

融雪水の積雪底面流出量の簡易推定方法

防災技術研究部 気象防災研究室
研究員 栗原 靖

1. はじめに

降雨や融雪水が積雪底面へ到達すると、積雪底面と地表面との間の強度が低下するため、斜面積雪は不安定化する(全層雪崩の発生危険度が高まる)ことが定性的に知られている。しかしながら、降雨や融雪水が全層雪崩の発生に及ぼす影響については未解明な部分が多く、融雪期における雪崩巡回や警備の要否判断についても経験に基づく定性的な判定に頼ってきた。こうした背景を受けて、著者らは気象データを用いた全層雪崩の発生危険度評価方法に関する研究を進めている。本発表では一連の研究の中で、斜面積雪の安定性に大きく影響を及ぼす積雪底面流出量(積雪底面から流出する降雨・融雪水量)の推定手法について紹介する。

2. 積雪底面流出量の算出方法

積雪底面流出量を求める方法には、①積雪底面流出量を直接的に測定する方法(積雪水量法¹⁾、ライシメータ法¹⁾)と②気象要素から間接的に積雪底面流出量を推定する方法(ディグリー・デー法²⁾)がある。前者の積雪水量法、ライシメータ法は積雪底面流出量を実測できるメリットを有するものの、いずれの方法も機器設置に広い用地(10m²程度)が必要である他、正確な測定を継続するためには機器の維持管理に十分な注意が必要である。そのため、これらの機器を鉄道沿線(融雪量の監視が必要となる全ての地点)へ設置することはコスト、メンテナンスの面で現実的ではない。一方、後者のディグリー・デー法は、積雪底面流出量と気温との関係に基づく経験則により、気温から積雪底面流出量を簡易に算出する方法である。この方法は、入力データの取得が容易であり、かつ前者に比べてコスト面でも優れていることから、過去には鉄道防災(全層雪崩に対する線路巡回や雪崩警備の出動基準、運転規制の発令基準)への適用が検討されている²⁾。しかしながら、ディグリー・デー法は推定値の時間分解能が日単位であり、近年の鉄道防災(特に運転規制)で求められる1時間分解能で積雪底面流出量を算出することは困難であった。

そこで本研究では、上記の課題を解決するために、積雪底面流出量を1時間単位で評価する手法を検討した。また、鉄道防災へ適用することを考えた場合、手法の入力値(気象要素)は入手が容易であることが望ましいことから、推定手法を検討する際の前提条件として、入力値は最寄りのアメダス等から容易に入手できる気象4要素(気温、降水量、風速、日照時間)とした。以上を踏まえ、本研究では積雪底面流出量を精度良く、かつ時間単位で推定するため、融雪現象を「積雪表面での融雪現象」と「融雪水の浸透現象」の2つの現象に分けて考え(図1)、気象要素および融雪量の観測結果、既往の研究成果

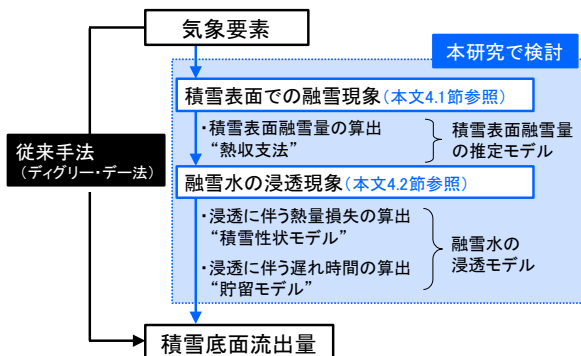


図1 積雪底面流出量の推定フロー

を踏まえて、それぞれの現象を再現するモデルを作成した。以下、各モデルの作成方法、推定結果について述べる。

3. 気象要素・融雪量の観測

積雪底面流出量の推定手法を作成するために必要な気象等のデータ、および検証用の融雪量データを入手するため、2011年度の冬期に塩沢雪害防止実験所(新潟県南魚沼市)の観測露場(平坦地)において気象要素と融雪量の観測を実施した。観測した気象要素は、気温、湿度、降水量、積雪深、風向・風速、気圧、日射(日照時間)、放射4成分である。また、積雪ライシメータを用いて積雪底面流出量を測定した。測定期間は2012年1月6日から4月25日(消雪日)までの110日間である。ここで、融雪量の観測結果の一例を示す。観測期間における累積の積雪底面流出量は1232mmであり、日最大、日最小値はそれぞれ81.6mm/d(4月23日)、0.7mm/d(3月2日)であった。また1日の中でも日照や気象状況によって融雪量は大きく変動し、例えば最大日融雪量を記録した4月23日の時間最大、最小値はそれぞれ6.9mm/h、1.2mm/hであった。このように積雪底面流出量は時期のみならず、1日の中でも大きく変化することが観測結果から明らかになった。

4. 積雪底面流出量の推定方法

4.1 積雪表面での融雪現象

積雪表面で生じる融雪量(これを「積雪表面融雪量 M_s 」と呼ぶ)は、既存の“熱収支法”を用いて算出した。熱収支法は、図2に示すように積雪表面における熱収支から融雪熱量 Q_M (M_s を求めるときに必要な熱量)を求める手法であり、各時刻における Q_M は式(1)で表現される。

$$Q_M = Q_R + Q_H + Q_L + Q_P + Q_C \quad (1)$$

ここで Q_R は正味放射量、 Q_H は顕熱輸送量、 Q_L は潜熱輸送量、 Q_P は降雨伝達熱量、 Q_C は雪中伝導熱量であり、熱収支法は推定に必要な気象要素さえ得られれば時間単位で、かつ地域に関わりなく M_s を算出可能であるものの、従来の熱収支法を鉄道防災へ適用するには入力要素(必要となる気象観測項目)が多いという課題がある。なお、各項目の計算方法は参考文献³⁾を参照されたい。

そこで本研究では、入力要素の削減を目的として、気象・融雪量の観測結果、ならびに既往の研究成果^{例えば 4)}を熱収支法の計算過程に取り込むことで、アメダス観測点等から容易に入手できる気象4要素(気温、降水量、風速、日照時間)より積雪表面融雪量 M_s を時間単位で推定可能なモデルを作成した(表1)。ここで、本研究で作成した推定モデルから求めた M_s と熱収支法から求めた M_s (これを真値とする)との相違の程度を調べるため、塩沢雪害防止実験所の観測データ(推定モデルは気象4要素、熱収支法は3章に示す気象7要素)から両者の M_s を算出し、相関分析を行った(図3)。その結果、両者の M_s は1時間あたり最大で3.3mm/hの差があるものの、決定係数は0.87と両者には強い相関があり、真値に対する二乗平均平方根誤差(RMSE)は0.5mm/hであった。

熱収支法(基本式) $Q_M = Q_R + Q_H + Q_L + Q_P + Q_C$
 Q_M : 熱収支によって得られる積雪表面における融雪熱量
 Q_R : 全天日射量, 反射量, 大気放射量, 地球放射量の総和
 Q_H : 温度の高いところから低いところへ輸送される熱量
 Q_L : 相変化に伴う熱量
 Q_P : 雨滴によってもたらされる熱量
 Q_C : 積雪層内の温度勾配によってもたらされる熱量

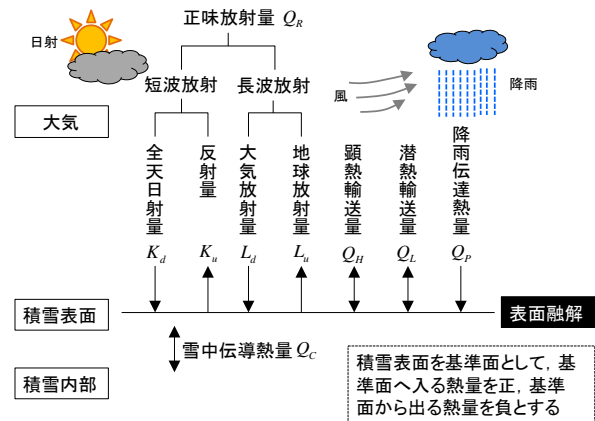


図2 熱収支法(概念図)

表 1 積雪表面融雪量の推定モデルの概要

各熱量	推定に必要な気象要素
正味放射量 Q_R	気温, 降水量, 日照時間
顕熱伝達量 Q_H	気温, 降水量, 風速
潜熱伝達量 Q_L	気温, 降水量, 風速
降雨伝達熱量 Q_P	気温, 降水量
雪中伝導熱量 Q_C	一律 $0W/m^2$ で与える

また、観測期間全体の M_s の積算値を比較すると、真値が 1202mm であるのに対して推定モデルから得られる値は 1266 mm であり、両者は概ね一致した。以上のことから、本研究で作成した推定モデルは、多くの気象要素を必要とする熱収支法で推定した値をおおむね再現できることがわかった。

4.2 融雪水の浸透現象

融雪水の浸透現象を考える場合、①積雪層内における融雪水の熱量損失(浸透量に影響)、②積雪層内での貯留効果(浸透時間に影響)を考慮する必要がある。以下に各モデルの詳細を述べる。

(1) 積雪性状モデル

積雪表面で融雪熱量 Q_M が生じたとしても、積雪層内に雪温 $0^{\circ}C$ 未満の層が存在する場合、その熱量の一部、もしくは全てが雪温の温度上昇に用いられると考えられる。そのため、厳冬期の融雪現象を評価するには、融雪熱量の損失量(以後、損失熱量と呼ぶ)を算出することが必要である(積雪全層 $0^{\circ}C$ の場合、損失熱量は 0 となる)。そこで本研究では、既往研究^{5), 6)}を参考にして気象 4 要素から積雪深、密度、雪温等の物性値を推定する“積雪性状モデル”を作成した。そして、積雪内に雪温が $0^{\circ}C$ 未満の層が存在する場合は、雪温を $0^{\circ}C$ まで上昇させるために必要な熱量(損失熱量)を算出し、これと積雪表面で受けた融雪熱量とを比較することで、正味の積雪底面流出量を求めた。

(2) 浸透モデル

浸透現象を考える上での課題の一つに、降雨・融雪水が積雪中を浸透する場合に生じる貯留効果の影響、すなわち遅れ時間の問題が挙げられる。遅れ時間とは、積雪表面で融雪が生じてから積雪底面から流出するまでの時間差のことであり、積雪底面流出量を時間単位で推定するためには、この影響を無視できない。遅れ時間を簡易に評価する方法として、近年の研究事例^{例えは 7)}では融雪水の鉛直浸透を飽和浸透と仮定して、Darcy 則から時刻 t における(遅れ時間を考慮した)積雪底面流出量 $M'_b(t)$ を表現する方法が採用されており、本研究でもこの手法を用いた。

4.3 推定精度検証

図 1 に示した推定フローに従って、4.1 節、4.2 節に示す一連のモデルから算出した積雪底面流出量 M'_b (推定値)と塩沢雪害防止実験所での融雪量観測で得られた M'_b (実測値)とを比較した。その結果、 M'_b (推定値)のピーク値およびピークの出現時間とも M'_b (実測値)と近い値を示した(図 4)。また、図 5 は観測期間全体を通して両者を比較した結果であり、両者の値は 1 時間あたり最大で 4.3mm/h の差を有するものの、実測値に対する RMSE は 0.5mm/h であり、良い相関関係にあることがわかる。加えて、本研究で積雪表面融雪量の推定モデルのみならず、融雪水の浸透モデルを作成したことにより、浸透過程を考慮しない場合(積雪表面融雪量の推定モデルのみ)に比べて、 M'_b (推定値)の RMSE が約 45% 低減したことを確認した。以上のように、本研究で提案した推定手法

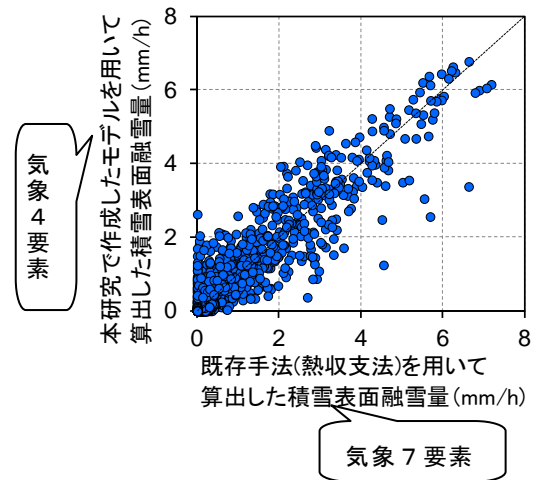


図 3 積雪表面融雪量の推定結果

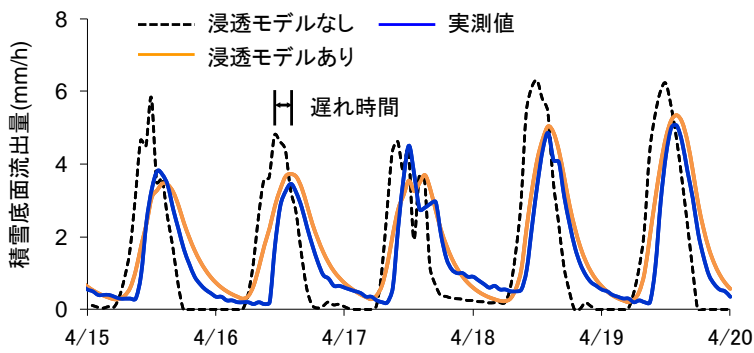


図4 積雪底面融雪量の時系列変化

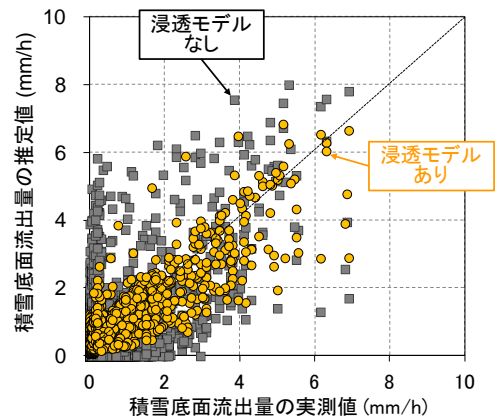


図5 積雪底面融雪量の推定結果

は、容易に入手できるアメダス観測点等の気温、降水量、風速、日照時間の気象4要素のみから積雪底面流出量を1時間単位で推定することが可能となり、既往のディグリー・デー法に比べて推定値の時間分解能が向上した。ただし、図5に示すとおり、一部には実測値を過少、過大評価している点もみられることから、雪温の推定や貯留係数の設定方法等について引き続き検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、全層雪崩の発生に影響を及ぼす積雪底面流出量の推定方法について検討した。今回提案した手法は、評価対象地点、あるいは最寄りのアメダスから容易に入手できる気温、降水量、風速、日照時間の気象4要素から積雪底面流出量を1時間単位で推定することができるため、鉄道防災(例えば、周辺環境等の問題で積雪底面流出量の実測が困難な地点)への適用が期待される。今後は、本手法を実際の斜面へ適用するため、斜面傾斜や方位が融雪量に及ぼす影響を評価し、その結果をモデルへ反映させることを目標にモデルの改良・拡張を図るとともに、積雪底面流出量と積雪強度について整理を進め、斜面積雪の安定性評価方法を確立させたい。加えて、融雪水が起因する土砂崩壊等への本成果の適用についても検討を進め、「融雪期の斜面管理指針」等へ本成果を反映できるように研究の深度化を図る計画である。

4. まとめ

本研究では、全層雪崩の発生に影響を及ぼす積雪底面流出量の推定方法について検討した。今回提案した手法は、評価対象地点、あるいは最寄りのアメダスから容易に入手できる気温、降水量、風速、日照時間の気象4要素から積雪底面流出量を1時間単位で推定することができるため、鉄道防災(例えば、周辺環境等の問題で積雪底面流出量の実測が困難な地点)への適用が期待される。今後は、本手法を実際の斜面へ適用するため、斜面傾斜や方位が融雪量に及ぼす影響を評価し、その結果をモデルへ反映させることを目標にモデルの改良・拡張を図るとともに、積雪底面流出量と積雪強度について整理を進め、斜面積雪の安定性評価方法を確立させたい。加えて、融雪水が起因する土砂崩壊等への本成果の適用についても検討を進め、「融雪期の斜面管理指針」等へ本成果を反映できるように研究の深度化を図る計画である。

参考文献

- 1) 日本雪氷学会北海道支部編：雪氷調査法，北海道大学図書刊行会，pp.137-152，1991
- 2) 河島克久，飯倉茂弘，杉山友康，遠藤徹，藤井俊茂：鉄道防災に適用可能な日融雪量の簡易推定方法，雪氷，Vol.64，No.6，pp.605-615，2002
- 3) 栗原靖，宍戸真也，飯倉茂弘，高橋大介，鎌田慈：融雪水の積雪底面流出量の推定手法，鉄道総研報告，Vol.27，No.11，pp.29-34，2013
- 4) 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—，朝倉書店，1994
- 5) 遠藤八十一，小南裕志，山野井克己，竹内由香里，村上茂樹，庭野昭二：降水量データから積雪深と密度を推定する方法，雪氷，Vol.66，No.1，pp.17-25，2004
- 6) 水津重雄：激しい降雪による乾雪表層雪崩危険度モデル，雪氷，Vol.64，No.1，pp.15-24，2002
- 7) 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，Vol.48，pp.37-42，2004