

# 二次的な土砂災害発生予測手法について ～簡易な融雪量予測に向けて～

独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 秋山一弥

## 1. はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震（マグニチュード6.8）では、最大震度7を記録し、道路や鉄道、家屋などに多くの被害を及ぼした。同時に信濃川水系魚野川支川の芋川流域を中心として、多数の地すべりや斜面崩壊が発生し、溪流内に大量の不安定土砂が堆積するとともに、多くの箇所でも河道閉塞が発生した。多くの被害が生じた中越地域は、新潟県においても豪雪地帯であるうえ、地震直後に積雪期を迎えるという状況となり、融雪期には融雪水に起因する土砂災害の発生が懸念された。

わが国の土砂災害の多くは梅雨期から台風期の豪雨によって発生することが多いため、土砂災害に対する警戒・避難の基準は連続降雨量、時間最大降雨量などの降雨量を最大の決定因子として構築されている。そこで本研究では、豪雪地帯の山地流域において、融雪期における斜面への供給水量や河川の流量を予測する上で必要な融雪水量の推定手法を提案し、地震後に発生する二次的な土砂災害の被害の軽減に資することを目的とする。

## 2. 研究方法

### 2.1 気象・融雪等の現地観測

芋川流域内の新潟県古志郡山古志村（現長岡市）小松倉集落近くの標高190mの地点において、気象・融雪等の観測を行った（図1）。観測機器は気温計、日射計、超音波式積雪深計を高さ4mの観測機器設置用の架台に設置した（図2）。また、実際の融雪水量を計測するため、架台近傍の地面に1m×1mの金属製パン（ライシメータ）を水平に設置し、積雪後に浸透降下した融雪水をパンで集水し転倒マスによって計測できるようにした。これらはいずれも一つのデータロガーに集約し30分間隔で記録を行った。さらに、小松倉の観測施設以外に、他の関係機関によって観測されている記録も参考とした。用いたデータの一覧を表1に示す。

### 2.2 融雪水量の算定方法

融雪水量を算定する手法として、熱収支法は雪面に出入りするエネルギー量を計算し、その残差を融雪に使われた熱量とする方法で、一般に $Q_M = Q_N + Q_H + Q_E + Q_P + Q_C$ と表される。ここで、 $Q_M$ は融雪または積雪層の昇温、降温に用いられる熱量、 $Q_N$ は純放射量、 $Q_H$ は顕熱交換量、 $Q_E$ は潜熱交換量、 $Q_P$ は降雨による熱量、 $Q_C$ は積雪層中の伝導熱量で、単位は $W/m^2$ である。純放射量 $Q_N$ については $Q_N = (1 - \alpha) \cdot I \downarrow + L \downarrow + L \uparrow$ と表すことができる。ここで、 $L \downarrow$ は下向き長波放射量、 $L \uparrow$ は上向き長波放射量で

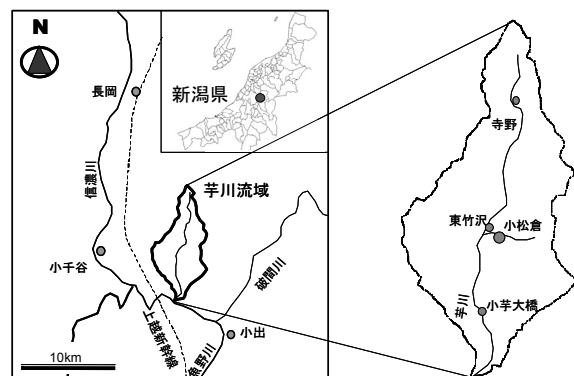


図1 観測地点位置図(旧山古志村小松倉)

表1 観測地点と観測項目

観測地点	測定項目	熱収支法に必要な要素	検討した簡易的手法に必要な要素	観測機関
小松倉	気温	○	○	土木研究所・岩手大学
	湿度	○		
	風向			
	風速	○		
	気圧	○		
	日射量(上下)	○	○	
	純放射量	○		
	積雪深			
融雪水量	○(検証)	○(検証)		
東竹沢	気温			湯沢砂防事務所
	風向			
	風速	○		
	雨雪量		○	
	積雪深			
寺野	気温			湯沢砂防事務所
	雨雪量			
小芋天橋	積雪深			湯沢砂防事務所
小芋天橋	河川水位			湯沢砂防事務所

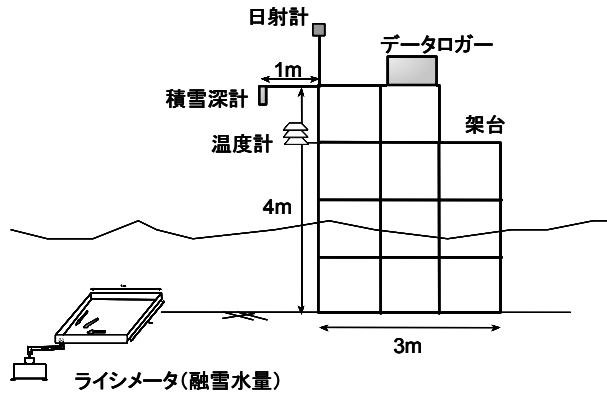


図2 観測機器の概要

あり、このうち、第1項が短波放射(日射)に

よる融雪熱量、第2項以降が大気と雪面の放射量の差で長波放射による融雪熱量である。顕熱交換量は積雪面付近の温度勾配により生じる融雪熱量で、潜熱交換量は積雪面と大気の水蒸気圧の差により生じる融雪熱量である。積雪層中の伝導熱量 $Q_c$ は、融雪期では積雪層の温度勾配がなくなるため、 $Q_c = 0$ となる。

熱収支法は雪面における熱の収支を物理的に説明しており、1時間あたりの融雪水量が算出可能であるなど優れた方法である。しかし、観測する気象要素が多岐にわたり煩雑であるため、要素を限定した簡易的な計算手法が多く提案されている。

今回は3つの気象要素を用いた簡易的な熱収支式を考え、日単位の融雪水量予測を行った。検討した推定手法は、日平均気温、日射量、降水量を用いるもので、翌日の天気、最高・最低気温、そして降水量の情報から翌日の日融雪水量を予測計算する方法である。この予測結果について、実際に小松倉で計測している融雪水量と比較してその精度を検証した。計算の詳細は以下のとおりである。

まず、雨雪量を降雨と降雪に分離した。方法は、水津(2001)による方法に従い、新潟気象台のデータ(1994年～2003年)より図3のとおり気温と降雪の発生確率の関係を求めて直線近似を行った。近似直線における降雨発生の下限の気温を降雪100%の気温(0.6°C)、降雪発生の上限の気温を降雪0%の気温(4.6°C)とし、0.6°C以下は全ての降水が雪、4.6°Cの気温では雨と評価した。0.6～4.6°Cの間では、発生確率の割合で降雪、降雨を区分した。

次に簡易的な熱収支式について、以下のとおり設定を行った。1日当たりの融雪水量 $M$ (mm/day)は、1日の融雪熱量 $Q_M$ (J/m<sup>2</sup>/day)を水の融解潜熱 $\iota_F$ (0.334×10<sup>6</sup>J/kg)で除して

得ることができる。平均気温( $T_a$ )が0°C以上では、積雪表面での熱収支のすべてが融雪に費やされ、-3°C以下では積雪表面での融雪は起こらず、0°Cと-3°Cの間では熱収支の $(T_a + 3) / 3$ が融雪に費やされると考えて、 $M$ を次の式で計算した。

$$M = 0 \quad (T_a < -3)$$

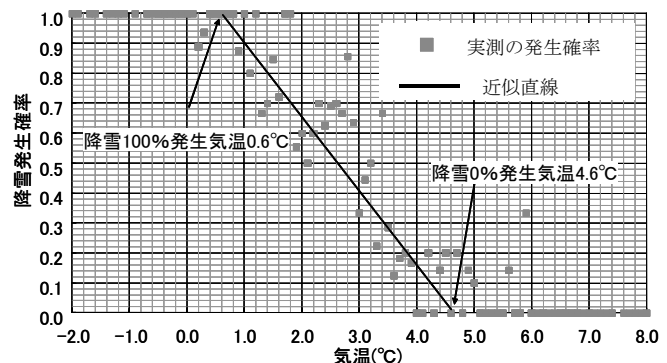


図3 気温と降雨・降雪の関係

$$M = \frac{(1-\alpha)I + (L\downarrow - L\uparrow) + Q_H + Q_p + Q_c}{t_F} \quad (T_a > 0), \quad M = \left( \frac{(1-\alpha)I + (L\downarrow - L\uparrow)}{t_F} \right) \cdot \left( \frac{T_a + 3}{3} \right) \quad (-3 < T_a < 0)$$

純放射量 $Q_N$ の第1項(短波放射)のうち、アルベド $\alpha$ は山崎ら(1994)による方法を用い、日平均気温と日降水量から日平均アルベドを求めた。

$$\alpha_0 = \alpha_{max}, \quad \alpha_n = (\alpha_{n-1} - \alpha_{min}) \times \exp(-1/k) + \alpha_{min}$$

ここで、 $\alpha_{min}$ はアルベドの最小値(=0.4)である。日降水量が3mm以上で、日平均気温 $T_a$ が $2^\circ\text{C}$ 以下の時には新積雪があるとし、 $\alpha_\sigma = \alpha_{max}$ とする。また、 $\alpha_{max}$ と $k$ は以下の通り与えられる。

$$\begin{cases} \alpha_{max} = -0.12T_a + 0.76 & T_a \geq -1.0^\circ\text{C} \\ \alpha_{max} = 0.88 & T_a \leq -1.0^\circ\text{C} \end{cases} \quad \begin{cases} k = -4.9T_a + 4.5 & T_a \leq 0.1^\circ\text{C} \\ k = 4.0 & T_a \geq 0.1^\circ\text{C} \end{cases}$$

次に、第2項以下の長波放射については、平松ら(1998)により以下の方法で計算した。

$$L\downarrow = \sigma(T_a + 273)^4 (0.605 + 0.048e_{sat}^{\frac{1}{2}}), \quad L\uparrow = \varepsilon\sigma(T_0 + 273)^4$$

$$\begin{cases} T_0 = 1.13T_a - 1.67 & T_a < 1.47 \\ T_0 = 0.0 & T_a \geq 1.47 \end{cases} \quad e_{sat} = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_a}{273.3+T_a}}$$

ここで、 $\varepsilon$ :雪面の放射率、 $e_{sat}$ :飽和蒸気圧(hPa)、 $\sigma$ :ステファン・ボルツマン定数(=5.670×10<sup>-8</sup>W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>)、 $T_0$ :雪面温度( $^\circ\text{C}$ )である。

顕熱・潜熱交換量について、水津は顕熱・潜熱輸送量を日単位で簡易に推定する手法( $K_{SL}$ 法)を提案している。 $K_{SL}$ 法は、風速・気温・比湿および地表面の温度から顕熱・潜熱輸送量を計算するバルク法に基づいており、これによれば、顕熱 $Q_H$ 、潜熱 $Q_E$ による融雪水量(mm/day)は、係数 $K_{SL}$ (mm/day/ $^\circ\text{C}$ )を用いて次のように求められる。

$$Q_H = K_{SL} P T_a / 1013, \quad Q_E = 1.53 K_{SL} (e - 6.11) \quad (\text{日平均気温 } 7^\circ\text{C} \text{ 以上の日のみ})$$

$$K_{SL} \propto c_p \rho C_H U$$

ここで、 $P$ :標準大気圧(hPa)、 $T_a$ :日平均気温( $^\circ\text{C}$ )、 $e$ :飽和水蒸気圧(hPa)、 $c_p$ および $\rho$ :空気の定圧比熱および密度、 $C_H$ 、 $C_E$ :顕熱、潜熱に対するバルク係数、 $U$ :風速である。

上式において係数 $K_{SL}$ は、融雪水量を推定する地域ごとに決定する必要がある。水津(2001)および水津(2002)によれば、 $K_{SL}$ の値は地形に依存し、地点によって0.9~5.4と大きな開きがあるが、水津(2001)が長岡の値として求めた2.0(mm/day/ $^\circ\text{C}$ )を用いた。

降雨により搬送される融雪熱量 $Q_p$ は $R$ を日雨量(mm/day)として以下のとおり求められる。

$$Q_p = R \cdot T_a \cdot 4.19 \times 10^4 / 10$$

以上から、日平均気温、日射量、雨雪量により融雪水量が計算できる。

### 2. 3 観測結果

2004年12月から2005年5月までの期間における気温、雨雪量、積雪深、融雪水量、河川流量の観測結果を図4に示す。

図4(b)には小松倉観測点とアメダス小出の積雪深の変化に、アメダス小出における過去10年間の平均的な積雪深を併せて示した。この期間のアメダス小出の記録は平年値を大きく上回っており、芋川周辺においても例年に比べて積雪が多かったことが推測される。

図4(c)は、積雪層底面からの融雪水量である。このデータは、積雪層内で融雪により発生した水と、降雨時に浸透して積雪層下端面に到達した雨水を併せて計測していることになる。図4(a)の気温の変化で、気温が $0^\circ\text{C}$ を下回らない日が連続する3月中旬から融雪

水量の増加が顕著となった。ピーク時の時間融雪水量は9.5mm(5月8日11~12時)、24時間融雪水量は74.5mm(5月6日~7日)に達した。

図4(d)に小芋大橋における芋川の流量観測結果を示す。融雪が本格化し始めた4月初旬から、融雪による短期流出の影響と思われる日周期の変動パターンが見られるようになる。また、融雪水量の極大値が得られている3月12、19、24、29日および4月8、11、23日に対応して流量のピークが現れている。小芋大橋における最大流量は4月23日5:00に約24m<sup>3</sup>/secを記録したが、これは前夜から降り続いた総雨量40mmの雨も含んでいる。

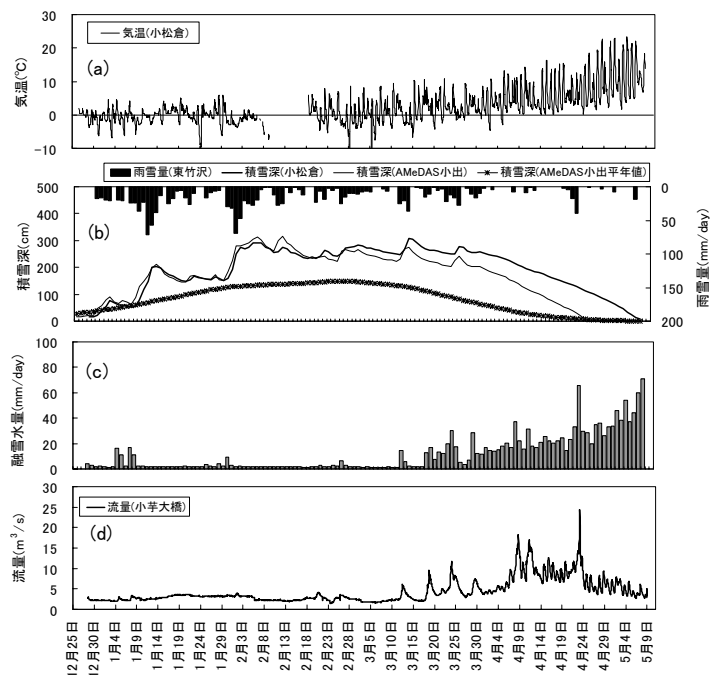


図4 2004年12月28日から2005年5月8日までの観測記録

### 3. 融雪水量の実測値と計算値の比較

簡易な熱収支法により計算した融雪水量および図3により分離した降雨量を合計した値と小松倉における融雪水量実測値の関係を図5に示す。全体的に予測値と実測値の傾向は類似しているが、4月下旬より計算値が過大となる傾向にあった。2005年3月から5月上旬まで、この手法を用いて気象台の気温等の予報値を元に日々の予測を行い、翌日の予測として現地の砂防事務所へ情報提供を行うことで警戒体制等の判断の目安として用いられた。

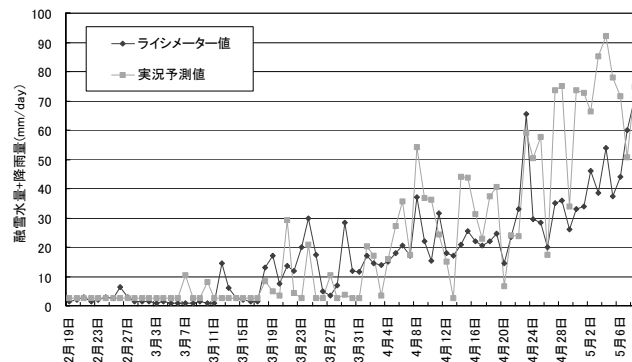


図5 融雪量の計算値と実測値の比較

### 4. おわりに

本研究では、芋川のような豪雪地帯を流域とする山地河川における溪流流量を予測する上で必要な融雪水量の推定手法を提案し、地震後に発生する二次的な土砂災害の被害の軽減に資することを目的として検討を行った。その結果、簡易な熱収支法による融雪計算結果は、全体的な傾向は実測値とよい適合性を示すものの、融雪最盛期には過大な算出となる傾向があったが防災上は有効であったと考える。今後は熱収支法などの手法と合わせて、より詳細に検討し精度の高い手法を確立する必要がある。

### 参考文献

- 1) 水津重雄: 簡易熱収支法による融雪・積雪水量モデル、雪氷、日本雪氷学会誌、63巻3号、pp.307-318、2001年5月
- 2) 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、41、pp.71-77、1994
- 3) 平松晋也、井良沢道也、本郷国男: 融雪に起因した山腹崩壊の発生に関する一考察、砂防学会誌、Vol.51、No.3、pp.27-34、1998
- 4) 水津重雄: 広域に適用可能な融雪・積雪水量モデル、雪氷、日本雪氷学会誌、64巻6号、pp.617-630、2002年11月