

融雪量に基づく実効雨量を用いた 融雪災害警戒基準の提案

高柳 剛* 佐藤 亮太** 布川 修*

Proposal of Snowmelt Disaster Warning Criteria Using Effective Rainfall Index that Reflects Snowmelt

Tsuyoshi TAKAYANAGI Ryota SATO Osamu NUNOKAWA

In snow-covered areas, slope failures induced by snowmelt water may occur. In this study, we attempted to develop warning criteria for snowmelt disasters using the effective rainfall index, which reflects the analyzed snowmelt amount (hereinafter referred to as the effective snowmelt index), as an evaluation index. In this study, we verified the appropriate half-life of the effective snowmelt index by comparing it with the results of groundwater level observation in snow-covered areas. As a result, it was confirmed that a strong correlation between them was confirmed under the conditions that the half-life of the index was set to approximately 24 to 96 hours. In addition, through case studies, we found that the warning criteria using the effective snowmelt index and snow depth as evaluation indexes could effectively warn of snowmelt disasters.

キーワード：融雪、のり面、維持管理、防災、実効雨量、運転規制

1. はじめに

豪雨時に雨水の浸透を誘因とした土砂災害（以下、降雨災害）が発生することは広く知られる。一方、降雨災害と比べて事例数は少ないものの、北海道や本州の日本海側などの積雪地帯（図1）の鉄道では、鉄道沿線斜面において融雪水の浸透を誘因とした土砂災害（ここでは、積雪期に地震動の外力によらず融雪および降雨を誘因として生じる斜面災害を「融雪災害」と定義）が発生し（写真1）、列車の運転に影響を生じた事例^{例えば2)}が報告されている。融雪水は積雪の融解によって発生し、降雨と同様に地盤へ浸透して地盤の高含水化に寄与する。しかし、その量を雨量計で計測することはできない。このため雨量のみを評価指標とした運転規制（警戒基準）では、融雪災害に対する警戒の判断が困難である。

このような事情により、積雪地帯を営業圏とする鉄道事業者では、列車の安全を確保するために、通常の降雨時運転規制に加えて、例えば融雪期（鉄道事業者や地域により設定時期は異なるものの概ね3月～5月に設定される）に職員の線路巡回を強化するなどの措置をしている。一方で、融雪災害の警戒要否や巡回箇所は経験的な判断に基づくことも多い。そこで本研究では、融雪災害のリスクが高い時期を特定する警戒基準に着目した検討を行った。

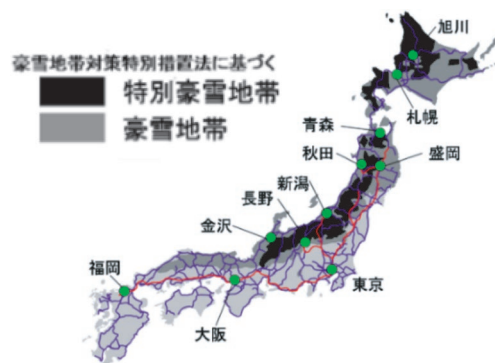


図1 主な鉄道網と豪雪地帯および特別豪雪地帯¹⁾



写真1 融雪水の浸透を誘因とした盛土崩壊の例

2. 融雪災害警戒基準の考え方

2.1 基本的な方針

融雪災害における斜面の不安定化メカニズムは、基本的には降雨災害に類似し、融雪（降雨が複合する場合も含む）による地盤への水分供給を原因とする、地盤の高

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

** 防災技術研究部 気象防災研究室

含水化による自重の増加やせん断抵抗力の低下が主要因と推定される。そこで鉄道事業者が実施している降雨時運転規制の仕組みを応用し、融雪水の影響を反映した評価指標を採用することで、リアルタイムな融雪災害警戒基準が構築できると考える。

なお融雪情報をリアルタイムに把握する手段として、本研究では低コスト化の観点から、観測機器を用いて直接情報を取得する方法ではなく、気象庁アメダス³⁾の配信データを利用して、融雪量の解析値を算出する方法を採用する。解析手法の詳細は文献4を参照されたい。

なお本論文では融雪水の情報に関して、一定時間に積算された融雪水の体積を単位面積で除した値 (mm) を「融雪量」、特に1時間の積算値 (mm) を「時間融雪量」、瞬間的な融雪の強さを1時間あたりに換算した値 (mm/h) を「融雪強度」と呼称する。

2.2 融雪量を反映した実効雨量

融雪災害警戒基準には融雪水の長期的な作用に対する斜面の土中水分応答との高い相関が期待できる評価指標を採用することが合理的と判断される。本研究では土中水分挙動をモデル化した指標であり一部の鉄道事業者で採用されている「実効雨量」⁵⁾を利用する。実効雨量の算出式を式(1)に示す。

$$R_{c(t)} = R_{c(t-1)} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{T}} + w_s \quad (1)$$

T : 半減期 (h)

w_s : 時間浸透水量 (= 時間融雪量 s + 時間雨量 P_t) (mm)

$R_{c(t)}$: 実効雨量 (mm)

$R_{c(t-1)}$: 1時間前の実効雨量 (mm)

本研究では、式(1)に示される実効雨量 R_c のうち、時間融雪量 s が反映されうる積雪期 (代表する気象観測地点の積雪深が1cm以上の期間) の値を「実効融雪量 R_{cs} 」と呼称し、融雪災害警戒基準の主要な評価指標として採用する。

3. 研究課題と目的

本章では、実効融雪量 R_{cs} に基づく融雪災害警戒基準の開発における主要な課題を示すと共に、課題を踏まえた研究目的を整理して述べる。

3.1 実効融雪量 R_{cs} の半減期 T に関する課題

第一の課題として実効融雪量 R_{cs} を算出するパラメータである半減期 T に関する課題を挙げる。同パラメータ

は土中水分の減衰をモデル化したパラメータであり、災害警戒基準としての運用の観点から、鉄道沿線斜面の土中水分の挙動の実態を踏まえて適切な値を設定する必要がある。先行研究として例えば溝口・桂⁶⁾は、融雪量を加算した実効雨量 R_c と地すべり箇所における斜面安定性と高い関連性のある地下水位挙動を比較し、両者に高い相関性が得られる半減期 T を報告している。しかし、鉄道の融雪災害として主に問題となる盛土崩壊や切土・自然斜面の表層崩壊を警戒する観点から相応しい実効融雪量 R_{cs} の半減期 T が検討された事例は確認できない。

3.2 実効融雪量を用いた警戒基準に関する課題

第二の課題として、実効融雪量を用いた融雪災害の警戒要否を判断する妥当な手法が確立されていない点を挙げる。具体的には、融雪災害の警戒要否を判断するための実効融雪量などの評価指標の閾値の設定方法を確立する必要がある。筆者らは、これまでに実効融雪量 R_{cs} を評価指標とした災害警戒基準の開発について検討してきたもの⁷⁾、実効融雪量 R_{cs} のみでは融雪災害の捕捉精度の観点から課題があった。

ここで融雪災害と降雨災害の差異として、水分供給の原因となる気象現象の違いの他に、積雪の有無が挙げられる。積雪が斜面安定性に及ぼす定量的な影響評価は技術的に発展途上ではあるが、積雪が水路の通水を阻害した事が融雪災害の原因として報告されている事例も多く、積雪は融雪災害に対するリスクになると想定される。

3.3 研究目的

本研究では融雪災害警戒基準の開発を目指し、前節の課題を踏まえて以下の内容を検討するものである。

第一に、積雪地帯の鉄道沿線の複数の盛土・切土斜面の土中水分挙動の実態を把握し、土中水分挙動と強い相関が得られる実効融雪量 R_{cs} の半減期 T を明らかにして、実効融雪量 R_{cs} に設定する適切な半減期 T の水準を推定することである。第二に、実効融雪量 R_{cs} と積雪深を評価指標として採用した融雪災害警戒基準および同基準の閾値の設定方法について検討し、さらに同基準による過去の災害捕捉性能を確認することである。

4. 現地観測

土中水分挙動と強い相関が得られる実効融雪量 R_{cs} の半減期 T の範囲を把握することを目的として、本研究では積雪地帯における鉄道沿線斜面の土中水分挙動を長期間にわたり現地観測した。具体的には積雪地帯にあたる鉄道沿線斜面より、地形条件の異なる3箇所 (観測ケース1: 平地上の盛土, 観測ケース2: 段丘崖の切土

のり面，観測ケース3：段丘崖の片切片盛）を選定し，最長で約2年間にわたり土中水分挙動（地下水位，体積含水率）を観測した。なお観測ケース2と観測ケース3の斜面は過去に融雪災害が発生した箇所にあたる。その上で，近傍のアメダスの気象データを用いて実効融雪量 R_{cs} を算出し，土中水分挙動の観測値と比較した。なお本章では代表例として観測ケース3の観測結果について報告する。

4.1 観測概要

観測ケース3は長野県の河岸段丘の末端に位置する片切片盛である。当該箇所を含む色別標高図（標高20m毎に色変化）を図2に，当該箇所を基点（ゼロ点）とした地形断面図（切土のり面の最大傾斜方向）を図3に示す。現地の標高はEL.302mであり，地質図においては新生代第四紀前期完新世の安山岩火砕岩（溶岩を伴う）⁹⁾にあたる。当該盛土より下方は河川に，上方は切土のり面に，さらには河岸段丘の自然斜面が続いている。

当該箇所の特徴として，過去の積雪期（4月上旬）に片切片盛の盛土で斜面崩壊（写真2）が生じている。崩壊箇所は図4（平面図）に示す旧崩壊箇所であり，河川沿いに併設された国道と鉄道の盛土部が崩壊した。河川側の国道盛土の斜面勾配は約25°，崩壊規模として最大崩壊深さは約4m，崩壊幅は約13m，崩壊のり長は約34mの円弧すべりであった

計測機器（地下水位計）の設置状況を図4に示す。なお本観測ケースでは他ケースと異なり土壌水分計は敷設していない。被災後に実施されたボーリング調査の記録によれば，地山の地質は，凝灰角礫岩の上に「粘土質砂礫」（ $N=10\sim32$ ）が約10m堆積しており，盛土は，「礫まじり粘土」（ $N=6$ ）からなる原地盤上に「礫まじり砂質シルト」（ $N=3\sim10$ ）の材料で構築されていた（図4）。

4.2 観測結果

同ケースにおいて観測機器を運用した観測期間は2017年11月11日より2018年5月16日である。ここで，図5に近傍のアメダス（アメダス野沢温泉，同位置標高EL.576m，現地斜面からの距離7.5km，現地斜面からの標高差-226m）の気象データ，同気象データを用いて算出した時間浸透水量 w_s ，斜面の安定性に関する土中水分挙動の観測データ（地下水位 W_L ），実効融雪量 R_{cs24} （暫定的に半減期 T を24時間に設定）を示す。図5より，積雪期後半の著しい地下水位上昇を確認することができる。これらの結果より，積雪期の後半には地下水位 W_L の著しい上昇が確認され，現地斜面の斜面安定性が低下していたと判断される。さらに24時間実効融雪量 R_{cs24} と地下水位 W_L の関係に着目すると，積雪期および非積雪期を通じて両者の増加時期は概ね一致して

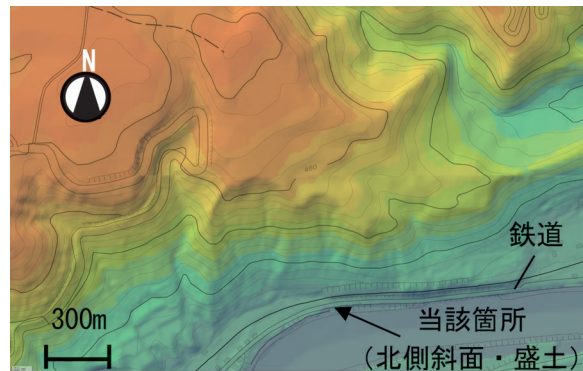


図2 色別標高図（電子国土に加筆）⁸⁾

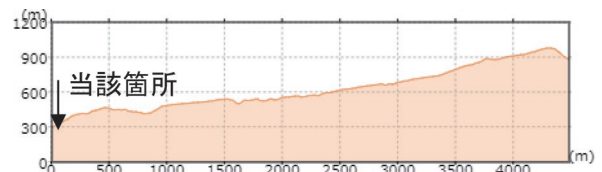


図3 地形断面図（電子国土に加筆）⁸⁾



写真2 融雪災害発生後の崩壊面

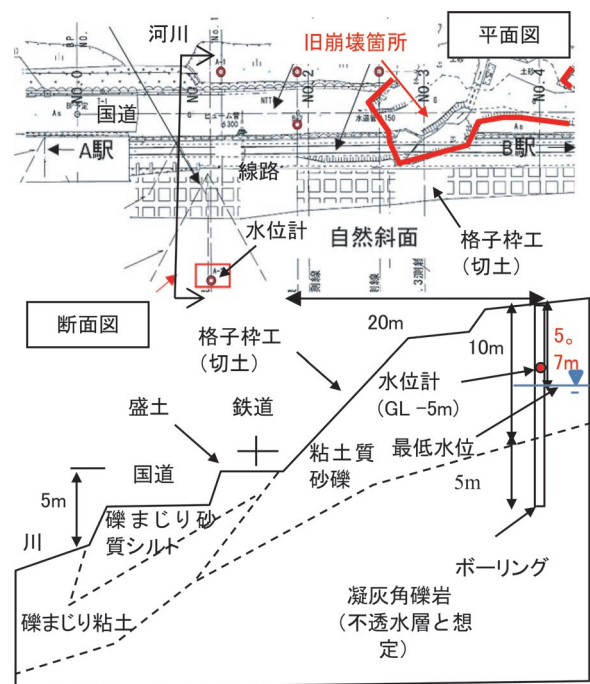


図4 計測機器設置状況
（地質断面図資料のトレースに加筆）

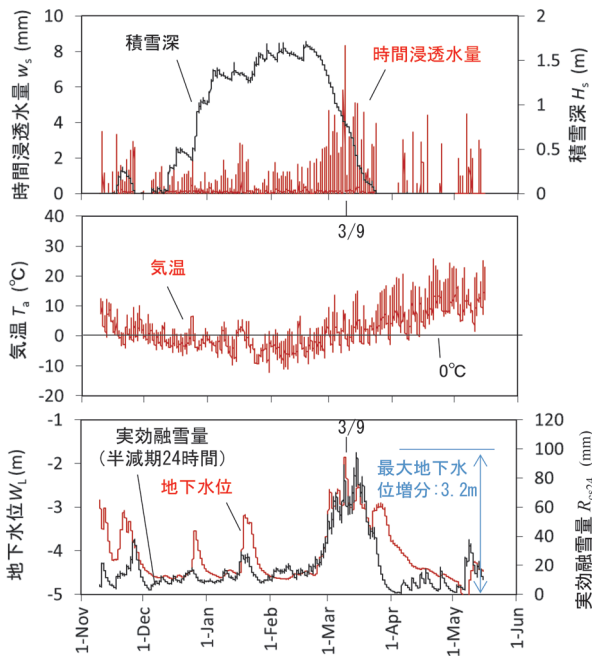


図5 現地観測結果

おり、一定の連動性が期待できることが分かる。これらの一連の傾向は他の観測ケース1、観測ケース2でも同様であった。

なお本ケースでは積雪期の3月9日に連続雨量32mmの降雨を経験しており、地下水位が急増している。一般に積雪期では、特に平均気温が0°Cを超過し始める後期においては、晴天では日中に融雪が進行し、夜間には放射冷却の影響などを受けて氷点下まで気温が低下するサイクルを繰り返す一方、雨天の場合は夜間も高い気温に保たれ、かつ降雨も作用するため、昼夜連続して浸透水が供給されて地下水位が大きく上昇する場合がある。この様に、融雪期における降雨は地下水位の急増の原因となるため注意が必要である。

5. 適切な半減期の検証

5.1 パラメータスタディの概要

実効融雪量 R_{cs} に設定する適切な半減期 T を得ることを目的としたパラメータスタディを実施した。3観測ケースを対象に、近傍のアメダスの気象データより半減期 T の異なる実効融雪量 R_{cs} を14パターン（半減期 $T=1.5h, 6h, 12h, 24h, 48h, 72h, 96h, 120h, 144h, 192h, 240h, 336h, 432h, 720h$ ）算定し、それぞれ地下水位 W_L ・体積含水率 θ との相関係数 r (図6) を算出し、高い相関係数 r が得られる半減期 T を把握した。なお本論文では、同時刻における実効融雪量 R_{cs} と土中水分状態に関連する変数（地下水位 W_L ・体積含水率 θ など）の関係において、最も高い相関係数 r が得られる実

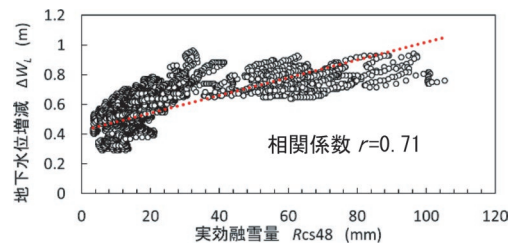


図6 実効融雪量 R_{cs48} と地下水位増減 ΔW_L の相関関係
(観測ケース1、積雪期のみ、2カ年)

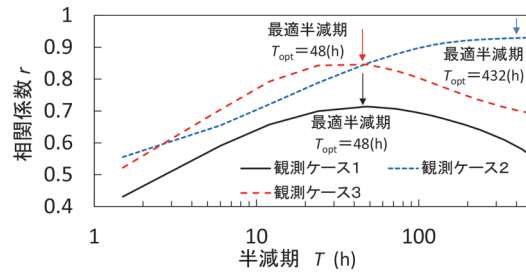


図7 相関係数—半減期関係まとめ
(地下水位—実効融雪量関係)

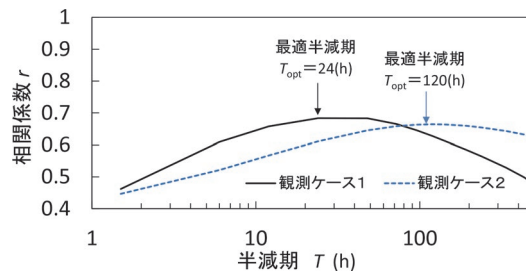


図8 相関係数—半減期関係まとめ
(体積含水率—実効融雪量関係)

効融雪量 R_{cs} の半減期 T を「最適半減期 T_{opt} 」と定義する。

5.2 パラメータスタディの結果

パラメータスタディの結果として、各観測ケースにおける実効融雪量 R_{cs} の半減期 T と、同時刻における実効融雪量 R_{cs} と土中水分挙動（地下水位 W_L 、体積含水率 θ ）との相関係数 r の関係を図7、図8に整理して示す。なお体積含水率 θ には概ね地表からGL-0.25mの位置のセンサーを代表点としている。地下水位は比較的深い斜面崩壊のリスクと、浅部で計測した体積含水率は比較的浅い表層崩壊のリスクと関連性が高いと想定する。

同パラメータスタディの結果、地下水位 W_L と強い相関性（今回は相関係数 $r \geq 0.7$ ）が得られる実効融雪量 R_{cs} の半減期 T は、観測ケース1の場合は24h～96h（最適半減期 $T_{opt}48h$ ）、観測ケース2の場合は12h～720h（最適半減期 $T_{opt}432h$ ）、観測ケース3の場合は12h～432h（最適半減期 $T_{opt}48h$ ）との結果が得られた。また

表層の体積含水率 θ を観測したケースでは、体積含水率 θ に関する実効融雪量 R_{cs} の最適半減期 T は、観測ケース 1 の場合は 24h、観測ケース 2 の場合は 120h であった。

以上の分析結果より、実効融雪量 R_{cs} を用いた融雪災害警戒基準における実効融雪量の半減期 T の代表値 T_{rep} として、地下水位に着目した場合には概ね 24h~96h での設定が適切であると判断される。個々の斜面の最適半減期は異なるものの、実際の災害警戒基準の運用の観点では簡便さが求められるため、個別の斜面に対して逐一個別の半減期を設定する運用は現実的ではない。このため、平均的に土中水分挙動と連動制の高い代表的な半減期 T を採用する必要がある。また過度に長い半減期 T を採用した場合には、実効融雪量が閾値を超過した後に、閾値以下に値が減衰するまでに長い時間を要することになり、警戒発令時間が長期に渡るため現場の負担が過大となる懸念がある。以上の観点を総合して、本研究では、災害警戒基準の運用における実効融雪量 R_{cs} の半減期 T の代表値 T_{rep} として 24 時間を採用することとした。

6. 実効融雪量および積雪深を指標とした融雪災害警戒基準の提案

6.1 基準の概要

過去に検討した災害警戒基準⁷⁾では、実効融雪量 R_{cs24} を評価に用いる唯一の指標値として、どの期間においても過去に経験した実効融雪量 R_{cs24} のレベルに応じて一定の閾値を設定する手法を採用していた。その一方で、積雪が比較的多く残る融雪期の前半(2月~3月)において、災害発生時の実効融雪量が過去に経験した実効融雪量よりも極端に低い値で融雪災害が発生する事例があった。積雪は斜面に対して積雪荷重を作用させ、また排水路の通水性を阻害するなど、斜面の安定性に対して悪影響を及ぼす可能性がある。このような積雪環境における融雪災害の危険性を適切に把握するためには、積雪深に応じて実効融雪量の災害捕捉閾値を変化させる対応が必要となると考えられる。そこで本検討では、実効融雪量に積雪深 H_s を加えた災害捕捉閾値を設定する手法について検討した。

今回検討した融雪災害警戒基準の概要を図9に示す。図9(a)には、融雪災害の被災事例がある箇所における実効融雪量 R_{cs24} と積雪深 H_s との組み合わせによる履歴(以下、スネークライン)を過去20年分重ね合わせて表している。このように、積雪深 H_s が多いときには過去に経験した実効融雪量 R_{cs24} は小さい傾向がある。基本的な融雪災害の危険度評価の閾値の概念として、過去のスネークラインの履歴がない空白領域の側を危険側、多くの履歴がある領域の側を安全側と判断する。

この時、各年の実効融雪量 R_{cs24} の最大値を積雪深

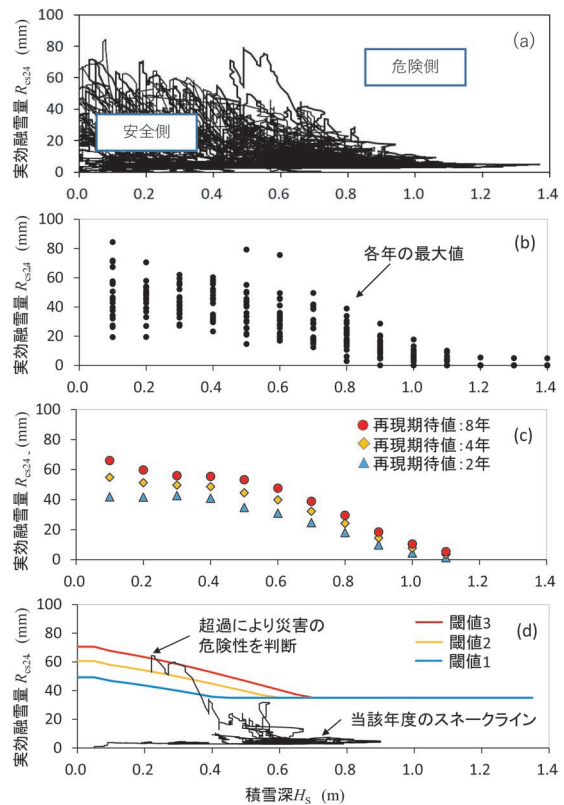


図9 実効融雪量と積雪深とを指標とした融雪災害警戒基準の概要

0.1m毎に過去20年分プロットしたものを図9(b)として示す。この積雪深 H_s 毎に経験した実効融雪量 R_{cs24} の最大値のデータを用いて、ガンベル分布に基づいて極値統計解析を行い、積雪深 H_s ごとに実効融雪量 R_{cs24} の確率年(2年、4年、8年確率)を整理した結果を図9(c)に示す。同じ確率年のグループ(2年、4年、8年確率)のプロットから近似曲線を求め、評価年度の実効融雪量 R_{cs24} と積雪深 H_s によるスネークラインの実況値が、各確率年のグループの近似曲線(2年確率、4年確率、8年確率)を原点側から離れるように超過した場合、危険領域に至ったと判断する。本研究では2年確率の近似曲線を閾値1、4年確率を閾値2、8年確率を閾値3として設定している。

その際、当該年度のスネークラインが高い確率年の閾値(例えば閾値3)を超過する程、より融雪災害の危険度が高まっていると判断される。図9(d)に当該年度のスネークラインと閾値との比較例を示す。なお本手法の実運用においては、融雪が本格的に始まる前の時期(積雪が多く残る時期)にスネークラインが閾値を超過し続けることを回避する措置が必要と考えられる。そこで、各閾値には一定の下限値を設けることとした(本研究では下限値に35mmに設定)。また、アメダスの積雪深と現地の積雪深に稀に乖離が生じる可能性がある事から、アメダスデータを用いて実効融雪量 R_{cs24} を評価する場

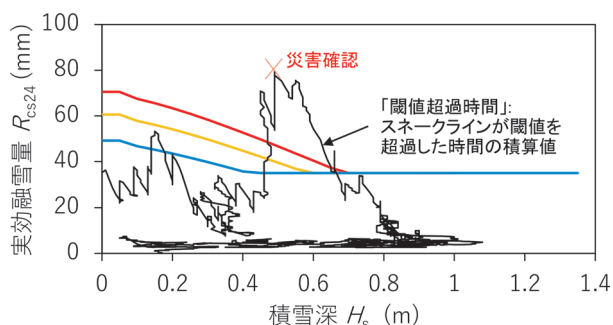


図 10 閾値超過時間と災害捕捉の考え方

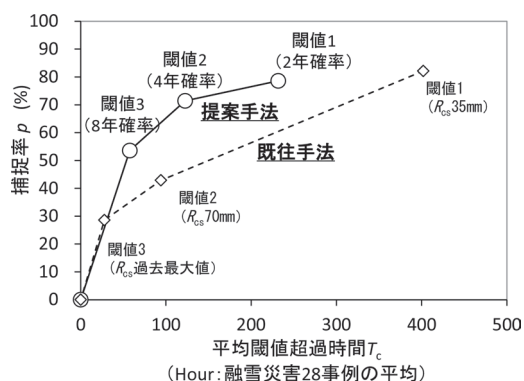


図 11 災害捕捉率と閾値超過時間との関係

合、安全側の措置として、仮にアメダスの積雪深がゼロになったとしても、災害発生地点（斜面上部等）には残雪があるものとして、当該年度の融雪量の解析は一定期間（本研究では過去の災害事例を考慮してアメダス消雪日から14日間）続ける設定としている。

6.2 過去の災害事例との比較による検証

本節では、JR北海道およびJR東日本に依頼して収集した過去の融雪災害事例（28事例）の情報を整理し、閾値1～3と災害発生年の実効融雪量と比較し、災害捕捉の可否と閾値超過時間（図10）を整理した結果を報告する。融雪災害の発生が確認された時点（時間単位）で実効融雪量 R_{cs24} が閾値を超過していた場合、当該閾値は適切に過去の融雪災害を補足していたとみなす。ここで、本研究で収集した全融雪災害件数（28事例）に対する補足件数の割合として「捕捉率 p 」を算出する。さらに実効融雪量 R_{cs24} と積雪深 H_s からなるスネークラインが、閾値1～3を超過していた積算時間について、過去20年間の平均値として表した平均閾値超過時間 T_c を併せて算出する。この平均閾値超過時間 T_c と災害捕捉率 p の関係について、閾値毎にプロットした散布図を図11に示す。また比較のために、既往手法（実効融雪量 R_{cs24} のみによって危険度を評価する手法、閾値は実効融雪量 R_{cs24} の極限統計解析より設定）における平均

閾値超過時間 T_c と災害捕捉率 p との関係も併せて示す。図11より、設定した閾値に応じて閾値超過時間 T_c が変化し、閾値が低いほど（例えば閾値1）、過去の事例に対する災害捕捉率 p は高くなるが、その分、閾値超過時間 T_c （規制時間）も長くなるのが分かる。すなわち、実務上では図11を参考にすることで、目標として設定する災害捕捉率 p と閾値超過時間 T_c （規制時間）の関係に応じて、適切な警戒閾値を設定できる。また図11より、積雪深を考慮した改良型の融雪災害警戒基準と、既往手法を比較した場合、改良型の手法の方が同じ閾値超過時間 T_c に対して災害捕捉率 p が約20%向上することが分かった。

7. まとめ

本研究では春先に融雪水に起因して発生する融雪災害の発生危険度を評価する融雪災害警戒基準の開発を目指した検討を行った。その結果として、積雪地帯の鉄道沿線の複数の盛土・切土斜面の土中水分挙動の実態を踏まえ、実効融雪量 R_{cs} の半減期 T には概ね24時間を設定する事が適切であることが分かった。融雪災害警戒基準として実効融雪量 R_{cs} と積雪深 H_s を評価指標として採用した改良型の融雪災害警戒基準は従来手法と比較して、閾値超過時間 T_c に対して災害捕捉率 p が向上することが分かった。

なおこの報告には文献10の内容を含んでいる。

文献

- 1) 国土交通省：豪雪地帯・特別豪雪地帯の指定, <https://www.mlit.go.jp/common/001405717.pdf> (参照日: 2021年12月1日)
- 2) 航空・鉄道事故調査委員会：東日本旅客鉄道株式会社只見線早戸駅～会津水沼駅間、列車脱線事故鉄道事故調査報告書, 報告書番号 RA2006-2-4, 2006
- 3) 国土交通省気象庁：地域気象観測システム公開情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> (参照日: 2021年12月24日)
- 4) 飯倉茂弘, 佐藤亮太, 高橋大介：任意地点の融雪量推定方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.4, pp.5-10, 2022
- 5) 島村誠：雨, 風, 地震に対する列車運転規制方法の改良, 東京大学博士論文, 2008
- 6) 溝口芽衣, 桂真也：融雪と蒸発散を考慮した実効雨量法による地すべり地の地下水位変動解析, 日本地すべり学会誌, 56巻1号, pp.16-24, 2019
- 7) 高柳剛, 湯浅友輝, 櫻健典：融雪期の斜面災害に対する管理手法, 鉄道総研報告, vol.31, No.5, pp.11-16, 2017
- 8) 国土交通省国土地理院：電子国土基本図, <https://maps.gsi.go.jp> (参照日: 2021年12月24日)
- 9) 国立研究開発法人産業技術総合研究所：地質図表示システム・地質図Navi, <https://gbank.gsj.jp/geonavi> (参照日: 2021年12月24日)
- 10) 高柳剛, 佐藤亮太, 布川修：解析融雪量と実効雨量を用いた融雪災害警戒指標の設定条件に関する諸検討, 土木学会論文集C (地圏工学), 77(3), 95-212, 2021