

土砂災害発生危険度評価のための 実用的融雪量算出法の提案

宮崎 嵩之¹・中津川 誠²・西原 照雅³

¹学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: 15041063@mmm.muroran-it.ac.jp

²正会員 博士 (工学) 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: mnakatsu@mmm.muroran-it.ac.jp

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

E-mail: nishihara-t22aa@ceri.go.jp

本研究の目的は、融雪に伴う土砂災害危険度評価を行うことであり、合わせてそのための実用的な融雪量推定法を提案するものである。近年、日本の至る所で大雨に伴う土砂災害が発生しているが、北海道のような積雪地域では、融雪を誘因とする土砂災害も頻発している。本研究では、積雪重量計による観測データに基づき積雪密度の設定に改良を加えた雪面低下法の他に、熱収支法、デグリーアワー法の3つの手法を用いて融雪量の推定を行った。また、それらによって土壌雨量指数を推算し、スネーク曲線で土砂災害発生危険度を評価できるかを検証した。この結果、土砂災害発生危険度の評価において熱収支法の優位性を確認するとともに、実際の道路管理等の観点からの雪面低下法の改良について提案した。

Key Words: landslide, risk evaluation, soil water index, amount of snowmelt, snow density

1. はじめに

近年集中豪雨の増加等の影響により日本全国で斜面災害の危険度が増大している一方で、北海道等の積雪地域では融雪期の大雨によって引き起こされる斜面災害の増加が懸念されている。本研究の対象とした札幌市と道南方面を結ぶ国道 230 号中山峠においても、写真-1 に示すように融雪期における斜面災害がたびたび発生し、交通等の大きな障害となっている。このような現状を受け、積雪地域では降雨に加え融雪も勘案した土砂災害発生危険度を表す指標の設定・運用が必要と考えられる。

斜面災害発生危険度の評価方法に関しては、災害の要因に関する様々な視点からの提案^{1), 2)}がなされている。

Glade³⁾ は、斜面災害の誘因として知られる激しい降雨および前期降雨を指標とした前期降雨モデルを用いることで、降雨発生確率のしきい値を設定し、斜面災害の発生基準の推定手法を提案した。これらの考え方を受け、現在気象庁では、土壌中の浸透状態を表す3段タンクモデルの貯留高の合計値を「土壌雨量指数」とし、降雨による地盤の湿潤状態を表す岡田⁴⁾による手法等に基づいた土砂災害発生危険度評価および予測をしている。また、そこで危険が予測される場合は、各都道府県と共

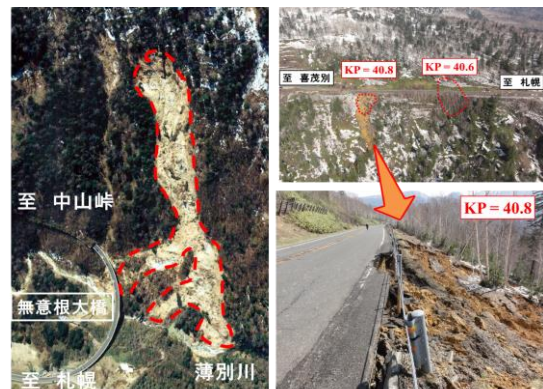


写真-1 国道 230 号中山峠の被災状況
(左: 2000 年 5 月 15 日 右: 2012 年 5 月 4 日
提供: 北海道開発局札幌道路事務所)

同で「土砂災害警戒情報」を発令している。

しかし、これらの手法が対象とする斜面災害は降雨を誘因としているものであり、融雪は考慮されていない。融雪を考慮した斜面災害の危険度判定は、岩倉ら⁵⁾や臼谷ら⁶⁾などが検討を行っているほか、Kawagoeら⁷⁾は融雪を勘案した土砂災害ハザードマップの作成を行っているが、その報告事例は少なく、地域に応じた適用性について十分な検証がされているとは言い難い状況にある。そこで本研究では、複数の融雪量の算出法に基づく土壌

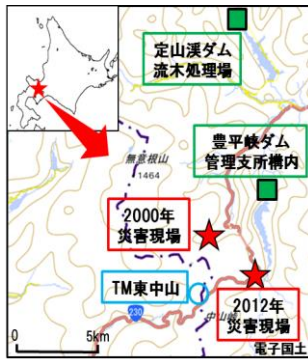


図-1 災害発生箇所及び気象観測所



写真-2 積雪重量計（定山溪ダム流木処理場）

雨量指数の推定を通し、より実用的な災害発生危険度評価を試みた。具体的には、以下のような検討を行った。

- 1) 積雪重量計による観測データに基づき、積雪密度の設定法を提案した。それによって改良を加えた雪面低下法のほか、熱収支法、デグリーアワー法の3つの手法を用いて融雪量の推定を行った。
- 2) 土壌雨量指数を用いたスネーク曲線によって災害発生危険度を評価し、融雪量推定手法の妥当性を比較検討した。

2. 研究の方法

(1) 融雪量の推定方法

融雪期における土壌水分状態の推定に必要な融雪量の算出法として、以下の3つの手法を検討した。以下に具体的な手法を示す。

a) 熱収支法

熱収支を用いた融雪量を、白谷ら⁸⁾が提案する融雪モデル・積雪浸透モデルを用いて約1km四方のメッシュ毎に求めた。このモデルは、近藤・山崎ら⁹⁾が提案した熱収支法を用いて雪面における融雪量を算出する融雪モデルと、中津川ら¹⁰⁾が提案する1価線形貯留関数法に基づき、底面から流出する水量を求める積雪浸透モデルの2種を用いて土壌供給水量の推算を行うものである。ここでは、入力データとして豊平峡ダム管理用已取得されている気象データ（気温、湿度、風速、積雪深、日射量、気圧）を用いた。なお、任意個所の気温はダム

管理所地点の観測値を標高により補正し、日射量は緯度・経度方向の傾斜を補正して求めた。また、地形や地被データには、石狩川ランドスケープ情報¹¹⁾を用いた。

b) デグリーアワー法

各時間毎に計測された気温のうち0°Cを上回った度数に相当する融雪量を次式から算出する。

$$m = k_{dhf} T_{dh} \quad (1)$$

ここで、 m は融雪量（mm/hr）、 T_{dh} は所定の時刻 t でのデグリーアワー（deg）、 k_{dhf} はデグリーアワーファクター（mm/deg/hr）である。計算に用いる気温データは、対象災害発生地域付近に設置されている道路テレメータ（TM 東中山）における2000～2012年のデータを用いた。また、デグリーアワーファクターは実務への適用を考え固定値とし、中津川ら¹²⁾による既往研究において、豊平峡ダムへの計算流入量が実測流入量に合うように調節した結果得られた0.15mm/deg/hrを採用した。なお、積雪がなくなった時点で融雪量は0とした。

c) 雪面低下法

融雪期における積雪深の変化から積雪表層に発生した水量を推定し、次式により融雪量を算出する。

$$m = 10\rho_s \Delta H \quad (2)$$

ここで、 m は融雪量（mm/hr）、 ρ_s は積雪密度（g/cm³）、 ΔH は雪面低下量（cm/hr）を表している。この手法の利点として、積雪深の観測データがあれば簡単に融雪量の算出が可能であることが挙げられるが、松浦¹³⁾は積雪の堆積過程における圧密作用の影響で、この手法が合理的に採用できるのは積雪比重がほぼ一定となる融雪期に限られると指摘している。そこで本研究では、小島ら¹⁴⁾による積雪密度の設定目安を参考に、0°C以上の日が3日継続する前をしまり雪（積雪密度0.3g/cm³）、後をざらめ雪（積雪密度0.3～0.5g/cm³）とし、それを用いて融雪量を算出した。これを「従来法」と称する。加えて、「改良法」と称して以下で説明する方法により、時間変化する積雪密度の設定を行い、それを用いて融雪量を算出した後に、従来法との比較を行った。

(2) 雪面低下法の改良

a) 観測データに基づく積雪密度の設定

継続的に積雪密度を測定することは困難であるが、時間単位での積雪重量および積雪深が判明している場合には、その推定が可能である。そこで、災害発生地点に近い定山溪ダム流木処理場および豊平峡ダム管理支所構内の2地点において、時間単位で測定された積雪重量及び積雪深から積雪密度の推定を行った。各観測所の位置関係は図-1に示す通りである。また、観測期間は、定山溪ダム流木処理場で2005～2016年の11年間、豊平峡ダ

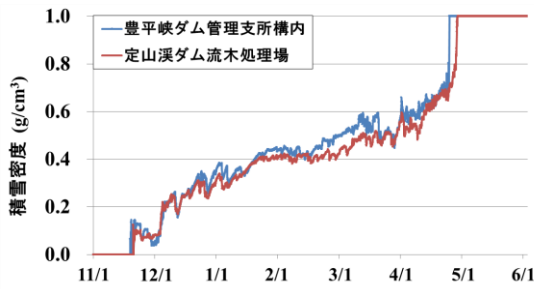


図-2 各観測所における積雪密度の推移
(2011年11月～2012年5月)

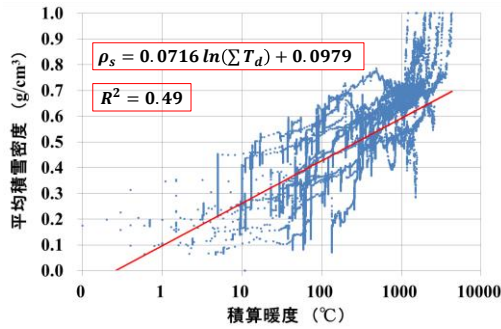


図-3 積雪密度と積算暖度の相関および対数近似線

ム観測処理場で 2010～2016 年の 7 年間とした。積雪重量の計測に用いた積雪重量計は新潟電気 (株) 製 MN-301 であり、ステンレス製の薄板扁平容器 2 枚の中に不凍液を充填し、容器内圧力を圧力センサーで電氣的に計測するものであり、一枚あたり 1m×2m の大きさで、最大 2,500kg/m² まで計測できる。なお、各観測所にはそれぞれ写真-2 に示すような 2 台の積雪重量計を設置しており、計算においては 2 台の平均値を積雪重量データとして用いた。図-2 は、災害発生日を含む 2011 年 11 月から 2012 年 5 月において、2 つの観測所での観測データから算定した積雪密度の推移を示したものである。この図をみると、積雪密度は雪の降り始めから融雪が終わるまでほぼ増加し続けており、観測地点が異なっている場合でも、その傾向は概ね一致していることがわかる。

そこで、積雪重量計による観測データがない場合においても積雪密度の推定を可能にするために、時間ごとの積雪密度と積算暖度との相関をとり、それをもとに近似式を作成した。ここで積算暖度とは、12 月 1 日 1 時以降における 0°C 以上となった気温の積算値を指す。図-3 は、2 つの観測所において 2010～2016 年までの積雪密度と対数目盛にとった積算暖度の相関図及び近似線を示したものである。最小二乗法に基づく近似式を以下に示す。

$$\rho_s = 0.0716 \ln(\sum T_d) + 0.0979 \quad (3)$$

ここで、 $\sum T_d$ はある時間でのデグリーアワー (deg) , ρ_s は同時間における積雪密度 (g/cm³) を表す。

b) 水収支を考慮した融雪量の補正

図-4 は上記の 3 つの融雪量算出法を用いて 2000～

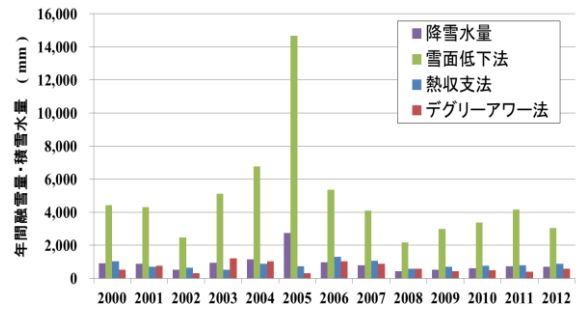


図-4 各手法を用いた年間融雪量・降雪水量の比較

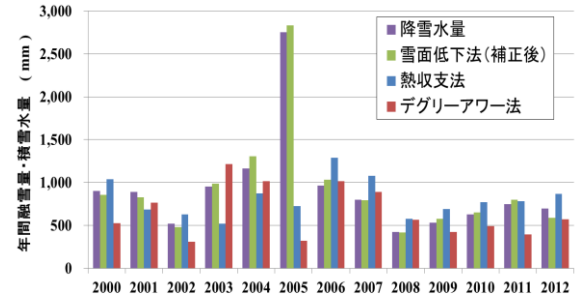


図-5 補正した雪面低下法による融雪量と各水量の比較

2012 年までの 3～6 月の融雪量を算出し、比較したものである。この図をみると、雪面低下法 (改良法) を用いて算出した融雪量が他 2 つの手法によるものと比べて突出して多いことがわかる。この理由として、雪面低下量に融雪だけではなく積雪の圧密分が含まれてしまったことが考えられる。そこで、水収支の観点から、積雪深の 1 時間当たりの増加分に積雪密度 (新雪は 0.1g/cm³ とする¹⁴⁾) を乗じた値を降雪水量とし、各年ごとに年間の降雪水量と融雪量が等しくなるような補正を考える。その結果、各年の平均値である 0.193 を改良法に基づく融雪量に乘じることで各手法に基づく融雪量が各年ともほぼ同程度の値となったため、以降この補正值を用いて計算を行った。補正結果を追加したものを図-5 に示す。

(3) 土壌雨量指数 (SWI) の推定方法

土壌雨量指数 (Soil Water Index (以下、SWI とする)) の推定にあたり、上記で示した手法により各時間融雪量を推算した。また、時間雨量について、3 月以降に観測された降水量はすべて降雨とし、気象庁が提供している 2000～2012 年での災害現場付近の解析メッシュ雨量データを使用した。以上で算出された時間融雪量と時間雨量を、図-6 に示す直列 3 段タンクモデルに入力し、SWI を推算した。なお、タンクモデルのパラメータは現在気象庁で全国一律に設定されており、その値¹⁵⁾を使用した。

(4) スネーク曲線の作成と RBFN を用いた CL の設定

斜面災害危険度判定を行うため、縦軸に上記の手法により推定した各時間融雪量及び時間雨量を、横軸に同時

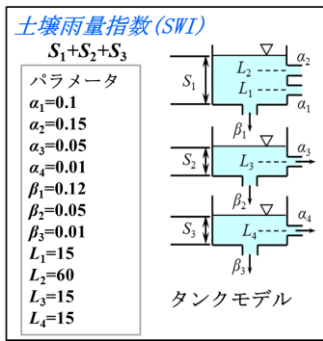


図-6 直列3段タンクモデルとパラメータ

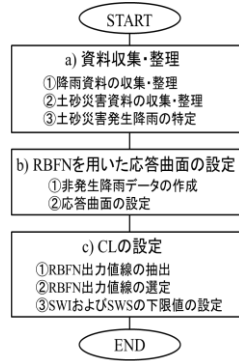


図-7 CLの設定フロー

刻における SWI を用いてスネーク曲線を作成した。また、危険度判定に用いられる Critical Line (以下、CL とする) は、国土交通省と気象庁の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法 (案) (以下、連携案) に基づき各地域別に設定されている。連携案に基づいた CL の設定フローを図-7 に示す。連携案では、倉本ら¹⁶⁾ が提案した RBF ネットワーク (Radial Basis Function Network (RBFN)) を用いた非線形 CL の設定手法が採用されており、CL の降雨指標に時間雨量と土壤雨量指数が用いられている。本研究では、推定した SWI を用いて CL の設定を試みた。

a) 資料収集・整理

最初に、CL の設定に必要な災害発生地点付近における時間雨量・融雪量データを収集し、SWI を計算する。対象期間は融雪期に限定せず、2000~2012 年の 13 年間とした。また、収集したデータは CL の設定手法に関する既往文献¹⁷⁾ を参考に、当該現場付近で大規模な斜面災害が起きた 2000 年、2012 年の一連の降雨及び、それに準ずる土壤水分量が推定された一連の降雨を土砂災害発生降雨 (発生降雨) として分類した。

b) RBFN を用いた応答曲面の設定

次に、収集した降雨データの中から抽出した斜面災害発生降雨を除外した非発生降雨のみとなる降雨データを作成し、RBFN を用いて応答曲面を設定する。ここで応答曲面とは、3次元座標において x 軸を土壤雨量指数、y 軸を 60 分間積算雨量とする任意の点の非発生降雨がどの程度の確率で発現するかを示すものであり、z 軸をその発現確率として RBFN 出力値としたものである。本研究では、x 軸に推定した SWI を、y 軸に 60 分間積算雨量・融雪量を用いた。

c) CL の設定

連携案においては、設定した応答曲面から非発生降雨の発現確率を示す RBFN 出力値 0.1~0.9 (0.1 間隔) が同値となる点を結んだ 9 本からなる線を等 RBFN 出力値線とし、この中から土砂災害警戒情報の運用に適した CL の選定を行う。

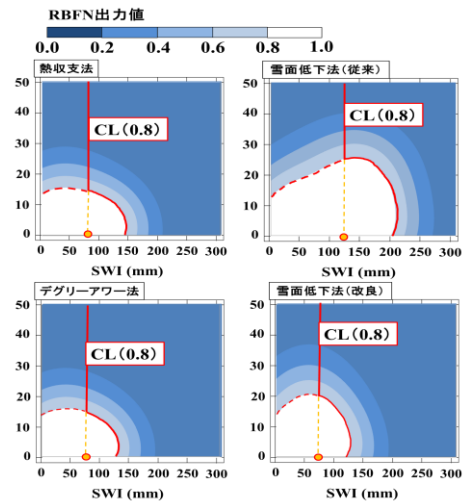


図-8 4つの融雪量推定法に応じ作成した応答曲面

4. 結果と考察

(1) CL の選定と安全領域の設定

上記の手法により推定した SWI を用いて作成したそれぞれの応答曲面を図-8 に示す。なおこの図は、3次元曲面として算出される応答曲面を z 軸上の真上から見た状態で 2次元表示したものである。この図から抽出した 9 本の RBFN 出力値線から斜面災害危険度判定に用いる最適な CL の選定を行う。本研究においては、すべてのパターンにおいて 2000 年および 2012 年の災害発生を見逃さない RBFN 出力値線のなかで、空振りが最小限となる RBFN 出力値 0.8 を最適な CL として選定した。また、下限値を設定していない CL と、非発生降雨のスネーク曲線を比較検討した結果、SWI が小さいにも関わらず、短時間降雨が瞬間的に大きいだけで CL を超える、つまり空振りが頻発することが予想される。それを回避するように SWI の下限値の 6 割をしきい値として安全領域を設定した。このようなしきい値は実運用されている危険度評価においても導入されている。

(2) 各 SWI の推定結果と比較検討

図-9 及び図-10 は、2000 年及び 2012 年において、現場付近での SWI を推定した結果である。図中の青・赤・緑・橙線は、それぞれ熱収支法・デGREEアワー法・雪面低下法 (従来法)・雪面低下法 (改良法) を用いて融雪量を推算し、それを入力値として推定した SWI の中で、3月~6月の結果を表示している。この図をみると、従来法による SWI が、災害発生日以外の時期においても大きい状態が継続していることがわかる。一方で、すべてのグラフにおいて、災害発生日の同日または直前に SWI が最大となっていることから、雨量に加え、融雪量を考慮した場合においても、当時の状況を踏まえた危険度評価が可能であると考察される。さらに、各

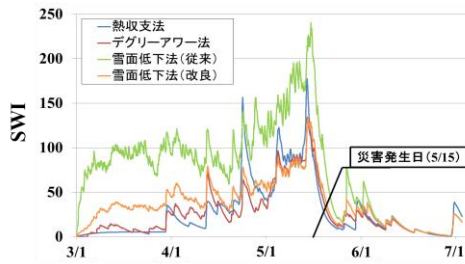


図-9 中山峠における各 SWI の比較 (2000 年融雪期)

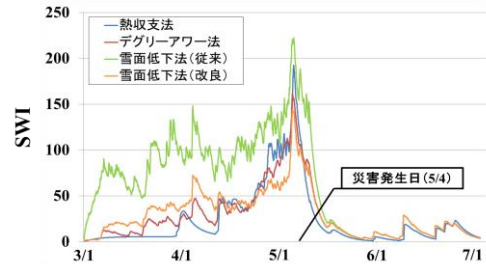


図-10 中山峠における各 SWI の比較 (2012 年融雪期)

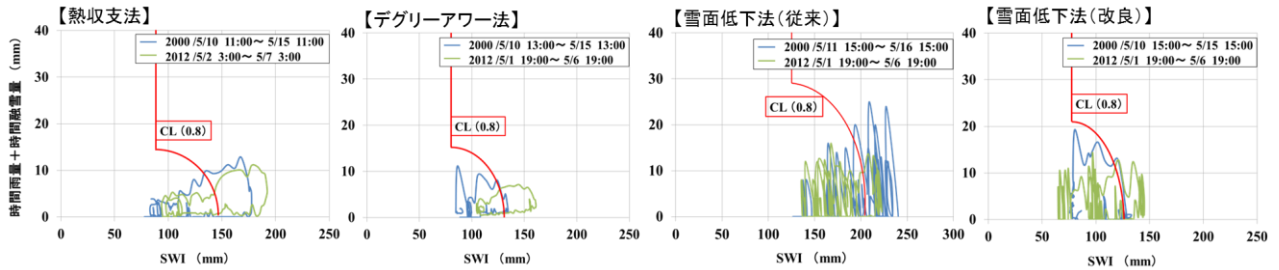


図-11 中山峠における4つの融雪量算法により作成したスネーク曲線

SWIの最大値に着目すると、熱収支法が他2つと比較して大きいことに加え、2000年の事例においては熱収支法の結果のみに他2つには無いピークが現れている。これは、熱収支法が気温のみならず、風速や日射量等の融雪に関わる要因を包括的に考慮できる手法であるためと考えられる。

(3) スネーク曲線による危険度評価

図-11は、推定したSWIの中で年最大値を含む5日間のスネーク曲線を作成した結果である、図中の青・緑線は、それぞれ2000年・2012年のスネーク曲線を示している。また、各手法による差異を比較するために、それぞれのスネーク曲線のCL超過期間及び超過時間を表-1にまとめた。これらの結果を踏まえた見解を以下に示す。

- ・熱収支法によるスネーク曲線は他3つの手法と比較して2ヶ年ともCLを大幅に超過していることから、斜面災害予測の観点では最も適切な評価が可能であったと結論づけられる。
- ・デグリーアワー法によるスネーク曲線は、特に2000年の事例においてCLの超過幅が小さく、危険度を過小評価していた。
- ・雪面低下法(従来法)はCLの超過幅が大きく、超過時間も長い一方で、スネーク曲線の変動が大きく不安定であり、それが危険度の判定を困難にする懸念がある。この原因としては、圧密などの影響も受ける積雪深の変動に直接影響を受けて誤差が大きくなっていることが考えられる。
- ・雪面低下法(改良法)は、CLの超過期間が長く、従来法と比較してスネーク曲線の変動の不安定さが改良されているが、2000年の事例においてCLの超過幅が

表-1 CLの超過期間および超過時間

熱収支法	2000年	2012年
CL超過期間	2000/5/12 13:00~5/13 10:00	2012/5/4 4:00~5/5 19:00
CL超過時間	22	40
デグリーアワー法	2000年	2012年
CL超過期間	2000/5/12 22:00~5/13 7:00	2012/5/3 21:00~5/5 13:00
CL超過時間	10	41
雪面低下法(従来)	2000年	2012年
CL超過期間	2000/5/12 19:00~5/14 16:00	2012/5/3 23:00~5/5 0:00
CL超過時間	46	26
雪面低下法(改良)	2000年	2012年
CL超過期間	2000/5/12 22:00~5/14 10:00	2012/5/4 0:00~5/5 5:00
CL超過時間	37	30

過小評価となった。このことから、雪面低下法は簡便性において特に実務面では一定の価値があるが、安全な評価が可能かは十分な検証が必要と考えられる。

以上のことから、今回の事例については、本研究で示した3つの融雪量算法について、斜面災害危険度の観点において、著者らが提案してきた熱収支法が最も安全側の評価が可能であると考えられる。

5. おわりに

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 複数の算法に基づき推定した融雪量を用いてSWIを推算することで、融雪を勘案した斜面災害危険度判定を行った。その結果、雨量に加え、融雪量を考慮した場合においても、当時の状況を踏まえた危険度評価が可能であることがわかった。
- 2) 積雪重量データを用いた積雪密度と積算暖度の関係式を作成し、それを基に改良した雪面低下法を提案した。その上で土砂災害発生危険度の評価において熱収支法の優位性を確認した。

以上より、より実務的な土砂災害発生予測の精度向上に寄与し得る手法が提案できたと考える。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、文部科学省（MEXT）の事業である気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）の助成を受けた。また、（独）土木研究所寒地土木研究所防災地質チームおよび（一財）日本気象協会の松岡直基氏並びに白谷友秀氏にはデータ提供等で協力して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 寺田秀樹, 中谷洋明: 土砂災害警戒避難基準の設定方法, 国土技術総合研究所資料, 第5号, 2001.
- 2) Nobutomo, O. Takeshi, S. Shinichi, K. and Tomoyuki, N: Japanese Early-warning for Debris Flows and Slope Failures using Rainfall Indices with Radial Basis Function Network, Landslides, 7, 325-338, 2010.
- 3) Glade, T. Crozier, M.J. and Smith, P: Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “Antecedent Daily Rainfall Model”, Pure Appl. Geophys., 157(6/8), 1059-1079, 2000.
- 4) 岡田憲治, 牧原康隆, 新保明彦, 永田和彦, 国次雅司, 斉藤清: 土壌雨量指数. 天気, 48, 349-356, 2000.
- 5) 岩倉徹, 神原孝義, 谷本英徳, 大谷健一, 時岡真治, 渡邊智明, 大西正容: 融雪期に発生する土砂災害に対する警戒避難基準設定手法の検討, 平成22年度砂防学会研究発表会概要集, 520-521, 2010.
- 6) 白谷友秀, 中津川誠, 松岡直樹: 融雪期の土砂災害に関連する土壌水分の定量評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.I_403_I_408, 2013.
- 7) S.Kawagoe, S.Kazama and Priyantha Ranjan Sarukkalgidige, Assessment of snowmelt triggered landslides hazard and risk in Japan, Cold Region Science and Technology, Vol.58, No.3, pp.120-129, 2009.
- 8) 白谷友秀, 星清, 中津川誠: 熱収支法に基づく2段タンク型融雪流出モデルの適応, (財)北海道河川防災研究センター研究所紀要(XVII), 19, 2006.
- 9) Junsei, K. and Takeshi, Y: A prediction model for snowmelt, snow surface temperature and freezing depth using a heat balance method, J. Appl. Meteor., Vol.29; 375-384, 1990.
- 10) 中津川誠, 工藤啓介: 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, 第48巻; 37-42, 2004.
- 11) (財)北海道河川防災研究センター: 石狩川流域ランドスケープ情報, 1998.
- 12) 中津川誠, 白谷友秀: 水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算, (財)北海道河川防災研究センター研究所紀要, XVII, pp.299-323, 2006.
- 13) 松浦純生: 積雪地帯における降水の到達過程と地下水及び地すべりの挙動(その1) -冬期間における降水と地表面到達水量の動態-, 地すべり技術, Vol.30, No.1(88号), 2003.
- 14) 小島賢治: 融雪機構と熱収支, 気象研究ノート, 136, 1-38, 1979.
- 15) 気象庁: 土壌雨量指数: <http://www.jma.go.jp/kishou/ know/bosai/dojoshisu.html>
- 16) 倉本和正, 鉄賀博己, 東寛和, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平: RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.672/VI-50, pp.117-132, 2001.
- 17) 杉原成満, 福田慎哉, 倉本和正, 荒木義則, 朝位孝二, 古川浩平: SCE-UA 法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定, 土木学会論文集 F6, Vol. 67, No. 1; 1-13, 2011.

(2016.12.14 受付)

A PROPOSED PRACTICAL SNOWMELT CALCULATION METHOD FOR ASSESSING THE RISK OF LANDSLIDE DISASTERS

Takayuki MIYAZAKI, Makoto NAKATSUGAWA and Terumasa NISHIHARA

This study aims to conduct risk assessments for snowmelt-related landslide disasters and to propose a practical snowmelt estimation method that accurately assesses the landslide disaster risk. In recent years, landslide disasters have occurred during heavy rainfall events in many areas in Japan. In snowy areas such as Hokkaido, landslide disasters caused by snowmelt have frequently occurred. In this study, snowmelt was estimated by using three methods. One was a snow surface lowering measurement method, which was improved in its setting of snow cover density based on data gathered by using snow weight meters. Another was a heat balance method and the third was a degree-hour method. We estimated the soil water index by using the above three methods and examined whether it was possible to use snake curves to assess the risk of landslide occurrence. The examination clarified that landslide disaster risk can be assessed by using the snow surface lowering measurement method, which has been used in actual road management, when the snow cover density is set by using the method proposed in this study. As a result, we confirmed the superiority of the heat balance method in evaluating the risk of landslide disasters, and proposed improvement of the snow surface lowering method from the viewpoint of actual road management.