

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、笠村
繁幸（雪氷）

野呂智之、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解析」「多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験」「既往積雪モデルにおける課題の検討」「スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討」に関する検討を行った。

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 24 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) 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
- (3) 既往積雪モデルにおける課題の検討

- (4) 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 24 年度は、湿雪雪崩発生への関わりが強いと考えられる降雨量と積雪表面付近の融雪量を気象観測データから求めた。

2.1. 対象とした湿雪雪崩事例と気象観測データ

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、近傍の気象観測データを用いて、湿雪雪崩発生時の気象条件に関する解析を行った。収集した雪崩事例の詳細は、昨年度の報告書を参照されたい。

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。これらの気象データは、以下に示す補正や推定を行った後、降雨量や融雪量の計算に使用した。

2.2. 気象データの補正

2.2.1. 気温の標高補正

気象観測所の気温 $T_0(^{\circ}\text{C})$ から、雪崩発生箇所と気象観測所との標高差 $z(\text{m})$ と気温減率 $\Gamma = -0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$) を用いて、式(1)より雪崩発生箇所の気温 $T(^{\circ}\text{C})$ を推定した。

$$T = T_0 - \Gamma \times \Delta z \quad (1)$$

2.2.2. 降水量の補正補正

横山ら(2003)³⁾は、降水量計の受水口付近の気流が風によって乱されるため、降水粒子が上手く降水量計に補足されないことを指摘し、式(2)に示すように風速に応じた降水量計の捕捉率 CR を提案した。

$$CR = 1 / (1 + m \cdot U) \quad (2)$$

ここで、 CR は捕捉率、 U は受水口高さの風速 (m/s)、 m は降水量計の種類及び降雨と降雪ごとの係数 (s/m) である。受水口高さの風速 U は、その高さを 5 m として、気象観測所の風速計の高さを 10 m と仮定し、対数法則により推定した。また、降水の雨雪判別は、近藤ら(1995)⁴⁾に従い、 $T > 1.8(^{\circ}\text{C})$ の場合を降雨、 $T \leq 1.8(^{\circ}\text{C})$ の場合を降雪とした。

本解析では、降水量の観測値 $P_0(\text{mm})$ を、式(2)から求めた降水量計の捕捉率 CR で除した降水量 $P(\text{mm})$ を解析に用いた。

$$P = P_0 / CR \quad (3)$$

2.2.3. 日射量の推定

積雪表面付近における融雪に寄与する日射量を観測している箇所は気象官署に限られ、雪崩発生箇所から離れている。ここでは、近藤ら(1991)⁵⁾の手法を用いて、雪崩発生箇所に近い気象庁アメダスの日照時間 (h) の観測値から、日射量の日積算値 (J/m^2) を推定した。

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

降水量計の捕捉率の算出と同様に、近藤ら(1995)⁴⁾の雨雪判別気温 ($= 1.8^{\circ}\text{C}$) 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。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 $P(\text{mm})$ 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 $M_s(\text{mm})$ は、水津

(2002)⁶⁾の方法に従い、気象観測データから、式(4)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。

$$M_s = NRS + NRL + H + \tau E + R + Q_i \quad (4)$$

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 は積雪層内で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。

2.4. 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乗荷重の増加の他、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。ここでは、後者による湿雪雪崩発生への影響を調べるため、積雪への水の供給量を降雨量と融雪量の合計値とした。

図-1は、11月から4月の湿雪雪崩事例について、雪崩発生の前日と当日(発生時刻まで)の積雪への水の浸透量と発生時の積雪深の関係で、表層雪崩と全層雪崩を分けて示した。図-1より、積雪への水の供給量が多いと全層雪崩が発生する傾向にあり、表層雪崩の多くは水の供給量が 10 mm 以下の場合で発生している。なお、図には雪崩発生箇所近傍の気象観測所において積雪深が 0 cm である場合も示した。

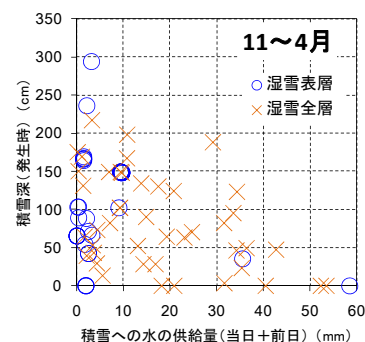
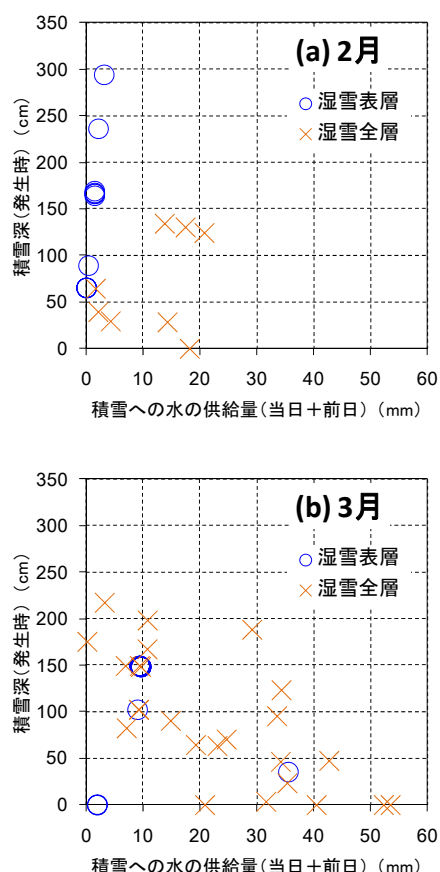


図-1 積雪への水の浸透量と積雪深の関係 (11~4月)

積雪への水の供給量と積雪深との関係を、厳冬の2月と融雪期の3月にわけて示したのが図-2である。厳冬の2月(図-2a)は、積雪への水の浸透量が少なく、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-2b)は、積雪への融雪量が多くなり、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。このような月による湿雪雪崩の発生条件の違いについて、気温や日射などの大気の熱的環境の相違の他、季節や気象条件によって変化する積雪内の雪質や雪粒の大きさ等の積雪構造が、降雨や融雪水の浸透状況に影響を与えている可能性がある⁷⁾⁸⁾⁹⁾が、その物理的な説明は今後の課題である。



図ー 2 積雪への水の浸透量と積雪深の関係

2.5. 今後の課題

今後、雪崩の発生形態が不明な事例について、気象観測データから雪の乾湿を推定して対象事例を増やし、湿雪雪崩発生気象条件に関するより詳細な解析を行っていく予定である。

3. 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¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。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 年度において実施した実験テーブルを平らにして平地を模擬した実験に引き続き、

平成 24 年度は実験テーブルを 30° に傾けて斜面上で実験を行った。平地の実験詳細は、平成 23 年度の報告書を参照されたい。

3.1. 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、人工雪を用いて低温室で実験することとした。

斜面の実験は、2013 年 1 月 28 日～2 月 2 日に(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で行った。

3.1.1. 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ー 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ー 1 に示す。

表ー 1 雪氷防災実験棟で設定可能な環境

気温	−30℃～+25℃
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)

3.1.2. 実験準備 (積雪層の形成)

大きさが 3 m×5 m の降雪テーブル(写真ー 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 9.5 cm 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 10 cm 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。この後室温を −5℃ に保ち、降雪 B を氷盤上に 4 時間かけて約 10 cm 堆雪させ、降雪終了後室温を −10℃ に保って、20 時間放置した。さらに降雪 A を 24 時間降雪させ、約 45 cm 降雪 A を堆積させた(表ー 2)。

降雪 A の堆雪後、体重を加えて圧密させて降雪 A の厚さを 17 cm とした。以上が降雨実験に用いた供試体となる人工積雪層である。この積雪層の構成を図ー 3 に示す。

この積雪層の厚さは、実験テーブルを 30° に傾けた際に昨年度の積雪の高さと同じになるように設定してある。



写真-1 雪氷防災実験棟

表-2 人工積雪層の形成と降雪・降雨の時程

日	時間	作業等
1/28	9:30-12:30	自然雪搬入整形
	14:00-18:00	降雪 B 降雪
1/29	13:00-13:00 (1/30)	降雪 A 降雪
1/31	10:10-16:10	降雨

図-3 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)

3.1.3. 降雨実験

3.1.2 で作成した積雪層に、積雪層の準備完了約 21 時間経過後から、6 時間降雨させた(表-2)。降水量は 2 mm/h とした。降雨前と降水開始後から 1 時間経過毎と降水終了直後、および終了 17 時間後の計 8 回、積雪観測を行った。

積雪観測は、積雪層構造の分類、雪温、密度、硬度、重量含水率(以下、単に含水率とする)などを測定した。測定方法はおおむね「積雪観測ガイドブック」¹³⁾に準じ、重量含水率の測定は熱量式(遠藤式)に因った。

3.2. 観測結果と今後の課題

実験中の雪温・密度・硬度・含水率の推移を計測毎に図-4 に示した。

3.2.1. 降雨前の積雪

降雨前の積雪は自然雪直上の氷板を 0 として、高さ 28 cm であった。0 ~ 9 cm が降雪 B による層(B 層)、9 cm ~ 28 cm が降雪 A による層(A 層)で、2 層構造である。

B 層は密度 : 約 300 kg/m³、硬度 : 約 100 kN/m²でしまり雪に相当し、A 層は密度 : 約 100 kg/m³、硬度 : 約 10 kN/m²で、新雪に相当する。雪温は、B 層は -6 °C でほぼ一定、A 層は底面から雪面にかけて -6 °C から -0.1 °C に変化した状況であった。

3.2.2. 水の浸透

水が積雪層内に浸透すると雪温は 0 °C となるため、ここでは、浸潤の先端を雪温から判断した。水の浸透は、降雨開始 2 時間後では雪面付近のみであるが、同 4 時間後に高さ 15 cm に達した。降雨開始から 5 時間後には底面を含む全層に水が浸透した。

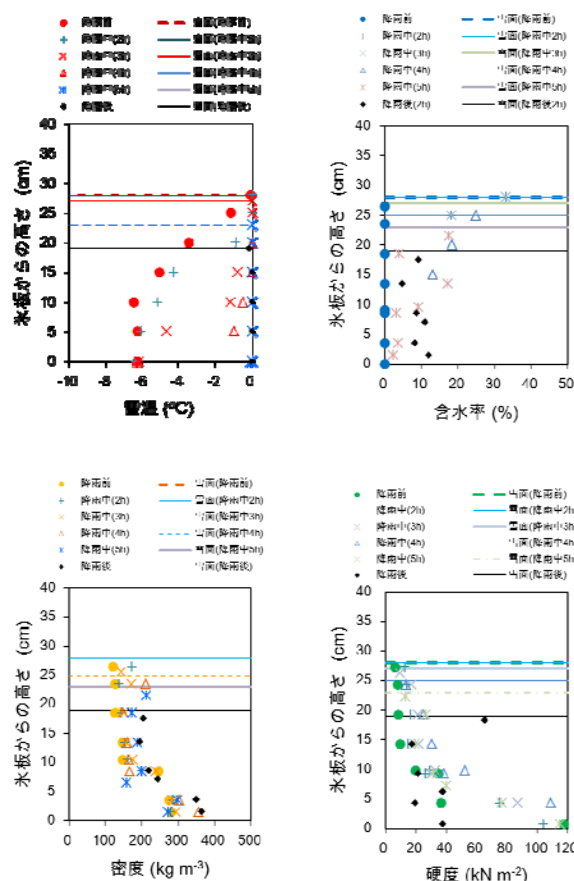


図-4 実験中の雪温、密度、硬度、重量含水率の変化

3.2.3. 重量含水率

含水率はA層で雪面付近において最大で33%となったが、A層内部では最大で20%前後であった。一方、B層においては最大で15%前後であった。水の浸透過程において雪面付近、A層とB層の境界付近、B層と氷板の境界付近に一時的に高い個所がみられ、層境界における帯水が発生したと考えられる。A層、B層共に降雨終了18時間後の時点で含水率は10%前後でほぼ全層均一になった。

3.2.4. 密度・硬度

水の浸透前後において、密度はA層で100 kg/m³から200 kg/m³へ、B層で300 kg/m³から400 kg/m³へ変化している。

硬度はB層内で100 kN/m²から40 kN/m²に減少しているのに対し、A層では10 kN/m²から20 kN/m²へと逆に増加している。

3.2.5. まとめと今後の課題

降雨の浸透における強度変化などについては、新雪では密度の増加による強度の増加が顕著であったのに対し、しまり雪では、含水率の増加による強度の減少が顕著であり、雪質によって差異があることが明らかになった。この結果は平地における実験と同様の傾向であった。

今後、水の浸透状況や積雪の硬度変化などについて、平成23年度に行った平地の観測結果と詳細に比較し、斜面における特徴について明らかにすべく解析を行いたいと考えている。また、ここで得られたデータは積雪モデルの検証と改良にも活用したいと考えている。

4. スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討

雪崩発生危険性(=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駆動力の比である積雪安定度(SI)が提案されている¹⁴⁾¹⁵⁾。

$$SI = \sigma_w / W \cdot \sin\theta \cos\theta \quad (5)$$

σ_w : 弱層のせん断強度(N/m²)

W : 単位水平面積当たりの積雪荷重(N/m²)

θ : 斜面勾配(°)

SI を算定するには、多くの場合弱層のせん断強度 σ_w の値として、せん断有効面積の定まった金属枠(Shear Frame)¹⁴⁾¹⁵⁾を用いて計測された弱層のせん断

強度をせん断有効面積で除した値であるせん断強度指数 SFI (Shear Frame Index)が用いられる。

ただし、 SFI は、実際の雪崩におけるひずみ速度とは異なる速度で破壊させること等から実際の雪崩の発生を完全に説明することは難しいということが指摘されている¹⁶⁾。しかし、 SFI は雪崩の発生の危険性を見積もるための指標の一つとしてその有用性は認められており、海外では道路管理の現場等において用いられている¹⁷⁾。

雪崩の発生予測¹⁸⁾¹⁹⁾に関する研究においても、安定性のアウトプットとしてしばしば SI が利用されている。しかし、これらの研究では、モデルによる積雪層構造や雪質の再現性について主眼が置かれており、安定度そのものには着目されていない¹⁸⁾¹⁹⁾。

図-5に示したように雪崩が発生する際には、底面の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。特に密度の高いしまり雪が卓越する多雪地帯、積雪密度が全体的に高く積雪層の強度が高い傾向にある温暖な地域、あるいは融雪期においては安定度に対してスラブの強度の影響が大きくなると考えられる。このため、本研究では積雪の安定性をより適切に見積もる手法を提案することを目的として、スラブの強度を考慮した積雪安定度について検討する。

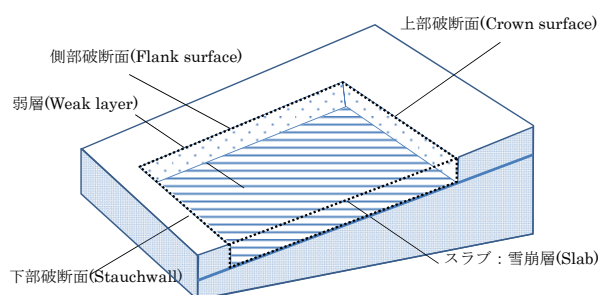


図-5 雪崩発生時の積雪の破壊の模式図

4.1. スラブの強度を考慮した安定度

ここでは、安定度をスラブによる上載荷重の斜面平行成分によってもたらされる駆動力とスラブの強度と弱層の強度を合わせた支持力の比と定義し安定度の算出方法を提案する。そこで、まず SI を求める式(5)にスラブの四方の強度を加えて式(6)を提案し、さらに斜面状況を考慮して式(6)を基に式(7)と式(8)を提案する(表-3)。なお、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することとした。

$$SIwcf = \{ bl\sigma_w + bh(\sigma_c + \sigma_s) + 2lh\sigma_f \} / blW \cdot \sin\theta \cos\theta \quad (6)$$

$$SIwcf = (bl\sigma_w + bh\sigma_c + 2lh\sigma_f) / blW \cdot \sin\theta \cos\theta \quad (7)$$

$$SIwf = (bl\sigma_w + 2lh\sigma_f) / blW \cdot \sin\theta \cos\theta \quad (8)$$

b: スラブの幅 (m)

l: スラブの長さ (m)

h: スラブの厚さ (m)

σ_c : 上部破断面の引張強度 (N/m²)

σ_f : 側部破断面のせん断強度 (N/m²)

σ_s : 下部破断面の圧縮強度 (N/m²)

表－3 各安定度と想定する斜面状況

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	(5)
SIwcf	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	(6)
SIwcf	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	(7)
SIwf	上記の状態でさらにスラブの上部に亀裂が入り支持力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)

(不安定条件: 駆動力 > 弱層の強度 + スラブの強度)

4.2. 安定度の算出

4.2.1. 安定度の算出方法

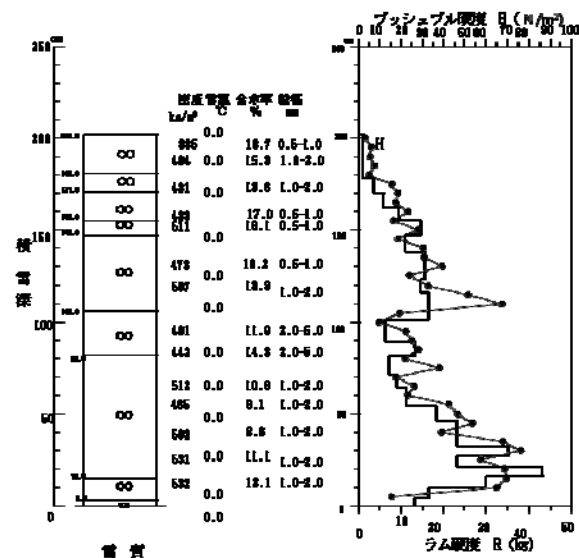
4において提案した安定度を算出するには、スラブの寸法を定める必要がある。このため、ここでは b (スラブの幅) × l (スラブの長さ) について 10 m × 10 m、50 m × 50 m、100 m × 100 m の 3 つの規模を想定する。

σ_w および σ_f は、山野井ほか¹⁰⁾の手法を用いプッシュプル硬度(プッシュプルゲージを用いて計測した硬度)より求め、 σ_c については Keeler and Weeks²⁰⁾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 を用いてプッシュプル硬度によるせん断強度から求めることとした。また σ_s については、低密度の雪において圧縮強度と引張強度に大きな差がない²²⁾ことから、 σ_c と同じと仮定した。なお斜面勾配 θ は、雪崩が発生しやすい斜面勾配の範囲が 30° ～ 60° といわれている²¹⁾ことから、ここでは 40° と仮定することとした。

4.2.2. 使用する積雪データ

安定度の算出事例として 2005 年 3 月 24 日に森林総

合研究所十日町試験地において観測されたデータを用いた。このデータは融雪期のもので、全層が密度の高いざらめ雪であり底部と中間部(100 cm 辺り)に脆弱な箇所が存在する(図－6)。厳冬期の新雪やこしまり雪を含む積雪層に比べるとスラブの強度が高いため、安定度に対するスラブの強度の影響が比較的大きい積雪構造と考えられる。



図－6 安定度の算出事例に用いた積雪断面観測データ

(森林総合研究所十日町試験地 2005 年 3 月 24 日)

4.3. 安定度の算出結果と考察

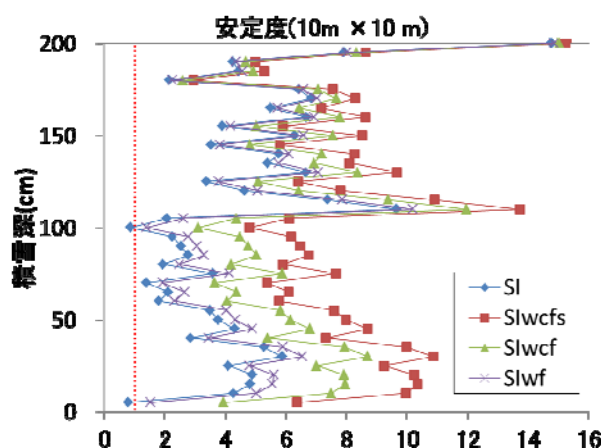
図－7にスラブの規模 10 m × 10 m における各安定度(SIwcf、SIwcf、SIwf)の算定結果を示す。ここで底部と中間部(100 cm)の脆弱な層に注目すると SI は、中間部 : 0.9、底部 : 0.8 であり、駆動力が強度を上回っている。それに対し SIwcf は中間部 : 4.8、底部 : 6.3、SIwcf は中間部 : 3.1、底部 : 3.9、SIwf は中間部 : 1.4、底部 : 1.5 といずれも強度が駆動力を上回る結果となった。また、bl = 50 m × 50 m、100 m × 100 m における、中間部の SIwcf は、それぞれ 1.6、1.2、底部の SIwcf はそれぞれ 1.8、1.3 となりこちらも強度が駆動力を上回る結果となった(図－8)。

4.3.1. スラブの強度が安定度にもたらす影響

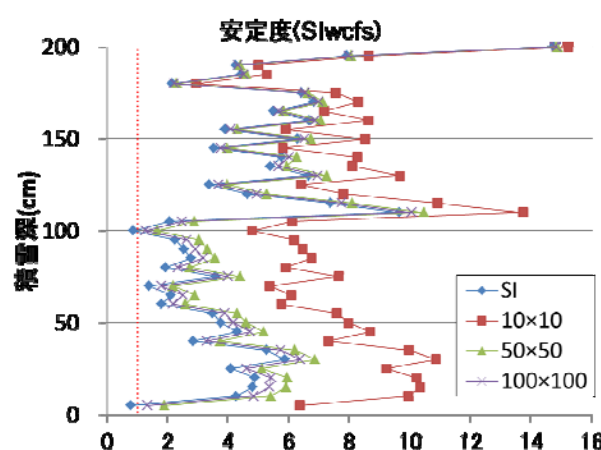
積雪層の中間部と底部における各安定度の算出結果を表－4に取りまとめた。表から、スラブの強度を考慮した場合としない場合において安定度は大きく異なっており、積雪の安定性を見積もる上でスラブの強度は無視できない要素といえる。しかし、スラブの上部や下部の強度が有効でない場合やスラブの規模が比

較的大きい場合は、スラブの強度を考慮することによる安定度の変化は少ない。このことから、安定度に対するスラブの強度の影響は斜面規模や斜面状況（上部・下部の強度の有効性）に大きく左右されるといえる。

今回の事例では特に全層ざらめ雪で積雪層の密度が全体的に高くスラブの強度が高いものを選定している。当然、新雪やしまり雪層を多く含む積雪構造においては安定度に対するスラブの強度の影響は少なくなると考えられる。



図－7 スラブ規模 10m×10m における安定度 (SIwcf, SIwcf, SIwf)



図－8 スラブ規模毎の安定度 (SIwcf)

表－4 各安定度の算定結果

	斜面規模	SI	SIwcf	SIwcf	SIwf
中間部	10×10m	0.9	4.8	3.1	1.4
	50×50m	0.9	1.6	1.3	1.0
	100×100m	0.9	1.2	1.1	0.9
底部	10×10m	0.8	6.3	3.9	1.5
	50×50m	0.8	1.8	1.4	0.9
	100×100m	0.8	1.3	1.1	0.8

4.4. まとめと今後の課題

本研究の結果から、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。密度の高い時期において規模が小さい斜面でスラブの強度の影響は大きくなる。このため、道路法面や住宅の裏山等、規模が小さい斜面における融雪期の雪崩の危険性を見積もる上では本研究において提案する安定度が有効であると考えられる。

スラブの強度を考慮すると、従来の SI に比べて安定度を大きく評価することになるため、実際には安定している状況を不安定と評価する「空振り」を削減することが可能になると考えられる。今後、実際の雪崩事例において検証を行うと共に 1 冬期を通じた連続的な安定度の算定結果と雪崩の発生状況の比較などを通じて、本研究で提案した安定度の妥当性と適正な閾値の検討を行うことが課題である。

5. 既往積雪モデルにおける課題の検討

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。

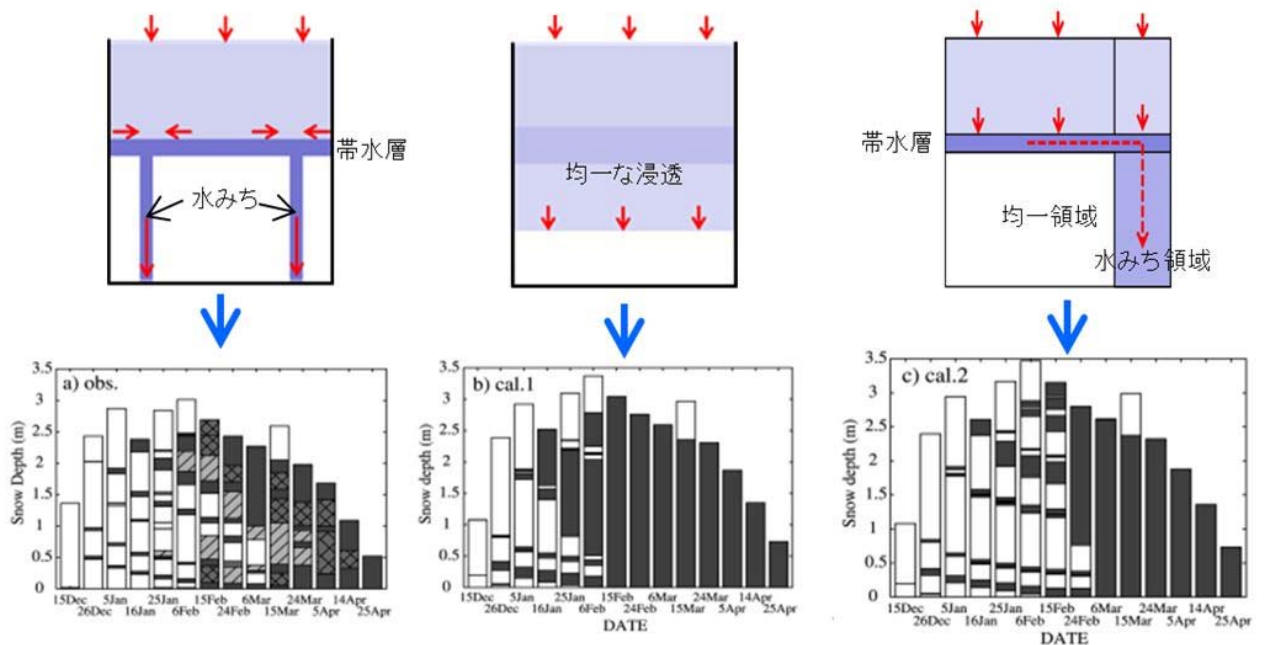
そのため本研究では、冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価に適する積雪モデルとして積雪への水の浸透や帯水層の形成を再現することが可能な積雪モデルの開発を行っている。

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²⁴⁾²⁵⁾(図－9)。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.²⁶⁾²⁷⁾とスイスの SNOWPACK(Bartelt et al.²⁸⁾ Lehning et al.²⁹⁾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ない。Hirashima et al.³⁰⁾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－9B)。一方、Katsushima et al.³⁰⁾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-9 C)。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、帯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。



A : 実際の状況

B : 従来の積雪モデル

C : Katsushima et al のモデル

※グラフ中の白い部分は「しまり雪」黒い部分はざらめ雪を示す。

図-9 既往の積雪モデルにおける水の浸透の再現方法

5.2. 水みちへの流量の検討

5.1 を踏まえ、本研究では Katsushima et al.³¹⁾によるモデルを基として、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の開発を行うこととした。現在、このモデルにおいて水みちが形成される空隙含水率の閾値は、平地での積雪断面観測結果を基に設定されている。しかし、平地と斜面では水の浸透状況が異なることが予想されるため、雪崩の危険度評価においては斜面積雪の観測結果を基に検討する必要がある。このため本研究では、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の比較を行った。

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、斜面のデータは、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(100 cc 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

観測は、2012 年の 1 月 5 日、1 月 25 日、2 月 15 日、3 月 5 日、3 月 26 日、4 月 13 日に実施した。

雪質および積雪層構造の推移を図-11 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-12 に、観測時の積雪断面の例を写真-2、写真-3 にそれぞれ示す。図-10、図-11、から、斜面積雪のざらめ率が高いことがわかる(平均で 26% の差)。最もざらめ率に差異がみられた 3 月上旬のざらめ率は、斜面 : 99%、平地 54% であった。また、積雪断面の観察において斜面では平地と比べて、局所的に水が浸透する鉛直方向の水みちの形成が少なく、平地よりも積雪層全体に均一に水が浸透している傾向が見られ(写真-2、写真-3)、水の浸透の差異が積雪の差異をもたらしていると考えられた。

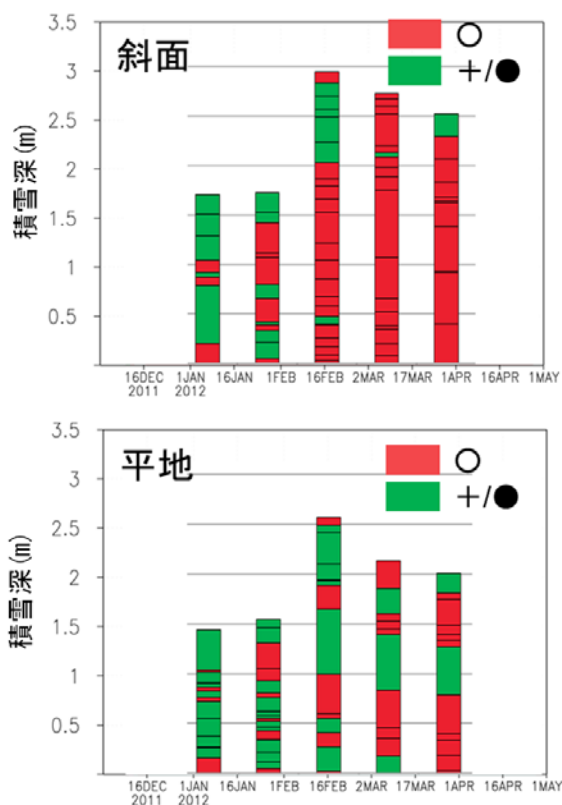


図-10 雪質および積雪層構造の推移

〇：ざらめ雪、+：新雪、/：こしまり雪、●：しまり雪

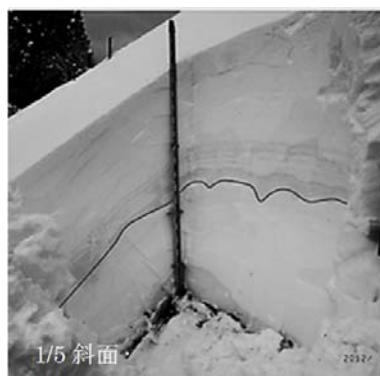


写真-2 積雪断面の例(1/5)

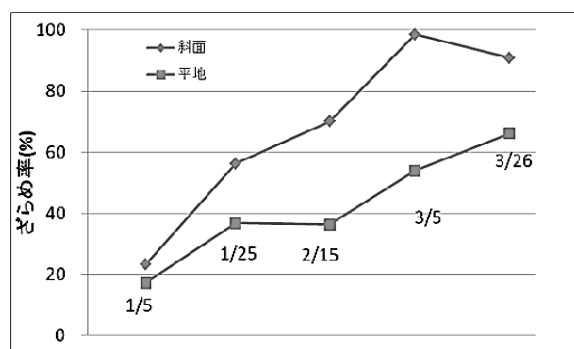


図-11 ざらめ率の推移

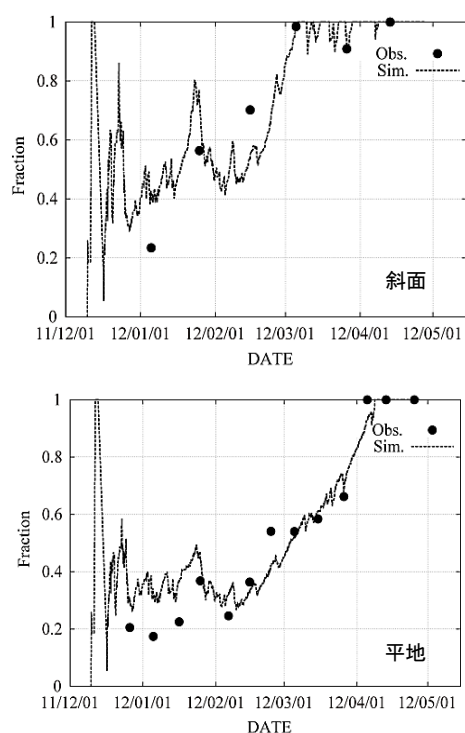


写真-3 積雪断面の例(3/26)

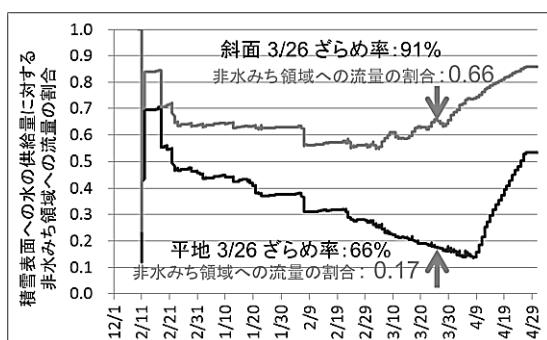
5.2.3. モデルによる非水みち領域への流下量の検討

Katsushima et al. ³¹⁾ においては、実測とモデルの計算結果におけるざらめ率が一致するように、水みちへの流下が発生する空隙含水率の閾値を設定する。今回の実測を基に検討した結果、閾値を斜面：0.0735、平地：0.0720とした際に最もざらめ率の再現性が良くなることがわかった。図-12は実測と、この閾値を用いて計算したざらめ率の推移である。この閾値を用いて計算した、積雪表面から供給された積算の浸透水に対する、非水みち領域に流下する水量の割合を図-13に示す。全体的に、非水みち領域への流下量の

割合は1月～3月において小さく、3月末から4月にかけて大きくなる傾向がみられた。根雪期間全体の積算値においては、平地では0.53であるのに対し、斜面では0.86が非水みち領域を流下している。また、3月26日の観測を行った時点での非水みち領域への流下量の割合は平地：0.17、斜面：0.66と約4倍という大きな差異がみられた。



図－12 ざらめ率の推移
(実測と計算結果)



図－13 非水みち領域への水の流下量の推移
(積算値)

5.3. まとめと今後の課題

本研究によって平地と斜面では積雪が大きく異なり、その原因は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 Katsushima et al.³¹⁾により提案された積雪モデルにおける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。

今後、平成 24 年度に実施した観測により得られたデータを解析することによって、閾値の妥当性について検討する予定である。

6. 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調査・研究を行った。結果は以下のとおりである。

6.1. 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ことがわかった。

6.2. 斜面における多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験

降雨の浸透における強度変化などについては、新雪では密度の増加による強度の増加が顕著であったのに対し、しまり雪では、含水率の増加による強度の減少が顕著であり、雪質によって差異があることが明らかになった。さらにこれらの結果は平地における実験と同様の傾向であった。

6.3. スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討

斜面の規模や斜面状況(スラブの亀裂や斜度変化)、雪質にもよるが、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。

このため、道路法面や住宅の裏山等、規模が小さい斜面における融雪期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。

6.4. 既往積雪モデルにおける課題の検討

現地調査によって平地と斜面では積雪が大きく異なり、その原因は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。また積雪モデルにおける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。

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・井上聡・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壌水分量，流出量，積雪水当量，及び河川水温の研究，天気，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，天気，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) Conway, H., and C. F. Raymond : “Snow stability during rain” , Journal of Glaciology, Vol.39, pp.635-642, 1993
- 8) Heywood, L. : “Rain on snow avalanche events, some observations” , Proceedings of the International Snow Science Workshop, Whistler, Canada, pp.125-136, 1988.10
- 9) Tremper, B., : “Wet snow” , Staying alive in avalanche terrain, The Mountaineers Books, pp.143-147, 2008.
- 10) 山野井克己・竹内由香里・村上茂樹：プ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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) (社)日本雪氷学会(編)：積雪観測ガイドブック，朝倉書店，2010
- 14) Roch, A. : 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, 1966
- 15) Perla, R. : Slab avalanche measurements. Can. Geotech. J., 14(2), 206-213, 1977
- 16) Schweizer, J., J. Jamieson, J.B. and Schneebeli, M., Snow avalanche formation, Rev. Geophys., 41(4), 1016-1041, 2003
- 17) Jamieson, J.B. : Avalanche prediction for persistent snow slabs. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Calgary, Canada., 1995
- 18) Lehning M., P.B. Bartelt, R.L. Brown, C. Fierz, P. Satyawali: A physical SNOWPACK model for the Swiss Avalanche Warning Services. Part II: Snow Microstructure, Cold Reg. Sci. Technol., 35, 147-167, 2002
- 19) Hirashima, H., Nishimura, K., Yamaguchi, S., Sato, A., and Lehning, M. : Avalanche forecasting in a heavy snowfall area using the snowpack model, Cold Regions Science Technology, 51, 191-203, 2008
- 20) Keeler and Weeks: Investigations into the mechanical properties of alpine snow-packs, Journal of Glaciology, Vol. 7, No50, 253-271, 1968
- 21) (社)日本建設機械化協会・(社)雪センター，2005：除雪・防雪ハンドブック(防雪編)，417 pp.
- 22) 前野紀一・黒田登志雄：雪氷の構造と物性(基礎雪氷学講座第 I 巻，古今書院，209pp, 1986
- 23) Podolskiy, E.A. : 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, 2010
- 24) 若浜五郎：積雪内に於ける融雪水の移動 I，低温科学，物理篇 21, 45-74, 1963
- 25) 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，低温科学，物理篇 26, 53-76, 1969
- 26) 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
- 27) 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
- 28) 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
- 29) 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
- 30) Hirashima H., Yamaguchi S., Sato A., Lehning 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
- 31) 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.

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

KASAMURA Shigeyuki

NORO Tomoyuki

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, laboratory experiments of artificial rain on a multi-layered snowpack, examination on the problems of the present numerical snow pack models 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.