

9. 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における土砂災害発生地と非発生地の地形・地質的特徴

Comparison of topographic and geologic features of landslide and non-landslide slopes in the 2017 torrential rainfall in northern Kyushu, Japan

○濱本佳那子（NEXCO 西日本コンサルタンツ株式会社）・太田岳洋（山口大学）

はじめに

平成 29 年 7 月九州北部豪雨の影響により、同年 8 月 31 日の時点で 307 件の土砂災害が発生した¹⁾。福岡県朝倉市では多数の斜面崩壊が発生したのに対し、大分県日田市西部では比較的崩壊数が少ないが、崩壊面積が大きいという特徴が認められた²⁾。朝倉市における斜面崩壊は、強風化で赤色土化した結晶片岩をすべり面とし、遷急線付近の谷型集水地形から崩壊しているものが多く見られた³⁾。一方、日田市における斜面崩壊は、火砕流堆積物の上位に安山岩質溶岩が分布するキャップロック構造によるものであり⁴⁾、少ない雨量で比較的大きな斜面崩壊が発生した²⁾。

また、土砂災害による被害を防止・軽減するため、急傾斜地の崩壊、土石流、地すべりを対象に土砂災害警戒区域が設定されているが⁵⁾、昨今の土砂災害について、その約 1 割は土砂災害警戒区域外で発生している^{6), 7), 8)}。よって、本豪雨において日田市北西部の斜面崩壊発生地と非発生地の地形・地質的特徴を明らかにすることで土砂災害警戒区域の新たな指標を考察することを目的とする。

1. 調査地域概要

調査地域は大分県日田市北西部から福岡県東部東峰村に当たる、東西約 8km、南北約 7km の範囲である。国土地理院数値標高モデルより作成した、調査地域の標高段彩図を図 1.1 に示す。調査地域は山地地形を呈する。西側は標高約 300m から 700m の山地が連なり、東側では標高 600m の山地が連なる。また、北部ほど標高が高く、南に向かうほど標高が低くなる傾向がある。

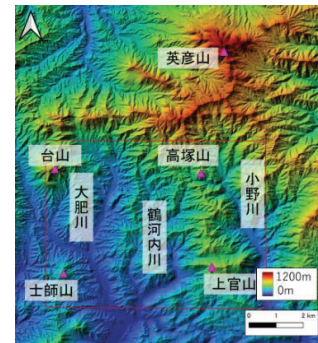


図 1.1 調査地域の標高段彩図

調査地域の地質図を図 1.2 に示す。大分県日田市北西部においては、主に中新世後期―鮮新世に形成された山国累層の輝石安山岩凝灰角礫岩及び溶岩、鮮新世に形成された英彦山火山岩類に分類される輝石安山岩溶岩及び凝灰角礫岩が分布する⁹⁾。調査地域周辺には北坂本累層、山国累層、上宮山安山岩火山岩類が分布する¹⁰⁾。



図 1.2 調査地域の地質図

2. 研究手法

2.1. 空中写真判読

2009 年 5 月 10 日に撮影された大分県日田市の空中写真 26 枚、2017 年 11 月 3 日に撮影された空中写真 14 枚を用いて斜面崩壊による滑落崖を判読した。以降、2009 年 5 月 10 日に撮影された空中写真で判読された崩壊地を旧崩壊地、2017 年 11 月 3 日に撮影された空中写真で判読された崩壊地を崩壊地とする。

2.2. 土砂災害警戒区域に関する検証

本災害発生時に土砂災害発生が周知されていたか否かは、国土交通省の国土数値情報ダウンロードで公開されている平成 25 年度の土砂災害警戒区域 第 1.1 版、平成 22 年度の土砂災害危険箇所 第 2.0 版から土砂災害警戒区域および土石流危険渓流を取得することで検証した。また判読された崩壊地が急傾斜地の崩壊の土砂災害警戒区域指定条件に該当するか否かを確認した。ここで、急傾斜地の崩壊は傾斜度が 30°以上である土地が崩壊する自然現象とされ、土砂災害警戒区域には急傾斜地の上端から 10m と下端から急傾斜地の高さの 2 倍以内 (下端からの距離は 50m 以内) が含まれる⁹⁾。傾斜度および急傾斜地からの距離は、基盤地図情報ダウンロードサービスより 2016 年 10 月 1 日更新の 10m メッシュ (標高) を使用して QGIS による解析から求めた。

2.3. 現地調査

日田市西部の火山岩類分布域において斜面崩壊地 4 箇所とその周辺を調査した。図 2.1 に現地調査を行った 4 地点を菱形印で示した。調査地は、空中写真判読で判読できた崩壊地のうち、土砂災害発生が周知されていた地点 (崩壊地 2)、未周知であったが土砂災害警戒区域の条件にあてはまる地点 (崩壊地 1、4)、いずれにも当てはまらない地点 (崩壊地 3) を選択した。特に崩壊地 2 は本災害において日田市で最大の規模の崩壊であった。現地調査では主に層序、地質構造、岩石強度を調査した。

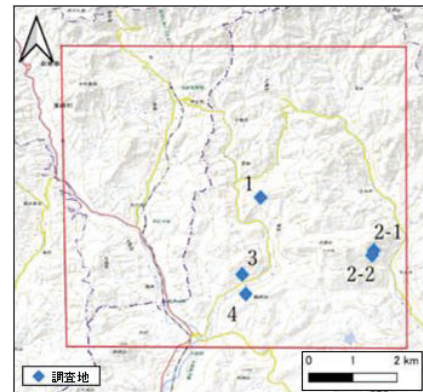


図 2.1 調査した崩壊地
(地理院地図に加筆)

岩石強度はシュミットロックハンマーテストにより測定した。露頭において 1 箇所につき 9 点で測定を行い、角度を補正した値を R_0 、式 1 を用いて圧縮強度 (F) を算出した¹¹⁾。

$$F(N/mm^2) = (-18.0 + 1.27R_0) \cdot \dots \cdot \text{式 1}$$

その後、最大値と最小値を除く 7 点での平均値を求めることで岩石の圧縮強度とした。

2.4. 地形解析

崩壊地および非崩壊地において、標高、傾斜量、傾斜方位、TPI、一般曲率、縦曲率¹²⁾、断面曲率¹²⁾、接曲率¹³⁾について解析を行った。地形解析には QGIS3.10.2 および SAGA GIS 7.8.2 を使用した。数値標高データは基盤地図情報ダウンロードサービスより 2016 年 10 月 1 日更新の 10m メッシュ (写真測量) をダウンロードして使用した。

各地形量について、崩壊地は源頭部、非崩壊地は斜面上端部で測定した。非崩壊地は浅田ほか (2020)¹⁴⁾ に倣って以下の通り設定した。まず、1 次谷集水域内において、尾根線と谷線を抽出した。次に、尾根線と谷線で囲まれた領域を斜面ユニットとした。斜面上端部は作成した TPI 図において、斜面ユニット内で凹部の上方に凸部が分布する箇所とした。

2.5. 判別分析

地形解析の結果、2 つの地形量に関係が見られたものについて判別分析を行った。分析には Origin を用いた。目的変数と説明変数との関係式を作成し、その相関比が 0.5 を上回る時、関係式を予測に使用できる。目的変数を本豪雨による崩壊の有無、説明変数を地形量とした。

3. 結果

3.1. 空中写真判読結果と土砂災害警戒区域

図 3.1 に空中写真判読の結果を示す。土砂災害警戒区域内の崩壊地を type-a、土砂災害警戒区域外だがその指定条件に一致する崩壊地を type-b、いずれにも一致しない崩壊地を type-c とする。

調査地域において本豪雨による土砂災害は type-a が 11 箇所、type-b が 11 箇所、type-c が 9 箇所判読された。type-b は保全対象がない為に土砂災害警戒区域に指定されなかったところである。よって、現行の土砂災害警戒区域指定条件で土砂災害発生を周知できた可能性があるものは 71%、周知できなかったものは 29%であった。

3.2. 現地調査

崩壊地 1 および崩壊地 2 の下位では、中程度の熱水変成作用を受けた角閃石両輝石安山岩溶岩と凝灰角礫岩を確認した。これは、北坂本累層と一致する。崩壊地 2 の上位、崩壊地 3 と旧崩壊地 3、崩壊地 4 と旧崩壊地 4 では、弱い熱水変質作用を受けたカンラン石含角閃石両輝石安山岩と凝灰角礫岩を確認した。溶岩の基質はハイアロオフィティックを呈する。これは上宮山安山岩と一致する。崩壊地 1、崩壊地 2 における安山岩質溶岩と凝灰角礫岩の境界の計 3 箇所、13～26° の北傾斜を計測した。

現行の土砂災害警戒区域指定条件で崩壊地の抽出を可能か否かが重要であるため、以降は傾斜量 30°を基準に崩壊地と非崩壊地を表 3.1 に示す 4 種類で分類する。図 3.2 に各崩壊地における岩石種別に圧縮強度を箱ひげ図で示す。安山岩質溶岩の圧縮強度は凝灰角礫岩より大きい。圧縮強度について、相対的に強い熱水変質作用を受けている崩壊地 1 および崩壊地 2 の下位安山岩質溶岩は崩壊地 2 の上位安山岩質溶岩および崩壊地 3、崩壊地 4 より小さい。これは変質程度が大きいほど圧縮強度が小さくなることを示す。一方、崩壊地と旧崩壊地における岩石との間に優位な差は見られず、崩壊発生の有無と圧縮強度の関係も認められなかった。

3.3. 地形解析

崩壊地の 37 箇所、非崩壊地の 45 箇所について解析を行った。解析は α が 21 箇所、 β が 16 箇所、 γ が 19 箇所、 δ が 26 箇所の計 82 箇所で行った。

(1) 傾斜量

崩壊地において α が 21 箇所、 β が 16 箇所と、傾斜量の条件を満たさない地点が過半数を占めた。一方、非崩壊地において γ は 19 箇所、 δ が 26 箇所であり、土砂災害警戒区域の条件を満たす地点が過半数となった。

また、平均傾斜量は崩壊地で 29.6°、非崩壊地で 31.2°であった。崩壊の有無に関わらず、土砂災害警戒区域内の傾斜量の平均値は区域外の傾斜量の平均値より大きくなった。

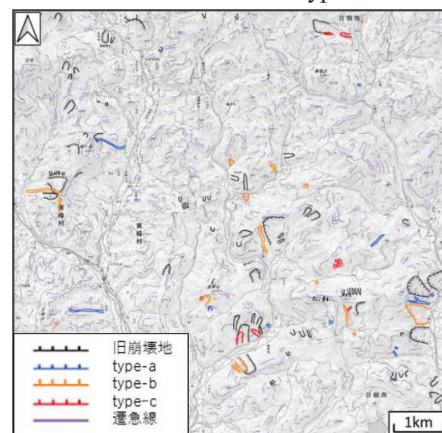


図 3.1 空中写真判読と土砂災害警戒区域

表 3.1 崩壊地と非崩壊地における分類

	傾斜量 30° 未満	傾斜量 30° 以上
崩壊地	α	β
非崩壊地	γ	δ

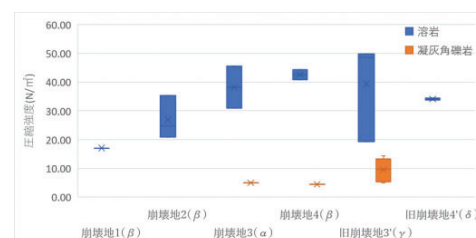


図 3.2 各崩壊地・岩種での強度試験結果

(2) 傾斜方位

図 3.3 に各傾斜方位における崩壊地数を示す。北西斜面および西斜面において崩壊件数が最大となった。一方、東斜面、北東斜面、南西斜面では傾斜量 30°未満の斜面における崩壊は発生しなかった。また、北斜面～西斜面において傾斜量 30°未満の斜面における崩壊が多発した。

(3) TPI

図 3.4 に TPI 図を示す。TPI は地表面の凹凸を示し、正は凸、負は凹を表す。全体の傾向として南東斜面は北西斜面と比較して凹凸が多い。本豪雨における崩壊地では、源頭部付近に凸部、その下位に凹部が見られる。

(4) 曲率

図 3.5～図 3.8 に傾斜量と一般曲率、縦曲率、断面曲率、接曲率の関係をそれぞれ示す。各曲率について平均値と分布の傾向を表 3.1 にまとめる。一般曲率および縦曲率については、崩壊地は非崩壊地より小さくなる傾向がある。一方で、いずれも土砂災害警戒区域内か否かにおいて分布傾向は見られなかった。

図 3.9 に縦曲率と断面曲率の関係を示す。土砂災害警戒区域内か否かに関わらず、縦曲率および断面曲率の平均値は崩壊地で負、非崩壊地で正の値となった。また、分散を考慮した場合も、縦曲率および断面曲率は崩壊地において負、非崩壊地において正の値を示す傾向がある。

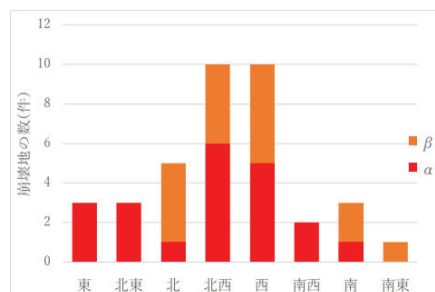


図 3.3 各傾斜方位における崩壊地数

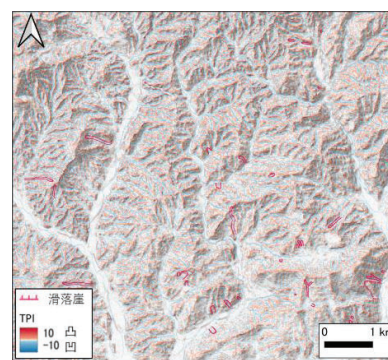


図 3.4 TPI 図(本豪雨発生前)

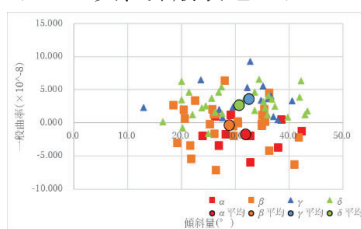


図 3.5 傾斜量と一般曲率の関係

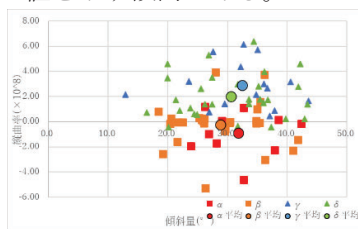


図 3.6 傾斜量と縦曲率の関係

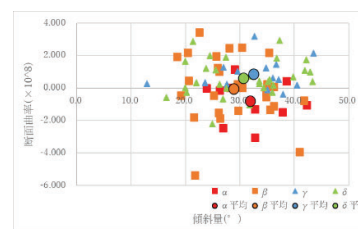


図 3.7 傾斜量と断面曲率の関係

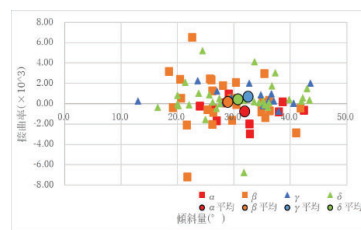


図 3.8 傾斜量と接曲率の関係

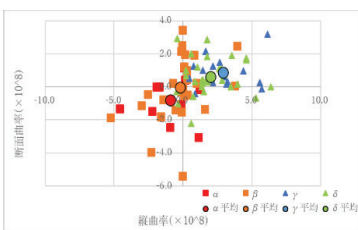


図 3.9 縦曲率と断面曲率の関係

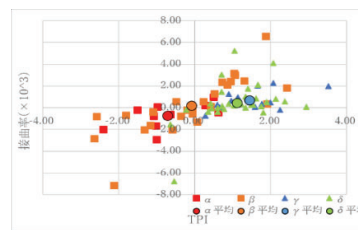


図 3.10 TPI と接曲率の関係

表 3.2 傾斜量と各曲率の関係

	平均値				分布傾向	
	土砂災害警戒区域内		土砂災害警戒区域外		崩壊の有無	土砂災害警戒区域内外
	崩壊地	非崩壊地	崩壊地	非崩壊地		
一般曲率	—	—	+	+	崩壊地<非崩壊地	×
縦曲率	—	—	+	+	崩壊地<非崩壊地	×
断面曲率	—	—	+	+	× (混在)	×
接曲率	—	+	+	+	× (混在)	×

図 3.10 に TPI と接曲率の関係を示す。TPI と接曲率には正の相関がある。土砂災害警戒区域内か否かに関わらず、TPI および接曲率の平均値において崩壊地は非崩壊地より小さい値を示す。

判別分析の結果を図 3.11 に示す。TPI を x_1 、接曲率を x_2 としたとき、崩壊が予測される条件は式 2 のように表される。

$$x_2 > 3775x_1 - 1823 \quad \dots \dots \dots \text{式 2}$$

このとき、正準相関は 0.62934、エラー率は 12.07% であった。

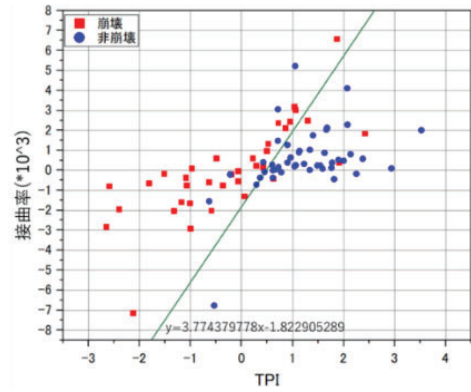


図 3.11 判別分析結果_TPI-接曲率

4. 考察

4.1 地質的特徴と崩壊の発生・非発生

崩壊地 1、崩壊地 2 における計 3 箇所 で 13~26° の北傾斜を計測した。崩壊地 1 は南東斜面、崩壊地 2 は東斜面のため、受け盤斜面であると考えられる。調査地域全域が北傾斜の地質構造を有すると仮定すると、崩壊地が多く分布する北～西向き斜面（図 3.3）は概ね流れ盤を呈することとなる。

相対的に熱水変質作用を強く受けた北坂本累層（崩壊地 1、崩壊地 2 の下位）における強度は上宮山安山岩（崩壊地 2 上位、壊地 3、崩壊地 4）より小さいことから、熱水変質作用を強く受けるほど強度が低下すると考えられる。一方、旧崩壊地と崩壊地が隣接する場合に、本豪雨における崩壊地と非崩壊地について圧縮強度に優位な差はない。したがって、1 回の豪雨における斜面崩壊発生の有無に圧縮強度は関与しないと考える。

4.2 地形的特徴

現地調査を行った崩壊地のうち、受け盤斜面が確認された崩壊地 1 および崩壊地 2 は、TPI 図において凹凸が多い南東斜面であった。よって、凹凸の多い斜面は受け盤構造、凹凸の少ない斜面は流れ盤構造を示すと考えられる。また、流れ盤である北西斜面において傾斜量が 30°未満の斜面で崩壊が多発した（図 3.3）。これは、流れ盤斜面は構造的に抵抗力が小さくなるためと考えられる。したがって、流れ盤構造においては急傾斜地の崩壊基準を変更する必要があると考える。

縦曲率と断面曲率がいずれも負の値となると、崩壊が発生する傾向がある（図 3.8）。このような斜面は凹形谷型斜面に分類される（図 4.1）¹⁵⁾。一方、縦曲率と断面曲率がいずれも正の値となると凸形尾根型斜面に分類され¹⁵⁾、崩壊しない傾向がある。

TPI と接曲率について判別分析の結果、図 3.10 で示す通り、TPI と接曲率について崩壊の条件は以下の式で表せる。

$$\text{接曲率} \geq 3775 \times \text{TPI} - 1823 \quad \dots \dots \dots \text{式 3}$$

意味	最大傾斜の方向（落水線の方向）の変化状態			
分類基準	水平断面形（等高線の平面形）による斜面分類			
	分類	尾根型斜面（r）	直線斜面（s）	谷型斜面（v）
最大傾斜量の大きさ（等高線距離）による斜面分類	凸形斜面（X）			
	凸形尾根型斜面（Xr）			
	凸形直線型斜面（Xs）			
	凸形谷型斜面（Xv）			
	等斉凸形斜面（R）			
	等斉尾根型斜面（Rr）			
凹形斜面（V）				
	凹形直線型斜面（Vs）			
	凹形谷型斜面（Vv）			

図 4.1 垂直断面形と水平断面形による斜面型の基本的分類¹⁵⁾

4.3 土砂災害警戒区域の指定条件

土砂災害警戒区域の指定条件として以下に示す2点を提案する。

- ① 土砂災害警戒区域を傾斜量で指定するには、流れ盤構造と持つ斜面と受け盤構造を持つ斜面とで分類する必要があると考える。
- ② 斜面型の基本分類¹⁵⁾における凹形尾根型斜面であること、TPIと接曲率について式3を満たすことは土砂災害警戒区域の新たな指定条件となる可能性があると考ええる。

また、地質条件については土砂災害警戒区域の指定条件とはならないと考える。これは、圧縮強度は1回の豪雨における斜面崩壊発生の有無に関与しないことより、斜面崩壊の発生は地層に依存しないと考えられるためである。

引用文献

- 1) 国土交通省砂防部 (2017) 平成29年7月九州北部豪雨による土砂災害の概要〈速報版〉Vol.6 (平成29年9月4日時点) (https://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf, 2022.1.30 確認)
- 2) 西村智博・高見智之・松澤真 (2018) 調査地域における地すべり・崩壊の発生状況, 2017年九州北部豪雨災害調査団報告書, 53-56
- 3) 三田村宗樹・梅田隆之介 (2017) 平成29年7月九州北部豪雨の土砂災害調査報告, 都市防災研究論文集, 4, 25-32
- 4) Takehiro Ohta, and Seiya Eguchi (2019) Landslides and debris flows in volcanic rocks triggered by the 2017 Northern Kyushu heavy rain, International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, 7, 790-797
- 5) 国土交通省 (2019) 土砂災害警戒区域の概要 (<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001323909.pdf>, 2022.1.30 確認)
- 6) 牛山素行・本間基寛・横幕早季・杉村晃一 (2017) 平成29年7月九州北部豪雨による人的被害の特徴(序報), 日本災害情報学会第19回研究発表大会予稿集, 190-191
- 7) 国土交通省 (2019) 土砂災害警戒区域の検証 (<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001324550.pdf>, 2022.1.30 確認)
- 8) 山陰中央新報デジタル (2021) 家屋被害1割は警戒区域外 8月大雨の土砂災害 豪雨激甚化 危険性高まる (<https://www.sanin-chuo.co.jp/articles/-/98802>, 2022.1.30 確認)
- 9) 久保和也・松浦浩久・尾崎正紀・牧本博・星住英夫・鎌田耕太郎 (1993) 20万分の1地質図幅「福岡」, 産業技術総合研究所
- 10) 関根亮太・井沢英二・渡辺公一郎・板谷徹丸 (1995) 北部九州、小鹿田—山国金鉱床地域の火山活動・熱水変質作用の時期, 地現地質(RESOURCE GEOLOGY), 45(5), 295-302
- 11) 熊本県土木部 (2013) テストハンマーによるコンクリート強度推定要領 (<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/14274.pdf>, 2022年1月30日確認)
- 12) LYLE W. ZEVENBERGEN, and COLIN R. THORNE (1987) QUANTITATIVE ANALYSIS OF LAND SURFACE TOPOGRAPHY, EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS, VOL.12, 47-56
- 13) J.C. Gallant and J.P. Wilson, Primary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), Terrain Analysis: Principles and Applications. Wiley, New York, pp. 51-85 (2000)
- 14) 浅田寛喜・皆川朋子・小山彰彦・一柳英隆 (2020) 平成29年7月九州豪雨による斜面における表層崩壊の要因検討, 応用生態工学, 23(1), 185-196
- 15) 鈴木隆介 (1997) 建設技術者のための地形図判読入門 第1巻 読図の基礎, 古今書院, 122-124