

積雪底面流出量推定モデルの融雪期斜面への適用

佐藤 亮太* 飯倉 茂弘* 高橋 大介*
鎌田 慈* 宍戸 真也*

Applying Snowmelt Model to a Slope Snowpack in Snowmelt Season

Ryota SATO Shigehiro IIKURA Daisuke TAKAHASHI
Yasushi KAMATA Masaya SHISHIDO

In order to evaluate the risk of slope disasters caused by snowmelt water in the early spring, it is important to evaluate the amount of snowmelt water flowing out from a bottom of slope snowpack. In consideration of the application to the area along the railway lines, we have developed a model that enable us to estimated the outflow from the snow bottom using only AMeDAS weather data. In this model, it is possible to estimate the outflow from the snow bottom on the slope considering the effect of the slope aspect and slope inclination. As a result of the comparison between the observation value and the estimated by the model, it was confirmed that estimated the outflow were good agreement with observed value.

キーワード：積雪底面流出量，融雪災害，斜面積雪，融雪，浸透，AMeDAS

1. はじめに

多量の降雨によって斜面崩壊等の災害が発生することが一般に知られている。一方で、発生件数は少ないものの、積雪地域の斜面においては春先に融雪水に起因する土砂崩壊（融雪災害）が発生することがある。このような融雪災害は降水のない晴天下であっても、積雪表面で生じた融雪水が地面へと連続的に浸透することで発生する場合があるため、この危険度を評価するには融雪量を把握することが重要である。しかしながら、延長の長い鉄道沿線の全ての箇所において、融雪水量を直接観測し、その危険度を評価することは現実的には難しいため、鉄道現場では融雪期に急激な気温上昇等が観測された際、経験的手法に基づいて線路巡回や警備が実施されている。近年、経験豊富な社員が減少傾向にあるなかで、沿線巡回や警備をより効果的かつ効率的に実施していくためには、何らかの方法で災害の外力である積雪底面からの融雪水（および雨水）の流出量（以下、積雪底面流出量とする）を定量的に評価し、巡回警備等の客観的な出動基準へと反映することが重要である。

筆者らは、鉄道沿線の積雪底面流出量を推定するために、一般に入手可能なアメダス（AMeDAS：Automated Meteorological Data Acquisition System）等の気象データ（気温、降水量、日射量、風速）のみを入力値とした平地積雪に対する積雪底面流出量推定モデル（以下、平地モデルとする）を構築した¹⁾。しかしながら、斜面で

はその方位や傾斜により融雪に影響する熱量や融雪水の浸透過程が異なると考えられるため、これらを考慮して平地モデルを斜面積雪へ適用可能なモデルへと発展させる必要がある。本報告では、塩沢雪害防止実験所（新潟県南魚沼市）において、平地積雪と斜面積雪の積雪底面流出量の観測等を行い、平地と斜面の融雪に影響する熱収支量の違いに着目して構築した斜面モデルを紹介する。

2. 平地モデルの概要

平地モデルは、実際の融雪現象に基づき、積雪表面での融雪現象を計算する積雪表面融雪量推定モデル、積雪層内における損失熱量を計算する積雪性状モデル、浸透に伴う流出の遅れ時間を計算する浸透モデルの3モデルから構成される²⁾。ここでは、融雪期の積雪底面流出量の推定に深く関与する、積雪表面融雪量推定モデルと浸透モデルについて概要を説明する。

2.1 積雪表面融雪量推定モデル

積雪表面融雪量推定モデルは、積雪表面融雪量（以後、 M_s ）を融雪量解析で広く用いられている“熱収支法”^例えは²⁾に基づいて計算するモデルである。

熱収支法は、積雪表面の熱収支（図1）から融雪熱量 Q_M （ M_s に換算する熱量）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。

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

* 防災技術研究部 気象防災研究室

特集：防災技術

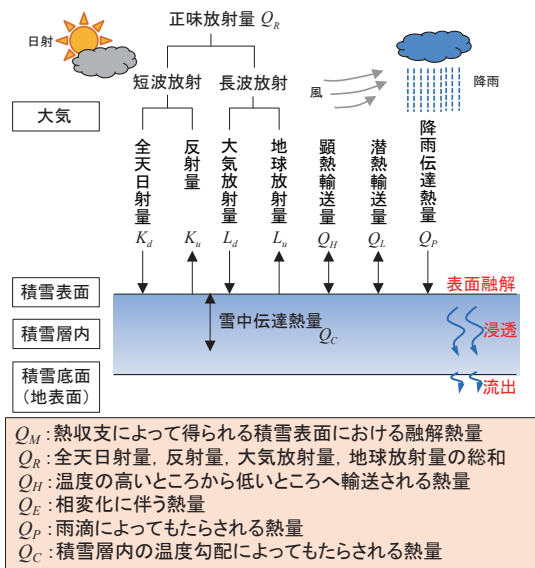


図1 積雪表面における熱収支の概念図

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る (単位はいずれも W/m^2)。1時間あたりの M_s (mm) を求めるには、式(1)で得られた Q_m (W/m^2) を $0^\circ C$ の氷の融解潜熱 (= 0.334×10^6 J/kg) で除し、時間を乗ずることで、時間、面積当りの融雪水量を求め、1時間あたりの M_s (mm) に換算する。なお、 Q_c は積雪中の温度勾配が小さくなる融雪期には他の項と比べるとその値は小さいため、本研究では一律 $0 W/m^2$ とした。

本来、熱収支法を用いて積雪表面融雪量 M_s を推定するには多くの気象要素を必要とするが、平地モデルは熱収支法の一部を定式化するなどして与えることで、アメダス等から一般に入手できる気象データ (気温、降水量、風速、日照時間) のみを用いて積雪表面融雪量を算出する手法である¹⁾。以下に平地モデルにおける各熱量の算出式を示す。

正味放射量 Q_R は式(2)で求まる。

$$Q_R = K_d + K_u + L_d + L_u \quad (2)$$

ここで、 K_d は全天日射量、 K_u は反射量、 L_d は大気放射量、 L_u は地球放射量である (単位はいずれも W/m^2)。ここで、本研究では、 K_d は既往の研究³⁾を参考にし、日照時間 n (min) と大気上端の日射量 S_0 (W/m^2) を用いて、次式から算出した。

$$K_d / S_0 = a_1 + a_2 (n / 60) + a_3 (n / 60)^2 \quad (3)$$

係数 $a_1 \sim a_3$ は、塩沢雪害防止実験所における全天日射量の観測値を基に係数のフィッティングを行い、 $a_1 = 0.20$ 、 $a_2 = 0.80$ 、 $a_3 = -0.21$ を与えた。また、 K_u は式(4)

で求まる。なお、アルベド ref は、気温 T_a ($^\circ C$)、降水量 P (mm)、日射量 K_d (W/m^2)、降雪からの経過時間 P_T (h) を説明変数とした重回帰分析を行い、式(5)から求めた。

$$K_u = (1 - ref) K_d \quad (4)$$

$$ref = f_1 T_a + f_2 P + f_3 K_d + f_4 P_T + f_5 \quad (5)$$

ここで、係数 $f_1 \sim f_5$ は重回帰分析によって得られた係数である。

L_d は、式(6)から求まる²⁾。

$$L_d = \sigma (T_a + 273.15)^4 \left[1 - \left(1 - \frac{L_{df}}{\sigma (T_a + 273.15)^4} \right) C \right] \quad (6)$$

ここで、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 ($5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$)、 T_a は気温 ($^\circ C$)、 L_{df} は快晴時に大気中の水蒸気のみから与えられる大気放射量 (W/m^2)、 C は雲の効果を表す係数である。また、地球放射量 L_u は雪面から射出される熱量である。積雪を黒体と仮定すると、 L_u (W/m^2) は式(7)から求まる²⁾。

$$L_u = \sigma (T_s + 273.15)^4 \quad (7)$$

なお、 T_s ($^\circ C$) は雪面温度である。

顕熱輸送量 Q_H および潜熱輸送量 Q_L は、バルク法^{例えば4) 5)}を用いて、中立大気の状態を仮定することで式(8)、式(9)で求まる。

$$Q_H = C_H \rho C_p (T_a - T_s) u_z \quad (8)$$

$$Q_L = C_E \rho l (0.622 / AP) (e_z - e_0) u_z \quad (9)$$

C_H と C_E はそれぞれ顕熱輸送、潜熱輸送に対するバルク輸送係数 1.74×10^{-3} (無次元)、 ρ は空気密度 (kg/m^3)、 C_p は空気の定圧比熱 1005 (J/kg/K)、 l は水の蒸発潜熱 2.5×10^6 (J/kg) を示す。 AP は観測地点の気圧 (hPa)、 u_z は雪面からの高さ z (m) での風速 (m/s)、 e_z は雪面からの高さ z (m) での水蒸気圧 (hPa)、 e_0 は雪面高さにおける飽和水蒸気圧 (hPa) である。

降雨からの伝達熱量 Q_p (W/m^2) は、式(10)より求まる⁶⁾。

$$Q_p = \rho_w C_w T_w P_r \quad (10)$$

ここで、 ρ_w は水の密度 1000 (kg/m^3)、 C_w は水の比熱 4.186 (J/kg/K)、 T_w は湿球温度 ($^\circ C$)、降雨量 P_r は、降水観測時の気温 T_a から雨雪判別を行い、本研究では T_a が $1^\circ C$ 以下のときに観測された降水を降雪とした。

上記のように、平地モデルでは熱収支式の一部を定式化して与えることで、表1に示す気象4要素のみから融雪熱量 Q_m を求めることができる。

表1 積雪表面融雪量推定モデルに用いる各要素

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

2.2 浸透モデル

積雪表面で融雪が生じてから（もしくは雨水が浸透し始めてから）積雪底面から流出するまでに要する時間のことを遅れ時間と呼び、積雪底面流出量を時間単位で推定するためには、この影響が無視できない。

融雪水の浸透現象は積雪層の雪質や物性等の影響を受けるため、その再現は非常に難しいが、近年では、遅れ時間を簡易に評価する方法として、融雪水の鉛直浸透を飽和浸透と仮定し、Darcy 則から浸透に伴う流出の遅れ時間を考慮した時刻 t における積雪底面流出量 $M'_b(t)$ を式 (11) のように表現する方法^{7) 8)}がある。平地モデルでもこの手法を用いた。

$$M'_b(t) = M'_b(t - 1) \exp(-1/k_0) + M_b(t) + P_r(t) - \{M_b(t) + P_r(t)\} \exp(-1/k_0) + M_g(t) \quad (11)$$

ここで、 $M'_b(t - 1)$ は時刻 t より 1 時間前の積雪底面流出量（損失熱量をおよび浸透に伴う流出の遅れ時間を考慮：mm/h）、 k_0 は遅れ時間を表す貯留係数、 M_b は時刻 t における積雪底面流出量（損失熱量を考慮し、遅れ時間の考慮はなし：mm/h）である。また、 $M_g(t)$ は積雪底面における融雪量（地熱による融雪）であり、本研究では一律 $0.075mm/h$ ⁹⁾とした。

貯留係数 k_0 は積雪深や積雪層構造に依存することが知られているが、本モデルでは塩沢雪害防止実験所における観測の結果から、 k_0 を式 (12) のように積雪深 D_s の関数として与えた。また、既往研究⁷⁾を参考に D_s が $0.5m$ 以下では時間遅れが生じないとみなした。

$$D_s > 0.5m, \quad k_0 = 1.1 \exp(1.6 D_s) \quad (12)$$

3. 平地モデルの斜面適用に関する検討事項

斜面積雪表面における融雪熱量やその時間変化は斜面の方位や傾斜による影響を受け、特に日射量に関しては平地積雪とは大きく異なる。さらに、斜面積雪における融雪水の浸透現象は、鉛直浸透以外に斜面と平行な積雪層に沿った流下が起こると考えられるため、平地積雪の浸透現象とは浸透速度が異なることが考えられる。したがって、平地モデルを斜面へ適用する際には、平地積雪

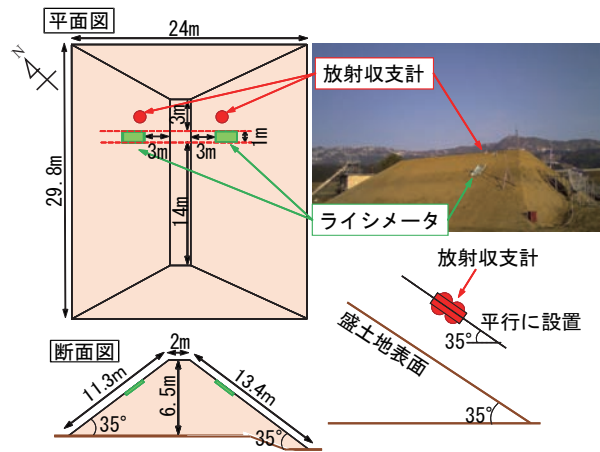


図2 盛土の寸法と観測機器設置状況

と斜面積雪の①融雪熱量の違いや②浸透時間の違いを定量的に把握することが重要となる。

上記解析の基礎データを取得するために、2014/15 年冬期に塩沢雪害防止実験所において盛土（傾斜 35° 、南東および北西向き斜面を有する）を構築し、平坦地と盛土斜面にライシメータおよび放射収支計を設置するとともに熱収支計算に必要な気象観測を平地で実施した（図2）。さらに、積雪断面観測を実施し、平地積雪と斜面積雪との性状の違いを調べた。以上の観測で得られたデータを用いて平地積雪と斜面積雪における融雪熱量の違いと浸透速度の相違を調べた。

3.1 平地・斜面積雪の融雪熱量の違い

平地および斜面（南東および北西向き、以降、それぞれ南東斜面、北西斜面とする）における融雪熱量を実験所構内における観測値等を用いて熱収支法から算出した（これを融雪熱量の真値とする）。

3 地点の積算融雪熱量の時間変化を図3に示す。その結果、平地に比べ南東斜面では、融雪熱量は常に多く、4月上旬には平地の1.2倍程度となった。一方、北西斜面においては平地に比べて融雪熱量が小さく、4月上旬には平地の0.5倍程度であった。このような差が生じる原因として、2014/15 年冬期の平地積雪における熱収支量の内訳をみると、融雪熱量に対する日射量の割合が約

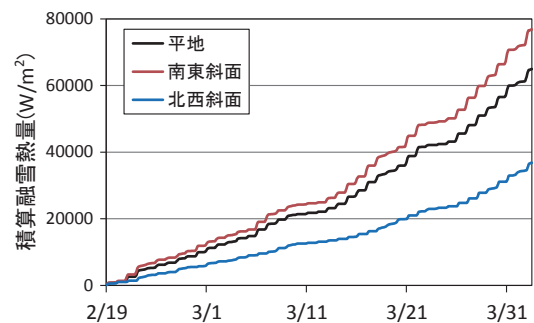


図3 積算融雪熱量の比較

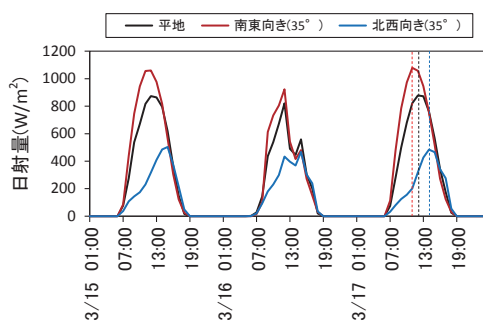


図4 日射量の比較

7割であったことから、斜面積雪でも融雪には日射量が大きく寄与していると推定された。そこで、平地と斜面における日射量の観測結果（3月中旬の晴天日）を比較した（図4）。平地に対する日射量の最大値は約800W/m²であるのに対して、南東斜面では約1000W/m²、北西斜面は約400W/m²であり、南東斜面と北西斜面では、日最大値に約600W/m²（2.5倍）の差があった。また、平地の最大値出現時刻は12時頃であるのに対して、南東斜面は10時頃、北西斜面では14時頃（図4参考：点線がそれぞれの日最大値出現時刻を表す）であった。これらのことから、平地モデルを斜面へ適用する際には、日射の量的および時間的な違いを考慮する必要があることがわかった。

3.2 平地・斜面積雪の浸透速度の違い

平地モデルにおける浸透モデルではDarcy則に基づいた鉛直浸透のみを考えているが、斜面積雪では鉛直浸透以外に斜面と平行な積雪層に沿った流下が起こると考えられるため、平地積雪の浸透現象とは異なることが考えられる。ここでは、平地積雪と斜面積雪（南東斜面）の流出の遅れ時間の違いを明らかにするために、連続的に融雪が起こる融雪期を想定し、積雪全層がざらめ雪化しており、かつ積雪深が50cm～100cmであった期間について、熱収支法による積雪表面融雪量の日最大値出現

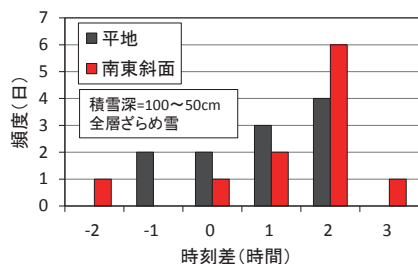


図5 積雪表面融雪量と積雪底面流出量の日最大値出現時刻差（時間）

（例えば時刻差が1時間であれば、積雪表面融雪量の日最大値の出現時刻が積雪底面流出量の日最大値の出現時刻より1時間早いことを表す）

平地モデル

- ①積雪表面融雪量推定モデル
→積雪表面における融雪現象を計算
融雪熱量： $Q_M = Q_R + Q_H + Q_L + Q_P$
正味放射量： $Q_R = K_d + K_u + L_d + L_u$
- ②積雪性状モデル
→浸透に伴う損失熱量の計算
- ③浸透モデル
→浸透に伴う流出の遅れ時間の計算
 $k_0 = 1.1 \exp(1.6 D_s)$

斜面モデル

- ①斜面積雪表面融雪量推定モデル
→斜面積雪表面における融雪現象を計算
斜面融雪熱量： $Q'_M = Q'_R + Q_H + Q_L + Q_P$
斜面正味放射量： $Q'_R = K'_d + K_u + L_d + L_u$
- ②積雪性状モデル
→浸透に伴う損失熱量の計算
- ③浸透モデル
→浸透に伴う流出の遅れ時間の計算
 $k_0 = 1.1 \exp(1.6 D_s)$

図6 平地モデルと斜面モデルの構成

時刻とライシメータ法による積雪底面流出量の日最大値出現時刻の差を比較した（図5）。その結果、積雪表面融雪量よりも積雪底面流出量のピークが早い時刻に現れた事例もあるものの、両者ともに積雪表面融雪量の日最大値の出現時刻と積雪底面流出量の日最大値の出現時刻の差はおよそ1～2時間の範囲でばらついており、その差に顕著な違いは見られなかった。したがって、積雪全層がざらめ雪化している融雪期においては、平地積雪と斜面積雪との間に遅れ時間の明瞭な差異はないと考えられる。

4. 斜面モデルの開発

前章までの検討結果を整理すると、平地モデルを融雪期の斜面に適用する際に主に考慮すべきことは、平地積雪と斜面積雪とでは日射量が量的時間的に異なることである。したがって、斜面方位および傾斜を考慮できる斜面モデルでは、斜面積雪における融雪熱量 Q'_M (W/m²) を式(13)とし、斜面における正味放射量 Q'_R (W/m²) を式(14)で算出するものとする（図6）。

$$Q'_M = Q'_R + Q_H + Q_L + Q_P \quad (13)$$

$$Q'_R = K'_d + K_u + L_d + L_u \quad (14)$$

ここで、 K'_d は斜面積雪における日射量 (W/m²) である。その他の要素の推定式や浸透モデルについては平地モデルと同様のものを用いることとした。 K'_d の推定方法について、次節から検討する。

4.1 斜面積雪表面融雪量推定モデルの検討

斜面積雪における日射量を推定するためには、斜面の傾斜と方位を考慮する必要がある。斜面積雪表面融雪量推定モデルでは、既往の研究^{10) 11)}を参考にして作成した式(15)を用いて、斜面の角度と方位から斜面日射量 K'_d を算出する。

$$K'_d = K_{dd} + K_{da} \quad (15)$$

ここで、 K_{dd} は斜面全天日射量、 K_{da} は雪面反射日射量で

ある（単位はいずれも W/m^2 ：図7）。 K_{dd} と K_{da} は式 (16)～(18) で算出した。

$$K_{dd} = K_d \cdot \sinh' \quad (16)$$

$$\sinh' = \sinh \cdot \cos\theta + \cosh \cdot \cos(A-\alpha) \quad (17)$$

$$K_{da} = K_d \cdot \text{ref} \cdot (1 - \cos\theta) / 2 \quad (18)$$

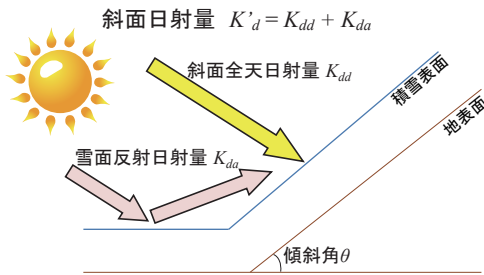


図7 斜面日射量の模式図

ここで、 h' は任意の日時と場所における斜面に対する太陽高度、 h は太陽高度、 A は太陽方位角、 θ は斜面の傾斜角、 α は斜面の方位角、 ref は平地積雪のアルベド（雪面における反射量/日射量）、 K_d は平地における日射量である。なお、今回の解析では、 K_{da} を求める際に必要となるアルベド ref は、平地における観測値を使用した。

斜面日射量の推定式 (15) を検証するために、実験所構内の盛土における1時間毎の観測値（2014年12月～2015年4月）と斜面モデルによる推定値 K'_d とを比較した（図8）。なお、斜面モデルの入力値である日照時間については、実験所の最寄りのアメダス十日町の観測

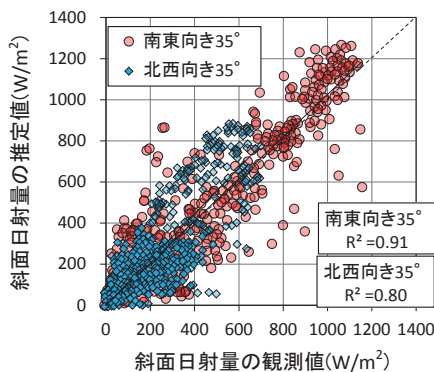


図8 斜面日射量の推定結果

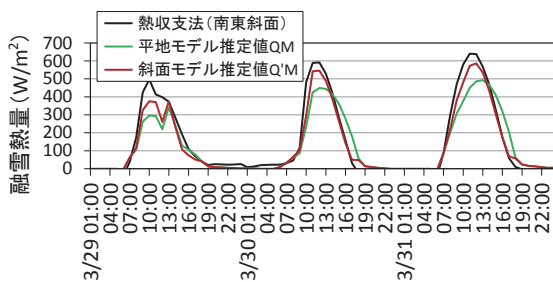


図9 融雪熱量の推定結果

データを、その他の要素は実験所構内における観測値を使用した。比較の結果、ややばらつきがあるものの、両斜面ともに推定値と観測値との決定係数 R^2 は0.8以上であり、アメダスデータから斜面の傾斜と方位の影響を考慮した斜面日射量を推定できることが確認できた。

次に、斜面積雪の融雪熱量を推定する式 (13) を検証するために、南東斜面の融雪熱量について、盛土斜面における観測値を用いた熱収支法による融雪熱量、式 (13) を用いた斜面モデルによる融雪熱量の推定値 Q'_M 、および平地モデルによる推定値 Q_M の時系列変化を比べた（図9）。なお、各モデルの入力値は、日照時間はアメダス十日町の観測データを使用し、その他の要素は実験所構内における観測値を使用した。その結果、斜面の傾斜と方位を考慮した斜面モデルは、熱収支法による融雪熱量に対して日最大融雪熱量をやや過小評価しているものの、平地モデルと比べて熱収支法に近い融雪熱量を再現できることがわかった。さらに、日最大融雪熱量の出現時刻は、観測値と概ね一致する結果が得られた。

4.2 寒冷地における積雪底面流出量の推定精度検証

寒冷地における斜面モデルの積雪底面流出量の推定精度を検証するために、北海道の積雪地域における観測値と、前節までに示した斜面モデルによる積雪底面流出量の推定値とを比較した（図10）。積雪底面流出量の観測では、南東向きの人工斜面を選定し（傾斜27°）、塩沢雪害防止実験所と同様のライシメータを設置し、2014/15年度冬期に斜面における積雪底面流出量の観測を行った。斜面モデルの入力値には、近隣アメダスの観測値を使用した。なお、3月5日に積雪断面観測を実施し、全層ざらめ雪であったことから、当該期間は融雪水（および雨水）が鉛直浸透しており、斜面モデルを適用できると考えられた。

比較の結果、3/1 から消雪までの積算値は観測値および推定値ともに約500mmであり、斜面モデルは融雪期における積雪底面流出量の積算値を精度よく推定できることがわかった。次に両者の時間変化を比較してみると、

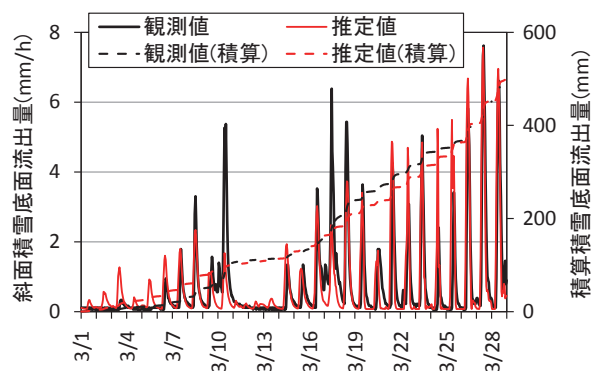


図10 積雪底面流出量の推定結果

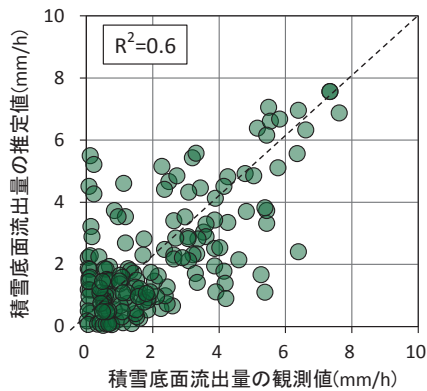


図 11 積雪底面流出量の観測値と推定値の関係

観測値の時間変化を概ね再現できていることがわかる。さらに、観測値に対する推定値の平均二乗誤差 RMSE は 0.7mm/h、両者の決定係数 R^2 は 0.6 と良い相関関係にあることがわかった (図 11)。

以上の結果から、時間単位の推定精度に改良の余地はあるものの、斜面モデルを用いることで一般に入手可能な気象データを入力値として斜面積雪における積雪底面流出量を推定できることが確認できた。

5. おわりに

本解析では、平地と斜面の融雪熱量の違いに着目し、斜面日射量の推定式を作成し、これを平地モデルに取り込む形で斜面モデルを作成した。その結果、一般に入手可能な気象データから、斜面積雪における積雪底面流出量を推定できることが確認できた。一方で、斜面積雪における積雪底面流出量の推定精度をより向上させるためには、つぎのような解析が必要である。

時間単位の積雪底面流出量の推定では (図 11 参照)、観測値の日最大値に対して斜面モデルによる推定値は過小評価もしくは過大評価している場合が散見される。この誤差の要因として考えられるのが、浸透モデルによる遅れ時間の計算である。全層ざらめ雪となる融雪期においても厳密にはざらめ雪の粒径や空隙率は積雪各層によって異なっている場合がある。したがって、時間単位の積雪底面流出量の推定精度向上を図るためには、積雪層内の物性値 (密度や含水率、空隙率など) の分布等に基づいて、それぞれの積雪層で融雪水の流下速度を与える必要があると考えられる。

また、融雪熱量に大きく寄与する斜面日射量およびアルベドについても推定精度向上を図る必要があると考え

られる。斜面日射量およびアルベドは観測結果に基づく実験式で求めているため、係数の決定にはより多くの観測データを用いることが必要である¹²⁾。両者の係数をより多点の観測データを用いて改善することで、その推定精度向上に繋げていきたい。

今後は、前章に示すような推定精度向上に関する課題に取り組むことでモデルの深度化を図り、より精緻に積雪底面流出量を推定できるモデルへと発展させるとともに本モデルの適用範囲の検証についても実施する計画である。

参考文献

- 1) 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, pp29 - 34, 2013
- 2) 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
- 3) Kun Yang and Toshio Koike, A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies., Water Resources Research, vol.41, 2005.
- 4) 近藤純正, 地表面に近い大気の科学, 財団法人東京大学出版会, pp.82-165, 2000
- 5) 前野紀一, 福田正巳, 雪氷水文現象, 基礎雪氷学講座IV, 古今書院, pp.17-92, 1994
- 6) Hay J.E. and Fitzharris B. B., “A comparison of the energy-balance and bulk-aerodynamics approaches for estimating glacier melt”, *Journal of Glaciology*, Vol.34, 1988.
- 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
- 8) 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.72, No.4, pp.255-270, 2010
- 9) 和泉薫, 積雪底面の融雪量, 新潟大災害研年報, Vol.5, pp.123-125, 1983
- 10) 黒瀬義孝, 複雑地形地域における 250m メッシュ日射量分布推定モデルについて, 農業気象 (J. Agr. Met.), vol.47 (2), 1991
- 11) 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編, 新太陽エネルギー利用ハンドブック, 2000
- 12) 山崎剛, 田口文明, 近藤純正: 積雪のある森林小流域における熱収支の評価, 天気, Vol.41, 1994