特集 1 平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害調査団報告

事例研究 CASE STUDY

平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂崩壊地と地形・植生の関係について

遠山 貴之^{1)*}・吉原 哲²⁾

1) 八千代エンジニアリング株式会社 九州支店 環境部 〒810-0062 福岡県福岡市中央区荒戸 2-1-5

2) 八千代エンジニアリング株式会社 事業統括本部 国内事業部 環境計画部 〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8

Takayuki TOYAMA^{1)*}, Satoru YOSHIHARA²⁾: Relationship between landslides caused by heavy rain in July 2017, topography and vegetation in Northern Kyushu. *Ecol. Civil Eng.* 23(1), 197-205, 2020

1) Yachiyo Engineering Co., Ltd., Kyusyu Office, 2-1-5, Arato, Chuo-ku, Fukuoka, Fukuoka 810-0062, Japan

2) Yachiyo Engineering Co., Ltd., 5-20-8, Asakusabashi, Taito-ku, Tokyo, 111-8648, Japan.

はじめに

平成 29 年 7 月 5 日に発生した九州北部豪雨では、極めて規模の大きな降雨により、おびただしい数の斜面崩壊が発生し、それに伴い大量に発生した流木が橋梁を閉塞するなどして被害をさらに拡大させた。筆者らは、応用生態工学会により結成された「平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害調査団」に参加する機会を頂き、被災直後の赤谷川や白木谷川流域の現地視察では、無数の土砂崩壊地や、谷底平野一面に大量の土砂や流木が堆積した惨状を目の当たりにした。この豪雨災害の前後でも、西日本に広く被害をもたらした平成 30 年 7 月豪雨（西日本豪雨）をはじめ、土砂崩壊により人命・財産への被害が及ぶ豪雨災害が毎年のように発生している。

土砂崩壊を引き起こす規模の豪雨がどこで発生するかの事前予測は難しく、全人口の約 7 割が災害リスクの高い地域に居住すると言われる我が国では、治山・砂防施設等による既存のハード対策のみで国土全体での災害を防除することは極めて困難である。このため、森林が有する公益的機能の 1 つである土砂災害防止機能を有効に発揮させる「生態系を活用した防災・減災 (Ecosystem-

based disaster risk reduction ; Eco-DRR)」にも並行して取り組んでいくことが必要と考えられる。

本研究は、土砂崩壊が発生しやすい、または、発生しにくい地形や植生の特徴を把握し、今後の Eco-DRR の概念を活用した防災に資する知見を得ることを目的とし、九州北部豪雨により土砂崩壊が多発した流域を対象に、土砂崩壊の発生と地形や植生との関係性の分析を試みたものである。

方法

検討範囲

検討範囲は、豪雨による土砂崩壊が多発した赤谷川、乙石川、白木谷川、寒水川、北川、奈良ヶ谷川、妙見川、桂川、新立川、黒川の各流域内のうち、国土交通省国土政策局国土情報課が提供する国土数値情報 森林地域データ (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A13.html>) において、森林地域として指定された領域を設定した (図 1)。

土砂崩壊の発生要因を広域スケールで解析する際には、降水量のばらつきの影響を考慮する必要がある。降水量も含めた土砂崩壊の発生に影響する素因・誘因について、本特集号の浅田・皆川の報告において網羅的な分析結果

2019 年 10 月 9 日受付, 2019 年 12 月 1 日受理

*e-mail: tk-toyama@yachiyo-eng.co.jp

図 1. 検討範囲及び土砂崩壊地の分布.

が示されていることから、本報では特に斜面の形状と樹種、樹齢等の相互関係に着目することとした。ただし、降水量のばらつきの影響を極力排除するため、北部豪雨による降水量の分布を解説した山本ら（2017）の報告を参考に、日降水量が 500 mm を超える豪雨が発生し、土砂崩壊が多発した上述の 10 流域のみを解析対象とした。山本ら（2017）によると、今回の北部豪雨では東西 20 km、南北 8 km の範囲で日降水量 500 mm の豪雨が観測され、さらにその中心部では 700 mm を超える最大値を示しており、これらの地域を中心に土砂崩壊が多発している。

検討範囲内の土砂崩壊地の分布は、国土地理院が提供する平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図 (https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka_oita-heavy-rain.html#9) より、画像処理ソフトにて土砂崩壊地をポリゴンとして抽出し、GIS (ArcMap 10.4.1, ESRI Co., USA) のジオリファレンス機能を用いて整備した。判読図で示された土砂崩壊地は、「長さ又は幅がおおむね 50 m 以上の急傾斜地の土砂崩壊の範囲を表しており、崩壊地と堆積地を 1 つの項目にまとめて表現している」との注釈が添えられている。このため、本検討は、斜面上部が崩壊し、土石や流木が移送されて堆積するまでの一連の土砂災害が発現した範囲とそうでない範囲との比較を行ったものである。

土砂崩壊地と地形との関係性

土砂崩壊地の最小面積が 400 m² 程度であったことから、検討範囲をカバーする 20 m 角セルを整備し、国土地理院が提供する基盤地図情報の 10 m 数値標高モデル (<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>) を利用して各セル内の最大傾斜度、断面曲率、平面曲率を ArcMap の Spatial Analyst 機能を用いて算出した。

曲率は、曲線や曲面の曲がり具合を表す量であり、斜面地形の凹凸の指標として砂防分野等で適用例が多い。自セルを中心とした周囲の標高データを基に算出され、斜面の断面形状を示す断面曲率と、平面形状を示す平面曲率の組み合わせで表現される。断面曲率は、侵食や堆積につながる流れの加速と減速に関わる指標で、負の値は斜面が上方向に凸状であることを、正の値は斜面が上方向に凹状であることを、ゼロは斜面が直線であることを示す。平面曲率は、流れの収束と分岐に関わる指標で、正の値は斜面が横方向に凸状であることを、負の値は斜面が横方向に凹状であることを、ゼロは斜面が直線であることを示す。この断面曲率と平面曲率の組み合わせにより、斜面の形状は図 2 に示す 9 つに分類される（水越ほか 2002）。丘陵地では、「凸型尾根型」または「凹型谷型」に分類されることが多い。なお、本研究では、林野庁（2016）を参考に、断面曲率及び平面曲率ともに 0.05 以上を正值、-0.05 以下を負値、-0.05 超 0.05

未満を0として扱った。

以上のデータを基に、土砂崩壊が発生したセル群と検討範囲全体での傾斜度の分布の比較及び斜面分類の構成状況の比較を行った。さらに、各々の斜面分類について、土砂崩壊が発生したセル群または検討範囲全体に占める構成割合を基に、Jacobsの選択度指数D (Jacobs 1974)

を算出した。この指数は、-1から1の間をとる数値で、本研究の場合は検討範囲全体のセルに占める各斜面分類の構成割合（全体率）と、土砂崩壊が発生したセル群に占める各斜面分類の構成割合（利用率）から算出される。Dが正の場合は土砂崩壊がその斜面分類に偏って分布し、負の場合は避けて分布することを示す。また、±1に近づくほどその傾向が強いことを示す。

土砂崩壊地と地質との関係性

産業技術総合研究所の20万分の1シームレス地質図 (<https://gbank.gsj.jp/seamless/index.html?lang=ja&>) を利用し、土砂崩壊地内と検討範囲全体での地質の構成割合の比較及び選択度指数Dの算出により、土砂崩壊の発生と地質との関係性について検討した。

土砂崩壊地と植生との関係性

福岡県より提供を受けた森林簿データ（朝倉市及び東峰村のうち国有林以外の森林）を利用し、土砂崩壊地内と検討範囲全体での樹種または齢級区分の構成割合の比較及び選択度指数Dの算出により、土砂崩壊の発生と植生との関係性について検討した。

結 果

土砂崩壊地と地形との関係性

傾斜度、断面曲率、平面曲率について、土砂崩壊地を含むセルと含まないセルでの比較を図3に示す。いずれも数値の分布に明瞭な差は認められなかったが、断面曲

		平面曲率		
		谷型 (<0)	直線 (=0)	尾根 (>0)
断面曲率	凸型 (<0)	凸型谷型 	凸型直線型 	凸型尾根型
	等斉 (=0)	等斉谷型 	等斉直線型 	等斉尾根型
	凹型 (>0)	凹型谷型 	凹型直線 	凹型尾根型

図2. 断面曲率及び平面曲率による斜面分類。水越ら (2002) を参考に作成。

図3. 土砂崩壊の有無による傾斜度、断面曲率、平面曲率の比較。

表 1. 土砂崩壊地及び検討範囲全体での斜面分類の構成状況.

項 目		凹型 谷型 斜面	凹型 直線 斜面	凹型 尾根型 斜面	等斉 谷型 斜面	等斉 直線 斜面	等斉 尾根型 斜面	凸型 谷型 斜面	凸型 直線 斜面	凸型 尾根型 斜面
崩 壊 地	セル数	9,918	468	3,603	340	23	351	2,304	271	5,608
	割合 %	43.3%	2.0%	15.7%	1.5%	0.1%	1.5%	10.1%	1.2%	24.5%
検討範囲 全 体	セル数	27,416	1,551	14,069	1240	146	1,916	9,545	1,249	30,909
	割合 %	31.1%	1.8%	16.0%	1.4%	0.2%	2.2%	10.8%	1.4%	35.1%

図 4. 土砂崩壊地の斜面分類に対する選択度指数. 検討範囲全体での構成割合が 1%未満の斜面分類は表示していない.

率については、崩壊ありでは凹型斜面に、崩壊なしでは凸型斜面に区分されるものが多い傾向が認められ、平面曲率については、崩壊ありでは谷型斜面に、崩壊なしでは尾根型斜面に区分されるものが多い傾向が認められた。

断面曲率と平面曲率の組み合わせから斜面を 9 つに分類し（図 2）、土砂崩壊地及び検討範囲全体での構成状況を比較した結果を表 1 に示す。検討範囲全体では凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面の占める割合が高く、ほぼ同様の構成割合となった一方で、土砂崩壊地に限れば、0 次谷等の凹型谷型斜面の構成割合が高い傾向が認められた。

また、土砂崩壊が発生したセル群と検討範囲全体でのそれぞれの斜面分類の構成割合から Jacobs の選択度指数 D を算出した結果を図 4 に示す。前述したとおり、選択度指数は -1 から 1 の間をとる指数であり、正の場合はその斜面分類に偏って分布し、負の場合は避けて分布することを示す。また、±1 に近づくほどその傾向が強いことを示す。算出の結果、土砂崩壊は凹型谷型斜面に偏って発生し、凸型尾根型斜面では発生しにくい傾向が認められた。図 5 には赤谷川と乙石川合流点付近の拡大図を示すが、土砂崩壊地と凹型谷型斜面の分布がよく整合している状況が確認できる。

土砂崩壊地と地質との関係性

土砂崩壊地及び検討範囲全体での地質構成を比較した結果を表 2 に示す。検討範囲全体では三郡周防帯に属する変成岩類が 6 割超、花こう閃緑岩等の深成岩類が 3 割弱を占め、土砂崩壊地においてもほぼ同様の構成割合を示した。

土砂崩壊地と検討範囲全体でのそれぞれの地質別面積割合から Jacobs の選択度指数 D を算出した結果を図 6 に示す。火山岩類で負の値を示し土砂崩壊が発生しにくい傾向は認められたが、主要な構成地質である変成岩類と深成岩類では明瞭な傾向は認められなかった。

土砂崩壊地と植生との関係性

樹種

土砂崩壊地及び検討範囲全体での樹種構成を比較した結果を表 3 に示す。検討範囲全体ではスギ及びヒノキの人工林が 8 割超を占め、土砂崩壊地においても両樹種で同様の割合を占めた。

土砂崩壊地と検討範囲全体でのそれぞれの樹種別面積割合から Jacobs の選択度指数 D を算出した結果を図 7 に示す。スギでやや崩壊が発生しやすく、雑木林でやや発生しにくい傾向が認められた。

齢級区分

土砂崩壊地及び検討範囲全体での齢級区分の構成を比

図 5. 土砂崩壊地と斜面分類の対応状況（赤谷川及び乙石川の合流点付近）.

表 2. 土砂崩壊地及び検討範囲全体での地質の構成状況.

項 目		堆積岩類	火山岩類	変成岩類	深成岩類	その他
崩 壊 地	面積 ha	16.6	17.6	392.1	180.2	0.0
	割合 %	2.7%	2.9%	64.6%	29.7%	0.0%
検討範囲 全 体	面積 ha	90.1	210.9	2,493.7	1,108.4	0.6
	割合 %	2.3%	5.4%	63.9%	28.4%	0.0%

図 6. 土砂崩壊地の地質に対する選択度指数.

図 7. 土砂崩壊地の樹種に対する選択度指数. 検討範囲全体での構成割合が1%未満の樹種は表示していない.

表 3. 土砂崩壊地及び検討範囲全体での樹種の構成状況.

項 目		広葉樹				針葉樹			竹林		
		クヌギ	ケヤキ	雑木林	その他	スギ	ヒノキ	その他	マダケ	モウソウチク	その他
崩 壊 地	面積 ha	19.4	2.8	18.0	8.9	229.9	192.0	5.2	4.4	6.5	0.1
	割合 %	4.0%	0.6%	3.7%	1.8%	47.2%	39.4%	1.1%	0.9%	1.3%	0.0%
検討範囲 全 体	面積 ha	166.4	19.1	216.8	33.4	1,583.2	1,945.1	78.0	49.7	75.3	1.0
	割合 %	4.0%	0.5%	5.2%	0.8%	38.0%	46.7%	1.9%	1.2%	1.8%	0.0%

表 4. 土砂崩壊地及び検討範囲全体での齢級区分の構成状況.

項 目		広葉樹				針葉樹			
		1～3 齢級	4～7 齢級	8～11 齢級	12 齢級 以上	1～3 齢級	4～7 齢級	8～11 齢級	12 齢級 以上
崩 壊 地	面積 ha	21.2	8.0	11.1	8.8	57.0	56.3	164.5	147.5
	割合 %	4.5%	1.7%	2.3%	1.9%	12.0%	11.9%	34.7%	31.1%
検討範囲 全 体	面積 ha	101.8	82.8	126.8	124.6	291.9	551.6	1,524.7	1,218.7
	割合 %	2.5%	2.1%	3.2%	3.1%	7.3%	13.7%	37.9%	30.3%

図 8. 土砂崩壊地の齢級区分に対する選択度指数.

較した結果を表 4 に示す. 解析範囲全体では針葉樹の 8 齢級以上 (樹齢 36 年以上) の壮齢林が 7 割以上を占めていた. 一方で土砂崩壊地では 1～3 齢級の幼齢林の構成割合が解析範囲全体よりも高い傾向が認められた.

土砂崩壊地と解析範囲全体でのそれぞれの齢級区分別面積割合から Jacobs の選択度指数を算出した結果を図 8 に示す. 土砂崩壊地は, 広葉樹・針葉樹ともに, 幼齢林で正の値を示し崩壊地が偏って分布する傾向が認められた. 一方で, 広葉樹の壮齢林では負の値を示し, 崩壊が発生しにくい傾向が認められた. また, 針葉樹の壮齢林では明瞭な傾向は認められず, 今回の豪雨においては土砂崩壊を防止する効果は限定的と考えられた.

考 察

土砂崩壊は, 斜面が断面形・平面形ともに凹型を示す 0 次谷等の凹型谷型斜面に偏って発生した一方, 断面形・平面形ともに凸型を示す凸型尾根型斜面では発生しにくい傾向が認められた. また, 樹齢が若い幼齢林に偏って発生する傾向が認められた. さらに, 広葉樹林の壮齢林では土砂崩壊が発生しにくい傾向が認められたが, 針葉樹林の壮齢林では樹齢を重ねた林分であっても, 今回の豪雨においては土砂崩壊を防止する効果は限定的と考えられた.

以上の知見は土砂崩壊と地形または植生との個別の関係性について得られたものであることから, ここでは土砂崩壊が起りやすいと推定された凹型谷型斜面と, 土

砂崩壊が起こりにくいと推定された凸型尾根型斜面の2つの斜面分類に注目し、各斜面分類の特徴と土砂崩壊の関係性についてさらに詳しい分析を試みた。

凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面の平均的な傾斜度を表5に示す。平均傾斜度はいずれの斜面分類も24度程度で、明瞭な差は認められない。崩壊の有無に着目すると、凸型尾根型斜面で崩壊したセルの平均傾斜度(26.7°)は、崩壊していないセルの平均傾斜度(23.9°)と比較するとやや大きく、3°弱(5%勾配程度)の差が認められた。なお、既往知見(藤堂ら 2011)では、山腹崩壊と地形

(斜面勾配)との関係が認められ、森林植生の有無を問わず勾配別の崩壊面積は30～45°の範囲が顕著であった一方、斜面勾配が15°未満の有林地では崩壊が起こりにくかったという報告もある。

次に、凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面の樹種の構成状況を図9に、樹種別年齢区分の構成状況を図10に示す。樹種については、針葉樹の樹種構成に明瞭な違いが認められ、崩壊しやすい凹型谷型斜面にはスギが多く、崩壊しにくい凸型尾根型斜面にはヒノキが多かった。これは耐乾性についての生態特性とも一致しており、植林の際に意図的に植え分けられたものと考えられる。年齢区分については、斜面分類の間での明瞭な違いは認められなかった。共通した傾向として、針葉樹は8年齢級以上(樹齢36年以上)の壮齢林の割合が高かった。

続いて、各斜面分類における樹種と崩壊有無の関係を図11に示す。崩壊しやすい凹型谷型斜面では、ケヤキやアカマツから成る林分の崩壊割合は、スギやヒノキから成る林分の崩壊割合よりも小さい傾向が認められ、被災地でも実際に周囲の林分(スギやヒノキ)はほとんど

表5. 斜面分類毎の傾斜度の状況。

斜面分類		平均傾斜度	標準偏差
凹型谷型斜面 (崩壊しやすい)	(全体)	24.0	8.0
	崩壊なし	24.2	8.1
	崩壊あり	23.8	7.8
凸型尾根型斜面 (崩壊しにくい)	(全体)	24.4	8.0
	崩壊なし	23.9	8.0
	崩壊あり	26.7	7.6

図9. 凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面における樹種の構成。

図10. 凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面における年齢区分の構成。

図 11. 凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面における樹種と崩壊有無の関係。

図 12. 凹型谷型斜面と凸型尾根型斜面における樹種別年齢級区分と崩壊有無の関係。

崩壊しているのに対し、まとまったケヤキ林は崩壊を免れている場所が確認されている。崩壊しにくい凸型尾根型斜面では、凹型谷型斜面と同様に、スギやヒノキから成る林分の方が他の樹種よりも崩壊割合が高い傾向が認められた。

最後に、各斜面分類における樹種別年齢級区分と崩壊有無の関係を図 12 に示す。全体の傾向として、すべての樹種について凹型谷型斜面の方が凸型尾根型斜面よりも崩壊した林分の割合が多いことは前述したとおりである。

このうち、針葉樹のスギ林では、両斜面共通の傾向として、年齢級が若いほど土砂崩壊の発生割合が高く、4~7 年齢級を超えると崩壊割合は横ばいとなった。このように、林齢が進むと崩壊抑止力が頭打ちして横ばいとなる傾向は、既往知見(林野庁 2015)とも一致している。同じ針葉樹のヒノキ林では、年齢級区分と崩壊有無の構成割合の間に明瞭な傾向は認められなかった。一方で、広葉樹のクヌギ林では、崩壊しやすい凹型谷型斜面において、年齢級区分が進んだ林分ほど崩壊割合が小さくなる傾向が

認められた。

現地では、土砂の崩壊面が樹木の根が張った土壌層よりも深い風化した基岩層から発生している様子を確認したことから、今回のような集中豪雨では降雨が集中しやすい凹型谷型の形状を示す斜面に崩壊が集中するなど地形条件の影響が大きかったものと推察されるが、その中でも、ケヤキやアカマツの方がスギやヒノキよりも崩壊割合が低い傾向や、クスギでは齢級区分が進むほど崩壊割合が低くなる傾向が認められたことから、溪畔林の広葉樹林は可能な限り存置させることや、針葉樹植林については可能な範囲で針広混交林化を促進する方策を検討していくことが望まれる。また、針葉樹植林のまま維持する場合でも、特にスギについては幼齢木のように幹が細く、生長が停滞した線香林の状態を改善するための間伐（巻き枯らし間伐等）を行う方策も有効と考えられる。

このような方策を後押しするものとして、平成31年4月1日に施行された「森林経営管理法」及び「森林環境税及び森林環境譲与税に関する法律」が挙げられる。これらは、林業経営の合理化や林業の成長産業化に加え、森林の適切な経営管理を通じて、災害防止や地球温暖化防止など森林の公益的機能の維持増進を図ることを目的としている。森林所有者の意向を確認した上で、林業経営に適さない森林は市町村が自ら管理することとなるが、その中に土砂崩壊及び流木発生源となり得る危険性の高い林分が含まれる場合には、適切な間伐や林相転換など防災・減災の効果を意識した公益的機能を十分に発揮する計画的な森づくりを実施していくことが有効と考えられる。またこの際、森林をグリーンインフラ（Green Infrastructure）として捉え、土砂災害防止機能だけでな

く、水源涵養・二酸化炭素固定・（間伐材活用等による）エネルギー活用・環境教育やレクリエーションの場など多くの機能を最大限に活用し、復興や地域振興につなげていくことも重要である。

謝 辞

本研究は、応用生態工学会 平成29年7月九州北部豪雨調査団の活動の一環として行ったものであり、調査団員並びに関係者からは貴重なご意見を頂いた。特に、沖津二郎氏（応用地質株式会社）、今村史子氏（日本工営株式会社）、中原良一氏（いであ株式会社）には、本研究に必要な情報の提供や研究過程での貴重なアドバイス等、大変お世話になった。ここに記して深く感謝の意を表します。

引用文献

- 藤堂千景・山瀬敬太郎・林一郎（2011）シリーズ「近年の土砂災害」— 2009年兵庫県播磨北西部・但馬南部地域で発生した土砂災害—。水利科学 **319**: 130-145.
- Jacobs J. (1974) Quantitative measurement of food selection: a modification of the forage ratio and ivlev's electivity index. *Oecologia* **14**: 413-417.
- 水越博子・安仁屋政武（2002）数値等高線データを用いた斜面計測手法。国土地理院時報 **99**: 77-84.
- 林野庁 森林整備部 整備課 間伐林対策室（2015）土砂流出防止機能の高い森林づくり指針。
- 林野庁（2016）流木災害対策の必要な森林を抽出する手法手引書（案）。
- 山本晴彦・山崎俊成・坂本京子・山下奈央（2017）2017年7月5日に発生した九州北部豪雨における豪雨と災害の特徴。自然災害科学 **36**(3): 257-279.