

## 融雪水の積雪底面流出量の推定手法

栗原 靖\* 宍戸 真也\* 飯倉 茂弘\*  
高橋 大介\* 鎌田 慈\*

## A Simplified Method for Estimating Outflow from the Bottom of Snowpack

Yasushi KURIHARA Masaya SHISHIDO Shigehiro IIKURA  
Daisuke TAKAHASHI Yasushi KAMATA

To ensure the safety of train operation, it is important to estimate the outflow from the bottom of snowpack affecting the full-depth avalanche. Therefore, the authors examined a simplified method for estimating outflow from the bottom of snowpack, which can be applied to railway disaster prevention, on the basis of heat balance observations, snowmelt observations and previous studies. Consequently, the simplified method, which combines a snowmelt (heat balance) model and a percolation model, yields a good estimate of outflow from the bottom of snowpack at 1-hour intervals using four input data available from the nearest AMeDAS: I.e., air temperature, precipitation, wind speed and duration of sunshine.

キーワード：積雪底面流出量，融雪，浸透，斜面積雪の安定性評価，全層雪崩

## 1. はじめに

積雪地域においては春先になると積雪表面で多量の融雪水が生じ、それらが連続的に積雪底面へ浸透することが既往の研究<sup>1)</sup>で明らかになっている。また、近年では冬期に一時的な気温上昇がみられ、まとまった降雨や融雪が観測されることがある。例えば、札幌で厳冬期の2009年1月23日に最高気温が7.6℃まで上昇し、同時に18.5mmの降雨量が観測された。このような状況下では、積雪底面と地表面との間に水が介在し、支持力が低下することで全層雪崩の発生危険度が高まるのが定性的に知られているものの、降雨・融雪水が全層雪崩の発生に及ぼす影響の程度は明らかになっていない。そのため、鉄道現場では冬季の気温上昇や降雨等が観測された際、経験則に基づいて全層雪崩に対する線路巡回や警備が実施されている。しかし、近年は経験豊富な社員が減少しており、適切な沿線巡回や警備を実施するためには、降雨・融雪水と全層雪崩の発生との関係（斜面積雪の安定性）を定量的に評価し、その結果を冬期の沿線巡回や雪崩警備の出動基準へ反映させることが重要である。

こうした事情から、著者らは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。具体的には、積雪底面から流出する降雨・融雪水量（以後、積雪底面流出量と呼ぶ）の推定手法の検討、および積雪底面流出量と積雪支持力の低下、ならびに全層雪崩の危険度指標となり得る積雪の移動速度（グライド速度）との関係の分析である。本報告

\* 防災技術研究部 気象防災研究室

では、前者の積雪底面流出量の推定手法を紹介する。

## 2. 積雪底面流出量の算出

積雪底面流出量を求める方法には、積雪底面流出量を直接的に測定する方法（積雪水量法<sup>2)</sup>、ライシメータ法<sup>2)</sup>）と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<sup>1) 2)</sup>）がある。積雪水量法は、積雪重量計と呼ばれる大型の計測器を地表面に設置して積雪水量（積雪の重量）の時間変化から積雪底面流出量を算出する方法である。また、ライシメータ法は、地表面に設置した大型容器（積雪ライシメータ）によって積雪底面から流出する降雨・融雪水を捉え、その水量から積雪底面流出量を算出する方法である。いずれの方法も積雪底面流出量を実測できるメリットを有するものの、機器設置に広い用地（10m<sup>2</sup>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、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、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きた<sup>1)</sup>。ただし、ディグリー・デー法は推定値

特集：防災技術

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、上記のニーズに対応するために、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。さらに、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。そのため、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。

積雪底面流出量の推定フローを図1に示す。本課題では積雪底面流出量を1時間単位で精度良く推定するため、積雪層で生じる融雪現象を「積雪表面での融雪現象」と「融雪水の浸透現象」の2つに分けて考えることとし、気象要素および融雪量の観測結果、ならびに既往の研究成果を踏まえて、それぞれの現象を推定するモデルを作成した。次章以降、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（4.1節参照）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日間であり、いずれの項目も10分間隔でデータを収録した。

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）、また1日（4月23日）の中での時間最大、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示された。

4. 積雪表面での融雪現象（積雪表面融雪量の推定モデルの開発）

図1に示す「積雪表面の融雪現象」、すなわち積雪表面での融雪量（以後、 $M_s$ ：積雪表面融雪量と呼ぶ）は、融雪量解析で広く用いられている“熱収支法”から算出した。本章では熱収支法の概要を述べた後、本研究で検討した気象4要素から $M_s$ を算出する方法、そして $M_s$ の推定結果を述べる。

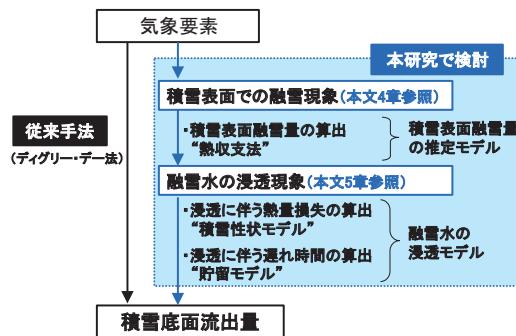


図1 積雪底面流出量の推定フロー

**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解熱量  
 $Q_R$ ：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

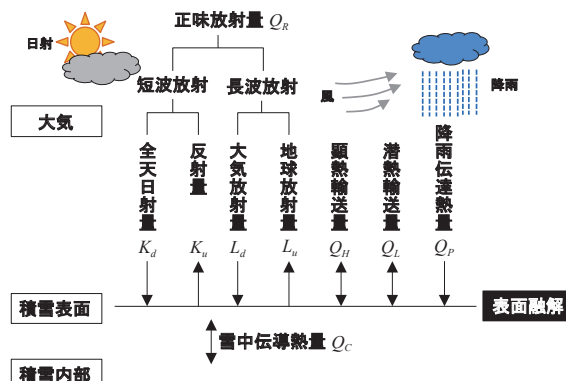


図2 熱収支法（概念図）

4.1 熱収支法による積雪表面融雪量の算出方法

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解熱量 $Q_M$  ( $M_s$ 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る。式(1)では、積雪表面を基準面として、基準面へ入る熱量を正、基準面から出る熱量を負とし、熱量は単位面積、単位時間当たりの大きさ $W/m^2$ で表す。そして、式(1)で得られた $Q_M$  ( $W/m^2$ )を $0^\circ C$ の氷の融解潜熱 ( $=0.334 \times 10^6 J/kg$ )で除することで、 $M_s$  (mm)に換算した。以下に式(1)に示す各熱量の算出方法を記述する。

(1) 正味放射量 $Q_R$

正味放射量 $Q_R$  ( $W/m^2$ )は、放射収支計で測定される全天日射量 $K_d$  (下向き短波放射量)、反射量 $K_u$  (上向き短波放射量)、大気放射量 $L_d$  (下向き長波放射量)、地球放射量 $L_u$  (上向き長波放射量)の4成分 ( $W/m^2$ )から式(2)より求まる<sup>例えは3) 4)</sup>。

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

(2) 顕熱輸送量  $Q_H$ , 潜熱輸送量  $Q_L$

顕熱輸送量  $Q_H$  (W/m<sup>2</sup>), 潜熱輸送量  $Q_L$  (W/m<sup>2</sup>) はバルク法<sup>例えは<sup>3)</sup> 4)</sup>を用いて、中立大気の状態を仮定することで式(3), (4)より求まる。

$$Q_H = C_H \rho C_p (T_a - T_s) u_z \quad (3)$$

$$Q_L = C_E \rho l (0.622 / AP) (e_z - e_0) u_z \quad (4)$$

ここで  $C_H$  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  $1.74 \times 10^3$  (無次元),  $\rho$  は空気密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$  は空気の定圧比熱 1005 (J/kg/K),  $T_a$  は気温 (°C),  $T_s$  は雪面温度 (°C),  $u_z$  は雪面からの高さ  $z$  (m) での風速 (m/s),  $l$  は水の蒸発潜熱  $2.5 \times 10^6$  (J/kg),  $AP$  は観測地点の気圧 (hPa),  $e_z$  は雪面からの高さ  $z$  (m) での水蒸気圧 (hPa),  $e_0$  は雪面温度における飽和水蒸気圧 (hPa) である。

(3) 降雨伝達熱量  $Q_p$

降雨からの伝達熱量  $Q_p$  (W/m<sup>2</sup>) は、式(5)より求まる<sup>5)</sup>。

$$Q_p = \rho_w C_w T_w P_r \quad (5)$$

ここで  $\rho_w$  は水の密度 1000 (kg/m<sup>3</sup>),  $C_w$  は水の比熱 4.186 (J/kg/K),  $T_w$  は湿球温度 (°C),  $P_r$  は降雨量 (mm/h) を示す。

(4) 雪中伝導熱量  $Q_c$

雪中伝導熱量  $Q_c$  は積雪層内の温度勾配によって生じる熱量であり、積雪全層が 0°C の状態では、 $Q_c$  を無視することができる<sup>4)</sup>。また、積雪層内に温度勾配があった場合も、その量は他の要素に比べて小さいことから、本研究では  $Q_c$  を一律 0W/m<sup>2</sup> として与えた。

#### 4.2 気象4要素を用いた積雪表面融雪量の算出方法

4.1 節に示すように熱収支法は、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積雪表面融雪量  $M_s$  を算出することが可能である。しかし、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残る。そこで本節では、熱収支法に必要な各要素の推定過程に気象要素・融雪量の観測結果、ならびに既往の研究成果を組み込み、気象4要素のみから  $M_s$  を推定する方法を検討した。以下に各要素の推定方法を記述する。

(1) 正味放射量  $Q_R$

日射が雪面へ与える熱量(下向き短波放射量)  $K_d$  は、日照時間  $S$  と対象箇所の緯度経度より求まる大気上端日射量から算出した<sup>6)</sup>。雪面に入射した  $K_d$  のうち雪面で反射する量(上向き短波放射量)  $K_u$  は、 $K_d$  と反射率(アルベド)  $\alpha$  の積で表すことができる。ここで、 $\alpha$  は主に積雪の水分量と汚れにより変化することが知られており

表1 雪面温度  $T_s$  の設定方法

| 気象条件   | $T_s$ の設定値                    |
|--|-------------------------------|
| $T_a \geq 0$ のとき   | $T_s = 0^\circ\text{C}$       |
| 夜間から早朝にかけて(大気上端日射量が $0 \text{ W/m}^2$ の時間帯), $T_a$ が前1時間より低下しているとき(放射冷却が発生とみなした) | $T_s = T_a - 3^\circ\text{C}$ |
| 上記(a), (b)以外   | $T_s = T_a^\circ\text{C}$     |

表2 相対湿度  $rh$  の設定方法

| 気象条件                          | $rh$ の設定値   |
|-------------------------------|-------------|
| $P_r > 0$ のとき                 | $rh = 90\%$ |
| $P_r = 0$ かつ $T_a < 0$ のとき    | $rh = 76\%$ |
| $P_r = 0$ かつ $T_a \geq 0$ のとき | $rh = 69\%$ |

<sup>7)</sup>、降雪時の気温  $T_a$  と降雪後の経過時間を指標として推定した。一方、大気中の雲および水蒸気から雪面に与えられる熱量(下向き長波放射量)  $L_d$  は、 $T_a$  と日照時間  $S$  から推定した<sup>8)</sup>。雪面から大気へ向けて射出される熱量(上向き長波放射量)  $L_u$  は、雪温  $T_s$  から推定した<sup>4)</sup>。なお、 $T_s$  は気象要素・融雪量の観測の結果から、表1の値とした。

(2) 顕熱輸送量  $Q_H$ , 潜熱輸送量  $Q_L$

式(3), (4)で使用する空気密度  $\rho$  は、気温  $T_a$ , 相対湿度  $rh$ , 現地気圧  $AP$  から推定した<sup>8) 9) 10)</sup>。 $rh$  については、気象4要素から推定することが困難であったことと、 $rh$  が伝達熱に与える影響が小さいことから、豪雪地帯の気象官署10箇所(札幌, 青森, 秋田, 盛岡, 山形, 仙台, 新潟, 長野, 富山, 金沢)における過去5冬期(2008~2012年度)の観測データを基に、表2の値とした。風速  $u_z$  は既往研究<sup>11)</sup>を参考にして  $z$  を2mに設定し、雪面からの高さ  $a$  mに設置した風速計の測定値 ( $u_a$ ) を風速の鉛直分布に関する対数則<sup>3)</sup>を用いて換算した。この際、観測地点における積雪深  $D_s$  が必要となるが、 $D_s$  は、気象4要素から算出可能である(5.1節参照)。また、現地気圧  $AP$  は、気象官署の海面気圧を基に、観測地点の気温  $T_a$  と標高から<sup>10)</sup>、また水蒸気圧  $e_z$  は  $T_a$  と  $rh$  から<sup>9)</sup>、さらに雪面温度における飽和水蒸気圧  $e_0$  は、*Tetens* の近似式<sup>8)</sup>を用いて観測地点の  $T_a$  からそれぞれ推定した。

(3) 降雨伝達熱量  $Q_p$

式(5)で使用する湿球温度  $T_w$  は、*Sprung* の式<sup>10)</sup>を用いて観測地点の気温  $T_a$ , 相対湿度  $rh$ , 気圧  $AP$  から算出した。また、降雨量  $P_r$  は、降水観測時の  $T_a$  から雨雪判別を行い、本研究では  $T_a$  が0°C以下で観測された降水を降雪、それ以外を降雨と判別した。

以上のように、今回提案した方法により式(1)に示す各要素は全てアメダス等で得られる気温  $T_a$ , 降水量  $P$ , 風速  $u_a$ , 日照時間  $S$  の気象4要素から求めることが可能となった(表3)。

表3 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 $T_a$ , 降水量 $P$ , 日照時間 $S$ |
| 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 $Q_C$ | 本研究では、一律 $0\text{W/m}^2$ で与える |

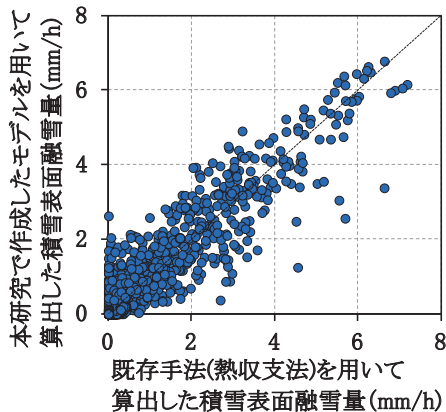


図3 積雪表面融雪量の推定結果

4.3 積雪表面融雪量の算出結果

4.1 節に示す熱収支法から求めた融解熱量  $Q_M$  を真値とみなし、これに対する推定モデル (4.2 節参照) で求めた  $Q_M$  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 (熱収支法は3章に示す気象7要素, 推定モデルは4.2節に示す気象4要素) から両者の  $Q_M$  を算出し、相関分析を行った (図3)。分析対象とした期間は2011年1月6日から4月25日の1689時間である (計測機器が冠雪したとみられる時間帯のデータを除いた)。なお、図3では両者の計算結果から得られる  $Q_M$  ( $\text{W/m}^2$ ) を積雪表面融雪量  $M_s$  (mm) に換算した値で示している。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。また、観測期間全体の  $M_s$  の積算値を比較すると、真値が1266mmであるのに対して推定モデルから得られる値は1266mm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と遜色なく  $M_s$  を推定できることがわかった。

5. 融雪水の浸透現象 (浸透モデルの開発)

融雪水の浸透現象を再現するためには、融雪水の浸透に伴う“損失熱量 (5.1 節参照)”の影響や“遅れ時間 (5.2 節参照)”の影響を考慮する必要がある。そこで、本章では気象要素・融雪量の観測結果、ならびに既往の研究成果を踏まえて作成した融雪水の浸透モデルについて述べる。

5.1 積雪性状モデルの開発

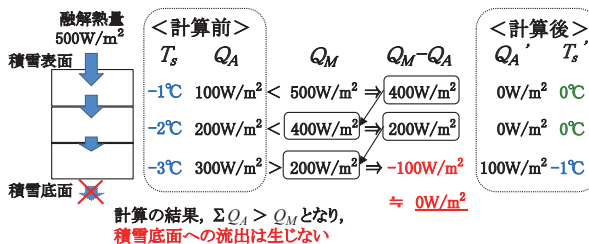
積雪表面で融雪が生じたとしても、積雪層内に雪温が  $0^\circ\text{C}$  未満の積雪層がある場合、その熱量の一部、もしくは全てが雪温の温度上昇に用いられると考えられる。そのため、積雪表面融雪量  $M_s$  と積雪底面流出量  $M_b$  は必ずしも一致しない。それ故、 $M_b$  を精度良く推定するためには融解熱量の損失量 (以後、損失熱量と呼ぶ) を算出することが必要である (積雪全層  $0^\circ\text{C}$  の場合、損失熱量は0である)。

本研究では、損失熱量を算出するため、気象4要素から積雪各層 (積雪層は1時間に1層形成される) の雪温をはじめ、積雪深、密度、質量等の物性値を推定する“積雪性状モデル”を開発した。このモデルは既往の積雪の粘性圧縮モデル<sup>12) 13)</sup> の入力値に新たに  $Q_M$  を加えることで、“損失熱量を考慮した”雪温  $T_s'$ 、積雪底面流出量  $M_b$  を推定可能にしたものである。本研究で検討した  $T_s'$ 、 $M_b$  の算出方法は次の通りである。最初に気温  $T_a$  を用いて積雪表面から底面へ向けて雪温  $T_s$  を順次計算する<sup>13)</sup>。次に損失熱量を算出するために、積雪各層の  $T_s$  を  $0^\circ\text{C}$  まで上昇させるために必要な熱量 (損失熱量)  $Q_A$  ( $\text{W/m}^2$ ) を式 (6) より求める。

$$Q_A = C_i w T_s / 3.6 \tag{6}$$

ここで  $C_i$  は水の比熱 ( $2.1 \times 10^3 \text{J/}^\circ\text{C/kg}$ )、 $w$  は積雪各層の質量 ( $\text{kg/m}^2$ ) である。そして、積雪各層の損失熱量  $Q_A$  と浸透する融雪水がもつ融解熱量  $Q_M$  との差分を積雪表面から積雪底面へ向けて順次算出し、融解熱量を考慮した後の各層の損失熱量  $Q_A'$  を求めた (図4)。この一連の計算で算出される積雪各層の損失熱量の積算値  $\Sigma Q_A$  から融解熱量  $Q_M$  を差し引いたものが、損失熱量を考慮した融解熱量  $Q_M'$  である。つまり、積雪表層で融雪

(1) 積雪底面から流出しないケース



(2) 積雪底面から流出するケース

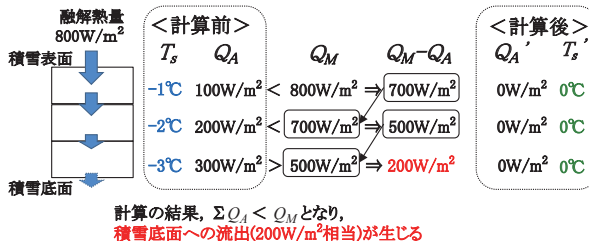


図4 雪温、積雪底面流出量の算出方法 (概念図)

が生じたとしても、 $\Sigma Q_A$  より  $Q_M$  が小さい場合、融解熱量は  $T_s$  の温度上昇に用いられるために、本モデルでは  $M_b$  は 0mm と算出される。本研究では、上記の計算を 1 冬期間、1 時間毎に繰り返すことで連続的に  $M_b$  を推定した。なお、この計算過程の中で ( $Q_A'$  を式 (6) に代入することで)、損失熱量を考慮した  $T_s'$  が求まる。

### 5.2 貯留モデルの開発

浸透現象を考える上でのもう一つの課題に、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<sup>14) 15)</sup> 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 (式 (7))、本課題でもこの手法を用いた。

$$M_b'(t) = M_b'(t-1)\exp(-1/k_0) + M_b(t) + P_r(t) - \{M_b(t) + P_r(t)\}\exp(-1/k_0) + M_g(t) \quad (7)$$

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 (遅れ時間を考慮)、 $k_0$  は遅れ時間を表す貯留係数、 $M_b(t)$ 、 $P_r(t)$  はそれぞれ時刻  $t$  における積雪底面流出量 (遅れ時間考慮なし) と降雨量である。また、 $M_g(t)$  は積雪底面での融雪量 (地熱による融雪) であり、本研究では一律  $0.075\text{mm/h}$ <sup>16)</sup> とした。

遅れ時間は積雪深や積雪層構造に依存することが知られており、本研究では塩沢雪害防止実験所における気象要素・融雪量の観測の結果から、 $k_0$  を積雪深  $D_s$  の関数として与えることとした。なお、現段階では積雪層構造を精度良く推定することが困難であること、また積雪層構造と遅れ時間との関係は未解明な部分が多いことから、積雪層構造が遅れ時間に及ぼす影響についても  $k_0$ - $D_s$  の関数で代表させることとした。

$k_0$ - $D_s$  の関数式を求めるにあたり、最初に 24 時間を 1 つの融雪イベントとみなし、24 時間の積算積雪底面融

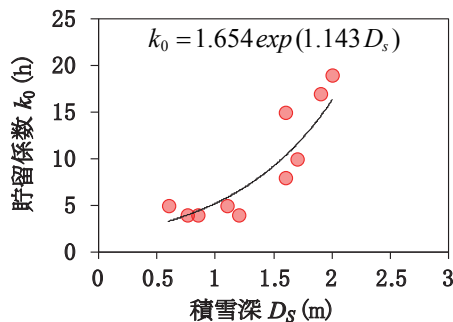


図5 塩沢雪害防止実験所における  $k_0$ - $D_s$  の関係

雪量  $\Sigma M_b(t)$  とライシメータ観測から得られる 24 時間の  $\Sigma M_b(t)$  (実測値) がほぼ一致し、かつ日変化が明瞭な 10 日を抽出した。次に各時刻の入力値である  $M_b'(t-1)$ 、 $M_b(t)$ 、 $P_r(t)$  を式 (7) に代入して  $M_b'(t)$  を求めた後、得られた  $M_b'(t)$  とライシメータから得られた  $M_b'(t)$  (実測値) との二乗誤差の積算値が最小となるように、融雪イベント毎の  $k_0$  を試行錯誤で求めた。以上の方法で求めた  $k_0$ - $D_s$  の関係を図 5 に示す。 $k_0$  が大きいほど、浸透時間が長いことを示し、 $D_s$  が 1.5m を上回ると  $k_0$  が著しく大きくなることが図から読み取れる。そのため、本課題では  $k_0$ - $D_s$  の関係を式 (8) に示すように指数関数で表すこととした。また、既往研究<sup>14)</sup> 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。

$$D_s > 0.5\text{m の場合 } k_0 = 1.654 \exp(1.143 D_s) \quad (8)$$

なお、既述の通り、 $k_0$  は  $D_s$  のみならず積雪層構造等の影響も受けるため、地域や年によって異なることも想定される。そのため、 $k_0$  の与え方、式 (8) の適用条件については引き続き検討が必要である。

### 6. 積雪底面流出量の推定結果

図 1 に示した推定フローに従って、4 章、5 章に示す一連のモデルから算出した積雪底面流出量  $M_b'$  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、 $M_b'$  のピーク値およびピークの出現時間も実測値と近い値を示した (図 6)。また、図 7 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、実測値に対する二乗平均平方根誤差 (RMSE) は 0.5mm/h であり、良い相関関係にあることがわかる。なお、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は、容易に入手可能な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。加えて、推定過程に積雪性状モデルを組み込んだことにより、雪温の影響を考慮できるようになり、冒頭に述べた厳冬期の一時的な気温上昇に伴う降雨・融雪現象についても評価 (適用) 可能となった。しかしながら、図 7 に示すとおり実測値を過少、過大評価している点も多くみられることから、雪温の推定や貯留係数の設定方法等については引き続き検討が必要である。また、今回提案した手法を

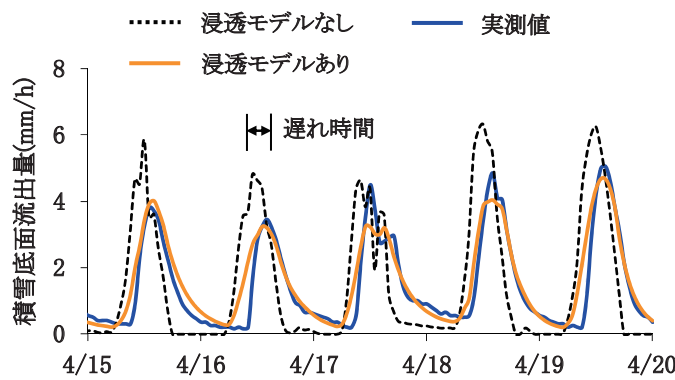


図6 積雪底面融雪量の時系列変化

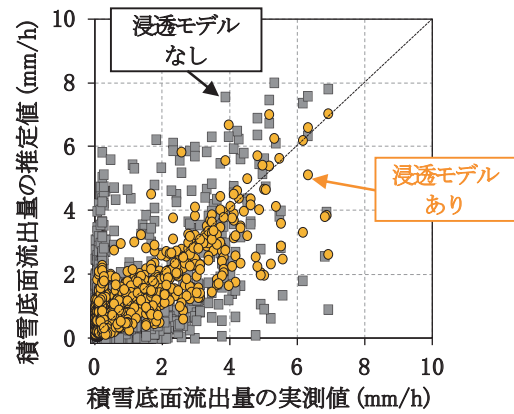


図7 積雪底面融雪量の推定結果

今後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、また積雪の破壊強度に影響を及ぼす積雪中の含水率を積雪性状モデルから算出できるようにすることを目標にモデルの改良・拡張を図る予定である。

## 7. 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可能な気温、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、提案手法の改良・拡張を図るとともに、積雪底面流出量と積雪強度、ならびに全層雪崩の危険度指標であるグライド速度との関係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。

## 文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 近藤純正：地表面に近い大気科学, 財団法人東京大学出版会, pp.82-165, 2000
- 4) 前野紀一, 福田正巳：雪氷水文現象, 基礎雪氷学講座VI,

古今書院, pp.17-92, 1994

- 5) 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.
- 6) Kun Y., and Toshio K., "A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies", *Water Resources Research*, Vol.41, 2005.
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 日本気象学会：気象観測—地上気象観測篇, 気象研究ノート, Vol.185, pp.1-12, 1996
- 10) 気象庁：地上気象観測指針, 気象業務支援センター, 2002
- 11) Pellicciotti F., Helbing J., Rivera A., Favier V., Corripio J., Araos J., Sicart J. and Carenzo M., "A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity", *Hydrological Processes*, Vol.22, pp.3980-3997, 2008.
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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