

融雪期の斜面不安定化捕捉に関する検討

○JR 東日本 外狩麻子 SWR 山口英俊  
新潟大学 河島克久 伊豫部勉 松元高峰

1. はじめに

融雪期において積雪から生じる融雪水が積雪層及び地中に浸透し、残雪混じりの土砂崩壊などの斜面災害を引き起こす場合がある。この種類の災害では、降雨時及び地震時の斜面災害のような、降雨や地震観測の情報が直接的に斜面不安定化の察知に繋がる事象とは異なり、積雪残存量及び熱移入などの気象条件の複合的な影響の結果として生じる融雪水が観測情報として直接的に獲得できないことが課題である。このため、被災回避の防災対応の現状としては、残雪状況および気温の変化の日単位あるいは週単位の気象予報情報をもって、その発生の危険性を推察するに留まっている。しかしながら、融雪期における斜面崩壊などの融雪害に対する鉄道運行の安全性を考慮するためには、起因とされる融雪水をより高い時間分解能で定量的に把握する必要がある。そこで、鉄道運行判断に活用することを目的として、時間単位で適用可能な融雪水推定手法を構築し、この融雪水量推定に基づいた災害危険性の判断基準に関する検討を行っている。

本研究では、まず基幹的な実データの獲得を目的にして、積雪・融雪に関連する詳細な気象観測を実施した。これらの観測データを基に、積雪からの融雪水量を推定して地盤への積雪底面流出を算出する手法の構築を試み、これまでに、融雪水量を 10 分から 1 時間更新の時系列で推定する手法を開発している<sup>1)</sup>。積雪由来の融雪水を時系列データとして定量的に推定することができれば、融雪水を地表面へ供給される擬似的な降水量として降雨と同等に取り扱うことが可能となり、無雪期の降雨時の鉄道運行判断基準の準用が可能となると考えている。本稿では、開発した融雪水量推定手法のうち、熱収支法に基づく推定モデルによる方法を紹介し、2012/13 年冬季に発生した斜面災害事例への適用を検討した結果を報告する。

2. 観測の概要

新潟県魚沼市大白川に設営した気象観測地(標高 350m)で気象観測を実施している。融雪推定に欠かせない熱量を計測するために放射収支計、全天日射計や直達日射計による計測を、また、雨量計、雨雪判別温度計のほか、積雪底面流出量を直接的に計測する方法として融雪ライシメータによる計測を実施している(図 1)。融雪ライシメータについては図 2 の  $A_{in}=A_{out}$  の仮定を成立させるために本研究では遮水シートによるエンクローズ処理を施している。

3. 融雪水量推定手法

融雪水量推定の方法として、積雪融雪の熱収支に基づいた物理理論に則した推定手法と気象観測を基に統計的に融雪水量を推定する手法を開発した<sup>1)</sup>。ここでは前者の推定手法について述べる。

積雪融雪の熱収支に基づいた物理理論に則した推定法では、積雪表面で外環境からの熱量流入によって融解する融雪量を推定する表面融雪モデルと、その表面融雪水が積雪層内を浸透して積雪底面(=地表面)まで到達することを表現する積雪層浸透モデルの 2 段階で構成している<sup>2)</sup>。表面融雪モデルとして TR モデル(Temperature and Radiation model)を、積雪層浸透モデルとしてべき乗貯留関数モデル(積雪層内の浸透モデル)を採用し、この組み合わせによって、表面融雪水が積雪層を浸透して積雪底面から地表面への流出量の推定を行った。

TR モデルでは、熱収支法として Konya ら<sup>3)</sup>の提案式を採用し、融解熱量による表面融雪量:  $M$  を、 $T$ : 気温(°C)と  $K$ : 全天日射量(W/cm<sup>2</sup>)より、

$$M = aT + bK + c \quad (1)$$

で求める。 $a, b, c$  はパラメータである。

表面融雪量が算出されたのち、気温による雨・雪判別を実施して、降水と判別された場合はその水量の合算を行い、積雪層内を浸透して積雪底面に到達する遅延を考慮した積雪層浸透モデルで積雪底面流出量を算出する。

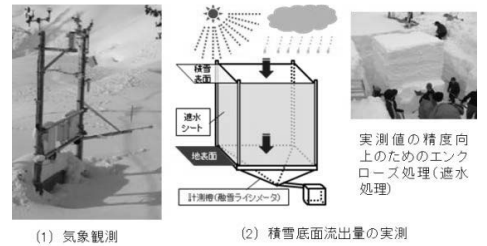


図 1 観測状況

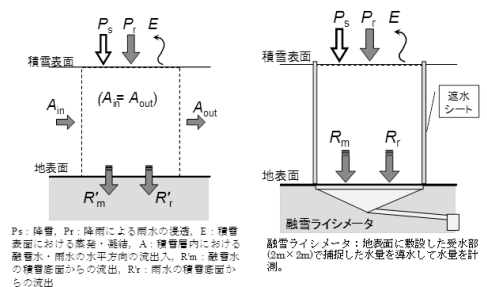


図 2 積雪層内の液体水の収支と計測方法

表 1 TR モデルの係数と推定誤差

	a	b	c	RMSE(mm/h)
2008/09冬季	0.367	9.62	-31.2	0.393
2009/10冬季	0.385	11.4	-24.7	0.473
2010/11冬季	0.302	11.8	-15.6	0.552
2011/12冬季	0.303	12.2	-23.5	0.524
2012/13冬季	0.385	10.9	-27.3	0.432
平均値	0.348	11.2	-24.5	

表 2 最適 m' と推定誤差

	最適 m' (× 10 <sup>-4</sup> )	RMSE(mm/h)
2009/10冬季	2.0	0.66
2010/11冬季	1.9	0.66
2011/12冬季	2.7	0.73
2012/13冬季	1.1	0.56
平均値	1.9	0.65

積雪層浸透モデルとして、中津川ら<sup>4)</sup>の提案した貯留モデルを参考に、べき乗貯留関数を使用して、

$$R = m' S^3 \quad (2)$$

$$dS/dt = (M + P) - R \quad (3)$$

で積雪底面流出量( $R$ )を算出する。ここで、 $R$ : 積雪底面流出量(mm)、 $P$ : 雨量(mm)、 $S$ : 貯留量(mm)、 $M$ : 表面融雪量(mm)、 $m'$ : パラメータである。

各モデルのパラメータは、2で述べた観測地での実測データを基に各式の重回帰分析などで近似して求めた。TRモデルのパラメータは、熱収支法によって求めた融雪熱量を目的変数、各時刻の気温と全天日射量の観測データを説明変数とする重回帰分析によって決定している。積雪層浸透モデルのパラメータは、融雪ライシメータ実測値を真値と仮定して、期間中のRMSEが最小となる最適値を求めている。表1及び表2に各冬季で求めたパラメータと推定誤差を、図3に2012/13冬季の融雪ライシメータ実測値と推定値の時系列を示す。表1の推定誤差は表面融雪における推定誤差、表2の推定誤差は表面融雪の誤差を包括した積雪底面流出における推定誤差となる。

### 3. 災害事例への適用の試み

2013年4月6日に新潟県妙高市の鉄道沿線(標高443m)で融雪水が起因と思われる土砂災害(推算崩壊土量約50m<sup>2</sup>)が発生した。この災害事例を対象に、融雪水量推定による積雪底面流出量の試算を行った。

融雪水量推定に必要な観測データ(日射量、気温、降水量)の時系列情報のうち、気温は沿線観測データを使用した。降水量については、近隣の気象庁アメダスの降水量を推定対象地点に距離補完をおこなった推定雨量<sup>5)</sup>を使用した<sup>6)</sup>。積雪底面流出量の推定値及び24時間積算雨量を図4に、また、推定値から算出した雨量指標値(実効雨量、48時間積算雨量)を図5に示す。共に、災害発生時刻を点線で加筆している。融雪による地表面への供給水量の強度は弱い、累積期間の長い雨量指標、図5では半減期24時間及び48時間積算雨量値では比較的高い値へと移行する増加傾向が4月に認められている。この2つの指標値で、災害発生時が試算対象期間中のピークとはならないが、災害発生時以前の期間中に経験していない高い数値を示していると解釈することはできる。

冬季から融雪期にかけての対象期間での相対比較で高い雨量指標値を示しているが、通年で考えると、無雪期にこれらの雨量指標値がより高い数値を示す降雨イベントを経験している。このことを考慮すると、斜面の不安定化を捕捉するための判断基準の設定については、融雪期については無雪期(降雨期)と異なった基準の必要性が考えられ、このためには、地表面からの浸透状況等の不安定化メカニズムに関する知見が必要であると考えられる。

[参考文献] 1)外狩ら: 積雪層からの融雪水量推定手法の構築, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第15号, JSCE, ISSN137-6092, pp.183-189, 2011, 2)松元ら: 気温・日射量を指標とする表面融雪量モデルと積雪層モデルとを組み合わせた積雪底面流出量の推定, 雪氷, no.72, vol.4, pp.255-270, 日本雪氷学会, 2010.7, 3)Konya, K., et. al.: Surface heat balance and spatially distributed ablation modeling at Koryto Glacier, Kamchatka Peninsula, Russia, Geografiska Annaler, 86A, 337-348, 2004, 4)中津川ら: 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, vol.48, 37-42, 2004.2, 5)村石ら: アメダス補完法による斜面災害地雨量の推定方法, 鉄道総研報告 vol2, No8, 1988, 6)外狩ら: 解析日射量を使用した積雪底面流出量の推定, 雪氷研究大会概要集, 2013

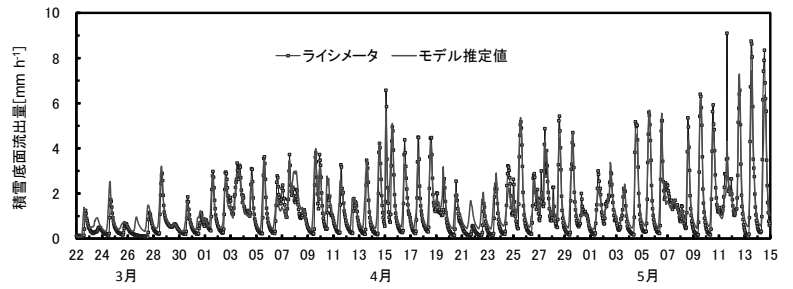


図3 融雪ライシメータ実測値と推定値の時間変化  
(2013年3月22日~5月14日)

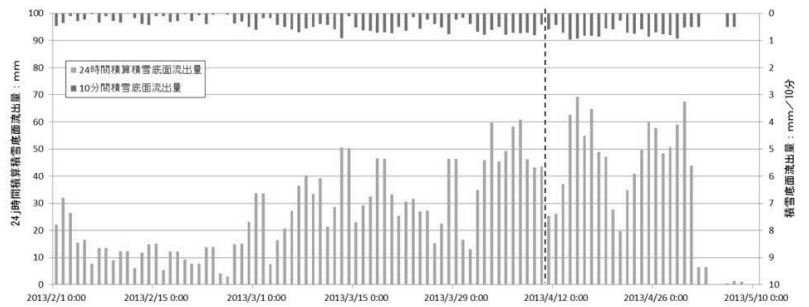


図4 推定結果: 10分間積雪底面流出量及び24時間積算値

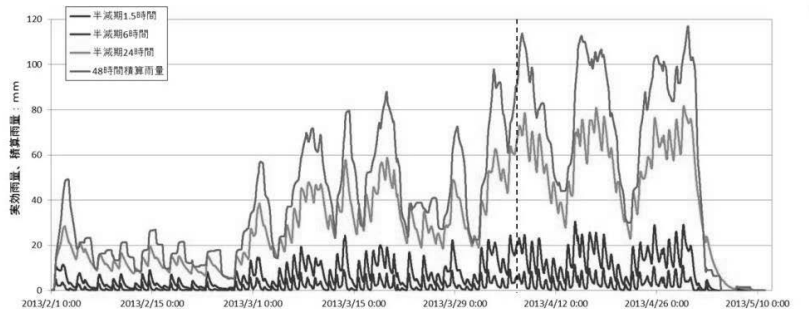


図5 融雪推定結果: 実効雨量と48時間積算雨量