

湿雪雪崩の発生条件に関する基礎的検討

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム

○松下 拓樹
吉井 昭博
櫻井 俊光

雪崩対策を行う上で、雪崩の発生を評価することが可能になれば、より効果的かつ効率的な対策を実施することができる。しかし、乾雪雪崩に比べて複雑な過程を経て発生する湿雪雪崩の発生条件の明確な提示は、大きな課題となっている。そこで、湿雪雪崩の発生評価の実現に向けて、斜面積雪の安定度に着目する方法と積雪の含水率に着目する方法の2つの方法により、湿雪雪崩の発生条件の基礎的な検討を行った。

キーワード：防災、耐災害性、雪崩対策、湿雪雪崩、発生条件

1. はじめに

積雪寒冷地の冬期道路交通の安全確保において、雪崩等の障害となる事象への対応と対策は重要である。北海道では、本州に比べて融雪に伴う湿雪雪崩の発生割合は低い。しかし、気候変動の影響により、これまで寒冷な北海道でも、冬期気温の上昇や融雪開始時期の早まりにより湿雪雪崩の発生が増える懸念がある¹⁾。

雪崩対策を行う上で、雪崩の発生を評価することができる。湿雪雪崩(写真-1)は、融雪水や降雨の浸透により積雪の強度が低下して、斜面積雪が不安定となり発生²⁾するが、その発生には積雪の層構造や雪質に起因する水の浸透過程の違い等による影響を受ける³⁾⁴⁾⁵⁾。そのため、乾雪雪崩に比べて複雑な過程を経て発生する湿雪雪崩の発生条件の明確な提示については、大きな課題となっている。



写真-1 湿雪雪崩の発生例 (北海道開発局 旭川開発建設部)

本論文では、湿雪雪崩の発生評価の実現に向けて、斜面積雪の安定度に着目する方法と、積雪の含水率に着目する方法の2つの方法により、湿雪雪崩の発生条件について基礎的な検討を行った結果を報告する。

2. 方法

(1) 雪崩の発生評価について

雪崩の発生には、積雪、気象、地形、植生、人為的な要素など様々な要因が関連するが、基本的には重力の作用により斜面積雪が下方に落下しようとする力(駆動力)が、雪を支える力(支持力)を上回るときに雪崩は発生する(図-1)³⁾。駆動力は、積雪の重量と斜面勾配に比例し、湿雪雪崩の発生には、降雨による重量の増加も寄与する。一方、主な支持力は、積雪を構成する雪粒同士の結合力や積雪の強度、積雪底面の摩擦抵抗力等で

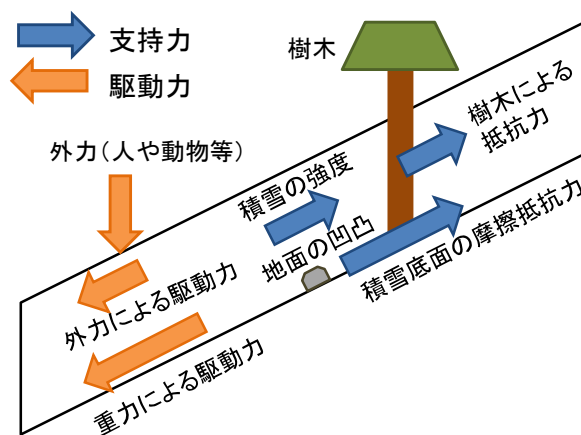


図-1 雪崩発生に関わる駆動力と支持力

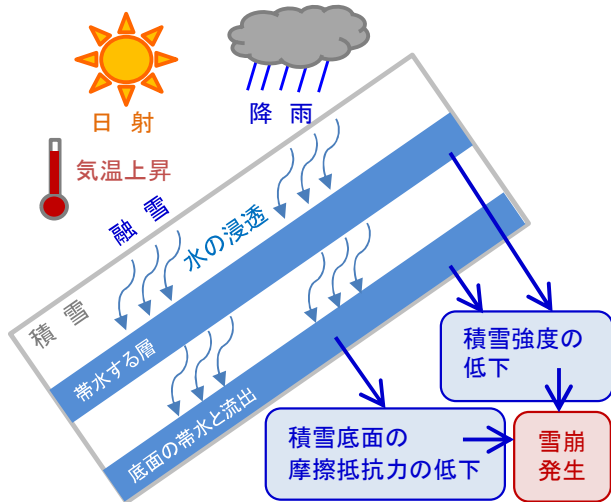


図-2 湿雪雪崩の発生機構の模式図

ある。湿雪雪崩は、融雪水や降雨の積雪への浸透により積雪強度や積雪底面の摩擦抵抗力（支持力）が低下して発生すると考えられる（図-2）。

雪崩の発生評価では、古くから斜面積雪の安定性に基づく議論が行われており、斜面積雪の安定度 SI^6 （詳細は2.(2)参照）が活用されている。この安定度 SI は、主に乾雪雪崩の発生評価に用いられることが多い⁷⁾が、湿雪雪崩の発生評価に活用した例^{8,9)}もある。また、乾雪雪崩より複雑な過程を経て発生する湿雪雪崩の発生評価に関しては、最近様々な取り組みが行われている。例えば、気象や積雪水文データを用いた機械学習等の統計モデルによる湿雪雪崩の発生評価手法^{10,11)}や、湿雪雪崩の活動を積雪全体の含水率の閾値によって評価する方法^{12,13)}（詳細は2.(3)参照）、積雪モデルによる積雪内部の水分移動の計算結果を活用する方法^{12,13)}がある。

ここでは、これらの既往研究を参考に、斜面積雪の安定度に着目する方法（2.(2)参照）と、積雪全体の含水率に着目する方法（2.(3)参照）の2つの方法により、湿雪雪崩の発生条件の検討を行った。

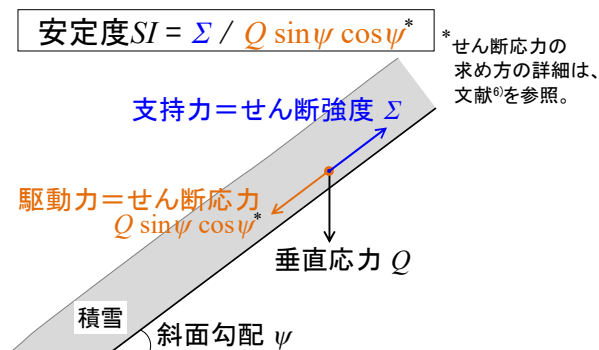


図-3 斜面積雪の安定度 SI

(2) 斜面積雪の安定度に着目する方法

斜面積雪の安定度 $SI^6,7)$ は、斜面積雪のせん断方向の応力 $Q \sin \psi \cos \psi$ （駆動力）と強度 Σ （支持力）の比で表され（図-3）、 SI が小さいほど斜面積雪が不安定であり、雪崩が発生しやすい状況であることを示す。北海道の国道で発生した雪崩の既往調査¹⁶⁾によると、 SI が2.5以下になると雪崩の発生がみられはじめ、 SI が2.0以下になると発生数が著しく増加する。よって、ここでは、斜面積雪の安定度 SI が2.5以下になると、雪崩発生の可能性が高まると考える。

斜面積雪の安定度 SI は、式(1)を用いて計算した。

$$SI = \frac{\Sigma}{g(\overline{\rho}_s H + \rho_w P) \sin \psi \cos \psi} \quad (1)$$

Σ はせん断強度（ N/m^2 ）、 g は重力加速度（ $= 9.8 \text{ m/s}^2$ ）、 $\overline{\rho}_s$ は積雪の全層平均密度（ kg/m^3 ）、 H は積雪深（ m ）、 ρ_w は水の密度（ $= 1 \text{ kg/m}^3$ ）、 P は降雨量（ m ）、 ψ は斜面勾配（ $^\circ$ ）である。図-3の垂直応力 Q は、式(1)では積雪と降雨の重量を合算した $g(\overline{\rho}_s H + \rho_w P)$ （ N/m^2 ）となる。降雨がない場合（融雪のみの場合）は、 $P=0$ である。斜面勾配 ψ は、せん断応力が最も大きくなる 45° とした。

積雪のせん断強度 Σ は、式(2)¹⁷⁾より、積雪の密度 $\overline{\rho}_s$ と体積含水率 $\bar{\theta}$ （ $\%$ ）から求めた。

$$\Sigma = 9.40 \times 10^{-4} \overline{\rho}_s^{2.91} \exp(-0.235\bar{\theta}) \quad (2)$$

このせん断強度 Σ は、新雪やしまり雪に対するものである。積雪の含水率 $\bar{\theta}$ は、融雪量 M （ m ）と降雨量 P （ m ）が、積雪全体に均一の分布すると仮定した全層平均値で、式(3)により計算した。

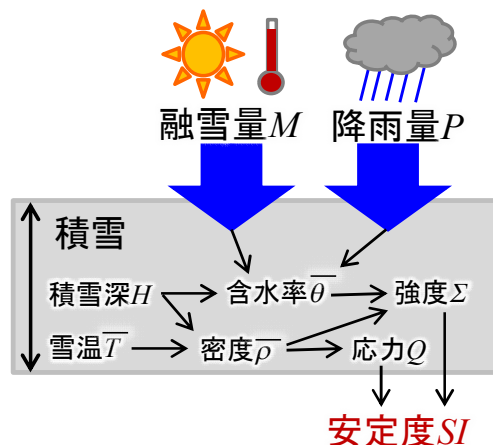


図-4 積雪の安定度 SI の計算における融雪量 M 、降雨量 P および積雪の各変数の関係

$$\bar{\theta} = (M + P)/H \times 10^2 \quad (3)$$

また、積雪の密度 $\bar{\rho}_s$ は、積雪深等の荷重環境や温度環境により変化する¹⁸⁾。ここでは、式(4)から、積雪密度の全層平均値 $\bar{\rho}_s$ を求めた。

$$\bar{\rho}_s = 105.0\sqrt{H} + 29.74\bar{T}_s + 240.5 \quad (4)$$

ここで、 \bar{T}_s は雪温の全層平均値(°C)である。

以上、式(1)~式(4)を用いて、深さ H 、雪温 \bar{T}_s の積雪に融雪量 M や降雨量 P を加えて、それらにより求まる積雪の含水率 $\bar{\theta}$ (式(3))と積雪密度 $\bar{\rho}_s$ (式(4))から、せん断強度 Σ (式(2))を求め、安定度 SI (式(1))を計算した(図-4)。安定度 SI の計算にあたり、雪温 \bar{T}_s は0~5°Cの範囲、積雪深 H は0.5~3.0 mの範囲とした。なお、積雪内の水分移動や積雪底面からの流出、それに伴う積雪深の変化は考慮しなかった。

(3) 積雪の含水率に着目する方法

湿雪雪崩の発生評価では、積雪全体の平均含水率に閾値を設けて発生評価の参考にしてしている例がある^{12) 13)}。例えば、積雪の体積含水率の全層平均値 $\bar{\theta}$ が3%以上になると、湿雪雪崩の発生数が増加するとの報告がある¹⁹⁾。また、積雪内部の水分は、体積含水率 $\bar{\theta}$ が3~8%以上になると顕著に移動する状態となる²⁰⁾。よって、ここでは、融雪や降雨によって積雪の体積含水率の全層平均値 $\bar{\theta}$ が3%以上になると、雪崩発生の可能性が高まると考える。

積雪の含水率 $\bar{\theta}$ の計算は、積雪内の水の貯留量の時間変化に基づいて行った。つまり、図-5に示すように、融雪量 M と降雨量 P を水の供給量 I (m/h)として積雪表面から与えて、積雪底面からの流出量 R (m/h)の時間変化を計算し、流出量 R と供給量 I の差から貯留量 S (m)を求め含水率 $\bar{\theta}$ を計算した。時刻 t における積雪底面からの流出量 R_t 、積雪内の貯留量 S_t 、含水率 $\bar{\theta}_t$ は、それぞれ式(5)²¹⁾、式(6)、式(7)を用いて計算した。

$$R_t = R_{t-1} \exp\left(-\frac{1}{k_0}\right) + I_t - I_t \exp\left(-\frac{1}{k_0}\right) \quad (5)$$

$$S_t = \sum_{i=1}^t I_i - \sum_{i=1}^t R_i \quad (6)$$

$$\bar{\theta}_t = S_t/H \times 10^2 \quad (7)$$

式(6)の ΣI と ΣR は、それぞれ時刻 t までの水の供給量 I と底面からの流出量 R の累積値(m)である。式(5)の k_0 は

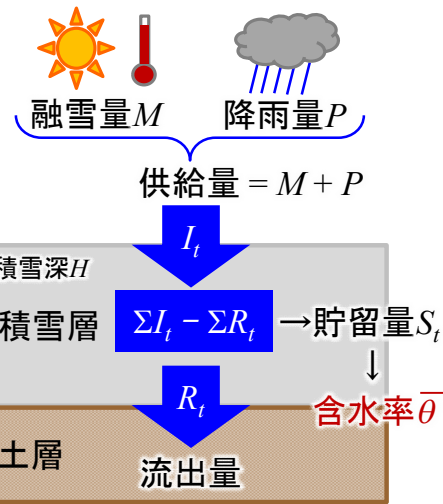


図-5 積雪の含水率 $\bar{\theta}$ の計算における水の供給 I 、貯留 S 、底面流出 R の関係

貯留係数で、ここでは札幌市定山溪の観測値から導出された積雪深 H (m)との関係式(式(8))²²⁾から求めた。

$$k_0 = 15.8H - 8.2449 \quad (H > 0.52 \text{ m}) \quad (8)$$

式(8)より、積雪深 H が0.52 m以下の場合には、積雪の貯留効果がなく供給された水は直ちに積雪底面から流出する。

以上、式(5)~式(8)を用いて、深さ H の積雪の表面に供給量 I (融雪量や降雨量)の水を与え、積雪底面からの流出量 R (式(5)、式(8))の時間変化を計算して、供給量 I と流出量 R の差から貯留量 S (式(6))を求め、積雪の体積含水率の全層平均値 $\bar{\theta}$ (式(7))を計算した(図-5)。含水率 $\bar{\theta}$ の計算にあたり、1時間あたりの水の供給量 I は3~20 mm/hの範囲、積雪深 H は0.6~3.0 mの範囲とした。また、積雪深 H は変化せず一定とした。

3. 結果と考察

(1) 斜面積雪の安定度に着目する方法

図-6は、融雪時において、斜面積雪の安定度 SI が2.5になるときの融雪量 M と積雪深 H 、雪温 \bar{T}_s の関係である。図中の各曲線の右側が、安定度 SI が2.5以下となり、雪崩発生の可能性が高いと考えられる範囲である。また、図-7は、降雨時において、斜面積雪の安定度 SI が2.5になるときの降雨量 P と積雪深 H 、雪温 \bar{T}_s の関係である。融雪時(図-6)と比較して、降雨による上載荷重が加わるため各曲線は図の左側にシフトし、降雨時は融雪時より少ない水の供給量で安定度 SI は2.5以下となる。

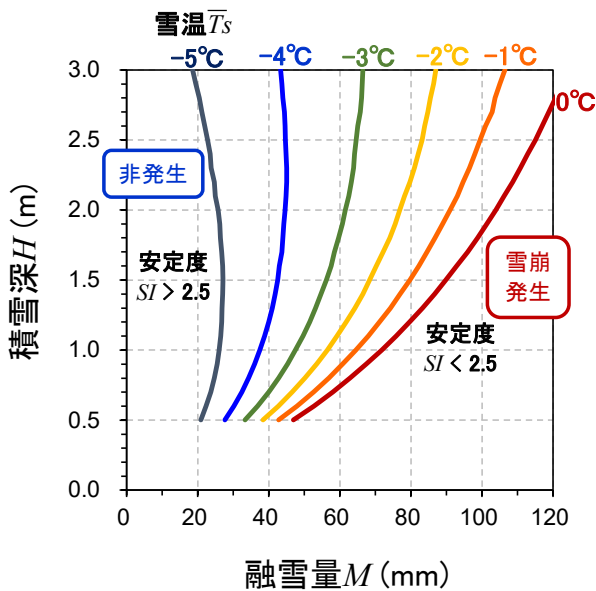


図6 斜面積雪の安定度 SI が2.5となるときの融雪量 M と積雪深 H 、雪温の全層平均値 \bar{T}_s の関係

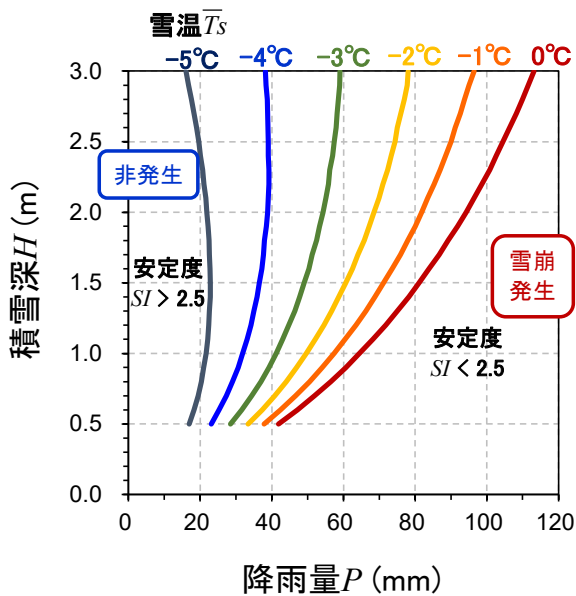


図7 斜面積雪の安定度 SI が2.5となるときの降雨量 P と積雪深 H 、雪温の全層平均値 \bar{T}_s の関係

図-6と図-7より、積雪深 H と融雪量 M 、降雨量 P 、雪温 \bar{T}_s の観測値を得ることができれば、湿雪雪崩発生の可能性が高まる状況を判断できると考えられる。ただし、積雪深 H と降雨量 P の観測値を得ることは比較的容易だが、融雪量 M の観測値を得ることは一般的には難しい。そのため、気象観測値から融雪量を推定する必要があり、気温や日射等から融雪量を換算できる図や表の提示を検討する予定である(3.4)参照)。また、雪温の全層平均値 \bar{T}_s の観測値を得ることも難しいが、乾雪の状態から

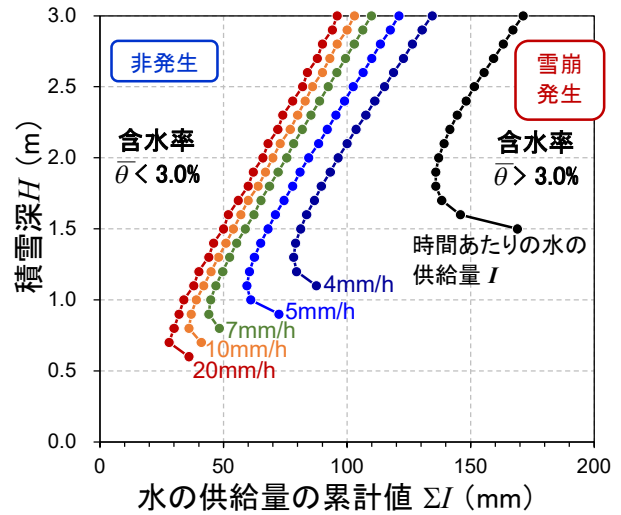


図-8 積雪の体積含水率の全層平均値 $\bar{\theta}$ が3%となるときの水の供給量の累積値 ΣI と積雪深 H 、時間あたりの水の供給量 I の関係

初めて融雪や降雨が生じる場合を想定し、例えば融雪期前の2月の平均気温を積雪表面の平均的な温度、積雪底面の温度を 0°C とすると、概略的には2月の平均気温 $\div 2$ を雪温 \bar{T}_s とする方法が考えられる。

なお、斜面積雪の安定度 SI を用いた湿雪雪崩の発生評価の難点は、図-6と図-7のように、融雪時と降雨時で2つの図に分かれることにある。実際の現象としては、降雨時でも融雪が生じている。雪崩発生評価における実用的な観点からは、これらの図を1つに集約することが望ましいが、これは今後の課題となる。

(2) 積雪の含水率に着目する方法

図-8は、積雪の体積含水率 $\bar{\theta}$ が3%になるときの融雪や降雨に伴う水の供給量の累積値 ΣI と積雪深 H 、時間あたりの供給量 I の関係である。図中の各曲線の右側が、含水率 $\bar{\theta}$ が3%以上となり湿雪雪崩発生の可能性が高いと考えられる範囲である。各曲線において、積雪深 H が0.6 m以上にも関わらず示されていないのは、計算の結果、含水率 $\bar{\theta}$ が3%以上にならなかったことを意味する。

図-8より、含水率に着目する方法では、1つの図で雪崩の発生評価を行うことができ、そのために必要な観測値は積雪深 H と水の供給量 I (融雪量 M や降雨量 P)であり、安定度に着目する方法よりも必要な観測値の数が少なく簡便である。ただし、融雪量 M は、安定度に着目する方法と同様、気象観測値から推定する必要がある(3.4)参照)。

また、図-8の時間あたりの水の供給量 I による関係曲線の違いに着目すると、供給量 I が7 mm/h以上になると、関係曲線の位置の差が小さくなる傾向にある。時間あたりの水の供給量 I が7 mm/h以上となるのは、主に降雨の

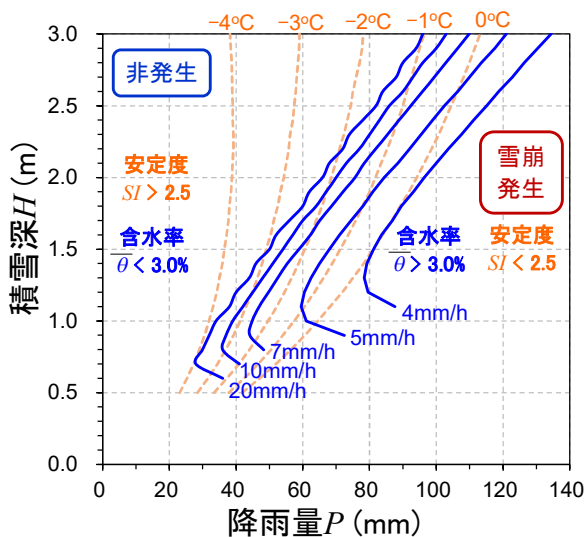


図-9 安定度 SI に着目する方法(橙色の破線)と含水率 $\bar{\theta}$ に着目する方法(青色の実線)による湿雪雪崩の発生条件の比較

場合である。よって、今回検討した方法では、7 mm/h以上の降雨による湿雪雪崩の発生評価を、ある幅を持った一つの関係曲線で表すことができる可能性が示唆される。

一方、時間あたりの水の供給量 I が5 mm/h以下の場合、図-8より、供給量 I によって関係曲線の位置が大きく変わる。例えば、同じ積雪深($H=1.5$ m)でも、含水率 $\bar{\theta}$ が3%になる供給量の累積値 ΣI は、5 mm/hで68 mm、4 mm/hで81 mm、3 mm/hで168 mmと大きく異なる結果となった。この結果は、特に融雪に伴う雪崩発生評価に影響するためさらなる検証が必要であり、今後、雪崩事例との比較検証と、底面流出量の計算式の検証および斜面積雪への適用性の検討を行う予定である。

(3) 2つの方法による発生条件の比較

図-9は、斜面積雪の安定度に着目する方法と積雪の含水率に着目する方法の計算結果を1つの図で比較した結果である。横軸の水の供給量は、降雨量 P とした。図-9の各曲線の右側が、湿雪雪崩発生の可能性が高いと考えられる範囲(安定度 $SI < 2.5$ または含水率 $\bar{\theta} > 3\%$)である。

図-9より、これらの2つの方法は、着目する湿雪雪崩の発生に関わる現象や計算における仮定が異なるものの、積雪深 H が2.0 m以下であれば、安定度 SI による方法の雪温 \bar{T}_s が0~3°Cの範囲と、含水率 $\bar{\theta}$ による方法の水の供給量 I が4~20 mm/hの範囲は、それぞれに幅があるもののほぼ一致している。つまり、図-9において2つの方法による発生条件が重なる範囲は、湿雪雪崩の発生において重要な意味を持つ可能性がある。なお、融雪により土砂災害や浸水害が発生するおそれがあるときの融雪注意報の発表基準は、北海道では降雨量と融雪量の24時間の

合計が50~70 mm以上予想される時²⁹⁾であり、図-9では2つの雪崩発生条件が重なる範囲になる。また、図-9は、一般国道236号天馬街道における湿雪雪崩に対する自主規制の条件(積雪深が1 m以上かつ連続降雨量が80 mm以上)²⁹⁾とも整合していると考えられる。

ただし、図-9の2つの雪崩発生条件、気象庁の融雪注意報の発表基準、天馬街道の湿雪雪崩に対する自主規制条件を比較した結果からは、湿雪雪崩の発生条件が、ある一つの線で一義的に決まるのではなく、積雪深や水の供給等の状況に応じた幅を持った関係で決まることが示唆される。また、図-9の湿雪雪崩の発生条件の活用には、積雪内の水分移動や底面流出の計算方法の斜面積雪への適用性の検討等の課題が残っており、実際の湿雪雪崩事例との比較検証も必要である。これらの課題については、今後取り組んでいく予定である。

(4) 融雪量の推定について

本論文の雪崩発生条件の活用には、一般的には観測が行われていない融雪量を気象観測値等から推定する必要がある(3.(1)と3.(2)参照)。図-10に、その試みとして、気温と日射から融雪量を計算する手法²⁹⁾による例を示す。日射は季節や時刻、緯度により変化するが、図-10の「日射あり」の計算結果は、北海道のほぼ中心の北緯43度30分において2月28日、3月10日および20日の快晴時の日射量を推定²⁹⁾して融雪量の日合計値を計算した結果である。図-10より、気温の観測値と日射の有無(例えば、晴れや曇り等の天候、斜面方位による日照条件)に応じて、融雪量を推定することができると考えられる。ただし、融雪量の推定方法もまだ基礎検討の段階である。

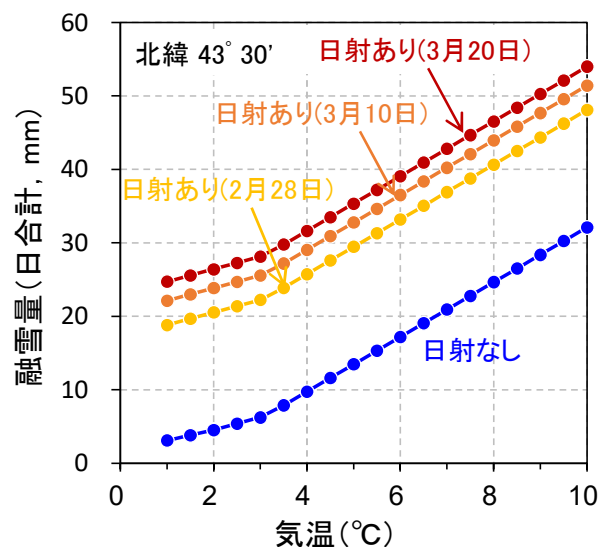


図-10 融雪量の日合計値と気温、日射の有無の関係の計算例

4. おわりに

湿雪雪崩の発生評価の実現に向けて、斜面積雪の安定度と積雪の含水率に着目する2つの方法により、湿雪雪崩の発生条件の基礎的な検討を行った。その結果、積雪深と水の供給量（融雪量や降雨量）の関係において、湿雪雪崩の発生の可能性が高まる条件をそれぞれの方法により示すことができた。これら2つの方法による湿雪雪崩の発生条件を比較すると、積雪深が2.0 m以下で、雪温が0〜−3°C（安定度に着目する方法）、水の供給量が4〜20 mm/h（含水率に着目する方法）の範囲であれば、両者の発生条件がほぼ一致する結果となった。

今回検討した湿雪雪崩の発生条件の活用には、まだ多くの課題がある。主な課題としては、積雪内の水分移動や底面流出の計算方法の斜面積雪への適用性の検討であり、実際の湿雪雪崩事例との比較検証も必要である。これらの課題については、今後取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 松下拓樹, 吉井昭博, 櫻井俊光, 西村敦史, 2023: 北海道の2023年融雪期と湿雪雪崩の特徴. 寒地技術論文・報告集, 39, 166-171.
- 2) Tremper, B., 2008: Wet snow. Staying alive in avalanche terrain, The Mountaineers Books, Seattle, USA, 143-147.
- 3) 秋田谷英次, 遠藤八十一, 1998: 雪崩の発生機構. 気象研究ノート, 190, 3-17.
- 4) 松下拓樹, 上田真代, 原田裕介, 松澤 勝, 中村 浩, 2013: 湿雪雪崩の発生条件に関する一考察. 寒地技術論文・報告集, 29, 157-161.
- 5) Conway, H., and C. F. Raymond, 1993: Snow stability during rain. Journal of Glaciology, 39, 635-642.
- 6) 池田慎二, 2021: 雪崩斜面における積雪安定性評価と弱層テスト. 積雪観測ガイドブック, 日本雪氷学会編, 朝倉書店, 79-96.
- 7) Viallon-Galinier, L., P. Hagenmuller, B. Reuter and N. Eckert, 2022: Modelling snowpack stability from simulated snow stratigraphy: Summary and implementation examples. Cold Regions Science and Technology, 201, 103596.
- 8) 池田慎二, 勝島隆史, 伊東靖彦, 野呂智之, 竹内由香里, 野呂智之, 2012: スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討(その2). 寒地技術論文・報告集, 28, 46-49.
- 9) 河島克久, 松元高峰, 中淵遙平, 伊豫部 勉, 2019: 温暖多雪地帯で発生する全層雪崩災害はなぜ厳冬期に多いのか?. 寒地技術論文・報告集, 35, 91-95.
- 10) Viallon-Galinier, L., P. Hagenmuller and N. Eckert, 2023: Combining modelled snowpack stability with machine learning to predict avalanche activity. The Cryosphere, 17, 2245-2260.
- 11) Hendrick, M., F. Techel, M. Volpi, T. Olevski, C. Pérez-Guillén, A. van Herwijnen and J. Schweizer, 2023: Automated prediction of wet-snow avalanche activity in the Swiss Alps. Journal of Glaciology, 69, 1365-1378.
- 12) Wever, N., C. V. Valero and F. Techel, 2018: Coupled snow cover and avalanche dynamics simulations to evaluate wet snow avalanche activity. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 123, 1772-1796.
- 13) Bellaire, S., A. van Herwijnen, C. Mitterer and J. Schweizer, 2017: On forecasting wet-snow avalanche activity using simulated snow cover data. Cold Regions Science and Technology, 144, 28-38.
- 14) Morin, S., S. Horton, F. Techel, M. Bavay, C. Coléou, C. Fierz, A. Gobiet, P. Hagenmuller, M. Lafaysse, M. Liž ar, C. Mitterer, F. Monti, K. Müller, M. Oiefs, J. S. Snook, A. van Herwijnen and V. Vionnet, 2020: Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: A status report on current implementations and prospects for the future. Cold Regions Science and Technology, 170, 102910.
- 15) 池田慎二, 松下拓樹, 勝島隆史, 石田孝司, 2015: 湿雪雪崩の発生評価における積雪モデルの活用について. 寒地技術論文・報告集, 31, 197-202.
- 16) 西村浩一, 平島寛之, M. Lehning, 石本敬志, 河見博文, 2006: 雪崩発生危険度指標図の作成II. 寒地技術論文・報告集, 22, 31-35.
- 17) 山野井克己, 遠藤八十一, 2002: 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, 443-45.
- 18) 松下拓樹, 2018: 温度条件を考慮した雪荷重算定のための積雪密度の推定について. 雪氷, 80, 441-450.
- 19) Mitterer, C., F. Techel, C. Fierz and J. Schweizer, 2013: An operational supporting tool for assessing wet-snow avalanche danger. Proceedings of International Snow Science Workshop (ISSW), 334-338.
- 20) 前野紀一, 1986: 濡れ雪の構造と性質. 雪氷の構造と物性, 古今書院, 186-198.
- 21) 松元高峰, 河島克久, 外狩麻子, 島村 誠, 2010: 気温・日射量を指標とする表面融雪量モデルと積雪層浸透モデルとを組み合わせた積雪底面流出量の推定. 雪氷, 72, 255-270.
- 22) 中津川 誠, 工藤啓介, 星 清, 2004: 積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析. 水工学論文集, 48, 37-42.
- 23) 気象庁, 2023: 警報・注意報発表基準一覧表. <https://www.jma.go.jp/jma/ki-shou/known/ki-jun/index.html> (2023. 11. 28閲覧).
- 24) 山本佳宏, 村上勇一, 青木卓也, 2021: 一般国道236号天馬街道における広域道路雪崩に対応する自主的道路規制の運用. 第64回北海道開発技術研究発表会発表論文集, 601-606.
- 25) 近藤純正, 1994: 大気上端における日射量. 水環境の気象学, 朝倉書店, 57.