 生予測の確立が切望されている。

本研究では、ニセコ山系をモデル地域と定 め、当地の自治体、スキー場管理者により構 成された「なだれ事故防止対策協議会」の協 力のもと、雪崩発生危険度を予測する手法の 開発を開始したので、その概要を報告する。

気象・雪氷観測

ニセコアンヌプリスキー場の標高約 800m 地点(図1)に、自動気象観測システム(AWS) を設置し、2002 年 12 月 12 日より気象データ の収集を開始した。測定項目は、風向・風速、 積雪深、気温、湿度、長波・短波放射、積雪 表面温度、雪温分布で、それぞれ 10 分間隔で 記録し、携帯電話にてデータを転送した。

また雪崩発生の可能性が高いと考えられる 場所を選択して、積雪の断面観測を一冬期間 に計70回程度実施した。積雪構造に関するデ ータ(層構造、雪質、密度、雪温など)を取 得するとともに、積雪の安定度を評価するた めに、コンプレッションテストやルッチブロ ックテストなども随時行った。



観測結果

2002/2003 年冬期の標高 800m地点におけ る平均気温は-8.2℃、最多風向は西北西で、 2月14日に最大積雪深 2.57m を記録した。

雪崩は12例発生し、このうち10例が面発 生表層雪崩、2例が全層雪崩であった。発生 地点は、図1に示すようにいずれも日射の影 響を受ける南〜東向きの風下斜面であった。



図2. 破断面の厚さと雪質

破断面の厚さとその部分での雪質をまとめた 結果を図2に示す。破断面の厚さは40 cm か ら 60 cm の場合が多く、滑り面の雪質は「雲 粒の無い降雪結晶」と「あられ」がそれぞれ 3 例と2 例、両者が混在したものが1 例、そ して「降雪結晶」に「こしもざらめ雪」が混 在したものが6例観測された。12例のうち7 例で滑り面の下側にクラストが存在したのも 大きな特徴である。始動積雪(スラブ)は「新 雪」か「こしまり雪」で、堆積から雪崩発生 に至る時間が比較的短いことが示された。

また低気圧の接近、通過から冬型の気圧配 置に変化する過程で、雪崩発生の要因となる 弱層と多量の上載積雪が形成されるプロセス も確認された。2月15日と16日の雪崩発生 箇所と発生域の破断面を図3に示す。



図3. 雪崩発生地点(上)と破断面(下)

積雪構造変化の予測

1 次元の積雪変質モデルである 『SNOWPACK』を用いて実測と計算結果の比 較検討を実施した。このモデルはスイスアル プスでの雪崩予報を目的に構築されたもので、 気温、相対湿度、風向風速、積雪表面温度、 短波放射量、積雪深等の入力から積雪表面の 熱収支と質量収支を計算し、積雪層構造の変 化を算出する。雪温、熱伝導率、上載荷重、 粘性、密度、雪質等が時系列データとして出 力される(Bartlet etal., 2002; Lehning et al., 2002a, 2002b)。モデルに含まれるアルベード の推定手法と「しもざらめ雪」の発達過程の モデル化に改良を加えて計算を行ったところ、 実測結果と良い一致が見られた。特に雪崩が 発生した2月15日の場合は、クラスト上に「こ しもざらめ雪」が、さらにその上に 50cm の 「降雪結晶」と「こしまり雪」からなる積雪 構造が再現された。

積雪構造がモデルにより十分な精度で再現 されると、計算された雪質と密度分布から積 雪内各層でのせん断強度 σ を求めることがで きる(Jamieson and Johnston, 2001)。

新雪、こしまり雪、しまり雪:

$$\sigma = 14.5 \times 10^3 \left(\frac{\rho}{\rho_i}\right)^{1.73}$$
こしもざらめ雪、ざらめ雪

$$\sigma = 18.5 \times 10^3 \left(\frac{\rho}{\rho_i}\right)^{2.11}$$

ここで、ρとρ_iは積雪と氷の密度である。 求められた「せん断強度」σと、上載荷重(積 雪重量)Wと対象地点の斜度θから得られる 「せん断応力」の比を計算することで、次式 で与えられる積雪安定度SIが求められる。

:

$$SI = \frac{\sigma}{W\sin\theta\cos\theta}$$

SI は 1.5 以下になると、表層雪崩発生の危険 性が大きいとされている(McClung and Schaerer, 1993)。雪崩が発生した 2 月 15 日と 16 日について、SNOWPACK の出力から SI を計算すると、それぞれ 0.67、1.49 と非常に 小さい値をとり、SI が雪崩発生予知に有効な 指標であることが示された。

広域気象と吹きだまり分布の推定

このように気象観測地点近傍では、ある程 度の精度で雪崩発生の予測が可能であること が示された。しかし、この手法をニセコ山系 全域に適用するにあたっては、1 点での気象 観測データを何らかの方法で山域全体の分布 に拡張するアルゴリズムの開発が必要となる。

積雪モデルに入力する気象要素のうち、本 研究では、気温は高度逓減率(-0.6℃/100m) から、また日射量は50mメッシュの標高デー タと太陽方位角を用いて、それぞれの分布を 算出した。

一方、地形に基づく風速変化は、吹きだま り分布の形成、つまり積雪深の変化に大きく 寄与する。ここでは、標高データの傾斜と曲 率を用いて風速変化を記述する Liston and Strum (1998)、Hirashima et al. (2003)のアル ゴリズムに従った。求められた気温、日射、 風速分布の例を図4に示す。



図 4. 気温、風速及び日射の分布 A: 気温分布(AWS: -5 度)、B: 日射(2 月 1 日正午)、C: 風速分布(AWS: 10m/s、西北西)

計算と併行して、1万分の1の地形模型を 用いた風洞実験(長岡雪氷防災研究所新庄支 所、北海道立北方総合建築研究所)を行い500 m(模型上では5cm)ごとに風速を測定し分布 を求めた(図5)。両者の結果は、アンヌプリ の風下や谷の斜面が弱風域となるなど、定性 的には良い一致が見られた。 対象域に上空から一様な降雪があるとし て、これと前述の風速分布から吹雪の計算を 行い、山域の吹きだまり分布を求めた一例を 図5に示す。積雪深の分布が地形の影響を受 けて不均一になるようすがわかるが、精度の 検証とそれに基づくモデルの改善は今後の課 題である。



図 5. 風洞実験による風速分布の測定 (北海道立北方総合建築研究所)



図 6. 吹きだまり量(積雪深)の分布

このようにして求められた気象の時系列 データを SNOWPACK に入力して、図1の点 線で示した領域内の各グリッドにおける積雪



安定度 SI を計算した結果を図7に示す。

図7.積雪安定度の時間変化 2003年2月14日~16日に当該地域で発生し た雪崩は、7日~10日にかけて日射と低気圧 前面の暖気によって形成されたクラスト上に、 降雪結晶とこしもざらめ雪から成る弱層が形 成された後、冬型の気圧配置に基づく強風の 下でスラブが堆積し、雪崩が発生したと分析 される。図7の計算結果でも、発生域周辺の 積雪の安定度 SI が雪崩発生時の数日前から 非常に小さくなる傾向が確認できる。

おわりに

ニセコアンヌプリ山域を対象とした雪崩発 生危険度の予測手法開発の概要を紹介した。 今後は、現地での観測を継続するとともに、 積雪変質モデルや広域の気象データ予測アル ゴリズムなど、予測に至る個々のプロセスに 関して慎重な吟味と改良を行い、モデルの精 度を高めていく予定である。

参考文献

- Bartelt, P. and M. Lehning. 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part I. numerical model. *Cold Reg. Sci. Technol.* 35(3), 123-145.
- Hirashima H., T. Ohata, Y Kodama, H Yabuki, A Georgiadi and N. Sato. 2004. Non-Uniform Distribution of tundra snow cover in eastern Siberia., J. Hydromet. 5, 373-389.
- Jamieson, B. and C. D. Johnston, 2001. Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers. *Ann. Glaciol.* 32, 59-69.
- Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, C. Fierz, P. Satyawali. 2002a. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part II. Snow microstructure. *Cold Reg. Sci. Technol.* 35(3), 147-167.
- Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, C. Fierz 2002b. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part III. meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. Cold Reg, Sci. Technol. 35(3),

169-184.

- Liston, G. E. and M. Sturm. 1998. A snow-transport model for complex terrain. J. Glaciol., 44(148), 498-516
- McClung, D. and P. Schaerer. 1993. The Avalanche Handbook. *The Mountaineers*. pp. 272.