

4.4 冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術に関する研究

研究予算： 運営費交付金（一般勘定）

研究期間： 平23～平26

担当チーム： 雪氷チーム

雪崩・地すべり研究センター

研究担当者： 松澤勝、中村浩、松下拓樹、原田

裕介、上田真代（雪氷）

秋山一弥、伊東靖彦（雪崩・地すべり）

【要旨】

冬期の気温上昇に伴い、湿雪雪崩の発生が増加すると考えられている。しかし湿雪雪崩の発生条件については不明な点が多く、雪崩対策の現場では湿雪雪崩の危険度評価が難しい状況にある。そこで、湿雪雪崩の危険度評価に向けて「湿雪雪崩事例の気象」「積雪内の水の浸透に関する現地実験」「多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験」「水の浸透や帶水層の形成を再現することが可能な積雪モデル」「スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度」に関する検討・解析等を行った。

キーワード：湿雪雪崩、積雪モデル、降雨、融雪、斜面積雪、積雪観測

1.はじめに

近年の気候変動に伴い、我が国において冬期の気温上昇が報告されており¹⁾、これによって降水形態が雪から雨へ、また積雪の性質が乾雪から湿雪へ変化し、雪崩などの雪氷災害の発生形態などにも変化が生じることが懸念されている。たとえば寒冷な気候である北海道においても厳冬期に降雨が生じ、雪崩が発生することが報告されている²⁾。

このように雪崩災害において、冬期の気温上昇や降雨の増加は湿雪雪崩による災害の多発につながる可能性があるが、その湿雪雪崩の発生条件について不明な点が多く、雪崩対策の現場において湿雪雪崩の危険度判断が難しい現状にある。このため危険度評価技術の開発により、事前の警戒避難や通行規制を的確かつ効率的に実施する体制の整備が求められている。

そこで本研究では、湿雪雪崩の発生条件の解明及び危険度評価技術の検討を行うものであり、雪氷チームと雪崩・地すべり研究センターが共同で実施している。

平成25年度は、湿雪雪崩の発生条件解明のため、

- (1) 湿雪雪崩事例の気象解析
- (2) 積雪内の水の浸透に関する現地実験
- (3) 多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験

を、また湿雪雪崩危険度評価技術の提案に向けて、

- (4) 水の浸透や帶水層の形成を再現することが可能な積雪モデルの開発
 - (5) スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討
- を行った。

2. 湿雪雪崩事例の気象解析

湿雪雪崩が発生するときの気象条件を明らかにするために、平成23年度および平成24年度に続き、雪崩発生箇所近傍の気象観測データを用いて気象解析を行った。平成25年度は、これまでの解析で明らかとなつた、厳冬期と融雪期における湿雪雪崩の発生形態と発生条件について、雪質等の積雪特性を現す指標を加えて検討を行つた。

2.1. 対象とした湿雪雪崩事例

平成23年度に収集した雪崩事例のうち、雪の乾湿及び全層と表層の雪崩発生形態が明らかな湿雪雪崩事例を対象に、雪崩発生箇所近傍の気象観測データを用いて、湿雪雪崩発生の気象条件に関する解析を行つた。収集した雪崩事例の詳細は、平成23年度の報告書を参照されたい。

2.2. 気象観測データとデータの補正

解析に用いた気象観測データは、雪崩発生地点近傍の北海道開発局道路テレメータと気象庁アメダスの気温、積雪深、降水量、日照時間、風速の1時間間隔の観測データである。雪崩発生箇所の気温は、気温減率($=-0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$)を用いて標高補正し、降水量は、横山ら(2003)³⁾方法によって降水量計による降水粒子の補足率を考慮して補正した。補正した気温と降水量を用いて、近藤ら(1995)⁴⁾従い気温が 1.8°C 以上の場合を降雨、 1.8°C 未満を降雪として、降水量から降雨量(mm)を求めた。日射量の日積算値(J/m^2)は、近藤ら(1991)⁵⁾手法を用いてアメダスの日照時間(h)から推定した。また、積雪の表面付近における融雪量(mm)は、水津(2002)⁶⁾簡易熱収支法に従って求めた。これらのデータ補正方法の詳細は、平成24年度の報告書を参照されたい。

2.3. 降雨量と融雪量の推定方法

2.3.1. 降雨量の推定方法

近藤ら(1995)⁴⁾雨雪判別気温($=1.8^{\circ}\text{C}$)を用いて、標高補正を行った1時間ごとの気温の観測値Tに対して $T > 1.8^{\circ}\text{C}$ を雨、 $T \leq 1.8^{\circ}\text{C}$ を雪と判断した。そして、気温による雨雪判別によって、捕捉率を考慮した1時間間隔の降水量P(mm)から降雨量(mm)と降雪量(mm)に分けて算出した。

2.3.2. 融雪量の推定方法

積雪表面付近における融雪量 M_s (mm)は、水津(2002)⁶⁾の方法に従い、気象観測データから、式(1)右辺の各項の熱量による融雪量を求め、これらを合計して求めた。

$$M_s = NRS + NRL + H + \tau E + R + Q_i \quad (1)$$

ここで、NRSは短波長放射、NRLは長波長放射、Hは顕熱伝達、 τE は潜熱伝達、Rは降雨による搬送熱、 Q_i は積雪層内の貯熱変化による融雪量(mm)であり、標高補正を行った気温の観測値や日射量と降雨量の推定値から求めた。

2.3.3. 雪質に関する指標

Kawashima et al.(1994)⁷⁾による積雪内の温度勾配に関する指標TGと融雪に関する指標MFを算出した。

$$TG = |Ta/Hs| \quad (2)$$

$$MF = \sum Ta_+/Hs \quad (3)$$

ここで、Taは根雪期間の平均気温($^{\circ}\text{C}$)(ただし $Ta > 0$ の場合 $TG=0$)、Hsは根雪期間の平均積雪深(cm)、 $\sum Ta_+$

は根雪期間の 0°C 以上の日平均気温の積算値($^{\circ}\text{C day}$)である。後述するように、Kawashima et al.(1994)⁷⁾、TGとMFを用いることで、積雪をしまり雪、ざらめ雪、こしもざらめ雪に分ける方法を提案しており、ここではTGとMFを雪質に関する指標と呼ぶ。

2.4. 湿雪雪崩事例の気象解析結果

湿雪雪崩は、降水による積雪の上載荷重の増加の他、積雪内に水が浸透することにより積雪強度が小さくなることで発生すると考えられる。よって、積雪への水の供給量を降雨量と融雪量の合計値と考えて、湿雪雪崩の発生条件の検討を行った。

昨年度までの解析の結果の一例を、図-1に示す。図-1は、湿雪雪崩発生の前日と当日(発生時刻まで)の降雨量と融雪量の合計と発生時の積雪深の関係であり、これらの関係を厳冬期の2月と融雪期の3月に分けて示した。厳冬期の2月(図-1a)は、積雪への水の供給量が少なく、表層雪崩の発生が多いことが特徴である。特に、積雪が深いと表層雪崩となる傾向がみられる。一方、融雪期の3月(図-1b)は、積雪への水の供給量が多くなり、全層雪崩がほとんどである。以上のように、湿雪雪崩発生の気象条件として、厳冬期の2月は少ない水の供給量で湿雪表層雪崩が発生する傾向にあり、融雪期の3月は水の供給量が多く湿雪全層雪崩が発生する傾向にあるといえる。なお、図-1には雪崩発生箇所近傍の気象観測所において積雪深が0cmである場合も示した。

3で述べる積雪内の水の浸透実験によると、しまり雪主体の斜面では、水は積雪層に沿って斜面下方に流れる傾向があり、積雪底面には容易に到達しない。しかし、ざらめ雪が多くなると、水は積雪底面へ浸透していく。つまり、雪質などの積雪の層構造によって湿雪雪崩の発生形態(全層、表層)が異なり、これによって図-1のような関係がみられたと考えられる。

そこで、図-2に、雪質に関する指標TGとMFの関係を示す。図中に示す実線と破線は、Kawashima et al.(1994)⁷⁾による雪質を分ける目安である。図-2より、表層雪崩では数事例を除いてMFが小さく、しまり雪やこしもざらめ雪が主体の積雪で雪崩が発生したと考えられる。ただし、全層雪崩はばらつきが大きく、TGとMFからの発生条件は明確ではないが、表層雪崩に比べてTGが小さくMFが大きい条件でも全層雪崩が発生している。

2.5. 今後の課題

湿雪雪崩の発生条件を示すには、融雪量や雪質に関する指数だけではなく、さらに複数の要素を組み合わせることで明確になると考えられる。今後は、3.で述べる積雪内への水の浸透に関する実験結果も参考に、湿雪雪崩発生の気象条件に関するより詳細な検討を行っていく予定である。

3. 積雪内の水の浸透に関する現地実験

2で行った湿雪雪崩事例の気象解析結果によると、厳冬期と融雪期で湿雪雪崩の発生条件が異なることが示された。この要因を明らかにするために、積雪内の水の浸透状況と雪質等の積雪層構造との関係に着目して、以下に示す現地実験を行なった。

3.1. 実験方法

実験は、札幌市南区定山渓（定山渓ダム流木処理場）の平地と隣接する斜面（勾配は約30°）で、2013年3月19日と4月23日に行った。実験では、自然積雪の表面に黄色の蛍光染料（フルオレセイン）を混ぜた水を散布し、積雪断面観測により積雪内の水の浸透状況を記録した。図-3と図-4に示すように、散水範囲は幅4m×奥行2mで、雪面から1mの高さに設置した散水ノズル2個（噴角90°）により、毎分41Lの水を1時間散布（散水量30mm h⁻¹）した。ポンプには減圧弁と流量計を備え付け、散水中の流量が一定になるようにした。また、積雪断面観測を、散水前と散水開始から4時間後まで1時間間隔で行い、雪温と密度を鉛直方向に約10cm間隔または層構造ごとに測定した。散水前の積雪断面観測では、雪質と粒径も観察した。

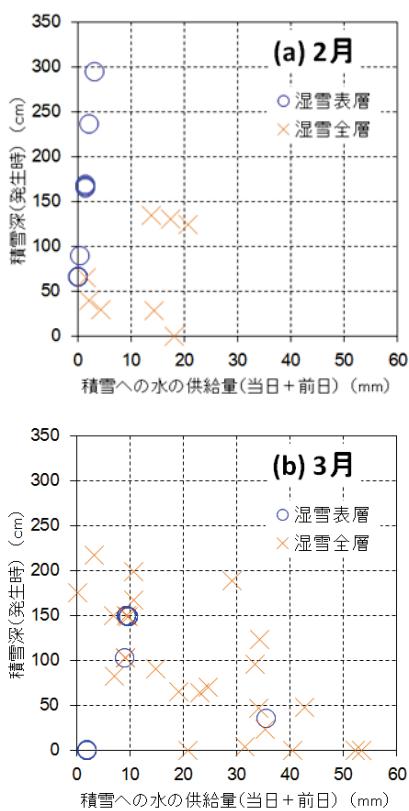


図-1 積雪への水の供給量と積雪深の関係

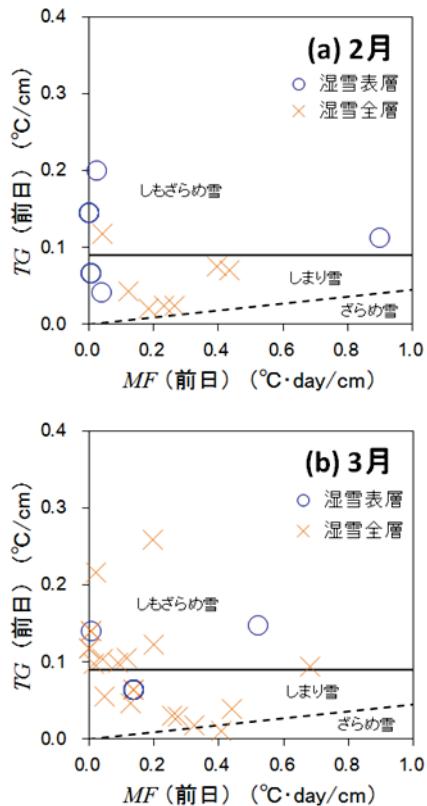


図-2 積雪内の温度勾配に関する指標TGと融雪に関する指標MFの関係

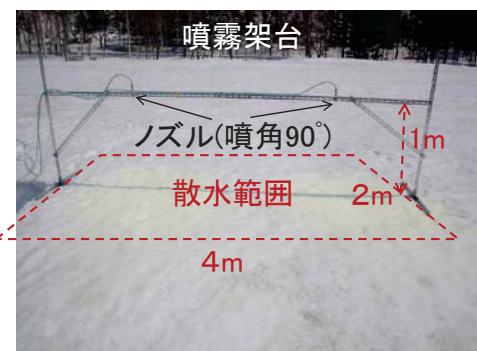


図-3 散水範囲と散水の状況



図- 4 散水装置

3.2. 実験結果

最初の実験を行った3月19日の天候は曇り時々晴れ、実験中の気温は3.2～-2.6°C、散布した水の温度は5°Cであった。図- 5aは、水を散布する前の平地と斜面における積雪の層構造と、水を散布した後に多くの水を保持して滯水した層の位置である。図- 6は、散水開始から2時間後の水の浸透状況、図- 7は、散水前と散水開始から2時間後の雪温と密度の鉛直分布である。散水前の雪温は、斜面では雪面から深さ約30cmまで0°Cでそれより下は0°C以下であったが、平地では全層0°Cに近い温度状況であった。平地と斜面の積雪構造(図- 5a)に大きな違いはないが、散水開始から2時間後の平地(図- 6a)では、多くの水を保持して滯水した層があり、水は滯水した層の任意箇所から集中的に流下して地面に達した。一方、斜面(図- 6b)では、雪面から約30cm下の層で滯水し、水はこの層に沿って斜面下方に流れ地面に到達しなかった。滯水した層に対応して密度の増加が測定され(図- 7b)、またこの層は雪温0°Cの境界付近に位置している(図- 7a)。よって、融雪が本格化する前の雪温0°C以下のしまり雪が残る斜面積雪では、水は滯水した層に沿って斜面下方に流れる傾向が強く、地面に到達する可能性は低いと考えられる。

2回目の実験を行った4月23日の天候は晴れ、実験中の気温は10.7～9.4°C、散布した水の温度は9.8°Cである。図- 5bは、散布前の積雪層構造と散布後に多くの水を保持した層の位置、図- 8は、散水開始から1時間後の水の浸透状況、図- 9は、散水前と散水開始から1時間後の雪温と密度の鉛直分布である。散水前の雪温は、平地と斜面ともに全層0°Cであり(図- 9)、雪質はざらめ雪が多く所々に氷板としまり雪が存在した(図- 5b)。水の浸透状況を比較すると、平地(図- 8a)では散水開始から1時間後には水が地面に到達したが、斜面(図- 8b)では滯水した層に沿

って流れる水と滯水した層から鉛直方向に流れる水が確認できた。よって、融雪が進行した雪温0°Cの斜面積雪では、水の地面への到達は平地より遅れるものの、水は階段状に流下して地面に到達すると考えられる。

以上、積雪内への水の浸透に関する現地実験を行った結果、しまり雪主体の斜面では、水は積雪層に沿って斜面下方に流れる傾向があり、積雪底面には容易に到達しない。しかし、ざらめ雪が多くなると、水は積雪底面へ浸透していく。つまり、雪質などの積雪の層構造によって水の浸透状況が異なり、これが湿雪雪崩の発生形態(全層、表層)に影響すると考えられる。

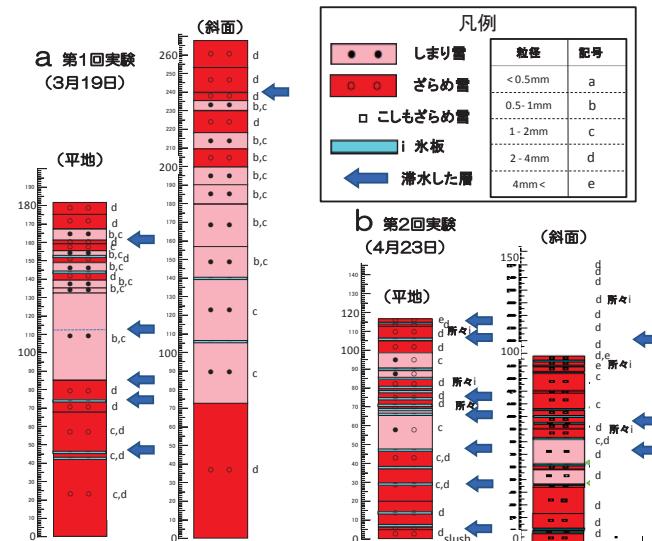


図- 5 散水前の積雪層構造と散水後の滯水層の位置
(a)第1回実験(3月19日)、(b)第2回実験(4月23日)。

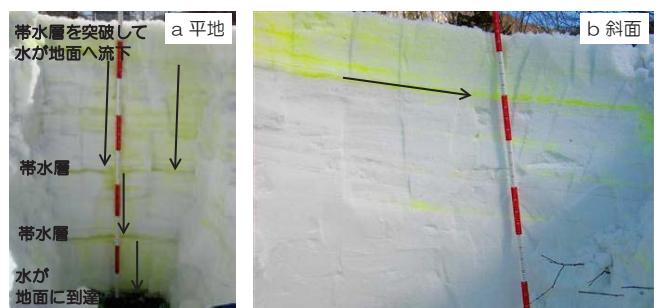


図- 6 散水開始から2時間後の積雪断面
第1回実験(3月19日)、(a)平地、(b)斜面。

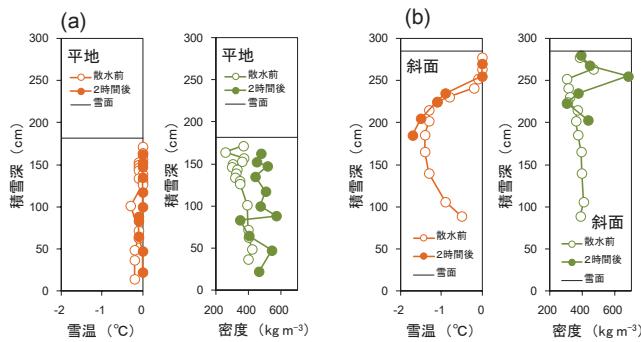


図-7 散水前と散水開始から2時間後の雪温と密度
第1回実験(3月19日)、(a)平地、(b)斜面。



図-8 散水開始から1時間後の積雪断面
第2回実験(4月23日)、(a)平地、(b)斜面。

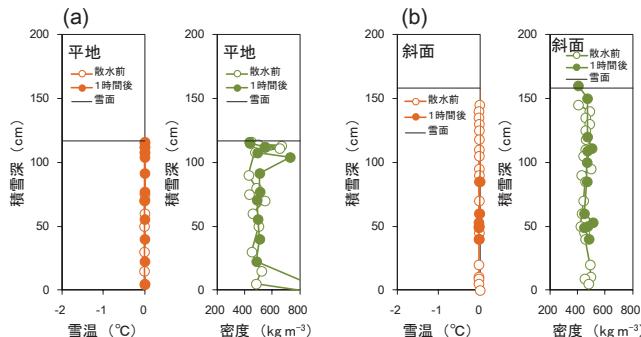


図-9 散水前と散水開始から1時間後の雪温と密度
第2回実験(4月23日)、(a)平地、(b)斜面。

3.3. 今後の課題

積雪への水の浸透実験は、H25/H26年冬期も行っている。今後、人工降雨実験の結果も合わせて考察を行い、湿雪雪崩の事例解析や積雪モデルの検討に活用していく予定である。

4. 多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験

積雪中の含水率が大きいと、積雪の破壊強度が小さくなることが知られている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。しかし降水が積雪中へ浸透する過程における、積雪の破壊強度変化について観測した事例がないことから、これを把握すること

を目的として多層構造を持つ積雪層内への降雨の浸透実験を行った。平成23年度は、実験テーブルを平らにして平地を模擬した(以降:平面)実験を行い、平成24年度には実験テーブルを30°に傾けて斜面上で実験を行った。ここでは、これらの実験結果を比較する。

4.1. 実験方法

自然環境下では積雪状態、温湿度、降雪降雨のコントロールが難しいことから、(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所の雪氷防災実験棟において人工雪を用いて実験することとした。実験棟の広さおよび一度に作成できるサンプルのサイズの制約から、実験は、以下のとおり平面と斜面で日程を分けて行われた。

平面: 2012年1月16日～1月20日

斜面: 2013年1月28日～2月2日

4.1.1. 雪氷防災実験棟

雪氷防災実験棟では、室温を一定に保つことが出来るほか、人工雪による降雪、降雨が可能となっている。それぞれの設定可能な環境範囲は表-1に示す通りである。本実験棟では樹枝状の降雪Aと球形の降雪Bの2種類の雪が降雪可能となっている。各々人工雪の諸元を表-1に示す。

表-1 雪氷防災実験棟で設定可能な環境

気温	-30°C～+25°C
降雨	0～2 mm/h
降雪 A	降雪強度: 0～1 mm/h(水換算) 結晶形: 樹枝状結晶(径 0.5～5 mm)
降雪 B	降雪強度: 0～5 mm/h(水換算) 結晶形: 球形モデル(径約 0.025 mm)

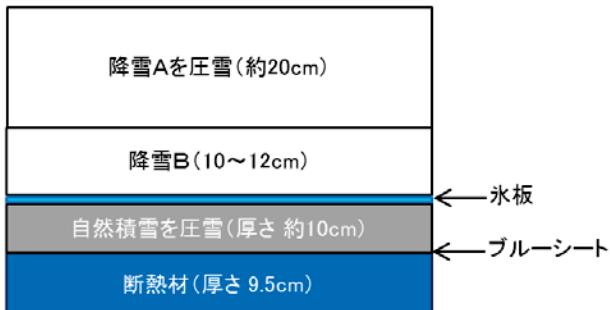
4.1.2. 実験準備(積雪層の形成)

大きさが3m×5mの降雪テーブル(写真-1)の上に、室温による熱が底面から積雪に伝導し難いよう厚さ約9.5cmのスタイロフォームを敷き詰め、さらに野外から自然雪(しまり雪)を厚さ10cm程度敷き詰めた。こののち室温を氷点下にして雪面に水を噴霧し、厚さ数mmの薄い氷盤を形成させた。

この上に降雪Bを10cm、さらに降雪Aを圧雪したもの(図-10)を20cm積層した。ただし、斜面においては実験テーブルを30°に傾けた際の厚さである。なお、詳細な積雪層の作成過程は平成23年度、24年度の報告書を参照されたい。



写真-1 雪氷防災実験棟

図-10 積雪層の構成(実験前)
(厚さは実験テーブルを傾ける前のもの)

4.1.3. 降雨実験

4.1.2 で作成した積雪層に、 2mm/h で 6 時間降雨させた。降雨中の一定間隔と降雨前後に積雪観測を実施した。積雪観測項目は層構造、雪温、密度、硬度、重量含水率(以下、単に含水率とする)などである。測定方法はおおむね「積雪観測ガイドブック」¹¹⁾に準じ、重量含水率の測定には熱量式(遠藤式)含水率計を用いた。

4.2. 観測結果と今後の課題

図-11に雪温が 0°C となった積雪層の高さの推移、図-12に平均密度の推移、図-13に積雪の全層厚に対するざらめ雪の層厚を占める割合を「ざらめ率」として、その推移を示したものである。降雨後の推移は斜面と平面で概ね類似した傾向を示している。雪温が 0°C となった積雪層の高さに関しては、斜面の方がより早く積雪下層まで到達する結果となっているが、これは斜面の特性ではなく、ばらつきの問題である可能性もある。この点については、同時に測定している熱電対による雪温計測データと合わせて今後検討していく必要がある。さらに、積雪モデルによる計算結果と今回の観測結果を比較することによって、積雪モデルの検証・改良を行う予定である。また、含水後の硬度の

変化についても解析を行い積雪安定度の計算に反映可能であるか検討したい。

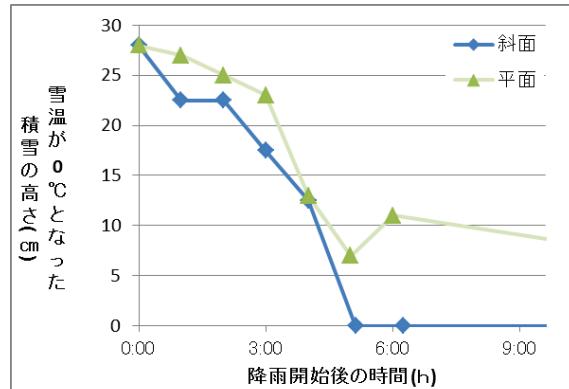
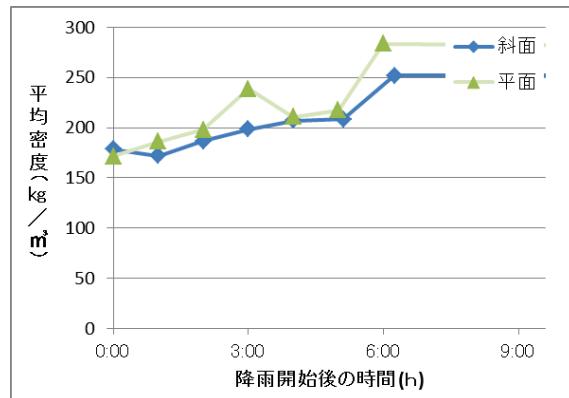
図-11 降雨後の時間経過と雪温 0°C の積雪高さ

図-12 降雨後の時間経過と平均密度

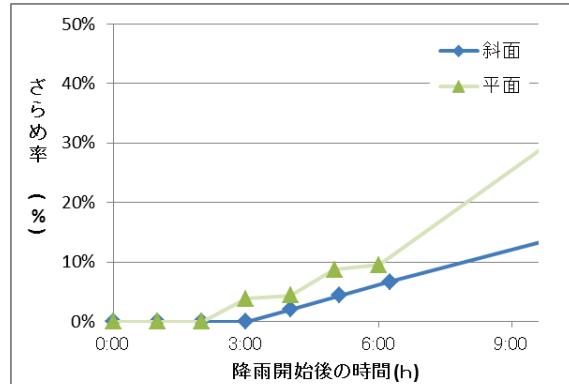


図-13 降雨後の時間経過とざらめ率の推移

5. 水の浸透や帶水層の形成を再現することが可能な積雪モデルの開発

積雪モデルとは、気象データ(気温、降水量、日射、湿度、放射収支、風速等)を入力値として積雪層構造、雪質、密度、含水率等を出力するものである。積雪モデルの開発は積雪層構造の推定には有用であり、また積雪内部の安定度評価に寄与すると考えている。

そのため本研究では、冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価に適する積雪モデルとして積雪への水の

浸透や帶水層の形成を再現することが可能な積雪モデルの開発を行っている。

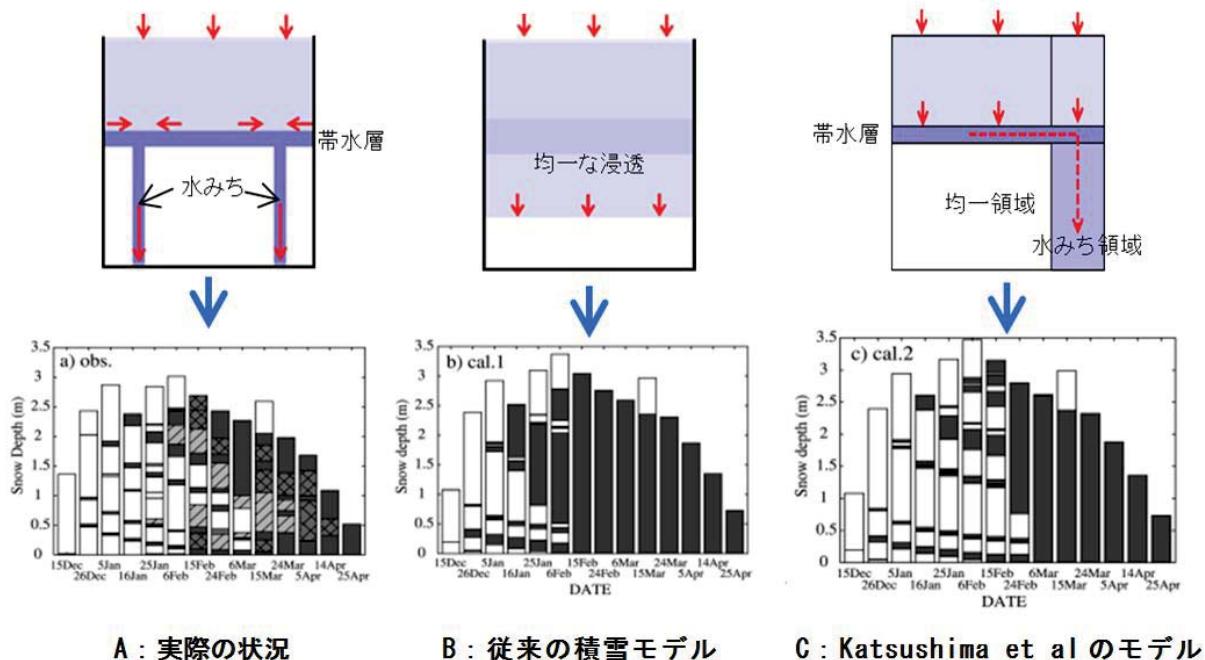
5.1. 既往の積雪モデルにおける課題

実際の積雪では、均質に降水や融水が積雪内に浸透するのではなく、局所的に急速に下の積雪層に水が浸透する「水みち」が形成される¹²⁾¹³⁾(図一 14)。現在、雪崩の危険度評価への活用を考慮した積雪モデルの主要なものは、フランスのCROCUS (Brun et al.¹⁴⁾¹⁵⁾)とスイスのSNOWPACK (Lehning et al.¹⁶⁾Lehning et al.¹⁷⁾)である。これらは主にヨーロッパの山岳地における乾雪雪崩の危険度評価を想定しており、湿雪雪崩には重点が置かれていらない。Hirashima et al.¹⁸⁾はSNOWPACKにおける水の浸透の再現方法について改良を試みているが、水の浸透を均一に扱っており、水みちは考慮されていない。このため既往の積雪モデルでは、水の浸透が均一に再現されるため、ざらめ雪層が多く見積られる(図一 14B)。一方、Katsushima et al.¹⁹⁾によるモデルは、仮想的に積雪を水みち領域と非水みち領域に分けることによって、積雪層の再現性を高めるよう工夫されている(図一 14C)。すなわち、水の浸透によって

増加する積雪の空隙含水率に閾値を設け、それを超える浸透水の供給があった際には、以降の浸透水は水みちに流下するよう設定している。しかしこのモデルを雪崩危険度評価に活用するには、帶水層における含水率の閾値と、水みちへの流出量の設定について課題が残されている。

5.2. 水みちへの流量の検討

5.1 を踏まえ、平成 23 年度に平地と斜面において定期的に積雪観測を実施し、浸透水の影響に着目して斜面と平地の積雪を比較した結果、平地と斜面では雪質が大きく異なり、その原因是水の浸透状況の差異によってもたらされることが示唆された。また、平成 24 年度にKatsushima et al.¹⁹⁾によるモデルを用いて上記のデータを解析した結果、水みちが形成される空隙含水率の閾値について斜面と平地で異なる値を設定することによって積雪層の再現性が良くなることが示された。ここでは、平成 23 年度の観測データと平成 24 年度に実施した観測によって得られたデータを合わせた 2 冬期分のデータを基に上記の閾値について検討を行う。



図一 14 既往の積雪モデルにおける水の浸透の再現方法

5.2.1. 観測地および観測方法

観測は、森林総合研究所十日町試験地において実施した。平地の観測は露場において、斜面の観測は、勾

配 40° の北東向き試験斜面において実施した。露場のデータは森林総合研究所十日町試験地による観測である。

観測項目は、雪温、層構造、雪質、粒度、密度

(100cc サンプラー)、硬度(プッシュプル)、含水率(デノス式)であり、観測頻度は約 20 日に 1 回実施した。

5.2.2. 観測結果

平成 23 年度と平成 24 年度に観測された雪質および積雪層構造の推移を図-15 に、積雪全層に対するざらめ雪の占める割合(ざらめ率)の推移を図-16 にそれぞれ示す。全体的な傾向として平成 24 年度の方が、積雪初期(1月～2月)からざらめ率が高い傾向がみられた。ただし、いずれの年も 3 月頃には概ね全層ざらめ雪となっている。

5.2.3. 水みちが形成される空隙含水率の閾値の検討

ここでは、2 冬期の観測データを基に水みちが形成される空隙含水率の閾値を検討する。なお、計算にあたっては Katsushima et al.¹⁹⁾によるモデルを用いたが、粒径の異なる層の境界における帶水層を再現するため飽和透水係数の式については Calonne et al. (2012)²⁰⁾ の式に、水分特性曲線の式は Yamaguchi et al.(2012)²¹⁾ の式に変更している。

積雪中の水の存在状態は、含水率の低い順に毛管領域、懸垂領域、網目領域の 3 段階に分けられ、水が積雪中で移動可能になる(透水性を持つ)のは懸垂領域からである。毛管領域と懸垂領域の境界となる含水率は雪質によらず空隙含水率で 7% 程度であるといわれている(Colbek, 1974)²²⁾。このため、水みちが形成される空隙含水率の閾値を 7% から徐々に増やしていく、ざらめ率の観測結果と計算値との RMSE が最も小さくなった際の値を閾値として採用することとした。この際 1 冬期毎に設定した場合と 2 冬期のデータを合わせて設定した場合の 2 つの方法で検討を行った。結果は以下のとおりである。また図-17 に計算結果と実測値におけるざらめ率の推移、図-18 に雪質と積雪層構造の推移の計算結果をそれぞれ示す。

1) 1 冬期毎に設定した閾値

H23 閾値 : 7.41%、RMSE: 1.9%

H24 閾値 : 7.22%、RMSE: 12.5%

2) 2 冬期合わせて設定した閾値

H23・H24 : 7.31%、RMSE: 10.1%

H23 のみの RMSE: 4.2%

H24 のみの RMSE: 13.6%

以上の結果から閾値を 1 冬期毎に設定した方が精度

が高まるものの、2 冬期分合わせて設定した閾値を用いても RMSE 10% 程度の精度でざらめ率を再現できることがわかった。

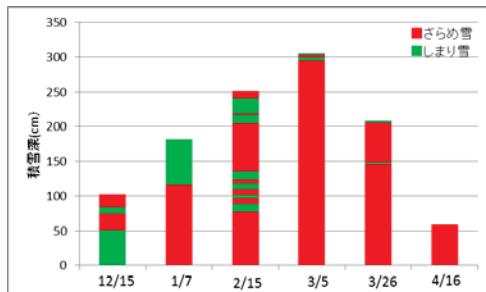
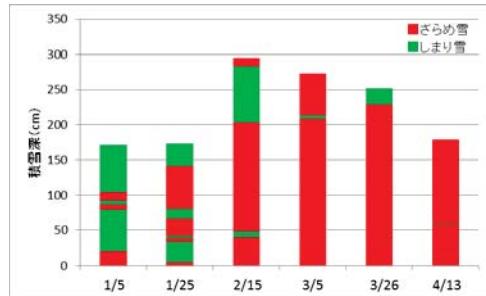


図-15 雪質および積雪層構造の推移
(H23 年度 : 上、H24 年度 : 下)

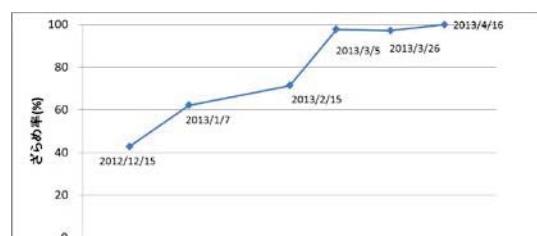
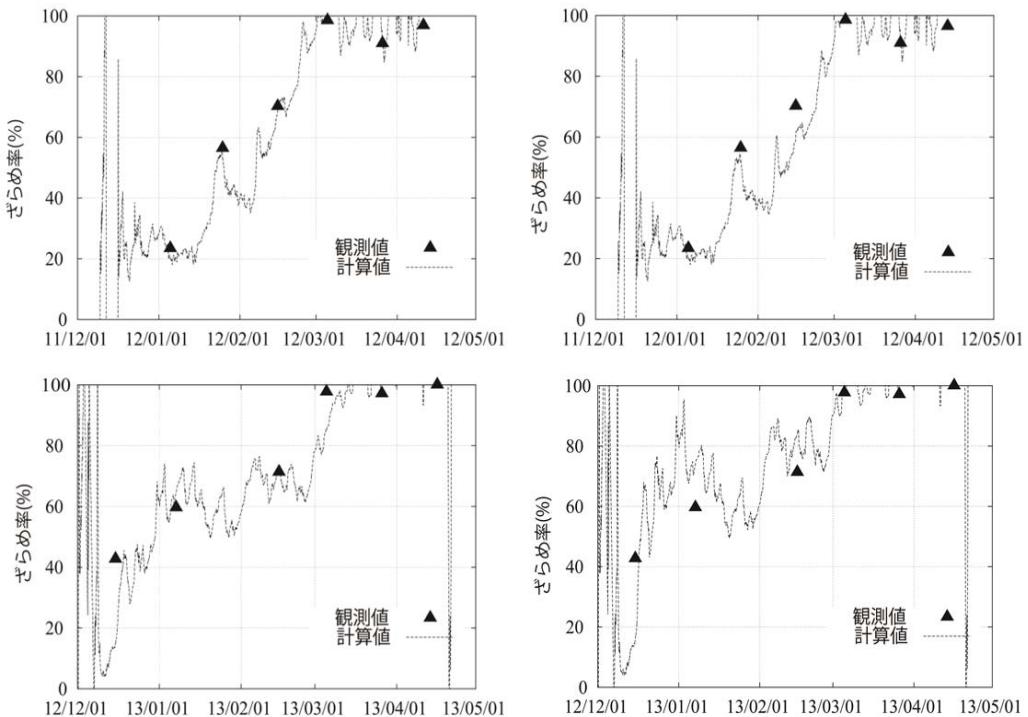


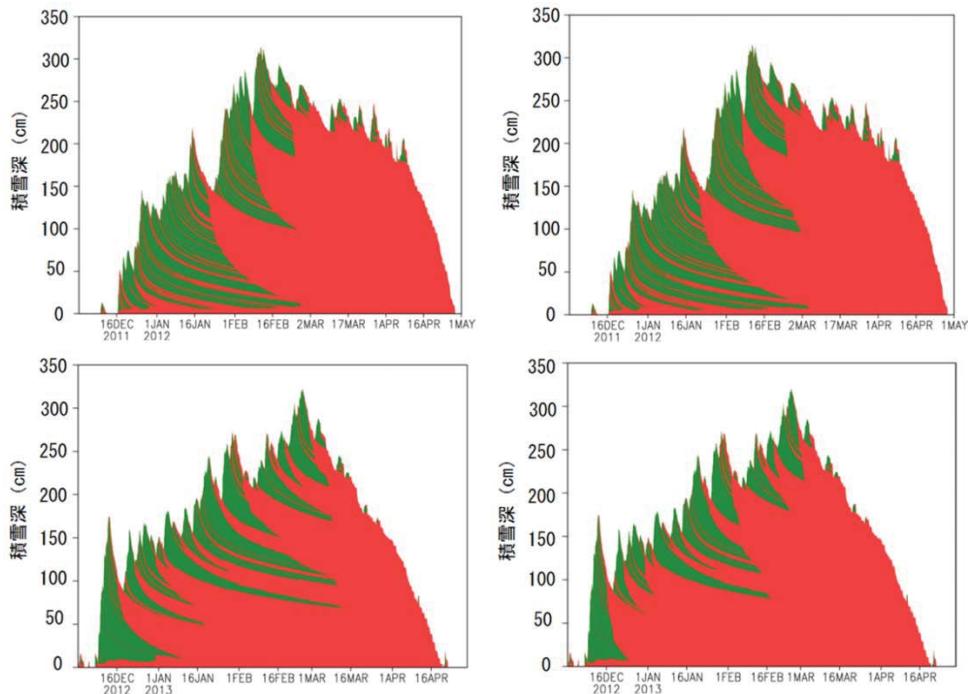
図-16 ざらめ率の推移
(H23 年度 : 上、H24 年度 : 下)

5.3. 今後の課題

ここでは、平成 23 年度冬期と平成 24 年度冬期の 2 冬期分の観測結果を基に積雪モデルにおいて水みちが形成される空隙含水率の閾値を検討した。今後、25 年度冬期の観測結果を用いて今年度検討した閾値の有効性を検討する予定である。



図一 17 計算結果と実測値におけるざらめ率の推移
 上左：H23 年度(1 冬期毎に設定した閾値を用いて計算した結果)
 上右：H23 年度(2 冬期合わせて設定した閾値を用いて計算した結果)
 下左：H24 年度(1 冬期毎に設定した閾値を用いて計算した結果)
 下右：H24 年度(2 冬期合わせて設定した閾値を用いて計算した結果)



図一 18 雪質と積雪層構造の推移の計算結果
 上左：H23 年度(1 冬期毎に設定した閾値を用いて計算した結果)
 上右：H23 年度(2 冬期合わせて設定した閾値を用いて計算した結果)
 下左：H24 年度(1 冬期毎に設定した閾値を用いて計算した結果)
 下右：H24 年度(2 冬期合わせて設定した閾値を用いて計算した結果)

6. スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討

斜面積雪の安定性を評価する際の指標として積雪中の弱層のせん断強度と弱層の上載積雪荷重によってもたらされる斜面方向の応力の比である積雪安定度(SI)が提案されている(たとえばRoch, 1966²³, Perla, 1977²⁴等)。しかし、図-19に示したように雪崩が発生する際には、弱層におけるせん断破壊のみでなく、スラブ(雪崩層)の四方(上部破断面、左右の側部破断面、下部破断面)において破壊が起こる。スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度については、前年度において検討が行ったが、検討に用いられたのは1事例の断面観測データのみである。そこで、本年度は1冬期間にわたってスラブの強度を考慮した安定度を計算し、従来のSIと比較することによってその有用性について検討する。

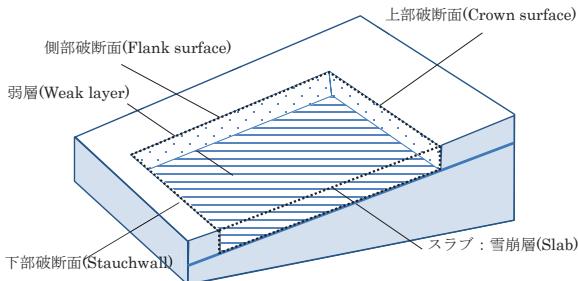


図-19 雪崩発生時の積雪の破壊の模式図

6.1.1 冬期間における安定度の算出方法

6.1.1. 積雪の再現方法

森林総合研究所十日町試験地の2011-12冬期の1冬期間の積雪を、積雪モデルを用いて気象データから再現した。算出した値は1冬期間における1時間毎の層構造、層厚、および各層の密度、粒径、含水率である。使用した積雪モデルは、水みちを考慮したKatsushima et al.(2009)¹⁹によるモデルであるが、水分特性曲線の式についてはYamaguchi et al.(2012)²¹の式に変更して計算を行った。なお、地面の透水係数は場所によって大きく異なるため、ここでは地面の透水係数を積雪最下層と同一とすることにより積雪底面から地面への水の浸透を連続として扱った。これにより積雪と地面の境界において滞水が起らないため積雪最下層の含水率を過少評価していると考えられる。よって湿雪全層雪崩の安定度については過大評価することになると考えられるが、表層雪崩に関しては適切に表現できていると考える。使用した気象データは気温、湿度、降水量、日射(上下)、放射収支である。

6.1.2. スラブの強度を考慮した積雪安定度

前年度は、スラブの四方における破壊を上部破断面：引張破壊、側部破断面：せん断破壊、下部破断面：圧縮破壊とそれぞれ仮定し、不安定条件として「駆動力>弱層の強度+スラブの強度」と「駆動力>弱層の強度 且つ 駆動力>スラブの強度」という2つの条件を設定し、それについて安定度の算出方法を提案したが、ここでは、不安定条件：「駆動力>弱層の強度+スラブの強度」について試算を行うこととした。なお、斜面の形状やスラブにおけるクラックの発生状況を考慮して提案された4種類の安定度に加え比較対象として従来の安定度(SI)を算出した(表-2)。

$$SI = \sigma_w / W \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (4)$$

$$SI_{wcls} = \{ b\sigma_w + bh(\sigma_c + \sigma_s) + 2lh\sigma_f \} / bIW \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (5)$$

$$SI_{wcf} = (b\sigma_w + bh\sigma_c + 2lh\sigma_f) / bIW \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (6)$$

$$SI_{wfs} = (b\sigma_w + bh\sigma_s + 2lh\sigma_f) / bIW \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (7)$$

$$SI_{wf} = (b\sigma_w + 2lh\sigma_f) / bIW \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (8)$$

b: スラブの幅 (m)

I: スラブの長さ (m)

h: スラブの厚さ (m)

W: 単位水平面積当たりの積雪荷重 (N・m⁻²)

σ_w : 弱層のせん断強度(N・m⁻²)

σ_c : 上部破断面の引張強度(N・m⁻²)

σ_f : 側部破断面のせん断強度(N・m⁻²)

σ_s : 下部破断面の圧縮強度 (N・m⁻²)

θ : 斜面勾配 (°)

表-2 各安定度と想定する斜面状況
(不安定条件：駆動力>弱層の強度+スラブの強度)

安定度	想定する斜面状況	考慮する強度	式
SI	従来の安定度	弱層の強度のみを考慮	(4)
SI _{wcls}	スラブの四方の支持が有効な状態を想定	弱層、上部、側部(左右)、下部破断面の強度を考慮	(5)
SI _{wcf}	地形条件、除雪等により、スラブの下部の支持が得られない状態を想定	弱層、上部、側部(左右)破断面の強度を考慮	(6)
SI _{wfs}	クラックの発生により、スラブの上部の支持が得られない状態を想定	弱層、下部、側部(左右)破断面の強度を考慮	(7)
SI _{wf}	スラブの上部、下部双方の支持が得られない状態を想定	弱層、側部(左右)破断面の強度を考慮	(8)

6.1.3. 積雪強度の算出方法および斜面勾配

σ_w および σ_f は、山野井・遠藤(2002)⁹の手法を用いて積雪密度と含水率より求めた。 σ_c についてはKeeler and

Weeks (1968)²⁵⁾が求めた乾雪における引張強度とせん断強度の比 27.3:4.2 を用いてせん断強度から求めるとした。また、 σ_s については、低密度の雪においては圧縮強度と引張強度に大きな差がないとされる(前野・黒田, 1986)²⁶⁾ことから σ_c と同じと仮定した。このため $SIwcf$ と $SIwfs$ の計算結果は、同じ値となるので以降は両方の計算結果を個別には示さず、 $SIwcf(SIwfs)$ と表示する。なお、斜面勾配 θ については、ここでは雪崩発生頻度のピークである 40° (McClung and Schaerer, 2006)²⁷⁾に設定している。

6.2. 結果と考察

各安定度の算定結果の例として SI (従来の安定度) : 図- 20、 $SIwcf100$ (スラブ規模 100×100m、スラブの四方の支持が有効) : 図- 21、 $SIwcf50$ (スラブ規模 50×50m、スラブの四方の支持が有効) : 図- 22、 $SIwcf10$ (スラブ規模 10×10m、スラブの四方の支持が有効) : 図- 23、 $SIwcf10$ (スラブ規模 10×10m、スラブの上部または下部および側部の支持が有効) : 図- 24、 $SIwfs10$ (スラブ規模 10×10m、スラブの側部の支持が有効) : 図- 25 を、表- 3 に各安定度における不安定状況の発生時間をそれぞれ示す。なお、表- 3においては不安定を示唆する目安として支持力が駆動力を下回る安定度<1、しばしば目安として用いられる安定度<1.5 と安定度<4.0(Roch, 1966²³⁾, Perla, 1977²⁴⁾)となつた時間とそれらの根雪期間(3189h)に対する割合(%)を示してある。これらの計算結果から、スラブの規模が 100×100m であると従来の SI と大きな差とならないが、スラブの規模が 50×50m、10×10m と小さくなるほど差が大きくなることがわかる。例えば不安定の基準を安定度<1.5 とした場合、不安定となる時間は SI : 1377 時間(根雪期間の 43%)に対し $SIwcf100$: 1135 時間(36%)、 $SIwcf50$: 993 時間(31%)、 $SIwcf10$: 305 時間(10%)である。一方、スラブの規模が 10×10m であっても上部(または下部)の支持が得られない $SIwcf(SIwfs10)$ では、不安定となる時間は 569 時間(18%)、側部のみの支持力が有効である $SIwfs10$ では、不安定となる時間は 991 時間(31%)であり、スラブの支持力の有効性を考慮することによって安定度の計算結果が大きく異なってくることがわかる。従来の SI を用いた場合、1 冬期間の 4 割もの期間において積雪が不安定と評価されるが、実際には考えがたいことから、 SI によって不安定と評価された期間の中には、実際には積雪が安定している状態を不安定と評価する「空振り」が多く含まれていると考えられる。

図- 26 に SI と $SIwcf10$ の最小値(各時点における積雪全層中のもっとも安定度が低い箇所の値)の推移を示す。 $SIwcf10$ は、 SI に比べて全体的に安定度が高く示されているが、特に 3 月中旬以降その差が大きくなっている。これは、 SI においては、積雪下部から中間部における脆弱な積雪による不安定性が継続しているのに対し、 $SIwcf10$ では、積雪下部から中間部に脆弱な箇所が存在しても、スラブの強度によって積雪を支えうると評価しているからである。

また、 $SIwcf10$ においては時には安定度が急激に下がっている箇所が度々みられるが、これらは、新たな降雪や表面融解によってもたらされた表層付近の不安定性を表現しているものであり、表層付近の安定性に関してはスラブの強度はそれほど貢献していないと考えられる。

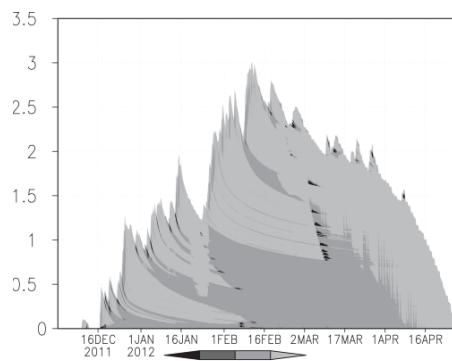
6.3. まとめと今後の課題

1 冬期間における安定度の試算を行った結果、前年度提案したスラブの強度を考慮した安定度と従来の安定度では、不安定と評価される期間に大きな差が現れることがわかった。このことから、斜面の規模、スラブの支持の状態にもよるが、積雪の安定性を見積もる上で、スラブの強度は無視できない要素であるといえる。特に全体的に密度の高い融雪期において、規模が小さい斜面ではスラブの強度の影響は大きくなると考えられる。このため、道路法面や住宅の裏の小規模斜面の雪崩の危険性を見積もる上では本研究において提案した安定度が有効であると考えられる。さらに、提案した積雪安定度は地形形状によるスラブの支持力の有効性、スラブのクラック発生状況、除雪による支持力の消失といった斜面状況を考慮することができるので、日々の斜面点検結果と照らし合わせて斜面毎に適切な安定度を適用することによって、より細やかに安定度を算出できる点が有用である。これらによって、実際には安定している状況を不安定と評価する「空振り」を従来の安定度よりも削減し、より適切に安定度を算出できる可能性があるといえる。さらに提案された安定度は、弱層の強度のみでなく、その上の複数の層の強度に着目しているので積雪多層モデルのアウトプットをより有効に活用することができる。

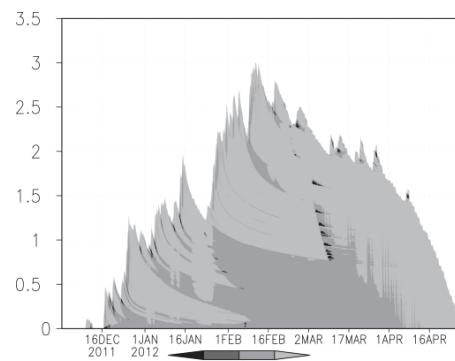
一方、本研究においては、スラブの引張強度 σ_c を求める際に Keeler and Weeks (1968)²⁵⁾が求めた引張強度とせん断強度の比を用いたが、積雪を含む脆性材料においては引張強度がせん断強度を下回るという観測結果もある(Podolskiy, 2010)²⁸⁾。引張強度の求め方によって

スラブの強度の安定度への影響は大きく変化するため、今後湿雪を含む多様な雪質における引張強度の検討を行う必要がある。また、全層雪崩の評価に対しては、積雪底面から地面への水の浸透を適切に表現できるよう何らかの手法を用いて地面の透水係数を設定する必要がある。さらに、スラブはその重さによる駆動力と強度による支持力をもたらすだけでなく、スラブ自体の収縮が駆動力になると考えられ、この点についても

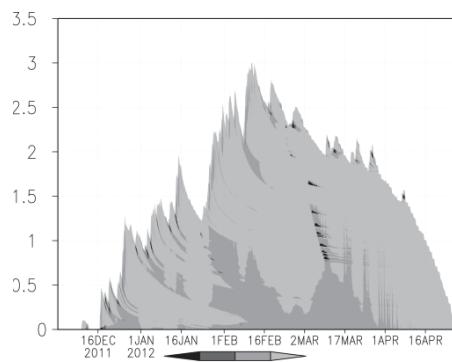
今後研究を進めていく必要がある。そして、スラブの強度を考慮すると、従来のSIに比べて安定度を高く評価することになるため、「空振り」を削減できる可能性がある一方で、実際には不安定な状況を安定と評価する「見逃し」につながる可能性も併せ持っている。このため、実際の雪崩事例において検証を行うことによって 本研究で提案した安定度の妥当性と安定度の適正な閾値の検討を行う必要がある。



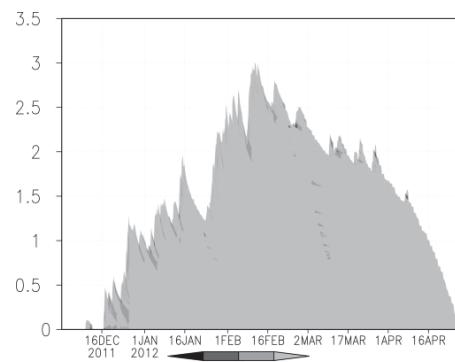
図－20 11-12 冬期における安定度の算出結果
(SI)



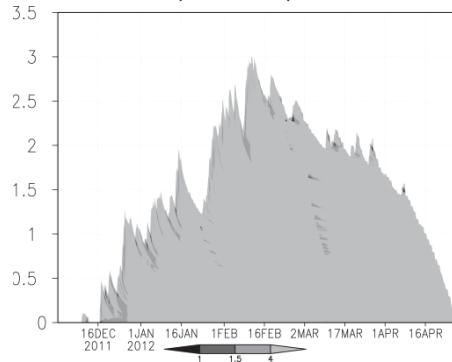
図－21 11-12 冬期における安定度の算出結果
(SIwcf100)



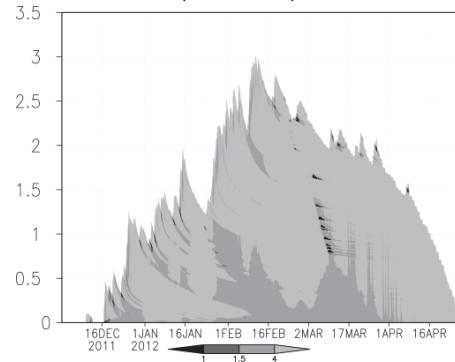
図－22 11-12 冬期における安定度の算出結果
(SIwcf50)



図－23 11-12 冬期における安定度の算出結果
(SIwcf10)



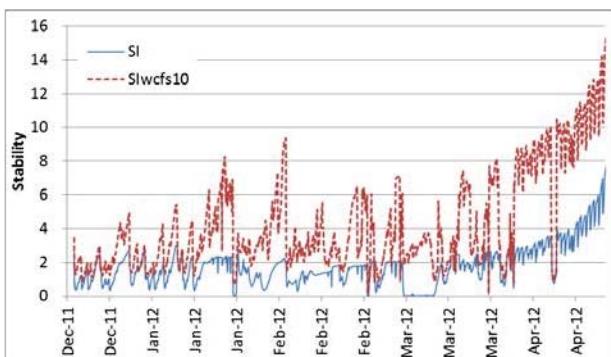
図－24 11-12 冬期における安定度の算出結果
(SIwcf/SIwfs10)



図－25 11-12 冬期における安定度の算出結果
(SIwf10)

表－3 各安定度における不安定状況の発生時間
(根雪期間：3189h)

	<1.0		<1.5		<4.0	
	h	%	h	%	h	%
SI	817	26	1377	43	2869	90
SIwcf100	688	22	1135	36	2819	88
SIwcf50	594	19	993	31	2745	86
SIwcf10	54	2	305	10	1908	60
SIwcf(SIwcf10)	143	4	569	18	2038	64
SIwf10	590	19	991	31	2743	86



図－26 SI と SIwcf10 の最小値の推移

7.まとめ

湿雪雪崩発生条件の解明と、湿雪雪崩の危険度評価技術の検討するために解析等を行った。結果は以下のとおりである。

7.1. 湿雪雪崩事例の気象解析

湿雪雪崩発生の気象条件として、厳冬期の2月は少ない水の供給量で湿雪表層雪崩が発生する傾向にあり、融雪期の3月は水の供給量が多く湿雪全層雪崩が発生する傾向にある。さらに、雪質に関する指数を用いて湿雪雪崩の発生条件を調べたが、発生条件を明確に示すまでには至らなかった。今後、実験や観測の結果も考慮して検討を行なっていく。

7.2. 積雪内の水の浸透に関する実験

しまり雪主体の斜面では、水は積雪層に沿って斜面下方に流れる傾向があり、積雪底面には容易に到達しない。しかし、ざらめ雪が多くなると、水は積雪底面へ浸透していく。このような雪質などによる水の浸透の違いが、湿雪雪崩の発生形態（全層、表層）を決める一要因になると考えられる。

7.3. 多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験

降雨後の推移は斜面と平面で概ね類似した傾向を示

した。雪温が0°Cとなった積雪層の高さに関しては、斜面の方がより早く積雪下層まで到達する結果となっているが、これは斜面の特性ではなく、ばらつきの問題である可能性もあるため同時に測定している熱電対による雪温計測データと合わせて今後検討していく必要がある。

7.4. 水の浸透や帶水層の形成を再現することが可能な積雪モデルの開発

平成23年度冬期と平成24年度冬期の2冬期分の斜面積雪の観測結果を基に積雪モデルにおいて水みちが形成される空隙含水率の閾値を検討した。結果として閾値を1冬期毎に設定した方が精度が高まるものの、2冬期分合わせて設定した閾値を用いてもRMSE:10%程度の精度でざらめ率を再現できることがわかった。

7.5. スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討

前年度提案したスラブの強度を考慮した安定度の計算手法を用いて1冬期間における安定度の試算を行った。結果として提案した安定度と従来の安定度では、不安定と評価される期間に大きな差が現れることがわかった。このことから積雪の安定性を見積もる上で、スラブの強度は無視できない要素であるといえる。特に全体的に密度の高い融雪期において、規模が小さい斜面ではスラブの強度の影響は大きくなると考えられるため、道路法面や住宅の裏の小規模斜面等の雪崩の危険性を見積もる上では本研究において提案した安定度が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 気象庁：異常気象レポート2005, pp383, 2005
- 2) 中村一樹・石本敬志：2010年2月下旬に広域に発生した全層雪崩について、北海道の雪氷, 29号, 8-11, 2010
- 3) 横山宏太郎・大野宏之・小南靖弘・井上聰・川方俊和：冬期における降水量計の捕捉特性、雪氷, 65, 303-316, 2003
- 4) 近藤純正・本谷研・松島大：新バケツモデルを用いた流域の土壤水分量、流出量、積雪水当量、及び河川水温の研究、天氣, 42, 821-831, 1995
- 5) 近藤純正・中村亘・山崎剛：日射量および下向き大気放射量の推定、天氣, 38, 41-48, 1991
- 6) 水津重雄：広域に適用可能な融雪・積雪水量モデル、雪氷, 64, 617-630, 2002
- 7) Kawashima, K., T. Yamada and G. Wakahama : “Regional division of snow-depositional environments and metamorphism of snow cover in plain areas along the Japan Sea coast”, IAHS Publication, No. 223, pp. 187-196, 1994

- 8) 山野井克己・竹内由香里・村上茂樹：「*ブッシュゲージを用いた斜面積雪安定度の推定*」。雪氷, 66, 669-676, 2004
- 9) 山野井克己・遠藤八十一：「*積雪におけるせん断強度の密度および含水率依存性*」。雪氷, 64, 4431-451, 2002
- 10) 竹内由香里・遠藤八十一・村上茂樹・庭野昭二：「*2005/06年冬期の十日町における積雪の硬度特性*」。雪氷, 69, 61-69, 2007
- 11) (社)日本雪氷学会(編)：「*積雪観測ガイドブック*」、朝倉書店, 2010
- 12) 若浜五郎：「*積雪内に於ける融雪水の移動 I*」、低温科學, 物理篇 21, 45-74, 1963
- 13) 若浜五郎・中村勉・遠藤八十一：「*積雪内における融雪水の移動 II*」、低温科學, 物理篇 26, 53-76, 1969
- 14) Brun, E., E. Martin, V. Siomn, C. Gendre, and C. Coleou: An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. Journal of Glaciology, 35, 333-342, 1989
- 15) Brun, E. P. David, M. Sudul and G. Brunot: A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. Journal of Glaciology, 38, 13-22, 1992
- 16) Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, C. Fierz and P. Satyawali: A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part II: Snow microstructure. Cold Regions Science and Technology, 35, 147-168, 2002
- 17) Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, and C. Fierz : A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part III: meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. Cold Regions Science and Technology, 35, 169-184, 2002
- 18) Hirashima H., Yamaguchia S., Satoa A., Lehningb M.: Numerical modeling of liquid water movement through layered snow based on new measurements of the water retention curve. Cold Regions Science and Technology, 64, 94-103, 2010
- 19) Katsushima, T., T. Kumakura and Y. Takeuchi: "A multiple snow layer model including a parameterization of vertical water channel process in snowpack". Cold Regions Sci. Technol., Vol. 59, pp. 143-151, 2009.
- 20) Calonne, N., Geindreau, C., Flin, F., Morin, S., Lesaffre, B., Rolland du Roscoat, S., Charrier, P., 2012. 3-D image-based numerical computations of snow permeability: links to specific surface area, density, and microstructural anisotropy. The Cryosphere, 6, 939-951
- 21) Yamaguchi, S., Watanabe, K., Katsushima, T., Sato, A., Kumakura, T., 2012. Dependence of the water retention curve of snow on snow characteristics. Ann. Glaciol. 53(61), 6-12.
- 22) Colbeck, S.C.: The capillary effects on water percolation in homogeneous snow. Journal of Glaciology, 13, 85-97, 1974
- 23) Roch, A., 1966: Les variations de la resistance de la neige. Proceedings of the International Symposium on Scientific Aspects of Snow Avalanches, IAHS Publ., No. 69, 86-99.
- 24) Perla, R., 1977: Slab avalanche measurements. Can. Geotech. J., 14(2), 206-213.
- 25) Keeler and Weeks, 1968: Investigations into the mechanical properties of alpine snow-packs, Journal of Glaciology, Vol. 7, No50, 253-271.
- 26) 前野・黒田, 1986 : 雪氷の構造と物性(基礎雪氷学講座第I巻, 古今書院, 209pp.)
- 27) McClung, D. and Schaefer, P., 2006. The Avalanche Handbook. Seattle, WA, The Mountaineers, pp. 271.
- 28) Podolskiy, E.A., 2010: Experimental studies on earthquake-induced snow avalanches. Ph.D. Thesis, Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 173 pp.

RESEARCH ON RISK EVALUATION OF SNOW AVALANCHE HAZARD INDUCED BY WINTER RAIN EVENT

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Cold-Region Road Engineering Research Group (Snow and Ice Research Team), Erosion and Sediment Control Research Group (Snow Avalanche and Landslide Research Center)

Author : MATSUZAWA Masaru

NAKAMURA Hiroshi

MATSUSHITA Hiroki

HARADA Yusuke

UEDA Masayo

AKIYAMA Kazuya

ITO Yasuhiko

Abstract : There are concerns that wet-snow avalanches will become more frequent with increases in winter temperature. However, it is difficult for avalanche safety administrators to evaluate the risk of wet-snow avalanches, because not much is known about the conditions under which such avalanches occur. Toward proposing a method for evaluating the likelihood of wet-snow avalanches, we performed meteorological data analysis using past avalanche events, field experiments on water infiltration in snowpack, laboratory experiments of artificial rain on a multi-layered snowpack, development of numerical snow pack models which can represent the water infiltration and the impermeable process, and theoretical examination of stability index considering slab strength.

Key words : wet snow avalanche, numerical snow pack model, rain on snow, melting of snow, snow pack on the slope, snow pit observation.