

# 推定流出土砂量を用いた土石流要注意溪流の抽出方法

長谷川 淳\* 西金 佑一郎\*

A Method to Extract Streams with Debris Flow Hazard using Sediment Volume

Atsushi HASEGAWA Yuichiro NISHIKANE

Recently, there has been damage often by debris flow that occurs at valleys on railway lines. However, since there are many valleys on railways, it is not easy to investigate the risk of debris flow. Therefore, it is important to develop a method to estimate the risk of debris flow. Hence, we present a method to estimate the risk of debris flow on the basis of the geomorphological and geological features of valleys where debris flow once occurred.

キーワード：土石流，要注意溪流，流出土砂量，地形条件，地質条件

## 1. はじめに

鉄道はしばしば土石流により被災するが、その発生源となる溪流は鉄道用地外にあることがほとんどであり、鉄道事業者が、沿線の溪流の検査や管理を鉄道構造物と同様に行うことは容易ではない。一方、国では、過去に発生した土石流災害の事例等をもとに、土石流の調査要領などを取りまとめており、これをもとに行政による溪流の調査・評価が行われている<sup>例えば1)</sup>など。しかし、鉄道は駅部を除き保全対象物とみなされないため、人家等が少ない山間部の鉄道沿線の溪流については、行政による調査・評価の対象となっていない場合が多い。よって土石流災害に対する鉄道の安全性を確保するために、必要に応じて、事業者が独自に土石流の危険性がある溪流を抽出する機会が多い。

土石流の危険度評価は、溪流における土石流の発生危険度の評価に加え、土石流が発生した場合の保全対象物への影響度の評価も行われることが望ましい。このような事例としては、西日本高速道路株式会社中国支社管内での検討事例<sup>2)</sup>や、JR西日本管内における小規模な土砂流入を対象とした事例<sup>3)</sup>がある。いずれもポケット容量（盛土や砂防えん堤の背後の土砂が堆積可能な領域）などをもとに道路や鉄道への土石流の影響度を評価しているが、影響度の評価には詳細な調査または同等の調査資料が必要になるため、より簡易に影響度を評価することができれば、実務的に有用であると考えられる。

そこで本研究では、土石流の鉄道への影響度の評価として溪流から流出する土砂の量に着目し、簡易な地形計測により土石流が発生する可能性がある溪流を抽出する手法および流出する土砂量を推定する手法について検討した。本報告ではこれらの結果について記述する。

## 2. 鉄道の被災事例の分析

本研究では、土石流による災害を「谷次数が1次以上の谷において、溪流内で発生した自然斜面の崩壊により生成した土砂や、溪流内に存在していた溪床堆積物が表流水とともに流出し、線路上やその周辺に堆積した事象」として定義し、0次谷や斜面で発生した斜面崩壊、地すべりにともなう土砂の流入や、盛土などの人工構造物の崩壊に起因する事象は除外した。ここで0次谷とは、1/25000地形図上で谷型斜面を示す等高線群が円弧状であり水系の記入が不能である範囲<sup>4)</sup>と定義した。0次谷と1次谷の区分の定義を図1に示す。この定義に基づき、鉄道の被災事例の収集と地形や降雨の条件について検討を行った太田ほか<sup>5)</sup>の事例と、災害資料や公開文献等に記載されている土石流や土砂流入による鉄道の被災事例から、土石流による鉄道の被災事例148件を抽出した。なお、このうち約半数は関西・中国・四国地域での事例であり、発生した地域にはやや偏りがある。また、全事例のうち鉄道やその周辺に流出した土砂の量が判明したのは100事例であった。これらの事例をもとに、土石流が発生した地形・地質条件の特徴と、溪流から流出した土砂量について分析した。

### 2.1 土石流発生溪流の地形・地質

抽出した148事例について、国土地理院が公開している地理院地図<sup>6)</sup>を用いて土石流が発生した溪流の地形を計測した。また溪流に分布する地質については、産

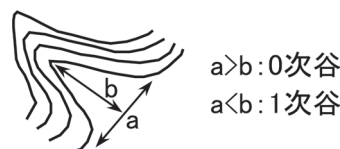
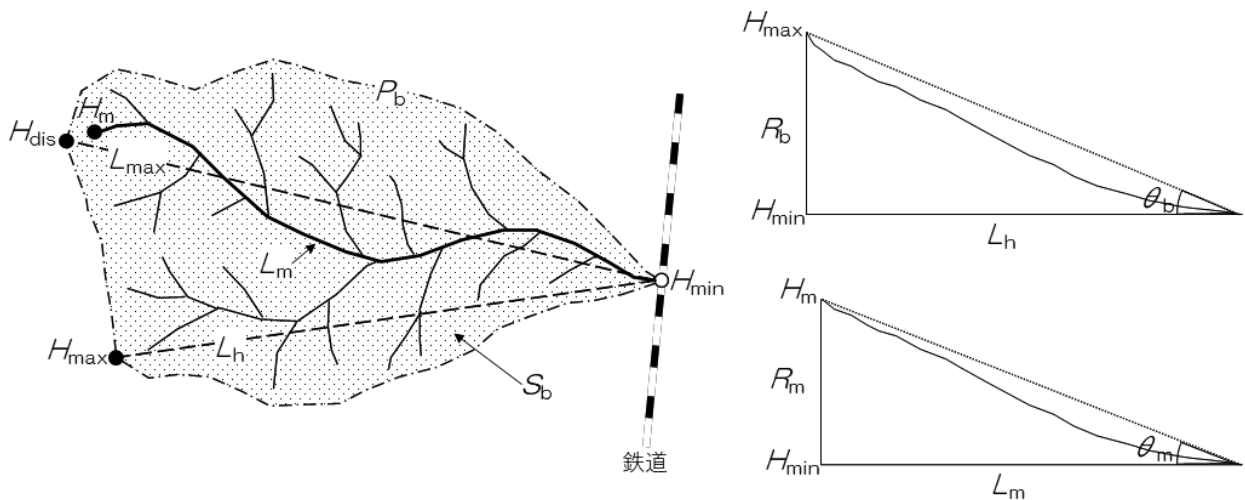


図1 0次谷と1次谷の定義

\* 防災技術研究部 地質研究室



$H_{min}$ :最低点高度,  $H_{max}$ :最高点高度,  $H_{dis}$ :最遠点高度,  $H_m$ :本流最高点高度,  $L_h$ :最高点距離,  $L_{max}$ :流域最大径,  $L_m$ :本流長,  $P_b$ :流域縁辺長,  $S_b$ :流域面積,  $R_b$ :流域比高,  $R_m$ :本流比高,  $\theta_b$ :流域傾斜,  $\theta_m$ :平均溪床勾配

図2 計測した地形量の定義 (谷次数以外)

業技術総合研究所が公開している地質図 Navi<sup>7)</sup> を用いて調査した。

### 2.1.1 地形の特徴

溪流の地形の特徴を表す指標 (以下、地形量と称する) は多数定義されているが<sup>例えば4, 8)</sup> など、このうち先行研究<sup>例えば9~12)</sup> などでは、土石流の要因となる地形量として溪流の流域面積や溪床勾配、本流や流域の長さ等が採用されている。本研究では、これらの文献をもとに、比較的計測が容易と考えられる以下の14の地形量を採用した (図2)。なお溪流の地形の計測にあたっては、砂防分野における土石流調査の考え方<sup>1)</sup> に従い、鉄道を保全対象物とみなし、溪流と鉄道が交差する箇所よりも上流側の流域の地形を計測対象とした。

- ①最低点高度 ( $H_{min}$ ): 本流と鉄道の交点 (最低点) の標高値
- ②最高点高度 ( $H_{max}$ ): 最も標高が高点の標高値
- ③最遠点高度 ( $H_{dis}$ ): 最低点からの直線距離 (投影距離) が最も遠い点の標高値
- ④本流最高点高度 ( $H_m$ ): 本流の始点の標高値
- ⑤最高点距離 ( $L_h$ ): 最低点と最高点を直線で結んだ際の投影距離
- ⑥流域最大径 ( $L_{max}$ ): 最低点と最遠点を直線で結んだ際の投影距離
- ⑦本流長 ( $L_m$ ): 対象流域内で最長の流路の長さの投影距離
- ⑧流域縁辺長 ( $P_b$ ): 最低点よりも上流部の流域の外周の投影距離
- ⑨流域面積 ( $S_b$ ): 最低点より上流部の流域の投影面積
- ⑩流域比高 ( $R_b$ ): 最高点高度と最低点高度との高さの差 ( $H_{max} - H_{min}$ )
- ⑪本流比高 ( $R_m$ ): 本流最高点高度と最低点高度との

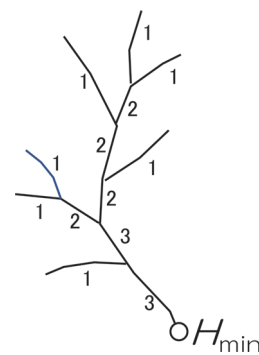


図3 谷次数の考え方 (谷の始まりから最初の合流点までを1次, n次の谷が2本合流した谷をn+1次とする。図中で最低点  $H_{min}$  での次数は3となる。)

- 高さの差 ( $H_m - H_{min}$ )
- ⑫流域傾斜 ( $\theta_b$ ): 最低点と最高点を結んだ直線が水平面となす角度
- ⑬平均溪床勾配 ( $\theta_m$ ): 本流長と本流比高を直角をはさむ2辺とした場合に斜辺が水平面となす角度
- ⑭谷次数: Strahler法<sup>13)</sup> により水系網の次数を計測した場合の最低点における谷の次数 (図3)

代表的な地形量ごとの頻度分布を図4に示す。流域面積は  $0.2\text{km}^2$  以下の事例が全体の約70%,  $0.05\text{km}^2$  以下の事例が約30%を占めている。流域比高はほとんどの事例が500m以下で、なかでも100~150mの事例が多い。平均溪床勾配は20~25度の事例が多い。また、谷次数は2次での事例がもっとも多く、4次での事例は少ない。これらのことから、今回調査した範囲では、小規模かつ急勾配の流域での土石流の発生事例が多いと言える。

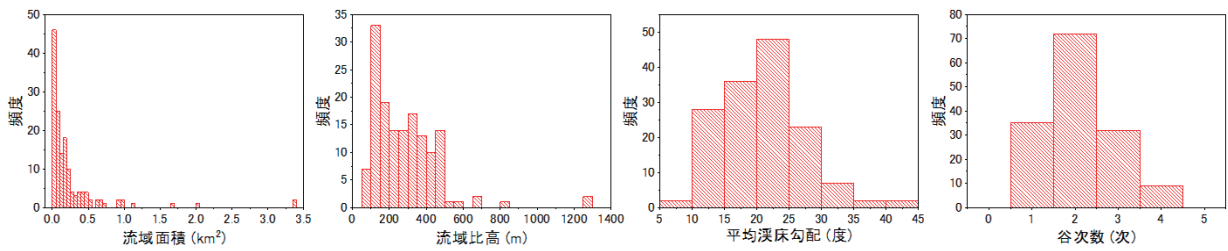


図4 流域面積，流域比高，平均溪床勾配，谷次数の頻度分布

### 2.1.2 地質の特徴

本検討で収集した事例では、地質の記載がない場合があったため、全事例について地質図Navi<sup>7)</sup>を用いて土石流が発生した溪流に分布する地質を調査し、地質時代・岩種の組合せで以下の7種に区分した。

- ①第四紀凝灰岩類（シラス，阿蘇山のカルデラ壁等）
- ②新第三紀凝灰岩類（グリーンタフ等）
- ③新第三紀堆積岩類
- ④中・古生代堆積岩類
- ⑤中・古生代変成岩類
- ⑥火山岩類
- ⑦花崗岩類

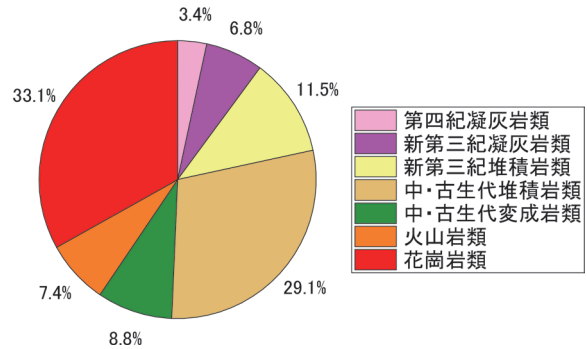


図5 土石流が発生した地質の割合

地質区分ごとの事例の割合を図5に示す。全事例のうち、地質区分では花崗岩類と中・古生代堆積岩類の割合がそれぞれ約3割を占める。また、新第三紀凝灰岩類、新第三紀堆積岩類、中・古生代変成岩類、火山岩類はそれぞれ約1割を占めるほか、割合としては少ないながらも第四紀凝灰岩類での事例もある。花崗岩類と中・古生代堆積岩類が占める割合が大きいのは、これらの地質が分布する線区での事例が多いことに起因しており、事例の多寡がただちに土石流の発生しやすい地質を表しているとは言えない。一方で、花崗岩類は風化するとまき土となり、斜面崩壊や土石流が群発しやすいことが指摘されている<sup>14)</sup>。今回収集した事例で花崗岩類の割合が最も大きくなった背景には、線区の偏りだけでなく、このような性質も一因として考えられる。

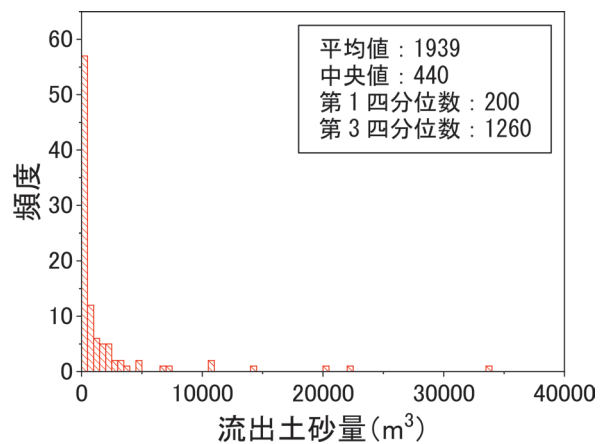


図6 流出土砂量の頻度分布

## 2.2 被災事例における流出土砂量

### 2.2.1 流出土砂量の傾向

収集した事例のうち流出土砂量が記載されていた100事例について、流出土砂量の傾向を分析した。流出土砂量ごとの頻度分布を図6に示す。流出土砂量は500m<sup>3</sup>以下の事例が大半を占めるが、少数ながらも10000m<sup>3</sup>を超える事例もある。ここで、箱の範囲を25～75パーセントイル、ひげの長さを四分位範囲の1.5倍を上下限としたボックスチャート（箱ひげ図）で見ると、ほとんどの事例が0～1000m<sup>3</sup>の範囲にあり、3500m<sup>3</sup>以上は外れ値の扱いとなった（図7）。これらのことから、今回調査した範囲内では流出土砂量が1000m<sup>3</sup>以下の事例が

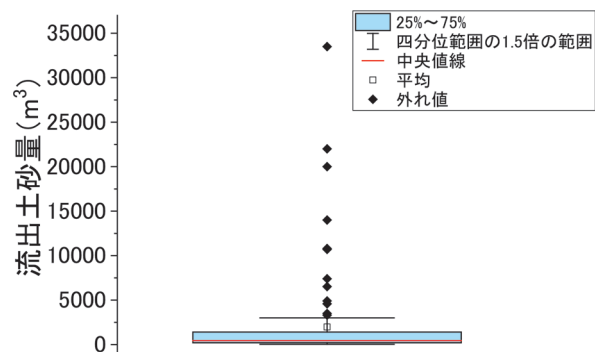


図7 流出土砂量の箱ひげ図

主であり、数千～数万 m<sup>3</sup> におよぶ事例はまれであると言える。なお流出土砂量については、実際に線路上やその周辺に堆積した土砂の量（目測あるいは排土量）であると考えられるケースや、国や自治体の災害報告等にある値を用いていると考えられるケースなどがあり、必ずしも定義が同一ではないことに留意が必要である。

### 2.2.2 地形と流出土砂量の関係

次に、地形と流出土砂量の関係について検討した。計測した地形量と流出土砂量の相関係数を表1に示す。いずれの地形量も流出土砂量との相関は低く、比較的相関が高い流域縁辺長、流域面積、最高点距離、本流長でも相関係数は0.34であった。また、流出土砂量とほぼ相関がない流域傾斜と平均溪床勾配以外の地形量は互いに相関が高い（相関係数：0.79～1.00）。このため、これらの地形量を説明変数とし、流出土砂量を目的変数として多変量解析を実施すると、多重共線性が発生して流出土砂量の予測精度が低くなることが想定される。したがって、本検討で採用した地形量のみから直接的に流出土砂量を推定するのは難しいと言える。

### 2.2.3 地形・地質と流出土砂量の関係

前項から地形量のみで流出土砂量を推定することが難しいことが分かったため、地質条件を加えて検討した。流出土砂量との相関が比較的高い地形量のうち、流域面積と堆積土砂量の関係を地質区別に示した散布図において地質ごとに直線回帰を行った結果、花崗岩類では直線回帰での決定係数が0.46、中・古生代堆積岩類では0.22、これら以外の地質では0.10未満であった（図8）。このことから、花崗岩類では地形条件によって概略の流出土砂量を推定することができる可能性があると言える。そこで、花崗岩類の事例に絞り、各地形量と流出土砂量との関係を検討した。各地形量と流出土砂量との関係を示した散布図における回帰直線の決定係数を表2に示す。流域の長さや大きさに関する地形量である最高点距離、流域最大径、流域縁辺長、本流長で決定係数が0.5以上となり、統計的には当てはまりがよいと言える。つまり、花崗岩類が分布する溪流においては、これらの地形量を用いて概略の流出土砂量を推定できる可能性がある。一方で、溪流の険しさや浸食作用の強さに影響すると考えられる流域比高や本流比高、土砂の運搬に影響す

ると考えられる流域傾斜や平均溪床勾配は決定係数が低く、流出土砂量の多寡にあまり寄与していないことが分

表1 流出土砂量と地形量の相関係数

地形量	流出土砂量との相関係数
流域縁辺長	0.33
流域面積	0.34
流域比高	0.26
最高点距離	0.34
流域最大径	0.32
本流長	0.34
本流比高	0.30
流域傾斜	-0.12
平均溪床勾配	-0.07

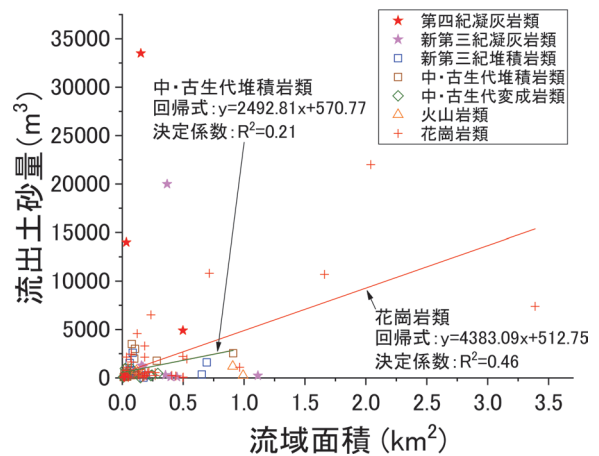


図8 地質ごとの流域面積—流出土砂量の関係の例

表2 花崗岩類の事例における決定係数

地形量	直線回帰の決定係数
最高点距離	0.52
流域最大径	0.50
流域縁辺長	0.50
本流長	0.50
流域面積	0.46
流域比高	0.29
本流比高	0.29
流域傾斜	0.22
平均溪床勾配	0.17

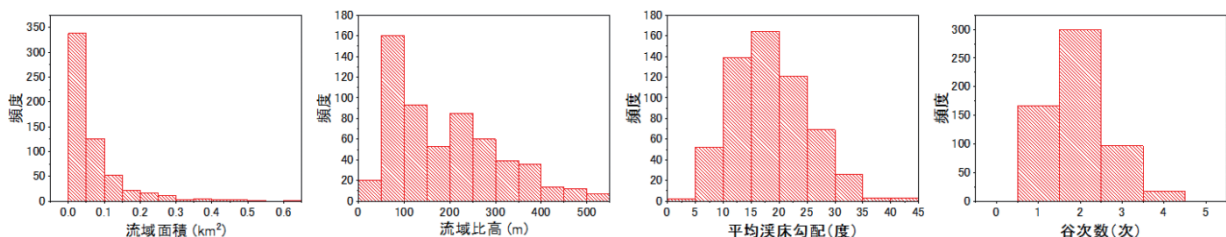


図9 モデル地区における流域面積、流域比高、平均溪床勾配の頻度分布

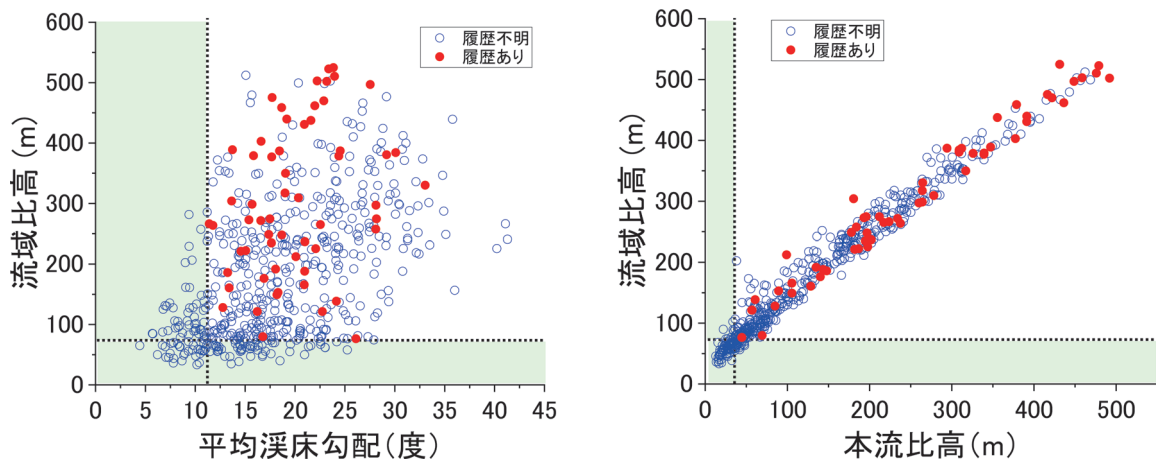


図 10 モデル地区における土石流の履歴あり・履歴不明の溪流の地形条件の比較  
(左図：平均溪床勾配と流域比高の関係，右図：本流比高と流域比高の関係)

かる。

### 3. 要注意溪流の抽出手法の検討

第2章において、花崗岩類が分布する溪流では概略の流出土砂量を推定できる可能性があることが分かった。そこで、おもに花崗岩が分布する地区をモデル地区とし、地形条件から土石流の要注意溪流を抽出することが可能か検討した。

#### 3.1 モデル地区内の溪流の地形的な特徴

モデル地区は中国地方でもおもに花崗岩が分布する約95km<sup>2</sup>の範囲である。当該範囲内において、第2章に示した定義における谷次数が1次以上の溪流を578箇所抽出した。モデル地区における地形の特徴を図9に示す。流域面積は0.2km<sup>2</sup>以下の溪流が全体の約80%、0.05km<sup>2</sup>以下の溪流は約50%を占める。流域比高はほとんどの溪流が500m以下で、50~100mの事例が多い。平均溪床勾配は10~25度の事例が多い。谷次数は鉄道の被災事例と同様に2次における事例がもっとも多く、3次、4次での事例は少ない。このことから、土石流が発生した地域や分布する地質は異なるものの、図9に示したモデル地区の全溪流は、図4に示した鉄道が被災した溪流に比べ、より規模が小さく緩勾配の傾向があると言える。

#### 3.2 土石流発生溪流の特徴

前節より、土石流が発生した溪流の地形条件は他の溪流と異なる可能性がある。そこでモデル地区において、土石流の発生が確認できた溪流（以下、履歴ありと称する）と、今回の調査の範囲においては土石流の発生が確認できなかった溪流（以下、履歴不明と称する）との地形条件の相違について検討した。まず、モデル地区

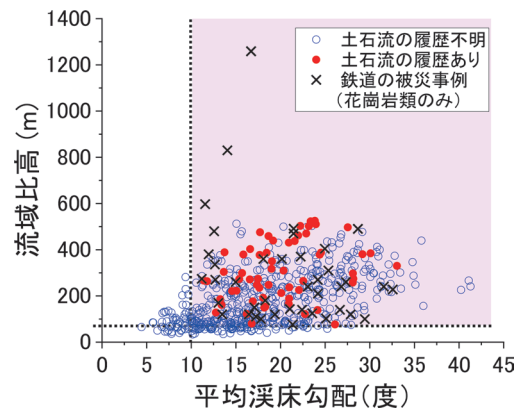


図 11 鉄道の被災事例と履歴ありの溪流すべてを包含する範囲（赤色の網かけ部）

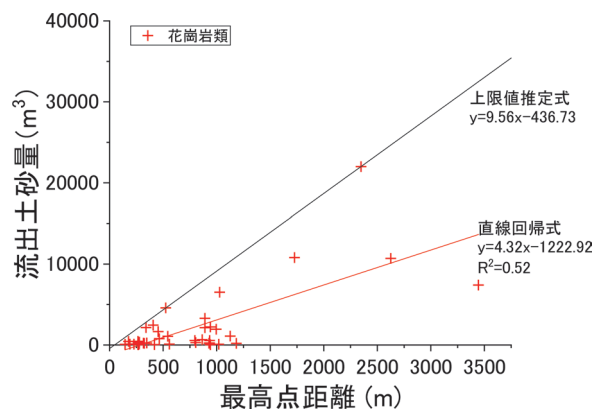


図 12 流出土砂量推定のための回帰直線（赤実線）と上限値推定のための直線（黒実線）

内の578溪流について、災害関係資料の調査および1975年撮影の空中写真の判読をおこない、59溪流で土石流の発生を確認した。次に、2つの地形量を用いて散布図を作成し、履歴あり／履歴不明の地形条件の相違を検討した。検討結果の例を図10に示す。多くの場合で

履歴あり・履歴不明のプロットほぼ同じような分布を示し、両者を区別することができなかった。一方で、流域比高、本流比高、平均溪床勾配については、履歴ありのプロットの最小値が履歴不明のプロットの最小値よりも大きい傾向がみられた（図 10）。これらの地形量における履歴ありのプロットの最小値は以下のとおりである。

- ・流域比高：76m
- ・本流比高：39m
- ・平均溪床勾配：11 度

上述の値をしきい値とした場合、しきい値以下の範囲（図 10 で緑色の網掛けの範囲）に分布する履歴不明のプロットの全プロットに対する割合は、平均溪床勾配 - 流域比高の関係（図 10 左）で 24.4%，本流比高 - 流域比高の関係（図 10 右）で 18.5%，平均溪床勾配 - 本流比高の関係で 23.7%であった。つまり、これらのしきい値を用いることで、土石流が発生した履歴がある溪流と同等の地形条件にある溪流をある程度絞り込める可能性がある。

### 3.3 要注意溪流抽出のためのしきい値の検討

前節で得られたしきい値はモデル地区に固有のものである可能性があるため、花崗岩類が分布する他の地域において、これらのしきい値の適用性を検討する必要がある。そこで、第 2 章で示した鉄道の被災事例のうち花崗岩類が分布する地区での事例（以下、花崗岩類での被災事例と称する）を用いて検討した。

鉄道の被災事例 148 件のうち、花崗岩類での被災事例は 49 件あり、流域比高、本流比高、平均溪床勾配の最小値はそれぞれ流域比高：76m、本流比高：70m、平均溪床勾配：11.2 度であった。よって、花崗岩類での被災事例は、前節に示したしきい値以上の範囲にすべて含まれる。ここで、土石流の要注意溪流の抽出にあたっては、要注意ではない溪流をなるべく除外できることが望ましい。よって、モデル地区における履歴ありの溪流および花崗岩類での被災事例と同等の地形条件にある溪流を要注意溪流とみなす場合、これを抽出するしきい値としては、履歴不明のプロットを最も多く除外できる平均溪床勾配 11 度以上かつ流域比高 76m 以上が適当であると言える（図 11 の赤色網かけ部）。

## 4. 推定流出土砂量をふまえた土石流の要注意溪流の抽出方法

3.3 節の結果から、花崗岩類が分布する地域において土石流の要注意溪流を抽出するためのしきい値として、平均溪床勾配：11 度以上、流域比高：76m 以上が適当であると考えられる。一方、流出土砂量については、2.2 節において最高点距離と流出土砂量との関係において直線

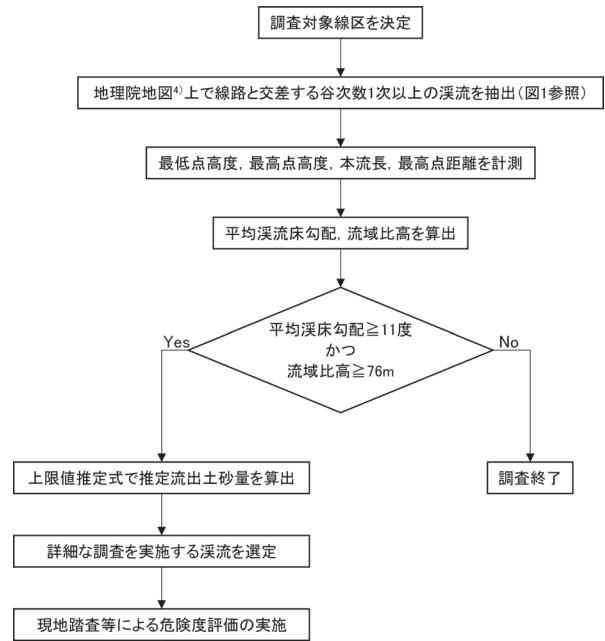
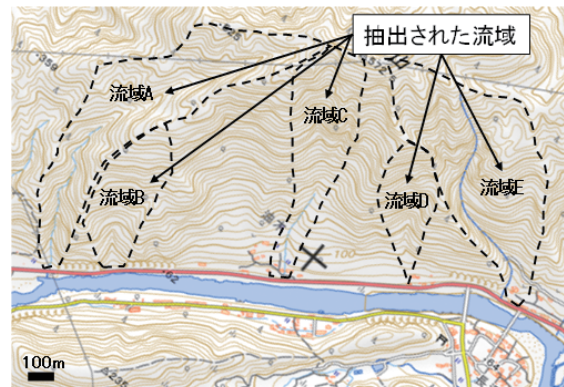


図 13 推定流出土砂量を考慮した土石流要注意溪流の一次スクリーニングのための調査フロー（暫定案）



	最高点距離 (m)	推定流出土砂量 (上限値推定式) (m <sup>3</sup> )※	推定流出土砂量 (回帰式) (m <sup>3</sup> )※	被災時の 流出土砂量 (m <sup>3</sup> )
流域A	1,322	12,300	4,500	1,770
流域B	570	5,100	1,300	—
流域C	879	8,000	2,600	—
流域D	540	4,800	1,200	—
流域E	972	8,900	3,000	550、250 (2回被災)

※100m<sup>2</sup>未満を切り上げた値を掲載

図 14 モデル地区における適用例と被災時の流出土砂量の比較（地理院地図<sup>6)</sup>に加筆）

回帰の決定係数が高いため、回帰式による推定値を実際の流出土砂量が大きく上回る場合もあることから、回帰式による流出土砂量の推定は危険側の判断となることがある。このため、流出土砂量の推定については、全事例を包含する直線を表す式(1)（以下、上限値推定式と称する）を用いる方が安全側の評価となり、直線回帰式での推定よりも実用的であると考えられる（図 12）。

$$y = 9.56x - 436.73$$

$x$ ：最高点距離 (m) (1)

$y$ ：流出土砂量 (m<sup>3</sup>)

以上から、本検討で調査した範囲における土石流発生事例の捕捉率を100%とする場合の、土石流要注意溪流の調査フローの暫定案を図13に、モデル地区において本手法を試行した結果の例を図14に示す。本フローの位置づけは一次スクリーニングであり、沿線に分布する溪流から平均渓床勾配と流域比高により要注意溪流を絞り込み、推定流出土砂量をふまえて詳細な調査を実施する溪流を選定する流れとした。なお、一次スクリーニング後に実施する現地踏査等による詳細調査については、溪流内の状況は刻々と変化することから、単発ではなく、定期的実施して評価を見直す必要がある。

ここで、本手法の課題としては、①土石流が発生していない溪流を要注意溪流として抽出している割合が高い可能性がある、②他の地区における検証ができていない、などが挙げられる。①については、図11の赤色の網掛け部分に含まれる履歴不明の溪流のうち、土石流の危険度が高い溪流がどの程度含まれるのかを現地踏査等により検討する必要がある。また②については、花崗岩が分布する他の地区での検証や、他の地質が分布する地区での適用性について検討する必要がある。

## 5. まとめ

本報告では、土石流による鉄道の被災事例をもとに、地形計測と資料調査により土石流が発生した溪流の地形・地質条件と、流出土砂量の傾向を明らかにした。また、モデル地区において地形計測を行って土石流の履歴あり・履歴不明の溪流の地形条件を比較し、土石流の履歴がある溪流の地形条件を明らかにした。そのうえで、推定流出土砂量を用いた要注意溪流抽出手法の暫定案を示した。

本手法は、花崗岩類が分布する他の地域での検証を行っていないこと、他の地質が分布する地域での検討を実施していないことから、現状では適用性に限界がある。今後はこれらの課題を解決し、本手法を汎用的なものとする

ため、引き続き検討する予定である。

## 文献

- 1) 建設省河川局砂防部砂防課：土石流危険溪流および土石流危険区域調査要領（案），1999
- 2) 村上豊和ほか：高速道路に影響を与える土石流危険溪流の資料調査に基づく評価手法，公益社団法人地盤工学会中国史部論文報告集 地盤と建設，Vol.34, No.1, pp.19-27, 2016
- 3) 森泰樹ほか：線路への小規模土砂流入の危険度評価手法に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.75, No.1, pp.31-48, 2019
- 4) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段丘・丘陵・山地，古今書院，2000
- 5) 太田岳洋ほか：土石流発生に関する地形・地質および降雨条件の特徴，鉄道総研報告，Vol.9, No.3, pp.13-18, 1995
- 6) 地理院地図：<https://maps.gsi.go.jp/>  
（参照日：2021年12月24日）
- 7) 地質図 Navi：<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>  
（参照日：2021年12月24日）
- 8) 太田岳洋ほか：数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例，応用地質，Vol.46, No.6, pp.347-360, 2006
- 9) 足立勝治ほか：土石流発生危険度の判定について，新砂防，Vol.30, No.3, pp.7-16, 1977
- 10) 荒木義則ほか：土石流危険溪流における崩壊規模の評価に関する研究，土木学会論文集，Vol.522/VI-28, pp.133-142, 1995
- 11) 大石博之ほか：統計的手法を利用した1999年6月29日広島県西部における土砂災害発生状況と降雨・地形要因の関連についての考察，砂防学会誌，Vol.58, No.6, pp.3-10, 2006
- 12) 澤田尚ほか：既存の調査データを用いたH21.7山口県防府土砂災害における土石流発生・非発生ルールの抽出，砂防学会誌，Vol.64, No.1, pp.17-24, 2011
- 13) Strahler, A.N. "Hypsometric (area-attitude) analysis of erosional topography", Bulletin of Geological Society of America, Vol.63, pp.1117-1142, 1952.
- 14) 千木良雅弘：群発する崩壊 花崗岩と火砕流，近未来社，2002