

土石流が発生した溪流上流域の地形解析

Topographic Analysis of Upper Regime of Mountain Stream Occurred Debris Flow

中田 幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院創成科学研究科)
田下 哲也	Tetsuya TASHITA	(山口大学大学院創成科学研究科)
鯨吉 樹	Itsuki TOKIYOSHI	(山口大学大学院創成科学研究科)
柳迫 新吾	Shingo YANAGHISAKO	(NEXCO エンジニアリング中国(株))

土石流に対する防災、減災に関連して、溪流の危険度評価や発生非発生評価の確立や確度の向上には、以前にもまして社会的要求が高まっている。これに関して、溪流に対する評価が行われているものの、溪流上流域に着目した検討の例が少ない。本論文は、平成30年の豪雨で発生した広島県の溪流の一部を対象に、溪流上流域の地形解析を行い、特徴的な地形特性の抽出が可能かを検討する。また、過去の災害における溪流に対する源頭の地形特性との違いを考察する。

キーワード：土石流，地形解析，傾斜角，集水面積，地形滑動力指数
(IGC : C-0, E-6)

1. はじめに

土石流の発生に関連して、溪流の危険度評価や発生非発生評価の確立や確度の向上には、以前にもまして社会的要求が高まっている。中国地方では、土石流災害の発生頻度が、1999年呉市での災害¹⁾から、増加している。顕著な被害をもたらしたものでは、2009年山口市および防府市²⁾、2010年庄原市³⁾、2014年広島市⁴⁾があげられる。このような中で発生した2018年(平成30年)7月西日本豪雨災害⁵⁾では、平成最大の広域豪雨災害と呼ばれるように、数多くの土砂災害が多く府県にわたって発生した。この中でも、土石流発生数は、広島県内だけで7660か所にのぼった⁵⁾。土石流は、一度発生すると被害をもたらす程度が大きい。そのため、危険溪流の土石流発生率や、土石流による被害の程度を評価することが、重要である。

土石流の発生箇所に対して、溪流に対する評価が行われているものの、溪流上流域に着目した検討は例が少ない。これまで、土石流の発生に対して危険性のある溪流の評価は、数多く行われてきている⁶⁾⁻¹³⁾。それらは、土砂災害の発生の有無を説明できる条件を、素因および誘因^{6),8),9),11)}、素因^{7),13)}、誘因^{10),12)}から示そうとするものである。このなかには、統計的な手法を取り入れる^{6),8)}ことにより、できるだけ条件の数を絞り込む工夫がなされているものもある。また、溪流の地形を評価に取り入れている研究もある^{6)-9),11),13)}が、溪流の全長に対する総合的な評価にとどまっているのが現状である。中国地方で発生する豪雨による土石流は、溪流上部の斜面が崩壊し、崩壊した土砂が雨水により流されて発生していると考えられることから、溪流上部の地形の特徴には特に注視す

る必要がある。

土石流危険溪流の源頭に対する地形評価について、波多野¹⁴⁾や沖村¹⁵⁾が平均傾斜角や集水面積を取り上げて検討した。沖村¹⁵⁾は、傾斜角と集水面積から地形滑動力指数を定義し評価を試みた。沖村・中川¹⁶⁾は、集水面積を局所集水面積と限定した評価を試みている。笹原・綱木¹⁷⁾は、発災事例を対象に、発生・非発生の評価について検討し、沖村の検討とは異なる傾向を示した。Inomata and Nakata¹⁸⁾は、2014年広島市で土石流災害に見舞われた地域の溪流を対象に源頭の地形解析を実施した。

本論文は、2018年の豪雨で発生した広島県内の溪流の一部を対象に、溪流上流域の地形解析を行い、地形特性について検討する。また、過去の災害における溪流に対する源頭の地形特性との違いを考察する。

2. 抽出した溪流と地形特性の把握

2.1 抽出した溪流

今回対象とした溪流は、高速道路沿線で発生した土石流のうち、流出土砂量の多いものの7溪流58源頭を対象とした。図-1は、抽出したNo.18の溪流と、これに対して割り当てた源頭の識別番号を示している。この図に示すように、発生溪流としては1溪流ではあるが、上流部に複数の源頭を有することで、流出土砂量が多くなったと考えられる。図-2に示したNo.33の溪流は、広島県道路のもので、盛土が流出した箇所の上流で発生した土石流のそれである。表-1は、溪流ごとに整理した源頭の緯度経度および、後述する源頭の地形特性の分析結果について一覧に示したものである。

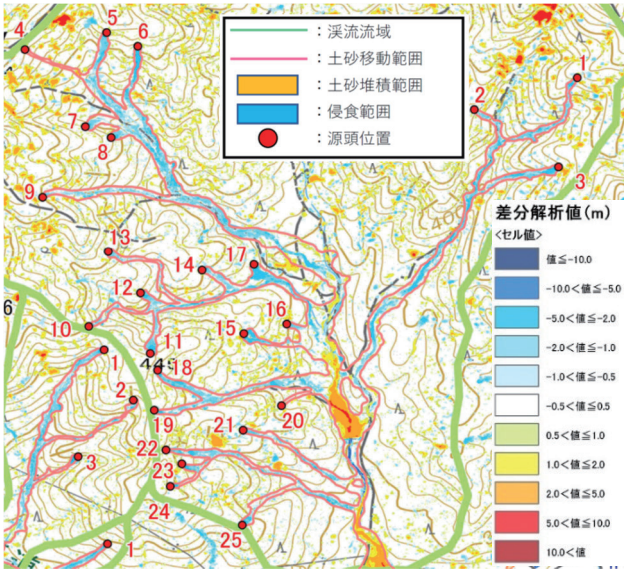


図-1 No.18の溪流と源頭位置

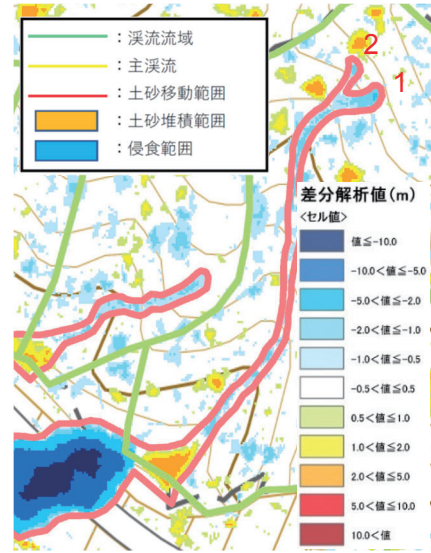
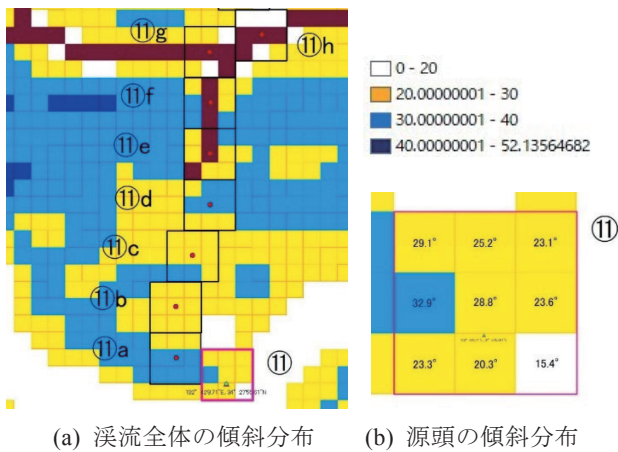


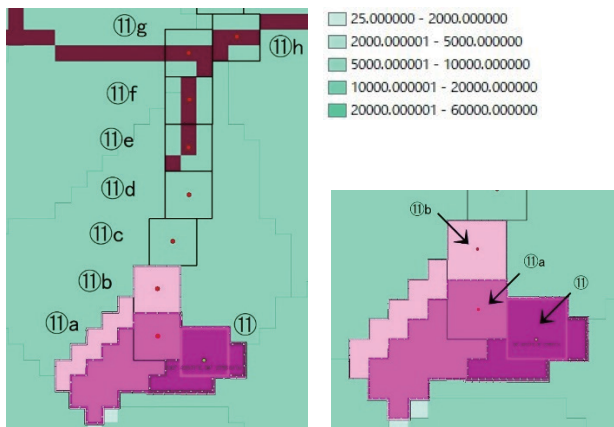
図-2 No.33の溪流と源頭位置

表-1 抽出した溪流に対する源頭の緯度経度，地形特性の分析結果

溪流番号	源頭番号	経度	緯度	傾斜角 tanθ	集水面積 A (m ²)	F 値 (源頭)	F 値(上流域 最大値)
No.33	①	132° 30'01.19"	34° 19'00.57"	0.79	876.54	3.49	3.49
	②	132° 30'01.70"	34° 19'01.03"	0.65	725.71	2.76	3.44
No.25	①	132° 36'24.63"	34° 27'24.01"	0.53	424.60	1.99	3.45
	②	132° 36'28.10"	34° 27'26.13"	0.59	275.61	2.05	2.83
	③	132° 36'31.81"	34° 27'31.17"	0.54	325.28	1.91	2.68
	④	132° 36'7.348"	34° 27'33.024"	0.63	5949.86	4.25	4.44
No.23	①	132° 42'05.20"	34° 27'55.87"	0.54	524.58	2.14	2.54
	②	② 132° 42'07.42"	34° 27'52.05"	0.65	1601.30	3.29	3.46
	③	③ 132° 42'03.22"	34° 27'47.75"	0.63	11874.17	5.00	5.00
No.22	①	④ 132° 42'05.45"	34° 27'41.12"	0.69	1449.48	3.43	3.58
No.18	①	⑤ 132° 42'41.16"	34° 28'16.62"	0.68	549.64	2.72	3.56
	②	⑥ 132° 42'33.33"	34° 28'14.21"	0.70	574.32	2.83	3.84
	③	132° 42'39.73"	34° 28'09.83"	0.64	1149.52	3.03	4.02
	④	132° 41'59.18"	34° 28'18.77"	0.57	974.40	2.59	3.27
	⑤	132° 42'05.39"	34° 28'20.05"	0.75	449.89	2.87	3.13
	⑥	132° 42'07.75"	34° 28'19.02"	0.60	2100.43	3.25	3.81
	⑦	132° 42'03.76"	34° 28'12.90"	0.70	799.95	3.02	4.34
	⑧	132° 42'05.73"	34° 28'12.08"	0.57	325.05	2.04	2.90
	⑨	132° 42'00.53"	34° 28'07.52"	0.67	1049.13	3.11	3.93
	⑩	132° 42'04.03"	34° 27'57.66"	0.60	350.31	2.17	2.69
	⑪	132° 42'08.71"	34° 27'55.61"	0.46	399.94	1.71	2.53
	⑫	132° 42'07.96"	34° 28'00.21"	0.51	873.77	2.25	2.78
	⑬	132° 42'05.51"	34° 28'03.38"	0.44	2099.15	2.38	3.42
	⑭	132° 42'12.64"	34° 28'01.94"	0.54	1299.20	2.60	3.23
	⑮	132° 42'15.81"	34° 27'57.11"	0.44	999.61	2.01	2.65
	⑯	132° 42'19.08"	34° 27'57.84"	0.51	1897.33	2.66	2.66
	⑰	132° 42'16.59"	34° 28'02.39"	0.60	424.74	2.28	2.28
	⑱	132° 42'09.26"	34° 27'54.33"	0.45	674.81	1.88	2.74
	⑲	132° 42'09.01"	34° 27'51.29"	0.45	574.56	1.83	2.51
	⑳	132° 42'18.68"	34° 27'51.63"	0.38	3176.50	2.26	2.39
?	132° 42'15.76"	34° 27'49.77"	0.51	1778.22	2.63	2.90	
?	132° 42'09.89"	34° 27'48.26"	0.59	1099.32	2.73	3.29	
?	132° 42'11.10"	34° 27'47.20"	0.61	850.54	2.69	2.91	
?	132° 42'10.23"	34° 27'45.49"	0.49	997.11	2.22	3.21	
?	132° 42'15.69"	34° 27'42.55"	0.40	325.06	1.42	2.96	
No.11	①	132° 47'18.16"	34° 25'37.31"	0.42	849.74	1.86	3.36
	②	132° 47'33.08"	34° 25'42.93"	1.05	974.60	4.77	4.77
	③	132° 47'38.03"	34° 25'46.70"	0.22	1607.94	1.10	4.90
	④	132° 47'22.90"	34° 25'42.83"	0.47	325.02	1.67	2.53
	⑤	132° 47'23.34"	34° 25'43.61"	0.56	649.96	2.31	3.43
	⑥	132° 47'23.39"	34° 25'43.97"	0.49	425.22	1.85	3.34
	⑦	132° 47'26.02"	34° 25'44.42"	0.55	500.80	2.16	3.85
	⑧	132° 47'23.10"	34° 25'45.47"	0.62	674.42	2.58	3.10
	⑨	132° 47'23.10"	34° 25'46.64"	0.53	274.90	1.82	2.42
	⑩	132° 47'31.70"	34° 25'52.26"	0.51	1172.37	2.41	2.51



(a) 溪流全体の傾斜分布 (b) 源頭の傾斜分布

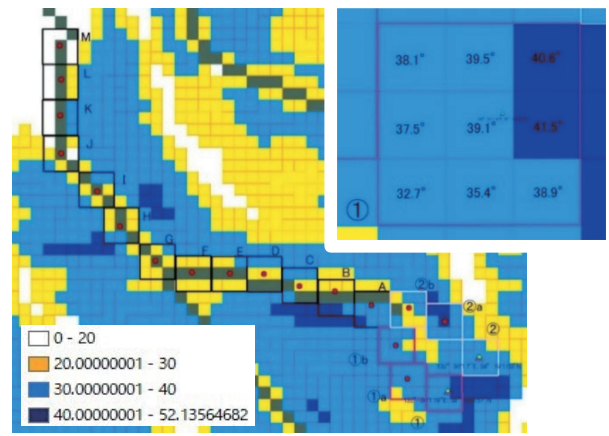


(c) 溪流の集水域 (d) 源頭の集水域
図-3 No.18 溪流の上流域での傾斜角と集水域

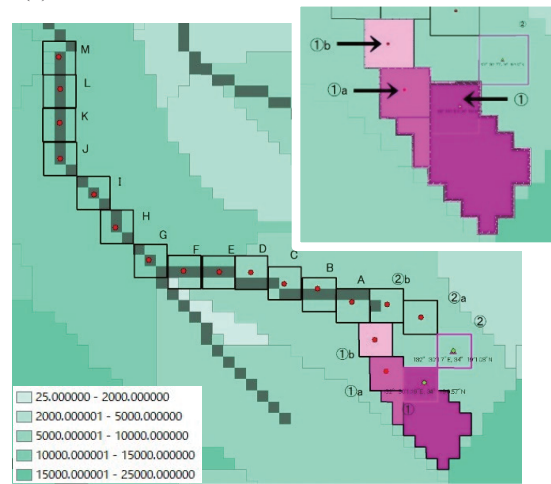
2.2 地形特性の把握

溪流上流域の地形特性の把握のために、地理情報システム(GIS)を用いて地形解析を行った。解析する上で、国土地理院が提供する 5m×5m メッシュに対する 2009 年の標高データを用い、傾斜角や集水面積を求めた。傾斜角は、まず各メッシュの最大の傾斜を求め、該当メッシュを中心とする 9 つのメッシュの傾斜の平均角度とした。これは、15m×15m で極端に傾斜が変化する溪流がなかったためである。集水面積は、当該箇所に流下してくる降水のもたらされる面積のこととした。図-3(a) (b)は、No.18 の溪流の①源頭について、メッシュの標高データから得られた最大傾斜による角度の分布を示している。解析では、源頭を緯度経度データから同定し、それを中心とする 9 つのメッシュを、枠囲みした。源頭の傾斜角は、①の枠内の 9 つの傾斜の平均角度 (15m×15m の平均角度) とした。この源頭の傾斜角は、 24.7° ($\tan\theta=0.46$) となる。さらに、溪流沿いに解析上の簡便さから重複しないように 9 メッシュごとに枠囲みし、枠ごとにナンバリング (①~①h) した。この枠ごとに傾斜角を求めて分析した。なお、ここでの溪流は、谷地形を成し、GIS により雨水が流下する経路として定義できるものとした。

図-3(c) (d)は、No.18 の溪流の①源頭について、集水面積を求めたものを示している。この図には、①源頭、①a、①b に流入する集水面積を表し、流入するメッシュを



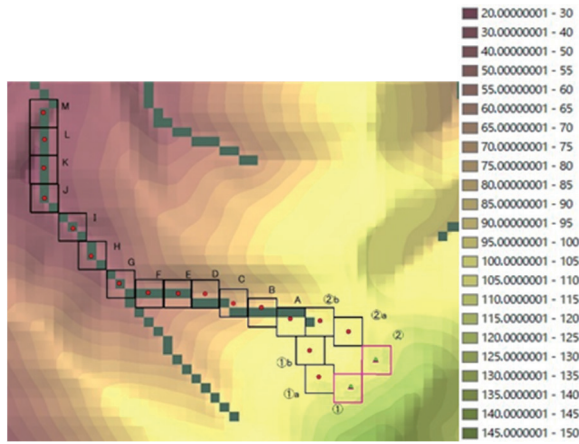
(a) 溪流全体の傾斜分布 (b) 源頭の傾斜分布 (右上)



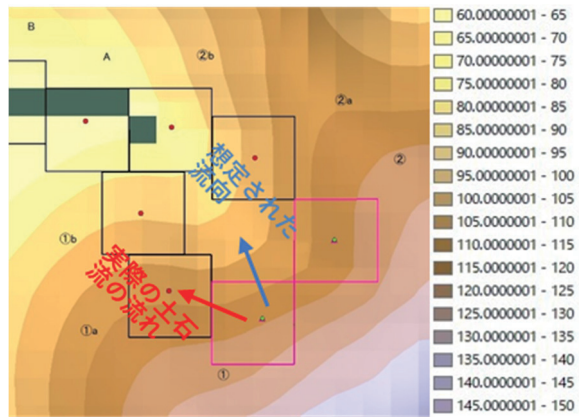
(c) 溪流の集水域 (d) 源頭の集水域 (右上)
図-4 No.33 溪流の上流域での傾斜角と集水域

色分けしている。①源頭の集水面積は、源頭を中心とした 9 メッシュに加え、7 メッシュの面積 (濃紫色) ということになる。①a の集水面積は、①のそれに加え、紫色ということになる。①b の集水面積は、薄紫色に加え、①a の集水面積を加えたものである。なお、オーバーラップした面積分は減じている。

図-4(a) (b)は、No.33 の溪流について、メッシュの標高データから得られた傾斜分布を示している。No.18 同様、源頭を緯度経度データから同定し、溪流に沿って 9 メッシュごとに枠囲みし、枠ごとにナンバリング (①~M) した。そして、この枠ごとに傾斜角を求めて分析した。図-4(c) (d)は、No.33 の溪流について集水面積を示している。この図には、①源頭、①a、①b の枠に流入する集水面積を表している。①源頭の集水面積は、源頭の 9 メッシュと、それに流入する降水をもたらず 26 メッシュの面積 (濃紫色) となる。①a の集水面積は、①a のメッシュを含む紫色の面積となった。①の集水面積を加算しないのは、図-5 に示すように、①源頭に集水した雨水の流向が元の地形では土石流が発生した方向と異なったためである。地形解析で判読される溪流を、実際には土石流が通過しないことがあるので注意が必要である。①b の集水面積は、薄紫色と①a の集水面積を加えたものである。



(a) 溪流上流の標高分布



(b) 源頭の標高分布

図-5 No.33 溪流の標高コンター

3. 溪流上流の地形特性

3.1 溪流上流の地形特性の把握

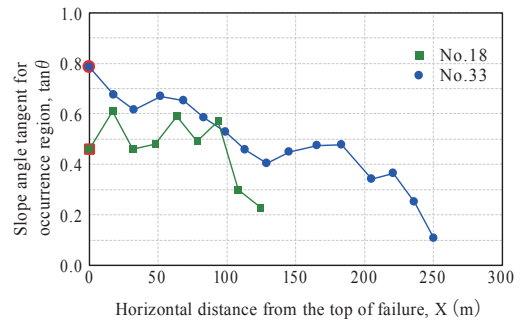
土石流は、一つの溪流で複数回発生することがある。これは、溪流沿いに複数の土砂流下の引き金となる箇所が存在することを示唆している。このため、源頭を含む溪流に沿った地形特性の把握は意義がある。図-6は、図-3および図-4に示す溪流、つまり、No.18 溪流の①源頭と、No.33 溪流の①源頭を含む溪流に沿って求めた地形特性を示す。図(a)は傾斜角 $\tan\theta$ の変化、図(b)は集水面積の変化、図(c)は(1)式で定義される地形滑動力指数の変化を示したものである。これは、この地形滑動力指数を用いて行われた危険水系に対する検討¹⁵⁾にならった。

$$F = \tan\theta \times A^a \quad (1)$$

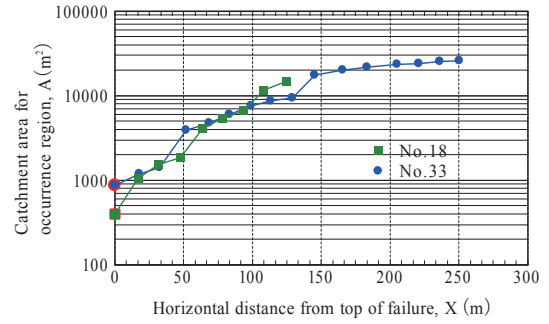
ここで a は、 $\tan\theta$ と集水面積 A の関係を示す図(d)中の直線の勾配となるもので、 F は $A = 1\text{m}^2$ の時の $\tan\theta$ の値を意味する。沖村¹⁵⁾によれば a の値が0.22として、 F の値が2.97以上となる箇所が崩壊が起こることを考察している。図(d)に示す破線は、以下の式で与えられる。

$$2.97 = \tan\theta \times A^{0.22} \quad (2)$$

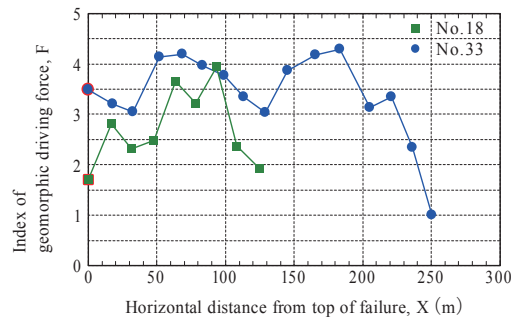
No.18の溪流の場合、 $\tan\theta$ の値は源頭より下流20-90mの



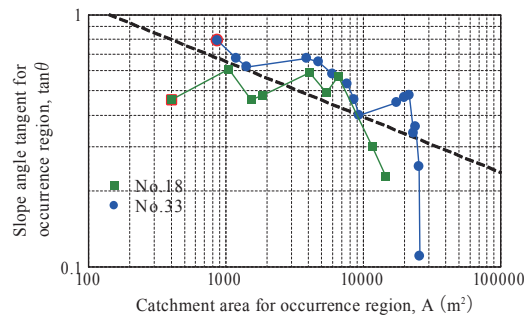
(a) 傾斜角 $\tan\theta$ の変化



(b) 集水面積の変化



(c) 地形滑動力指数の変化



(d) $\tan\theta$ と集水面積の関係

図-6 No.18 溪流の①源頭および No.33 溪流の①源頭を持つ溪流沿いの地形特性の変化

範囲の方が高い値を示した。これに対して、 A は指数的に増加する。(1)式を用いて得られる F の値は、源頭から15mで、2.8を超えた。No.33の溪流の場合、 $\tan\theta$ の値は下流に向かうにつれおおそ単調に減少し、 A は最初微増で、50mの地点で急増した。これは、図-4で見られるように、もう一つの支流と合流することによる。 F の値は、源頭から50mで、4を超える値を示した。土石流の発生という点で、溪流沿いの F の最大値を指標とする考え方

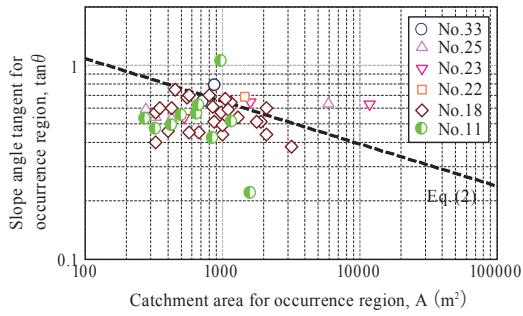


図-7 2018年広島県で土石流が発生した溪流の源頭の傾斜角と集水面積の関係

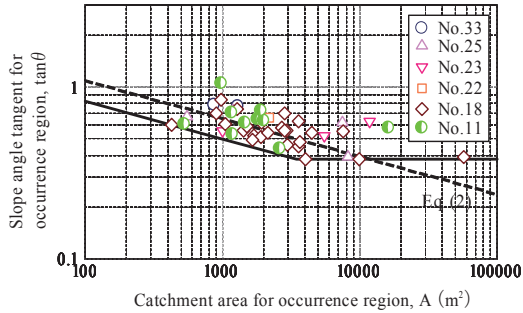


図-8 2018年広島県で土石流が発生した溪流の上流域の傾斜角と集水面積の関係

もある。Fの最大値は、No18で90m、No.33で180m付近に認められる。これは集水面積が指数的に増加することが主因と考えられる。この論文では、土石流がどこから起きたかという点に焦点を当てるため、源頭から50m以内のFの最大値を、土石流発生溪流の上流の地形特性の代表値と考えた。

3.2 源頭の地形特性

図-7は、前章で説明した方法により求めた源頭の傾斜角と集水面積について整理したものである。得られた源頭の地形滑動力指数は、多くの溪流の源頭において(2)式で与えられる値よりも低くなった。36箇所の源頭のうちこの直線よりも上にプロットされた源頭は10箇所であり、22%という結果であった。

図-8は上流域の地形特性として、源頭から50m以内のFの最大値を示す箇所のtanθとAについて示しものである。図には、(3)式に示すように、(2)式で与えられる破線の平行線とプロットの下限境界の二つの直線で定義したものを示す。

$$\begin{aligned} 2.28 &= \tan \theta \times A^{0.22} \quad \dots A < 3444m^2 \\ \tan \theta &= 0.38 \quad (\theta \approx 21^\circ) \quad \dots A \geq 3444m^2 \end{aligned} \quad (3)$$

沖村・中川¹⁶⁾は勾配aが0.103と比較的小さい値となる地域があることを指摘している。笠原・綱木¹⁷⁾は、勾配がわずかに一となることを指摘した。これから、集水面積のFへの影響を与える勾配aが0となる、つまり、(3)式の第2式のような、崩壊の発生非発生に集水面積が寄与せず傾斜角のみで規定される条件もあり得ると考えた。

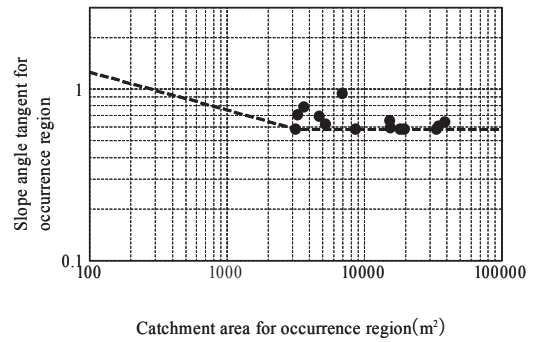


図-9 2009年山口県防府市で土石流が発生した溪流の源頭の傾斜角と集水面積の関係

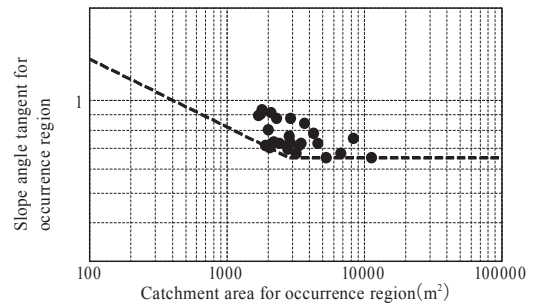


図-10 2014年広島市で土石流が発生した溪流の源頭の傾斜角と集水面積の関係

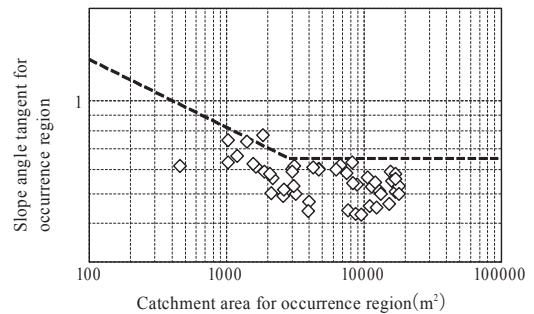


図-11 2014年広島市で土石流を発生していない溪流の源頭の傾斜角と集水面積の関係

4. 他の災害における地形特性

図-9, 10はそれぞれ、2009年山口県防府市と、2014年広島市での土石流発生溪流について、源頭の地形特性を評価したものである。2009年防府市の場合の2直線の式は、以下のようなになる。

$$\begin{aligned} 3.43 &= \tan \theta \times A^{0.22} \quad \dots A < 3225m^2 \\ \tan \theta &= 0.58 \quad (\theta \approx 30^\circ) \quad \dots A \geq 3225m^2 \end{aligned} \quad (4)$$

2014年広島市の場合の2直線の式は、以下のようなになる。

$$\begin{aligned} 3.74 &= \tan \theta \times A^{0.22} \quad \dots A < 2847m^2 \\ \tan \theta &= 0.65 \quad (\theta \approx 33^\circ) \quad \dots A \geq 2847m^2 \end{aligned} \quad (5)$$

(3)から(5)式を比べることで、Aの大きさが発生に影響を及ぼさなくなる面積が3000m²と大きな違いがなかった。

この3000m²以上の集水面積がある場合、傾斜角のみが発生の条件となる地形という条件は興味深い。ある集水面積以上ということは地盤がかなり飽和状態に近いと考えられる。飽和した無限斜面の安定性がせん断抵抗角と斜面の傾斜角の大小で評価できることから、この状況に近いものと推察する。防府や広島での災害の場合、この集水面積の源頭では傾斜角が30°を超える箇所が発生しているのに対し、2018年の災害の場合では21°と、かなり低い値となった。また、3000m²以下の集水面積では、2018年の災害の地形滑動力指数は、他の2ケースと比べ小さい値となった。2018年の西日本豪雨の場合、その2ケースに比べて累積雨量が大きい。ある量の雨水が集まれば土石流発生が発生すると考えられることから、災害発生に対する2直線は累積雨量の増加とともに、下限に移動することを示唆している。なお、これらの検討は、(1)式中の α の値に左右されることから、さらに災害事例の調査を用いて検討する必要がある。

図-11は、2014年広島市南区周辺の危険渓流のうち、土石流の未発生渓流について、想定源頭およびその周辺の地形特性を評価したものを、図-9に示す下限境界線とともに示した。未発生渓流の上流での地形は下限境界線よりも下に位置していることから、この下限境界線を土石流危険渓流の判定に利用できる可能性を示唆した。

5. まとめ

2018年の豪雨で土石流が発生した広島県の渓流を対象に、渓流上流域の地形解析を行った。

- (1) 渓流の傾斜角は、土石流の発生源頭から下流に進むほど、徐々に減少する渓流と、源頭より高くなる渓流とがあった。集水面積は、源頭から下流に進むほど、単調に増加する。傾斜角と集水面積から得られる地形滑動力指数は、源頭よりも数10m下流の方が高い渓流があった。これは、最初の崩壊が数10m下方で発生し、上方へ伝播するような発生形態を示唆している。
- (2) 2018年の豪雨で土石流が発生した広島県の渓流の上流域の地形特性は、傾斜角と集水面積を用いて判定できる可能性が示された。今回の検討に用いた渓流では、集水面積が3444m²以上では傾斜角が22°以上、集水面積がそれ以下では地形滑動力指数が2.28以上であることを確認した。
- (3) (2)の傾向は、過去の災害における渓流に対する源頭の地形特性においても確認された。それとともに、傾斜角や地形滑動力指数の下限値は、地域や累積雨量によることが示唆された。

謝辞

本研究の遂行にあたり、(株)西日本高速道路エンジニ

アリング中国から、災害発生個所の位置情報などの情報提供を頂いた。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 地盤工学会：平成11年6月29日豪雨による広島県の斜面災害に関する緊急調査報告，土と基礎，Vol.47, No.10, pp.40-45, 1999.
- 2) 土木学会中国支部：2009年7月山口豪雨災害調査報告書，2009.
- 3) 土木学会中国支部：平成22年7月広島県庄原市土砂災害現地調査報告会，2010.
- 4) 土木学会中国支部：平成26年8月広島豪雨災害調査報告書，2015.
- 5) 土木学会中国支部：2018年7月西日本豪雨災害調査報告書，2019.
- 6) 大石博之，竹本大昭，榊原弘之，古川浩平，八木俊夫，荒木義則，浦真：統計手法を利用した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.
- 7) 福田友久，大石博之，井上亘，西尾陽介，古川浩平：包絡分析法による土砂災害危険箇所評価に基づく砂防施設整備事業の優先順位検討，砂防学会誌，Vol.61, No.1, pp.11-20, 2008.
- 8) 篠崎嗣浩，芦田悠輔，Park, D.J., Yoon, M., Yun, Y., 大石博之，古川浩平：ロジスティック回帰モデルを用いた災害発生危険度の活用に関する研究，砂防学会誌，Vol.63, No.1, pp.14-21, 2010.
- 9) 伊達裕樹，加納誠二，吉富健一，中井真司，竹内次郎：広島県の災害データの解析による土石流・がけ崩れの特徴，地盤と建設，Vol.28, No.1, pp.79-86, 2011.
- 10) 海堀正博：近年の豪雨による土砂災害発生の実態から見た中国地方における危険度，地盤と建設，Vol.28, No.1, pp.7-14, 2011.
- 11) 澤田尚，大石博之，杉原成満，古川浩平，荒木義則：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.
- 12) 土田孝，森脇武夫，田中健路，中井真司：2014年8月20日の広島豪雨災害における雨量を用いた土砂災害危険度評価に関する考察，地盤工学ジャーナル，Vol.11, No.1, pp.53-68, 2016.
- 13) 村上豊和，下野宗彦，中田幸男：高速道路に影響を与える土石流危険渓流の資料調査に基づく評価手法，地盤と建設，Vol.34, No.1, pp.19-27, 2016.
- 14) 波多野誠一：最近の地形学 8.崩壊性地形（その2），土と基礎，pp.81-93, 1974.
- 15) 沖村孝：地形要因からみた山腹崩壊発生危険度評価の一手法，砂防学会誌，Vol.35, No.3, pp.1-8, 1982.
- 16) 沖村孝，中川雅勝：地形的滑動力示数を用いた崩壊

危険斜面予知手法の汎用性について, 砂防学会誌,
Vol.41, No.6, pp. 14-21, 1988.

and model test behaviour for occurrence region of debris
flow at Hiroshima in August 2014, Proc. 16ARC, 2019.

17) 笹原克夫, 網木亮介: 斜面崩壊発生条件の地形学的
解析, 地すべり, Vol.32, No.1, pp. 26-33, 1995.

(2021年6月14日 受付)

18) Inomata, Y. and Nakata, Y.: Topographical characteristics