

# 湿雪雪崩の発生と積雪内部の水の浸透との関係

松下拓樹・池田慎二・石田孝司

## 1. はじめに

湿雪雪崩（図-1）は、主に降雨や融雪による水の浸透によって積雪強度が低下することと、降水による上載荷重の増加によって斜面積雪が不安定となり起こる（図-2）。これに加え、雪質や積雪の層構造が水の浸透過程やそれに伴う雪質の変態過程に影響し、湿雪雪崩の発生を左右する<sup>1),2)</sup>。このように複雑な過程を経て発生する湿雪雪崩の発生条件について、入手が容易な気象や積雪水文データを用いた統計解析を湿雪雪崩の予測に活用する試みが行われている<sup>3)</sup>。しかし、様々な要素が複雑に関連して発生する湿雪雪崩の発生条件を、気象や積雪水文データから明確に示すことは難しく、湿雪雪崩発生の評価の実用化にはまだ多くの課題が残されている。

本報文では、湿雪雪崩の発生条件を周辺の気象データから示すことを目的に、湿雪雪崩の発生と積雪内部の水の浸透状況との関係に着目して行った気象解析と現地実験の結果について報告する。

## 2. 湿雪雪崩事例の気象解析

湿雪雪崩発生時の気象条件を検討するため、雪崩発生箇所近傍の気象観測データを用いて解析を行った。解析では、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推定した。



図-1 湿雪雪崩の発生例

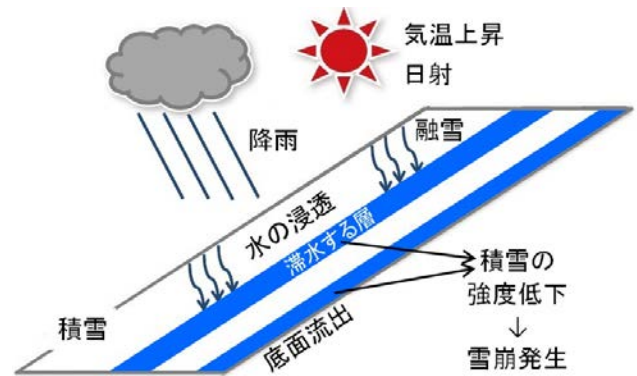


図-2 湿雪雪崩の発生過程の概念

### 2.1 湿雪雪崩事例と気象観測データ

収集した湿雪雪崩事例（2000年3月～2011年3月）のうち表層雪崩と全層雪崩の区別が記録されている湿雪雪崩事例を用いた。湿雪雪崩の発生箇所近傍の気象観測データは、気象庁AMeDASと北海道開発局道路テレメータの気温、積雪深、降水量、風速、日照時間の1時間間隔の観測データと気象庁解析雨量による降水量である。これらの気象観測データは、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 気温と降水量の補正方法、日射量の推定方法

気温は、雪崩発生箇所と気象観測所の標高差  $\Delta z$  (m) と気温減率  $\Gamma$  ( $= -6.5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ) を用いて、気象観測所の気温  $T_0$  ( $^\circ\text{C}$ ) を雪崩発生箇所の標高の気温  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) に補正した（式(1)）。

$$T = T_0 - \Gamma \times \Delta z \text{ -----式(1)}$$

降水量の観測値  $P_0$  (mm) は、式(2)と式(3)を用いて、風速  $U$  (m/s) に応じた降水量計の降水粒子の捕捉率  $CR$  を考慮した補正<sup>4)</sup>を行い、補正後の降水量  $P$  (mm) を用いた。

$$P = \frac{P_0}{CR} \text{ -----式(2)}$$

$$CR = \frac{1}{1 + m \cdot U} \text{ -----式(3)}$$

ここで、 $m$ は降水量計の種類や降雨と降雪ごとの定数 (s/m) である<sup>4)</sup>。

積雪表面付近の融雪に寄与する日射量は、雪崩

発生箇所に近い気象庁AMeDASの日照時間 (h) の観測値から、日射量の日積算値 (J/m<sup>2</sup>) を推定<sup>5)</sup>した。

### 2.3 降雨量と融雪量の推定方法

降雨量の推定は、近藤ら<sup>6)</sup>に従い、1時間ごとの気温  $T$  が 1.8℃ 以上の場合を降雨として、そのときの降水量を降雨量 (mm) とした。

積雪表面付近における融雪量  $M_s$  (mm) は、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 (mm) を求めて合計した<sup>7)</sup>。

$$M_s = NRS + NRL + H + E + R + Q_i \text{ -----式(4)}$$

ここで、 $NRS$ は短波長放射 (= 日射)、 $NRL$ は長波長放射、 $H$ は顕熱伝達、 $E$ 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) である。これらの具体的な算出方法は、水津<sup>7)</sup>を参照していただきたい。

以下の2.4では、湿雪雪崩の発生過程のうち、積雪への水の浸透によって発生する湿雪雪崩の特徴を調べるため、降雨量と融雪量の合計値を積雪への水の供給量とした。

### 2.4 解析結果

図-3に、11月から4月の全て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) の積雪への水の供給量と発生時の積雪深の関係を示す。図では、表層雪崩と全層雪崩のプロットを分けている。図-3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比較的少なく10mm以下の場合に発生している。

図-3の関係を、厳冬期の2月と融雪期の3月に分けて示したのが図-4である。厳冬期の2月 (図-4a) は、積雪への水の供給量が少なく、表層雪崩の発生がみられることが特徴である。特に、ここで用いた事例では、積雪が150cm以上と深いと表層雪崩となる傾向がある。積雪深150cm以下で積雪への水の供給量が多い場合は全層雪崩となる。一方、融雪期の3月 (図-4b) は、積雪への水の供給量が多くなり全層雪崩となる事例がほとんどである。特に、積雪深が150cm以上で積雪への水の供給量が少ない場合でも全層雪崩が発生していることが、厳冬期の2月 (図-4a) と異なる点である。

厳冬期で表層雪崩、融雪期で全層雪崩が発生する傾向について、次の3.章の積雪内の水の浸透に

関する現地実験結果と合わせて4.章で考察する。

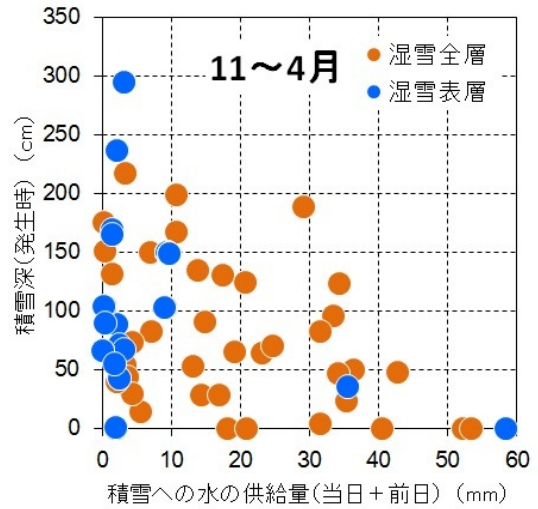


図-3 雪崩発生の前日からの融雪量と降雨量の合計値 (積雪への水の供給量) と発生時の積雪深との関係

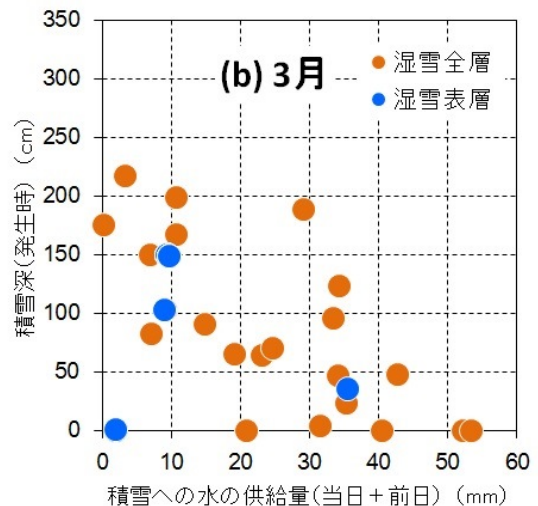
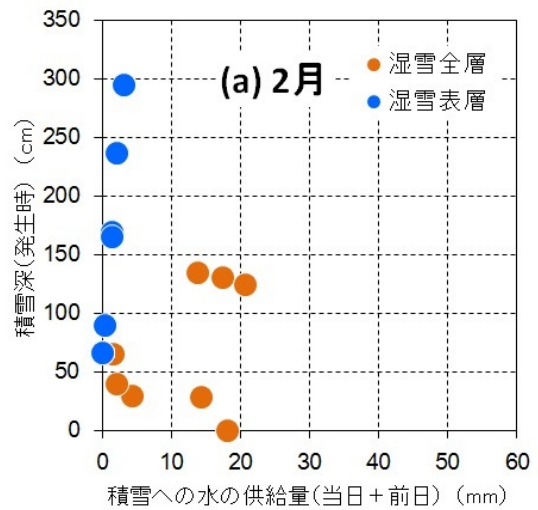


図-4 月別にみた積雪への水の供給量と積雪深との関係 (a) 2月、(b) 3月

### 3. 積雪内の水の浸透に関する現地実験

湿雪雪崩発生に関わる積雪内の水の浸透状況について、積雪に水を散布する現地実験を行なった。

#### 3.1 実験方法

実験は、札幌市南区定山溪（定山溪ダム流木処理場）の平地と隣接する斜面（勾配は約30°）で、2014年2月24日と4月9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。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4リットルの水を1時間散布（散水量30mm/h）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、雪質と粒径等の積雪層構造と滞水する層などの積雪内の水の浸透状況（表-1）を観察した。

#### 3.2 実験結果①（しまり雪主体の積雪の場合）

実験日（2014年2月24日）の天候は晴れ、実験中の気温は-0.4～3.3℃である。散布した水の温度は9.8℃で実験②（3.3）より1.2℃低い。降雨の融雪への寄与（式(4)の $R$ ）は小さく<sup>8)</sup>、この程度の水温の差であれば結果に影響しない。散水前の雪温は、全層0℃以下である。積雪構造（図-5a）は、平地の120cm以下の層でざらめ雪がみられるが、それより上層は平地と斜面で大きな違いはなく、雪面から深さ約30cmまでの層が新雪とこしまり雪からなる。散水の結果、平地（図-6a）では、積雪表面が局所的に大きく沈降し、積雪内では所々滞水する層がみられるものの水みちを形成して地面に到達した。一方、斜面（図-6b）では、積雪表面の沈降が散水範囲全体で均一に起こり、水はこしまり雪としまり雪の境界より下には浸透せず、この境界に平行に斜面下方へ流れた。よって、厳冬期の雪温0℃以下の斜面積雪では、水は積雪層に沿って斜面下方に流れる傾向が強いため、水が地面に到達するには長い時間がかかるか浸透の途中で積雪内部で滞水して（捕捉されて）地面には到達できないと考えられる。

#### 3.3 実験結果②（ざらめ雪主体の積雪の場合）

実験日（2014年4月9日）の天候は晴れ、実験中の気温は10.4～11.7℃、散布した水の温度は

11℃である。散水前の雪温は、平地と斜面ともに全層でほぼ0℃に近く、融雪が進行して雪質はほぼ全層がざらめ雪である（図-5b）。水の浸透状

表-1 雪質分類と粒径の凡例

＜雪質分類の凡例＞		＜粒径の凡例＞	
	新雪	粒径 < 0.5mm	記号 a
	こしまり雪	0.5 - 1mm	b
	しまり雪	1 - 2mm	c
	ざらめ雪	2 - 4mm	d
	こしもざらめ雪	4mm <	e
	i 水板		
	滞水した層		

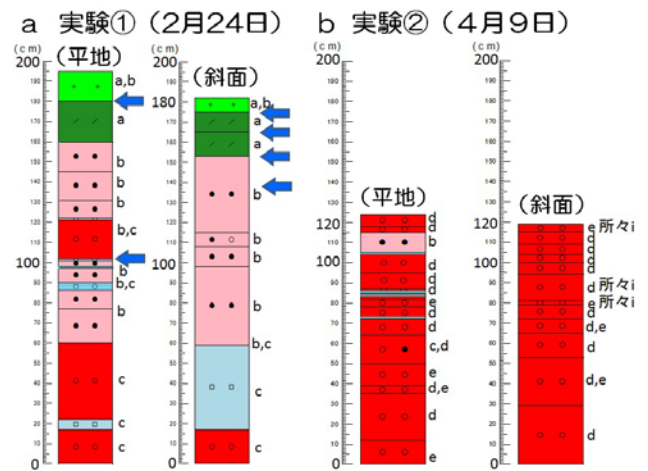


図-5 散水前の積雪層構造と散水後に滞水した層の位置 (a) 実験①(2月24日)、(b) 実験②(4月9日)

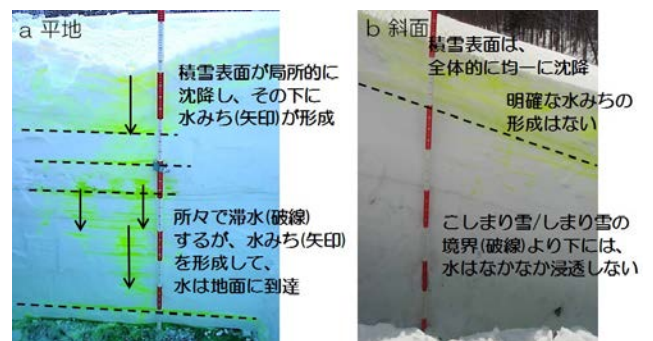


図-6 実験①(2014年2月24日)の散水停止後の水の浸透状況 (a) 平地積雪、(b) 斜面積雪

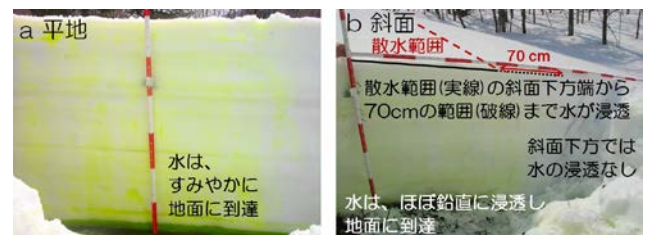


図-7 実験②(2014年4月9日)の散水停止後の水の浸透状況 (a) 平地積雪、(b) 斜面積雪

況(図-7)は、平地と斜面ともに散水範囲からほぼ鉛直に地面まで浸透した。特に、斜面において、層に沿って斜面下方に流れる水がほとんどなく、水がほぼ鉛直に均一に浸透して地面に到達したことが特徴である。斜面において水が浸透した範囲は、散水範囲の斜面下端より70cmまでの範囲であった(図-7)。以上より、融雪が十分に進行して全層ざらめ雪の積雪では、斜面でも水は容易に地面に到達すると考えられる。

#### 4. 考察

湿雪雪崩事例の気象解析(2.章)では、厳冬期の2月では積雪への水の供給量が少ないものの表層雪崩となる事例がみられ、融雪期の3月では積雪への水の供給量が多くなり全層雪崩となる事例がほとんどで、積雪が深くても少ない水の供給量で全層雪崩となる傾向がみられた。積雪内の水の浸透実験(3.章)によると、厳冬期のしまり雪主体の斜面積雪では、水は積雪層構造に沿って斜面下方に流れる傾向が強く、積雪底面には到達しなかった。しかし、融雪期のざらめ雪が主体の斜面積雪では、水は積雪底面へ浸透した。つまり、厳冬期の積雪に水が供給された場合、水は滞水した層に沿って流れる傾向が強いため、表層雪崩が発生しやすい状況になると考えられる。一方、融雪期で粒径の大きいざらめ雪が主体となる積雪では、供給された水は容易に積雪底面に浸透するので、全層雪崩の発生につながると考えられる。このような雪質等の層構造による水の浸透状況の違いが、厳冬期で表層雪崩が多く、融雪期で全層雪崩が多くみられる理由と考えられる。

ただし、本州の低標高地など1~2月でもざらめ雪が卓越する地域では、冬期を通して融雪期の特徴を有すると考えられる。なお、今回の実験結果より、斜面と平地では積雪内の水の浸透状況が

異なることから、湿雪雪崩の発生機構を考える場合は、斜面積雪における水の浸透状況を考慮する必要があるといえる。

#### 5. おわりに

この報文では、湿雪雪崩の発生と積雪内部の水の浸透状況との関係について、雪崩発生箇所近傍の気象観測データを用いた解析と積雪内の水の浸透に関する現地実験の結果を基に報告した。

湿雪雪崩の発生における数値的な評価へ向けた取り組みとして、斜面積雪を対象に水の浸透状況による層構造変化を考慮した積雪モデルを用いた検討<sup>9)</sup>を行っており、今後この結果を報告したい。

#### 参考文献

- 1) Tremper, B.: Wet snow, Staying alive in avalanche terrain, The Mountaineers Books, Seattle, WA, USA, pp.143-147, 2008
- 2) Conway, H., and Raymond, C.F.: Snow stability during rain, Journal of Glaciology, Vol. 39, pp.635-642, 1993
- 3) Peitzsch, E. H., et al.: Examining spring wet slab and glide avalanche occurrence along the Going-to-the-Sun Road corridor, Glacier National Park, Montana, USA, Cold Regions Science and Technology, Vol. 78, pp.73-81, 2012
- 4) 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巻、pp.303~316、2003
- 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巻、pp.41~48、1991
- 6) 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、天気、42巻、pp.821~831、1995
- 7) 水津重雄：広域に適用可能な融雪・積雪水量モデル、雪氷、64巻、pp.617~630、2002
- 8) 石川信敬：融雪と積雪層の熱収支、雪氷水文現象、古今書院、pp.17~48、1994
- 9) 池田慎二、勝島隆史、松下拓樹、秋山一弥：積雪モデルの斜面積雪への適用~湿雪雪崩の危険度評価を目的として~、土木技術資料、第56巻、第10号、pp.36~39、2014

松下拓樹



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(理学)  
Dr. Hiroki MATSUSHITA

池田慎二



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 専門研究員、博士(理学)  
Dr. Shinji IKEDA

石田孝司



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  
Koji ISHIDA