気候変動に伴なう積雪寒冷地の融雪期における斜面災害危険度の評価

Research on risk assessment of slope disaster during snowmelt season,s in cold snowy regions due to climate change

室蘭工業大学　○学生員　服部有吾（Hattori Yugo）
室蘭工業大学　正　員　中津川誠（Makoto Nakatsugawa）
室蘭工業大学　学生員　坂本莉子（Riko Sakamoto）

1. はじめに

近年，集中豪雨の増加等の影響により，日本全国で斜面災害の危険度が増大している．一方で，北海道等の積雪地域では融雪期の大雨によって引き起こされる斜面災害の増加が懸念されている．札幌市と道南方面を結ぶ国道230号中山峠では，**表－1**に示すように，過去の融雪期において斜面災害がたびたび発生している[1]．特に，2000年と2012年には**写真－1**に示すような大規模な斜面災害が発生し，長期間におよぶ交通の障害となるなど大きな影響が出た．また，平成25年から平成26年にかけて公表されたIPCC第5次評価報告書[2]では「気候システムの温暖化には疑う余地はない」と結論付けられている．気候変動の影響は既に顕在化しつつあり[3]，今後，降雨量の増加や融雪期の変化により，斜面災害の増加が懸念される．そのため，降雨に加え融雪を勘案した斜面災害発生危険度を表す指標の設定が必要と考えられる．

斜面災害発生の危険度の評価方法に関しては，実効雨量による手法や土壌水分量をタンクモデルによって考慮した土壌雨量指数（Soil Water Index，以下 SWI）を用いる手法が提案され，運用されている．SWI は，気象庁と都道府県が共同で発表する「斜面災害警戒情報」[4]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．

本研究では，積雪寒冷地の斜面災害の発生に対する気候変動の影響を定量的に評価することを目的とする．そこで，災害現場付近における融雪を勘案した SWI を推定するとともに，上田ら [5]が作成した地域気候モデル MRI-NHRCM20 の 1 km メッシュの統計的ダウンスケーリング（Statistical Downscaling，以下 1 kmDS）データを用いて，将来気候における斜面災害発生危険度の定量的な評価を試みた．

2. 研究方法

2. 1　災害事例の概要

本研究で対象とする中山峠付近では，2000 年 5 月と 2012 年 5 月に大規模な斜面災害が発生している．それぞれの災害発生箇所と災害状況を**図－1**，**写真－1** に示す．

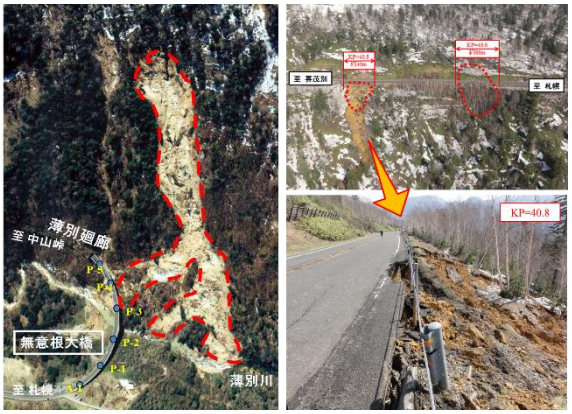
2000 年 5 月の災害は，1969 年に開通して以来初めてとなる全面通行止めに至った．この際，延長約 550 m，幅 50~90 m の範囲で，約 200,000 m^3 の土砂が崩壊した．崩壊により発生した地すべり土塊は下方にある無意根大橋の橋脚や薄別川まで達し，河道閉塞が発生した．

2012 年 5 月の災害は，KP40.6 地点（起点：札幌市）において，道路幅約 10 m，道路延長約 86 m の範囲で地すべりが発生し，KP40.8 地点においては，盛土法面が幅（道路延長）約 40 m，横断幅約 110 m の範囲で約 13,000 m^3 の土砂が崩壊した．また，同日に地すべりのほか，切土法面崩壊，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，片側交互通行が再開されるまでに連休期間中を含む 20 日間を要した．

表－1 中山峠付近の災害履歴

発生日時	災害形態
1998/4/9	崩壊
2000/5/15	地すべり
2006/5/29	落石
2009/5/5	崩壊
2012/5/2	崩壊
2012/5/4	崩壊
2012/5/4	地すべり
2012/5/4	盛土崩壊
2012/5/4	盛土崩壊
2012/5/30	盛土崩壊
2012/6/1	盛土変状
2012/6/1	盛土変状
2013/4/7	盛土崩壊

図－1　災害発生箇所

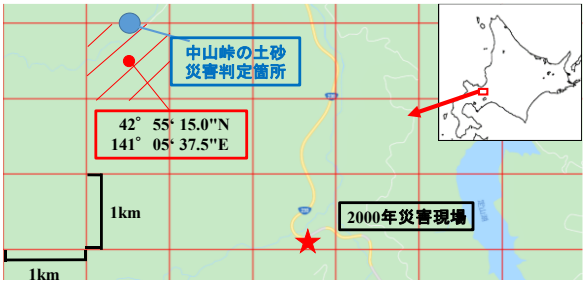


写真－1　国道 230 号中山峠の被災状況
（左：2000 年 5 月 15 日　右：2012 年 5 月 4 日）
提供：北海道開発局札幌道路事務所及び寒地土木研究所

2. 2　解析に用いる気象観測・気候変動予測データ

中山峠の現況の斜面災害危険度評価においては時間雨量では気象庁が提供している 2000～2012 年までの災害現場付近の解析メッシュ雨量データを使用した．

また，中山峠の将来気候における斜面災害危険度評価については，IPCC 第 5 次評価報告書の RCP シナリオ [2]に基づく気象庁の地域気候モデル MRI-NHRCM20 を上田ら [5]によって作成された 1 kmDS データを用いる．

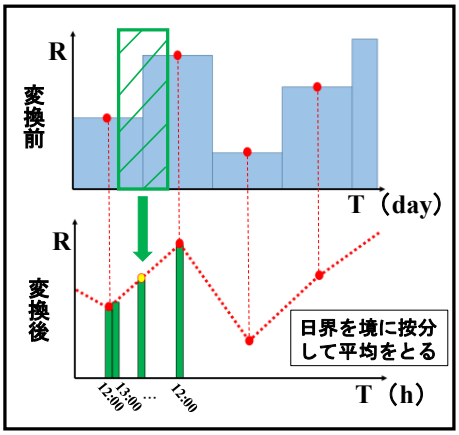


図－2　使用した 1kmDS のメッシュ座標

表－2 解析ケース

解析ケース	計算期間	RCPシナリオ	海面水温
Case-1	現在気候	—	HadISST
Case-2			SST1
Case-3	将来気候	RCP8.5	SST2
Case-4			SST3

注）海面水温の内，HadISSTは英国ハドレーセンターによる観測値，SST1～3はAR5で用いられた第5期結合モデル相互比較計画データより作成された3種の異なる特徴を有する将来変化の空間パターンを表す．

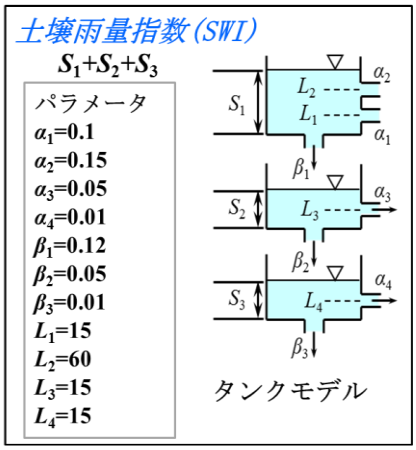


図－3　移動平均の概略図

上田ら [5]は，降水量，降雪水量，気温，気圧，全層雲量，風速，相対湿度を対象に DS-JRA55（気象庁 55 年解析モデル）などでバイアス補正を行ない，さらには，距離重み法で空間内挿するダウンスケーリングを行っている．本研究では融雪を考慮した SWI の算出を行うため，降水量，降雪水量，気温を用いた．

また本研究で選択した 1 km メッシュ座標を**図－2** に示す．このメッシュの選択方法として，現況の中山峠の土砂災害警戒判定メッシュの座標に近く，2000 年での災害現場からも近いことを勘案した． 気候変動の解析期間は，現在気候（1984 月 9 月~2004 年 8 月）及び将来気候（2080 年 9 月~2100 年 8 月）の計 40 年間とした．RCP シナリオについては，積雲対流スキームを同一条件として，海面水温パターンによる比較検証を行うため，公開されている MRI-NHRCM20 の解析ケースの中から**表－2** に示す計 4 ケースを選定した．

また，本研究で採用した 1 kmDS のメッシュ値は全て日データであるため，SWI 算出に用いるには毎時データに変換する必要がある．そのため，当該時刻の前後 12 h



図－4　土壌雨量指数（SWI）とパラメータ

分の値を，日界を境とした時間重みで按分するような移動平均を行い，日データを時間データに変換した．移動平均の手法の概略図を**図－3** に示す．なお，時間降雨量は所定の時刻の降水量から降雪水量を引いた値を用い，降雪水量が降水量を上回っている場合は降雨量を 0 mm とした．

2．3　融雪量と SWI の算出方法

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として，デグリーアワー法を用いて検討した．時間ごとに計測された気温のうち 0 ℃を上回った度数に相当する融雪量を次式から算出する．

$$m_t = k_{dhf} \cdot T_{dht} \qquad (1)$$

ここで，m_t は所定の時刻 t での融雪量（mm/h），T_{dht} 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/h）である．デグリーアワーファクターは実務への適用を考え固定値とし，中津川ら [6]による既往研究において，豊平峡ダムへの計算流入量が実測流入量に合うように調節した結果得られた 0.15 mm/deg/h を採用した．なお，積雪がなくなった時点で融雪量は 0 とした．また，融雪量の計算については，次式から時間値を推定する．

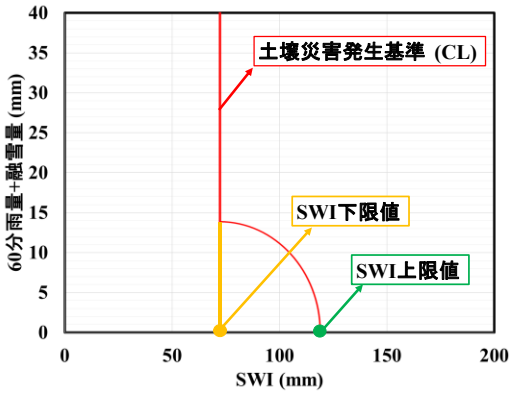
$$AS_t = AS_{t-1} + (s_t - m_t)\Delta t \qquad (2)$$

ここで，AS_t は時刻 t での積雪水量（mm），s_t は所定の時刻 t での降雪水量（mm/h），m_t は融雪量（mm/h），Δtは 1 h である．

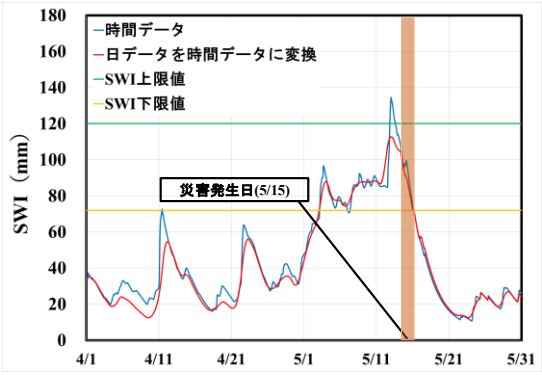
SWI は，デグリーアワー法で算出した時間融雪量と時間雨量を**図－4** に示す直列 3 段タンクモデルに入力し推算した．なお，タンクモデルのパラメータは現在気象庁で全国一律に設定されている値 [7]を使用した．

2．5　SWI とスネーク曲線による災害発生リスクの評価方法

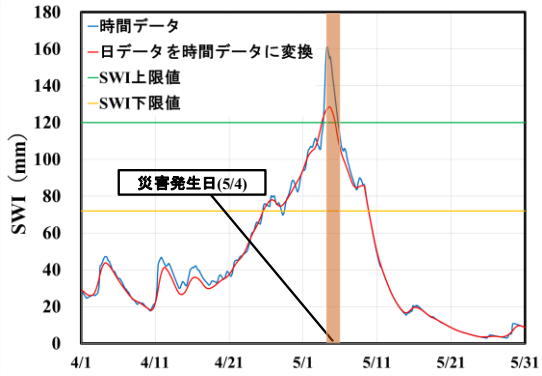
現在，北海道における土砂災害警報の発表には，危険度判定図（スネーク曲線）が用いられており，北海道の土砂災害発生基準線（Critical Line；以下，CL）及び各気象台の短期降雨指標である 60 分雨量，長期降雨指標である SWI の 3 つの要素によって判断されており [8]，CL は国土交通省と気象庁の連携による土砂災害掲載避難基準雨量の設定方法（案）に基づき各地域に設定され



図－5　災害現場付近の観測データによる CL



図－6　中山峠における SWI の比較（2000 年融雪期）



図－7 中山峠における SWI の比較（2012 年融雪期）

ている [9]．すなわち，図－5 に示すようなダイアグラムにおいて 60 分雨量と SWI のプロット（スネーク曲線）が CL を超えるかどうかの判定が行なわれる．これは基本的に降雨に対する危険度評価の考え方であり，宮崎ら[10]は融雪事例にも適用できるように CL の設定を行なった．また，1 kmDS のメッシュ値を日データから毎時データに移動平均して変換すると，降雨量の極値が過少評価されることが予想される．そこで，融雪期の斜面災害は短期間の降雨よりは継続時な融雪で土壌が湿潤する影響が大きいとして，SWI が斜面災害発生の閾値を超えるかどうかで評価することとした．

3．結果と考察

3．1　観測データを用いた SWI の推定結果と比較検討

図－5 は中山峠の災害現場周辺の観測データ（2000 月 1 月~2013 年 1 月）を対象に融雪量算出法としてデグリーアワー法を用いて作成された CL であり，緑色で示す SWI 上限値と黄色で示す SWI 下限値を閾値として使用した．また，図－6 及び図－7 は，2000 年及び 2012 年において現場付近での SWI を推定したものである．青線が観測データの毎時データをそのまま入力値とし，赤線が観測データの毎時データを日データに変換して再度毎時データに移動平均した値を入力値としている．またこれらより，ピーク値は過小評価しているが，災害発生日の同日または直前に SWI が最大になっていることがわかる．さらに，ピーク値付近以外の期間では SWI の値がほぼ一致しており，下限値は同様に超過していることから，日データから毎時データに変換した値でも危険度の評価が可能であることがわかる．

表－3　観測データと気象シミュレーション（1kmDS）での危険度評価比較

	観測データ（2000/1/1~2012/12/31）	1kmDS現在気候（1985/1/1~2003/12/31）
SWI下限値 年間超過回数（回/年）	4.6	4.6
SWI下限値 年間超過時間（h/年）	329	417
SWI上限値 年間超過回数（回/年）	0.5	0.1
SWI上限値 年間超過時間（h/年）	14.1	0.3

表－4　現在気候と将来気候の水収支の比較

	1kmDS現在気候（1985/1/1~2003/12/31）	1kmDS将来気候（2081/1/1～2099/12/31）				
		SST1	SST2	SST3	平均	（増減）
年平均降水量（mm）	1,663	1,679	1,598	1,702	1,660	(-3)
年平均降雨量（mm）	925	1,145	1,154	1,260	1,186	(+261)
年平均降雪水量（mm）	737	534	444	443	474	(-263)
年平均気温（℃）	4.0	8.4	8.8	9.3	8.8	(+4.8)

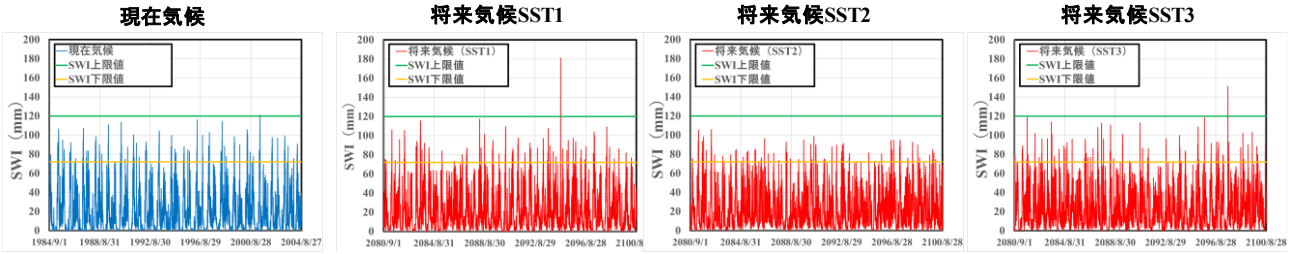
3．2　気象シミュレーションデータ（1 kmDS）を入力値とした SWI の推定

表－3 は検証のため，観測データと現在気候 1 kmDS データを用いた SWI 下限値，SWI 上限値の年間超過回数，超過時間を比較したものである．表より，年平均 SWI 下限値超過回数が観測データと現在気候 1 kmDS データで同じ値であることから，SWI 下限値超過回数においてリスク評価が可能であると判断できる．

3．3　現在気候と将来気候の比較

表－4 は現在気候 1 kmDS データと将来気候 1 kmDS データで水文諸量を比較したものである．表より，現在気候に比べ，将来気候では地球温暖化に伴う年平均気温が 4 ℃以上の上昇，年平均降雨量は 200～300 mm の増加が確認できる．対照的に，年平均降雪水量は 200～300 mm の減少が確認できた．これらより，気候変動が進行していくに従って，年降水量は大きく変化しないが，雨が増加し，雪が減少することが推察される．

図－8 は現在気候と将来気候で推定した SWI の変動を示している．また，この図において現在気候と将来気候での斜面災害リスクを比較するため，表－5 に SWI 下限値の年平均超過回数及び時間を示す．結果より，現在気



図－8　現在気候及び各将来気候の SWI 算出結果

表－5　年間での現在気候と将来気候の危険度評価

	1kmDS現在気候（1984/9/1～2004 8/31）	1kmDS将来気候（2080/9/1～2100 8/31）				
		SST1	SST2	SST3	平均	（増減）
SWI下限値 年間超過回数（回/年）	5	4	4	4	4	(-1)
SWI下限値 年間超過時間（h/年）	413	271	179	215	222	(-191)

表－6　時期ごとの現在気候と将来気候の危険度評価

		1kmDS現在気候（1984/9/1～2004 8/31）	1kmDS将来気候（2080/9/1～2100/8/31）			
			SST1	SST2	SST3	平均（増減）
11~2月	SWI下限値 年間超過回数（回/年）	0.3	1.0	0.9	0.6	0.8（+0.5）
	SWI下限値 年間超過時間（h/年）	9	39	25	30	31（+22）
3~6月	SWI下限値 年間超過回数（回/年）	2.8	1.8	1.5	1.5	1.6（-1.2）
	SWI下限値 年間超過時間（h/年）	357	182	111	118	137（-220）
7~6月	SWI下限値 年間超過回数（回/年）	1	1	1	2	1（0）
	SWI下限値 年間超過時間（h/年）	48	51	43	67	54（+6）

候に比べ将来気候では年間的にみると，超過回数にはさほど変化が見られなかった一方，超過時間は平均で 191 時間減少する結果となった．

次に期別の傾向を評価するため，11~2 月（降雪期），3~6 月（融雪期），7~10 月（無積雪期）の 3 つの期間に分けて SWI 下限値の超過回数，時間を比較した．**表－6** に期間別の結果を示す．表より 3~6 月の SWI 下限値超過回数が平均で 1.2 回，時間が平均で 220 時間減少している一方，11~2 月では超過回数が平均で 0.5 回，時間が平均で 22 時間増加していることが示された．このことから，将来気候では融雪量の減少により 3~6 月の融雪による斜面災害のリスクが減少する一方，冬期の降雨の増加や，気温上昇に伴い融雪期が早まることで，冬季においても斜面災害のリスクが増加すると推察される．

4. まとめ

本研究において得られた結果を以下に記す．

1) MRI-NHRCM20 の 1 kmDS を用いて融雪を考慮した SWI を算出し，斜面災害危険度評価が可能であることを示した．
2) 現在気候と将来気候で水文諸量を比較したことで，将来気候では気温の上昇により降雨量は増加し，降雪水量が減少することが示された．
3) 現在気候，将来気候で時期ごとの SWI の変動を比較した結果，気温上昇に伴い降雨の増加や融雪期が早まることで，冬期に斜面災害へのリスクが高まることが示された．

本研究の成果は，積雪寒冷地における気候変動に伴なう斜面災害リスクを勘案した道路管理や地域防災を考えるうえで有用であり，今後は同様の方法を他の地域にも展開していきたいと考える．

謝辞：本研究は文部科学省（MEXT）の事業である気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）の助成を受けたものである．また，（一財）日本気象協会の松岡直基氏，臼谷友秀氏，北海道の宮崎嵩之氏より有益な情報提供を頂いた．ここに記して謝意を示す．

参考文献

1) 伊藤佳彦，大日向昭彦，倉橋稔幸，日下部祐基，宍戸政仁：融雪期の道路斜面災害についての考察−国道 230 号を例として−，日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会平成 25 年度研究発表会講演予稿集，No33, pp.15~18, 2013.
2) 環境省：日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について（お知らせ）別途資料，2014.
3) 工藤啓介，長谷川裕史，中津川誠：気候変動が積雪寒冷地の汽水湖水質に及ぼす影響の評価，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74，No.4，pp.205-210，2017.
4) 気象庁；土壌雨量指数：http://www.jma.go.jp/kishou/know/bosai/dojoshisu.h（閲覧日：2019/11/27）
5) 上田聖也，中津川誠，千田侑磨，小松麻美：流域水収支が検証された北海道全域の高解像度 Downscaling 情報の作成，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.75，No.2，pp.1051-1056，2019.
6) 中津川誠，臼谷友秀：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.
7) 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，pp.349-356．2000.
8) 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（閲覧日：2019/11/27）
9) 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.
10) 宮崎嵩之，中津川誠，西原照雅：土砂災害発生危険度評価のための実用的融雪量算出法の提案，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.73，No.4，pp.1375-1380，2017.