

河川基金助成事業

「広域水文指標に基づく融雪地すべり 警戒指標の提案」

助成番号：2022 - 5311 - 006

北海道大学大学院農学院
松永 隆正

2022 年度

目次

1. はじめに
 2. 地表面到達水量推定モデルの開発
 3. 融雪地すべり警戒指標および基準の検討
 4. 結論
- 謝辞
参考文献

1 はじめに

積雪地域では、降水の一部が積雪として地表面に貯留された後、3~5月の融雪期に融け出すことで、融雪を起因とした地すべり（融雪地すべり）が多発し、大きな被害をもたらしている。融雪地すべりは融雪水の浸透により地下水位が上昇し、すべり面に作用する間隙水圧が上昇することで発生する（図1-1）。融雪地すべりの発生に伴う亀裂や段差等の地表面の変状が発見されると、地すべりの移動状況の監視を開始し、移動が加速してきた場合に避難が行われる。そのため、融雪地すべりの被害の防止・軽減には、融雪地すべりに伴う地表面の変状が発生する可能性の高い期間・場所を特定し、早期警戒につなげることが重要であるが、早期警戒指標や基準の設定手法は確立されていないのが現状である。融雪地すべりに特化した水文指標に基準値を設けることで地すべり発生を捕捉する試みがこれまで行われてきた（中谷ら，2008；Touhei et al，2016）。中谷ら（2008）はダム流入量，Touhei et al（2016）は河川水位・流量を水文指標として用い、要警戒期間を設定することで地すべり災害の7割を捕捉できるとしている。しかし、これらの水文指標は灌漑や発電の取排水等の人為的な影響を受ける地域への適用が難しい上に、取排水などの影響を受けない観測箇所が限られているために広域的に適用するには不十分である。また、中谷ら（2008）はダム流入量を20~30 km四方程度の広がり度で地すべりの発生と対応する指標として用いているが、融雪地すべり発生危険性が高まっている場所の特定が困難な上、標高などにより異なる気象状況の違いを考慮できないと考えられる。したがって、降水量など面的に得られる気象データから算定可能な指標が早期警戒指標として有効である。そうした気象データから融雪による災害発生の危険性を判断する指標として現在、気象庁により融雪注意報が運用されている。融雪注意報とは、融雪による洪水・浸水・土砂災害などの災害が発生する恐れがあると判断されたときに発表される警戒指標である。しかし、融雪注意報は市町村単位で発表されるため、融雪地すべり発生危険性が高まっている場所の特定が依然として困難な上、融雪注意報の発表基準は日射量といった放射収支に関する要素を考慮していないため、寒暖差の激しい日や純放射量が多いなど発表基準を満たして

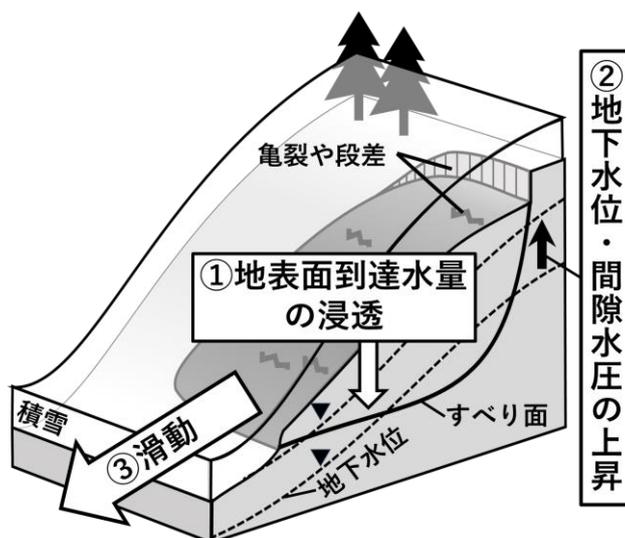


図 1-1 融雪地すべりの発生機構

いない場合でも融雪地すべり発生の危険性が高い日があることが指摘されている（井良沢ら，2011）。近年，数値予報モデルの高度化により，時間解像度が1時間，空間解像度が1~10 kmのメソスケール気象データが運用されており，日射量を含む全国各地の気象要素を高解像度で面的に把握することが可能となっている。このようなメソスケール気象データは融雪地すべり早期警戒指標を設定する上で非常に有効なデータセットであるといえる。また，降雨量から算定される斜面内部の水分状態を表すような各種水文指標と地すべり移動量との対応関係の検証がこれまで日本各地で行われてきた。その結果，地すべりの滑動と良好な関係にあることが報告されている（たとえば榎田ら，2002）。全国各地で入手可能な気象データから算定可能な水文指標は，警戒指標としての適用性が高く，融雪の影響を考慮することができれば融雪地すべり警戒指標として適用が可能であると考えられる。

以上を踏まえて，本事業では，メソスケール気象データから算定可能な地すべりの滑動と良好な相関が報告されている水文指標に基づき，広域的な融雪地すべり早期警戒手法の提案を行うことを目的とした。

2 地表面到達水量推定モデルの開発

気象庁が提供するメソスケール気象データ（解析雨量・メソ数値予報モデル・DSJRA-55）を用いて，地表面に到達する融雪水も含めた全水量（地表面到達水量 MR ）を，積雪深，積雪水量とともに1時間単位で推定するモデル（ MR 推定モデル）を構築した。積雪地域における降水は積雪層の形成とその後の融解など様々な過程を経て，時間的な遅れや強度の変化を伴い地表面に到達することから， MR 推定モデルでは，降水過程，積雪・圧密過程，融雪過程，浸透過程の4つの過程を考慮する（図2-1）。降水過程では，気温と相対湿度に基づい

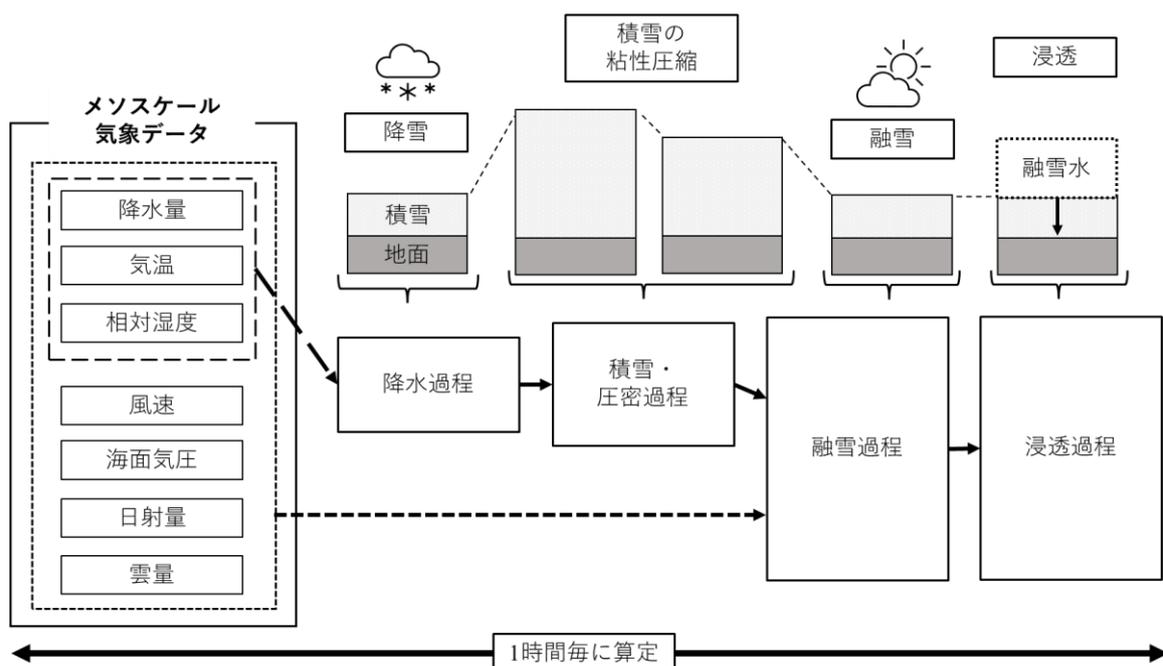


図 2-1 地表面到達水量（ MR ）推定モデルの概要

表 2-1 メソスケール気象データの概要

データ	気象要素	格子間隔	時間間隔	配信期間
DSJRA-55	気温, 降水量, 相対湿度, 風速, 気圧, 日射量, 下向き長波放射量	約5km	1h	1958~2012年
MSM	気温, 降水量, 相対湿度, 風速, 気圧, 雲量, 日射量	約5km	1h	2006年3月~
解析雨量	降水量	約1~5km	0.5~1h	1988年4月~

て降水形態を雨か雪に判別する。積雪・圧密過程では、積雪層が自重及び上載荷重によって圧密されると仮定し、粘性圧縮理論に基づいて積雪深を推定する。融雪過程では、熱収支法を用いて斜面の勾配や方位を考慮しながら融雪水量を推定する。熱収支法とは積雪層に出入りする日射量等の放射収支を含む熱収支成分を算定し、その残差から融雪水量を求める手法である。浸透過程では積雪層を一つのタンクに見立て、積雪層内の貯留や流出過程を積雪深によってパラメタライズした貯留関数モデルに基づきMRを推定する。最後に、1時間前の積雪水量にその1時間の降水量を加え、MRを減ずることで、積雪水量を計算する。本モデルで用いる気象要素は、降水量および気温、相対湿度、風速、大気圧、日射量、雲量であり、いずれもメソスケール気象データから把握することが可能である(表-1)。また、メソスケール気象データの空間的な解像度は少なくとも5 km、時間的な解像度は1時間となっており日本全域を網羅している(表2-1)。したがって、メソスケール気象データに標高補正等を行うことで任意の地点の地表面到達水量を推定することが可能である。MR推定モデルを新潟県妙高市土木研究所雪崩・地すべり研究センター内の積雪観測所(図2-2)に適用し、積雪観測結果と比較することでモデルの妥当性を評価した。積雪観測所では2017-18年から2020-21年の冬期に斜面ライシメータによるMRの観測(図2-3)およびスノー



図 2-2 土木研究所雪崩・地すべり研究センターの位置



図 2-3 斜面ライシメータ(土木研究所雪崩・地すべり研究センター内)

サンプラーによる積雪水量および積雪深の観測が実施されている。積雪水量および積雪深は降水量と地表面到達水量の収支などを反映しているため、MR推定モデルの妥当性を判断する上で有効な指標となると考えられる。斜面ライシメータによりMRを精度よく観測できた2020-21年の冬期におけるMRの観測値とMR推定モデルの計算値の経時変化を図2-4に示す。2020-21年の冬期におけるMRの平均絶対誤差（MAE）は0.47 mm/h、平均平方二乗誤差（RMSE）は0.98 mm/hであった（表2-2）。2017-18年から2020-21年の冬期における積雪水量および積雪深の観測値とMR推定モデルの計算値の経時変化を図2-5にそれぞれ示す。2017-18年から2020-21年の冬期における積雪水量のMAEおよびRMSEはそれぞれ67.9 mm、89.5 mmとなり、積雪深のMAEおよびRMSEはそれぞれ0.13 m、0.18 mであった（表2-2）。MRおよび積雪水量、積雪深を過大・過小評価する期間も見受けられるものの、年ごとの積雪の多寡に関わらず、MR推定モデルの計算値は観測値を精度よく再現していることが示された。また、MR推定モデルの妥当性のさらなる検証のため、従来のMR推定手法である積算暖度法との比較を行った。積算暖度法は気温に融雪係数を乗じることで融雪水量を求める手法であり、融雪水量と降雨量を合算することでMRを簡便に求められることから、多くの地すべり地において適用されてきた。融雪係数は日本での代表的な値（0.25 mm/h/°C）

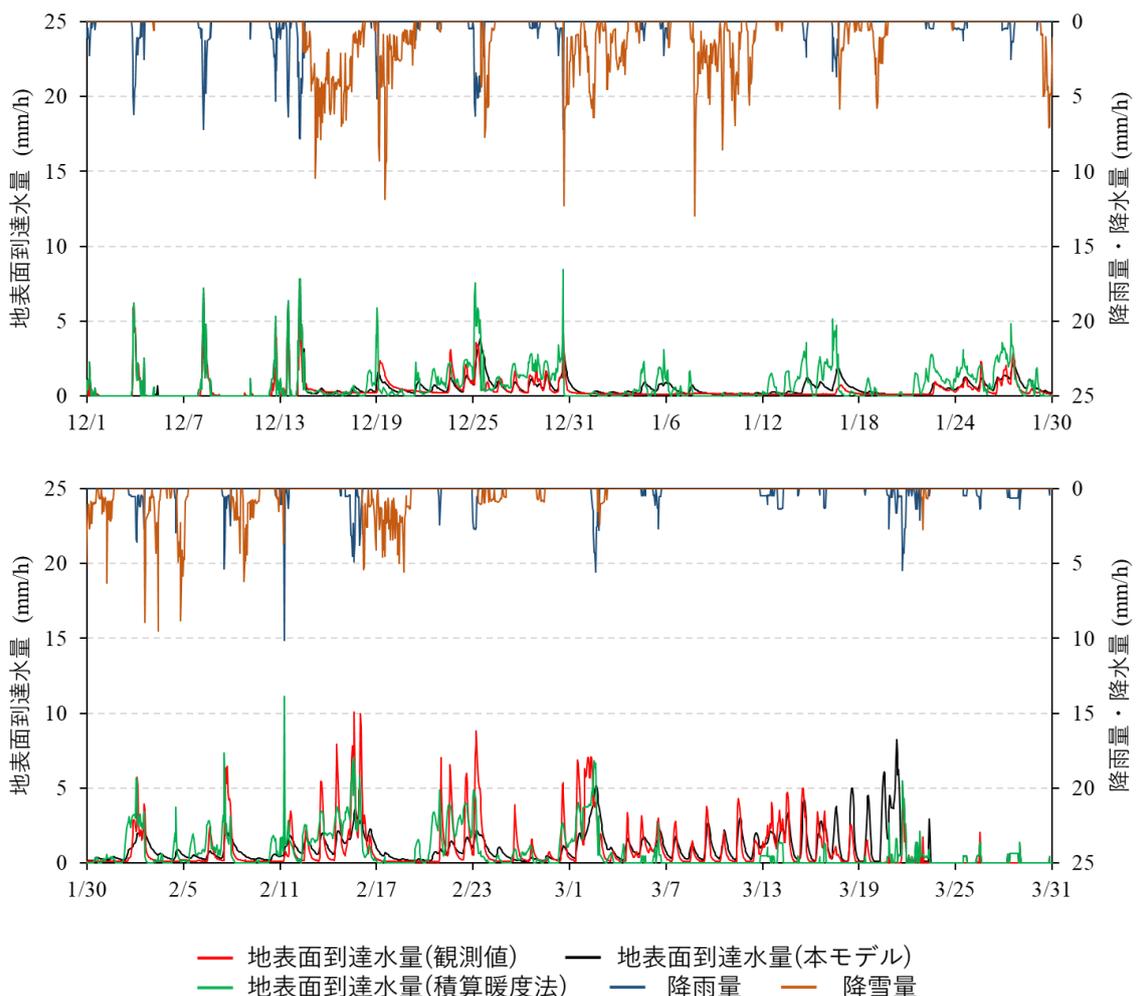


図 2-4 地表面到達水量および降水量，降雪量の経時変化（2020/12/1 から 2021/3/31）

を用いた。2020-21年の冬期における積算暖度法のMRの計算値の経時変化を図2-4に示す。2020-21年の冬期におけるMRのMAEは0.47 mm/h, RMSEは0.65 mm/hであった(表2-2)。2017-18年から2020-21年の冬期における積雪水量および積雪深の観測値と積算暖度法の計算値の経時変化を図2-5にそれぞれ示す。2017-18年から2020-21年の冬期における積雪水量のMAEおよびRMSEはそれぞれ144.5 mm, 208.2 mmとなった(表2-2)。MR推定モデルと積算暖度法の計算値を比較するとMR推定モデルの方が観測値を精度良く再現していた。このことからMR推定モデルは、熱収支や積雪貯留効果を考慮することで、メソスケール気象データからMRや積雪水量、積雪深をより精度よく推定できると言える。

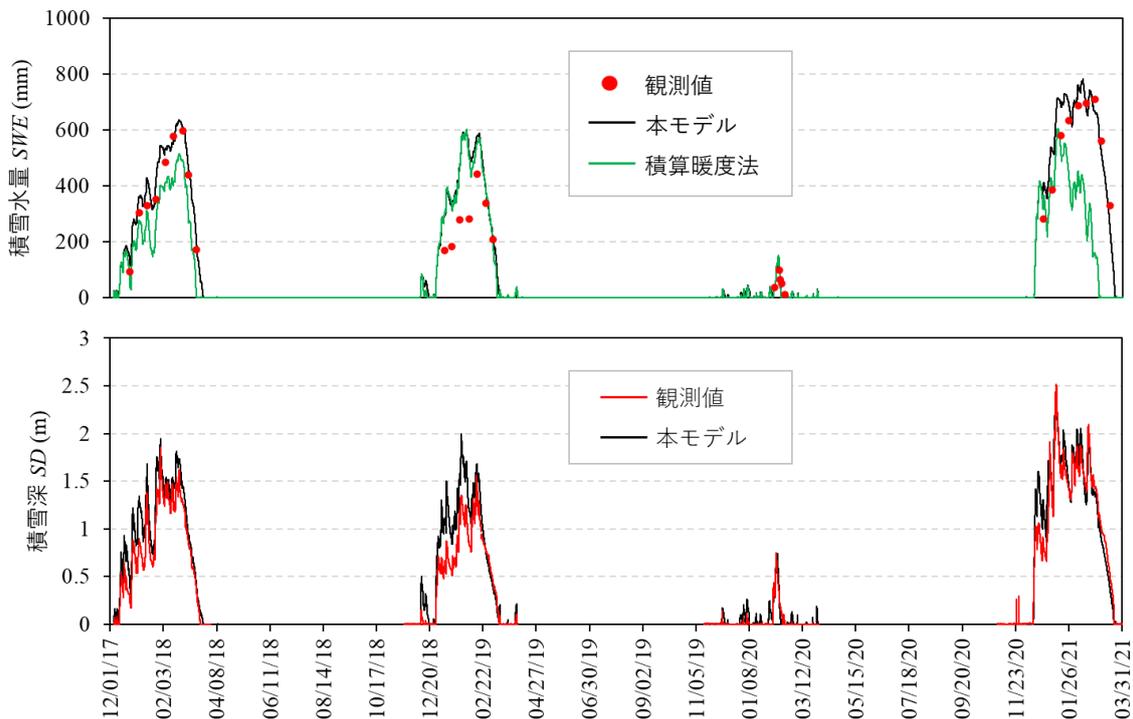


図 2-5 積雪水量の経時変化 (2017/12/1 から 2021/3/31)

表 2-2 MR 推定モデルの適用結果

Period	地表面到達水量 (mm/h)		積雪深 (m)		積雪水量 (mm)		
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	
	本モデル	2020-21	0.47	0.98	0.13	0.18	74.2
	2017-21	—	—	0.14	0.20	67.9	89.5
積算暖度法	2020-21	0.65	1.12	—	—	271.6	339.9
	2017-21	—	—	—	—	144.5	208.2

MAE：平均絶対誤差, RMSE：平均平方二乗誤差

3 融雪地すべり警戒指標および基準の検討

既往の融雪地すべり発生事例を解析することにより、水文指標に基づく融雪地すべり警戒指標および基準の検討を行った。本研究では、地すべりの滑動と相関の良い水文指標として多くの地すべり地で適用事例のある実効雨量を用いた（たとえば榎田ら，2002；神谷，2019）。実効雨量は降雨量から算定される半減期をパラメータとして斜面内部の水分状態を表す水文指標である。本研究では実効雨量の計算式における降水量の代わりに MR を用いることで実効 MR として算定した。対象地は日本有数の豪雪地帯かつ地すべりの多発地帯として知られる新潟県上越・中越地方である（図3-1）。解析の対象とする地すべり発生事例は、1988年～2021年の3～5月に発生し、発生日・発生場所（地すべり防止区域名）が特定可能な416事例である。なお、発生日とは、地すべりを起因とした地表面の変状が発見され、監視が必要と判断された日を指す。また、地すべり防止区域とは地すべり等防止法により指定され、過去の地すべりの痕跡がみられるなど地すべり発生の恐れが大きく、一定の行為の制限やハード対策が必要と判断された区域である。解析対象事例が発生した地すべり防止区域の平均面積は 0.68 km^2 であった。地すべり防止区域の重心座標を当該地すべり防止区域の代表地点とし、その地点の標高は基盤地図情報数値標高モデル(10 mメッシュ)による当該地すべり防止区域内の平均値とした。解析対象事例が発生した地すべり防止区域の平均標高と面積の度数分布を図3-2および図3-3にそれぞれ示す。解析対象事例が発生した地質の多くは第三紀堆積岩に分布していた（図3-1）。代表地点に対し、メソスケール気象デ

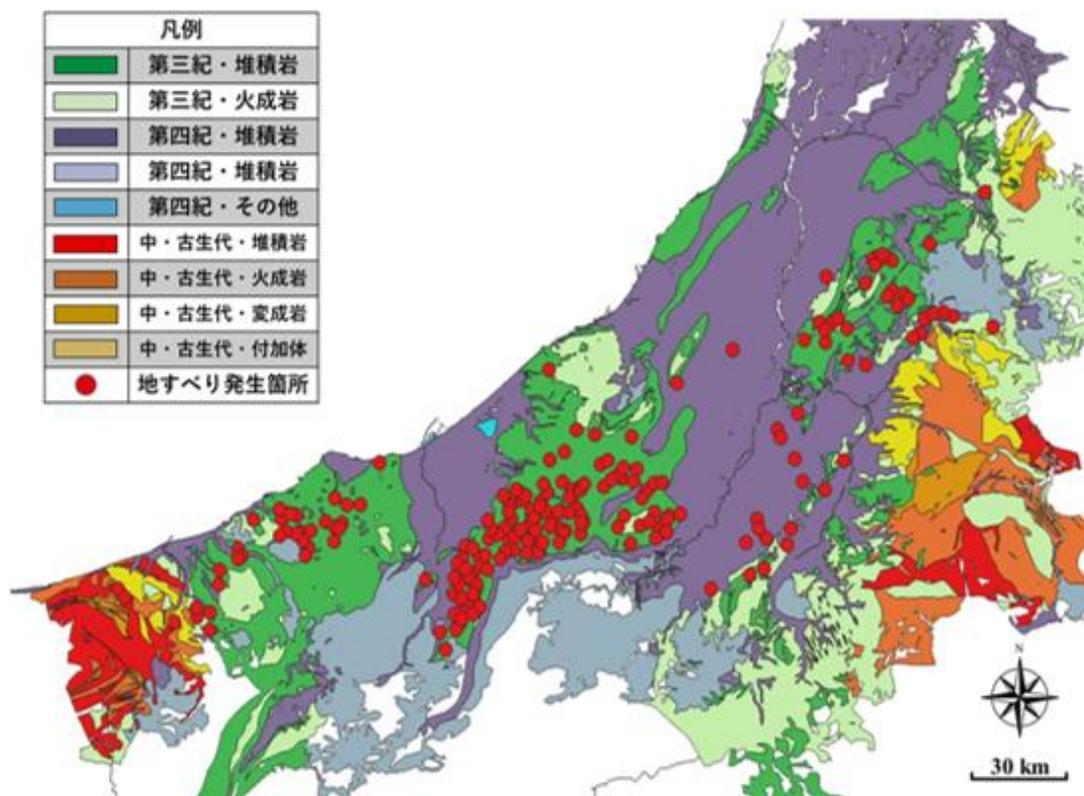


図 3-1 研究対象地

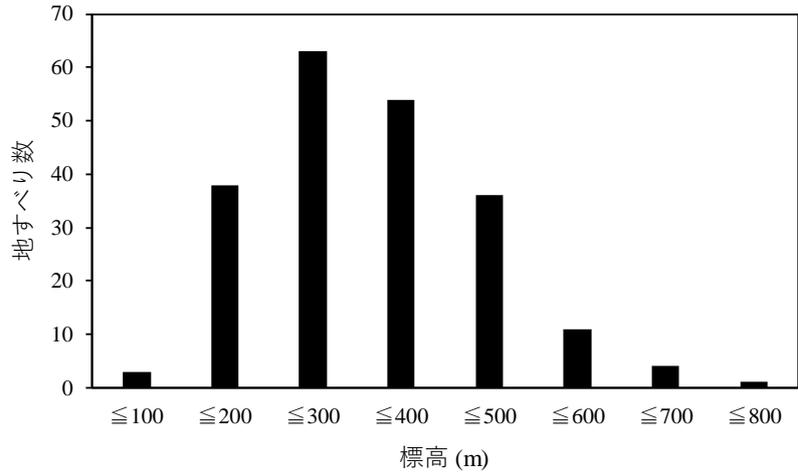


図 3-2 地すべり防止区域の平均標高の頻度分布

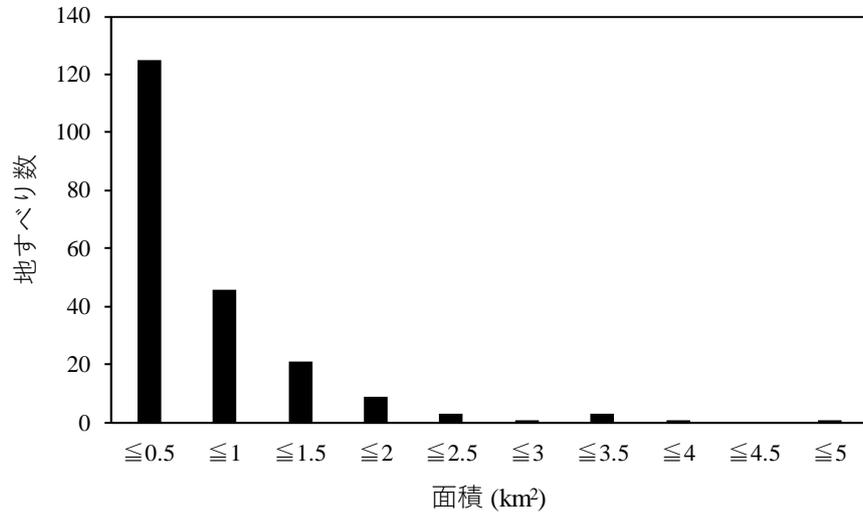


図 3-3 地すべり防止区域の面積の頻度分布

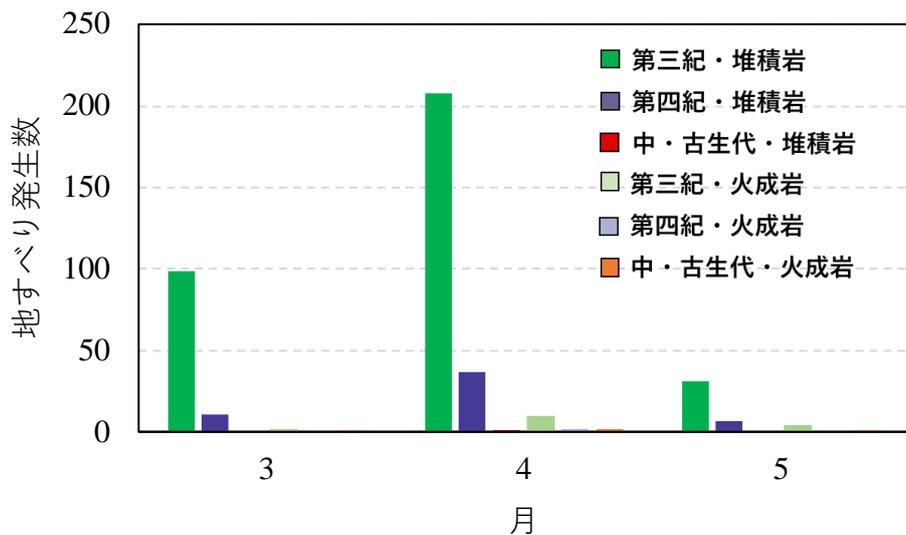


図 3-4 地質・月別の地すべり発生数の頻度分布

一タを標高補正等した上でMR推定モデルを適用し、様々な半減期(1, 3, 6, 12, 24, 48, 120, 240, 480, 960時間)の実効MRを1時間ごとに算出した。続いて異なる半減期における実効MRを比較するために、実効MRの標準化を行い、標準得点を1時間単位で地すべり防止区域ごとに求めた。本研究では、現在豪雨に伴う土砂災害に対する警戒避難基準として広く運用されている土砂災害警戒情報の捕捉率と同等程度にするために、対象とした地すべり発生事例の7割を捕捉する標準得点を早期警戒基準、標準得点が早期警戒基準を超過した期間を地すべり早期警戒期間として設定した。そして地すべり早期警戒期間が最も短くなる半減期を早期警戒基準に用いる最適半減期として求めた。各半減期における標準得点の頻度分布を図3-4a-jにそれぞれ示す。図3-4a-j中の頻度（全期間）とは全地すべり防止区域での全対象時間のうち全地すべり防止区域でのある階級の生起時間数の割合であり、頻度（発生時）とは全地すべり発生数のうちある階級での地すべり発生数の割合を表す。頻度（全期間）に着目すると、半減期が大きくなるほど徐々に右側に偏った分布に変化していることが分かる。一方で頻度（発生時）は半減期1時間から半減期240時間までは右に偏った分布に徐々に変化しているが、半減期240時間より大きくなると左に偏った分布に変化していた。また、早期警戒基準の値は半減期240時間で最大値1.00となっていた。融雪地すべり警戒指標としては、捕捉率を確保すると同時に地すべり早期警戒期間を短くする必要がある。頻度（発生時）の分布中心が右寄りであり、また、頻度（全期間）の分布中心が左寄りであるほど、地すべり早期警戒期間が短くなる。各半減期における頻度（全期間）および頻度（発生時）の歪度を図3-5に示す。歪度とは、分布が正規分布からどの程度歪んでいるか表す統計量であり、右に偏った分布であるほど小さな値となる。図3-5から半減期が大きくなるにつれて頻度（全期間）における歪度は減少率していた。一方で、頻度（発生時）における歪度は半減期240時間で最小の値となっており、半減期240時間になるまでの減少率は、頻度（全期間）と比べて大きくなっていた。したがって、統計的に最適半減期は240時間であると考えられる。各半減期における早期警戒基準と地すべり早期警戒期間を表3-1に示す。その結果、最適半減期240時間、早期警戒基準1.00が得られ、そのときの地すべり早期警戒期間は年平均25.8日であった。この結果は、表層崩壊や土石流に対する警戒指標（たとえば、半減期72時間の実効雨量）と比べて、融雪地すべりに対する警戒指標ではより長期間にわたる積算的なMRの影響を考慮する必要があることを示している。一冬期の間にも多くの融雪地すべりが発生した地すべり防止区域における地表面到達水量および最適半減期の実効MRにおける標準得点の経時変化を図3-7に示す。図3-7から標準得点は地表面到達水量の増加に伴い大きな値をとるようになり、標準得点のピークは消雪直前の融雪末期と概ね一致していた。また早期警戒基準によってすべての地すべりの発生を捕捉できていた。本手法の適用性のさらなる検証のため、対象地内で特に地すべり発生事例が多い上越市・妙高市・十日町市について、本手法による融雪地すべりの捕捉率（各市で発生した地すべり事例のうち、当該地すべり事例が発生した地すべり防止区域における地すべり早期警戒期間に当該事例が発生した割合）・地すべり早期警戒期間（各市に位置する全地すべり防止区域における早期警戒期間を平均した値）を融雪注意報の捕捉率・発表日数と比較した。その結果、いずれの市においても本手法は融雪注意報より捕捉率が高い（3市平均で17.9%）一方で地すべり要警戒期間は短く（3市平均で年平均6.1日）、融雪地すべり早期警戒手法として有用であることが示された。

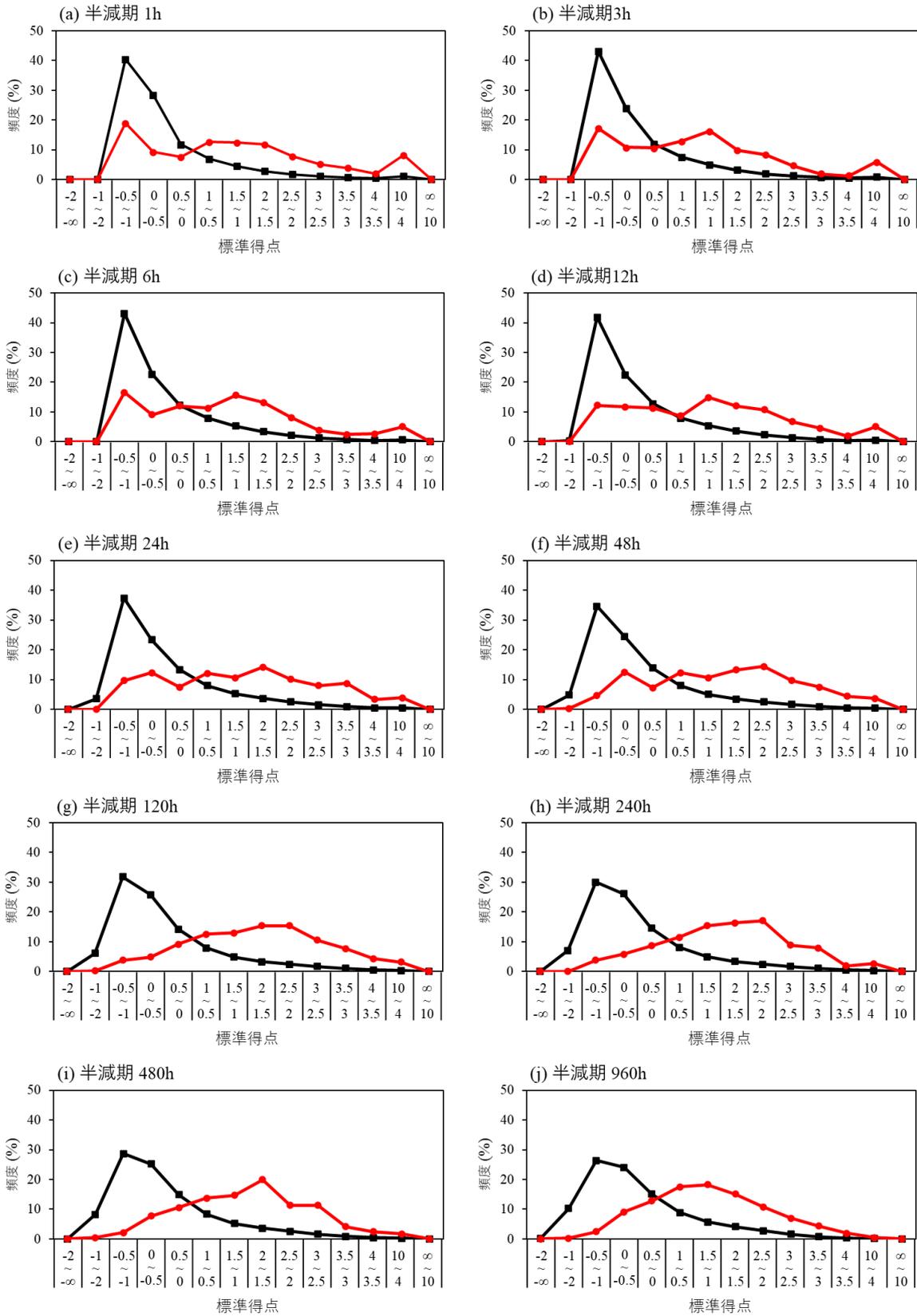


図 3-5 標準得点の頻度分布

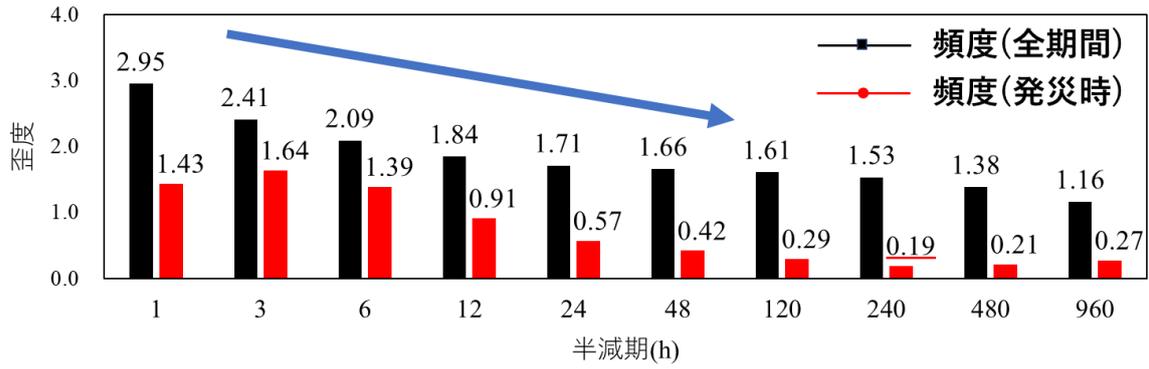


図 3-6 標準得点の頻度分布

表 3-2 標準得点の頻度分布

半減期 (h)	SS_{70}	地すべり要警戒期間 (day/year)
1	0.12	50.1
3	0.09	55.1
6	0.16	53.8
12	0.29	49.2
24	0.54	39.6
48	0.75	32.3
120	0.97	26.4
240	1.00	25.8
480	0.89	29.3
960	0.66	38.0

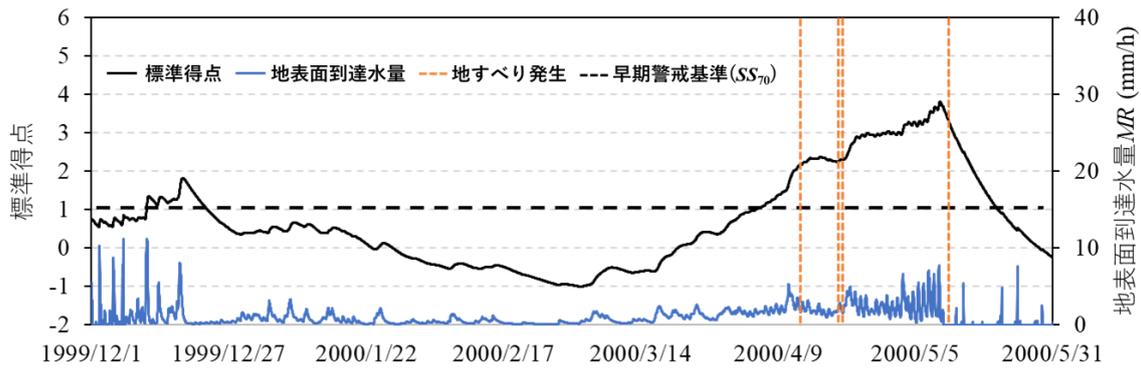


図 3-7 標準得点および地表面到達水量の経時変化（1999/12/1~2000/5/31）

表 3-2 標準得点の頻度分布

	対象地域	捕捉率 (%)	要警戒期間 (day/year)
融雪注意報	上越市	30.4	27.0
	妙高市	61.5	38.6
	十日町市	75	29.8
	平均	55.7	31.8
本研究	上越市	62.2	25.7
	妙高市	70.5	25.2
	十日町市	88.2	26.2
	平均	73.6	25.7

4 結論

本研究では、はじめにメソスケール気象データに基づくMR推定モデルの構築を行い、熱収支や積雪貯留効果を考慮することで積算暖度法より精度の良いモデルを構築した。そしてMR推定モデルと実効雨量を用いて融雪地すべり発生事例を解析することで実効MRに基づく融雪地すべり早期警戒指標及び基準を設定した。以上から、個々の地すべり防止区域に対し、メソスケール気象データを標高補正等した上でMR推定モデルによりMRを計算し、半減期240時間の実効MRを標準化した標準得点が1.00を超過している期間を地すべり早期警戒期間として設定する手法を提案することができた。本手法は、融雪注意報より早期警戒期間が短い上、地すべり防止区域単位で融雪地すべり発生の危険性が高まっている場所を特定可能であることから、融雪注意報より高精度かつ高解像度な早期警戒手法であることが示された。地すべり早期警戒期間は融雪地すべりに伴う地表面の変状が発生する可能性が高い期間であるため、本手法により該当の地すべり防止区域が早期警戒基準を超過した場合に巡視点検を行い、地表面の変状を発見したらただちに地すべりの移動状況の監視

を開始するなど、融雪地すべりに対する早期警戒に活用できる。今後、融雪地すべり警戒指標および基準のさらなる検証を行うことで、事前の警戒避難などソフト対策の面から被害軽減が期待でき、流域の安全度の向上を後押しできると考えられるほか、本手法におけるMR推定モデルは、多目的ダムにおける融雪期の利水容量や洪水調節容量の調節など、治水・利水への活用も期待できる。

謝辞

本研究の利用した気象データセットは気象庁により提供されたものです。また、国立研究開発法人土木研究所雪崩地すべりセンターには、積雪観測データの提供とともに融雪地すべり警戒指標に関して議論頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1. 榎田充哉・福田睦寿・清水洋・福井理作・市川仁士・岸原信義（2002）：水文諸量の時系列解析手法に関する検討（2）－2変量時系列解析手法の提案－，水文・水資源学会誌，Vol.15,No.1,pp.23-38.
2. 井良沢道也・窪寺洋介・角田皓史（2011）：土砂災害の減災の観点から見た融雪注意報に関する検討，岩手大学農学部演習林報告，42,pp.97-109.
3. 神谷規夫（2019）：地すべり変位速度と孔内水位・タンクモデル貯留高間の指数関数的相関関係を示す一事例の研究，日本地すべり学会誌，Vol.54,No.3,pp.25-31.
4. M. Touhei, T. Toriumi, S. Katsura, Y. Ishii（2016）：Examination of hydrological indices for predicting landslides in regions with heavy snowfall, The 12th International symposium on landslides, Naples, Italy, pp.1921-1924.
5. 中谷洋明・丸井英明・向井啓司・片山弘憲（2008）：北陸地方における地すべり発生に関係する広域水文指標の検討，地すべり，Vol.44,No.5,pp.302-312.