

戦-39-1 冬期の降雨に伴う雪崩災害の危険度評価に関する研究(2)

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 22～平 26

担当チーム：雪氷チーム

研究担当者：松澤 勝、中村 浩、松下 拓樹、
坂瀬 修

【要旨】

湿雪雪崩の発生条件の解明に向け、雪崩事例の気象解析と積雪表面の融雪及び降雨の浸透に関する予備的な積雪観測を実施した。気象解析の結果、降雨を伴う場合の湿雪雪崩の発生は、降雨を伴わない場合よりも雪崩発生前の気温が低く、気温 0℃以上の積算温度が小さい傾向にあることが示された。積雪観測の結果、こしまり雪やしまり雪に比べて、ざらめ雪は積雪表面における融雪量が多く、積雪下層への浸透が早いことが示された。この浸透速度の違いにより、ざらめ雪としまり雪の境界で帯水層が形成される様子が観察された。

キーワード：湿雪雪崩、積算温度、降雨量、表面融雪、降雨の浸透

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。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、湿雪雪崩や大量の水を含んだ雪が長距離流下するスラッシュ雪崩による災害の多発につながる可能性があるが、これらの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。

本研究では、まず湿雪雪崩発生の気象条件を調べるために、北海道の国道における雪崩発生事例の気象解析を行った。また、湿雪雪崩の発生機構を明らかにするため、積雪表面における融雪状況と積雪内の降雨の浸透状況を把握するための観測を実施した。

2. 研究方法

2.1 雪崩発生事例の気象解析

過去5年間(2001年4月～2006年3月)の北海道の国道における災害や事故等の履歴から、雪崩の発生による通行止め40事例を抽出した。気象解析には、雪崩発生地点近傍の北海道開発局道路テレメータおよび気象庁アメダスの気温、積雪深、降水量の1時間間隔の観測データを用いた。気温について、観測

箇所と雪崩発生箇所の標高差を考慮した標高補正は行っていない。また、降水量は、試みとして気象庁のレーダー解析雨量も収集し、アメダスの降水量との比較を行った。雪崩事例のうち湿雪雪崩事例の抽出は災害記録の記述に基づき、雪の乾湿に関する記述がない場合は、雪崩発生時の近傍気象観測の気温データが0℃以上である場合を湿雪雪崩と判断した。

2.2 積雪の表面融雪に関する積雪断面観測

気温や日射による積雪表面の融雪量を把握することを目的とした観測を実施した。観測には、図1に示す融雪水が排水されるように工夫した容器(以下、融雪パン)を用いる方法³⁾で行った。

使用した融雪パンは、高さ5cm、直径20cmの円筒型で、底は網目が1.2×1.2mmのメッシュ構造になっており融雪水が排水される構造になっている。この融雪パンに積雪を切り出して収め、質量 m_1 を測



図1 観測に用いた融雪パンと蒸発パン



図2 雪面に設置した融雪パンの状況

定した後に積雪表面に埋めた(図2)。約4時間後に融雪パンを取り出して質量 m_2 を測定し、質量の差を融雪水として排出された量とした。さらに、観測中の積雪表面からの蒸発による質量の損失を把握するため、融雪パンと同じ形状で底に蓋をした蒸発パンを用いて同様に質量 m_{e1} 、 m_{e2} を測定し、その差を蒸発量とした。以上の測定値から、融雪によって流出した量(融出量 M)を、式(1)より求めた。

$$M = (m_1 - m_2)/A - (m_{e1} - m_{e2})/A \quad (1)$$

ここで、 A は融雪パンと蒸発パンの断面積である。

また、融雪パン内に残った融雪水の量を把握するために、融雪パン内の雪の含水率と密度を測定した。含水率は、遠藤氏による熱量方式で測定した重量含水率(%)である。融雪パン内に残った融雪水は、密度に重量含水率をかけて求めた。観測は、2011年2月21日、寒地土木研究所構内で行った。

2.3 積雪内の降雨の浸透に関する積雪断面観測

降雨の積雪内部への浸透状況を把握するための試みとして、水で薄めたインクをマーカーとして用いる観測を実施した。観測では、降雨前に積雪の密度、雪温、含水率の鉛直分布を測定し、雪質の観察を行った。その後、積雪表面に水で薄めたインクを散布し、翌日、インク散布箇所を掘り出してインクの浸透状況を観察した。

降雨の積雪内部への浸透に関する観測は、札幌の市街地に位置する寒地土木研究所構内で行った。インク散布前の積雪断面観測を2011年2月24日15時から16時30分にかけて行い、翌25日9時にインクの浸透状況を観察した。この期間の降水量や気温は、札幌管区気象台の観測値を用いた。

3. 研究結果

3.1 湿雪雪崩発生時の気象状況

収集した雪崩40事例のうち、35%にあたる14事例が湿雪雪崩であり、そのうち9事例で降雨を伴っていた。以下では、この14事例について、雪崩発生時および発生前の気象状況を調べた。

図3は、雪崩発生時の積雪深と気温の関係および発生前24時間の最高気温との関係である。図中のプロットは、降雨の有無で区別した。図3aより、降雨を伴う場合は、降雨を伴わない場合よりも低い気温で雪崩が発生しており、 0°C 以下の事例もある。しかし、図3bの発生前24時間の最高気温では、降雨の有無による気温の違いはみられない。

湿雪雪崩発生における気温の影響をより詳しくみるため、 0°C 以上の気温を積算した積算温度を求めた。図4は、雪崩発生前24時間、48時間、1週間の積算温度と雪崩発生時の積雪深との関係である。降雨を

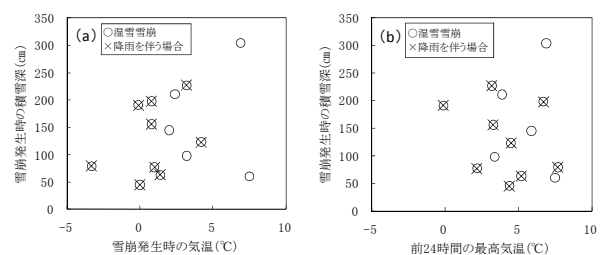


図3 湿雪雪崩発生時の気象条件

雪崩発生時の積雪深と (a) 気温、(b) 発生前24時間の最高気温の関係

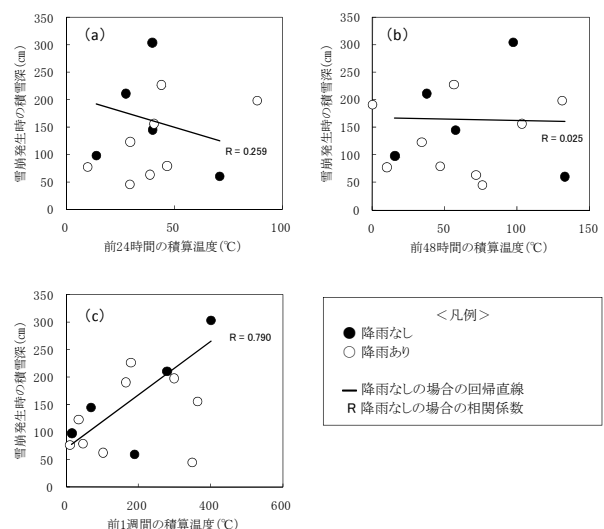


図4 湿雪雪崩発生時の気象条件

雪崩発生時の積雪深と (a) 発生前24時間の気温 0°C 以上の積算温度、(b) 発生前48時間の積算温度、(c) 発生前1週間の積算温度の関係

伴う場合はばらつきがあり明確な関係が見られないが、降雨を伴わない場合、積雪が深いほど大きな積算温度のときに雪崩が発生している(図4)。また、この傾向は、発生前1週間の積算温度(図4c)でより明確である。このことは、気温上昇による湿雪雪崩発生条件のうち融雪水の積雪下層への浸透に関連して、積雪が深いほど気温の高い状況が長く続くことが必要であると示唆される。ただし、この傾向から外れた事例もあり、積雪の層構造や雪質によって湿雪雪崩の発生機構が異なると考えられる。

次に、降雨と雪崩発生との関係を調べた。図5は、雪崩発生前24時間について、雪崩発生箇所近傍の地上観測による降雨量と気象庁レーダー解析雨量を比較したものである。図5より、降雨量はレーダー解析雨量の方がやや少ない傾向にあったため、以下では地上観測による降雨量を用いた。図6は、雪崩発生前24時間の降雨量と積算温度の関係である。降雨量が少ない場合は積算温度が大きく、降雨量が多い場合は積算温度が小さい傾向があり、気温上昇による融雪量と降雨量を合わせた水量が、湿雪雪崩発生に関係すると考えられる。ただし、降雨時に発生する雪崩は、降雨前の気象条件に起因する雪質と降雨のタイミングによって発生機構が異なることが指摘されており⁴⁾⁵⁾、今後、降雨による湿雪雪崩発生の気象条件に関する詳細な解析を行う予定である。

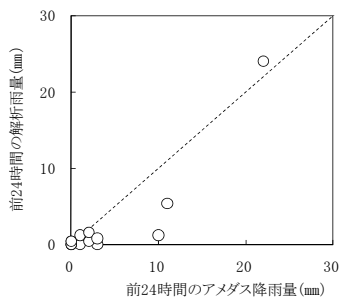


図5 雪崩発生前24時間のアメダス降雨量とレーダー解析雨量の関係

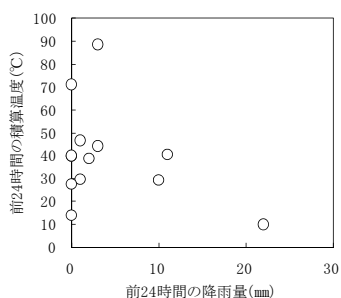


図6 湿雪雪崩発生の気象条件
雪崩発生前のアメダス降雨量と積算温度の関係

3.2 積雪の表面融雪に関する積雪断面観測

積雪の表面融雪に関する観測は、こしまり雪、しまり雪、ざらめ雪の3種類の雪質について行った。観測前の密度は、それぞれ 176kg/m^3 、 325kg/m^3 、 297kg/m^3 で、いずれも含水率 0%の乾き雪である。これらの雪を収めた融雪パンと蒸発パンを10時に雪面に設置し、14時からこしまり雪、ざらめ雪、しまり雪の順に取り出した。

図7は、融出量(融雪パンから流出した融雪量)、融雪量(融雪パンに残った融雪量)、非融雪量(融けなかった量)を密度との関係において比較したものである。図7aの質量の割合でみると、密度が大きいほど融雪量や融出量の割合が低くなるが、図7bの質量の絶対量でみるとほぼ同じ量が融雪した。また、融出量と融雪量を比較すると、こしまり雪では融出量より融雪量が多く、融雪水が融雪パン内に残る傾向にあるのに対し、ざらめ雪では融出量の方が多く、融雪水が比較的早く流出する傾向にあると考えられる。しまり雪は、融出量と融雪量が同程度で、こしまり雪とざらめ雪の間の特徴を持つと考えられる。

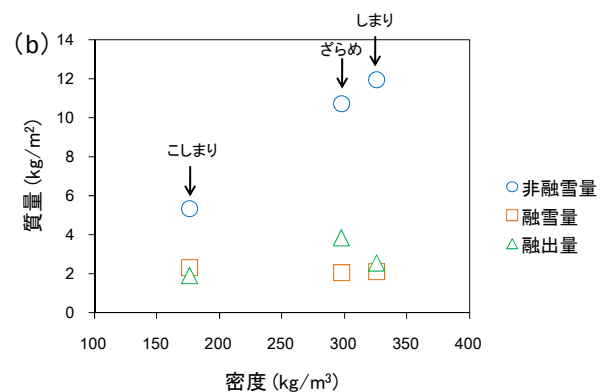
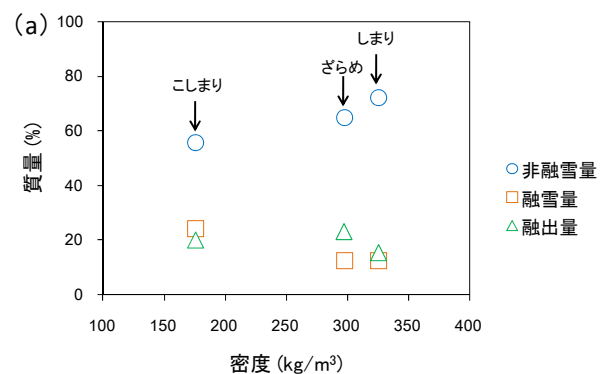


図7 融出量と融雪量、非融雪量の測定結果
縦軸(a) 質量の割合(%), (b) 質量の絶対量(kg/m^2)

3. 3 積雪内の降雨の浸透に関する積雪断面観測

図8は、雪面にインクを散布する前の雪質、雪温、密度、重量含水率の鉛直分布である。観測時の気温は5.7℃、天候は曇り時々晴れであった。積雪は、しまり雪とざらめ雪が交互に存在し、全体的に雪温が0℃に近く、ほぼ全層で水を含む濡れた状態であった。特に、雪面から5cmの積雪の重量含水率は12~17%と高い状態であり、気温による融雪が進行していたものと考えられる。また、最下層4cmの積雪の含水率も20%と高く、帯水している様子が観察された。雪面へのインク散布は16時30分に行った。

図9は、翌日9時のインクの浸透状況である。インクを散布してからの降水量は1.5mmであり、降水時の気温が2℃以上であることから、この降水は雨であったと考えられる。図9のインクの浸透状況を

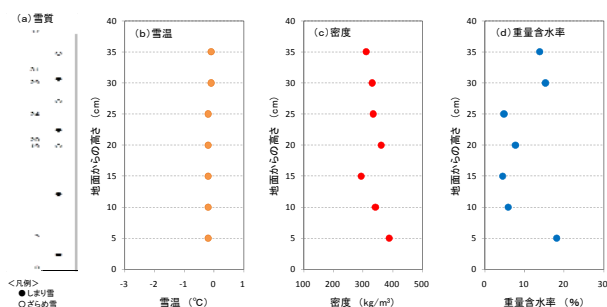


図8 インク散布前の積雪断面観測の結果

(a) 雪質、(b) 雪温、(c) 密度、(d) 重量含水率

2011年2月24日15時から16時30分測定

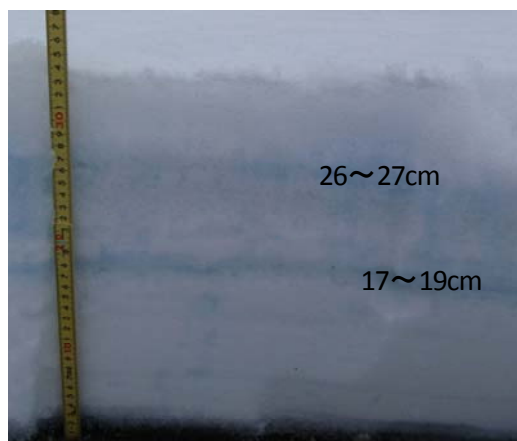


図9 インクの浸透状況

2011年2月25日9時撮影

みると、地面から17~19cm及び26~27cm付近にインクの濃い層がみられ、浸透した雨水が帯水している様子がわかる。積雪深が前日の37cmから34cmに減少したことを考慮して、前日の雪質や密度の鉛直分布(図8)とインクの状況(図9)を比較すると、この層は、しまり雪層の上にざらめ雪が形成されている箇所と考えられる。杉江・成瀬(2000)⁶⁾によると、水の浸透速度は雪質によって異なり、高い含水率の場合、しまり雪よりもざらめ雪の不飽和透水係数が大きく、水の浸透が早い。よって、今回観測した帯水層は、しまり雪の上にざらめ雪が存在する層構造の箇所で形成されたものと考えらる。

4. まとめ

今年度は、湿雪雪崩の発生条件の解明に向け、雪崩事例の気象解析と、積雪表面の融雪及び降雨の浸透に関する予備的な観測を実施した。今後は、さらに詳細な気象解析を行うとともに、観測や実験によって帯水層や積雪内の氷板形成過程について明らかにし、湿雪雪崩の具体的な発生条件の解明及び危険度評価技術の提案に向けた検討を行っていく。

なお、降雨の浸透に関しては人工雪を用いた室内実験も行っており、こちらは雪崩・地すべり研究センター作成の報告書「戦-39 冬期の降雨にともなう雪崩災害の危険度評価に関する研究(1)」をご参照いただきたい。

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年
- 3) 日本雪氷学会編集：「融雪量の観測」、積雪ハンドブック、pp.23-29、2010年
- 4) Conway, H., and C. F. Raymond : “Snow stability during rain”, Journal of Glaciology, Vol.39, pp.635-642, 1993
- 5) Heywood, L. : “Rain on snow avalanche events, some observations”, Proceedings of the International Snow Science Workshop, Whistler, Canada, pp.125-136, 1988.10
- 6) 杉江伸祐、成瀬廉二：「積雪の不飽和透水係数の測定」、雪氷、62巻2号、pp.117-127、2000年