

研究ノート

上高地乗鞍スーパー林道で発生した雪崩 (2003年1月5日)の調査報告

山口 悟¹⁾, 西村 浩一¹⁾, 納口 恭明¹⁾,
佐藤 篤司¹⁾, 和泉 薫²⁾, 村上 茂樹³⁾,
山野井 克己³⁾, 竹内 由香里³⁾, Michael LEHNING⁴⁾

要 旨

2003年1月5日に長野県南安曇郡安曇村の上高地乗鞍スーパー林道で起こった複数の雪崩は、死者こそ出なかったが車20台以上を巻き込む大災害となった。雪崩の種類は面発生乾雪表層雪崩であった。今回の雪崩の特徴は、従来雪崩があまり発生しないと考えられている森林内から発生したことである。現地における断面観測より、今回の雪崩は表層から約30cm下層に形成された“こしもざらめ層”が弱層となり発生した事がわかった。積雪変質モデル並びに現場近くの気象データを用いた数値実験でも、同様の“こしもざらめ層”の形成を再現することができた。弱層になった“こしもざらめ層”は、1月1日の晩から1月2日の朝に積もった雪が、3日早朝の低温、弱風という気象条件下で変質して形成されたと推定される。今回の研究結果により、雪崩予測における積雪変質モデルの適応の可能性が明らかになった。また、考えられている森林の雪崩抑制効果に関してより詳細に検討する必要があることも示された。

キーワード：雪崩、弱層、森林、積雪変質モデル

Key words: avalanche, weak layer, forest, numerical model of snowpack

はじめに

2003年1月5日午前、長野県南安曇郡安曇村の上高地乗鞍スーパー林道で雪崩が断続的に発生し、車22台、百人余りが巻き込まれた。翌日(2003年1月6日)の信濃毎日新聞朝刊によると、現場は山腹を縫うようにカーブが続く一本道で、雪崩の流下方向である東側は数百メートルの谷となっている。最初の雪崩は午前10時半ころ蛭窪(ひるくぼ)トンネルから乗鞍高原側へ約300メ

ートルの場所にあるカーブで発生し、現場の前後で車が立ち往生した。その後、午後3時40分ころまでの約5時間に、少なくとも四回の雪崩が起こったという。図1に同新聞に掲載された事故現場の地図を示す。

今回雪崩事故が起こった上高地乗鞍スーパー林道では、2000年5月と2001年3月にも雪崩が発生している。林道は12月～4月の積雪期は村が管理し、連続降雪30cm以上になると通行止めにしてきた。これまで冬のシーズンには平均5回ほど通行止めになったが、3月、4月が中心であった。また斜面の一部には雪崩防護柵が設置されていたが(図2)、今回の雪崩発生場所では比較的密度が高い森林内ということもあり、雪崩防止対策はとられていなかった。このような森林内が雪崩の発生源であるというのが、今回の雪崩の大き

- 1) 独立行政法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究部門 長岡雪氷防災研究所
〒940-0821 新潟県長岡市栖吉町前山187-16
- 2) 新潟大学 積雪地域災害研究センター
〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050
- 3) 独立行政法人 森林総合研究所十日町試験地
〒948-0013 新潟県十日町市辰乙614
- 4) Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research CH-7260 Davos Dorf, Switzerland

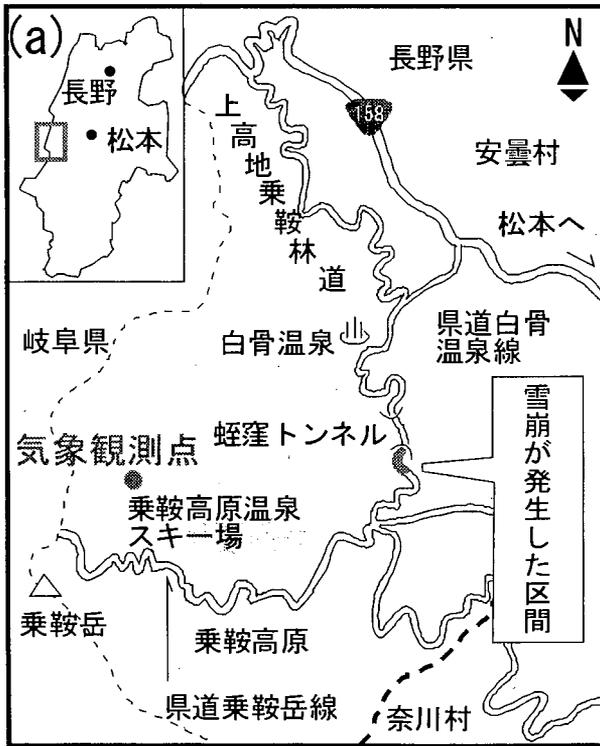


図1a 雪崩事故の発生現場。

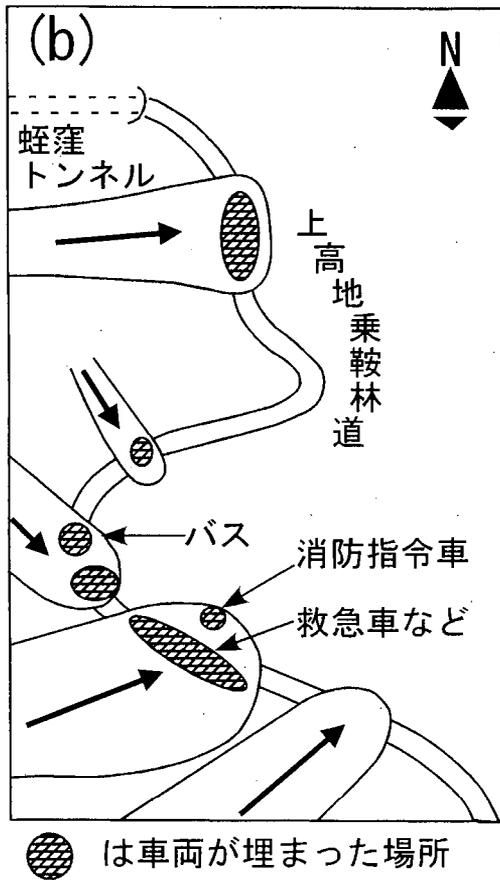


図1b 雪崩発生箇所(安曇村役場による)。
注) a,bともに2003年1月6日の信濃毎日新聞朝刊に掲載された図を一部改変。



図2 雪崩発生斜面の近傍に設置された雪崩防止柵。

な特徴である。

本報告では、当時の気象の推移、雪崩発生から2日後の1月7日に行った現地調査の結果を報告するとともに、積雪変質モデル(SNOWPACK)による雪崩発生予測の可能性について議論を行う。

気象概況

図3に2003年1月1日から雪崩の発生した1月5日までの天気概況を示す。12月下旬から続いた強い寒気の影響で冬型の気圧配置が強まり、全国的に気温の低い日が続いた。1月3~4日には発達した低気圧が接近し、全国的に雨や雪が降り、通過後には暴風や大雪など日本海側を中心に大荒れの天気となった。

図4に雪崩発生現場(標高約1700m)から約2km離れた地点にある乗鞍高原温泉スキー場(標高約2000m)で測定された気温、湿度、風速、降雪の深さならびに積雪深を示す。このうち気温、湿度、風速に関しては1時間ごとに、また降雪の深さならびに積雪深は午前9時と午後3時に測定が行われている。雪崩が発生する3日前の1月2日の気温は -15°C 付近まで低下したが、翌日には夜半にかけて -2°C まで上昇した。その後1月4日から雪崩が発生した5日にかけて再び気温が低下した。また4日の夕方から5日の午前9時にかけて、約30cmの多量の降雪があったこともわかる。3日から5日にかけての風速は2m/s程度と比較的穏やかに経過した。

天気図一覧表
平成15年1月
(気象庁)

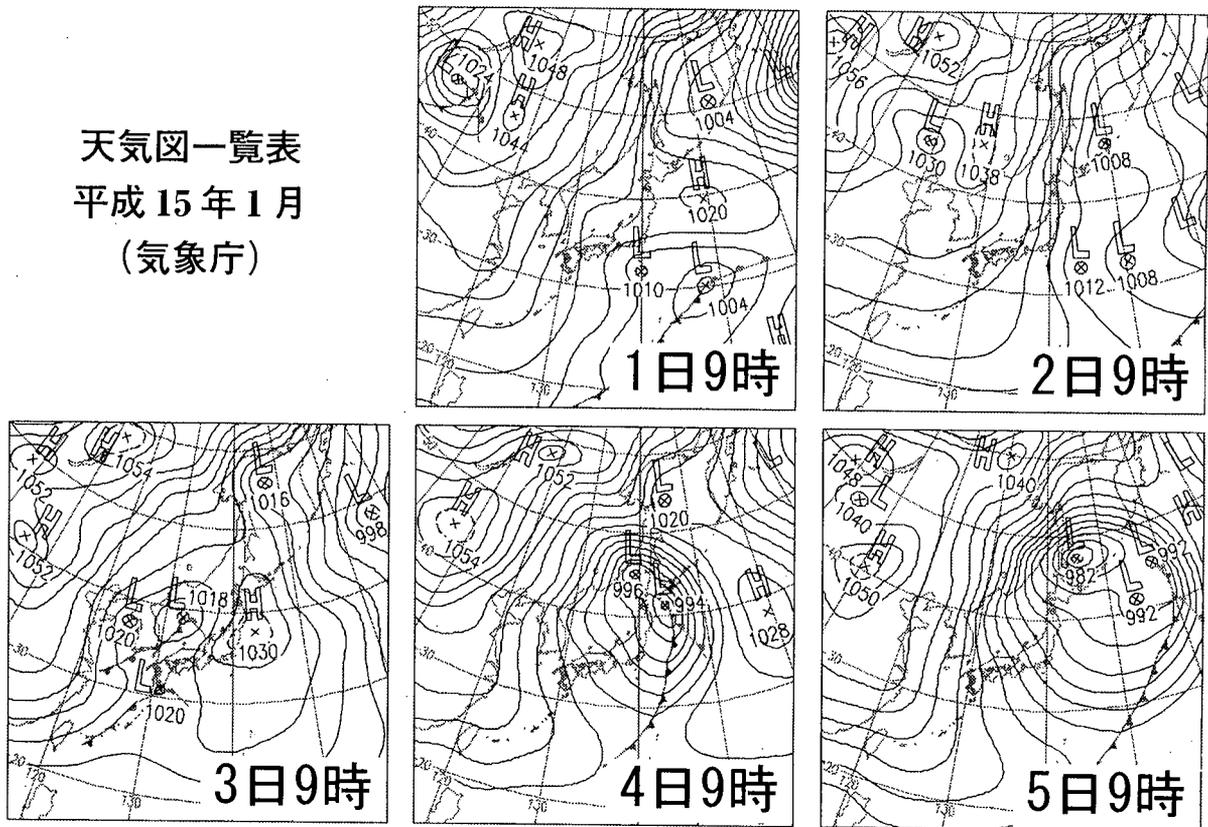


図3 2003年1月1日から5日にかけての地上天気図.

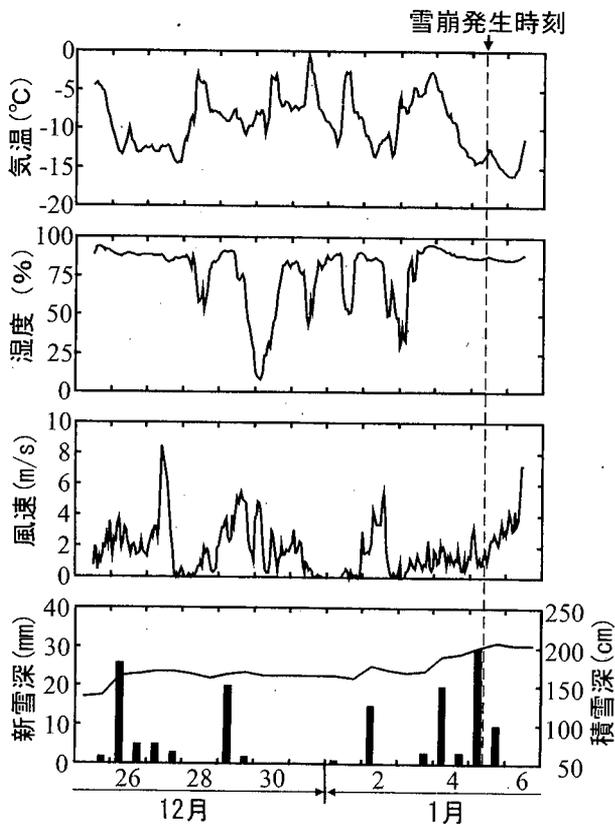


図4 乗鞍高原温泉スキー場(標高約2000m)で測定された気象データ.

現地観測

雪崩が発生した2日後の1月7日に雪崩の発生した斜面を調査した結果、道路から43°の斜面を約50m登った標高約1700mの林内に破断面を確認した(図5a)。また、この地点より下方側斜面の樹木の幹には図5bに示すような雪崩による着雪がみられ、その高さから流下した雪崩の高さが2~3mであったことが推定される。また同一斜面上で複数の破断面が見られたことから、多数の地点から雪崩が発生したことも確認された。当日行った積雪の断面観測結果を図6に示す。図6aは雪崩発起点、図6bは気象観測が行われている乗鞍高原温泉スキー場の近傍(標高1600m)で行ったものである。両者ともに、表層から約30cm下の位置に「こしもざらめ層」が確認され、この深さが雪崩の破断面と一致した。また現場で実施した弱層テスト(スキーを履かないルッチブロックテスト; 図5c)によっても、この面から破断することが確認された。図4の気象データからは、この「こしもざらめ層」は1月1日の晩から1月2日の朝に積もった雪が、3日早朝の低温、

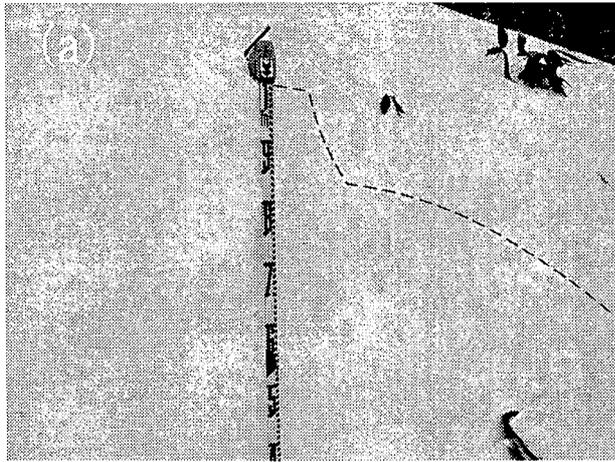


図5a 標高1700mの林内で観測された雪崩の破断面。破断面に直交する積雪断面を示す。



図5b 樹木に残された雪崩の跡。



図5c 雪崩発生点における弱層テスト(スキーを履かないルッチブロックテスト)。

弱風という気象条件下で変質して形成されたと推定される。この「こしもざらめ層」の上に雪崩発生の前日から多量の雪が降り積もり、表層雪崩の発生に至ったと考えられる。

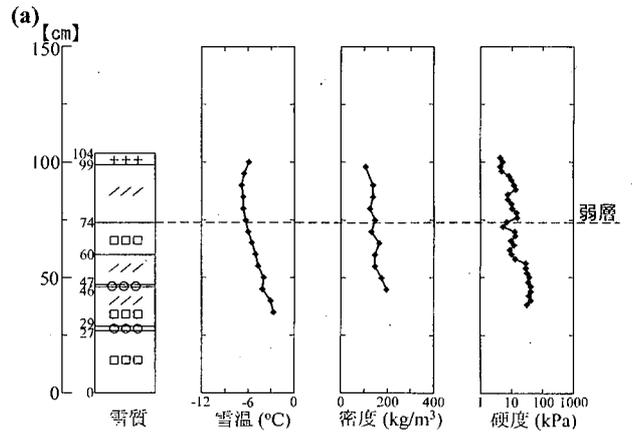


図6a 雪崩発生点における断面観測結果。

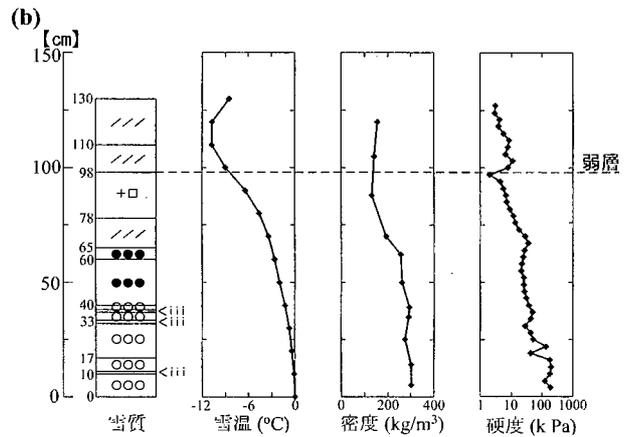


図6b 乗鞍高原スキー場近傍(標高1600m)での断面観測結果。

今回はシアフレームを用いた弱層の強度試験を行わなかったが、以下の手法で積雪の安定性に関する定量的な評価を行った。積雪のせん断強度は、密度ならびに雪質の関数として表せることが知られている。Jamieson and Johnston (2001) は、乾いた雪の雪質を二つのグループ(グループ1:新雪, こしまり雪, しまり雪; グループ2: こしもざらめ雪, しもざらめ雪)に分け、それぞれのせん断強度 σ は、乾き密度 ρ ならびに氷の密度 ρ_i (917 kg/m³) を用いてグループ1;

$$\sigma = 14.5 \times 10^3 \left(\frac{\rho}{\rho_i} \right)^{1.73} \text{ (Pa)} \quad (1)$$

グループ2;

$$\sigma = 18.5 \times 10^3 \left(\frac{\rho}{\rho_i} \right)^{2.11} \text{ (Pa)} \quad (2)$$

という関係式で表せることを屋外観測で求めた。

図7は、雪崩発生点における雪質と密度測定結果、および式(1)と式(2)を用いて見積もった各種雪層のせん断強度である。なお今回の計算においては、便宜上、観測された薄いざらめ層のせん断強度に関しては式(1)で見積もった。図中には、上載荷重と斜面の傾斜角(43°)から求めたせん断応力も示した。「こしもざらめ層(70cm)」において、せん断強度(300 Pa)が低下し、せん断応力(221 Pa)の値に近づいている様子がわかる。積雪の安定度 SI は、せん断強度を SFI 、上載積雪荷重を W 、斜面傾斜を θ とおくと、次式で与えられる。

$$SI = \frac{SFI}{W \sin \theta \cos \theta} \quad (3)$$

なお、通常 SFI はシアフレームにより測定するが、今回は $\sigma = SFI$ とした。一般に SI が 1.5 以下になると、表層雪崩の危険性が大きいとされる (McClung and Schaerer, 1993)。本報告で見積もられた結果は、 $SI = 300/221 \approx 1.4$ に相当し、雪崩発生前日の大雪によるせん断応力の増加により「こしもざらめ層」が破壊されて雪崩が発生したという推論と矛盾しない。

数値実験との比較

積雪変質モデル “SNOWPACK” (Bartelt and

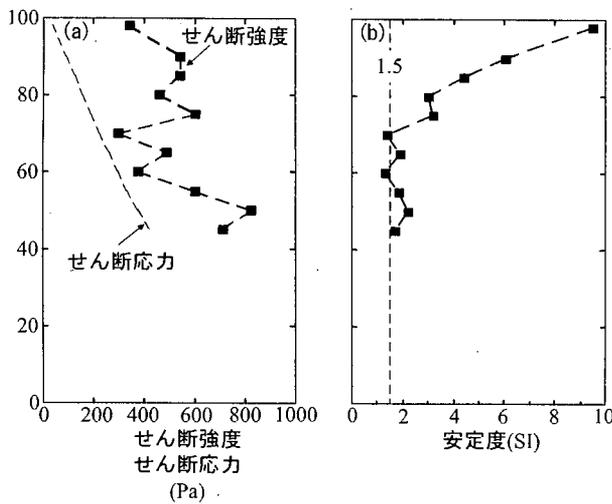


図7(a) 雪崩発生点における積雪せん断強度とせん断応力の比較。
(b) 雪崩発生点における積雪安定度 (SI) の鉛直分布。

Lehning, 2002; Lehning *et al.*, 2002 a; Lehning *et al.*, 2002 b) は、スイスの雪・雪崩研究所が中心となって開発し、スイスアルプスの雪崩予測に実際に活用されている (Bartelt and Lehning, 2002, Lehning *et al.*, 1999)。この “SNOWPACK” が日本の雪崩発生予測に適応できるか否かを検討する目的で、図4に示した気象データをモデルに入力して雪質変化を計算し、実測結果との比較を行った。SNOWPACKの計算には、気温、湿度、風速、積雪深変化、日射量の入力が必要となる。このうち初めの4つの要素については、乗鞍高原温泉スキー場で測定されたデータ (図4) を使用した。また、日射量に関しては、現場近くで測定が行われていないため、約 30 km 離れた松本測候所のデータを使用した。

計算には、2002年12月26日から2003年1月6日までの気象データを使用した。12月26日には、乗鞍高原温泉スキー場ではすでに1m以上の積雪があったが、積雪内部の初期値に関する情報はない。そこで本数値実験においては、12月26日の積雪深(新雪)に同日の気象条件を20日間(緩和時間)与えて十分になじませた上で、27日以降の気象条件を入力して計算を行った。なお、緩和時間は、事前に予備計算を繰り返し行い最適な値を決定した。

図8に計算結果を示す。前述した理由から緩和時間を経過した12月26日以後の計算結果にのみ着目すると、1月2日以降にこしまり雪/こしもざらめ雪の層 (図8中の矢印) が形成されているのがわかる。図9に1月7日の時点の断面の計算結果 (層構造、密度分布、せん断強度ならびにせ

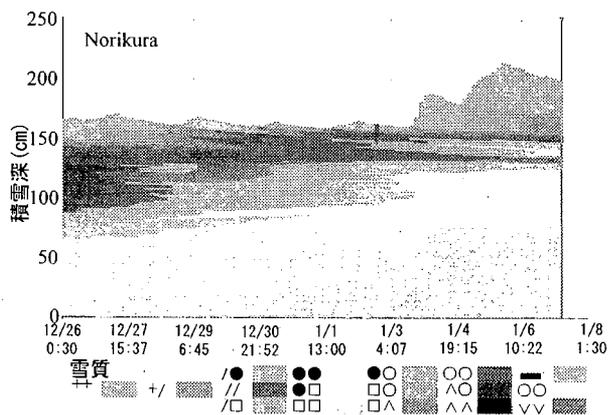


図8 SNOWPACKの計算結果 (雪質変化)。

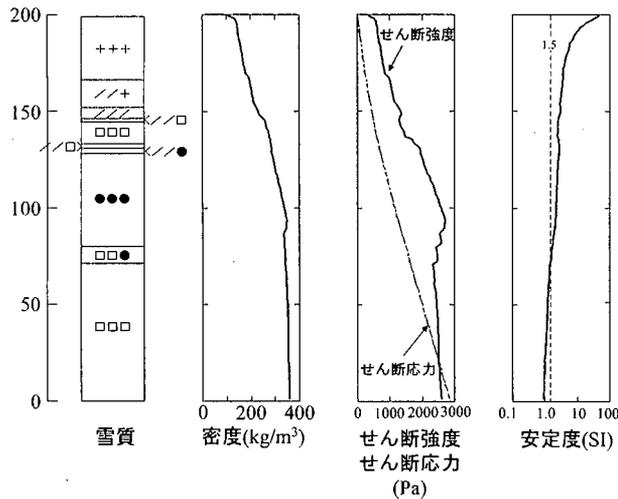


図9 SNOWPACKによる積雪内部の物理的性質の計算結果(2003年1月6日)。

せん断応力, 安定度)を示す。なお, せん断応力を求める際には, 斜面の傾斜角を雪崩発生点と等しい 43° と仮定した。層構造は図6aの断面観測結果とよく一致している。先に図4の気象データから, 今回弱層となった「こしもざらめ層」は, 1月3日以降の早朝以降に形成されたと推測したが, 数値モデルの導入によって弱層の形成時期の定量的な評価も可能になった。

計算によって求められた密度は, 実測値よりも大きめの値であった。この原因として, 緩和時間(実際とは違う気象条件を与えた)の影響に加えて, 計算で用いたスキー場の積雪深(1月7日; 201 cm)が, 雪崩発生個所の積雪深(1月7日; 105 cm)と比べて大きく, 圧密過程が進んだ点が挙げられる。図9に示したせん断強度は, 断面観測結果と同様に密度の増加に伴い深くなればなるほど強くなるが, 表層から約60 cm下に形成された「こしもざらめ層」では若干小さくなる。しかし計算された密度が大きい為にはせん断強度の絶対値も実測値よりもかなり大きい。また, こしもざらめ層で見られるせん断強度の減少も小さいものとなった。

このようにSNOWPACKモデルに近傍の気象データを入力することで, 積雪構造の定性的な再現がある程度可能であるが, 積雪安定度などを考慮した雪崩発生予測に適応させるためには, 対象域での正確な積雪深変化と気象データが不可欠となる。また, 積雪安定度を見積もる際に必要なせん

断強度の正確な推定方法についても, 今後検討する必要がある。

あとがき

今回の雪崩の特徴として, 「森林の中から発生した」という点が挙げられる。一般に森林内では以下の3つの理由から雪崩が発生しにくいと考えられてきた。

- ①降雪の一部が樹冠によって遮断され, 堆積した雪は昇華するか, 水滴または雪の塊となって雪面に落下する。これにより広範囲にわたる一様な積雪層構造の形成が妨げられる。
- ②倒木もしくは樹木の幹が斜面上の積雪を支える。
- ③林内では, 風速と放射量が低下し, 温度(気温, 雪温)の日変化が小さくなる。このため弱層となる「しもざらめ層」や「表面霜」の形成が抑制される。

今回, 雪崩が発生した林の樹種である落葉樹林は, 降雪の捕捉効果, 放射の抑制効果が常緑樹林に比べて小さいと考えられるが, 林内から上方を見上げたときの遮蔽率は約54%, 植林間隔も図5bに示すとおり2~3mで比較的密度が高い。しかしながら, 今回の雪崩は対象斜面のほぼ全域に渡って数多く発生しており, 弱層(こしもざらめ層)が林内広域にわたり一様に形成されたことを意味する。つまり林の気象緩和効果は小さく, また積雪の支持効果も雪崩発生を抑制するのに十分でなかったことがわかる。この原因としては, 5日の降雪は -10°C 以下で風速も2 m/s以下で積もった為, この積雪層は凝集力の小さなサラサラした崩れやすい新雪であった可能性がある。今後は, こうした観点からもデータを蓄積し, 森林の表層雪崩発生抑制効果を定量的に評価することが必要と考えられる。

なお, 本研究は, 防災科学技術研究所, 新潟大学積雪地域災害研究センター, 及び森林総合研究所が, それぞれ独自に調査隊を現地に派遣し, 現場で共同調査を行った結果をまとめたものである。

謝 辞

信州大学の新田隆三教授には現地調査の際に,

鈴木啓助教授には調査の為の情報収集に際しお世話になりました。また、本研究で使用した気象データは、乗鞍高原温泉スキー場の好意により提供していただいたものです。ここに記して深い感謝の意を表します。

文 献

Bartelt, P. B. and Lehning M., 2002: A physical SNOWPACK model for avalanche warning: Part I. Numerical model. *Cold Reg. Sci. Technol.* **35**, 123-145.
 Jamieson, B. and Johnston C. D., 2001: Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers. *Ann. Glaciol.* **32**, 59-69.
 McClung, D. and Schaerer P., 1993: Avalanche HAND-

BOOK. THE MOUNTAINEERS. pp. 272.
 Lehning, M., Bartelt P. B., Brown B., Fierz C. and Satyawali P., 2002a: A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow Microstructure. *Cold Reg. Sci. Technol.* **35**, 147-167.
 Lehning, M., Bartelt P. B., Brown B. and Fierz C., 2002b: A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part III. Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. *Cold Reg. Sci. Technol.* **35**, 169-184.
 Lehning, M., Bartelt P. B., Brown B., Russi T., Stöckli U. and Zimmerli M., 1999: SNOWPACK model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *Cold Reg. Sci. Technol.* **30**, 145-157.

Report on avalanches at Kamikouchi-Norikura Super-rindo on 5 January, 2003

Satoru YAMAGUCHI¹⁾, Kouichi NISHIMURA¹⁾, Yasuaki NOHGUCHI¹⁾, Atsushi SATO¹⁾, Kaoru IZUMI²⁾, Shigeki MURAKAMI³⁾, Katsumi YAMANOI³⁾, Yukari TAKEUCHI³⁾ and Michael LEHNING⁴⁾

1) Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. 187-16, Suyoshi-machi Nagaoka, 940-0821.

2) Research Institute for Hazards in Snowy Areas, Niigata University. 2-8050, Ikarashi, Niigata, 950-2181.

3) Forestry and Forest Products Research Institute, Tohkamachi Experimental Station. 614 Tatsuotsu, Tohkamachi, 948-0013

4) Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, CH-7260 Davos Dorf, Switzerland

Abstract: A field survey and numerical simulation were carried out to study avalanches which occurred at Kamikouchi-Norikura Super-rindo on 5 January, 2003; they occurred in the forest and more than 20 cars were involved.

A weak layer, which caused these avalanches, was observed 30 cm below the snow surface and was composed of solid type depth hoar. It is conjectured that this weak layer was formed under the following condition; fresh snow deposited between midnight of 1 and the morning of 2 January changed into a solid type depth hoar layer under the weak wind and cold condition on the morning of 3 January.

A simulation using a numerical snowpack model with meteorological data also revealed a solid type depth hoar layer and demonstrated the availability of the model to forecast avalanches.

Although forests are considered to contribute to avalanche protection in general, this avalanche implied that we need to evaluate their effectiveness carefully.

(2003年9月6日受付, 2003年12月11日改稿受付, 2003年12月16日受理, 討論期限2004年7月15日)