

4.5 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（2）

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：	雪崩・地すべり研究センター
研究担当者：	野呂智之、伊東靖彦

【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「既往積雪モデルにおける課題の検討」、「多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験」、「斜面における積雪断面観測」を行った。

キーワード：湿雪雪崩、積雪モデル、降雨、斜面積雪、積雪観測

1. はじめに

近年、我が国において冬期の気温上昇が報告され¹⁾、これに伴って降水の形態（雪/雨）や積雪の性質（乾/湿）が変化し、雪崩災害の発生形態などに変化が生じることが懸念されている²⁾。

例えば、最近では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、雪崩の発生が報告されるなど²⁾、冬期の気温上昇や降雨の増加は、湿雪雪崩等による災害の多発をもたらす恐れがある。

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。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、湿雪雪崩発生条件の解明と、湿雪雪崩の危険度評価技術の検討に取り組んでいる。このうち23年度は、湿雪雪崩発生条件解明のため、

- (1) 全国の雪崩事例の収集・整理
- (2) 湿雪雪崩事例の気象解析
- (3) 多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験
- (4) 斜面における積雪断面観測

を、湿雪雪崩危険度評価技術の検討に向けて

- (5) 既往積雪モデルにおける課題の検討
- (6) レーダ降水量データ活用に関する検討

を行った。このうちここでは雪崩・地すべり研究センターが主担当となった(3)(4)(5)について報告する。なお、(1)(2)(6)については「冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価に関する研究（1）」を参照頂きたい。

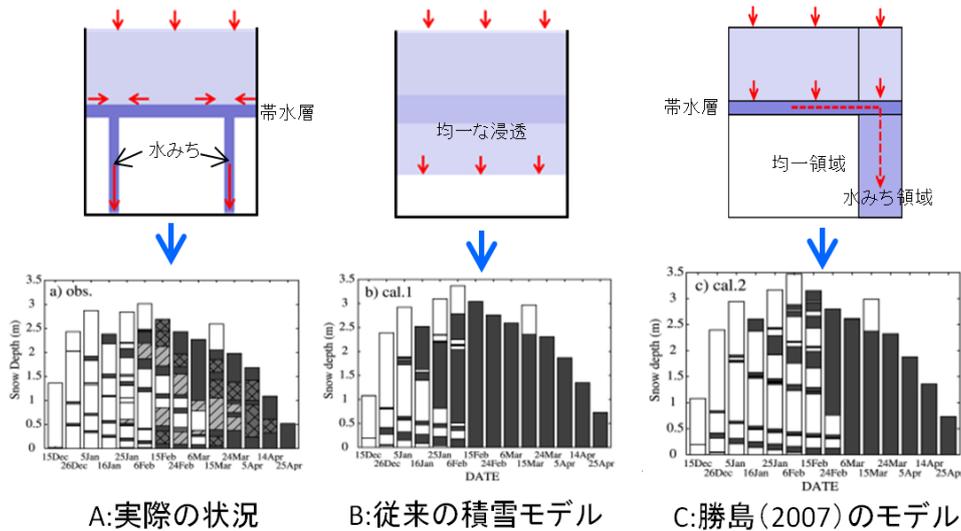
2. 既往積雪モデルにおける課題の検討

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。

本研究においては積雪モデル開発に向けた前段として、既往の積雪モデルの研究について調査を行い、積雪中の融雪水・雨水の浸透の再現方法、湿雪を再現する際の課題について整理した。

2.1. 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³⁾⁴⁾（図－1、写真－2参照）。一方、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.⁵⁾⁶⁾とスイスのSNOWPACK(Bartelt et al.⁷⁾ Lehning et al.⁸⁾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.⁹⁾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。このように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－1B）。一方、Katsushima et al.⁷⁾によるモデルは、仮想的に均一領域と水みち領域とに分け、水みちへの流量をパラメータとして調整することにより再現性を高めるよう工夫されている（図－1C）。しかし、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ことが明らかになった。



※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。

図一 既往の積雪モデルにおける水の浸透の再現方法

2.2. 今後の課題

Katsushima et al. をベースに検討を行うにあたって、以下のような課題が残されており、これらの手法の検討と観測等を24年度以降実施して行きたい。

- ・積雪断面観測データを基にした以下のパラメータ。
 - (1) 帯水層における含水率の閾値
 - (2) 水みちへの流出量
- ・積雪断面観測データによる積雪モデルの検証。
- ・モデルのアウトプットから危険度評価への応用手法の検討。

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^{11)~13)}。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実験を行った。人工降雨実験は23年度に引き続き2回目であるが、今回は多層構造を持つ積雪層を形成して行った。

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、今回は人工雪を用いて低温室で実験することとし、2012年1月に、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実験を行った。



写真一 雪氷防災実験棟

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一に示す通りである。本実験棟では樹脂状の降雪Aと球形の降雪Bの2種類が降雪可能となっている。各々人工雪の諸元を表一に示す。

表一 雪氷防災実験棟での設定可能な環境範囲

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)

3.1.2. 実験準備(積雪層の形成)

大きさが3m×5mの降雪テーブル(写真一参照)の上に、室温が底面から積雪に伝導し難いよう厚さ約9.5cmのスタイル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。その後室温を-5°Cに保ち、降雪Bを氷盤

上に4時間かけて約12cm堆雪させ、降雪終了後室温を-10°C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50cm降雪Aを堆積させた(表-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20cm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。この積雪層の構成図を図-2に示す。

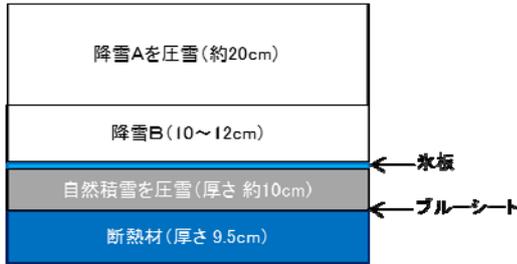


図-2 積雪層の構成(実験前)

表-2 人工積雪層の形成と降雪・降雨の日程

日	時間	作業等
1/16	9:30-12:30	自然雪の搬入整形
	13:00-17:00	降雪B降雪
1/17	13:00-14:00 (1/18)	降雪A降雪
1/19	10:15-16:15	降雨

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20時間経過後から、6時間降雨させた。降水量は2mm/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」¹⁴⁾に準じ、重量含水率の測定は熱量式(遠藤式)に因った。

3.2. 測定結果

実験中の雪温・密度・硬度・含水率の推移を約2計測毎に図-3に示した。図中の計測日時は表-3に示す。

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28cmであった。0-12cmが降雪Bによる層(B層)、12cm~28cmが降雪Aによる層(A層)で、2層構造である。

B層は密度:約300kg/m³、硬度:約100kN/m²でしまり雪に相当し、A層は密度:約100kg/m³、硬度:約100kN/m²で、新雪に相当する。雪温は、B層は-8°Cでほぼ一定、A層は底面から雪面にかけて-7°Cから-1°Cに変化した状況であった。

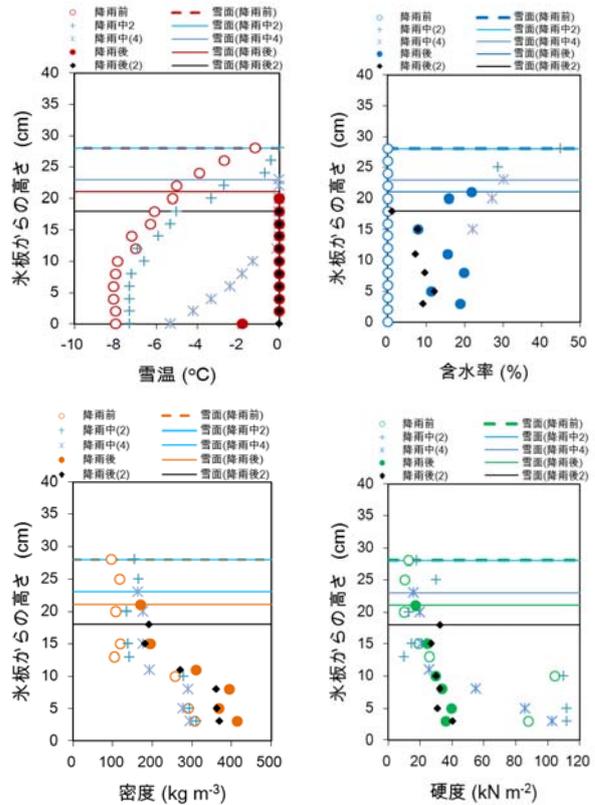


図-3 実験中の雪温、密度、硬度、重量含水率の変化

表-3 雪温等の計測日時(図-3)

凡例	測定日時	備考
降雨前	1/19 9:30~	
降雨中(2)	1/19 12:15~	降雨開始2時間後
降雨中(4)	1/19 14:15~	降雨開始4時間後
降雨後	1/19 16:15~	降雨終了直後(降雨開始6時間後)
降雨後(2)	1/20 9:15~	降雨終了18時間後

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12cmに達した。降雨終了時は底面を除いてほぼ全層に水が浸透した。また降雨終了18時間後には底面までの浸透が確認された。

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45%となったが、A層内では最大で30%前後であった。一方、B層においては最大で20%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100kg/m³から200kg/m³へ、B層で300kg/m³から400kg/m³へ変化している。

硬度はB層内で100kN/m²から30kN/m²に1/3程度に減少しているのに対し、A層では10kN/m²から30kN/m²へと逆に増加している。

3.3. 考察と今後の課題

降雨によって雪崩が発生する原因としては、駆動力の増加(含水による積雪重量の増加)と支持力の低下(水の浸透による積雪強度の低下)の2つが考えられている。今回の実験では、これらに対する水の作用が雪質によって異なることが確認された。すなわち、低密度の新雪層においては、重量の増加が顕著であるのに対し強度は増加し、高密度のしまり雪層においては、重量の増加は顕著ではないものの、強度低下が大きい。このことは、降雨による湿雪雪崩の発生危険度を評価するには、降雨量や降雨強度など気象データ以外に、その時々積雪の状態を考慮することが重要であることを示している。

特に雪質が多様で積雪層構造が複雑な厳冬期においては、気象データから雪質や積雪層構造を再現する積雪多層モデルの活用等、積雪状態の把握が重要な要素となるであろう。

今回の実験は2種類の雪質による2層の積雪に対する降雨実験であったが、今後より多様な雪質や複雑な層構造をもった積雪層に対しても実験を行う必要があると考えている。

また、水平面と斜面では水の挙動が異なることが予想される。このため危険度評価手法の構築には、斜面での計測も必須であり、今後の課題として考慮する必要がある。

4. 斜面における積雪断面観測

危険度評価においては積雪多層モデルを活用し安定度を計算する手法を用いるが、積雪中の水の移動を重視した積雪多層モデルに関する研究は、多くは行われていない。Katsushima, et. al¹⁰⁾では水みちに流れる水の量をパラメータとして設定する必要がある。これは、積雪断面観測データに基づいて検討することとなるが、これまでの積雪断面観測データのほとんどは、平地で観測されたものであるため、斜面積雪にそのまま適用可能であるか疑問がある。そこで平地の積雪と斜面の積雪における

水の浸透状況の差異を明らかにするために平地と斜面において同時に積雪断面観測を実施した。

4.1. 観測地と観測方法

観測地は、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°の試験斜面(北東向き斜面)において実施し、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。

4.2. 観測結果と今後の課題

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

写真-2は、1/5の観測時の積雪断面である。平地(写真上)の断面では、明瞭な水道が確認できるのに対し斜面(写真下)の断面では、明瞭な水みちがみられず、積雪下層における水の影響も少ないようにみられた。

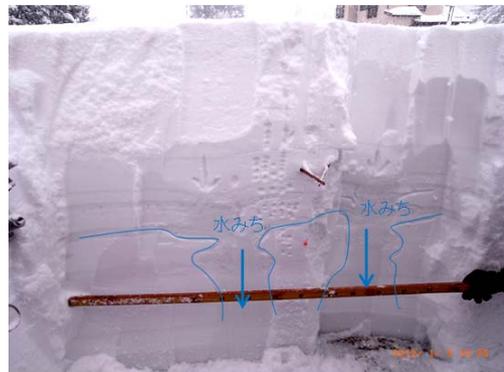


写真-2 1/5の積雪断面
(平地:上, 斜面:下)

しかし、2/15の観測においては、斜面の方がざらめ雪の占める割合が大きくより水の影響を受けているように

みられた。この際、水の影響を強く受けているのが局所的なものであるかどうか確認するために観測を行った積雪断面からさらに1mほど掘り進んでみると、ざらめ雪層の占める割合が少ない箇所があることが確認された。

このため、上記の2例のような平地と斜面の積雪における水の影響の差異は、局所的な差異によるものである可能性がある。今後は、観測を継続することに加え、大規模なトレンチを掘って比較する等、空間的なばらつきに対処する観測方法を検討する必要があると考えられる。

5. 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。

5.1. 既往積雪モデルにおける課題の検討

既往のモデルの中ではKatsushima, et. al (2009)によるモデルが水の浸透を再現する上で優れているが、帯水層における含水率の閾値や水みちへの流出量等について実測を基にした検討が必要であることが明らかになった。

5.2. 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。

5.3. 斜面における積雪断面観測

今冬期の観測において、斜面と平地の積雪における水の影響において明瞭な差異がみられた。しかし、これらは斜面と平地の差異ではなく、局所的な差異によるものである可能性もあるため、観測を継続することに加え、観測方法を検討したい。

6. 参考文献

- 1) 気象庁：「異常気象レポート 2005」、pp383、2005年
- 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、pp8-11、2010
- 3) 積雪内に於ける融雪水の移動 I 若浜五郎 低温科学 物理篇 21, 45-74、1963
- 4) 積雪内における融雪水の移動 II 若浜五郎・中村勉・遠藤八十一、低温科学 物理篇 26, 53-76、1969
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) Hirashima H., Yamaguchia 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
- 10) 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.
- 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, 443-451、2002
- 12) 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
- 13) 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
- 14) (社)日本雪氷学会(編)：積雪観測ガイドブック, 朝倉書店, 2010

Research on risk evaluation of snow avalanche hazard induced by winter rain event (2)

Budget: Grants for operating expenses General account

Research Period: FY 2011-2014

Research Team: Erosion and Sediment Control
Research Group (Snow Avalanche
and Landslide Research Center)

Authors: NORO Tomoyuki and ITO Yasuhiko

Abstract: It is concerned that the occurrence of wet snow avalanche will increase with warming of the winter climate. However, risk evaluation of wet snow avalanches is difficult for avalanche safety operations, because there are a lot of lacks of the knowledge about conditions for occurrence of wet snow avalanches. For the purpose of to fill the lacks of those knowledge, we performed “a review of present numerical snow pack models”, “a laboratory experiment of artificial rain on the multi layered snow pack” and “snow pit observations on the slope”.

Keywords: wet snow avalanche, numerical snow pack model, rain on snow, snow pack on the slope, snow pit observation.