

# 融雪土砂災害に対する融雪を考慮した 土砂災害警戒情報の適用性の検討

APPLICABILITY OF SEDIMENT-RELATED DISASTER WARNING  
INFORMATION INCORPORATING THE EFFECT OF SNOWMELT  
FOR SNOWMELT-INDUCED SEDIMENT-RELATED DISASTERS

桂 真也<sup>1</sup>

Shin'ya KATSURA

<sup>1</sup>北海道大学大学院農学研究院 (〒060-8589 札幌市北区北 9 条西 9 丁目)

E-mail: skatsura@for.agr.hokudai.ac.jp

**Key Words:** *sediment-related disaster warning information, snowmelt, effective rainfall*

## 1. はじめに

積雪地域では、主に 3～5 月の融雪期に融雪に起因する土砂災害が多数発生し、大きな被害をもたらしている。被害を防止・軽減する方策の一つとして、こうした融雪土砂災害の発生タイミングを予測し、適切な警戒・避難につなげることが考えられる。そのためには、融雪土砂災害に対する警戒避難基準を設定する必要があるが、設定手法はまだ確立されていないのが現状である。

現在、降雨による土砂災害を対象として、災害発生の危険度が高まったときに、対象となる市町村を特定して警戒を呼びかけるため、土砂災害警戒情報が発表されている。土砂災害警戒情報は、横軸に土壌雨量指数、縦軸に 60 分間積算雨量をとってスネーク曲線を描き、発表基準線 (CL) を超過すると判断された場合に都道府県と気象庁が共同で発表するものである。融雪土砂災害に対する警戒避難基準として、まずは土砂災害警戒情報の発表手順に融雪水の影響を取り入れることが考えられる。こうした検討を行った数少ない事例として岩倉ら<sup>1)</sup>が挙げられるが、融雪土砂災害発生時にスネーク曲線が CL を超過していたかまでは検討されておらず、さらに検証を積み重ねる必要があると考える。

そこで本研究では、既往の融雪土砂災害事例を収

集した上で、降雨量に融雪水量を足し合わせた、最終的に地表面に到達する全水量である「地表面到達水量」を簡易に推定するモデルを用いて、融雪土砂災害発生地点における地表面到達水量を推定した。そして、降雨量の代わりに地表面到達水量を用いてスネーク曲線を描き、発生時に CL を超過するかの検討を行ったので報告する。

## 2. 既往の融雪土砂災害事例の収集

融雪により発生した既往の土砂災害事例のうち、以下の条件をすべて満たすものを収集した。

- ①発生地点の周囲に位置する気象庁アメダスが現在とほぼ同じ水準まで整備された(概ね 1970 年代後半)以降に発生した。
  - ②文献調査により、河道閉塞の形成を伴わずに発生した土石流(泥流となっているものも含む)であったことが確認できる。
  - ③文献調査により、発生時刻が特定できる。
  - ④発生地点における土砂災害警戒情報の発表基準線 (CL) が都道府県の web サイトで公開されている (2019 年 3 月現在)。
- ②は、現行の土砂災害警戒情報が土石流および集中的に発生するがけ崩れを対象としている<sup>2)</sup>ことから設定した(ただし、集中的に発生したがけ崩れの事

例は確認できなかった). ①~④の条件を満たす事例として, 本研究では図-1, 表-1 に示す 4 事例を収集できた.

### 3. 地表面到達水量の推定

#### (1) 地表面到達水量推定モデル

融雪水量や地表面到達水量を推定するモデルはこれまで熱収支法に基づく手法をはじめとして種々提案されているが, 本研究では任意の地点に適用可能なモデルとして, 日本全国で広域的に観測され, データの入手が容易な気象項目である降水量と気温から推定可能な以下のようなモデルを用いた. このモデルは SWE (Snow Water Equivalent) モデル<sup>7)</sup>と本質的に同じであるが, 本研究では土砂災害警戒情報への応用を見越して 1 時間単位で計算を行う.

まず, 既往研究<sup>8)</sup>を参考に, 時刻*i*における気温 $T_i$  (°C) が 2°C 以上のときの降水を降雨, 2°C 未満のときの降水を降雪と判定し, 降水量を降雨量 $R_i$  (mm/hr) と降雪量 $S_i$  (mm/hr) に分離する. 降雨は積雪層の有無にかかわらずただちに地表面に到達し, 降雪は地表面に積雪層を形成する. 形成された積雪層は気温に応じて融けるものとし, 積算暖度法を時間単位で

用いる degree hour 法に基づき, 基準気温 $T_B$  (°C) より気温が高い場合に, その気温差に融雪係数 $K$  (mm/°C/hr) を乗じた水量が融雪するものとし, ただちに地表面に到達するものとする. すなわち, 融雪水量 $M_i$  (mm/hr) は以下のように求められる.

$$\begin{aligned} T_i > T_B \text{ のとき } M_i &= K(T_i - T_B) \\ T_i \leq T_B \text{ のとき } M_i &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$T_B$  は, 既往研究<sup>9)~11)</sup>を参考に 0°C とする. 地熱による底面融雪や積雪表面からの蒸発は少ないため無視する.

以上から, 時刻*i*における積雪水量 $SWE_i$  (mm) は以下のように計算できる.

$$SWE_i = SWE_{i-1} + S_i - M_i \quad (2)$$

また, 降雨量に融雪水量を足し合わせた, 最終的に地表面に到達した全ての水量である地表面到達水量 $MR_i$  (mm/hr) は以下のように計算できる.

$$MR_i = M_i + R_i \quad (3)$$

以上から, 融雪土砂災害発生地点における降水量と気温を推定し,  $K$  の値を決定できれば,  $MR$  を時間単位で推定することが可能となる.

#### (2) 降水量と気温の推定

降水量と気温の両方を観測している気象庁アメダス地点のうち, 融雪土砂災害発生地点 (土石流の発生区) を内包する最も小さな三角形を構成できるアメダス 3 地点を選び, 発生した冬期を含む 10 月 1 日~翌年 6 月 30 日のアメダス各地点の 1 時間ごとの降水量と気温の観測データを収集した.

次に, 先述の通り気温 2°C を閾値として降水を降雨か降雪か判定した上で, 降水量計の捕捉率を考慮した降水量の補正を行った. これは, 風により降水粒子の一部が降水量計にうまく捕捉されず, 特に降雪時には本来の降水量よりも少ない値が記録されるためである. 本研究では, これまで提案されている式<sup>13)</sup>により, 各アメダスで観測された風速を用いて補正を行った.



図-1 対象とした融雪土砂災害の発生位置 (地理院地図に加筆).

表-1 対象とした融雪土砂災害事例.

事例 No.	地区名	都道府県	発生日時	現象	出典
1	虫亀	新潟	1980/4/9 4:00	泥流	新潟県監修 <sup>3)</sup>
2	清水山	長野	1994/4/14 4:30	土石流	川住ら <sup>4)</sup>
3	蒲原沢	新潟・長野	1996/12/6 10:40	土石流	丸井ら <sup>5)</sup>
4	井出川	長野	2017/5/19 6:00 *	土石流	平松ら <sup>6)</sup>

\* : 複数回発生した土石流のうち 1 回目を採用

表-2 融雪係数 $K$ の値と決定根拠・方法.

事例 No.	地区名	$K$ (mm/°C/hr)	決定根拠・方法
1	虫亀	0.295	発生地点から約 2km 離れた山古志村役場における発生前日 (1980/4/8) の積雪深が約 130cm であった <sup>16)</sup> . 融雪期にあたるため積雪密度を 0.5g/cm <sup>3</sup> と仮定し, この日の 12:00 の積雪水量が約 650mm となるように決定.
2	清水山	0.120	発生地点から約 1km 離れた気象庁アメダス小谷観測所における 1994/4/14 4:00 の積雪深が 23cm であった. 融雪期にあたるため積雪密度 0.5g/cm <sup>3</sup> と仮定し, 同時刻の積雪水量が約 115mm となるように決定.
3	蒲原沢	0.475	1997/4/28 の発生地点の積雪深が 120cm であった <sup>17)</sup> . 融雪期にあたるため積雪密度を 0.5g/cm <sup>3</sup> と仮定し, この日の 12:00 の積雪水量が約 600mm となるように決定.
4	井出川	0.125	2017/5/22 午前中に撮影された発生地点の簡易オルソ画像 <sup>9)</sup> にまだら状の残雪が見られることから, この日に消雪を迎えたと判断し, この日の午前中に積雪水量が 0mm となるように決定.

続いて, 各アメダス地点と発生地点の標高差を考慮した補正を行った. 気温については減率 0.6°C/100m として, アメダス地点の観測値を発生地点の値に補正した. 降水量については, 標高が上がるにつれ降水量が増加することが知られているため, 既往研究<sup>14)</sup>を参考に, 発生地点の気温が 2°C 以上で降雨と判断される場合は標高差 100m あたり 6.4%, 2°C 未満で降雪と判断される場合は同 10% 増加するとして補正した.

最後に, アメダス 3 地点における上記補正済みの降水量, 気温から, 重み付き距離平均法<sup>15)</sup>により, 発生地点での降水量, 気温を推定した.

### (3) $K$ の値の決定

融雪係数 $K$  (mm/°C/hr) は同一地点であっても年によって異なることが知られている. そこで本研究では, 発生時の状況を再現できるよう, 文献調査等により発生地点またはその周辺の積雪・融雪状況に関する情報を収集し, それに基づいて $K$ の値を決定した. 決定された $K$ の値とその決定根拠・方法を表-2 に示す.

## 4. 融雪土砂災害に対する警戒避難基準の検討

### (1) 融雪を考慮した土砂災害警戒情報の適用性

雨量の代わりに $MR$ を用いて土壌 $MR$ 指数と 60 分間積算 $MR$ を求め, 発生時のスネーク曲線が  $CL$  を超

過するかを検証した.

事例 No.1 虫亀のスネーク曲線 (発生日時を含む 1993 年 11 月 1 日 0 時~1994 年 6 月 30 日 24 時をすべてプロット) と虫亀地区が位置するメッシュにおける発表基準線 ( $CL$ ) を図-2 に示す. 災害発生時の 60 分間積算 $MR$ は 0.6mm と非常に小さい一方で, 土壌 $MR$ 指数は 95.4mm と比較的大きくなった. これは, 低強度ながら長期間連続する融雪の特性を反映したものとと言える. ただし, 災害発生時でも  $CL$  を超過してはいなかった.

全 4 事例の災害発生時の 60 分間積算 $MR$ と土壌 $MR$ 指数を表-3 に示す. 60 分間積算 $MR$ はやはりいずれの事例においても 0.8mm 以下と非常に小さかった. すなわち, 縦軸の値は大きくなりえないため,  $CL$  を超過するかどうかはほぼ横軸の土壌 $MR$ 指数に依存する. そこで, 横軸と  $CL$  の交点の土壌 $MR$ 指数の値に対する災害発生時の土壌 $MR$ 指数の値の比 $P$  (%) を求め, 表-3 にあわせて示した.  $P$  が 100% を超えると災害発生を捕捉できており, 超えていない場合でも 100% に近ければ近いほど  $CL$  に近接した状況で発生したと判断される. 表-3 から,  $P$  は No.4 井出川の 49% が最大であり, 全 4 事例とも  $CL$  超過に必要な土壌雨量 ( $MR$ ) 指数の半分にも満たない結果となった. すなわち, 土砂災害警戒情報の発表スキーム上は, 斜面に供給された水は災害が発生するとは判断されない程度の量であったにも関わらず, 災害が発生したことになる.

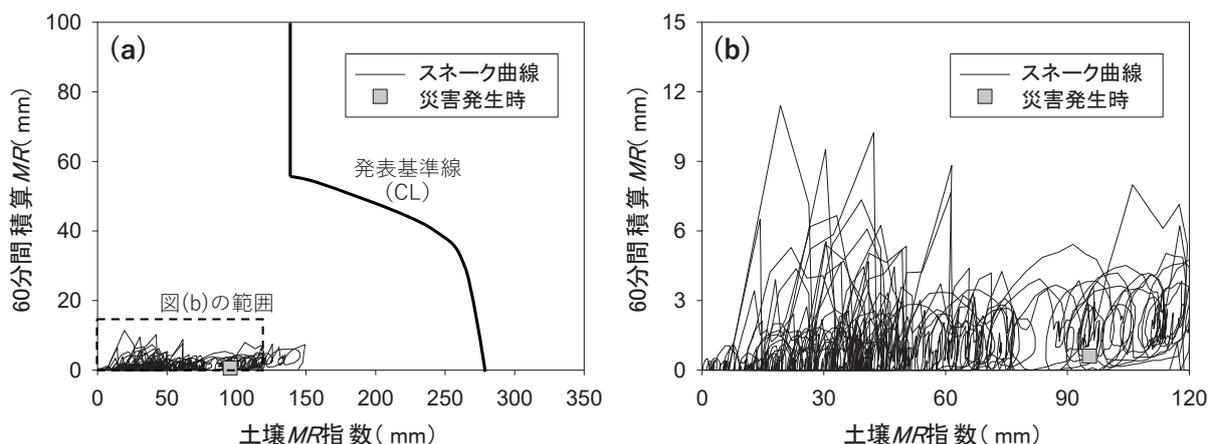


図-2 虫亀における融雪土砂災害発生冬期のスネーク曲線と発表基準線 (CL)

表-3 融雪を考慮した土砂災害警戒情報の適用結果

事例 No.	地区名	都道府県	発生日時	災害発生時の値		
				土壌MR指数 (mm)	60 分間積算MR (mm)	P (%)
1	虫亀	新潟	1980/4/9 4:00	95.4	0.6	34
2	清水山	長野	1994/4/14 4:30	69.3	0.3	24
3	蒲原沢	新潟・長野	1996/12/6 10:40	66.3	0.0	28
4	井出川	長野	2017/5/19 6:00	94.3	0.8	49

表-4 対象とした融雪土石流災害の発端となった土砂移動現象.

事例 No.	地区名	都道府県	発生日時	発端となった土砂移動現象		出典
				現象	土砂量 (m <sup>3</sup> )	
1	虫亀	新潟	1980/4/9 4:00	地すべり	200,000	藤田ら <sup>16)</sup>
2	清水山	長野	1994/4/14 4:30	地すべり	460,000	木村ら <sup>18)</sup>
3	蒲原沢	新潟・長野	1996/12/6 10:40	崩壊	39,000	丸井ら <sup>17)</sup>
4	井出川	長野	2017/5/19 6:00 *	崩壊	147,000	矢島ら <sup>19)</sup>

本研究で対象とした4事例の災害報告等の文献を精査したところ、これら4事例はいずれも大規模な崩壊または地すべりを発端とし、崩壊土砂あるいは地すべり移動土塊が谷部に流入して流下することで土石流化したものであった。表-4に、発端となった現象とその土砂量を文献から整理して示す。土砂量はいずれの事例とも39,000m<sup>3</sup>以上であり、昭和47年から平成19年に発生したがけ崩れ災害約17,000件の崩壊土砂量の平均が約380m<sup>3</sup>である<sup>20)</sup>ことを踏まえると、いずれも規模の大きい崩壊または地すべ

りであったことが分かる。本研究では発生時刻が不明等の理由で解析対象外となった1978年新潟県妙高高原白田切川土石流災害<sup>21)</sup>や1992年長野県姫川支川浦川土石流災害<sup>22)</sup>、1997年秋田県八幡平土石流災害<sup>23)</sup>も融雪に起因した土石流であるが、これらもやはり大規模な崩壊や地すべりが発端となって発生している。こうした大規模な崩壊や地すべりは、現行の土砂災害警戒情報が用いている60分間積算MRや土壌MR指数よりもさらに長期のMRの影響を受けて地盤深部の間隙水圧が上昇することで発生して

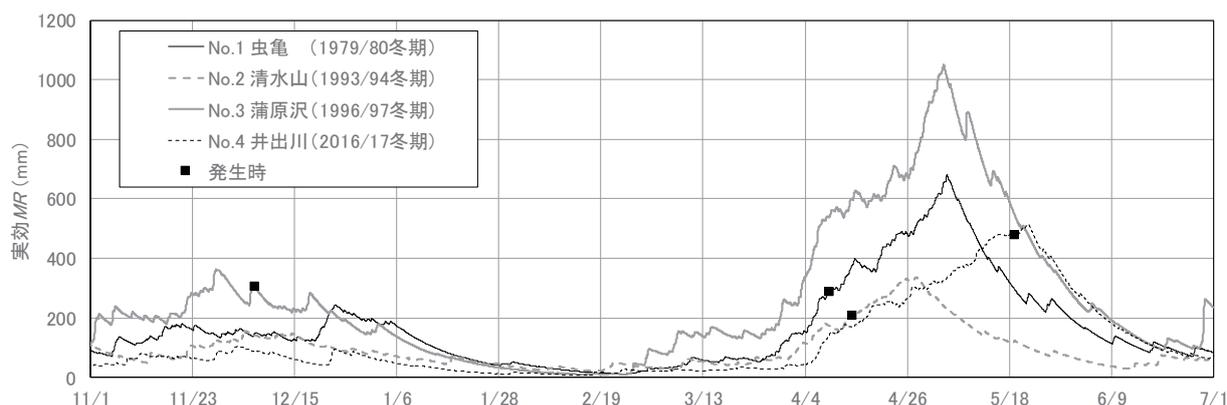


図-3 発生地点の実効MR（半減期 240 時間）の経時変化

いるものと考えられ、現行の土砂災害警戒情報が対象としていない現象<sup>2)</sup>であるため、土壌MR指数、60分間積算MRといった指標や、現在設定されているCLがこうした現象には適しておらず、本研究の解析において災害発生時でもCLを超過しないという結果につながったものと考えられる。

## (2) 新たな警戒避難基準の検討

前節の検討から、融雪土石流災害に対する融雪を考慮した土砂災害警戒情報の適用は困難であることが分かった。そこで代わりとなる警戒避難基準について検討を加える。前述の通り、融雪土石流発生時に短期降雨(MR)指標は大きくなりえないため、発生するかどうかはほぼ長期降雨(MR)指標に依存していると考えられる。そこで、長期の降雨(MR)の影響を表す指標として、半減期の長い実効雨量を考える。現行の土砂災害警戒情報で長期降雨指標として用いられている土壌雨量指数は、半減期 1.5 時間の実効雨量と半減期 72 時間の実効雨量の和とピークの位置や減水特性が類似する<sup>24)</sup>ため、さらに長い半減期を検討する。本研究では、実効雨量の計算式において雨量の代わりにMRを用い、半減期をさまざまに変化させながら発生冬期における実効MRの経時変化と発生時の関係を検証した。その結果、半減期 240 時間(10 日)が最適と判断した。発生した冬期を含む 11 月 1 日 0 時～翌年 6 月 30 日 24 時における各発生地点の実効MR(半減期 240 時間)の経時変化を図-3 に示す。実効MRが事例 No.1 虫亀では 280mm を、事例 No.2 清水山では 200mm を、事例 No.4 井出川では 470mm を、それぞれ当該冬期中で初めて超過するタイミングで発生していることが分かる。本研究では解析事例数が少なく、また発生冬期のみでの検討であるため、さらなる検証が必要ではあるものの、半減期の長い実効MRのように長期の

MRの影響を表す指標を用い、地域ごとに適切な閾値を設定すれば、警戒避難基準として活用できる可能性があると考えられる。

なお、事例 No.3 蒲原沢については、発生時の実効MRは約 300mm であったが、約 1 週間前にも 300mm を超過していた期間があり、実効MRで発生タイミングを説明するのは困難であった。これは、本研究では災害発生日(1996 年 12 月 6 日)から約 4 か月半後の 1997 年 4 月 28 日の積雪深を根拠にKを決定した(表-2)ため、災害発生日ごろのMRの推定精度が低い可能性があることや、蒲原沢の土石流災害発生当時、標高の高いところで気温の逆転現象が発生していた可能性が指摘されており<sup>25)</sup>、本研究で用いたMR推定モデルがそれを反映できていないことが原因と考えられる。さらに精度よくMRを推定する手法についても今後検討を加える必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、既往の融雪土石流災害事例を対象に警戒避難基準について検討した。土壌雨量指数と 60 分間積算雨量を融雪水量込み(地表面到達水量MR)で計算した場合の土砂災害警戒情報は、融雪土石流災害に対する警戒避難基準として適切ではないことが分かった。これは、融雪に起因する土石流は大規模な崩壊や地すべりが土石流化して発生したものが多く、現行の土砂災害警戒情報が用いている短期・長期降雨(MR)指標やCLがこうした現象に適していないためと考えられた。代わりに、半減期の長い実効雨量(MR)など、長期のMRの影響を表す指標がこうした融雪土石流災害に対する警戒避難基準として活用できる可能性が示唆された。今後はさらに事例を収集して検討を加えることにより、融雪土石流災害に対する警戒避難基準の設定手法を確立してい

く必要がある。

**謝辞:**本研究はJSPS 科研費 JP16K16376, JP18H03819 の助成を受けて実施したものです。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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, pp.520-521, 2010.
- 2) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法 (案), 21p, 2005.
- 3) 新潟県監修: 新潟の地すべり 1984, 新潟県, 212p, 1984.
- 4) 川住淳一郎, 望月巧一, 大野幸雄, 内田克, 藤岡毅: 長野県の地すべり—砂防課 (建設省所管) の地すべり対策について—, 地すべり技術, Vol.22, No.1, p.3-15, 1995.
- 5) 丸井英明, 佐藤修, 渡部直喜: 平成 8 年 12 月 6 日新潟・長野県境蒲原沢土石流災害 (速報), 砂防学会誌, Vol.49, No.5, p.60-62, 1997.
- 6) 平松晋也, 石田孝司, 金澤瑛, 権田豊, 澤陽之, 堤大三, 長山孝彦, 福山泰治郎, 萬徳昌昭, 三池力, 森下淳, 矢島光一, 山田泰弘: 平成 29 年 5 月長野県飯山市井出川流域で発生した大規模崩壊と土石流, 砂防学会誌, Vol.70, No.3, p.41-50, 2017.
- 7) 戸塚岳大, 風間聡, 朝岡良浩, 沢本正樹: 積雪モデルと衛星積雪面情報を用いた東北地方の積雪分布と融雪係数の解析, 水文・水資源学会誌, Vol.17, No.5, pp.493-502, 2004.
- 8) 太田岳史: 気温および降水量による山地積雪水量の経時変化の推定, 雪氷, Vol.51, No.1, pp.37-48, 1989.
- 9) 境隆雄: 河川の融雪流出に関する研究, 土木学会論文集, Vol.95, pp.9-20, 1963.
- 10) 大橋伸之, 笹本誠, 堺茂樹, 平山健一, 江口齊: 北上川ダム貯水池への融雪流入量の計算, 水工学論文集, Vol.35, pp.51-56, 1991.
- 11) 小原一哉, 堺茂樹: 降雪・積雪・融雪過程のモデル化と河川融雪流出予測への応用に関する研究, 土木学会論文集 B, Vol.64, No.1, pp.49-61, 2008.
- 12) 松浦純生: 融雪水等の地下浸透機構と地すべりの挙動, 日本雪工学会誌, Vol.19, No.3, pp.59-64, 2003.
- 13) 横山宏太郎, 大野宏之, 小南靖弘, 井上聡, 川方俊和: 冬期における降水量計の捕捉特性, 雪氷, Vol.65, No.3, pp.303-316, 2003.
- 14) 近藤純正, 本谷研, 松島大: 新パケツモデルを用いた流域の土壌水分量, 流出量, 積雪水当量, 及び河川水温の研究, 天気, Vol.42, No.12, pp.11-21, 1995.
- 15) 風間聡: 水文学, コロナ社, 165p, 2011.
- 16) 藤田至則, 茅原一也, 青木滋, 鈴木幸治: 新潟県古志郡山古志村における虫亀地すべりの形態とその形成過程, 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, No.3, pp.1-21, 1981.
- 17) 丸井英明, 渡部直喜, 佐藤修, 前川峰志: 蒲原沢土石流災害について, 新潟大学災害研究所年報, No.19, p.23-48, 1997.
- 18) 木村誇, 桂真也, 丸山清輝, 石田孝司: 長距離移動した融雪地すべりの発生域・移送堆積域の地形特性, 日本地すべり学会誌, Vol.53, No.2, p.1-12, 2016.
- 19) 矢島光一, 田下昌志, 西澤賢, 北原誠, 山崎隆雄, 長谷川国宏, 山田泰弘, 丹羽諭: 長野県飯山市井出川で発生した山腹崩壊に伴う土石流に対する既設堰堤の効果に関する検討, 平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.17-18, 2018.
- 20) 小山内信智, 富田陽子, 秋山一弥, 松下智祥: がけ崩れ災害の実態, 国総研資料, No.530, 203p, 2009.
- 21) 白石一夫: 妙高高原町に発生した土石流災害について, 地すべり, Vol.15, No.2, p.40-42, 1978.
- 22) 渡辺昇, 小林宏至, 桜井亘: 姫川支川浦川に発生した大規模土石流について, 砂防学会誌, Vol.46, No.1, p.41-44, 1993.
- 23) 南哲行, 綱木亮介, 小山内信智, 藤澤和範, 萬徳昌昭, 杉淵清徳: 平成 9 年 5 月秋田県鹿角市八幡平で発生した土砂災害調査報告 (速報), 砂防学会誌, Vol.50, No.2, p.68-73, 1997.
- 24) 瀬尾克美, 原口勝則, 菊井稔宏, 吉田真也: 土砂災害警戒避難基準雨量の課題と改良について, 砂防学会誌, Vol.53, No.6, p.37-44, 2001.
- 25) 丸井英明, 佐藤修, 渡部直喜: 12.6 新潟・長野県境蒲原沢土石流災害緊急報告, 新潟応用地質研究会誌, No.47, p.57-62, 1997.

(2020. 7. 1 受付)