

# 融雪期の斜面災害の要因となる土壌水分状態の評価手法について

Research on Evaluation Method of Soil Moisture Condition Causing Slope Disasters on Snowmelt Season

室蘭工業大学 ○学生員 吉村 勇人 (Taketo Yoshimura)  
 室蘭工業大学 正 員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)  
 室蘭工業大学 学生員 宮崎 嵩之 (Takayuki Miyazaki)

## 1. はじめに

近年、北海道での融雪期における斜面災害がたびたび発生しており、素因としての地質や地形、誘因としての降雨に加え融雪を考慮する必要がある。

現在の斜面災害発生危険度の評価手法として、実効雨量による手法<sup>1)</sup>や土壌水分量をタンクモデルによって評価した土壌雨量指数を用いる手法<sup>2)</sup>などが提案されている。しかし、土壌雨量指数は、気象庁と都道府県が共同で発表する「土砂災害警戒情報」<sup>3)</sup>として運用されているものの、対象とする斜面災害は大雨によるものであり、融雪を含む災害は含まれない。また、融雪を伴う斜面災害の危険度評価に関しては報告例が少なく<sup>4)</sup>、融雪を考慮した評価方法の確立が課題となっている。

そこで本研究では、北海道内における融雪期の斜面災害を取り上げ、災害現場付近における降雨に加え融雪を勘案した土壌水分状態の推定を通し、災害発生危険度の定量的な評価を試みた。

具体的には、以下のような検討を行った。

- 1) 図-1で示す地点を対象に、雪面低下法、デグリーアワー法、熱収支法の3つの手法を用いて、融雪量の算出を行った。
- 2) 土壌雨量指数に融雪量を考慮した「土壌水分量指数」の推定を行った。

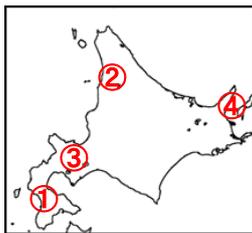


図-1 検証対象とした融雪期の斜面災害発生箇所



写真-1 国道230号中山峠の状況 (2012年5月4日災害発生、提供：北海道開発局札幌道路事務所)

- 3) 上記の方法により推定された土壌水分量指数を用いてスネーク曲線を作成することにより、斜面災害の発生危険度を評価した。

## 2. 研究方法

### 2.1 対象事例の概要

今回、近年の北海道の融雪期の斜面災害として、図-1に示す4箇所の事例を取り上げた。これらの斜面災害には、道路の通行止めや河川の閉塞など大きな影響をもたらすものもあり、適切な対策が求められている。各々の概要<sup>5) 6)</sup>を表-1に示す。

特に、2012年5月4日に発生した国道230号中山峠では、1969年に開通して以来、初めてとなる全面通行止めに至るような災害が発生した(写真-1)。この際には、地すべりのほか、切土のり面崩壊、盛土崩壊など数種類の災害が同時期に発生し、災害発生後、片側交互通行が開始されるまでに20日間を要する等、大型連休中の観光や物流に影響が見られた<sup>7)</sup>。また、中山峠では、2000年5月にも大規模な地すべりが発生しており、発生した地すべり土塊が下方に位置する薄別川まで達し、河道閉塞が発生するなど大きな被害をもたらした。

### 2.2 融雪量の算出法

融雪期における土壌水分状態の推定に必要な融雪量の算出法として、以下の3つの手法を検討した。以下に具体的な手法を示す。

#### (1) 雪面低下法

融雪期における積雪深の変化から積雪表層に発生した水量を推定し、次式により融雪量を算出する手法である。

$$m = 10\rho_s\Delta H$$

表-1 対象災害事例の概要<sup>5) 6)</sup>

発生地点	発生日時	箇所地域/災害	発生規模	地質的誘因
①	2012.4.19	瀬棚郡今金町 後志利別川中流右岸/地すべり	延長約200m、幅160m、比高10mの範囲で、約41,000m <sup>3</sup> の土砂が崩壊。	泥岩～シルト岩を主体とし、凝灰岩を挟在する風化しやすい地層。
②	2012.4.26	国道239号苫前郡 苫前町霧立/地すべり	延長約200m、幅160m、比高20mの範囲で、約41,000m <sup>3</sup> の土砂が崩壊。	過去から地すべりの繰り返しにより破碎された脆弱な岩盤。
③	2012.5.4	国道230号 札幌市南区 定山溪(中山峠)/地すべり、表層崩壊	道路延長約86m、幅約10mの範囲で地すべりが発生。盛土法面が延長約40m、幅約110mの範囲で、約13,000m <sup>3</sup> の土砂が崩壊。	熱水変質の影響により硬質な安山岩及び火山砕屑岩類が脆弱な岩盤となる。
④	2015.4.24	羅臼町幌萌町 幌萌海岸/地すべり	末端の幅が約380m、奥行が約260m、比高40mの範囲で、外形が三角形の地すべりが発生。	凝灰岩と泥岩による幾品層が見られ、すべり面を担っている可能性がある。

ここで、 $m$  は融雪量 (mm/hr) ,  $\rho_s$  は積雪密度 ( $\text{g/cm}^3$ ) ,  $\Delta H$  は 1 時間当りの雪面低下量 (cm/hr) を表している。また、積雪密度は、新雪で約  $0.1\text{g/cm}^3$  , しまり雪で約  $0.3\text{g/cm}^3$  , ざらめ雪で  $0.3\sim 0.5\text{g/cm}^3$  と定義される。ざらめ雪は、水を含んで粗大化した丸い氷の粒や、水を含んだ雪が再凍結した大きな丸い粒が連なったもの<sup>8)</sup> である。小川ら<sup>9)</sup> は日平均気温が  $0^\circ\text{C}$  以上の日が 3~4 日継続した際に融雪水の影響が現れるとしており、融雪水によりざらめ雪が形成される。今回は、 $0^\circ\text{C}$  以上の日が 3 日継続する前をしまり雪、後をざらめ雪の密度として融雪量の算出を行った。なお、 $0^\circ\text{C}$  以上の日が 3 日継続した後に気温がマイナスになった場合でも、すでに融雪水によりざらめ雪が形成されているとし、積雪密度はざらめ雪の値を用いる。

(2) 積算暖度法 (デグリーアワー法)

各時間毎に計測された気温のうち  $0^\circ\text{C}$  を上回った度数 (デグリーアワー) に相当する融雪量を次式から算出する。

$$m = k_{dhf} T_{dh}$$

ここで、 $m$  は融雪量 (mm/hr) ,  $T_{dh}$  は所定の時刻  $t$  でのデグリーアワー (deg) ,  $k_{dhf}$  はデグリーアワーファクター (mm/deg/hr) である。式から一見して分かるように、融雪量は比例定数であるデグリーアワーファクターに左右される。今回、算出に用いるデグリーアワーファクターは中津川ら<sup>10)</sup> が豊平峡ダム流域の事例で用いた  $0.15\text{mm/deg/hr}$  とした。また、積雪がなくなった時点で融雪量は 0 とした。

(3) 熱収支法

熱収支法を基にした融雪量の算出法として、臼谷ら<sup>11)</sup> の手法を用いた。この手法は、大気から雪面間及び積雪全体に関する 2 本の熱収支式を用いる融雪モデルと、中津川ら<sup>12)</sup> が提案する 1 価線形貯留関数法を用いて積雪層の貯留効果をモデル化した積雪浸透モデルにより構成される。計算においては、この 2 種のモデルを約 1km 四方のメッシュに適合して、気象因子から推定された土壌供給水量を融雪量とみなし算出する。

以上の 3 つの手法を用いて、融雪量を算出した。

2.3 土壌水分状態の評価手法とスネーク曲線による危険度評価手法

現在、全国における土砂災害危険度判定には図-2 に示すようなスネーク曲線が用いられており、土砂災害発生危険基準線 (Critical Line : CL) 及び各気象台の短期降雨指標である 60 分雨量、長期降雨指標である土壌雨量指数 (地中に溜まった降雨の量を示す指標) の 3 つの指標により、土砂災害発生の危険度を判断している。これらの判定基準は地域毎に定められており、北海道でも同様である<sup>13)</sup>。しかし、この手法においては融雪が考慮されていないため、本研究では融雪を考慮した土壌雨量指数を以後「土壌水分量指数 (Soil Water Index (SWI)) 」と称し検証する。土壌水分量指数の推定にあたり、融雪期における融雪量 (時間単位) を上記で示した 3 つの手法により求めた。また、時間雨量データは災害現場付近のアメダスや道路テレメータの雨量データを使用した。以上で算出された時間融雪量と時間雨量を

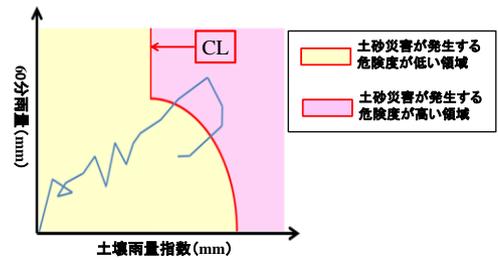


図-2 スネーク曲線のイメージ図

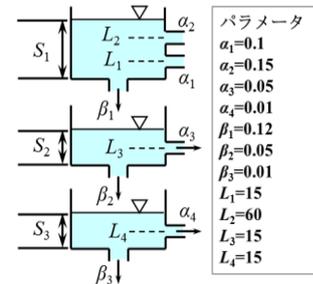


図-3 SWI を計算するための直列 3 段タンクモデルとパラメータ

図-3 に示す気象庁で採用されている直列 3 段タンクモデルに入力し、土壌水分量指数を推定した。タンクモデルのパラメータは現在気象庁で採用されている値を使用した。

危険度判定に用いられている CL は、平成 17 年度に取りまとめられた国土交通省と気象庁の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法 (案) (連携案) により各地方別に設定されている<sup>14)</sup>。連携案では、RBF ネットワーク (Radial Basis Function Network (RBFN)) を用いた非線形 CL の設定手法<sup>15)</sup> が提案されており、CL の降雨指標に 60 分積算雨量と土壌雨量指数が採用されている。本研究でのスネーク曲線の作成には、災害発生箇所を包含する 5km 四方メッシュで設定された CL を用いた。

3. 結果と考察

3.1 融雪期の土壌水分状態の推定結果

図-4 は、雪面低下法を用いて算出した 4 箇所の融雪量から SWI を算出したものである。対象期間は、斜面災害発生年の融雪期 (以後融雪期は 3~5 月とする) とした。赤線は斜面災害発生日を表している。4 箇所での SWI を比較すると、2012 年住吉の事例では時間遅れが見られるものの、どの事例も斜面災害発生日の前後の期間で SWI が高い状態となっていたことがわかる。また、中山峠においては、SWI が融雪期での最大値となった時とほぼ同時期に災害が発生していた。

次に、中山峠での 3 つの融雪量の計算値を用いて SWI を推定した結果を図-5 に示す。対象期間は、斜面災害発生年である 2012 年の融雪期とした。図中の青色の線は雪面低下法、赤色はデグリーアワー法、緑色は熱収支法を用いた SWI を表している。デグリーアワー法と熱収支法を基に推定した SWI を比べると、ピーク値の現れた 5 月 4 日には大きな差が見られた一方で、その他の時期は概ね近い値となった。また、雪面低下法と熱

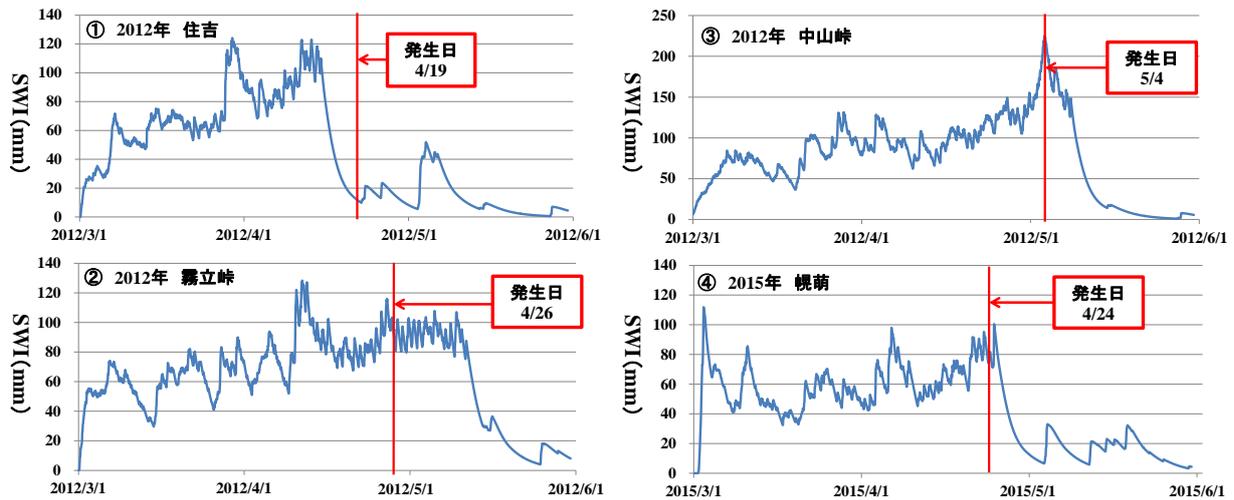


図-4 雪面低下法を用いて算出した融雪量を用いた4箇所のSWIの比較

収支法を基に推定したSWIを比べると、ピーク値は近い値となったが、全体的には雪面低下法を基に推定したSWIが過大な値となった。この原因として、積雪深の観測所が樹木の吹き溜まり等の影響を受け積雪深のデータにばらつきが生じていた可能性がある。さらに、積雪密度の設定に問題があることが考えられる。

図-6は中山峠における2000年から2012年の長期的なSWIを推定した結果である。融雪量の算出法として熱収支法を用いた。図中の青線はSWI、赤線はSWIの年最大値、緑色の帯は融雪期とした期間を表している。この図を見ると、対象期間内でSWIの年最大値が200mmを超える年は、災害発生年を含む2000年・2006年・2012年であり、いずれも融雪期であった。このことから、融雪期において斜面災害発生危険度が高いことが明確に示されている。また、SWIの最大は2012年5月4日の224mmであり、同日に災害が発生したこの事例が対象期間中における既往最大と推算された。

### 3.2 スネーク曲線による危険度評価

前節で作成した中山峠における3つの融雪量の算出法から得られたSWIを用いて、スネーク曲線を作成し、比較した。図-7は斜面災害発生年にあたる2012年の融雪期のSWIを推定し、災害発生日を含む前後2日の計5日間のスネーク曲線を作成した結果である。青線は縦軸を時間雨量・融雪量、横軸をSWIとしてプロットした線であり、赤線はCLを表している。熱収支法と雪面低下法によるスネーク曲線は、2000年5月4日の15時にピーク値となるSWIが推算されるとともにCLも超えており、実際に同日に災害が発生していることから、当時の状況を踏まえた危険度評価が可能であると考えられる。雪面低下法によるスネーク曲線は、CLを超える期間が熱収支法のものとは比べ長い一方で、短期間で大きな変動を繰り返している。この原因として、前節で述べたように、積雪深のデータのばらつきが融雪量やSWI、スネーク曲線に影響したと考えられる。

デグリーアワー法を用いたスネーク曲線では、2つの手法と同じく災害発生日にピーク値となるSWIが推算されるが、CLを超えた期間が見られなかった。

結果として、災害予測の観点では、雪面低下法はスネ

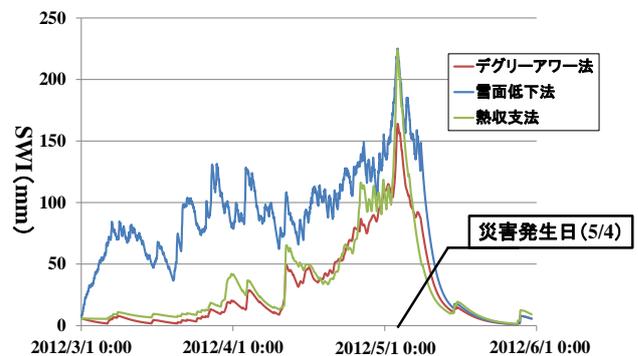


図-5 中山峠における3つ手法で算出された融雪量を用いたSWIの比較

ーク曲線の変動が激しく、それが危険度の判定を困難にする懸念があるため、熱収支法が適しているとの結果が得られた。

## 4. 結論

本研究において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 4箇所の斜面災害事例において、雪面低下法を用いて融雪量を算定し、融雪期におけるSWIを推定した。その結果、災害発生日の前後の期間において、SWIが高い状態となっていたことがわかった。
- 2) 2012年5月4日に中山峠で発生した斜面災害を対象として、雪面低下法、デグリーアワー法、熱収支法の3つの融雪量の算出法から得られたSWIを用いて、土壌水分状態を定量的に評価した。
- 3) 中山峠において、2000年から2012年の長期的なSWIの推定を行った。その結果、SWIの高い年がいずれも融雪期であり、この期間は災害発生危険度が高いことが示された。
- 4) 3つの融雪量の算出法により推定したSWIを用いて、スネーク曲線を作成することにより斜面災害の発生危険度評価を行った。その結果、斜面災害発生危険度の評価、予測という観点では、熱収支法が適しているとの結果が得られた。

なお、本報で用いた熱収支法は、気温、日射量、湿度、

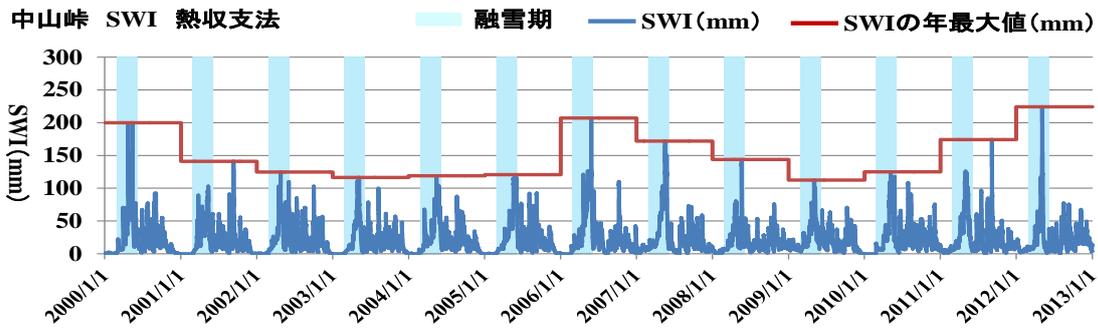


図-6 中山峠における 2000 年から 2012 年の長期的な SWI の推移

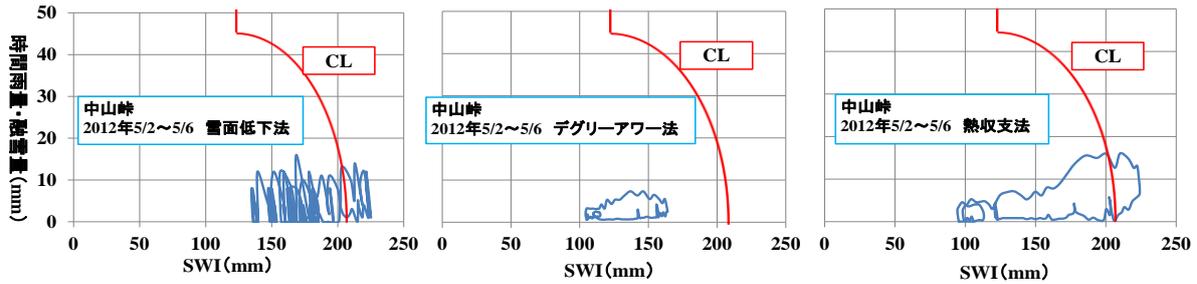


図-7 中山峠における 3つの融雪量の算出法により作成したスネーク曲線

風速、降雨といった現業気象データで適用可能であるため、斜面災害危険度を判定する上で実用化が十分可能なものである。

また、今後は土壌水分量の変化を実験等で計測し、斜面災害との関連性の物理的側面から解明していきたいと考える。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、平成 27 年度河川整備基金（助成番号 27-1151-004）の助成を受けた。また、北海道開発局札幌開発建設部道路整備保全課及び（一財）日本気象協会の松岡直基氏にはデータ提供等で協力して頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 三隅良平, 真木雅之, 岩波越: レーダ雨量に基づく土砂災害の発生評価—都市域を対象に, 神奈川県の場合—, 天気, 58 (8), pp.697-704, 2011.
- 2) 岡田憲治, 牧原康隆, 新保明彦, 永田和彦, 国次雅司, 斉藤清: 土壌雨量指数, 天気, 48 (5), pp.349-356, 2001.
- 3) 気象庁; 土壌雨量指数: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html> (アクセス日: 2015/10/15)
- 4) 道畑亮一, 菊井稔宏, 神野忠広, 吉田俊康, 境和宏: 融雪に伴う土石流発生基準の検討, 平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.190-191, 2011.
- 5) 倉橋稔幸: 2012 年春季の融雪による土砂災害, EPOCH, No.67, pp.7-10, 2013.
- 6) 川上源太郎, 山崎新太郎, 伊藤陽司, 高橋良, 渡邊達也, 興水健一, 田近淳: 北海道, 羅臼町幌萌地すべり—海岸を隆起させた岩盤すべり—, 第 54 回 (公

社) 日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.13-14 2015.

- 7) 国土交通省札幌開発建設部; 国道 230 号中山峠通行止めについて (第 6 報): <http://www.sp.hkdmlit.go.jp/press/pdf/12050801.pdf>. (アクセス日: 2015/10/2)
- 8) 日本雪氷学会; 積雪分類の用語集: <http://www.seppyo.org/tmp/hokkaido/nomen/nomen-a.html> (アクセス日: 2015/10/6)
- 9) 小川正二, 池田俊雄, 亀井健史, 和田正, 平松俊英: 濁沢地すべり地における融雪水・間隙水圧・地下水位・地温の変動特性, 地すべり, Vol.25, No.1, pp.21-27, 1988.
- 10) 中津川誠, 白谷友秀: 水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算, (財)北海道河川防災研究センター研究所紀要, XVII, pp.299-323, 2006.
- 11) 白谷友秀, 中津川誠, 星清: 積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, 第 20 巻, 第 2 号, pp.93-104, 2007.
- 12) 中津川誠, 工藤啓介, 星清: 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, pp.37-42, 2004.
- 13) 北海道庁; 北海道土砂災害警戒情報システム: <http://www.njwa.jp/hokkaido-sabou/others/vocabulary.do> (アクセス日: 2015/10/20)
- 14) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法 (案), 2005.
- 15) 倉本和正, 鉄賀博己, 東寛和, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平: RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.672/VI-50, pp.117-132, 2001.