

任意地点の融雪量推定方法の開発

飯倉 茂弘* 佐藤 亮太* 高橋 大介*

Development of Estimation Method for Run-off from the Bottom of Snow at Any Point using AMeDAS Data

Shigehiro IIKURA Ryota SATO Daisuke TAKAHASHI

A method for estimating a run-off from the bottom of snow at any point in the snow melt season is proposed using AMeDAS data. In this method, meteorological elements at any point are estimated using the IDW (Inverse Distance Weighting) method, and the estimated values are input to an estimated model of a run-off from the bottom of snow to estimate the amount of snowmelt. As a result of the analysis, we found that the amount of run-off from the bottom of snow can be roughly estimated at any point near a meteorological station (usually within 20 km).

キーワード：融雪水，融雪災害，斜面積雪

1. はじめに

斜面に積雪がある状況において、融雪水や雨水が斜面の積雪内を浸透することで地表面付近の積雪が不安定化したり、また地中に浸透することで地盤表層が不安定化したりすることがある。このため、融雪が進行し、かつ雨による降水の割合が多くなる融雪期には、融雪水に起因する全層雪崩や斜面崩壊の危険性が高まる。

近年、鉄道の沿線斜面においても、降雨が引き金と考えられる斜面表層の崩壊が融雪期に発生している¹⁾。このため、多雪地域に路線をもつ一部の鉄道会社では、斜面崩壊などによる重大な運行障害を未然に防ぐために、融雪期には線区ごとに雨量規制（雨量値によって運転速度を制限したり、運転を抑止したりする対策）の値を厳しい値（小さめの値）に設定したり、気温などを指標とした巡回警備をするなど、融雪水に起因する災害を考慮した安全対策を実施している。このような融雪災害が危惧される鉄道の沿線斜面の多くは山間地であり、標高、斜面方位や傾斜などが多様である。これにより、同じ線区内においても、場所によって気温や日照といった融雪現象に影響する気象要素に差異が生じている可能性が高く、さらに気象観測を行っている箇所から離れていることが多い。

著者らは、斜面方位など地形的な要素を考慮した融雪量（以下、底面流出量）の推定モデル²⁾³⁾⁴⁾を鉄道沿線の任意地点で使用することを想定し、任意地点の底面流出量の推定値の再現性を確認するための気象・融雪観測を実施した。気象・融雪観測は周囲の気象庁観測点から約13~23km離れた2地点で実施し、熱収収支に必要な気象要素およびライシメータ法（積雪の底面に集水容器

を設置して積雪底面から流出する融雪量を直接測定する方法）による底面流出量の実測値を取得した。

本報告では、2地点で取得した気象要素の実測値および底面流出量の実測値と、周辺の気象庁観測点の気象要素から推定して2地点の気象要素およびそれを入力値として融雪量の推定モデルでの底面流出量の推定値とを比較することでその再現性を評価した結果について示す。

2. 積雪底面流出量の推定モデル

積雪底面から流出する融雪水の多くは積雪表面で発生する。積雪表面で発生した融雪水は、積雪層内を流下して積雪底面から流出するため、積雪表面での融雪量を推定するモデルに加えて、積雪表面での融雪水や雨水が積雪層内を浸透する過程を考慮する必要がある。ここで示す積雪底面流出量の推定モデルは、積雪表面での融雪量を推定するモデル（積雪表面融雪量推定モデル）と融雪水や雨水が積雪層内を浸透する過程を再現する浸透モデル（貯留モデル）とで構成されており（図1）、両モデルを組み合わせることで底面流出量を推定するものである。

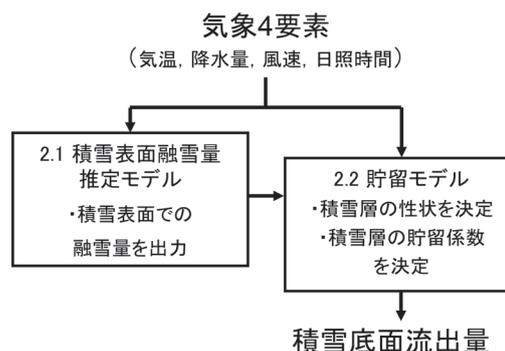


図1 モデルの構成

* 防災技術研究部 気象防災研究室

2.1 積雪表面融雪量推定モデル（融雪モデル）

積雪表面の融雪量は、表1に示す熱収支式の構成要素を観測することで、積雪表面での熱収支を計算（熱収支法）することで求めることができる。しかしながら、多雪・山間線区に多くの路線を持つ鉄道会社において、このような多要素の気象観測を行うことは現実的ではない。そこで、既往研究や融雪・気象観測の結果を参考にアメダスで得られる気象4要素（気温、降水量、風速、日照時間）を用いて、積雪表面における熱収支構成要素（表1）を、定式化もしくは定数化して取り入れて積雪表面の融雪量を求める方法を開発した²⁾。さらにこのモデルは、初期条件として斜面の向きと傾斜を設定することで、傾斜をもつ雪面に対する太陽の仰角や周辺雪面からの反射による熱量を融雪熱量に反映することができる⁴⁾。

表1 積雪底面流出量の推定に用いる気象要素

$$\text{融雪熱量 } Q_M = Q_R + Q_H + Q_L + Q_P + Q_C$$

熱収支式の構成要素	左記の各要素を推定するためにモデルで用いる気象要素
正味放射量 Q_R	気温、降水量、日照時間
顕熱 Q_H	気温、降水量、風速
潜熱 Q_L	気温、降水量、風速
降雨熱量 Q_P	気温、降水量
雪伝達熱量 Q_C	積雪性状モデル ^{5) 6)} で求める

2.2 浸透モデル（貯留モデル）

積雪表面で生じた融雪水が積雪中を浸透し、積雪底面から流出するまである程度の時間を要する。このため1時間ごとのような短い間隔で底面流出量を評価する場合には、浸透に要する時間の影響が大きい。ここでは、既往研究で示されている融雪水の鉛直浸透を飽和浸透と仮定して、Darcy 則からその時間を求める手法⁷⁾に基づき浸透モデルを構築した⁴⁾。浸透に要する時間は積雪深やその構造に依存することが知られており、塩沢雪害防止実験所（標高190m、南魚沼市⁸⁾）での気象、融雪量の観測結果から、この時間を積雪深の関数として与えた²⁾。なお、この浸透モデルは、前述の積雪表面融雪量推定モデルと同様に、気象4要素を入力値として、粘性圧縮モデル⁹⁾を適用した積雪性状モデル^{5) 6)}により、積雪深や積雪層内の雪密度や雪温などを推定するものであり、融雪水が積雪層内を浸透する過程において、浸透する融雪水の再凍結などを考慮できる。

3. 積雪底面流出量の観測

3.1 観測概要

底面流出量の推定モデルを構築するために2015年3~4月にかけて塩沢雪害防止実験所構内（以下、塩沢）において、平地には集水容器2m×2mライシメータを設置し、斜面長13.4m、傾斜35度の南東向き盛土斜面には2m×1mのライシメータを設置して底面流出量の観測をおこなった。以下、塩沢における平地での観測を塩沢（平地）、斜面での観測を塩沢（斜面）と呼ぶ。さらに、塩沢と同市内の余川地区（実験所から北に3.5km、標高365m）の傾斜15°の南東向き自然斜面に4m×4mの大型の斜面ライシメータを設置し¹⁰⁾、同様の観測を行った（以下、余川）（図2）。また、塩沢と余川において、積雪表面融雪量（以下、表面融雪量）を熱収支法で求めるため、気象観測（気温、湿度、風向風速、長短波放射収支量、降水量^{*}、積雪深^{*}）を行った。なお、^{*}は塩沢のみでの観測を表す。



図2 観測点位置とライシメータの設置状況

3.2 観測結果

塩沢（平地、斜面）および余川に設置したライシメータで観測された同じ時期の積雪底面流出量を図3に示す。図中の2015年3月20日の積雪深は、塩沢（平地）で177cm、塩沢（斜面）で105cm、余川で260cm

であった。また、消雪日は、塩沢（斜面）は4月3日、塩沢（平地）は4月22日、余川は4月25日であった。

ライシメータによる底面流出量は、この時期の南中高度と雪面が垂直に近い角度である塩沢（斜面）が大きく、ついで余川、塩沢（平地）の順である。また、流出量のピーク時刻は、塩沢（斜面）が早く、次いで塩沢（平地）、余川であり、積雪深の小さい順で早い結果となった。

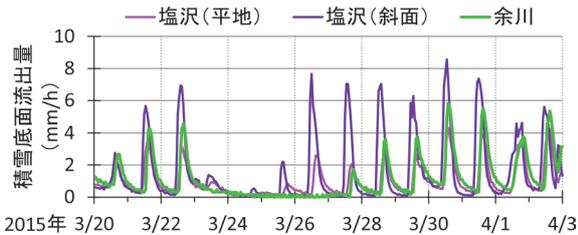


図3 積雪底面流出量（ライシメータ）の時系列変化

4. 提案手法による積雪底面流出量の推定精度

積雪底面流出量の再現性の評価では、図1に示すフローにより、表面融雪量と底面流出量のそれぞれについて評価した。評価にあたっては、塩沢（平地、斜面）と余川において観測した気象データをもとに熱収支法で求めた表面融雪量と、ライシメータ法で測定された底面流出量をそれぞれ真値とした。

表面融雪量は、それぞれの観測点の気温、降水量、風速、日照時間を積雪表面融雪量推定モデル（以下、融雪モデル）へ入力して求める方法（以下、①現地4要素法）、および近傍3箇所のアメダスデータ（小出、十日町、湯沢）から、塩沢（平地、斜面）と余川の各観測点の4要素を推定して、融雪モデルへ入力して求める方法（以下、②アメダス4要素法）の各方法で求めた値と熱収支法による値とを比較した。

底面流出量については、前述の熱収支法、①現地4要素法、②アメダス4要素法で求めた表面融雪量を、それぞれ貯留モデルへ入力して求めた値とライシメータ法により求めた値とを比較した。なお、②アメダス4要素法では、前述3地点のアメダスの気象4要素を、各アメダス地点と塩沢（平地、斜面）、および余川までの距離からIDW法（Inverse Distance Weighting, 逆距離加重内挿法）により、塩沢（平地、斜面）、余川における推定に用いる気象要素を推定してモデルの入力値とした。この時の気温については、各アメダスの気温を、気温減率（0.6℃/100m）を用いて標高0mでの気温を求め、IDW法で内挿した後に、再度それぞれの観測点の標高で補正して求めた。

4.1 モデルに入力する気象4要素の推定精度

モデルの入力値となる1時間ごとの気象4要素について、塩沢（平地、斜面）と余川の観測値と近傍の3地点のアメダス観測点の毎正時の値を用いてIDW法により求めたそれぞれの観測点の推定値とを比較した。なお、評価時間は1時間であり、気温は平均値、降水量は積算値、風速は平均値、日照時間は日照有りと判断された時間をそれぞれ比較した（表2）。この結果、4要素の中で、気温と降水量は比較的ばらつきが小さく、回帰モデルと実測値とのずれが小さかった。一方、日照時間に関しては、両観測点ともにやや過大に評価する傾向にあることがわかった。また、周辺地形の影響を顕著に受ける風速はばらつきが大きく、現地の観測点とのずれも大きいことがわかった。

表2 気象4要素の観測値に対する推定値の相関

消雪日前1ヶ月1時間値	塩沢（平地、斜面）				余川			
	気温	降水量	風速	日照時間	気温	降水量	風速	日照時間
回帰直線の傾き	0.8	1.0	0.1	1.1	1.2	1.0	0.8	1.1
決定係数	0.9	0.8	0.1	0.3	0.8	0.8	0.2	0.5
標準誤差	1.4	0.3	0.7	0.3	1.6	0.4	1.0	0.3

4.2 表面融雪量および底面流出量の推定精度

4.2.1 表面融雪量の推定精度

融雪災害の多くは、融雪現象の顕著化やそれに降雨が重なることで発生する。よって、ここでは融雪現象が最盛となる消雪日前1ヶ月間を推定精度の評価対象とした。この期間の熱収支法、および前述の①現地4要素法および②アメダス4要素法で求めた表面融雪量の時系列変化の例（塩沢（平地））を図4に示す。1時間ごとの時系列変化では、表面融雪量のピーク前後において、②アメダス4要素法による値は、熱収支法と比べてやや過大になっているものの、①現地4要素法、②アメダス4要素法ともに熱収支法と同様の傾向を示すことがわかった。



図4 積雪表面融雪量の時系列変化の例（塩沢（平地））

熱収支法による表面融雪量に対する、①現地4要素法および②アメダス4要素法による推定値との相関につ

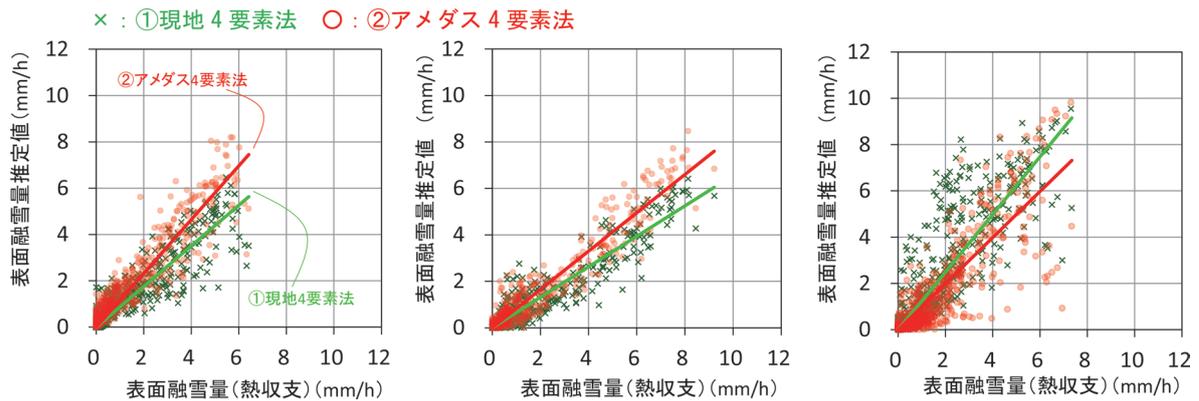


図5 積雪表面融雪量の観測値と推定値との関係

表3 表面融雪量(熱収支法)に対する推定値の相関

消雪日前1ヶ月 での評価 塩沢(斜面) は15日前	塩沢(平地)		塩沢(斜面)		余川	
	① 現地 4要素	② アメダス 4要素	① 現地 4要素	② アメダス 4要素	① 現地 4要素	② アメダス 4要素
回帰直線の傾き	0.9	1.2	0.7	0.8	1.3	1.0
決定係数	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7
標準誤差 (mm)	0.6	0.6	0.8	0.6	1.2	1.0

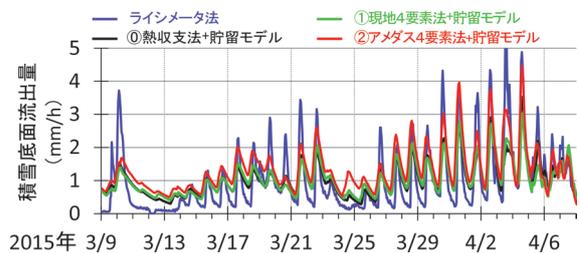


図6 積雪底面流出量の時系列変化の例
(塩沢(平地))

いて、回帰モデルの傾き、決定係数、標準誤差を求めた(図5、表3)。その結果、①現地4要素法および②アメダス4要素法は、熱収支法に対して最大で約3割過大、もしくは過小に評価されたが、いずれの観測点においても決定係数は0.7以上であった。また、本解析事例では、①現地4要素法と②アメダス4要素法とにおいて、直線の傾き、決定係数、標準誤差を比較した結果、両者の差異の最大値は、回帰直線の傾きで0.3、決定係数で0.1、標準誤差で0.2であり、①現地4要素法と②アメダス4要素法の再現性に大きな差異が無い結果となった。

4.2.2 積雪底面流出量の推定精度

底面流出量の推定モデル(表面融雪量+貯留モデル)による積雪底面流出量の再現性を評価するために、ライシメータ法で得られた底面流出量と、①熱収支法による表面融雪量+貯留モデル、①現地4要素法による表面融雪量推定値+貯留モデル、②アメダス4要素法による表面融雪量推定値+貯留モデルで得られた底面流出量とを比較した。比較の一例として表面融雪量を評価したものと同期間の底面流出量の時系列変化の例(塩沢(平地))を図6に示す。

全体的な時系列変化は、①熱収支法+貯留モデル、①現地4要素法+貯留モデル、②アメダス4要素法+貯留モデルの各モデルにおいて、いずれもライシメータ法と同様の傾向を示した。しかしながら、いずれのモデル

においても流出が盛んになる日中時間帯は底面流出量が過小に評価する傾向がある一方で、夜間から朝にかけては過大に評価する傾向が見られた。次に、ライシメータ法で得られた真値に対して、それぞれの推定値との相関について、回帰モデルの傾き、決定係数、標準誤差を求めた(図7、表4)この結果、推定値の回帰直線の傾きの多くは1を下回っており、総じて過小評価する傾向にあることがわかった。また表面融雪量の推定精度と比べて、決定係数は0.3~0.7と小さく、標準誤差は0.9~1.3mmと大きくなっており、積雪底面流出量での比較では総じて再現性が低下することがわかった。また、本解析では、①現地4要素法+貯留モデルと②アメダス4要素法+貯留モデルによる底面流出量と直線の傾き、決定係数、標準誤差を比較した結果、差異の最大値は、回帰直線の傾きで0.3、決定係数で0.2、標準誤差で0.1であり、①現地4要素+貯留モデルと②アメダス4要素+貯留モデルによる底面流出量の再現性に大きな差異は無い結果となった。

4.3 評価時間による再現性の違い

前節では、評価時間を1時間とし、それぞれ真値との比較を行った。この結果、本観測事例においては、①現地4要素法、②アメダス4要素法ともに概ね表面融雪量を再現できているため、評価地点近傍において多くの気象観測を実施しなくとも比較的高い精度で表面融雪量

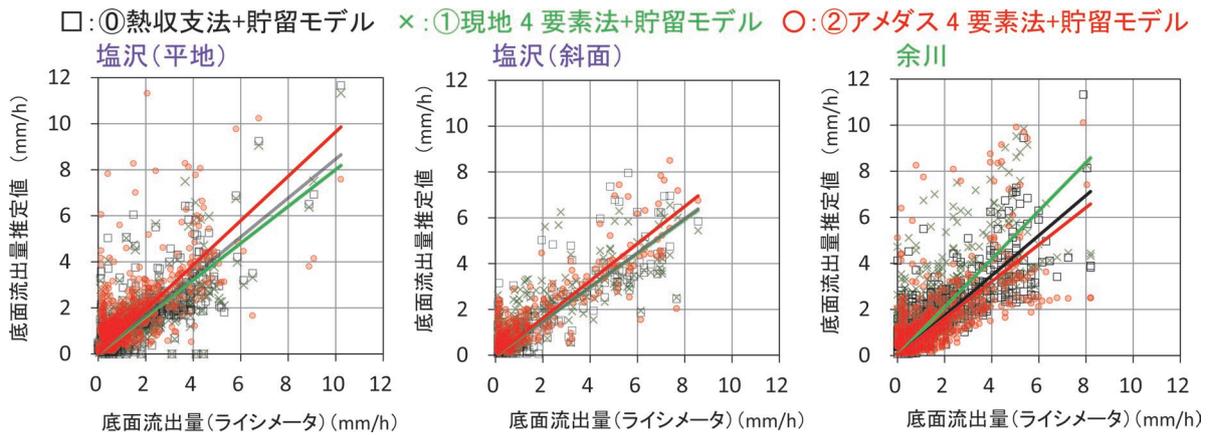


図7 積雪底面流出量の観測値と推定値との関係

表4 ライシメータによる底面流出量に対する推定値の
相関

消雪日前1ヶ月 での評価 塩沢(斜面) は15日前	塩沢(平地)			塩沢(斜面)			余川		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③
	熱収 支法	現地 4要素	アメダス 4要素	熱収 支法	現地 4要素	アメダス 4要素	熱収 支法	現地 4要素	アメダス 4要素
	+貯留モデル								
回帰直線 の傾き	0.9	0.8	1.0	0.8	0.7	0.8	0.9	1.1	0.8
決定係数	0.5	0.5	0.3	0.7	0.6	0.7	0.6	0.4	0.3
標準誤差 (mm)	1.0	1.0	1.2	1.0	1.1	1.0	0.9	1.2	1.3
変動係数	1.6	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5	1.5	1.3	1.6

表5 ライシメータによる日底面流出量に対する推定値
の相関

消雪日前1ヶ月 での評価 塩沢(斜面) は15日前 評価時間1日	塩沢(平地)			塩沢(斜面)			余川		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③
	熱収 支法	現地 4要素	アメダス 4要素	熱収 支法	現地 4要素	アメダス 4要素	熱収 支法	現地 4要素	アメダス 4要素
	+貯留モデル								
回帰直線 の傾き	0.9	0.9	1.1	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	0.7
決定係数	0.7	0.6	0.5	0.8	0.6	0.5	0.7	0.3	0.2
標準誤差 (mm)	7.7	9.3	9.8	6.6	10.9	9.0	10.7	13.7	21.3
変動係数	1.3	1.3	1.0	0.9	1.1	1.4	1.2	0.9	1.4

を推定できると考えられる。一方で、それぞれの融雪モデルと貯留モデルを組み合わせた積雪底面流出量推定モデルでは、底面流出量の再現性が低下した。そこで貯留モデルによる誤差（浸透時間のずれ）の影響を確認するために、評価時間を1日とし、底面流出量の真値と推定値とを比較した（図8、表5）。この結果、決定係数は評価時間1時間と同程度であったが、変動係数（標準偏差／平均値）を比較すると、1日での評価は、1時間で

の評価と比べて約60~90%となり、真値とのばらつきがやや小さくなることがわかった。

5. 再現性向上のための課題

現地4要素法により求めた表面融雪量は熱収支法で求まる値に対して再現性が良く、また、IDW法および気温の標高補正を用いてアメダス4要素法により求めた表面融雪量は、現地4要素法と再現性に大きな差異が無いことがわかった。

さらなる再現性向上のためには、アメダスから離れた地点の気象要素の推定精度を向上させることが重要であり、特に融雪熱量の大きな割合を占める日照時間の再現性を向上させることで、よりIDW法による表面融雪量の精度向上に繋がると考えられる。

一方で、積雪底面流出量の推定値が、表面融雪量に比べて再現性が低い理由の一つは、積雪層内の貯留量が計算上大きく見積もられており実際の積雪底面流出量の応答性に追従していないためと考えられる。融雪水の浸透速度は、雪質の影響を受けると考えられるため、積雪が大きい状況において1時間程度の評価時間で底面流出量を推定する場合は、積雪の密度や温度に加えて、融雪

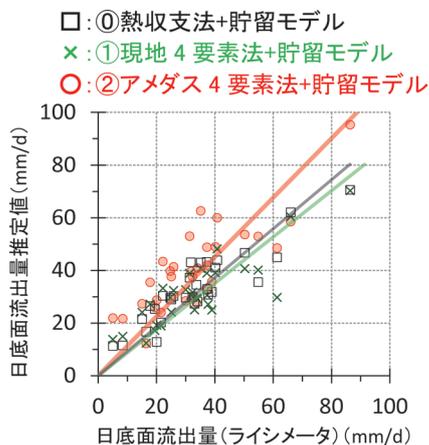


図8 日積雪表面融雪量の観測値と推定値との関係

水が浸透しやすいざらめ雪の割合など浸透時間に影響する積雪の性状をさらに深く考慮するなど、貯留係数の与え方について検討する必要がある。

6. まとめ

アメダスデータを用いて任意地点の積雪底面流出量を推定するモデルを構築することを目的として、アメダスから離れた2地点において気象・融雪観測を行った。2箇所の観測点（塩沢（平地，斜面），余川）で得られた気象観測データ，と近傍3地点のアメダスデータから推定した気象データとから求めた表面融雪量および底面流出量とを比較した結果を以下にまとめる。

- (1) 融雪モデルに改良の余地が残されているものの、IDW法による気象要素の補間と気温の標高補正を行うことにより、アメダス近傍20km程度以内であれば任意地点の積雪表面融雪量を、アメダス観測点直近の積雪表面融雪量と同等に推定できる見通しが得られた。
- (2) 積雪表面融雪量は、気象4要素（気温、降水量、風速、日照時間）で概ね推定できるが、さらに再現性を向上させるためには、日照時間の再現性を向上させる必要があることがわかった。
- (3) 貯留モデルで用いる貯留係数の与え方を、積雪深に加えて性状などを考慮する必要があると考えられる。本結果は、1冬期で得られた観測について分析を行った結果をまとめたものである。今後、観測を継続して今回の評価結果の再現性を確認するとともに、他の地域においても降雪・気象状況の空間代表性を確認するための観測を実施し、本手法の適用範囲や条件の整理を進めていく。

文献

- 1) 阿部伸吾：防災特集-平成26年度災害の概要-JR東日本-，日本鉄道施設協会誌，Vol.53，No.6，p.21，2015
- 2) 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
- 3) 佐藤亮太，高橋大介，飯倉茂弘，鎌田慈，宍戸真也：積雪底面流出量推定モデルの斜面適用化に関する検討，寒地技術論文・報告集（2015），pp.78-83，2015
- 4) 佐藤亮太，飯倉茂弘，高橋大介，鎌田慈，宍戸真也，積雪底面流出量推定モデルの融雪期斜面への適用，鉄道総研報告，Vol.31，No.5，pp.5-10，2017
- 5) 佐藤亮太，高橋大介，飯倉茂弘：アメダスデータを用いた積雪性状推定モデルの開発，雪氷研究大会（2015）講演予稿集，p.258，2015
- 6) Ryota Sato, Yasushi Kamata, Masaya Shishido：Study on the model to estimate the snow property of the slope snowpack, Proceedings of International Snow Science Workshop 2016, pp.674-679, 2016.
- 7) 松元高峰，河島克久，外狩麻子，島村誠：気温・日射量を指標とする表面融雪量モデルと積雪層浸透モデルとを組み合わせた積雪底面流出量の推定，雪氷，Vol.5，pp.123-125，2010
- 8) 飯倉茂弘，高橋大介：塩沢雪害防止実験所の概要と実験所を活用した研究開発，RRR，Vol.75，No.12，pp.8-11，2018
- 9) 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，pp.15-24，2004
- 10) 河島克久，伊豫部勉，松元高峰，飯倉茂弘，本谷研，石丸民之永，丸山敏介：大型斜面ライシメータによる斜面積雪の底面流出量観測，雪氷研究大会（2015）講演予稿集，p.244，2015