

## Ⅱ-10 積雪層内における特殊層の形成・変化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平15～平17

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：花岡 正明、金子 正則

### 【要旨】

表層雪崩の発生は「しもざらめ」、「あられ」、「ぬれざらめ」などの積雪層内で上下の層に対し相対的に弱い特殊な層（以下、弱層と記す）のせん断強度とその上層に積もった積雪のせん断力のバランスに関係しており、雪崩発生予測にはこれらを考慮した積雪層構造の把握が必要である。そこで、当センターが総合的な雪崩観測を実施している長野県白馬村八方尾根において、表層雪崩の発生の要因となる弱層の形成・変化について平成15年から2冬期にわたり2～3週間間隔で積雪断面観測及び弱層試験を行った。その結果、2冬期ともに「こしもざらめ」、「ざらめ」など合計5つの弱層が検出され、気温、降水状況などから弱層の形成要因を推定することができた。しかし、経時的变化の追跡を試みたが、これら弱層が次の観測で再度確認された事例はなく、弱層が保存されず目まぐるしく変化している状況が分かった。また平成16年2月末の観測で検出された弱層は、数日前に観測された表層雪崩の発生に関与した弱層と同時期に形成されたものと推察される。

キーワード：弱層、八方尾根、表層雪崩

### 1. はじめに

表層雪崩の発生は「しもざらめ」、「あられ」、「ぬれざらめ」などの弱層のせん断強度とその上の積雪のせん断力のバランスに関係しており、雪崩発生予測にはこれらを考慮した積雪層構造の把握が必要である。積雪深、降雪量、雪質、気象データ等の資料の蓄積は低標高の平地におけるものが主で、雪崩発生地域でのデータは非常少ない。また、気象要素と形成される弱層の種類との関係、弱層の経時的变化、弱層の存在と積雪層の安定性・雪崩発生の関係については不明な点が多い。

そこで、当センターで冬期間において雪崩常時観測を実施している長野県白馬村八方尾根において、表層雪崩の発生の要因となる弱層の検出及び形成された弱層の経時的变化を把握するとともに、弱層の強度試験を実施した。

### 2. 弱層に関する既往の知見<sup>1)</sup>

#### 2.1 弱層と表層雪崩の関係

表層雪崩の発生と積雪層内の弱層との関係について、以下のとおりまとめられている。

表層雪崩は積雪内に弱層があるとき、その層の上に積もった雪の荷重が駆動力となる。弱層の強度（抵抗力）が駆動力より十分に大きければ雪崩は発生しないが、強度が小さければ破壊が起こり雪崩となる。

積雪内部にある弱層の破壊が表層雪崩の直接的原因なので、積雪の層構造の形成過程を観察し、弱層形成条件を知れば雪崩の危険を予知することができる。

積雪は降り積もる降雪及び吹き飛ばされた積雪により、さまざまな性質の雪が層を成して積み重なっている。各層の性質は降雪の結晶形や降雪時の気象条件によって、最初の状態が決まる。例えば、雲粒の付いていない大きな結晶が無風状態で積もると密度の小さな層が、雲粒付きの結晶が強風下で積もると密で丈夫な層が形成される（第1期）。降雪が止んだから、表面の雪は日射、風、気温の影響を強く受け、急激な変化をすることがある（第2期）。さらに次の降雪で、上に雪が積もると、その荷重により下の雪は圧密され、密度は増加し表面にあったときの特性が薄らいでくる（第3期）。したがって、上層部の雪ほど降雪時の特徴や表面での顕著な変化が現れていて、層構造は複雑である。一方、下層の雪ほど積もってからの時間が長いので、その間、圧密、焼結、昇華蒸発、凝結により、層構造は単純になる。このような経過の中で、上下の層より弱い特異な層が弱層として残ることがある。表-1に積雪層構造の形成時期と形成要因及び構造要因の関係を示す。

表-1 積雪の層構造の形成時期と環境要因<sup>1)</sup>

時期	第一期 (降雪時)	第二期 (表面時)	第三期 (降雪による埋没後)
環境要因	結晶形 (雲粒の有無、形、サイズ)、気温、風速	長波放射、気温、湿度、短波放射、風速	上載積雪、雪温、温度勾配、水の供給
構造要因	初期構造 (充填度、密度、結合組織)	融解・凍結、再堆積、削剥、昇華蒸発・凝結	圧密、凝結、融解、凍結、昇華蒸発・凝結
特徴	多種多様な層構造 (厚さ数 mm~数 cm)	表面付近での急激な変化 (数時間以下)	遅い変化 (数日~)、層の数減少

2.2 弱層の種類

表-2にこれまで分かっている弱層の種類と形、及び形成条件を示す。

表-2 弱層の種類<sup>1)</sup>

種類	結晶の形	形成条件または特徴
降雪結晶	雲粒なしの広幅六花	無風時の降雪、水平に積もる
しもざらめ雪	骸晶、コップ状	表面に新雪、昼日射夜放射冷却、無風下で
表面霜	しだ状	放射冷却、弱風下で
あられ	大きな硬い球状 連結が弱い	時間が経ってもバラバラ 対流性の雲から
ぬれざらめ雪	大きな球状	表層が日射で融解、結合弱い

5種類の弱層のうち積もったときに、直ちに弱層になるのは雲粒の付いていない「降雪結晶」と「あられ」の2種類で、積もった後に強い寒気のもとで表層付近にできるのが「表面霜」と「しもざらめ雪」、暖気と強い日射で形成されるのが「ぬれざらめ雪」である。

また、これら弱層のうち2種類は第1期の降雪時に、他の3種類は第2期の表面時に形成される。このように弱層は積雪表面で形成されるので、この上に十分な雪が積もれば上載荷重となり、雪崩の発生条件が揃うことになる。図-1に弱層形成から雪崩発生までのフローチャートを示す。弱層の強度が小さいほど、上載積雪の量が多いほど雪崩の危険性は大きい。通常、弱層の上に大量の雪が積もると、弱層は上から圧密されて丈夫になる。したがって、弱層の上に大量の雪が積もった直後が表層雪崩の危険性が大きいことになる。

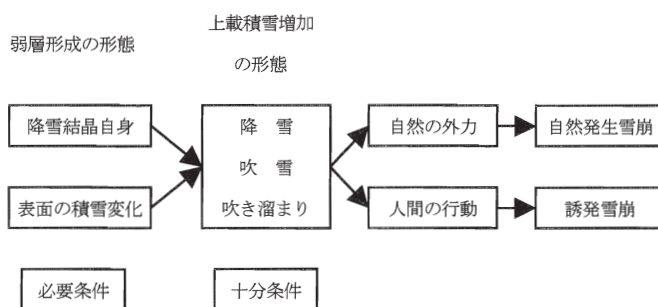


図-1 雪崩発生のフローチャート<sup>1)</sup>

これまで弱層の種類と形成条件に関する観測や実験が行われ、その結果気象条件から弱層の予測もある程度可能になった。すなわち、短時間に多量の雪が積もる前に、雪の表面に弱層ができたかどうかを気象条件から判断し、その後に積もった上載荷重の量を見積もれば、表層雪崩の予知ができる可能性がある。5種類の弱層の形成機構は以下のとおりである。このうち降雪結晶、しもざらめ雪、表面霜は発生頻度が高い。

(1)降雪結晶

風のない穏やかな天候のとき、ひらひらと大きな雪の結晶が舞い降りてくることがある。舞い降りた結晶はすべて斜面に平行に積み重なる。風のあるときに降る雪は、結晶の壊れた破片や大小さまざまな大きさの結晶が混じって積もるので、結晶の間の隙間が小さく比較的丈夫である。平らな結晶が平行に積み重なると、横方向に滑りやすいことは想像できるであろう。

(2)表層しもざらめ雪

しもざらめ雪には積雪の底の方で長時間かかって成長するものと、一昼夜程度の短時間で表層付近(表面直下)にできるものがある。後者、すなわち表層付近のしもざらめ雪は弱層となり表層雪崩の原因となる。雪の中に温度差があると暖かい雪粒子は蒸発し、蒸発した水蒸気は冷たい粒子の間で霜の結晶となる。一晩で霜の結晶が形成されることが確認され、人工的にも再現されている。表層しもざらめ雪の最も成長しやすい条件は、(a)硬い雪の上に数cmの新雪が積もる。(b)その後晴れて日がさすと、日射は新雪を透過し、下の硬い層で吸収され、その温度が上昇する(内部昇温)、(c)太陽が沈むと放射冷却で表面温度が急速に低下する(上下方向に大きな温度差が生ずる)、(d)高温部で蒸発、低温部で凝結が繰り返す、(e)やがて表層の新雪が霜の結晶に置き換わる(しもざらめ雪の形成)。このしもざらめ雪の上に大雪が積もると、表層雪崩の発生条件が揃ったことになる。

(3)表面霜

この表面霜も、放射冷却で表面温度が下がったときに積雪表面に形成される。しもざらめ雪の形成条件と異なるのは、空気中の水蒸気が積雪表面に凝結することである。表面霜のできる条件は、(a)放射冷却で表面温度が低下する、(b)空気中の湿度が高い、(c)弱い風が吹いている、の三つである。一晩で大きな結晶ができるのは、一つの斜面で一冬に数回以下

と頻度は少ない。この弱層ができてすぐ大雪は降る確率は高くないが、欧米では表面霜の弱層は古くから注目されてきた。

#### (4) あられ

雪の結晶が雲の中を落下中に雲粒を捕捉した、いわゆる雲粒付き結晶が降ることはめずらしくない。これらの結晶表面は平滑ではなく小さな凹凸が無数にあるので、降り積もった結晶同士は多数の点で接触している。このような雪が積もるとやがて圧密と焼結により強度が増し、弱層にはならない。さらに多くの雲粒が付着すると結晶の原型が見えなくなり、硬い球状のあられとなる。寒冷前線が通過したときの発達した積雲からは、大粒で大きさの揃ったあられのみが降ることがある。あられそれ自身は密度が大きく硬いため変形もほとんどしない。また、大きさが揃っているため、積み重なったあられの間には大きな空隙が残り、時間が経過しても圧密が進行せず長時間弱層として残る。そのため時間が経っても指で触れるとバラバラ崩れる結合力が弱い弱層である。

#### (5) ぬれざらめ雪

融雪水や降雨が浸透し、長時間ぬれ雪の状態が続くと、やがて粒の大きな、丈夫なざらめ雪に変化する。また、融解・再凍結が起こると短時間で丈夫なざらめ雪に変化する。しかし、積雪表面が高温や強い日射で急激に融解すると、表層のみが密度の小さい弱いざらめ雪に変わる。特に日射で融解するときは、雪粒同士の連結部が選択的に融解し、球状の結合の弱いざらめ雪に変わる。その後、気温が極端に低下せずに大量の降雪があると、このざらめ雪は、しばらく濡れたままの状態でも保存され、弱層として積雪中に残る。

### 3. 調査箇所及び方法

平成 15-16 年冬期、平成 16-17 年冬期の 2 冬期にわたって、長野県白馬村八方尾根において、積雪断面観測及び積雪層内の弱層検出・弱層強度試験を行った。その詳細は以下のとおりである。

#### 3.1 調査箇所

八方尾根において当センターでは雪崩動態撮影を中心とした観測を実施している。本研究で実施した積雪断面観測・弱層に係わる調査箇所は、観測対象である崩沢の源頭部の尾根上において実施している気象観測の地点近傍である(図-2)。当地点の標高は 1,670m、斜面勾配はおよそ 20°、斜面向きは南



図-2 調査箇所位置図

西向きである。

#### 3.2 積雪断面観測方法

積雪を人力により掘り出し、その断面が平滑になるように整形する。その表面に赤インクを吹き付け、バーナーで温め積雪層を鮮明にする。目視及び触感により層構造・層境界を判定し、層の厚さ、層境界の地表面からの深さ、各層の雪質等を記録する。

#### 3.3 弱層検出方法

積雪断面箇所で行った弱層の検出方法は以下のとおりである。

##### (1) 弱層テスト

①30cm 四方の雪柱を掘り出す。②力が均等にかかるようにスコップを雪柱の上面に置く。③力を段階的に加え、どの段階で、どの積雪層境界面にどのような変化が現れるかを調べる。

##### (2) 弱層の判定

本調査では、雪柱を掘り出す段階で層が滑る場合と、上から荷重を加えた段階(表-3の判定が○の場合)で変化があった層を弱層と判定する。

表-3 弱層テスト判定表

力の加え方の目安	弱層強度	判定
①手首から動かしてスコップの上を叩く	小	○
②ひじから動かしてスコップの上を叩く	↑	○
③肩から動かしてスコップの上を叩く		○
④雪柱の横面を握りこぶしで軽く叩く。	大	×
⑤雪柱の横面を握りこぶしで強く叩く		×

#### 3.4 弱層の強度試験方法

弱層テストで弱層と判定された層について、以下の試験を行う。

##### (1) せん断強度試験(シアフレームテスト)

安定度を表す指標  $SI$  は以下のとおり求める。

$$SI = \frac{SFI}{W \cdot \sin \theta} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $SFI$ :せん断強度指数 (kpa) ( $=F/A$ )、 $F$ :せん断強度 (N)、 $A$ :シアフレーム面積 ( $m^2$ )、 $W$ :積雪鉛直荷重 (pa) ( $=\Sigma(\Delta h \cdot \rho)$ )、 $\Delta h$ :層厚 (m)、 $\rho$ :層の密度 ( $kg/m^3$ )、 $\theta$ :斜面勾配 ( $^\circ$ )である。

(2)プッシュプルゲージによる計測

シアフレームが使用できない場合は、プッシュプルゲージにより弱層の硬度を計測し、以下の式により  $SFI$  を求める。文献2)、文献3)により式(2)、式(3)が求められており、式(2)及び式(3)より式(4)が導き出される。

$$H_p = 1.31 \times 10^{-5} \times \rho^4 \dots \dots \dots (2)$$

$$SFI = 0.621 \times 10^{-4} \times \rho^{3.08} \dots \dots \dots (3)$$

$$SFI = 1.78 H_p^{0.77} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $H_p$ :プッシュプルゲージで計測した硬度 (Pa)である。

4. 弱層検出結果

平成15-16年冬期、平成16-17年冬期に実施した積雪断面観測結果をそれぞれ図-3、図-4、ま

た弱層検出結果をそれぞれ表-4、表-5に示す。両冬期ともに計5つの弱層が検出された。しかし検出された弱層は全て新たに形成された別のものであり、同一弱層の保存は確認できなかった。弱層テストの実施状況を写真-1に示す。



写真-1 弱層テスト実施状況  
(雪柱上にのせたスコップを手で叩いている)

表-4 八方尾根における弱層検出結果 (平成15-16年冬期)

	実施日	天候	積雪深 (cm)	積雪断面の深さ (cm)	弱層の数	弱層番号	弱層の位置		弱層の厚さ (cm)	雪質
							地表面からの高さ (cm)	積雪表面からの深さ (cm)		
第1回	H16.1.16	晴れ	160	160	2	H1	88~90	70~72	2	こしもざらめ
						H2	127~130	30~33	3	こしもざらめ
第2回	H16.2.3	晴れ	188	188	0	-	-	-	-	-
第3回	H16.2.19	晴れ	252	180	2	H3	130~132	120~122	2	ざらめ・こしもざらめ
						H4	166~167	85~86	1	ざらめ・こしもざらめ
第4回	H16.3.4	晴れ	238	180	1	H5	199~210	28~39	11	こしもざらめ

表-5 八方尾根における弱層検出結果 (平成16-17年冬期)

	実施日	天候	積雪深 (cm)	積雪断面の深さ (cm)	弱層の数	弱層番号	弱層の位置		弱層の厚さ (cm)	雪質
							地表面からの高さ (cm)	積雪表面からの深さ (cm)		
第1回	H17.1.18	晴れ	222	150	1	H6	180~208	14~42	28	こしまり雪
第2回	H17.2.7	晴れ	204	180	2	H7	128~129	75~76	1	こしもざらめ
						H8	156~157	47~48	1	こしもざらめ
第3回	H17.2.28	曇り	195	180	2	H9	148~155	40~47	7	こしもざらめ
						H10	168~178	17~27	10	こしもざらめ
第4回	H17.3.22	雪	190	150	0	-	-	-	-	-

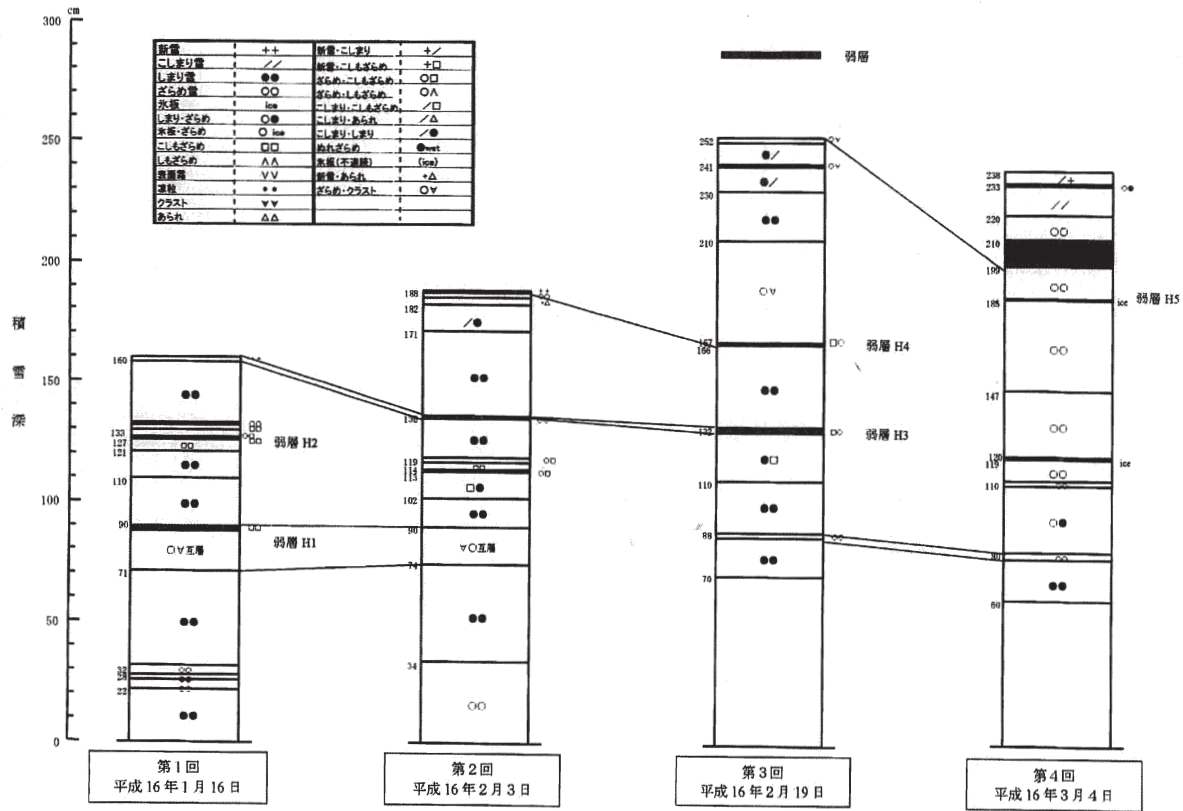


図-3 八方尾根における積雪断面観測結果 (平成15-16年冬期)

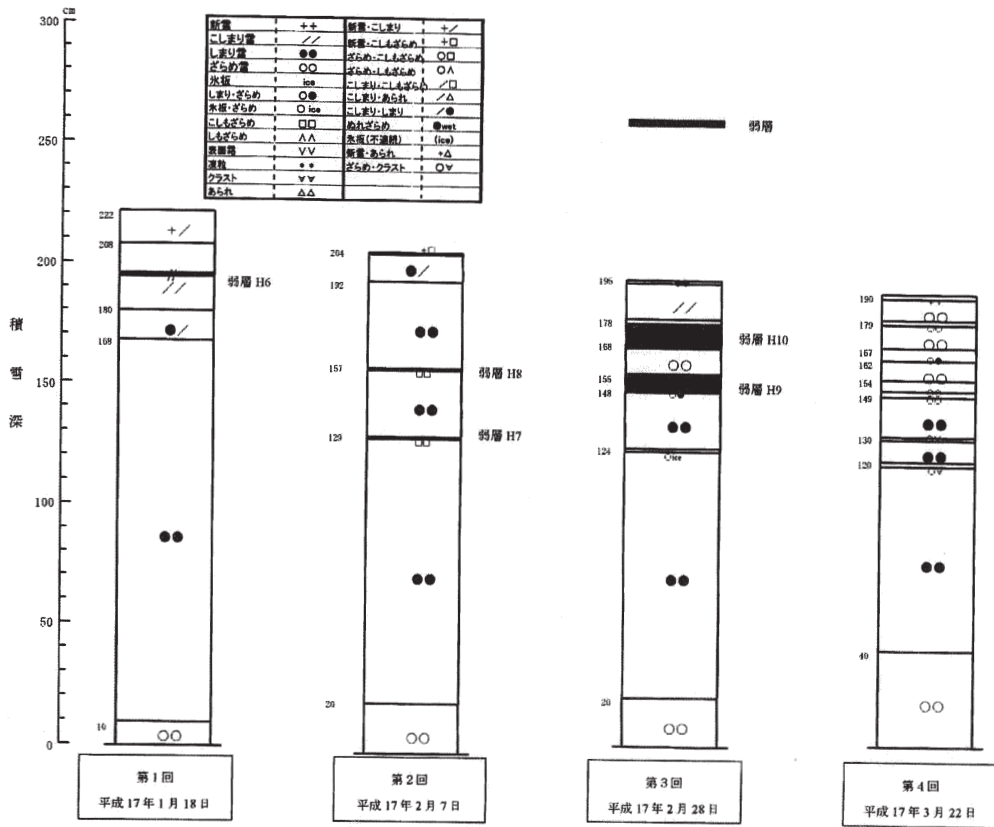


図-4 八方尾根における積雪断面観測結果 (平成16-17年冬期)

## 5. 弱層の形成状況の推定

平成 15-16 年冬期、平成 16-17 年冬期の積雪断面観測箇所近傍で観測した降水量、降雪パルス及び気温のデータを図-5、図-6に示す。図-5、図-6をもとにそれぞれの時期に形成された弱層の形成状況を以下に推定する。

### (1) 平成 15-16 年冬期

#### ①弱層 H1 及び H2 (1月16日観測)

弱層 H1 及び H2 はこしもざらめ雪の弱層である(写真-1)。こしもざらめ雪による弱層は、降雪結晶による弱層と比較して寿命が長い傾向にある。このため、こしもざらめ雪の弱層の形成時期を推定するためには、弱層形成前から連続的に積雪状況を把握し、形成時期をある程度絞り込んだ上で気象データについて検討する必要がある。しかし、弱層 H1 及び H2 は第1回目の断面観測時に観測されたものであり、それ以前の積雪状況が把握されていないため、形成時期を推定することは困難である。

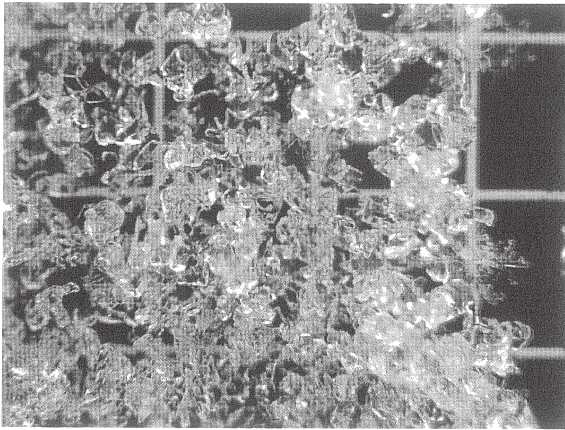


写真-2 弱層 H1 の雪粒 (こしもざらめ雪; 升目は3mm)

#### ②弱層 H3 及び H4 (2月19日観測)

2月3日の日中に気温がおよそ0℃まで上昇し、その後3日深夜から4日早朝にかけて気温がおよそ-12℃まで急激に下がっている。このときの積雪表面の昇温と急激な温度低下によって弱層 H3 は形成されたと推定される。弱層 H4 については、2月3日の観測の際に見落としか、あるいは3日と19日の断面観測位置の局所的な差異のため3日に観測を実施した位置では弱層が形成されていない可能性があり、形成時期の推定は明瞭でない。

#### ③弱層 H5 (3月4日観測)

まず弱層 H5 の下のざらめ層が2月19日から22日にかけての暖かい時期の日射により形成されたと考えられる。その後、22日の夜あたりから降雪が始まり、24日には気温がおよそ-12℃まで下がっている。弱層 H5 は、19日から22日にかけて温められた積雪層とその上の23日の冷たい降雪により形成された冷たい積雪層の温度差により形成されたと考えられる。

### (2) 平成 16-17 年冬期

#### ①弱層 H6 (1月18日観測)

弱層 H6 はこしまり雪の弱層(新雪結晶の弱層が積雪層中で圧密される過程の状態)である。観測した1月18日頃の気象状況は、1月11日から12日にかけて弱風下での降雪が見られる。このことから弱層 H6 は11日から12日にかけて形成された新雪結晶の弱層が徐々に圧密されていく過程にあるものと推定される。

#### ②弱層 H7 及び H8 (2月7日観測)

弱層 H7 及び H8 はこしもざらめの弱層である。これらは厚さ1cm程度の薄い層であり表層付近の急激な温度変化により形成されたものである。観測した2月7日頃の気象状況は、1月23日から24日にかけて、及び1月29日に気温の急激な変化が見られる。これより、弱層 H7 は1月23日から24日にかけて、弱層 H8

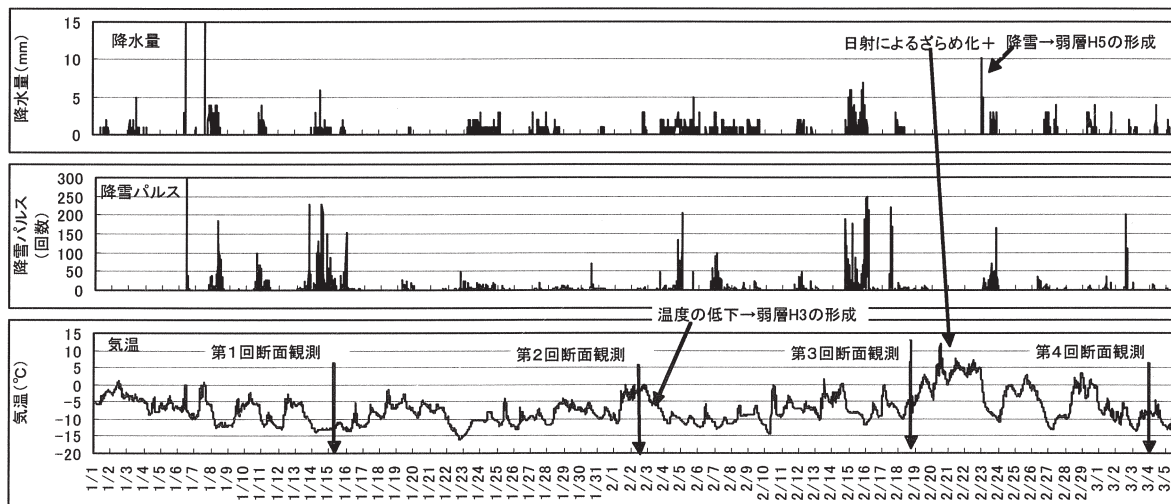


図-5 八方尾根における気象観測データ (平成 15-16 年冬期)

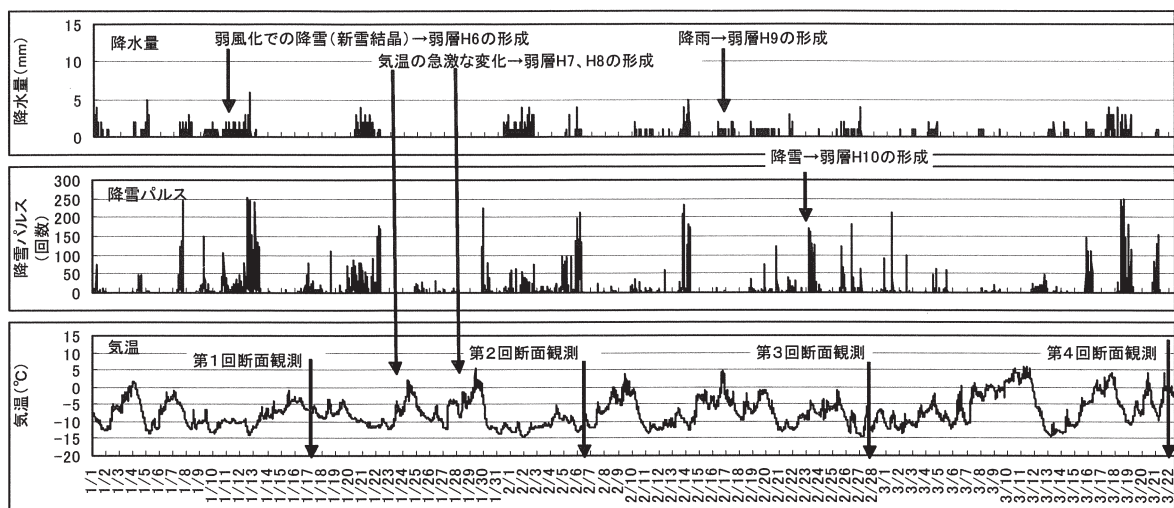


図-6 八方尾根における気象観測データ（平成16-17年冬期）

は1月29日に形成されたと推定される。

③弱層 H9 及び H10（2月28日観測）

弱層 H9 及び H10 はこしもぎらめの弱層である。観測時の気象状況を見ると、2月16日から20日にかけて降雨があったことが分かる。降雨により積雪表面付近の雪温はおよそ0℃まで上昇し、旧雪層との間に大きな温度勾配が生じることによって、弱層 H9 は形成されたと考えられる。その後、20日夜あたりから降雨は雪に変わり、暖かい濡れたぎらめ雪層の上に温度の低い新雪が積もった。これより、弱層 H10 は2月16日から20日の降雨により温められた積雪層とその上に冷たい雪が積もることにより生じた大きな温度勾配により形成されたと推定される。

6. 弱層の強度試験結果

3.4で述べた方法により検出された弱層の強度試験を行った。その結果を表-6に示す。

既往の知見によれば、シアフレームテストによって得られたSI値について以下のことが知られている。SI

値が2～4まで小さくなると雪崩が発生することがあるので警戒する必要がある<sup>4)</sup>。アメリカ、カナダではSI=1.5を雪崩発生予測基準としている<sup>5)</sup>。また、昭和61年1月26日に新潟県能生町（現糸魚川市）で発生した柵口表層雪崩の際、雪崩のすべり面と考えられたぬれぎらめ層の弱層についてシアフレームテストを実施した結果SI=1.0が得られ、表層雪崩が十分予測される危険な状態であったことが判明した<sup>6)</sup>。

表-6によると、シアフレームテストによって得られたSI値は全体的に、プッシュプルゲージによって得られたSIより小さい。また弱層 H2、H3、H4、H6、H8のSI値については4以下であり、表層雪崩発生条件を満たした弱層であると言える（ただし弱層 H4の値のみプッシュプルゲージの計測値の換算値である）。

弱層の強度試験を行った地点の南側に位置する崩沢を対象にして実施している雪崩常時観測の映像記録によると、平成16年2月22日及び2月27日に表層雪崩の発生を確認している（ただし27日の映像は夜間のため画像が不鮮明である）。一方、平成16年2月19日には弱層 H3、H4が検出されている。これより、弱層 H3、H4が形成されたのと同時期に、これら雪崩発生箇所においても、雪崩発生に関与した弱層が形成されていたことが推察されうる。

表-6 弱層強度試験結果

	弱層 No.	試験方法		得られたSI値	
		シアフレーム	プッシュプルゲージ	シアフレームによる	プッシュプルゲージによる
H15-16年冬期	H1	—	○	—	11.2
	H2	○	—	2.8	—
	H3	○	—	1.5	—
	H4	—	○	—	2.4
	H5	—	○	—	27.8
H16-17年冬期	H6	○	○	2.4	5.8
	H7	○	○	6.3	28.6
	H8	○	○	3.5	9.5
	H9	○	○	5.0	10.3
	H10	○	○	4.8	12.2

7. 今後の課題

本研究では、2冬期にわたり1月中旬から平成15-16年冬期は平均16日、平成16-17年冬期は3週間ごとに現地観測を実施し、弱層の有無と位置とその種別、層厚、強度を調査した。また気象観測データ（降水量、降雪パルス、気温、風向、風速、日射等）と雪崩発生記録との関連、及び弱層形成の時期及び要因を

分析し、さらに雪崩発生記録との対比により、雪崩発生条件を解析した。その結果、各冬期5回の弱層形成が確認されたが、それらは降雪後の気象条件により形成される「こしもざらめ」及び「ざらめ」であり、気温の急激な変化や降雨のあった時期に形成されたことが推定できた。またこれら弱層は2～3週間後の次の観測で再度確認された事例はなく、弱層が保存されず目まぐるしく変化している状況が分かった。全ての種類の弱層が形成されたわけではないので明確ではないが、現地は降雪量が多く、南側の斜面であることもその原因と考えられる。

観測調査中の規模の大きな雪崩の発生は1件のみで、発生直前の弱層観察がないため弱層の強度について十分な解析ができなかった。観測間隔をより短くする必要がある。

今後は、今回の成果を踏まえ、よりの確かつ効率的な調査方法を確立し、再度弱層の形成と雪崩の発生について解析することは有効と考えられる。また、白馬

地区の雪崩と全く異なる柵口地区のような湿雪においても同様の調査を試みたい。

#### 参考文献

- 1) 前野紀一・福田正己編：「基礎雪氷学講座第Ⅲ巻 雪崩と吹雪」、古今書院、pp.55-60、2000年2月
- 2) 竹内ら：Annals of Glaciology, 26, pp.27-30, 1998
- 3) 前野紀一・福田正己編：「基礎雪氷学講座第Ⅲ巻 雪崩と吹雪」、古今書院、pp.45、2000年2月
- 4) 日本雪氷学会北海道支部：「雪氷調査法」、北海道大学図書刊行会、pp.53、1991年7月
- 5) Sommerfeld, R.A : "Instruction for using the 250 cm<sup>2</sup> shear frame to evaluate the strength of a buried snow surface", US Dept. Agr. Forest Service Res. Note, RM-446, pp.6, 1984
- 6) 和泉薫ほか：「柵口表層雪崩の規模とデブリの雪氷学的特質」、新潟県能生町表層雪崩災害に関する総合的研究（研究代表者：小林俊一）、文部省科研費突発災害研究成果、No.B-60-8、pp.11-17、昭和61年