

九州北部豪雨 流木災害から得られた今後の課題

九州大学大学院工学研究院 教授 矢野 真一郎

1. 九州北部豪雨における流木の発生状況

平成29年7月九州北部豪雨による水害の大きな特徴の一つが大量の流木が発生し、谷底平野を流れる中小河川に土石流と一緒に流れて、被害を拡大させたことであった。河道を流下した流木は、比較的小さい橋梁に集積し、ダム化することで水の流下を阻害し、土砂の堆積を促進させ、橋梁下断面を閉塞した。それにより、橋梁そのものが埋没したり、破壊されたりしたものが多数見られた。また、流下できなくなった土砂と流木を含む洪水が河川からあふれ出て、周辺の道路や宅地・田畑に流入し、家屋などを破壊したり、土砂で埋没さ

せたり、最悪の場合には流失させたりした（写真1、2）。

今次水害においては、線状降水帯が6～9時間程度停滞し長時間にわたり強い降雨が発生したために、同時多発的に斜面崩壊が発生した。そのため斜面上の森林から立木が流木化して流下した。国土地理院が公開した崩壊地の分布について、GIS上に再整理したものを図1に示す。また、表1に被災河川毎に流木量や流出係数（流域面積あたりの流木量）などの情報をまとめたものを示す。ここで、流木量は国土交通省の推定値を示している。この推定値は、斜め航空写真から流木発生源を特定し、面積当たりの材積量を掛け合わせることで算出されている。その際、福岡県人工林収穫予測システム（<http://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/sugi-yosoku.html>）を用いて、樹齢45年を仮定した場合に推定される単位面積当たり材積



写真1 北川下流域の流木に起因した氾濫 [2017/7/6ヘリからの空撮]



写真2 北川本陣橋上流での被災状況 [2017/7/8撮影]

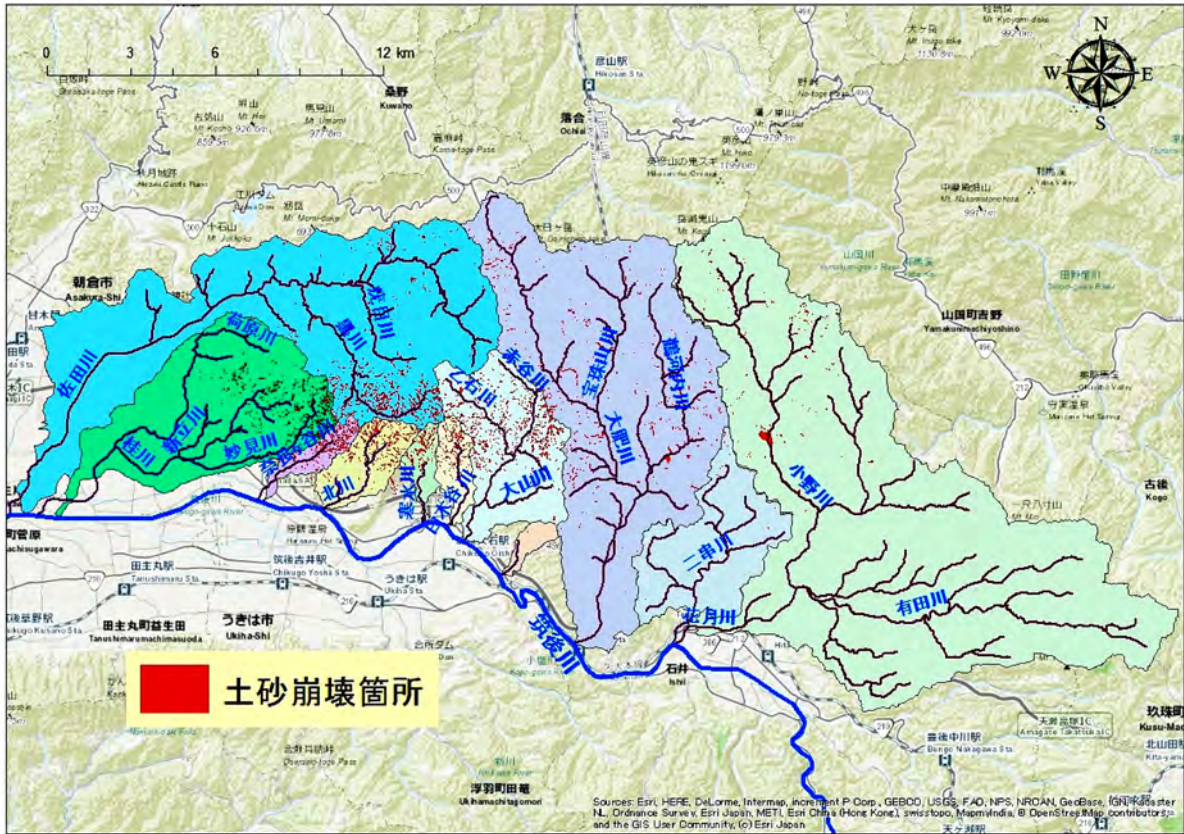


図1 今次水害における斜面崩壊地の分布 [原図 (国土地理院, 2017) を GIS 上に復元したもの]

表1 各被災河川の流木関連情報

本川	流域面積 (km ²) ¹⁾	推定流木量 (m ³) ¹⁾	山林からの流木量 (m ³) ¹⁾	流木発生量中の山林由来分の割合 (%)	斜面崩壊面積 (km ²) ²⁾	崩壊率 (%)	推定発生土砂量 (万m ³) ¹⁾	推定堆積土砂量 (万m ³) ¹⁾	流木流出係数 (m ³ /km ²)	山林由来流木流出係数 (m ³ /km ²)	平均河床勾配	地質 ¹⁾	被災形態 ¹⁾
小石原川	87.4	7,009	4,513	64.4			9	3	80	52	0.0124	変成岩	被災小
佐田川	72.7	19,010	10,886	57.3	1.35	1.86	173	182	261	150	0.0096	変成岩	流水
桂川	45.4	28,815	15,066	52.3	0.90	2.38	93	96	635	332	0.0027	変成岩	流水
奈良ヶ谷川	3.8	19,601	13,427	68.5	0.48	12.71	46	37	5,158	3,533	0.0354	変成岩	土砂+流木
北川	7.0	27,616	18,085	65.5	0.59	8.74	66	67	3,945	2,584	0.0389	花崗閃緑岩	土砂+流木
寒水川	3.7	22,660	13,244	58.4	0.29	7.73	55	55	6,124	3,579	0.0577	花崗閃緑岩	土砂+流木
白木谷川	3.9	12,520	8,225	65.7	0.35	9.67	59	50	3,210	2,109	0.0300	花崗閃緑岩	土砂+流木
赤谷川	20.1	39,230	27,581	70.3	1.36	6.77	290	222	1,952	1,372	0.0148	変成岩, 花崗閃緑岩	土砂+流木
大肥川	77.6	27,163	16,189	59.6	1.04	1.34	178	103	353	211	0.0108	火山岩	流木
花月川	130.2	6,753	6,108	90.4	0.39	0.30	96	47	52	47	0.0292	火山岩	流水

注: 1) 筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会報告書(2017)より, 2) 国土地理院HPより

量54,900m³/km²を用いている。赤谷川・白木谷川・寒水(そうず)川・北川・奈良ヶ谷(ならがや)川の5河川が特に流木流出が顕著であることが分かる。また、桂川上流域や支川の妙見川、ならびに佐田川支川の黒川の流域でも崩壊が顕著であることが分かる。流木の発生源としては、山林・溪畔林・河畔林・その他に分類されていたが、山林が大半を占めていた。

2. 流木発生の要因分析

2.1 被災河川全体の流木発生の要因分析

今次水害の特徴である流木の発生に関連する斜面崩壊についての要因分析については、国の委員会 [筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会 (2017)] においても行われている。その結果によると、傾斜角については崩壊斜面のうち9割

以上が15°以上であった。また、斜面崩壊のリスクが高いと一般的に考えられている30°以上の斜面の割合は4割であった。降雨に対しては、1時間雨量が100mm、3時間雨量が250mm、6時間雨量が350mm、12時間雨量が400mm、ならびに24時間雨量が450mmを越えると斜面崩壊する面積が増える傾向にあるとされている。ここでは地上雨量計（気象庁アメダス、国土交通省、福岡県）のデータから面的な分布を内挿して、累加雨量が求められている。しかしながら、この分析では何時間雨量が斜面崩壊に効いていたのかが不明であった。

そこで、各河川流域において斜面崩壊発生に対して各要因がどのような関係性をもっているのかを改めて分析した。まず、前述の崩壊地データを用いて、各崩壊斜面の傾斜角を算定した。各溪流の傾斜角の代表値として、1つの溪流に含まれる

崩壊した斜面のもつ最大傾斜角を求め、複数崩壊斜面が含まれる場合はその平均値を算出して分析に利用した。また、各河川の流域を溪流に分割し、各溪流の面積に対する斜面崩壊面積の割合を斜面崩壊率と定義して算出した。一例として、図2、3に赤谷川流域と奈良ヶ谷川流域における溪流分割と斜面崩壊地の分布を示す。溪流分割数については、赤谷川は107、奈良ヶ谷川は44であった。

次に雨量に関しては、国土交通省のC-Xレーダー合成雨量データ(2017年7月5日の24時間分)を用いて、各メッシュ上の1、3、6、12、24時間最大累積雨量を算出した。地上雨量計の測定結果との比較を行い、C-Xの方が過小評価されている傾向があるが、概ね降雨の状況を表現できており、今回の被災エリア全体の時空間的雨量分布を評価する上では信頼性があると判断して、以下の分析を行った。

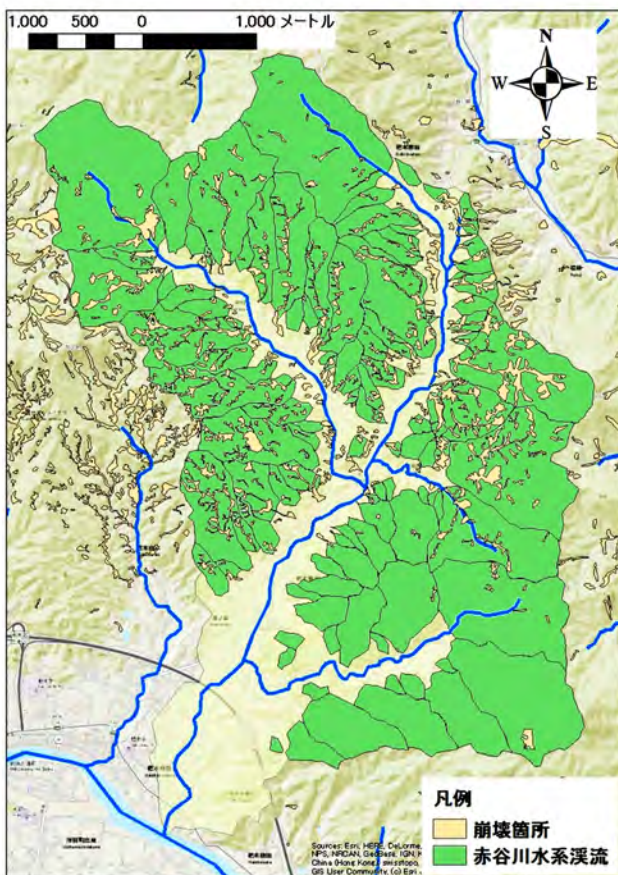


図2 赤谷川流域の溪流と斜面崩壊地の分布

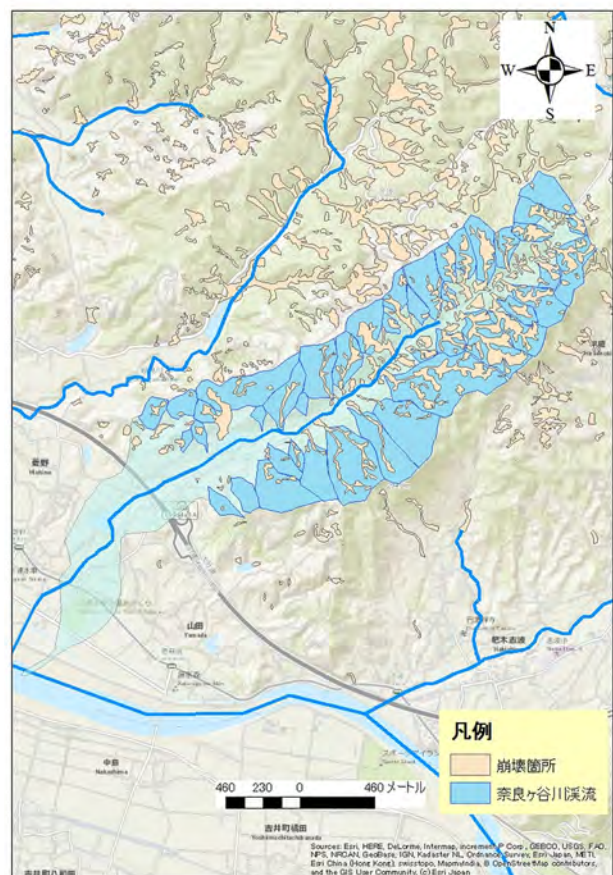


図3 奈良ヶ谷川流域の溪流と斜面崩壊地の分布

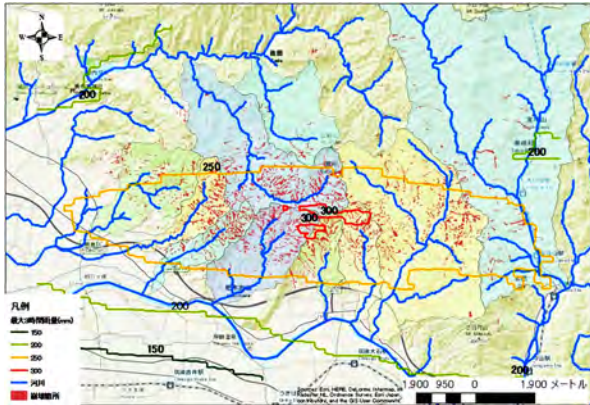


図4 3時間最大雨量

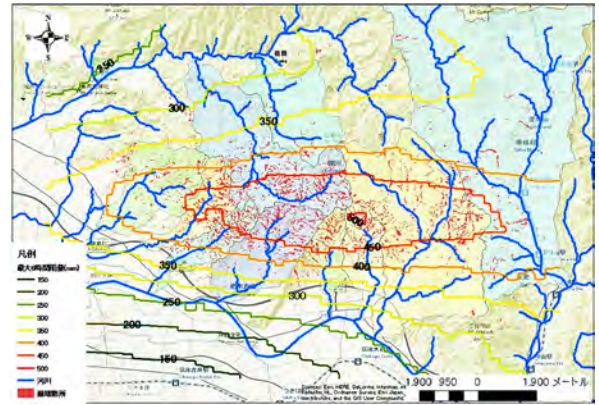


図5 6時間最大雨量

図4、5に一例として3時間、ならびに6時間最大累積雨量の空間分布図を示す。1時間雨量では佐田川の寺内ダムがあるあたりに極大エリアが分布していた（図は省略）が、3時間以降は流木発生量が多かった5河川（赤谷川～奈良ヶ谷川）と佐田川上流の黒川の流域へシフトしていた。

これらの情報をもとに、各溪流の斜面崩壊率に対する傾斜角と各時間の最大累積雨量についての重回帰分析を行った。分析においては、各変数を正規化して解析を行った。全変数を加味すると、雨量に対する偏回帰係数に負値が発生するなどの物理的に不合理な結果が得られたため、傾斜角と雨量1種の組み合わせの中でまとまりの良いものを選ぶと、傾斜角と3時間雨量、または6時間雨量との組み合わせとなった。なお、小石原川と花月川については崩壊面積が小さいため分析していない。また、桂川については本川上流域と支川の妙見川流域に分割し、佐田川については支川の黒川と疣目川の流域に分割している。また、赤谷川については全流域の他に、支川の乙石川のみを抽出した場合も分析した。加

えて、対象とした全河川を一括した場合と、特に流木発生量が多かった上位5河川を一括した場合も分析している。表2に重回帰分析結果の一覧を

表2 各河川の溪流毎の斜面崩壊率に対する傾斜角と最大3時間・6時間雨量との重回帰分析結果

河川名	斜面崩壊を含む溪流数(総溪流数)	傾斜角・3時間雨量		傾斜角・6時間雨量			
		R ²	係数	R ²	係数		
赤谷川*	75(107)	0.14	切片	0.00	0.22	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.28		崩壊地傾斜角	0.30
			3時間雨量	0.28		6時間雨量	0.39
寒水川*	23(35)	0.06	切片	0.00	0.05	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.03		崩壊地傾斜角	0.04
			3時間雨量	0.24		6時間雨量	0.21
白木谷川*	17(20)	0.59	切片	0.00	0.58	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.06		崩壊地傾斜角	0.03
			3時間雨量	0.74		6時間雨量	0.74
北川*	41(49)	0.39	切片	0.00	0.40	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.21		崩壊地傾斜角	0.22
			3時間雨量	0.52		6時間雨量	0.52
奈良ヶ谷川*	41(44)	0.41	切片	0.00	0.40	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.27		崩壊地傾斜角	0.28
			3時間雨量	0.45		6時間雨量	0.43
妙見川(桂川支川)	28(35)	0.48	切片	0.00	0.59	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.48		崩壊地傾斜角	0.31
			3時間雨量	0.34		6時間雨量	0.55
桂川上流(本川上流域)	38(51)	0.03	切片	0.00	0.00	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	-0.01		崩壊地傾斜角	0.02
			3時間雨量	-0.18		6時間雨量	-0.02
乙石川(赤谷川支川)	18(31)	0.16	切片	0.04	0.16	切片	-0.01
			崩壊地傾斜角	0.00		崩壊地傾斜角	0.00
			3時間雨量	0.00		6時間雨量	0.00
黒川(佐田川支川)	68(99)	0.10	切片	0.01	0.15	切片	0.02
			崩壊地傾斜角	0.08		崩壊地傾斜角	0.08
			3時間雨量	0.32		6時間雨量	0.39
疣目川(佐田川支川)	9(54)	0.31	切片	0.00	0.26	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.45		崩壊地傾斜角	0.41
			3時間雨量	0.60		6時間雨量	0.53
大肥川	69(172)	0.14	切片	0.00	0.21	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.31		崩壊地傾斜角	0.34
			3時間雨量	0.31		6時間雨量	0.41
全河川	409(666)	0.24	切片	0.00	0.23	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.23		崩壊地傾斜角	0.19
			3時間雨量	0.46		6時間雨量	0.44
Top5[*がついた5河川]	197(252)	0.27	切片	0.00	0.19	切片	0.00
			崩壊地傾斜角	0.28		崩壊地傾斜角	0.24
			3時間雨量	0.41		6時間雨量	0.31

示す。全体的には決定係数 R^2 はあまり高くないが、白木谷川、北川、奈良ヶ谷川、妙見川はやや高い値を示していた。桂川についてのみ偏回帰係数に負値が見られたが、その他の河川は全て正值であった。妙見川の3時間雨量の場合を除き、全ての河川において斜面傾斜角より雨量が効いているという結果を示した。森林がある斜面の崩壊は、雨量・地形（斜面傾斜角）・地質（表土と内部の構造）・森林の状況などが関係すると考えられるが、地質や森林の状況について定量的に評価するための情報が不足しており、これ以上の分析が現状では困難である。今後、不足する情報を定量的に評価し、より詳細な分析を行う必要がある。

2.2 個別河川の流木発生の要因分析

今次水害においては、表1に示した10河川において流木の発生が見られた。ここでは、河川毎に流木発生状況や要因分析を行った結果について、被害の最も大きかった赤谷川、ならびに溜め池の決壊による流木を含んだ洪水流による被害の発生した奈良ヶ谷川について報告する。

a) 赤谷川について

赤谷川流域について、矢野ら（2016）が提唱している流域の可能最大流木発生量に相当する流木発生ポテンシャルの概念を用いて、潜在的にどの程度の流木発生源を流域全体で持っていたのかを評価した。その際、矢野ら（2016）では傾斜角 30° 以上の斜面を流木発生源として取り扱っていたが、今次水害における状況では表3に示すとおり、 30° 以上が 0.43km^2 （崩壊地全体の31%）、 20° 以上が 0.93km^2 （68%）、 10° 以上が 1.27km^2 （93%）となっており、 30° 以下が6割を越えて

いた。そこで、流木発生ポテンシャルの評価においても、傾斜角を 30° 以上、 20° 以上、 10° 以上の3ケースを設定して評価した。潜在的な流木発生源となる流木供給可能箇所内の今次水害の崩壊地面積を見ると傾斜角によらず6～8%の割合で崩壊が発生していた。よって、 10° 以上を潜在的な発生源となり得る境界値として良い様である。

b) 奈良ヶ谷川について

奈良ヶ谷川流域では、河道に沿って2つの溜池が直列に配置されており、山の神溜池（有効貯水量： $59,791\text{m}^3$ ）と鎌塚溜池（ $78,349\text{m}^3$ ）が河道上に直列で配置されていた。今次水害の際には、上流側の山の神溜池では、洪水吐を持つ堤防が満水位を超えて越水を起こし、コンクリート製のシュート部の両側の土堤部を洗掘して、決壊したとみられている [鈴木ら（2018）]。その際に、住民が携帯電話で撮影した写真から決壊する前に流木が溜池に流入していたことが分かっている。しかし、洪水吐に流木が集積して排水能力が下がったために越水が助長されたかどうかについては明確ではない。洪水吐の排水能力以上の流入があり、流木が流入していなくても越水が発生していたことは鈴木ら（2018）の解析から分かっているが、洪水吐の上に道路橋が設置されていたことから、流木が大量に流下した場合には橋梁下に集積しやすい構造であり、影響を与えた可能性がある。矢野ら（2016）の方法で 30° 以上の傾斜を対象として流域全体の流木発生ポテンシャルを推定したところ、 $15,883\text{m}^3$ となった。表1に示した山林からの流木量が $13,427\text{m}^3$ と同程度であったことから、流木発生量が極めて大きかったことが理解される。

表3 赤谷川流域の斜面崩壊状況と流木供給可能箇所の面積

傾斜角	30° 以上	20° 以上	10° 以上	合計
斜面崩壊地の面積 (km^2)	0.43	0.93	1.27	1.36
流木供給可能箇所の面積 (km^2)	2.75	9.05	16.36	
供給可能箇所内の崩壊地面積 (km^2)	0.22	0.59	0.99	
流木発生ポテンシャル (m^3)	150,781	497,116	898,164	

3. まとめ

今次の豪雨災害において発生した流木について、発生量が多くなった要因の分析を行った。その結果、斜面の傾斜角と最大6時間雨量によりある程度説明ができることが明らかとなった。さらに、特徴的な災害が起こった2河川（赤谷川・奈良ヶ谷川）において、追加的な分析を実施した。赤谷川の事例より傾斜角 10° 以上の斜面は潜在的な流木発生源となること、奈良ヶ谷川の事例より潜在的な最大流木発生量である流木発生ポテンシャルと比較して同規模の流出が起きており、極めて大規模な流出が生じたことを示した。

今次水害において従来の概念が変化するほどの強大な流木災害が発生したことから、今後の流木リスク対策における課題が以下の通り見出された。

- i) 流木発生量の確率表示を可能にすること。
あわせて、治水・砂防の確率の考え方の整合が必要。
- ii) 河道上の流木災害リスクの評価法を確立し、その確率表示を可能にすること。
- iii) 流木災害に対する多重防御となるハード・ソフト対策の提案とその評価を行うこと。流木災害にもL1・L2の概念を組み込む必要がある。

加えて、流域圏（山地～河川～ダム～市街地～海）全体を見据えた流木災害への備えのあり方の議論を行政・市民・学を交えて始めることが必要

な時期に来ていると考えられる。温暖化の進行を踏まえて、今後の流木リスクの増大へ備えることを始めなければならない。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局河川部、福岡県、朝倉市、大分県、日田市、水資源機構にはデータ提供等で多大な協力を得た。本稿は平成29年度科研費特別研究推進費（JP17K20140）、ならびに土木学会水工学委員会2017年九州北部豪雨災害調査団による調査結果を利用した。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 内田太郎，秋山浩一，石塚忠範：表層崩壊発生場所と発生降雨量の関係の予測，平成23年度砂防学会研究発表会概要集，pp.130-131，2011。
国土地理院：<https://saigai.gsi.go.jp/3/20170726handokuzu/handokuzu.png>，2017。（2018年1月時点）
鈴木健吾，篠原麻太郎，守屋博貴，二瓶泰雄，長谷部由莉，五十川周，矢野真一郎，赤松良久：平成29年九州北部豪雨による福岡県朝倉市山の神ため池の決壊・洪水氾濫状況，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74，No.4，pp.L1183-L1188，2018。
筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会：筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会報告書，2017。
矢野 真一郎，土橋将太，堂菌俊多，笠間清伸，北隆範：流木発生ポテンシャルの概念に基づく花月川の橋梁における流木災害リスク評価，土木学会論文集B1（水工学），Vol.72，No.4，pp.L289-L294，2016。