

短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に向けて

原田裕介・石田孝司

1. はじめに

2014（平成26）年2月の関東甲信大雪では、短い時間に急激に積雪深が増加する降雪によって雪崩が発生した。このような短時間の多量降雪で発生する雪崩は、従来から発生しにくいと言われてきた森林内でも雪崩を誘発する特徴を有しているが¹⁾、実態は不明である。上記の雪崩の危険度評価に向けて、雪崩発生の気象及び積雪条件や、雪崩発生場における植生や地形等の特徴を解明することは重要である。そのためには、過去の雪崩発生の統計解析の他、雪崩が発生する前後の現地観測結果の蓄積が、基礎データとして必要である。

本報では、短時間の多量降雪で発生した雪崩と、気象及び積雪観測結果の一例を紹介し、雪崩の発生要因と今後の研究の方向性について述べる。

2. 観測サイトの概要と調査方法

長野県松本市乗鞍高原の標高1458mに位置する平地（以下「観測サイト」という。）に気象測器を設置し、冬期間に気象データを収集している（図-1）。観測サイトでは、2018（平成30）年の1月22日から23日にかけて低気圧性の降雪が予想されたため、降雪期間とその前後に積雪断面観測を行うとともに、雪崩の発生状況を確認した。

積雪断面観測を行うにあたり、降雪開始前にマーカーとして雪面に赤色の糸を設置し、降雪中および終了後にもマーカーを設置して、設置時の積雪表面の位置を積雪層内に目印として残した。積雪断面観測では、積雪を掘削してマーカーとなる糸が表面に見えるように断面を露出させた。

積雪層の測定は、マーカー間の積雪層の密度、硬度、並びに降雪粒子の大きさを測定するとともに、デジタルカメラ（OLYMPUS TG-4）を用いて降雪粒子を撮影した。密度は角型サンプラー（体積100cm³）および円筒型サンプラー（断面積50cm²）、硬度は直径15mmの円形アタッチメン

トを付けたデジタル荷重測定器（ZP-500N）を用いて測定した。また、積雪層内に存在する弱層を検出するため、弱層の調査方法のひとつであるショベルコンプレッションテスト⁴⁾を行った。

雪崩の発生については、観測サイト近傍の林道奈川安曇線B線（通称：上高地乗鞍スーパー林道Bで乗鞍高原～白骨温泉の区間）を対象として、発生状況の聞き取り調査を行った。

3. 調査結果

3.1 気象の概況

調査対象期間の1月22日から23日の地上天気図は図-2のとおりで、観測サイトでは1月22日の12～18時にかけて日本付近に低気圧が接近し、低気圧が通過した後は1月23日にかけて冬型の気圧配置へ移行した。

観測サイトにおける同期間の気象状況は図-3のとおりで、低気圧の接近・通過に伴って1月22日の12時30分から21時30分までの9時間の連続降雪で積雪深が45cm増加した（以下この期間を石坂ら²⁾を参考に「低気圧性降雪期間」という）。低気圧性降雪期間の平均気温は-5.5℃、風は静穏であったが、特に低気圧が接近した14～17時は降雪が強まり、時間降雪深は8.4～9.5cm/hであった。



図-1 調査位置図（背景図は地理院地図を利用）

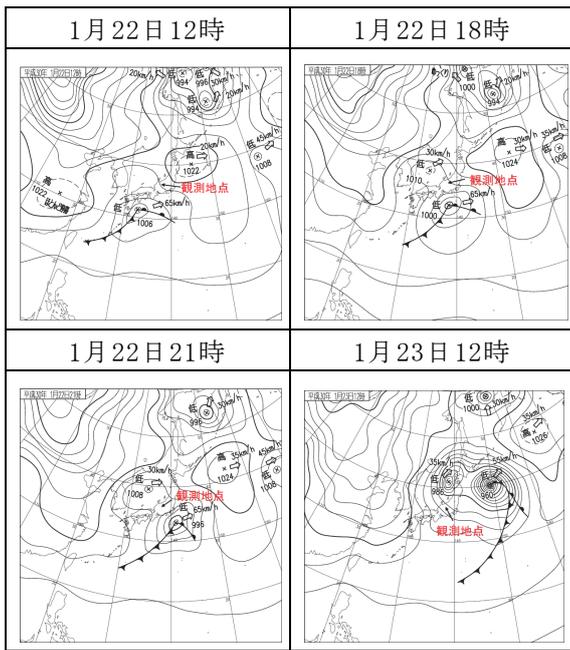


図-2 2018年1月22日12時から23日12時までの地上天気図（気象庁の図5に加筆）

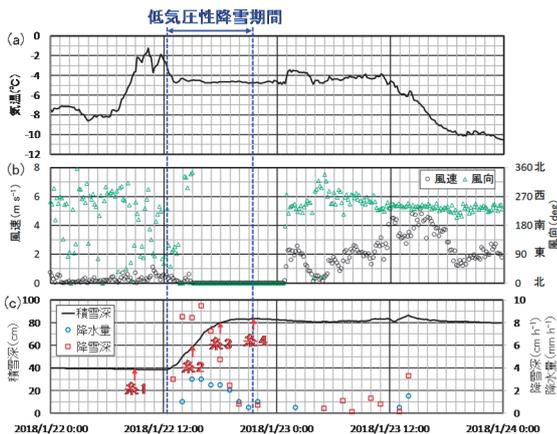


図-3 観測サイトにおける2018年1月22日から23日の(a)気温、(b)風向・風速、(c)積雪深および1時間あたりの降雪深と降水量の推移（降雪深と降水量以外は10分値、降水量は南東へ約6.7km離れたアメダス奈川の測定値で、(c)の赤矢印は積雪断面観測時にマーカーとなる糸を雪面に設置した時刻）

3.2 積雪断面と降雪粒子の状況

積雪層には低気圧降雪期間前の1月22日9時にマーカー1を設置し、降雪中の1月22日15時と18時にそれぞれマーカーの2と3、低気圧性降雪期間が終了した21時30分にマーカー4を設置した(図-3(c))。積雪断面観測はマーカーの2から4の設置時の3回と低気圧性降雪期間の後に降雪のあった1月23日12時の合計4回行い、積雪層の密度と硬度、降雪粒子の測定と降雪粒子の撮影を行った。マーカーの設置後に新たに形成された積雪層を順に層1から層4とすると、測定と撮影は順に4～1回となった。

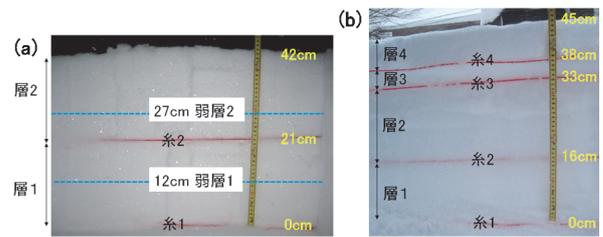


図-4 積雪断面の状況 ((a)は2018年1月22日18時、(b)は2018年1月23日12時)

積雪断面の一例として、低気圧性降雪期間中にマーカー3を設置した1月22日18時と、期間終了時にマーカー4を設置してその後に降雪のあった1月23日12時の状況を図-4に示す。層1と層2の厚さは1月22日から23日にかけて小さくなっているが、これは積雪の上載加重によって圧密を受けたことによる。弱層を検出するショベルコンプレッションテストは、マーカー3を設置した1時間後の1月22日19時に行い、縦と横が30cm、高さ44cmの大きさの雪柱を切り出して行った。テストの結果、マーカー1から上方へ12cm（層1の内部）と27cm（層2の内部）付近で積雪の破壊が起こったことから、順に弱層1、弱層2とした(図-4(a))。

層1から層4の降雪粒子について、それぞれ撮影した写真を図-5に示す。低気圧性降雪期間中に形成された層1から層3の降雪粒子は、いずれも雲粒(過冷却液滴)の付着が少ない樹枝状や角板の結晶が多く見られた。一方、冬型の気圧配置へ変化して再度1月23日に降雪があつて形成された層4では、雲粒の付着の多い降雪粒子が確認された。弱層の1と2の観察では、層1から層3と同様に雲粒付着の少ない樹枝状や広幅六花系の結晶が見られたことから、弱層を形成した新雪は雲粒付着の少ない低気圧性降雪期間中の降雪によることが示唆された。

3.3 積雪断面観測で得られた積雪層の密度と硬度の時間変化

層1から層4の単位面積当たりの上載積雪荷重(Pa)と密度(kg/m³)および硬度(Pa)の関係について、時間変化をそれぞれ図-6の(a)と(b)に示す。降雪によって積雪層に上載される積雪荷重が大きくなると、各積雪層の密度は増加し、低気圧性降雪期間における密度の時間変化は層1で50～60 kg/m³の範囲であった(図-6(a))。

層1の硬度は、層2が形成された1月22日18時まで変化はみられない。これは、層2の密度が小さいため、上載積雪荷重による圧密は進行しないと

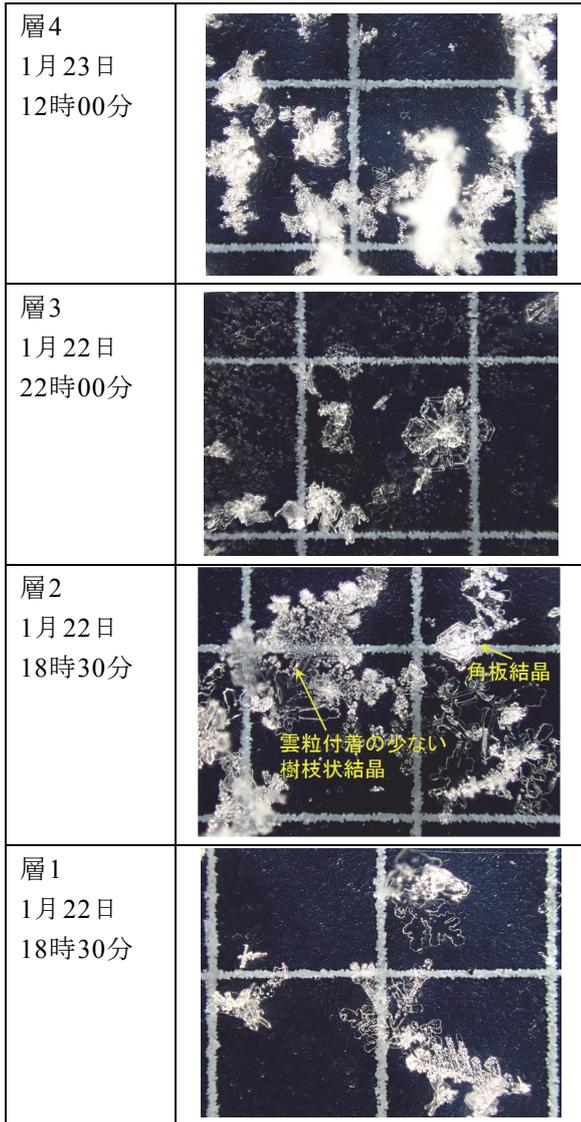


図-5 層1から層4の降雪粒子（目盛は3mm間隔で、日時は撮影時刻）

考えられる。これ以降は、層3と4による上載積雪荷重で硬度が0.5～2.5kPaの範囲で増加した（図-6(b)）。

3.4 気象観測による降雪深と積雪密度の関係

前述3.1項のとおり、低気圧性降雪期間は気温が氷点下で風は静穏であったことから、10分間の短時間では新雪層が圧密されないと仮定すると、

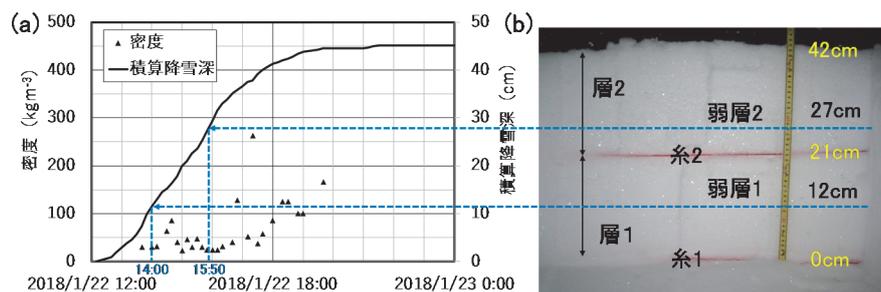


図-7 低気圧性降雪期間の(a)新雪層の密度（推算値）と積算降雪深の推移および(b)2018年1月22日18時の積雪断面

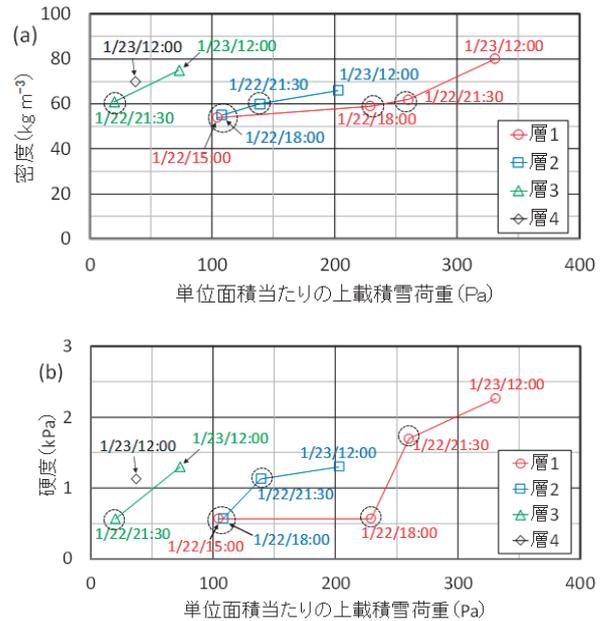


図-6 各積雪層における単位面積当たりの上載積雪荷重と(a)密度、(b)硬度の関係（破線の黒丸は低気圧性降雪期間のデータ）

10分間で降った新雪の層の密度は、降水量と降雪深から推算できる。観測サイトでは降水量は計測していないため、アメダス奈川（図-1）の10分間降水量を用いた場合、新雪の層の密度は式(1)より推算される。

$$\frac{\text{水の密度} \times \text{アメダス奈川の10分間当たりの降水量}(\text{mm}) \times 0.1}{\text{観測サイトの10分間当たりの降雪深}(\text{cm})}$$

-----式(1)

低気圧性降雪期間における10分当たりの新雪層の密度(kg/m³)の推算値と積算降雪深（積雪深差の正值の累計）の時間変化、および1月22日18時の積雪断面をそれぞれ図-7の(a)と(b)に示す。新雪層の密度の変化から、相対的に密度が小さい時刻は1月22日の14時00分と15時50分の前後で、それぞれの密度は25～30kg/m³と推算された。乾

いた新雪のせん断強度は密度のべき関数で示されることから⁴⁾、密度が小さいとせん断強度が小さくなり、積雪層内で弱層になる可能性がある。図-7(b)に示す1月22日18時の積雪断面では、弱層はマーカー1から上方へ12cmと27cmの位置にあり、マーカー2は当日の15時に設置している。以上から、相対的に新雪層の密度が小さかった1月22日の14時00分と15時50分の前後はせん断強度も小さく、弱層1と2がそれぞれ形成されたと考えられる。なお、1月22日の14～15時の新雪層の最大密度は100kg/m³程度、16～20時は主として50～100 kg/m³程度と推算されたことから、弱層1の上層と弱層2の上層はいずれの弱層よりも相対的に密度が大きい積雪であった可能性が考えられる。

3.5 観測サイト近傍で発生した雪崩と積雪断面の状況

観測サイト近傍の林道奈川安曇線B線では、7箇所で雪崩が樹林や雪崩予防柵をすり抜けてデブリ（雪崩堆積物）が道路に到達したことが判明した。このため、1月23日に路線沿いの標高1638mに位置する樹林地で積雪断面観測を実施した（図-1）。実施した斜面の傾斜は32度で、樹林の主な樹種はカラマツ（落葉針葉樹）であった。なお、観測を開始した1月23日10時の外気温は-5.4℃、積雪深は135cm、新雪の層厚は45cmで、観測サイトにおける同時刻の降雪深と同じであった。

積雪層内の弱層を検出するため、縦と横が30cm、高さ60cmの雪柱を切り出してショベルコンプレッションテストを実施したところ、新雪層の最下端から10cmと29cm付近で破壊した（図-8）。これらの弱層の位置は観測サイトの積雪断面観測で得られた弱層1（12cm）と弱層2（27cm）の高さに近いことから、同じ弱層に該当すると考えられる。

4. まとめと今後の課題

低気圧性降雪期間で短時間に多量の降雪があつて雪崩が発生した場合は、新雪層の密度と降雪結晶の種類に注意する必要があると考えられ、特に10分間の計算値や計測値から降雪期間中の新雪密度の詳細な変化を推定し、積雪層内に存在する密度の小さい部分が弱層になる可能性を示した。また、本事例での雪崩の発生要因は、低気圧性降

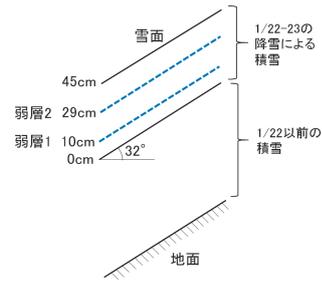


図-8 傾斜地における積雪断面の模式図

雪期間中に形成された新雪層のうち相対的に密度の小さい箇所が弱層となり、積雪深の増加に伴い弱層より上層の積雪が流下したものと推察された。

今後、短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に向けて、本結果や過去の事例を用いて雪崩発生条件を設定し、気象観測点のデータを用いてその出現頻度を解析する。また、雪崩の到達範囲や衝撃圧の算出手法の適用条件を提示する予定である。

謝 辞

林道安曇奈川線B線の雪崩発生状況は、松本市農林部より情報を頂いた。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松下拓樹、池田慎二、秋山一弥：樹林内における雪崩発生条件に関する一考察 - 2014年2月関東甲信の大雪時の事例一、雪氷、77、pp.433～445、2015
- 2) 石坂雅昭、藤野丈志、本吉弘岐、中井専入、中村一樹、椎名徹、村本健一郎：2014年2月の南岸低気圧時の新潟県下における降雪粒子の特徴 - 関東甲信地方の雪崩の多発に関連して一、雪氷、77、pp.285～302、2015
- 3) 社団法人日本雪氷学会：積雪観測ガイドブック、朝倉書店、pp.42～51、2010
- 4) 遠藤八十一：積雪の破壊、基礎雪氷学講座3、雪崩と吹雪、東京、古今書院、pp.42～51、2000
- 5) 気象庁「過去の天気図」、<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/wxchart/quickmonthly.html>

原田裕介



土木研究所土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター 主任研究員、博士(農学)
Dr. Yusuke HARADA

石田孝司



研究当時 土木研究所土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター上席研究員、現 国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所長
Koji ISHIDA