



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Development of Early Warning Method for Snowmelt-Induced Landslides Based on Mesoscale Meteorological Data [an abstract of entire text]
Author(s)	松永, 隆正
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第15773号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92634
Type	doctoral thesis
File Information	MATSUNAGA_Takamasa_summary.pdf



学 位 論 文 内 容 の 要 約

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名 松永 隆正

学 位 論 文 題 名

Development of Early Warning Method for Snowmelt-Induced Landslides Based on Mesoscale Meteorological Data

（メソスケール気象データに基づく融雪地すべり早期警戒手法の提案）

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。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。これまで、河川水位やダム流入量を早期警戒指標として用いる手法が提案されてきたが、これらの指標は観測箇所が限られている上、取排水等の人為的な影響を受ける地域への適用に課題があるため、広域的な運用は困難である。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。しかし、融雪注意報は市町村単位で発表されるため、融雪地すべり発生の危険性が高まっている場所の特定が困難な上、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、基準を満たして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。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1~5km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。そこで本研究では、メソスケール気象データを用いた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。

上記の研究の背景や目的を述べた第一章に引き続き、第二章では、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。降水過程では、気温・相対湿度に基づき雨雪判別を行う。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粘性圧縮理論に基づき積雪深を推定する。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モデル化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。 MR 推定モデルを新潟県妙高市内の積雪観測所に適用し、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 の観測およびスノー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。観測値と MR 推定モデルの計算値を比較した結果、年ごとの積雪の多寡に関わらず、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を用いた。 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。

地すべり地の地下水位変動は地すべりの発生と密接な関係があるため、 MR 推定モデルによる MR から地下水位変動を再現できれば、融雪地すべり早期警戒手法の提案に有効である。そこで第三章では、 MR から算定可能な水文指標である実効雨量法により、積雪地域の地すべり地における地下水位変動を MR から再現できるか検証した。実効雨量法は半減期をパラメータとして斜面内部の水分状態を表す実効雨量に基づき地下水位変動を再現する手法である。対象地は北海道芦別市野花南地区の地すべり地であり、地質は斜面上部が砂岩泥岩互層、下部が頁岩である。対象地における 2 か所の観測孔に圧力式水位計を設置し、2016 年 11 月 16 日から 2017 年 4 月 30 日まで 1 時間ごとに地下水位を観測した。まず、 MR 推定モデルを本地区に適用し、計算された積雪深、積雪水量をスノーサンプラーにより測定した積雪水量及び積雪深の観測値と比較した。その結果、本地区においても MR 推定モデルの精度は高いことが確認された。融雪の影響を考慮するために実効雨量の計算式において降雨量の代わりに MR を用いることで実効 MR を算出した。そして、実効 MR と地下水位の間に直線関係を仮定し、単回帰分析により観測地

下水位を最もよく再現する半減期および回帰直線の切片及び傾きをそれぞれ求めた。その結果、実効雨量法による地下水位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。したがって *MR* 推定モデルと実効雨量法を組み合わせることでメソスケール気象データから地すべり地の地下水位変動を再現できることが示された。ただし、既往研究や本研究の結果を整理したところ、地質等の情報から半減期を決定することは困難であった。これは地すべり斜面によって褶曲や断層などの地質構造や風化の程度が異なるためであると考えられる。この結果は、実効 *MR* を融雪地すべり早期警戒指標へ活用するには、多数の融雪地すべりの発生状況と様々な半減期の実効 *MR* を比較し、最も対応の良い半減期を設定する必要があることを示している。

以上を踏まえ、第四章では既往の融雪地すべり発生事例を解析することにより、実効 *MR* に基づく融雪地すべり早期警戒指標および基準の設定を行った。対象地は日本有数の豪雪地帯かつ第三紀層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。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。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。代表地点に対し、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。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。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、本手法の捕捉率は 3 市平均で 73.6%と融雪注意報より 17.9%高い一方で地すべり早期警戒期間は年平均 25.7 日と融雪注意報より年平均 6.1 日短い結果となった。

本研究では、二章で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。

そして第三章では積雪地域の地すべり地において実効雨量法により地下水位変動の再現を行い、実効 MR が早期警戒指標として適用可能であることを示した。そして第四章では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への活用が期待される。