# 土砂災害予測に関する研究集会 2017年度プロシーディング

**Proceedings of the Workshop on the Prediction of Landslide Disasters, 2017** 









土砂災害予測に関する研究集会

防災科学技術研究所研究資料

### 防災科学技術研究所研究資料

- 第351号 新庄における気象と降積雪の観測(2009/10 年冬期) 31pp. 2010 年12 月発行
- 第 352 号 平成 18 年度 大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ 木造建物実験 震動台活用による構造物の耐震性向上研究 (付録 CD-ROM) 120pp. 2011 年 1 月発行
- 第 353 号 地形・地盤分類および常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動のスペクトル増幅率の推定 242pp. 2011 年 1 月発行
- 第 354 号 地震動予測地図作成ツールの開発(付録 DVD) 155pp. 2011 年 5 月発行
- 第355号 ARTS により計測した浅間山の火口内温度分布(2007年4月から2010年3月) 28pp. 2011年1月発行
- 第356号 長岡における積雪観測資料(32)(2009/10 冬期) 29pp. 2011年2月発行
- 第357号 浅間山鬼押出火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 DVD) 32pp. 2011年2月発行
- 第 358 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 29(平成 22 年 No. 1) (CD-ROM 版). 2011 年 2 月発行
- 第 359 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 30(平成 22 年 No. 2) (CD-ROM 版), 2011 年 2 月発行
- 第 360 号 K-NET・KiK-net 強震データ (1996 2010) (DVD 版 6 枚組). 2011 年 3 月発行
- 第 361 号 統合化地下構造データベースの構築 <地下構造データベース構築ワーキンググループ報告書> 平成 23 年 3 月 238pp. 2011 年 3 月発行
- 第 362 号 地すべり地形分布図 第 49 集「旭川」16 葉 (5 万分の 1). 2011 年 11 月発行
- 第363号 長岡における積雪観測資料(33)(2010/11 冬期) 29pp. 2012 年 2 月発行
- 第364号 新庄における気象と降積雪の観測(2010/11年冬期) 45pp. 2012年2月発行
- 第365号 地すべり地形分布図 第50集「名寄」16葉(5万分の1), 2012年3月発行
- 第366号 浅間山高峰火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 CD-ROM) 30pp. 2012 年2月発行
- 第367号 防災科学技術研究所による関東・東海地域における水圧破砕井の孔井検層データ 29pp. 2012年3月発行
- 第 368 号 台風災害被害データの比較について(1951 年~ 2008 年, 都道府県別資料)(付録 CD-ROM)19pp. 2012 年 5 月発行
- 第 369 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-5 橋脚) 震動破壊実験研究報告書 実在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐
- 第 509 号 E-Delense を用いた美人 RC 橋脚 (CF-3 橋脚) 震動破壊美験研究報音書 美任の技術基準で設計した RC 橋脚の脈震性に関する震動台実験及びその解析 (付録 DVD) 64pp. 2012 年 10 月発行
- 第 370 号 強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部地盤統合モデルの検討(付録 CD-ROM) 410pp. 2013 年 3 月発行
- 第 371 号 野島断層における深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果 (平林・岩屋・甲山) (付録 CD-ROM) 27pp. 2012 年 12 月発行
- 第 372 号 長岡における積雪観測資料 (34) (2011/12 冬期) 31pp. 2012 年 11 月発行
- 第 373 号 阿蘇山一の宮および白水火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 48pp. 2013 年 2 月発行
- 第374号 霧島山万膳および夷守台火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 50pp. 2013 年3月発行
- 第 375 号 新庄における気象と降積雪の観測(2011/12 年冬期) 49pp. 2013 年 2 月発行
- 第 376 号 地すべり地形分布図 第 51 集「天塩・枝幸・稚内」20 葉(5 万分の 1), 2013 年 3 月発行
- 第 377 号 地すべり地形分布図 第 52 集「北見・紋別」25 葉(5 万分の 1). 2013 年 3 月発行
- 第 378 号 地すべり地形分布図 第 53 集「帯広」16 葉(5 万分の 1). 2013 年 3 月発行
- 第379号 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討 349pp. 2012年12月発行
- 第380号 日本の火山ハザードマップ集 第2版(付録 DVD) 186pp, 2013年7月発行
- 第 381 号 長岡における積雪観測資料 (35) (2012/13 冬期) 30pp. 2013 年 11 月発行
- 第 382 号 地すべり地形分布図 第 54 集「浦河・広尾」18 葉(5 万分の 1). 2014 年 2 月発行
- 第383号 地すべり地形分布図第55集「斜里・知床岬」23葉(5万分の1). 2014年2月発行
- 第384号 地すべり地形分布図 第56集「釧路・根室」16葉(5万分の1). 2014年2月発行
- 第 385 号 東京都市圏における水害統計データの整備(付録 DVD) 6pp. 2014 年 2 月発行
- 第 386 号 The AITCC User Guide -An Automatic Algorithm for the Identification and Tracking of Convective Cells- 33pp. 2014 年 3 月発行
- 第 387 号 新庄における気象と降積雪の観測(2012/13 年冬期) 47pp. 2014 年 2 月発行
- 第 388 号 地すべり地形分布図 第 57 集「沖縄県域諸島」 25 葉 (5 万分の 1). 2014 年 3 月発行
- 第389号 長岡における積雪観測資料 (36) (2013/14 冬期) 22pp. 2014 年 12 月発行
- 第390号 新庄における気象と降積雪の観測(2013/14 年冬期) 47pp. 2015 年2月発行
- 第 391 号 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のためのEーディフェンス加振実験 報告書 一大規模空間吊り天井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余裕度検証実験 193pp. 2015 年 2 月発行
  - 表紙写真・・・撮影:井口 降
    - 左上:日田市小野地区の斜面崩壊全景(2017年9月1日撮影)
    - 右上:日田市小野地区の斜面崩壊の崩壊源から土砂の滑動方向を望む(2017年9月1日撮影)
    - 左下: 土石流で被災した家屋. 乙石川上流の乙石集落(2017年9月2日撮影)
    - 右下: 乙石川上流で起きた斜面崩壊(2017年9月2日撮影)

### 防災科学技術研究所研究資料

- 第 392 号 地すべり地形分布図 第 58 集「鹿児島県域諸島」27 葉(5 万分の 1), 2015 年 3 月発行
- 第 393 号 地すべり地形分布図 第 59 集「伊豆諸島および小笠原諸島」10 葉(5 万分の 1). 2015 年 3 月発行
- 第 394 号 地すべり地形分布図 第 60 集「関東中央部 | 15 葉(5 万分の 1). 2015 年 3 月発行
- 第395号 水害統計全国版データベースの整備、発行予定
- 第396号 2015年4月ネパール地震(Gorkha 地震)における災害情報の利活用に関するヒアリング調査 58pp. 2015年7月発行
- 第 397 号 2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における建物被害に関する情報収集調査速報 16pp. 2015 年 9 月発行
- 第398号 長岡における積雪観測資料 (37) (2014/15 冬期) 29pp, 2015 年 11 月発行
- 第 399 号 東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良(付録 DVD) 253pp. 2015 年 12 月発行
- 第400号 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討(付録 DVD) 216pp. 2015 年12 月発行
- 第401号 全国自治体の防災情報システム整備状況 47pp. 2015年12月発行
- 第402号 新庄における気象と降積雪の観測(2014/15 年冬期) 47pp. 2016年2月発行
- 第 403 号 地上写真による鳥海山南東斜面の雪渓の長期変動観測(1979~2015年) 52pp. 2016年2月発行
- 第 404 号 2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における地震の概要と建物被害に関する情報収集調査報告 54pp. 2016 年 3 月発行
- 第405号 土砂災害予測に関する研究集会-現状の課題と新技術-プロシーディング 220pp. 2016年3月発行
- 第 406 号 津波ハザード情報の利活用報告書 132pp. 2016 年 8 月発行
- 第 407 号 2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における災害情報の利活用に関するインタビュー調査 改訂版 120pp. 2016 年 10 月発行
- 第 408 号 新庄における気象と降積雪の観測 (2015/16 年冬期) 39pp. 2017 年 2 月発行
- 第 409 号 長岡における積雪観測資料 (38) (2015/16 冬期) 28pp. 2017 年 2 月発行
- 第410号 ため池堤体の耐震安全性に関する実験研究 改修されたため池堤体の耐震性能検証 87pp. 2017年2月発行
- 第411号 土砂災害予測に関する研究集会-熊本地震とその周辺-プロシーディング 231pp. 2017年3月発行
- 第 412 号 衛星画像解析による熊本地震被災地域の斜面・地盤変動調査 多時期ペアの差分干渉 SAR 解析による地震後の変動抽出 107pp. 2017 年 9 月発行
- 第413号 熊本地震被災地域における地形・地盤情報の整備 航空レーザ計測と地上観測調査に基づいた防災情報データ ベースの構築 - 154pp, 2017 年9月発行
- 第414号 2017年度全国市区町村への防災アンケート結果概要 69pp. 2017年12月発行
- 第415号 全国を対象とした地震リスク評価手法の検討 450pp. 2018年3月発行予定
- 第416号 メキシコ中部地震調査速報 28pp. 2018年1月発行
- 第 417 号 長岡における積雪観測資料(39)(2016/17 冬期) 29pp. 2018 年 2 月発行

- 編集委員会 -	防災科学技術研究所研究資料 第 418 号
(委員長) 河合伸-	平成 30 年 3 月 28 日 発行
(委員) 松澤孝紀 三輪学9 若月強 平島寛7 中村いずみ	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
(事務局) 臼田裕一郎 横山 敏和	http://www.bosai.go.jp/ 印刷所 前 田 印 刷 株 式 会 社
(編集・校正) 樋山信号	

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2018

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ (http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/) をご覧下さい.

## 2017年度土砂災害予測に関する研究集会

山田隆二\*·飯田智之\*編集

### \* 防災科学技術研究所

### 要旨

平成 29 年 12 月 7 ~ 8 日, 防災科学技術研究所和達記念ホールにおいて「土砂災害予測に関する研究集会」が開催された. この研究集会は、平成 27 年, 28 年に続く 3 回目となる. 土砂災害予測技術の現在における到達点を明らかにし、その技術を発展させて実用化するため、多くの研究者・技術者・その他ステークホルダーの情報交換をする場を設けることを目指したものである. 「重力変形地形と深層崩壊発生予測」、「地震土砂災害」、「豪雨土砂災害」および「九州北部豪雨土砂災害」という 4 つのセッションを設け、1 件の特別講演と 21 件の研究発表とセッション別総合討論が行われた. 最近全国で多発している土砂災害に関する防災への社会的関心の高まりを受け、国や大学の研究者、民間企業の実務者など約 120 名が参加した.

キーワード: 土砂災害,深層崩壊,重力変形,線状降水帯,平成29年九州北部豪雨

# 目 次

^	ーン
2017 年度土砂災害予測に関する研究集会         研究集会の趣旨	4
<b>特別講演論文</b> 深層崩壊発生の準備過程としての重力斜面変形	5
京都大学 千木良雅弘	
一般発表論文	
紀伊山地における深層崩壊危険箇所の特徴と水文・水質調査について 国土技術政策総合研究所 木下篤彦	
深層崩壊発生場所の予測と山脚固定効果の定量化の試み	
国土技術政策総合研究所 内田太郎	
付加体の地質構造が大規模崩壊の発達に及ぼす影響:南アルプスアレ沢崩壊の例 新潟大学 西井稜子	
中部日本の高山〜低山域の付加体分布地域に発達する山体重力変形地形の特徴と発達過程 岐阜大学 小嶋 智	
斜面崩壊に認められる付加体の地質構造制約	59
防災科学技術研究所 木村克己	
断層・破砕帯とランドスライド:素因・過程・結果	
風水土。永田秀尚	
阿蘇カルデラ西部, 高野尾羽根溶岩円頂丘における斜面崩壊の履歴	
改測で明らかになった熊本地震の地表の水平変動の向きと崩壊面積率の関わり	79
日本大学/国土地理院 佐藤 浩	
熊本地震高野台地区地すべりの試料を用いて液状化強度を求めた繰返し非排水一面せん断試験 国土技術政策総合研究所 長谷川陽一	
重力変形斜面における地震観測と震動特性の把握	91
- 奈良県天川村栃尾地区の事例 - 京都大学 土井一生	
譲原地すべりにおける地震動観測に基づく複数の地震動加速度波形の比較	93
日本工営 柴崎宣之	
線状降水帯と土砂災害の危険度	
気象庁 岡田憲治	
土砂災害に関する豪雨度,豪雨階の設定法	

# ページ

降雨を誘因とする深層崩壊の発生メカニズム解明と危険地評価に向けた水文学的アプロー 筑波大学	チ 山川陽祐	115
平成 29 年度九州北部豪雨を引き起こした線状降水帯に伴う降水量の予測可能性 防災科学技術研究所		119
平成 29 年度九州北部豪雨に伴う土砂・地盤災害の現地調査報告		121
九州北部豪雨により発生した崩壊の発生時刻と雨量・崩壊形態との関係ー日田市柳瀬地区の事例 - パシフィックコンサルタンツ		
2017 年 7 月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布および植生状況との関係について 森林総合研究所		
人工衛星データ等による平成 29 年 7 月九州北部豪雨の土砂移動分析 RESTEC	古田竜一	135
地すべり地形の場で発生する斜面崩壊 - 日田市小野地区地すべりを例にしてドーコン	田近淳	139
平成 29 年 7 月九州北部豪雨における災害対応現場での情報共有と利活用 ー福岡県災害対策本部での対応を事例に一 防災科学技術研究所		143

# 2017年度土砂災害予測に関する研究集会

### 研究集会の趣旨

1990年代の一時期、土砂災害が減少したことで、対策工事や植生回復の効果などが指摘され、土砂災害への懸念が一段落したように見えることもあったが、21世紀に入り、豪雨の増加や地震の活発化などで土砂災害が再び全国的に多発している。また、発生が時間の問題とされる南海・東南海地震等巨大地震に伴い、土砂災害が多く発生することが予想されている。

土砂災害に関する研究は、本研究集会の後援学会をはじめとする多くの学会で進められており、それぞれの学会やシンポジウムなどで精力的な研究発表や議論がなされている。しかし、学会などは例年発表数が多く、個々の発表時間も限られるため、ややもすると、充分な質疑応答や議論が困難であるのかもしれない。

そこで、本研究集会では、質疑応答や議論の時間を出来るだけ長くとって、議論を深めると同時に、学会・大学・研究所・会社などそれぞれの研究者が所属している組織の枠を超えて、情報交換を活発にしていただくことを ねらいとした.

今回は、「重力変形地形と深層崩壊発生予測」、「地震土砂災害」、「豪雨土砂災害」および「九州北部豪雨土砂災害」の合計 4つのセッションに分かれたテーマについて研究発表をお願いした。そして、個別の発表ごとの質疑応答時間とは別に、各セッションの最後に 30 分~ 1 時間程度のセッション別の総合討論時間を設けて、予測や対策についての討論を行った。

2017 年 12 月 7 日 防災科学技術研究所 山田隆二 飯田智之

## 深層崩壊発生の準備過程としての重力斜面変形

千木良雅弘\*

キーワード:深層崩壊,重力斜面変形,降雨,地震

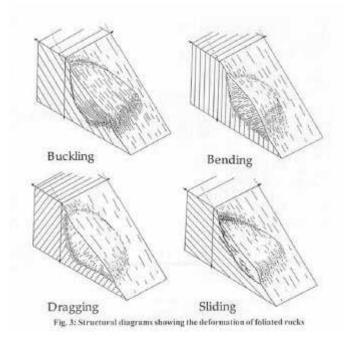
### 1. はじめに

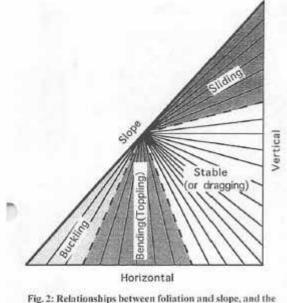
降雨や地震による深層崩壊は、突然発生し規模が 大きく長距離を移動するため、 甚大な災害を発生す る. そのため、それらの発生場所を予測することが 必要であるが、その方法はまだ確立していない、最 近の研究によって、深層崩壊は機械的あるいは化学 的な準備段階を持っていることが明らかになってき ており、それらが発生場所の予測のカギとなること がわかってきた.機械的な準備段階とは重力による 斜面変形であり、化学的な準備段階とは風化である. ここでは降雨または地震によって発生する深層崩壊 に先立つ重力斜面変形について、ケーススタディに 基づいて特徴を取りまとめる。 地質構造と重力斜面 変形によって生じる特徴的な地形が深層崩壊発生場 所予測のカギになる.風化は、地震によって火砕物、 石灰岩, および堆積軟岩に発生する深層崩壊にとっ て重要であるが、ここでは立ち入らないことにする.

### 2. 重力斜面変形と深層崩壊

重力斜面変形は、特に面構造を持つ岩石に発達しやすく、面構造と斜面との関係によって特有の構造を持つ、典型的なものは、面構造が急傾斜する場合のトップリング、流れ盤斜面の内面構造が斜面と平行か、それよりも急な逆目盤に発生する座屈、面構造が斜面よりも急傾斜する正目盤構造に発生するすべり、に分けられる(Chigira 2000).

トップリングの場合、岩盤の曲げに伴う開口割れ 目が全体に発生するために、地下水面が上昇しにく く、雨によって深層崩壊が発生することは少ないと 考えられる.しかしながら、岩盤に厚い破砕帯が挟 まれると、そこの上に地下水がたまりやすく、深層 崩壊に至ることがあると考えられる.このような厚 い破砕帯はトップリングに伴って線状凹地を形成す ることが分かってきている.逆に、線状凹地は脆弱 な破砕帯の存在を示唆するものであると考えられ





rig. 2: Relationships between foliation and slope, and to modes of deformation of rock slopes

図1 斜面と重力斜面変形の様式との関係. 左:模式図. 右:斜面と面構造との関係.

<sup>\*</sup> 京都大学防災研究所

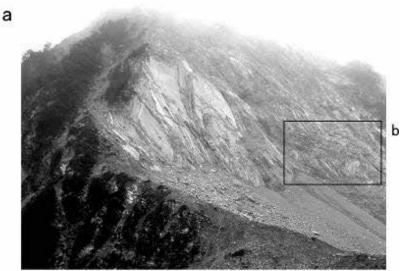
る.トップリングした岩盤斜面が地震動を受けると、トップリングによる開口割れ目に直交方向に震動が増幅されることが明らかになってきた (Marzorati et al. 2011). 日本の南海トラフ沿いの巨大地震は、至る所でトップリング由来の深層崩壊を発生させた (例えばカナギ、白鳥山、七面山など).

岩盤の座屈は重力斜面変形の中でも最 も不安定なものである. 面構造が底角な 場合には、緩慢なすべりが進行して深層 崩壊には至らないと考えられるが、それ でも斜面下部が切断されている場合に は、地震によって深層崩壊が発生すると 思われる. また、厚い断層破砕帯を伴う 場合には地下水の排水が妨げられ、降雨 によって深層崩壊が発生し得る. また、 面構造が高角な場合には、雨によっても 地震によっても深層崩壊に至る.

すべりは、降雨によっても地震によっても深層崩壊に至ることがある. 重力斜面変形は、岩盤に多くの脆性開口割れ目を形成し、これらは地下水の通路となるため、岩盤の透水性は高く、過剰間隙水圧は生じにくくなる. しかしながら、私

たちの近年の研究によれば、付加体に生じた降雨による深層崩壊は、ガウジを伴う厚い断層破砕帯にすべり面を伴っていた (Arai and Chigira 2015; Chigira 2009). 2009 年に台湾の小林村で発生した深層崩壊は、重力によって座屈した地層に発生したが、同時に、この地層は側部を断層破砕帯によって限られていた (Tsou et al. 2011). 斜面下部が切断されている場合には、地震によって深層崩壊に至ることがある。例えば、1999 年の台湾集々地震による草嶺の崩壊がある (Chigira et al. 2003). この場合にも、斜面はわずかに変形していて、それが上部に溝として表れていた.

流れ盤斜面で過去に過去に地すべりが発生し、対 岸に衝突して安定していた移動体が下部切断を受け ると不安定になり、それが地震動を受けて生じる深 層崩壊も数多く発生した。特に、2004年の中越地 震では大規模なもののほとんどがこのタイプであっ た。



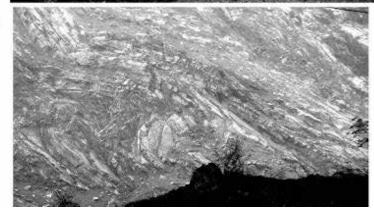


図2 中国汶川地震によって発生した Qingping の崩壊. 地層が右下で座屈している(拡大写真).

上記のような重力斜面変形の他に、逆目盤の地層が斜面下部で強度の高い岩盤に支えられている構造(バットレス)の場合、地震によって深層崩壊が発生することがある。例えば、1959年のヘブゲンレーク地震によって発生した Madison の崩壊や (Hadley 1964)、715年に長野県で発生した池口の崩壊がある。これらの場合、事前に地層の座屈が生じていた可能性もある。

### 3. 深層崩壊に至る重力斜面変形の地形的特徴

重力変形斜面は、岩盤に割れ目が多くて降水が地下に浸透しやすいために表面流出が起こりにくいために、ガリーに乏しく、不規則な凹凸と、全体にのっぺりした形を示す。また、前述したように弱層を持つ岩盤がトップリングを起こすと、線状凹地が特徴的に形成される。座屈やすべりのように移動体が塊としてすべる場合には、斜面上部に滑落崖が形成されていく。いずれにしても、ある領域が崩壊する場

合には、その領域が周囲と切り離される必要があり、発生直前には、斜面上部に小滑落崖が形成される (Chigira et al. 2013). 地形的にみて大きな滑落崖が生じている場合には、すでに岩盤斜面の崩壊は発生した後、あるいは地層が座屈していて、比較的大きな変形が許容されている場合である.

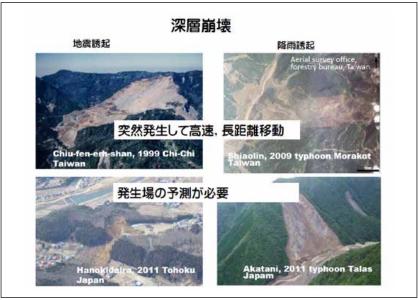
斜面下部の状況は、斜面の安定性にとって重要である. 侵食などによって斜面下部が切断されていると、深層崩壊発生の危険性は高まる.

### 引用文献

- 1) Arai, N. & Chigira, M. (2015): Rain-induced rock avalanches with a sliding surface along an out-of-sequence thrust. *10th IAEG Asian regional conference*, Kyoto, 6p.
- 2) Chigira, M.(2000): Geological structures of large landslides in Japan. Journal of Nepal Geological Society, **22**, 497-504.
- Chigira, M.(2009): September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deepseated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan. Engineering Geology, 108, 1-15.
- 4) Chigira, M., Tsou, C.Y., Matsushi, Y., Hiraishi,

- N. & Matsuzawa, M. (2013): Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas. Geomorphology, **201**, 479-493, doi: 10.1016/j.geomorph.2013.07.020.
- 5) Chigira, M., Wang, W.-N., Furuya, T. & Kamai, T. (2003): Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan. Engineering Geology, **68**, 259-273.
- 6) Hadley, J.B. (1964): Landslides and related phenomena accompanying the Hebgen Lake earthquake of August 17, 1959. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 435, 107-138.
- 7) Marzorati, S., Ladina, C., Falcucci, E., Gori, S., Saroli, M., Ameri, G. & Galadini, F. (2011): Site effects "on the rock": The case of Castelvecchio Subequo (L' Aquila, central Italy). Bulletin of Earthquake Engineering, 9, 841-868, doi: 10.1007/s10518-011-9263-5.
- 8) Tsou, C.-Y., Feng, Z.-Y. & Chigira, M. (2011): Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan. Geomorphology, **127**, 166-178.





# 目次

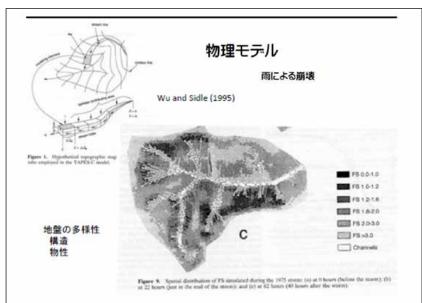
- ・崩壊発生場所の予測方法
- ・重力斜面変形のタイプと深層崩壊 ・雨によるものと地震によるものを交互に
- ・南海トラフ大地震による深層崩壊

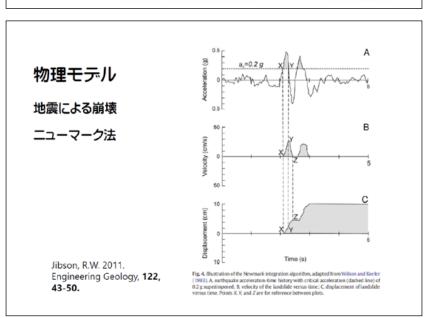
# 崩壊発生場所の予測

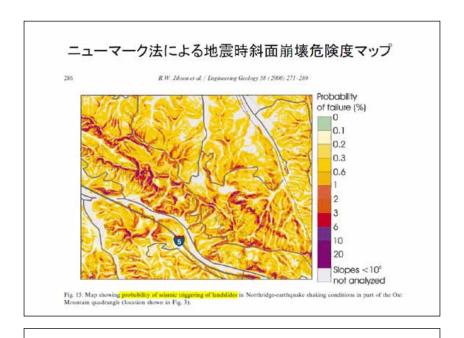
広い範囲の中から危険斜面を探し出す. あるいは, 危険な領域を探し出す

詳細な地質条件がわからなくても可能な方法であることが必要

- ・物理モデル
- 統計モデル
- 地質• 地形的特徵
- •Physically based model
- Statistical model
- •Geology-geomorphology







# 物理モデル

- ・定量的で"一見"説得力がある
- ・ 必要な情報
  - 地質構造
  - 地盤物性(強度定数分布)
  - 水理特性 (透水係数分布)
- 詳細に調べてみないとわからない
- 無い袖は振れない
- 格好の良い論文にはなっても、結局実用化されていない

# 統計モデル

- 今までの崩壊実績から
- 発生に関連する要因を多変量解析によって求め・地質,地質構造,傾斜,植生,土地利用,など
- 今後発生する確率を求める
- 表層崩壊のように多数の事例を処理する場合には有効
- ・局所的条件に左右される深層崩壊には不向き

# 深層崩壊発生場所の予測

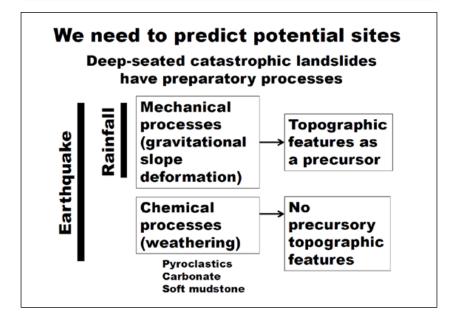
- ・ 物理モデル
- Physically based model
- 統計モデル
- Statistical model
- 地質• 地形的特
- Geology-geomorphology

定性的ではあるが、今の段階では最良の方法

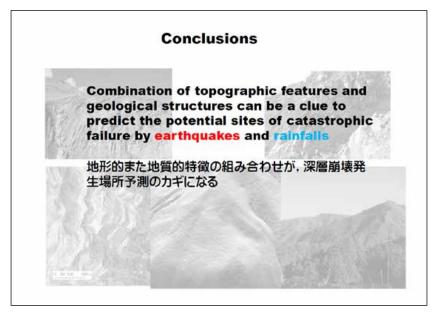
IAEG Asia, Nepal, 2017 第11回国際応用地質学会 アジア地域会 議. ネパール

Gravitational slope deformations that precede catastrophic landslides triggered by rainstorms and earthquakes

Masahiro Chigira And Noriyuki Arai (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.)

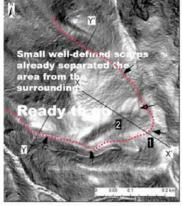


# There are many types of gravitational slope deformation Not all are transformed into catastrophic failure Chigira (1992, ENGEO) L A NDFORM INTERNAL STRUCTURE GENTLE SLOPE BOUNDED BY A HORSESHOE BOUNDED BY A HORSE BOUNDED BY A HO

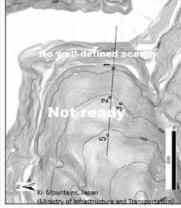




# For a certain body to fail, separation from the surroundings is necessary







Chigira et al. (2013, Tectonophysics, 605, 104-113.



航空レーザ-計測を活用すれば 少なくとも 深層崩壊の発生候補個所 は見つけられる 危険度のランキングが必要

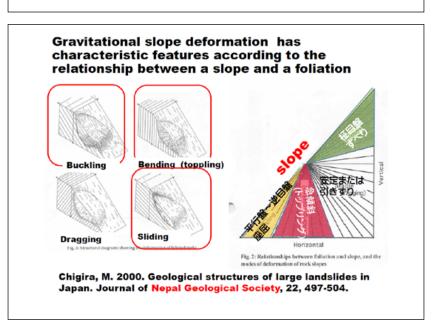
⇒地形と内部構造による

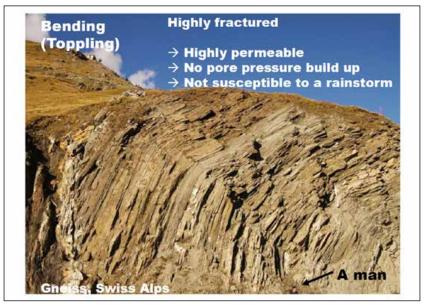
Chigira, M., et al. 2013. Geomorphology 201, 479-493.

1

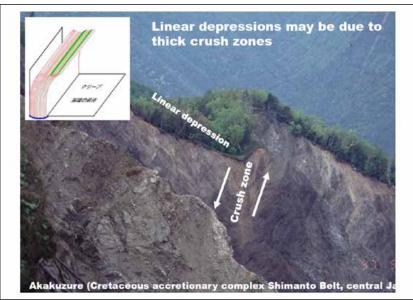
# 目次

- ・崩壊発生場所の予測方法
- ・重力斜面変形のタイプと深層崩壊・雨によるものと地震によるものを交互に
- ・南海トラフ大地震による深層崩壊

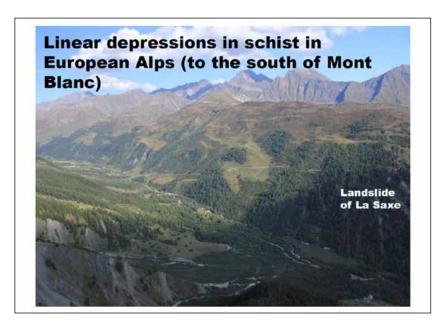


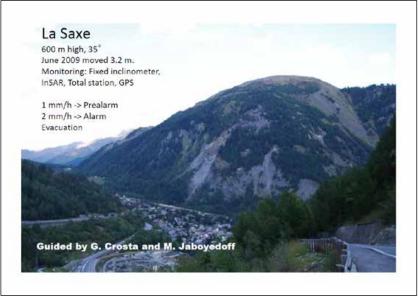


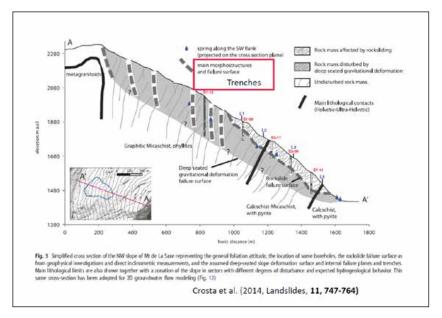


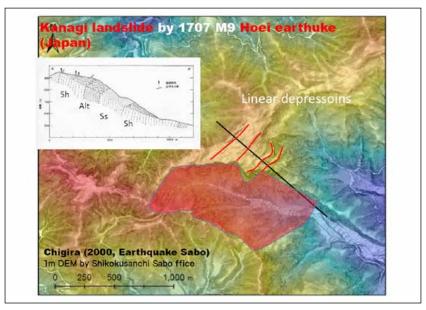


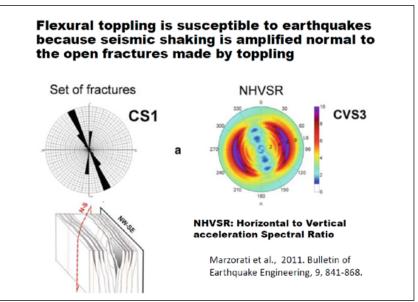


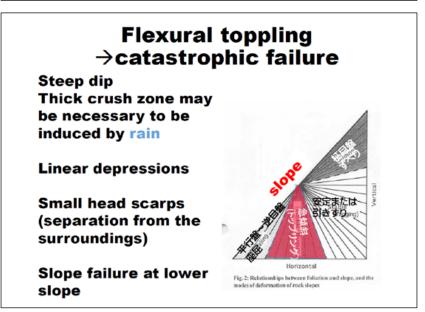


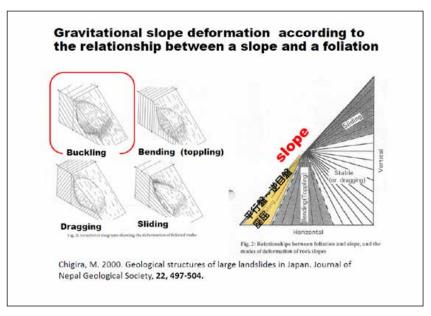


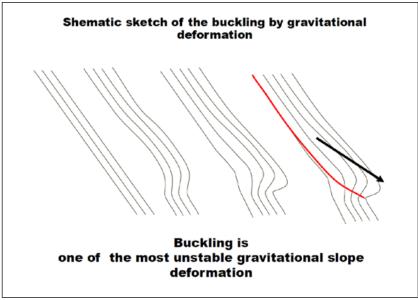






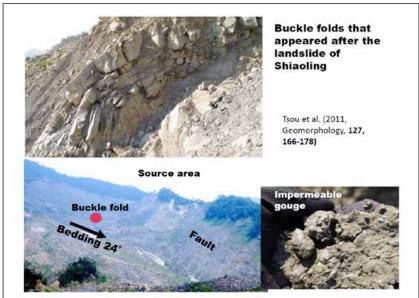




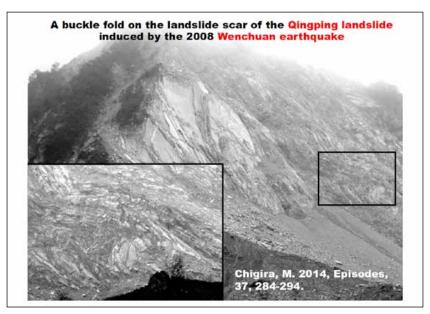




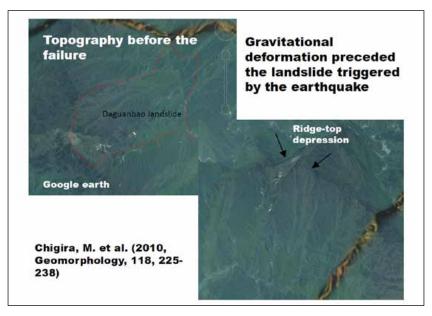


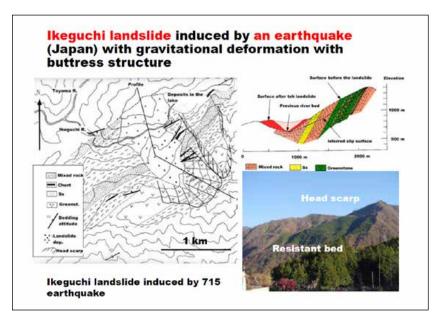




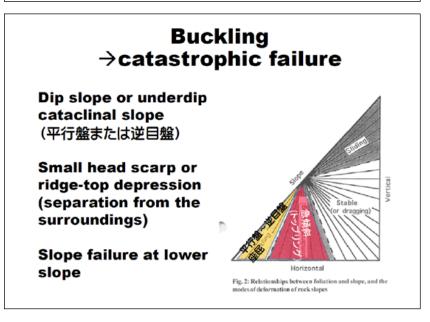


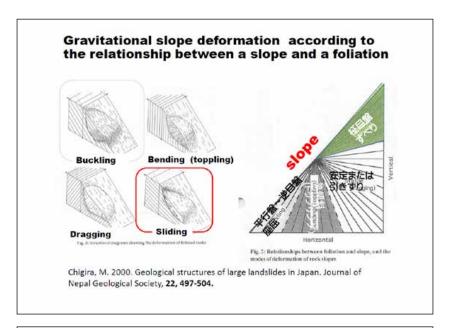




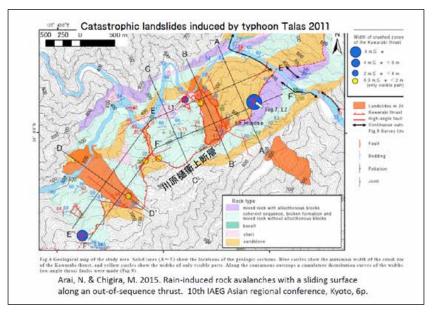


# Transformation from Buckling to sliding: It is dependent on bedding attitude Low-angle — → Gradual sliding Catastrophic failure + Undercut by an earthquake Catastrophic + wide failure by rain crush zone Catastrophic Higher-angle\_ failure (>30°) by an earthquake or rainfall

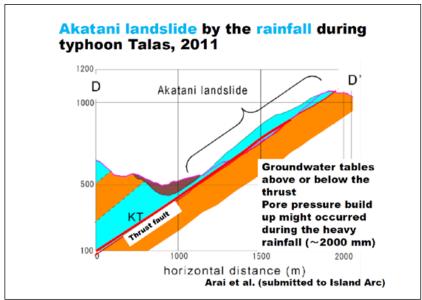






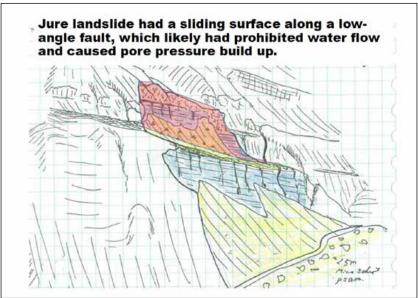


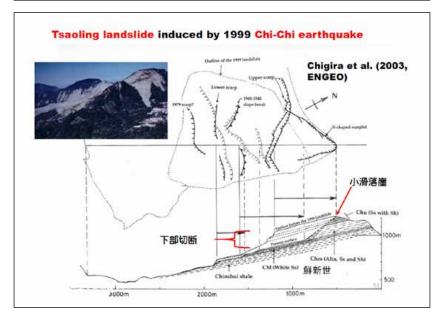












# Sliding →catastrophic failure

Overdip cataclinal slope

(柾目盤)

Thick crush zone may be necessary to be induced by rainfall

Small head scarp (separation from the surroundings)

Slope failure at lower slope or undercut

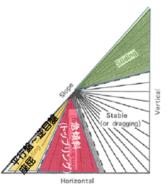
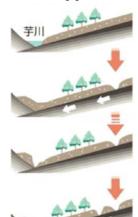


Fig. 2: Relationships between foliation and slope, and the modes of deformation of rock slopes

# Reactivation of landslides once collided to the opposite slope and then undercut



Once landslide occurred, collided to the opposite slope, and then stabilized

The landslide was undercut and destabilized

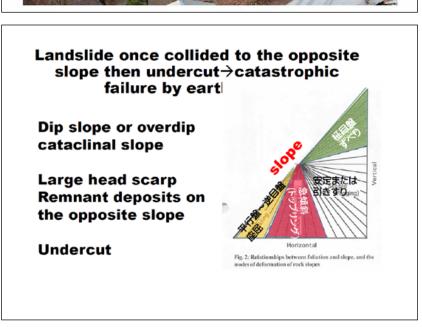
Earthquake triggered the slide again

Asahi Newspaper (interview to Chigira



# Stereopair of aerial photographs before the landslide Mound made by previous slide Reactivated part Old landslide scarp Chigira and Yagi (2005) Engineering Geology





Precorsory deformation		Topographic feature	Landslides	Reference
Bending Flexural toppling	Thick crush	Small head scarp Slope failure at the foot	Kanagi, Oyakuzure, Shirotori landslides by 2007 Hoei eq Oyakuzure landslides (Japan)	Chigira (2000)
Buckling	cataclinal	Small head scarp Slope failure at the foot	Chiu-feng-erh-shang landslide by 1999 Chi-Chi eq (Taiwan) Qingping and Daguanbao landslides by 2008 Wenchuan eq (China) Shiaoling, iawenguang, and Taiping landslides (Taiwan)	Tsou et al. (2015) Chigira et al. (2010) Chigira (2004)
Sliding		Small head scarp Slope failure at the foot	Tsaoling landslide by 1999 Chi-Chi eq (Taiwan)	Wang et al. (2003) Chigira et al. (2010) Arai and Chigira (2015)
Landslide once collided to the opposite slope then undercut		Large headscarp Undercut	Higashi Takezawa, Terano landslides by 2004 Chuetsu eq (Japan) Piabandiwara landslides by 2005 Kashmir eq (Pakistan) Aratozawa landslides by 2008 lwate-Miyagi inland eq	Chigira and Yagi (2006) Oono et al. (2010)

Combination of topographic features and geological structures can be a clue to predict the potential sites of catastrophic failure by earthquakes and rainfalls

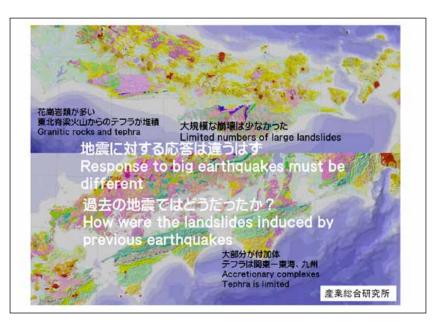


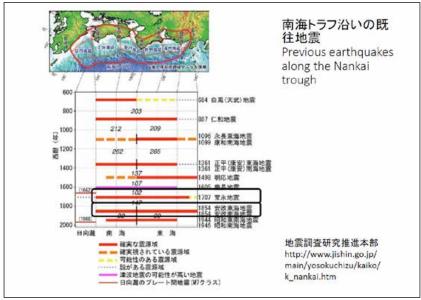




# 目次

- ・崩壊発生場所の予測方法
- ・重力斜面変形のタイプと深層崩壊 ・雨によるものと地震によるものを交互に
- ・南海トラフ大地震による深層崩壊

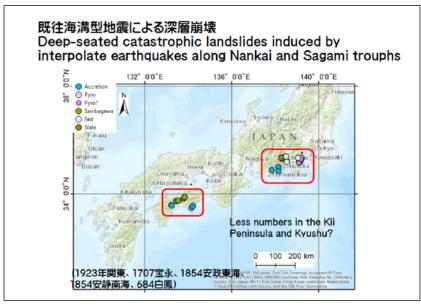


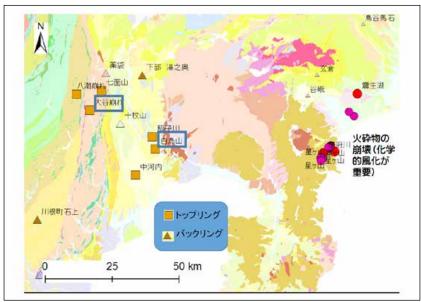


### 南海トラフ、相模トラフでの地震による深層崩壊 A list of deep-seated catastrophic landslides induced by earthquakes along the Nankai and Sagami trouphs

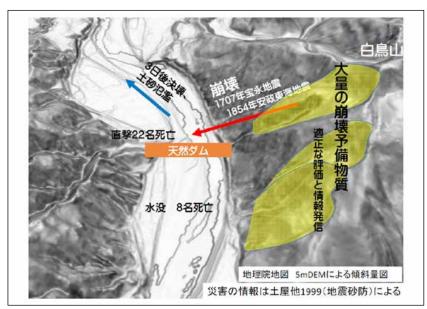
地震名	名前	地質	引用	地震名	名前	地質	引用
1707宝永	カナギ	Accretion		1854安政南海		Sambagawa	
1707宝永	池山	Accretion	井上	1854安政南海	三崎	Accretion	井上
			地盤工学会2011				
1707宝永	舞ヶ鼻	Accretion	Permian	684白風地震	横昌東	Accretion	地盤工学会2011
1707宝永	五剣山	Volc	土木学会	1923関東	震生湖	Pyro	地震地すべりカルテ27 - 6
							地震地すべりカルテ27 - 3
1707宝永	白鳥山	Sed	Neogene	1923関東	根府川駅	Pyro	井上2013
							地震地すべりカルテ27-2
1707宝永	大谷崩れ	Slate		1923関東	根府川	Pyro	井上(2013)
1707宝永	下部 湯之奥	Sed	井上 Neogene	1923関東	星ヶ山	Pyro?	地震地すべりカルテ27 - 1
1854安政東海	七面山	Slate		1923関東	星ヶ山	Pyro?	地震地すべりカルテ27 - 1
1854安政東海	川根町石上	Accretion	都司2015	1923関東	星ヶ山	Pyro?	地震地すべりカルテ27 - 1
1854安政豪海	稲子川	Sed	都司2015 Neogene	1923関東	星ヶ山	Pyro?	地震地すべりカルテ27 -
			都司2015Paleogene-				
1854安政東海	矢倉山	Accretion	Neogene	1923関東	星ヶ山	Pyro?	地震地すべりカルテ27 - 1
854安政東海	大沢山(不確実)	Accretion	都司2015	1923関東		Pyro?	
1854安政東海		Slate		1923開東		Pyro?	
1854空政南海		Sambagawa		1923関車	玄倉	Volc	地震地すべりカルテ27 - 9
100 1200000			四国山地砂防2004安政			7010	地震地すべりカルテ27 -
1854安政南海	とうじは			1923関東	谷峨	Sed	11Pleistocene
			四国山地砂防2004 地				
854安政南海	善待	Sambagawa		1923関東	島谷馬石	Volc	<b>地震地すべりカルテ27 - 1</b>

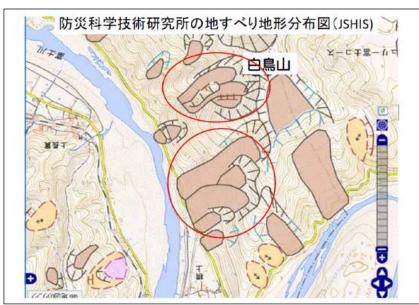
These are for only limited numbers of large landslides that have been located.

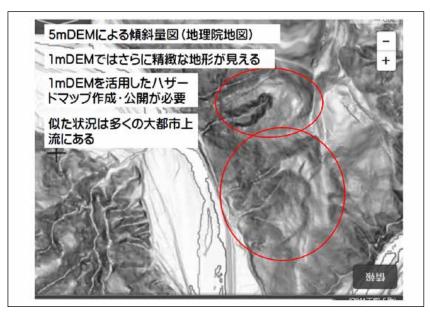


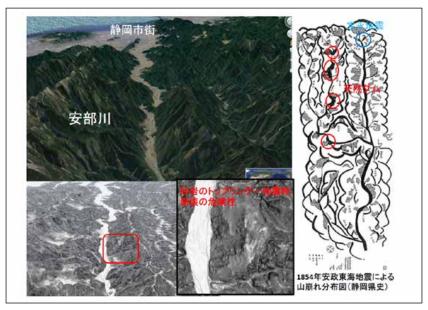




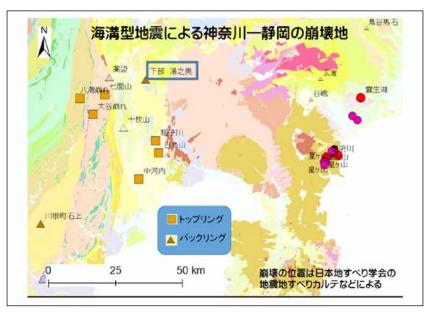


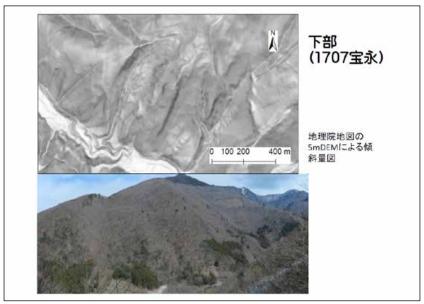


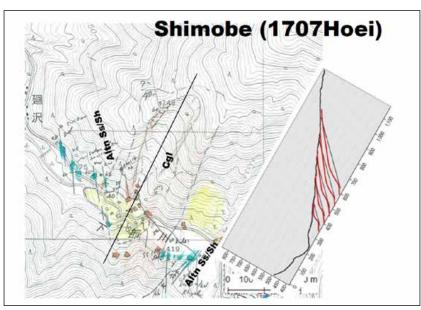


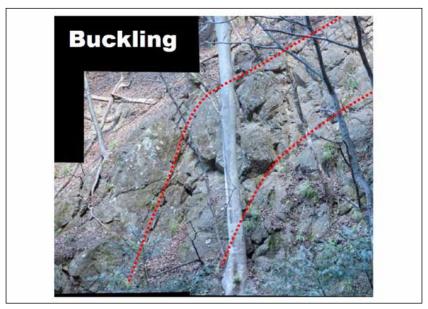












Landslides of pyroclastic fall deposits

**Toppling** 

Buckling

地震名 名前 地質 引用 地震名 名前 地質 Sambagawa 854安政南海 1854安政南海三崎 地盤工学会2011 Permian 684白鳳地震 横畠東 地盤工学会2011 Accretion 地震地すべりカルテ27-6 1707宝永 五剣山 Volc 土木学会 1923関東 震生湖 Pyro 地震地すべりカルテ27-3 井上2013 707 宝永 白島山 923間車 規度川駅 Pyro 地震地すべりカルテ27-2 井上(2013) 923関東 Pyro? 地震地すべりカルテ27-1 707宝永 下部 湯之奥 Sed 854安政東海 七面山 Slate 井上 Neogene 星ヶ山 923間東 Pyro? 地震地すべりカルテ27-1 星ヶ山 854安敦東海七朝山 854安改東海 川根町石上 Accretion 744中時東海和3子川 Sed 都司2015 地震地すべりカルテ27-1 1923間車 星ヶ山 923間東 Pyro? 地震地すべりカルテ27-1 星ヶ山 都同2015Paleogene-Neogene 1854安政東海 矢倉山 923関東 Pyro? 地震地すべりカルテ27-1 大沢山(不確 1854安政東海実) Accretion 923関東 都司2015 Pyro?

1923関東

1923関東 谷峨

玄倉

1923関東 鳥谷馬石 Volc

Sed

地震地すべりカルテ27-9 地震地すべりカルテ27-11 Pleistocene

地震地すべりカルテ27-13

# まとめ

四国山地砂防2004 地す Sambagawa ベリの再活動?

- ・南海トラフに沿う巨大地震で発生する事象は、東北の場合とは異なる。(東北の場合、事前降雨は少なかったことも関係)。
- ・ 堆積岩やスレートのトップリング、バックリング崩壊が 多いと見込まれる。
- ・是非, 防災科学技術研究所を中心にした新たなハザードマップ作製を進めていただきたい。

# 紀伊山地における深層崩壊危険箇所の特徴と水文・水質調査について

木下篤彦\*, \*\*\*·西岡恒志\*\*·田中健貴\*\*\*·桜井 亘\*

# Study on the Characteristics of the Dangerous Slopes for Deep-Seated Landslides and Survey of Hydrological and Water Quality in Kii Mountainous Area

Atsuhiko Kinoshita\*\*\*\*, Tsuneshi Nishioka\*\*, Yasutaka Tanaka\*\*\*, and Wataru Sakurai\*

\*National Institute for Land and Infrastructure Management,

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

kinoshita-a92wq@mlit.go.jp

\*\*Wakayama Sabo Research and Education Institute, Wakayama, Japan

\*\*\* Sediment Disaster Prevention Technology Center, Kinki Regional Development Bureau,

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

#### **Abstract**

In the Kii mountainous area, a large number of deep-seated landslides occurred in Typhoon Talas in 2011. In order to decrease these damage, it is important to grasp the geological and hydrological characteristics of the dangerous slopes. In this study, we focused on the fact that many landslides occurred at the bedrock creep slopes. Geomorphological features of the bedrock creep slopes were investigated based on topographical map, underground resistivity distribution by the airborne electromagnetic survey and characteristics of electric conductivity of spring at the end of the slope.

As a result, the features of the risk slopes are that the double ridges and cracks are developed in the upper part of the slope, there are large change points of the value of the resistivity ratio in the underground, the spring from the end of the slope, and its electrical conductivity was higher than surrounding water. Based on these characteristics, we found that there is a possibility of extracting dangerous slopes with high accuracy.

Key words: Deep-seated landslide, Bedrock creep, Spring, Airborne electromagnetic survey, Electronic conductivity

## 1. はじめに

紀伊山系では、平成23年の台風12号で大規模な深層崩壊が多数発生している。これらの被害を軽減するには、深層崩壊危険箇所の地質・水文学的な特徴を把握することが重要である。本研究では、これらの特徴を把握する目的で、空中電磁探査や岩盤クリープ斜面での水文・水質調査を行ったので報告する。

#### 2. 紀伊山地における深層崩壊危険箇所の特徴について

平成23年に深層崩壊が発生した斜面の特徴として、元々岩盤クリープが発生しており、二重山稜やクラックなどが存在していたことが分かっている. 危険箇所の特徴を把握する目的で、まず紀伊山系における岩盤クリープ斜面の調査を行った. 写真1,2に熊野川流域小原川、右会津川流域の岩盤クリープ斜面を示す. なお、地質はそれぞれ、砂岩・泥岩優勢の付加体である. 岩盤クリープ斜面上部は二重山

<sup>\*</sup>国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室

<sup>\*\*</sup> 和歌山県土砂災害啓発センター

<sup>\*\*\*</sup> 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター

稜等が発達しており、馬蹄形をしている. **写真3**, **4** にそれぞれの流域の末端斜面での湧水の状況を示す. 岩盤クリープ斜面では、湧水が存在することが分かった.

# 3. 空中電磁探査を用いた岩盤クリープ斜面の特徴について

深層崩壊危険斜面の地下構造を捉える目的で、空中電磁探査の計測を行った.計測深度は近隣の深層崩壊発生斜面の深度を参考に、100~150 m までの深度が計測できる手法を採用している. 図1 (a), (b) に空中電磁探査を実施した赤谷上流の位置図を示す.図2に(b)中の測線 I~Ⅲにおける比抵抗値の縦断分布を示す.岩盤クリープ斜面においては鉛直方向に比抵抗値の変化点があることが分かった.

# 4. 右会津川流域における湧水の水文・水質調査について

深層崩壊危険斜面は、既往研究から湧水の電気伝導度が高いことが報告されている。ただし、これらについては季節や地質によっても異なると考えられ、紀伊山系においても、和歌山県田辺市の右会津川の岩盤クリープ斜面において湧水と湧水が合流する右会津川本川の電気伝導度の変化を計測している。図3に結果を示す。湧水の電気伝導度は本川に比べて高いこと、降雨によって低下することが分かった。このことから、電気伝導度の計測による危険斜面の抽出は、湧水と本川の値を相対的に比較することによって行うこと、冬期のような非出水期に行うことが望ましいと考えられる。

#### 5. おわりに

本研究により、深層崩壊危険斜面である岩盤クリープの特徴をおおよそ掴むことができた。一方、深層崩壊危険斜面は多数あり、危険度判定技術が不可欠である。今後は、ひずみの進行具合と空中電磁探査により得られる比抵抗や水文・水質的な特徴との関係に関して調査を進めていきたい。



写真 1 小原川の岩盤クリープ ( 奈良県十津川村 ) **Photo 1** The bedrock creep slope in Ohara River basin (Totsukawa village, Nara).



写真 2 右会津川の岩盤クリープ(和歌山県田辺市) Photo 2 The bedrock creep slope in Migi-Aizu River basin (Tanabe city, Wakayama).



写真 3 右会津川の岩盤クリープ斜面の湧水 Photo 3 Spring from the bedrock creep slope in Migi-Aizu River basin.



写真 4 小原川の岩盤クリープ斜面の湧水 Photo 4 Spring from the bedrock creep slope in Ohara River basin.

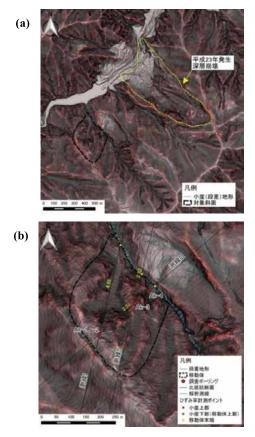


図1 空中電磁探査実施箇所位置図. (a) 広域図, (b) 詳細図.

Fig. 1 Location map of airborne electromagnetic survey in Akadani River basin. (a) Wide area map. (b) Detail view.

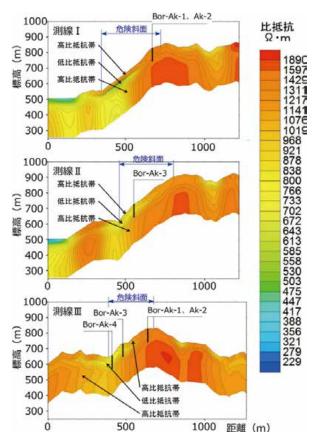


図2 図1(b) 測線 I ~Ⅲにおける比抵抗値の縦断分布 Fig. 2 Longitudinal distribution of resistance ratio in Survey lines I to Ⅲ in Fig.1(b).

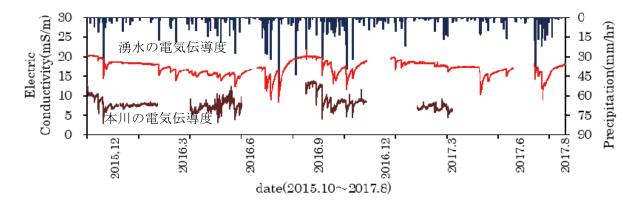


図3 右会津川における湧水と湧水が流出する本川の電気伝導度の季節変化

Fig. 3 Seasonal change in electric conductivity of main river and spring from bedrock slope in Migi-Aizu River basin.

## 研究その① 深層崩壊危険箇所の簡易的な見つけ方

○事例研究 (地頭薗ら,2012)



渓流水調査の変化が Озпация 針原川(平成9年)の事例

深層崩壊発生箇所では電気伝導度が高い。

深層崩壊発生箇所では湧水が多い。

## 電気伝導度とは?

電気伝導度:電気の流れやすさを表す指標。単位はS/m(ジーメンス・パー・メートル) EC計の値段は数万円~数十万円程度。簡易に計測可能。





EC計 (10分に1回の割合で計測)

EC計の設置事例

電気伝導度 (EC)が高い。 📥 水に含まれるイオン濃度が高い。

- ・地下の深いところを水が通っている(滞留時間が長い)。
- ・岩石との接触面積が大きい(地下で岩石がもろくなっている可能性がある)。



# 昭和28年有田川水害について(金剛寺の天然ダム)



O 崩壞概要(出典:7·18水害写真氣) 昭和 28年7月 20日午前 1時頃発生 崩壞度量 520万m³ 1名、重傷者 4名、家屋 4戸

#### 〇金剛寺天然ダム概要

高さ100m、堤頂幅600m、厚さ150m、底部厚600m 湛水深65m、湛水湖延長約6.6km 昭和28年9月25日(台風13号象雨により)決壊



出典: 7·18水海等真集(和联山県土井森砂砂駅)に加藤

# ①金剛寺(かつらぎ町花園) 昭和28年





出典: 7·18水應等其集(和較14県土井森砂が銀)に均等

深層崩壊跡地の現在の状況





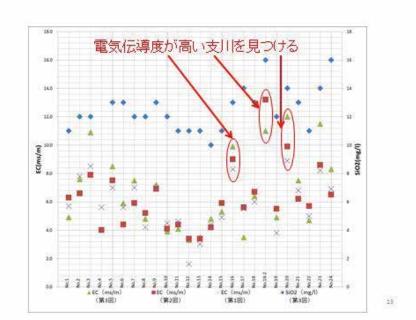
水質計を用いた深層崩壊危険箇所の見つけ方

支川

本川

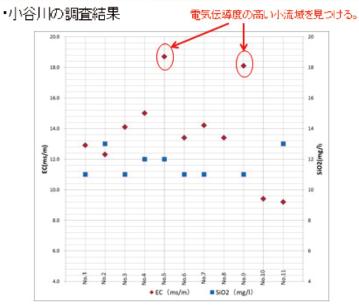
「電気伝導度チェックポイント

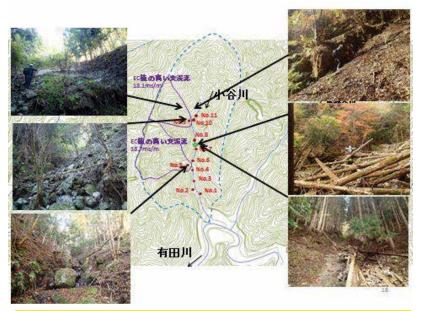
有田川



次に、流域末端で電気伝導度が高かった支川についてさらに詳細に電気伝導度を調査する。







研究その② 深層崩壊危険箇所の水文・水質調査について



右会津川流域(和歌山県田辺市)



小原川流域(奈良県十津川村)

- ・深層崩壊危険斜面は重力により斜面が変形している箇所。
- 変形が進むと目でも見えるようになる。

#### 17

# 深層崩壊危険斜面の湧水の特徴



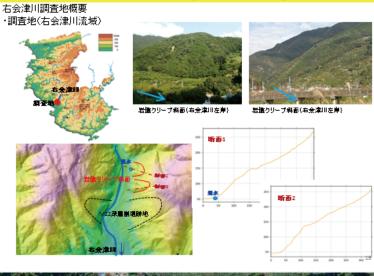
右会津川流域(和歌山県田辺市)

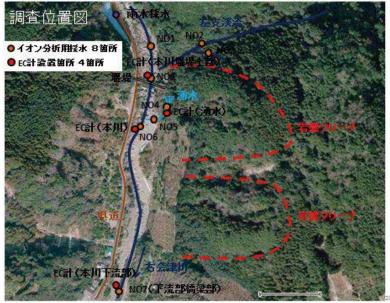


小原川流域(奈良県十津川村)

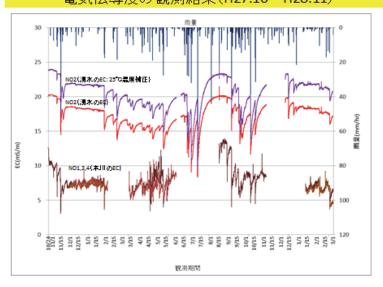
- ・尾根部なのに湧水が出ている。
- ・湧水の電気伝導度が本川と比べて高い(あくまで相対評価であることに注意)。
- ・湧水の水温の特徴としては、四季を通じてほぼ一定であること。赤谷の事例で雨が降って湧水として出てくるまで5年程度かかっている。

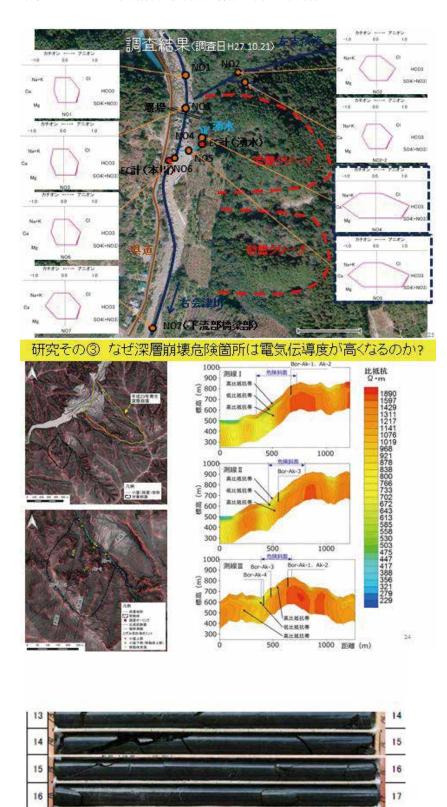
# 湧水の計測事例(右会津川流域)





# 電気伝導度の観測結果(H27.10~H28.11)





ところどころに白色脈が存在

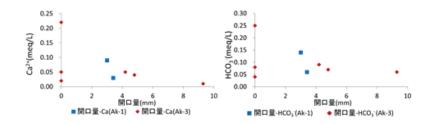
得られたボーリングコアについて、溶出試験を実施。

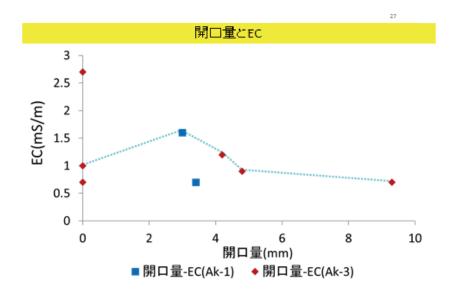
試験項目	溶出試験
分析項目	ナトリウムイオン, カリウムイオン, マグネシウムイオン, 塩化物イオン, 炭酸水素イオン, 硫酸イオン, イオン状シリカ, pH試験, 電気伝導度試験
溶媒水	pH6.0の純水 試料と溶媒水の液固比は1:10
溶出方法	1~5日目は溶媒水を1回/分の頻度で撹拌。 5日目以降は撹拌を行わず,試料を静置。





開口量とイオン溶出量





28

イオン溶出と開口の関係(イメージ図)

#### EC上昇機構に関する予想

- 1.ECの上昇には方解石(CaCO₃)が影響
- 2.CaCO₃の溶出には地下水が必要
- 3.地下水は開口龟裂から、深部へ浸透
- 4.地下水と接触し、CaCO₃が溶出 この時、ECが上昇する
- CaCO₃溶出痕は開口龟裂となる。
   この時、ECが低下する
- 6地下水はさらに深部へ浸透

79

# 今後の研究内容

- ①深層崩壊危険箇所の効率的な把握方法について 空中電磁探査・レーザブロファイラを活用した微地形解析、水文・水質 調査
- ②水文・水質調査を用いた危険箇所抽出に最適な時期の検討
- ③空中電磁探査による比抵抗分布を用いた現状の危険度の検討
- ④ボーリングコアを用いた溶出試験の実施

30

#### 要旨

紀伊山系では、平成23年の台風12号で大規模な深層崩壊が多数発生した。これらの被害を軽減するには、深層崩壊危険箇所の地質・水文学的な特徴を把握することが重要である。本研究では、深層崩壊の多くが岩盤クリープ斜面で発生したことに着目し、岩盤クリープ斜面の地形地質的特徴を知るために、地形図や空中電磁探査による地下の比抵抗分布、斜面末端の湧水の電気伝導度の特徴などを調査した。

これらの結果、深層崩壊危険斜面の特徴として、斜面上部に二重山稜やクラックなどが発達していること、地下に比抵抗値の大きな変化点があること、尾根にもかかわらず斜面末端から湧水が湧出し、その電気伝導度が周辺の水に比べて高いことなどが特徴として挙げられた。これらの特徴を踏まえれば、精度良く深層崩壊危険箇所を抽出できる可能性があることが分かった。

キーワード:深層崩壊危険斜面,岩盤クリープ,湧水,空中電磁探査,電気伝導度

#### 深層崩壊発生場所の予測と山脚固定効果の定量化の試み

内田太郎<sup>1</sup>\*·松本直樹\*·桜井 亘\*·吉野弘祐\*\*·高山陶子\*\*

# A Method for Assessing Deep-seated Rapid Landslide Susceptibility and for Quantifying Effects of Stabilization of Slope Foot on Deep-seated Rapid Landslide Susceptibility

Taro UCHIDA<sup>1\*</sup>, Naoki MATSUMOTO\*, Wataru SAKURAI\*, Kousuke YOSHINO\*\*, and Toko TAKAYAMA\*\*

\*National Institute for Land and Infrastructure Management, Japan

<sup>1</sup> uchida-t92rv@mlit.go.jp

\*\*Asia Air Survey, Japan

#### 1. はじめに

国土技術政策総合研究所では、深層崩壊対策技術に関する検討を進め、深層崩壊に対する対策の考え方を「深層崩壊対策技術に関する基本的事項」<sup>1)</sup>として取りまとめてきた. さらに、深層崩壊対策を進める上での基本となる深層崩壊による被害推定手法として、「深層崩壊に起因する大規模土砂災害被害想定手法」<sup>2)</sup>として取りまとめてきた.

その中で.

- ① 深層崩壊の発生場所や規模の推定技術は依然として十分とは言い難いこと.
- ② 砂防堰堤による山脚固定効果が期待されるものの、定量的な効果評価手法がなく、十分に計画に反映できていないのが現状であること

を指摘し、これらの課題の解決は今後の研究の進展 に委ねている.

砂防堰堤の山脚固定効果は河川砂防技術基準(計画編)においては、砂防堰堤を土砂生産抑制施設と土砂流送制御施設に大別した上で、土砂生産抑制施設としての砂防堰堤は、(1)「山脚固定による山腹の崩壊などの発生又は拡大の防止又は軽減」、(2)「渓床の縦侵食の防止又は軽減」、(3)「渓床に堆積した不安定土砂の流出の防止又は軽減」を目的とした施設とされてきた。このうち、(2)、(3)は近年発達してきた河床変動計算により一定程度の精度で定量的に評価できるものと考えられるが、(1)については、定量的に評価する技術が十分とは言い難い.

そこで、本検討では、上記課題の解決のために、 過去の深層崩壊の発生場や規模に関する精査を行う とともに、斜面安定解析に基づく検討を行った.

#### 2. 河床上昇による山脚固定の実態分析

本研究では、明治 22 年と平成 23 年の豪雨による深層崩壊を対象とし、特に流れ盤斜面の崩壊に限定し検討した。十津川本川は明治 22 年豪雨による多量の土砂流出や貯水ダムの影響により、明治 22 年に比べて、平成 23 年は河床が上昇していた。そこで、この河床上昇の影響を検討することにした(図1)、河床上昇の影響は、旧版地形図および平成 24 年の航空レーザー測量データより河床上昇状況の推定した上で、文献等の記載と整合性を確認した。その結果、二津野ダム、風屋ダム上流では、明治 22 年災害前の河床高に比べて平成 23 年災害前の時点で 15-20 m 程度河床が上昇していたと考えられた(図2)。

その上で、斜面の高さ、崩壊地の高さをそれぞれ計測した(図3). 明治22年の崩壊を含め、河床上昇が生じていない箇所で生じた崩壊では、斜面の高さに対する崩壊地の高さの比は平均で0.93と大きかった. 一方で、河床上昇が生じていた箇所で生じた崩壊では、斜面の高さに対する崩壊地の高さの比は平均で0.77となり、河床上昇により、深層崩壊の規模が小さくなる可能性が確認された(図4).

また,河床上昇があった箇所の深層崩壊が発生した 斜面について詳しく見ると,崩壊の滑落崖よりも上部

<sup>\*</sup> 国土交通省国土技術政策総合研究所

<sup>\*\*</sup> アジア航測株式会社

にも崩壊前にクラックが生じていることが確認される(図5). このことから、今後の詳しい解析が必要ではあるものの、河床上昇がなければ、より上部のクラックの位置が滑落崖となった可能性も考えられよう.

#### 3. 側岸崩落モデルを用いた深層崩壊箇所の予測

吉野ら(2013)<sup>3)</sup> は土塊の力学的なバランスを内部 応力や土質強度に基づいて定式化した天然ダムの越流侵食時の側岸崩壊を対象とした側岸崩落モデルを 提案した(図6). テクトニカルな隆起と河川の浸食により斜面の比高・勾配が増大し不安定化した結果,深層崩壊が生じると考えれば,天然ダムの決壊現象と深層崩壊の発生はタイムスケールは大きく異なるものの,両者は共通して斜面の比高・勾配の増大に ともなう斜面の不安定化現象と考えられる. そこで,本研究では,両者は同様のモデルで表現できる可能 性があると考えた.

平成23年台風12号により発生した紀伊半島における深層崩壊斜面や非発生斜面を対象に、台風12号前後に計測された詳細な地形データを用いて斜面勾配と比高等を整理し、側岸崩落モデルの適用可能性について検討を行った。本研究では、深層崩壊発生斜面およびその周辺の非発生斜面で複数の測線を設定し(図7)、測線上に等間隔で評価点を設け、評価点の河床からの比高・勾配を計測しプロットした。その結果、地盤強度を適切に設定すると深層崩壊発生斜面と非発生斜面が明確に分離でき(図8)、深層崩壊の発生危険度を側岸崩落モデルで表現できる可能性があることが分かった。

# 4. 側岸崩落モデルを用いた河床上昇による山脚固定 効果の定量化の試み

続いて、本研究では、砂防堰堤による山脚固定効果は深層崩壊の「発生規模」を低減させる効果と、「発生頻度」を低減させる効果の2つが期待されると仮定し、側岸崩落モデルで用いた安定解析を用いた解析を行った。同手法を適用するにあたって、地盤構造に異方性がなく、斜面ごとで安全率が最小となる形状で崩壊が発生すると考えられる場と、地盤構造が層理、節理を有し、安全率が低くなる面構造があらかじめ平行に存在する場の2つを想定した(図9).

ここでは、前節までに検討を行った紀伊半島の深 層崩壊が後者の地盤構造を有する斜面であったた め,後者の解析結果を示す. ここでは,斜面の諸元は,十津川流域の事例の平均的な値から,遷急線下部の比高は120 m,斜面勾配は40°,遷急線上部の斜面勾配25°とした. また,地盤強度は既往の研究を参考に,粘着力は40 kN/m²,内部摩擦角は35°,単位体積重量は20 kN/m³とした. ここでは,地下水発生をコントロールする不透水面を仮定し,その面より上部では不透水面と平行に地下水が上昇すると仮定し,安全率を順次計算し,安全率が1となる地下水面の高さを算出した.

図10に示すように、河床上昇量が大きくなるに従い、崩壊規模が小さくなることが計算された.すなわち、「発生規模」を低減させる効果について定量的に評価できる可能性が考えられた.さらに、図11には斜面崩壊が発生すると想定される時点の地下水位の算出結果を示した.この図から、河床上昇がある場合、崩壊を引き起こすためには地下水位がより高い位置まで上昇する必要があることが示された.ここで、地下水位と発生確率の関係を定量的に評価できれば、山脚固定による崩壊頻度低減効果を定量的に評価できる可能性も考えられた.

#### 5. まとめ

本研究で得られた結果は以下の通りである.

- 河床が上昇すると、崩壊規模が小さくなることを確認した。例えば、崩壊の高さで見て1~2割程度減少することがあることを示した。このことから、従来指摘されてきた河床上昇による山脚固定効果を改めて確認した。
- さらに、斜面脚部が崩れなくなると言う直接的な影響のみならず、崩壊頂部の位置、崩壊の厚さにも影響を与えている可能性が考えられた.
- 簡単な斜面安定解析により、深層崩壊発生斜面 の予測、山脚固定効果の定量化ができる可能性 を示した.

#### 参考文献

- 1) 深層崩壊対策技術に関する基本的事項 国土技術 政策総合研究所資料 No.807, 2014.
- 2) 深層崩壊に起因する大規模土砂災害被害想定手 法国土技術政策総合研究所資料 No.983, 2017.
- 3) 吉野ら: 天然ダム越流侵食時に形成される水 みちの発達過程に関する研究, 砂防学会誌, Vol.66, No.2, p.3-9, 2013.



図1 検討対象範囲 Fig. 1 Study area.

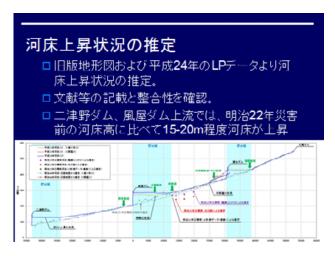


図2 河床上昇状況の推定結果

Fig. 2 Result of estimated riverbed change.

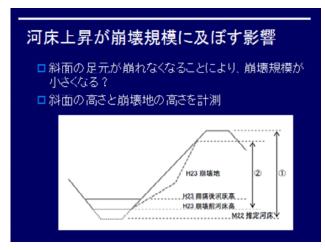


図3 測定項目

Fig. 3 Measured height.

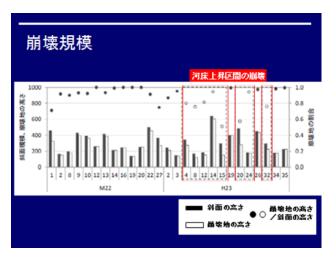


図4 河床上昇と斜面の高さに対する崩壊地の高さ

Fig. 4 Riverbed change, slope height and landslide height.

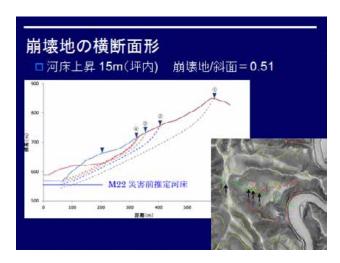


図5 河床上昇箇所の横断図

Fig. 5 Cross section of deep-seated landslide occurred at the section elevated riverbed.

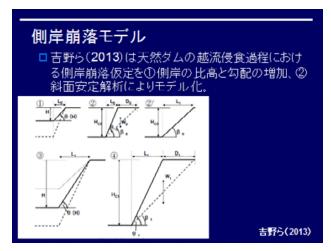


図6 側岸崩落モデル

Fig. 6 Side bank collapse model.

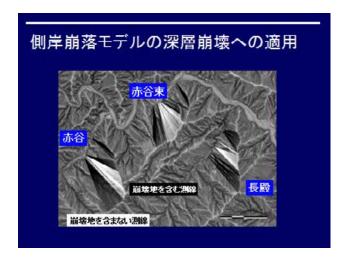


図7 対象とした深層崩壊斜面

Fig. 7 Studied deep-seated rapid landslide.

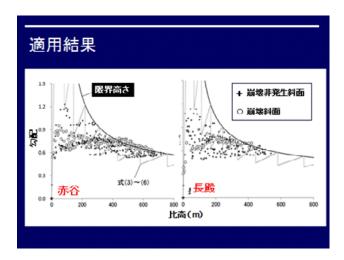


図8 河床上昇と斜面の高さに対する崩壊地の高さ

Fig. 8 Riverbed change, slope height and landslide height.

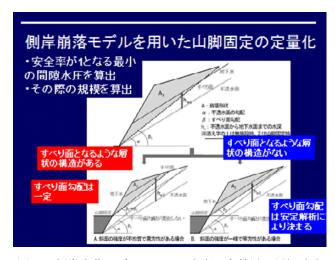


図9 側岸崩落モデルを用いた山脚固定効果の評価手法

**Fig. 9** Method for quantification of hill foot stabilization effects using side bank collapse model.

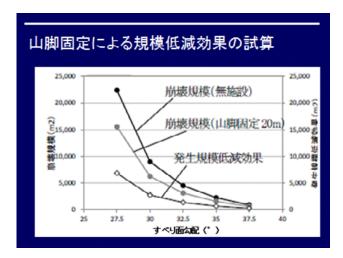


図10 崩壊規模低減効果の試算結果

Fig. 10 Simulated result of decreasing effect of landslide scale.

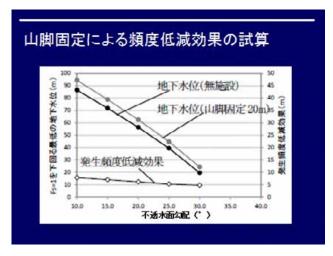


図11 崩壊頻度低減効果の試算結果

**Fig. 11** Simulated result of decreasing effect of landslide frequency.

#### 要 旨

国土技術政策総合研究所では,深層崩壊対策技術に関する検討を進め,深層崩壊に対する対策の考え方を「深層崩壊対策技術に関する基本的事項」として取りまとめてきた。しかし,深層崩壊の発生場所や規模の推定技術は依然として十分とは言い難く,砂防堰堤による山脚固定効果が期待されるものの,定量的な効果評価手法がないため,十分に計画に反映できていないのが現状であることを指摘した。そこで,本検討では,過去の深層崩壊の発生場や規模に関する精査を行うとともに,斜面安定解析に基づく検討を行った。その結果,地質構造・土質強度が概ね等しいと考えられる領域では,側岸崩落モデルにより十津川流域の河道の側方斜面における深層崩壊の発生状況を勾配と比高の関係から良好に再現できた。さらに,深層崩壊の発生の抑制に一定の効果が期待されるものの,その効果を十分に確認されていなかった山脚固定の効果について,実際の深層崩壊事例を整理することにより確認することができた。さらに,側岸崩落モデルを用いた解析により定量的に評価できる可能性を示した。

キーワード:深層崩壊,山脚固定,危険度評価

#### 付加体の地質構造が大規模崩壊の発達に及ぼす影響:南アルプスアレ沢崩壊の例

西井稜子\*・木村克己\*\*

キーワード:付加体、スラスト、デュープレックス構造、大規模崩壊、航空レーザ測量

#### 1. はじめに

国内において、降雨・融雪が誘因となって発生した深層崩壊(大規模崩壊)のうち、地質別では、付加体地質で発生したものが半数以上を占めることが報告されている<sup>1)</sup>.深層崩壊が発生しやすい付加体地質において、どのような断裂系が崩壊を引き起こすすべり面に発達するのかを評価することは、崩壊発生場の予測や崩壊危険度を評価していく上で重要と考えられる。本研究では、過去に付加体地質で発生した大規模崩壊を対象に、付加体地質構造が崩壊時のすべり面形成に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

#### 2. 調査地・方法

対象地は、南アルプス北部に位置する比高 400 m, 平均傾斜約 45°を示すアレ沢崩壊地である。アレ沢崩壊地の一部では、2004 年に 5~10×10<sup>5</sup> m³の岩盤崩壊が発生しており、さらに、その後、少なくとも 2.3×10<sup>4</sup> m²の崩壊地周縁斜面の変動が現地測量等から確認されている²)。また、崩壊地の周辺では、数多くの重力性変形地形が発達しており、重力性変形が著しく進行している斜面の一つと考えられる。一帯の地質は、四万十帯白根層群からなり、砂岩頁岩互層が卓越し、一部では混在岩を伴う。層理面は、北東・南西方向、高角度東傾斜が卓越する。南アルプス北部では、基盤構造の「逆くの字型ねじりまがり構造」によって³)、地層は西上位の逆転を示す。

対象地の地質構造を把握するため、現地での地質調査に加えて、写真解析、航空レーザ測量データを用いた断裂系解析を実施した。断裂系解析では、航空レーザ測量データ (DEM) を基に Coltop3D ソフトウェア、ArcGIS ソフトウェアを用いて、調査地に卓越する断裂系群 (走向傾斜)を抽出・分類した。最

終的に,2004年崩壊時のすべり面構造と対応する 断裂系群(付加体地質構造)について検討した.

#### 3. 対象地周辺の地質構造

対象地では、断層 (F), 層理面 (S0), 層理面フォリエーション (S1) の特徴的な面構造の発達が認められた <sup>4)</sup>. アレ沢崩壊地の大露頭 (尾無尾根) では、複数の断層 (F) がほぼ平行に北東 - 南西~~北北東 - 南南西方向に配列しており, 各断層間 (幅約 150~250 m) には、層理面、層理面フォリエーションが斜めに積み重なる特徴が認められた. それらの形状的特徴は、付加体の典型的な構造であるデュープレックス構造が入れ子構造をなし、累積したものと考えられる. デュープレックス構造の境界となっている断層は、付加体形成時のスラストにあたると推定される.

# 4. 2004 年崩壊時のすべり面構造

DEM を用いた断裂系解析を基に、上述の断層 (F)、層理面 (S0)、層理面フォリエーション (S1) を含む 9 つの断裂系を抽出し、それらの面構造の方位・傾斜を求めた. 2004 年崩壊時のすべり面構造は、それら断裂系群の中で、主に 2 つの断裂系 J1 (120°/48°(±15°))、J2 (145°/46°(±10°))に対応する. J1 はスラストと推定された断層群 (F) に、J2 は S0 および S1に、それぞれ対比できる走向傾斜を示す. 以上の結果から、2004 年の崩壊を引き起こしたすべり面の形成には、デュープレックス構造を構成するスラストと層理面・層理面フォリエーションの両面構造が作用したことが示唆される.

#### 謝辞

富士川砂防事務所には航空レーザ測量データを提供して頂きました. ここに感謝の意を表します.

<sup>\*</sup> 新潟大学

<sup>\*\*</sup> 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

#### 参考文献

- 1) 内田太郎・鈴木隆司・田村圭司(2007): 地質及 び隆起量に基づく深層崩壊発生危険地域の抽出. 土木技術資料 49-9, 32-37.
- Nishii R., Matsuoka N. (2012): Kinematics of an alpine retrogressive rockslide in the Japanese Alps. Earth Surface Processes and Landforms37, 1641-1650.
- 3) 松島信幸(1997): 赤石山地形成論―ポスト和田 変動と中央構造線付近のまくれ上がりについて ―. 飯田市美術館研究紀要 7, 145-162.
- 4) 木村克己・西井稜子(2017): 南アルプス間ノ岳の大規模斜面崩壊を規制する付加体の地質構造. 日本応用地質学会平成 29 年度研究発表会講演論文集, 117.

# 中部日本の高山〜低山域の付加体分布地域に発達する山体重力変形地形の 特徴と発達過程

小嶋 智\*

キーワード:山体重力変形地形,付加体,中部日本,美濃山地,北アルプス

#### 1. はじめに

二重(多重)山稜,山向小崖などの山体重力変形地形は,日本の大比高山地において,標高に関係なく発達することが知られている(例えば八木,1981).近年,航空レーザー測量の進展に伴い,小規模な山体重力変形地形を詳細に解析することができるようになり,これらの地形が深層崩壊の前兆現象であることが明確に示された(Chigira et al., 2013).しかし,広範囲にわたり無数に存在する山体重力変形地形全てが深層崩壊の前兆現象として防災上有効に活用できるとは考えられず,その防災政策上の利用には課題も多い.

山体重力変形地形は山地の稜線上に分布することが多いので、ほとんどの場合アクセスが難しい.しかし、周辺から山体重力変形地形がつくる凹地への堆積物の供給がほとんどなく、凹地埋積堆積物の堆積速度は遅いので、薄い堆積物が長期の周辺環境変動を記録している.そのためハンドオーガーボーリングや人力によるピット掘削で数万年間の堆積記録や構造発達の情報を得ることができる.また、日本の森林限界以下の山地では堆積物が有機質で放射性炭素年代測定に利用できる木片等が豊富に含まれ、また、火山国であるため火山灰年代学により堆積物の年代を決定することができる.

演者らのグループは、中部日本のジュラ紀付加体 分布域を主たる調査地域とし、山体重力変形地形の 分布や特徴、地質構造との関係、凹地埋積堆積物の 層相や年代、地下構造などを調査し、発達過程を議 論してきた、本発表では、その一部を紹介したい。

#### 2. 調査地域の地形・地質の概要

本発表で取り上げる調査地域は、岐阜県南部の美

濃山地と長野県西部の北アルプス,上高地地域である.両地域とも基盤岩は美濃帯のジュラ紀付加体からなる.

#### 2.1 美濃山地

調査地域の山塊は、標高 1,617 m の能郷白山を盟 主として, 標高 1,000 m 程度の山々からなる. 稜線 は定高性があり比較的なだらかだが、そこに食い込 んでいる沢地形や斜面は急峻で、土砂生産も活発で ある. 基盤岩はジュラ紀付加体構成岩類の砂岩. 泥 岩, チャート, 玄武岩, 石灰岩およびそれらの様々 な大きさ・形のブロックを含むメランジュからなる. これらの岩石のうち泥岩, チャートは層理面からな る面構造をもち, メランジュには顕著な片理面が発 達する. チャートは、他の岩石に比べて風化浸食に 対する抵抗力が強いため、急崖を作る. 石灰岩は化 学的風化には弱いが, 物理的風化には強く, 伊吹山, 魚金山, 舟伏山などの頂部は石灰岩からなり, キャッ プロック構造を素因とする大規模崩壊が発生してい る (Kojima et al., 2006). ジュラ紀付加体は、後期白 亜紀および新第三紀花崗岩類の貫入を受け, 新第三 紀火山岩類に覆われている. 能郷白山は新第三紀花 崗閃緑岩からなる.

#### 2.2 北アルプス,上高地地域

上高地周辺の基盤岩は梓川を挟んで対照的で、左 岸側(東側)はジュラ紀付加体からなるのに対し、右 岸側(西側)は中生代~新生代の火成岩類からなる。 前者は徳本峠~大滝山にかけての緩やかな稜線を持 つ山体となっているが、後者は前穂高岳東壁などの 垂壁群を持つ岩場となっている。ジュラ紀付加体は、 主として砂岩、泥岩、およびそれらの互層からなり、 少量のチャートを挟む、泥岩には顕著な層理面が発 達し、その一般的な走向傾斜は N45E, 60NW である。

<sup>\*</sup> 岐阜大学工学部 社会基盤工学科

上高地の南西, 5 km および 8 km の地点には, それ ぞれ焼岳, アカンダナ山といった活火山が分布する.

#### 3. 美濃山地の山体重力変形地形

美濃山地は濃い植生に覆われているため、わずかに発達した登山道や林道以外で稜線および山腹斜面に発達する山体重力変形地形を調査するのは難しい。しかし、高密度 DEM (digital elevation model)を用いた、Kaneda and Kono (2017) の研究によれば、819  $\rm km^2$  の範囲に 10,000 以上の山体重力変形地形が認められ、その線密度は  $\rm 0.87~km/km^2$  に及ぶ

美濃山地では,能郷白山,冠山,金草岳,権現山, 東津汲などの周辺で調査を行なっている. 本発表で は、冠山地域の調査結果を述べることにする. 冠山 周辺地域には、美濃帯のジュラ紀付加体に属する、 厚さ数十~数百mのチャート・砂岩・泥岩が繰り 返し分布し、一部に礫岩の薄層を伴う、地層の走向 は NW-SE 方向で、NE または SW 方向に傾斜する. 冠山の北西約1kmの, ほぼ南北に伸びる砂岩から なる稜線上には、二重山稜地形が認められ、山稜間 の凹地を埋積した堆積物をハンドオーガーボーリン グにより掘削・解析した. 堆積物は西ほど厚く, 凹 地東西断面ではくさび形を呈する. このことは、稜 線が東側に円弧回転しながら変形していることを示 唆する. 堆積物の厚さは最大で2.8 m以上あり,下 位から(a) 橙色礫質粘土, (b) 灰色粘土, (c) 有機質 粘土および腐植土層からなる. (a) の下位には、基 盤岩があるものと思われるが、(a)をハンドオーガー ボーリングで掘り抜くのは難しく確認していない. 美濃山地の他地域で掘削した山上凹地埋積堆積物の 層相も、ほぼ類似している. コア試料に挟まれるア カホヤ火山灰, 木片の AMS <sup>14</sup>C 年代, およびそれ らの年代値から推定される平均堆積速度などから, 本凹地は11,000年前頃に形成され、その後は変形す ることなく、ほぼ一定の速度で埋積されたものであ ることが明らかとなった.

二重山稜地形に直交および平行な側線に沿って比抵抗電気探査を行った(小嶋ほか, 2015). その結果, 凹地埋積堆積物と基盤岩の比抵抗の差は大きく, 両者の境界が明瞭に識別できることがわかった. また, 凹地の東部では, ハンドオーガー掘削により明らかとなった(a) 層の直下に基盤と考えられる高比抵抗層があるのに対し, 凹地の西部では高比抵抗部はよ

り深いところに位置する. これが何を意味するのかは明らかではないが, 凹地西部では基盤が落ち込んでいて凹地埋積堆積物が厚くなっている可能性や, 基盤岩上部が破砕され含水量が多くなっている可能性などが考えられる.

#### 4. 北アルプス, 上高地地域の山体重力変形地形

上高地地域では、徳本峠から大滝山に向かって北東にのびる稜線と、徳沢から蝶ヶ岳に至る長塀尾根を主たる調査地域としている。NE-SW 方向にのびる両稜線は、本地域の美濃帯の地層の層理面・片理面の走行と平行で、丸みを帯びた広い頂部を持ち、多くの山体重力変形地形が発達している。また、地層が NW 傾斜であるため、NW 方向の斜面は流れ盤となり傾斜がゆるいのに対し、SE 方向の斜面は受け盤となり急傾斜である。徳本峠から北東に延びる稜線の北西側斜面の下部には多くの「深層崩壊」の痕跡が認められ、その最大のものは幅 300 m、推定体積 3 × 10<sup>6</sup> m³ に達する。

長塀尾根の標高 2,000 m 付近 (A 地点) と徳本峠の 北東約2kmの標高2,150m(B地点)に位置する山上 凹地を埋積する堆積物をハンドオーガーボーリング により採取し、岩相記載、火山ガラス屈折率の測定 を行った. その結果, 前者は泥質堆積物を主体とす るのに対し、後者は主として火山性の粗粒砂からシ ルトからなることが明らかとなった. A 地点の2本 のボーリング試料の深度 67 cm および 90 cm 付近に は火山ガラスの産出ピークが認められ、両方とも鬼 界アカホヤ火山灰(7,300 cal BP)起源であると思われ る. 一方, B 地点のボーリングコアには火山ガラス の産出ピークは認められず、最下部(深度 190 cm) の試料も鬼界アカホヤ火山灰起源の火山ガラスを含 んでいる. しかし, 火山屑砕物の主体は粗粒な火砕 物であり、その粒度や鉱物組成から、2,000 - 5,000 年前に活発に活動した西南西約9.5 km に位置する 焼岳からもたらされたものと推定される. また, A, B両地点の凹地埋積速度は, A が約 0.1 mm/y, B が 0.26 mm/y 以上とかなり異なる. これは焼岳からの 距離や方位の差に起因するものと考えられる.

#### 5. おわりに

山体重力変形地形が斜面防災上有効な手段となる か否かは、日本の山岳地域に無数にある山体重力変 形地形から、近々崩壊すると思われる危険度の高いものを選び出す必要がある。つまり、山体重力変形地形の危険度ランキングが必要となる。そのためには、高精度で広範囲をカバーすることができる衛星データの活用や、危険度や人間社会への影響度に基づいてスクリーニングを行なった後に安価で高精度のセンサーを多数設置するなどの方法が考えられる。

地形学的・地質学的・環境学的観点からは、山体 重力変形地形の形成メカニズムや発達史の理解が期 待される。そしてその理解がひいては地すべり災害 の軽減につながると考えている。

#### 引用文献

- Chigira, M., Tsou, C.Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and Matsuzawa, M. (2013): Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas. *Geomorphology*, Vol.201, p.479-493.
- 2) Kaneda, H. and Kono, T. (2017): Discovery, controls, and hazards of widespread deep-seated gravitational

- slope deformation in the Etsumi Mountains, central Japan. *Jour. Geophys. Res.: Earth Surface*, DOI: 10.1002/2017JF004382.
- 3) 小嶋 智・岩本直也・山崎智寛・小村慶太朗・ 金田平太郎・大谷具幸(2015): 岐阜福井県境, 冠山北西の山体重力変形地形の地下構造. 日本 地質学会第122年学術大会講演要旨, p.150.
- 4) Kojima, S., Kaneda, H., Nagata, H., Niwa, R., Iwamoto, N., Kayamoto, K. and Ohtani, T. (2015): Development history of landslide-related sagging geomorphology in orogenic belts: Examples in central Japan. In Lollino, G., et al., eds., Engineering Geology for Society and Territory, Springer, Vol.2, p.553-558.
- 5) Kojima, S., Nishioka, T. and Yairi, K. (2006): Geological factors of present-day large landslides in subduction-accretion complex area: Examples from the Mino terrane, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Thailand, Spec. Issue*, No.1, p.91-100.
- 6) 八木浩司 (1981): 山地にみられる小崖地形の分布とその成因. 地理学評論, Vol.54, p.272-280.

#### 斜面崩壊に認められる付加体の地質構造制約

#### 木村克己\*

Key words: Landslide, Accretional complex, Shimanto, Geologic control, Kii Peninsula

#### 1. はじめに

紀伊半島四万十帯の付加堆積岩類において、2011 年台風12号豪雨により、赤谷、長殿北、長殿など、 多数の大規模な斜面崩壊が発生した. その斜面崩壊 の地形・地質的素因について、現地地表調査および 災害復旧工事に伴うボーリング調査や航空レーダー 測量などの精密 DEM による地形解析が実施され、 その内容が明らかにされてきている. 発表者は2015 年開催の本発表会で、現地調査と既往の調査資料に 基づいて, 大規模な斜面崩壊は, 流れ盤にあって, 泥岩が卓越しせん断変形が著しい層準で発達してお り、同様の傾向は、防災科研発行の過去の地すべり 地形・移動体の分布図にも認められることを指摘し た. 現在, 南海トラフ沿いのプレート境界地震の発 生が危惧されているが、その震源域に入る赤石山脈 には広範囲に四万十帯の付加堆積岩類が分布してお り、赤崩れ、などの巨大崩壊地が位置している。本 講演では、紀伊半島と赤石山脈の白亜紀付加堆積岩 類に認められる大規模斜面崩壊の事例を紹介し, 両 地域における地質構造制約の特徴について比較・検 討を行う.

#### 2. 調査地域の地形・地質概要

紀伊半島の四万十帯白亜系は,東北東一西南西走向で帯状配列をなす付加堆積岩類により構成され,北から南へ,その形成年代と岩相・地質構造の違いにより,花園ユニット,湯川ユニット,美山ユニット,龍神ユニット,丹生ノ川ユニットに細分される。いずれの地層境界も断層で断たれている。 主な調査地域は美山層分布地域にあたる。赤石山脈の四万十帯は,断層で境された構造層序ユニットが南北から北東-南西走向で帯状配列をなしており,調査を実施した北岳-間ノ岳地域は中白根山ユニットに,赤崩れは寸俣川ユニットにそれぞれ位置する。

#### 3. 付加堆積岩類の構造

付加堆積岩類の基本となる原岩層序は、いわゆる 海洋プレート層序を特徴とし,下部から上部へ,玄 武岩(海山起源と推定),遠洋性堆積物にあたる層 序チャート, 半遠洋性堆積物の凝灰質頁岩, 陸源堆 積物にあたる頁岩,砂岩頁岩互層,成層砂岩からな る. しかし、こうした層序は、スラストやそれに伴 うせん断変形によって, 岩相層序の累重が断たれ, 構造的に複雑に繰り返す. スラスト近傍では幅広い せん断帯が形成され, 泥質基質中に固い岩石が岩塊 をなして混在化した混在相を呈し, 砂岩頁岩互層で は砂岩単層がレンズ化しデュープレックス・低角ス ラスト群の発達で特徴づけられる構造変形が形成さ れている. 各構造層序単元(ユニット)は, 幅 1-3 km で、走向方向に帯状配列をなすサブユニットに細分 され、構造的下部は海洋プレート層序の下部を構成 する玄武岩やチャート, 頁岩などの岩石群が卓越し, かつ顕著なせん断変形帯をなすことに対し、上部は 砂岩が卓越し、層理面も保存され変形が相対的に弱 い傾向がある. こうした付加体形成に関わる基本的 な構造に加えて、その後に形成された一般に層理面 に直交する広域節理や高角度の横断断層系が発達し ている.

#### 4. 深層崩壊地の地質構造規制

調査地域の山地は、層理面の広域的な地質構造を 反映した非対称な構造地形を示し、地すべり地形お よび移動体はいわゆる流れ盤斜面に多数分布する. それらの主滑り面や側方を画する断裂を規制する地 質構造は、スラスト、層理面・せん断面、節理、お よび高角度の横断断層系が、各地における地形・地 質的特性に応じた特徴の異なる関与の仕方が認めら れる.こうした地域ではすでに指摘されているとお り、山頂には線状凹地などの重力変形による地形変

<sup>\*</sup>国立研究開発法人 防災科学技術研究所

状が発達している. 地形変状と地質構造との関係について, 赤石山脈のアレ沢では, 主滑り面をなすスラストと層理面・せん断面に沿って進行する様子がLPデータと空中写真から観察できる<sup>1)2)</sup>.

本講演では、紀伊半島および赤石山脈の四万十帯 北帯に分布する主要な大規模斜面崩壊地の調査事例 から、付加体堆積岩類の地質構造制約の特徴を紹介 する。

#### 参考文献

- 1) 木村・西井(2017): 応用地質学会平成 29 年度研究発表会講演論文集, 117.
- 2) 西井・木村 (2017): 本講演会.

# 斜面崩壊に認められる付加体の 地質構造制約

Structural constraints of large-scale landslides distributed in accretionary complexes, Japan

#### 木村克己

(防災科学技術研究所)

Katsumi Kimura

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan k.kimura@bosai.go.jp

#### スライド1

本講演では、大規模斜面崩壊と線状凹地に認められる付加体地質構造制約の特徴を整理して、本シンポでの議論の材料としたい.

#### はじめに

大規模崩壊の予兆として山体の重力性クリーブ変形は注目され、斜面と層理面の向き・傾斜度との関係からその形状的特徴が整理されている(干木良、1995など)しかし、スラストや幅広くせん断変形が発達した付加体岩類では、スラストとそれに伴うせん断帯が発達している層準では、層理面は断続的ないし方位が分散したりで、大規模斜面崩壊スケールでは物性境界として意味をなさないことが少なくない、そのため、具体的にどういう地質構造が滑りや崩壊を規制しているのかを明らかにする必要がある。

本講演では、紀伊半島四万十帯の白亜系美山ユニットにおける2011年台風12号 豪雨で発生した「長殿北」、および赤石山脈の四万十帯白亜系分布域の「赤崩」と間 ノ岳南東斜面の「アレ沢」を分象に、大規模斜面崩を規制している地質構造について 検討した結果を発表する

なお、「長殿北」は木村(2015)、「赤崩」は木村ほか(2013)、「アレ沢」は木村・西井(2017)、西井・木村(2017)で発表された研究資料に基づいている。

#### スライド2

はじめに 本講演の主旨

#### 講演の内容

- 1. 付加体の地質構造の特徴 デュープレックス, 順序外スラストとせん断構造
- 2. 紀伊半島四万十帯の例 2011年台風12号豪雨で大規模斜面崩壊が多数発生した 伯母子岳地域の地質と「長殿北」崩壊
- 3. 赤石山脈四万十帯の例: 赤崩, アレ沢 広大な崩壊斜面に付加体の地質構造が露出
- 4. 結論

#### スライド3

• 講演の内容

講演で利用した図のうち、新たに論文化する予定の 図は本講演資料において割愛させていただきます. その結果、掲載図の多くは1節と2節に関するもの になっています.

# 西南日本の地質と地すべり移動体分布

付加体岩類の分布域に、多数の地すべり移動体が分布している。それらの中で、非変成の四万十帯における大規模崩壊は、付加過程で形成された地質構造と密接な関係を示す。 4月1、3月1日に対している。1月1日に対しては対している。1月1日に対している。1月1日には対象を示する。1月1日に対している。1月1日には対している。1月1日には対している。1月1日には対している。1月1日には、1月1日には、1月1日に対している。1月1日には、1月1日にはは、1月1日にはは、1月1日にはは、1月1日にははは



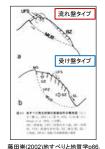
#### スライド4

・ 西南日本の地質と地すべり移動体分布

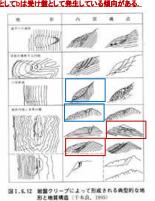
西南日本外帯の四万十帯には、多数の地すべり移動体が分布する.本講演で紹介する大規模斜面崩壊地の長殿北、赤崩、アレ沢の地点を示す.本図は、産総研のシームレス地質図に防災科研の地すべり分布図を重ねて表現されている.

#### 重力性クリープと地質構造の関係

四万十付加帯では、aは流れ盤としてbは受け盤として発生している傾向がある。



付加体の場合, 層理面とは? 地質構造との関係は?



#### スライド5

• 重力性クリープと地質構造との関係

大規模崩壊の予兆として重力性クリープによる山体の変形は注目されており、斜面と層理面の向き・傾斜度との関係から整理されている。本図では、大規模斜面崩壊の前兆となる左図のタイプ a とタイプ b (藤田, 2002) について、右図の層理面で表現される内部構造の模式図(千木良, 1995) とを対比した。しかし、付加体においては、地質構造を規制する面構造とは何なのかを検討する必要がある。

# 

# 付加過程で生成する地質構造 環境の心臓影響 できなが 裏面構造と衝上断層 (スラスト) Imbricate structure Thrust デューブレックス Duplex 正順スラスト in-sequence thurst 順序外スラスト out-of-sequence thrust が加測程は累進的な造構過程であり、 初期に形成された覆面構造やデューブレックス構造は順序外スラストで断 たれて累重し、せん断変形が発達する。 本村(1998)

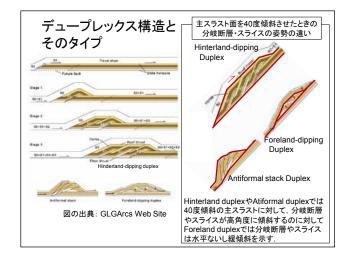
#### スライド 6

・付加体形成過程の模式図(木村学・木下編, 2009)

本図は付加体の付加作用で形成される地質構造の特徴が模式的に表現されている.四万十帯の付加複合岩類の多くは、底付付加作用で形成されており、その特徴的な構造は、デュープレックス構造であると理解されている.デュープレックス構造は、付加体底部での継続的なせん断変形により、構造の重合、累積的なせん断変形の累積、順序外スラストによる再配列などの多重変形が特徴である.

#### スライド 7

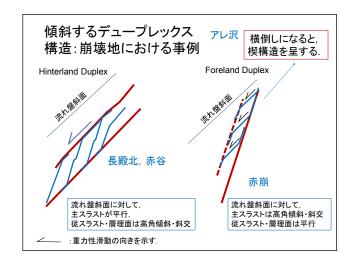
・付加過程で生成する地質構造(木村, 1998) 付加過程は累進的な造構過程であり、初期に形成された覆瓦構造やデュープレックス構造は順序外スラストで断たれて累重し、その内部ではせん断変形が累進的に進行する.



#### スライド8

デュープレックス構造とそのタイプ (GLGArcs Web Site の図に加筆・修正)

デュープレックス構造では、フロアスラストから分岐するスラストで断たれた個々のスライス(ホース)が分岐スラストの長さに対する変位量に応じて、短い場合は後方に傾斜するヒンターランド傾斜デュープレックス(標準的なタイプ)、同一の場合は上方に累積して背斜状を呈するアンチフォーマル累重デュープレクス、移動量が大きくなると、前方に傾斜するフォアランド傾斜デュープレックスと、大きく3つの異なる内部構造が生成する。右図はデュープレックス構造を傾動させたときの内部構造の違いを示す。



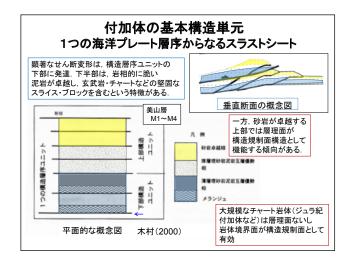
#### スライド9

デュープレックス構造が付加複合岩類の地質構造として出現する場合,重要な点は,デュープレックスの主スラストは全体的な地質構造を反映した傾斜を示すが,その内部の分岐スラストやそれで囲まれたスライスはデュープレックス構造のタイプによって異なる姿勢を示すことである。本図では,「長殿北」,「赤谷」と「赤崩」,「アレ沢」とで異なることを示す.



#### スライド 10

付加過程において形成されるせん断変形の事例を示す。左上図は、砂岩頁岩互層が累重し断ち切られた複雑なデュープレックス構造をなしており、その内部では砂岩層がせん断変形を受けて伸長し破断されている。このような変形構造は、スラストに伴う幅広いせん断帯において特徴的に認められる。せん断面沿いでは左下図にあるように、非対称なせん断変形構造 P-Y 構造が認められる。



#### スライド 11

• 付加体の基本構造(木村, 2000)

付加体においては元々の層序的関係や側方への連続性は著しく破壊されるが、海溝における海洋プレート上に形成される岩相層序("海洋プレート層序")を鍵にして、スラストで断たれた構造単元を把握し、その岩相と構造の特徴を側方に追跡することで地質構造を復元することができる。海洋プレート層序は、下部から上部へ、玄武岩、遠洋性堆積物にあたる層序チャート、半遠洋性堆積物の凝灰質頁岩、陸源堆積物にあたる頁岩、砂岩頁岩互層、成層砂岩からなる。

#### 「1. 付加体の地質構造の特徴」のまとめ

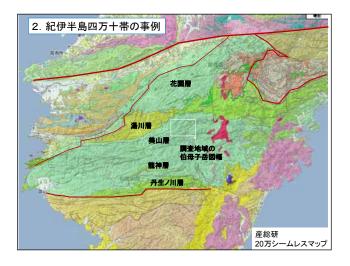
○付加体堆積岩類において, せん断変形の顕著な地帯に おいては, スラストとそれに伴う変形構造が著しく発達している.

その結果、地質構造を規制する面構造としては、層理面よりも、スラスト面とその活動で形成されたデュープレックス構造やせん断面であることが少なくない、層理面は変形のマーカーとして重要.

○紀伊半島四万十帯において、せん断変形の顕著な帯は、 構造層序ユニット(formation or group)の下部に発達する傾向がある。 ユニット下部は泥岩が卓越しチャート・玄武岩を含有する混在岩を伴うという岩相的特徴を呈する。

#### スライド 12

1. 「付加体の地質構造の特徴」のまとめ



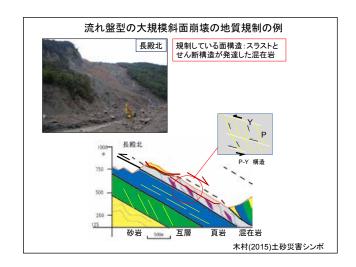
#### スライド 13

2. 紀伊半島四万十帯の事例 四万十帯北帯は、北から南へ、花園層、湯川層、美山層、竜神層、丹生ノ川層が帯状配列をなしている。 調査地域は図中の伯母子岳図幅地域にあたる。



#### スライド 14

・ 紀伊半島の四万十帯の地質と地形 紀伊半島四万十帯北帯の美山層分布域において,図 中の3か所(長殿北,長殿,赤谷)で,2011年台風 12号豪雨で大規模斜面崩壊が発生した.



#### スライド 15

• 流れ盤方の大規模斜面崩壊の地質規制の例調査地域で2011年に発生した大規模な斜面崩壊地の長殿北,赤谷,長殿,および防災科研の大規模な地滑り移動体の多くは,サブユニット境界などの主要なスラスト上盤に分布する傾向が認められる.これらの共通した地質構造制約の特徴は,長殿北の事例(本図)のように,斜面崩壊の主滑り面がスラストないしスラストに伴う幅広いせん断帯に沿って形成されていることにある.



#### 「長殿北」崩壊

2011年9月24日撮影

山体斜面に露出する暗灰色 の岩石は「混在岩」であり、 大規模斜面崩壊の主滑り面を なす

混在岩には、玄武岩、砂岩、 珪質凝灰岩などの岩塊・レンズ が不規則に含まれる。

基質の泥岩は鱗片状劈開が発達し 非対称なP-Y構造を呈する.

#### スライド 16

• 「長殿北」崩壊

山体斜面に露出する暗灰色の岩石は「混在岩」であり、大規模斜面崩壊の主滑り面をなしている. 混在岩には、玄武岩、砂岩、珪質凝灰岩などの岩塊・レンズが不規則に含まれる. 基質の泥岩は鱗片状劈開が発達し、top-to-up の非対称な P-Y 構造を呈する.

# 順序外スラスト(OST)の例

:美山層

構造ユニット境界をなす大規模な断層 :順序外スラスト

同スラスト近傍では岩石はせん断され、もろくなり、スラストに沿って破砕された泥質基質 の断層破砕帯が発達する.

川原樋川左岸: M1サブユニット境界





#### スライド 17

• 順序外スラストの例:美山層

サブユニット境界など主要な構造境界をなすスラスト露頭の例. 本スラストは, 奈良県十津川村の川原樋川左岸の林道沿いに露出する. 本露頭では 50 m以上の厚さにわたって周囲の砂岩頁岩互層は擾乱しており, 幅 5 m ほどの断層破砕帯が伴われる.

## まとめ

#### 大規模斜面崩壊における付加体の地質構造の重要性

- 斜面崩壊を規制する地質構造を把握する上で、スラストと それに伴うせん断帯が発達した地帯においては、それらの面構造 の特徴と斜面の3次元の幾何学的な関係が重要
- 紀伊半島四万十帯美山層では、その大半は流れ盤崩壊であ り、スラストとそのせん断帯に規制された特徴を呈する.
- 受け盤崩壊型の「赤崩」では、地質構造解析の結果は、 デュープレックスと断層系に構造が大きく規制され、崩壊は、互層 の層理・節理やデュープレックス内部のスライスの構造で継続的な 中・小規模な崩壊が発生しやすい状況が認められる。
- 流れ盤型の大規模崩壊地の「アレ沢」ではデュープレックスの 入れ子構造が発達し、その主断層とスライスを画する断層系によ り、崩壊面が制約を受けている。

#### スライド 18

まとめ

#### 引用文献

- 千木良雅弘(1989)巨大崩壊発生の地質的要因と土砂生産-赤石山地の堆積岩の崩壊例-. 電中研報告

- 25p.
  25p.
  十木良雅弘(1995)風化と崩壊。近未来社.
  藤田 業(2002)地すベリと地質学。古今書院、244p.
  木村克己(1998)付加体ののは一がまるquence thrust.地質学論集no.50, 131-146.
  木村克己(1900)四万十帯の付加体地質・春良県南部を例にして・十津川災害111周年記念集会-斜面 災害発生場所の予測に向けて、京都大学防災研、5-11.
  木村克己(2015)紀伊半島の付加体地域における深層崩壊発生場所の地質制約. 防災科研研究資料 no.405, 161-165.
  木村克己・今泉文寿・西井稜子・大八木規夫・井口 隆・池田 宏(2013)大井川上流域の「赤崩」の付加 体地質学 日本物質学会第20円学络ナム音楽運車局

- 体地質学 日本地質学会第120年学術大会講演要旨 木村克己・西井稜子(2017)応用地質学会平成29年研究発表会講演論文集、117. 木村 学・木下正高編(2009)付加帯と巨大地震発生帯-南海地震の解明に向けて-東京大学出版会。
- 292c. 西井稜子・木村克己(2018)付加体の地質構造が大規模崩壊の発達に及ぼす影響:南アルブスアレ沢崩 壊の例. 防災科研研究資料, 本号.

防災科学研究所:地すべり地形分布図データベース. GLGArcsのウェブサイト

http://www.glgarcs.rgr.jp/topics/miura/miura\_6.html

#### スライド 19

引用文献

#### 断層・破砕帯とランドスライド:素田・過程・結果

永田秀尚\*

#### 1. はじめに:断層と破砕帯

「この崩壊(地すべり)の素因は断層だ」という説明はしばしば耳にする.しかし,このことはどれくらいきちんと検証されているだろうか? 文献から都合のいいものを探してきただけだったり,調査結果の辻褄合わせの推定断層が素因にさせられてしまっている例も見てきたし,自らもそれに近いことをしてこなかったわけではない.以下では,その反省を込めて,断層とランドスライドとの関係を考えてみる.

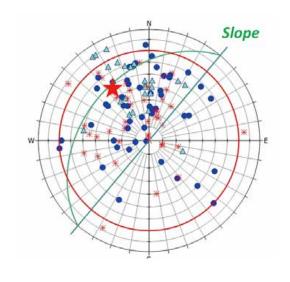
そもそも、地質学での定義としての断層は「面に沿う変位を持つ」ということなので、断層そのものが弱面であるといっているわけではない. 力学的な弱面としてはたらくのは『断層破砕帯』であることに注意しなければならない. たとえば、西南日本外帯で秩父帯と四万十帯を境する仏像構造線はしばしば明瞭な破砕帯を伴わず、存在が不明になることがある. 一般に顕著な破砕帯を伴うとされる中央構造線沿いでも、「長野県大西山の崩壊は中央構造線沿いの圧砕岩(マイロナイト)が素因である」というのは誤りで、マイロナイトそのものは堅硬な岩石である. 中央構造線沿いのランドスライドは、より新しいステージのカタクレーサイトや断層ガウジが素因であ

ることが多い. 付加体内部の断層でもすべてが破砕帯を有してランドスライドの素因となるわけではなく, 現在の位置に至るまでのさまざまなステージを経て破砕帯が形成されてはじめてすべり面となり得るのである. 断層という氏素性と同様に, 破砕帯の形成という「育ち」も重要視しなくてはならない.

#### 2. ランドスライドの素因としての断層破砕帯

地質学的な断層変位の大きさと破砕帯規模の大きさは必ずしも一致しない.とはいえ,脆性的な破断を生じた断層にはそれなりの破砕帯をともない, 亀裂や断層ガウジを形成するので,ひとつは力学的な弱面として,もうひとつは水理的な不連続面としてランドスライドの素因となり得る.

たとえば、2011 年紀伊半島豪雨によって多くの崩壊が生じたが、ほとんど初生と思われる赤谷崩壊では、四万十帯中の付加体ユニット境界断層の破砕帯が主要なすべり面となったらしい<sup>1)2)</sup>. 紀州の四万十帯では多くの場合に層理面が地山の傾斜より急な「逆目盤」の構造となっているので、しばしば誤解されているような流れ盤(柾目盤・平行盤)すべりはほとんど発生せず、本質的には不安定といえない.



● Bedding plane

△ S1 cleavage

\* Minor fault

† Thrust

図1 赤谷崩壊地における面構造の姿勢<sup>3)</sup> 面の極ではなく傾斜ベクトル表示であることに注意. 層理面やそれに平行な劈開面 S1 はバラツキが大きく 高角度のものも多い. スラストが斜面にほぼ平行な流れ目となる.

<sup>\*(</sup>有)風水土

赤谷では断層破砕帯の面がほぼ平行盤となっていた ことが崩壊に至った条件であると考えられる.

#### 3. 破壊面の形成と進展

本来テクトニックなスラスト(逆断層)として形成されたものが、重力性の正断層へと転化する. 私たちはこのような現象を「テクトニック・ノンテクトニック反転」と呼んだ<sup>4)</sup>. 断層運動に伴って剪断帯中に形成される複合面構造の解析から、このような反転が、赤谷崩壊や、隣接する河原樋(東赤谷)の崩壊、四国秩父帯の地すべりで報告されている<sup>5)~7)</sup>. 反転現象の中にはある程度長期的に準備されてきたものがあることが明らかになってきた. 破壊面ないし地すべり面とは異なる箇所にこのような構造が認められるということは、重力性の破断が、最終的な破断面のほかにも多数形成されたことを示す.

素因となり得る弱面があっても、実際にそれがどのような過程で破壊面として形成され、進展してゆくのかについては十分明らかにされていないように思われる。断層ではないが、地形による応力場において、短い割れ目が成長しうることは、破壊力学を用いれば説明が可能である<sup>8)</sup>。 亀裂性の岩盤への適用性について検討は必要だが、ひとつのヒントになるかもしれない。

#### 4. 局所化

破壊面が形成された箇所は崩壊に至るが、そうならない斜面も多く残る. LiDAR による精細な地形図からは日本各地で重力変形斜面を見いだすことができるが、これらのうちどこが、なぜランドスライドに至るのかを考える必要がある.

#### 5. 過程として・結果としてのノンテクトニック断層

重力変形を起こした斜面上には、それが崩壊しなければ、結果として山向きや谷向きの小崖が残ることになる。このような結果としてのノンテクトニック断層地形は、古いものでおよそ10万年前に形成されたものが知られている<sup>9)</sup>。一方、重力性の小崖は、崩壊の前兆としての微地形であることも明らかになってきた<sup>10)</sup>。この場合、それらは長期的な地形変化の過程として一時的に形成されたものであると捉えられる。結果として見えるものが実は過程であるということも少なくないと思われ、両者の判断は

難しい. 残存する、ノンテクトニック断層を含む重力変形地形を調査することの意義はここにもある.

#### 6. 課題

過程であれ結果であれ、地形や地質をよりどころに斜面の運動を評価しようとすれば、以下のような点が検討されるべきだろう.

重力変形地形の形成史:地形や表層堆積物などを手がかりに重力変形地形の形成史を各地で編む必要がある $^{11)}$ など. この中にランドスライドも織り込まれるべきである.

斜面運動の現況把握:最近得られるようになってきた GNSS, SAR, LiDAR データや孔内傾斜計など高精度の計測結果を援用して斜面の変形速度を捉えたり、豪雨や地震といったイベントとの関連性を探る必要がある $^{12)13)}$ .

斜面の評価方法:日本でいえば、整備されてきた高精度 DEM の成果を利用した判読をさらに推進し、「活斜面」の認定を行うことが求められる. そのためには人材育成や体制の整備も必要になってくる. また、どのような基準をもって崩壊の切迫性を評価するかも引き続き検討が望まれる.

#### 参考文献

- 1) 木村克己(2016): 紀伊半島の付加体地域における深層崩壊発生場所の地質制約. 防災科学技術研究所研究資料, No.405, pp.161-165.
- 2) 荒井紀之・千木良雅弘 (2015): 付加体中の低角 逆断層沿いに発生した豪雨に伴う深層崩壊につ いて. 京大防災研年報, No.58B, pp.95-101.
- 3) 横山俊治ほか(2013): 2011 年台風 12 号で発生した奈良県赤谷深層崩壊の地質構造規制. 日本地すべり学会第52回研究発表会講演集, pp.82-83.
- 4) ノンテクトニック断層研究会編著(2015): ノンテクトニック断層:識別方法と事例.近未来社.
- 5) 山根誠ほか (2015): すべり面粘土と断層ガウジ を識別する複合面構造 一秩父帯の地すべりを例 として一. 応用地質, Vol.56, No.3, pp.94-104.
- 6) 山崎 勉(2013):四万十累層群クリープ斜面を形成した深部せん断帯とその破壊. 日本地すべり学会第52回研究発表会講演集, pp.84-85.
- 7) 山崎 勉・横山 修 (2015): 四万十帯クリープ斜 面形成に関わるスラストと崩壊の前駆的変形.

- 日本地すべり学会第 54 回研究発表会講演集, pp.84-85.
- 8) 永田秀尚・藤井義明(2000), 非造構性の節理に 起因する岩盤崩壊の機構-北海道積丹半島セタ カムイ崩壊-. 地形, Vol.21, pp.169-191.
- 9) 小嶋 智ほか(2013):山体重力変形地形の形成 過程:岐阜福井県境の冠山北西および三重県熊 野市ツエノ 峰を例として.地球惑星連合大会, HDS27-08.
- 10) Chigira, M. et al. (2013): Topographic precursors and geologic structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, Geomorphology, Vol.201, pp.479-493.

- 11) 永田秀尚ほか(2016): 北アルプス徳本峠-大 滝山間の重力変形過程. 地球惑星連合大会, HDS17-02.
- 12) 長谷川淳ほか (2016): 三重県東又谷で発生した 大規模崩壊の背後の斜面に見られる変形. 日本 応用地質学会平成 28 年度研究発表会講演論文 集, pp.189-190.
- 13) Chen, RF. *et al.* (2017): Deformation characteristics and surface monitoring of deep-seated gravitational slope deformation in the Tienchih area, southern Taiwan, Program and Abstracts 4th Slope Tectonics Conference, p.39.

## 阿蘇カルデラ西部,高野尾羽根溶岩円頂丘における斜面崩壊の履歴

木村 誇\*·酒井 直樹\*

## Landslide History on Hillslopes of the Takanoobane Lava Dome, Western Part of Aso Caldera, Japan

Takashi KIMURA and Naoki SAKAI

\*Storm, Flood and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
kimurat@bosai.go.jp, sakai@bosai.go.jp

#### **Abstract**

LiDAR-based geomorphological maps allowed us to find many hollows, which could be formed by episodic landslide erosion of tephra fallout deposits overlying the slopes of the Takanoobane lava dome (TLD; 51 ka), where the Takanodai landslide, the most hazardous landslide in the 2016  $M_W$  7.0 Kumamoto earthquake, took place. We conducted tephrostratigraphic investigations at around a 130-m-wide hollow on south-facing slope of the TLD together with the head scarp of the Takanodai landslide. It was revealed that tephra fallout deposits at the centre of the hollow was only 4.70 m thick with absence of three key layers produced by prehistoric plinian eruptions of the Aso and other volcanoes between 30 and 7.3 ka (i.e., Kpfa, AT and K-Ah), while those developed during the past 30,000 years, including the above three key layers, were well preserved at the head scarp of the Takanodai landslide. Calibrated  $^{14}$ C age of 7164–6976 cal BP (2 $\sigma$ ) was obtained from a buried paleosol that covered the unconformity at the centre of the hollow, indicating occurrence of a landslide about 7,200–7,000 years ago (71 ka). This landslide could be triggered by a paleoearthquake, which was as yet unknown around the western part of Aso caldera.

**Key words**: Earthquake-induced landslide, Tephra fallout deposit, Takanoobane lava dome (TLD), Paleosol, Aso caldera

## 1. はじめに

2016年熊本地震により阿蘇カルデラ西部地域を中心に多数の地すべり・斜面崩壊が発生した(防災科学技術研究所, 2016;土志田ほか, 2016;福岡・酒井, 2016;石川ほか, 2016;宮縁, 2016a,b;木村ほか, 2017b;木村・酒井, 2017;酒井ほか, 2017).中でも、高野尾羽根溶岩円頂丘(南阿蘇村河陽の京都大学火山研究センターがある丘:図1)の緩斜面で発生した地すべり(以下,高野台地すべりとする)は、今回の地震による土砂災害としては最も甚大な被害を

もたらした事例である.

高野台地すべりは勾配 10°程度の非常に緩やかな 斜面で発生した点や、溶岩円頂丘を覆う火山灰土層 が流水の関与なく長距離移動した点で注目されてお り(福岡・酒井, 2016;釜井, 2016;宮縁, 2016a; 王ほか, 2016;奥野ほか, 2016),素因となる地形・ 地質条件が調査されているほか(釜井, 2016;宮縁, 2016a,b;高木ほか, 2017;佐藤ほか, 2017),土質 試験や数値シミュレーションをもとに地すべりの発 生機構や移動土塊の流動過程が検討されている(例

<sup>\*</sup> 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

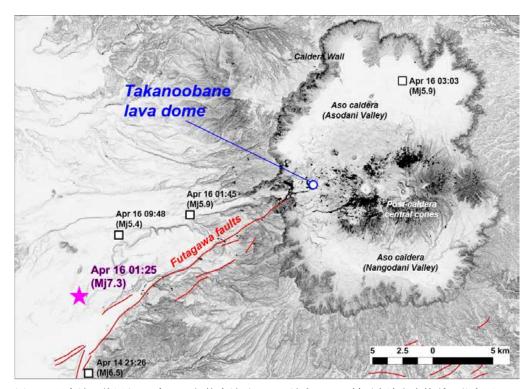


図1 調査地の位置および 2016 年熊本地震による地すべり・斜面崩壊発生箇所の分布図 Fig. 1 Location map of the study site with the spatial distribution of landslides and slope failures induced by the 2016 Kumamoto earthquake.

えば、Dang et al., 2016; 王ほか, 2016; 長谷川ほか, 2017; 田中ほか, 2017). 一方で、今後の地震による土砂災害危険性を評価するためには、高野尾羽根溶岩円頂丘のような火山灰土層に覆われた緩斜面の崩壊履歴を明らかにすることも重要である.

本稿では、高野台地すべりの隣接斜面で発見された崩壊跡とみられる馬蹄形凹地で地質調査を行い、 火山灰編年法と放射性炭素年代測定法を用いて崩壊 発生年代を推定した結果を報告する.この結果に既 往研究で報告されていた岩屑なだれ(宮縁ほか、2003) の発生年代を交え、高野尾羽根溶岩円頂丘における 地すべり・斜面崩壊の発生頻度や誘因を議論する.

#### 2. 調査地

高野尾羽根溶岩円頂丘は 51,000 年前頃 (51 ka: 松本ほか, 1991) の流紋岩質溶岩の噴出によって形成された独立丘 (底面径 700 m, 標高 567 m:渡辺, 2001) であり、 $5 \sim 20^\circ$  程度の緩斜面をもつ.

地表は溶岩円頂丘の形成以降に降下した未固結の 火砕物を主体とする火山灰土層に覆われる. 層全体 の厚さは最大13 m 程度であり(宮縁ほか, 2004), 阿蘇カルデラ形成以降(90 ka~: 小野・渡辺, 1985) で最大級の噴火堆積物である草千里ヶ浜軽石 (Kpfa; 30 ka:渡辺ほか, 1982; Miyabuchi, 2009) のほか, 広域テフラの姶良 Tn 火山灰 (AT; 29 ka: Machida and Arai, 1983; 奥野, 2002; 町田・新井, 2003) や鬼界アカホヤ火山灰 (K-Ah; 7.3 ka:町田・新井, 1978, 2003; 奥野, 2002) が挟在している (宮縁ほか, 2003; Miyabuchi, 2009).

高野尾羽根溶岩円頂丘の南西向き斜面で発生した 高野台地すべりは Kpfa の底面付近にすべり面を形成し(石川ほか,2016;釜井,2016;王ほか,2016; 佐藤ほか,2017),過去約30,000年間に発達した火山灰土層を削剥した(宮縁,2016a,b).一方,図2に示すように、地震前(2013年1月)の航空レーザ測量データをもとに作成した詳細地形図上では、火山灰土層が削剥されてできたとみられる凹地が多数見つかっている(木村ほか,2017a,c;Kimura et al.,2017).

今回の調査は、高野台地すべりに隣接する南向き 斜面で見つかった馬蹄形の遷急線に囲まれた幅約 130 m の凹地(H1)を対象とした.この馬蹄形凹地に ついては、石川ほか(2016)も過去の斜面変動領域で ある可能性を指摘している.

#### 3. 調查方法

地震前(2013年1月:国土交通省九州地方整備局・ 熊本河川国道事務所による)と地震直後(2016年4 月下旬:熊本県土木部砂防課による)に実施された 航空レーザ測量データをもとに1mメッシュ DEM を構築し、地形判読に用いる詳細地形図を作成した. 上記 DEM の標高差分から地震前後での地形変化量 を算出し、詳細地形図上に重ね合わせた(図2).これらの図と防災科学技術研究所水・土砂防災部門が 地震前後の空中写真等から判読した土砂移動分布図 (防災科学技術研究所,2016)を用いて、2016年熊 本地震による斜面変動域(地すべり・斜面崩壊による土砂移動範囲)と過去の崩壊跡とみられる凹地の 判読を行った.

次に、高野台地すべりが発生した南西向き斜面と それに隣接する南向き斜面で地質調査を行った.地 質調査地点の位置を図2に示す.南西向き斜面では、 地すべり頭部滑落崖の露頭観察を行い、火山灰土層 の層序を記載するとともに年代指標となる降下火山 灰層や古土壌層の試料を採取した.南向き斜面では、 凹地の中央と溶岩円頂丘の頂部斜面の2箇所でボー リング調査を行い(酒井ほか、2017)、同様に層序の 記載と試料採取を行った.

採取試料のうち,降下火山灰試料については,全 鉱物組成,重鉱物組成,火山ガラス形態分類を分析 した上で、火山ガラスと斜方輝石の屈折率を測定した. 古土壌試料については、 $300 \mu m$  の篩分けおよび酸処理を施して植物根等の形のある有機物や炭酸塩を除去し、残存した全有機炭素を用いて AMS 法による放射性炭素年代測定を行った. 測定で得られた  $^{14}$ C 年代値は  $IntCal\ 13$  データベース (Reimer et al., 2013) に基づき、 $OxCal\ 4.2$  プログラム (Bronk Ramsey, 2009) を用いて暦年較正した.

#### 4. 結果

#### 4.1 火山灰土層の層序学的特徴

高野台地すべりの頭部滑落崖露頭および凹地の中央 (BV28-1) と溶岩円頂丘の頂部斜面 (BV28-2) の 2 箇所で掘削したボーリングコアの地質柱状図を図 3 に示す。BV28-1 の火山灰土層厚は 4.70 m と薄く、鍵層となる K-Ah、AT、Kpfa を欠いた。0.00~2.30 m深にあるロームークロボク土層の下位には、炭質物や Kpfa とみられる橙色軽石粒が混じるローム基質の乱れた土層が挟在していた。一方、3.15~3.30 m深にある黄色砂質火山灰層は上下の境界が明瞭で乱れが少なかった。その下位にある暗褐色古土 壊層は 3.60 m 深付近で褐色火山灰土に漸移し、4.70 m 以深の高野尾羽根溶岩 (4.70~6.45 m 深は数十 cm 径の溶岩片を多く含むローム基質の層になっており、溶岩流の自破砕部やそれを主体とする崩積

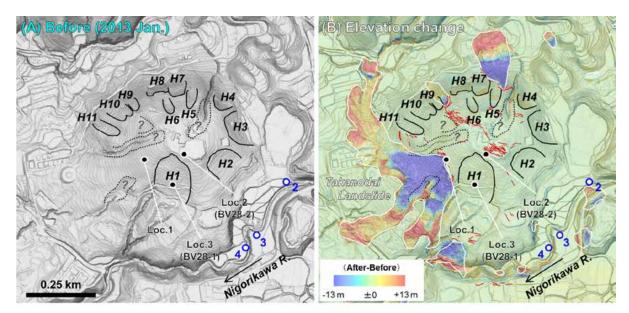


図2 高野尾羽根溶岩円頂丘における凹地形の分布(A)と2016年熊本地震による地形変化量(B). 両図の右下にある 青点は宮縁ほか(2003)が濁川岩屑なだれ堆積物(NgDA)を発見した地点を示している.

**Fig. 2** Geomorphological maps of the Takanoobane lava dome, showing (A) the spatial distribution of hollows and (B) elevation changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake. Blue dots at the lower right of the both figures indicate localities of the Nigorikawa debris-avalanche deposit (NgDA) found by Miyabuchi *et al.* (2003).

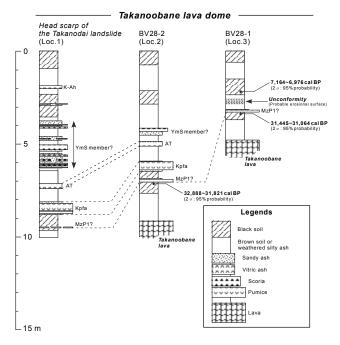


図3 高野台地すべりの頭部滑落崖露頭およびボーリン グコア BV28-1, BV28-2 の地質柱状図.

**Fig. 3** Geological profiles of the outcrop at the head scarp of the Takanodai landslide and the two boring core samples (BV28-1 and BV28-2).

土とみられる)を覆っていた.

BV28-2 の火山灰土層は 9.15 m と BV28-1 に比べて厚く, 鍵層となる AT と Kpfa が認められた。また、Kpfa の下位の  $6.80 \sim 7.00 \text{ m}$  深に BV28-1 の  $3.15 \sim 3.30 \text{ m}$  深にあるものと層相や鉱物組成のきわめてよく似た黄色砂質火山灰層を挟んでいた。

#### 4.2 古土壌層の <sup>14</sup>C 年代値

BV28-1 の 2.20 m 深にあるクロボクと 3.35 m 深にある暗褐色古土壌の放射性炭素年代を測定した結果,暦年較正  $^{14}$ C 年代  $(2\sigma)$  として 7164-6976 cal BP (5214-5026 cal B.C.) と 31445-31064 cal BP (29495-29114 cal B.C.) がそれぞれ得られた.また,BV28-2の 7.10 m 深にある暗褐色古土壌からは 32888-31821 cal BP (30938-29871 cal B.C.) という暦年較正  $^{14}$ C 年代  $(2\sigma)$  が得られた.

#### 5. 考察

ボーリング調査を行った凹地 (H1) の中央 (BV28-1) と溶岩円頂丘の頂部斜面 (BV28-2) の両コアに認められた黄色砂質火山灰層は,直下の暗褐色古土壌の  $^{14}$ C 年代が  $31\sim32$  ka であったことから,いずれも Kpfa の下位の水ノ元第 1 軽石 (MzP1; 31 ka: 宮

縁ほか,2003; Miyabuchi,2009,2011) に対比される. 凹地中央のボーリングコアにおいて,MzP1 に対比された火山灰層の上位に鍵層となる火山灰層 (Kpfa,AT,K-Ah) は存在せず,厚さ0.85 m程度の乱れた土層 (2.30~3.15 m深) を挟んで,その上位は7.1 ka頃以降に発達したロームークロボク主体の火山灰土層に覆われていた。よって,KpfaからK-Ahまでを含む過去約23,000年間(30~7.3 ka)に発達した火山灰土層が削剥されていたと解釈される。この凹地が降雨では地すべりが起こらないような緩斜面(5~15°) にあることと合わせると,K-Ah降下直後の時期に阿蘇カルデラ西部地域を強い地震が襲い,2016年熊本地震時の高野台地すべりと類似の土砂移動現象が発生していた可能性がある。

高野尾羽根溶岩円頂丘の西~南側を流れる濁川の河岸では、弥生時代中期の河陽 F 遺跡 (岡本, 2003)を埋める厚さ最大 3 m 程度の粘土~シルト質の火山灰土からなる堆積物 (濁川岩屑なだれ堆積物: NgDA) が見つかっている。また、その堆積物に埋没した木片試料からは 2350-2050 cal BP (400-100 cal B.C.) という暦年較正 <sup>14</sup>C 年代 (2 $\sigma$ ) が得られている (宮縁ほか、2003).

宮縁 (2016a, b) は、流水の関与がほとんど認められない NgDA の産状から、2.2 ka 頃の地震によって発生した斜面崩壊に伴う岩屑なだれ堆積物 (宇井、1987, 1997; Ui et al., 1986, 2000) ではないかと述べている。発生域は濁川流域内とされているが (宮縁ほか、2003)、未固結な火山灰土からなる移動体が流水と混合して泥流化することなく濁川沿いを流下してきたとは考えにくい。むしろ、NgDA の分布域に近接する斜面を発生域と考えた方がその産状とも整合する。図2に示した宮縁ほか (2003)が NgDA を発見した地点と高野尾羽根溶岩円頂丘の斜面上にある凹地との位置関係からは、南東向き斜面にある幅約 100 m の馬蹄形凹地 (H2) が有力視される。

NgDA の発生域が高野尾羽根溶岩円頂丘の南東向き斜面であったとすれば、2016 年熊本地震を含め最近約7,300 年間に3回の地すべり・斜面崩壊が発生していたことになり、発生頻度は2,400 年に1回程度と見積もられる。2016 年以前の2回についても地震が誘因となった可能性が高いため、この発生頻度は阿蘇カルデラ西部地域における過去の大規模地震の頻度を反映したものと考えられる。

同地域における震源としては阿蘇火山の火山活動 (火山性地震)や近傍の活断層群の活動が挙げられる。今回の地震の震源となった布田川 - 日奈久断層 帯の活動履歴は地震後の調査で大きく見直されつつ あるため(Lin et al., 2017), 高野尾羽根溶岩円頂丘に おける地すべり・斜面崩壊の発生頻度と古地震との 関連性については、今後さらに検討を進める必要が ある。

#### 6. まとめ

2016年熊本地震で発生した高野台地すべりに隣接する南向き斜面の馬蹄形凹地で地質調査を行った結果,この凹地が Kpfa から K-Ah までを含む過去約23,000年間に発達した火山灰土層を削剥する大規模な土砂移動現象によって形成されたものであることが明らかとなり,その発生年代は7.1 ka 頃と推定された.

既往研究で報告されていた 2.2 ka 頃の濁川岩屑なだれ (宮縁ほか, 2003) も含めて, 過去に阿蘇カルデラ西部地域を強い地震が繰り返し襲い, 2016 年熊本地震時の高野台地すべりと類似の土砂移動現象が発生していた可能性がある.

### 謝辞

本稿には、平成28年度文部科学省熊本地震復旧等予備費事業の成果の一部を用いました. 地震前後の航空レーザ測量データは熊本県土木部砂防課より提供いただきました. 現地調査の実施にあたっては、熊本県、熊本大学減災型社会システム実践研究教育センター、京都大学火山研究センターならびに京都大学防災研究所の方々に多くのご協力を賜りました. また、防災科学技術研究所社会防災システム研究部門の仙波望さんには実験室での試料分析にご協力を賜りました.

#### 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所(2016): 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門「熊本地震による土砂移動分布図(2016.6.27 更新)」. (http://www.bosai.go.jp/mizu/dosha.html, 2017.9.8)
- 2) Bronk Ramsey, C. (2009): Bayesian analysis of radiocarbon dates, Radiocarbon, Vol. 51, No. 1, 337–360.
- 3) Dang, K., Sassa, K., Fukuoka, H., Sakai, N., Sato,

- Y., Takara, K., Quang, L.H., Loi, D.H., Tien, P.V., and Ha, N.D. (2016): Mechanism of two rapid and long-runout landslides in the 16 April 2016 Kumamoto earthquake using a ring-shear apparatus and computer simulation (LS-RAPID), Landslides, Vol. 13, No. 6, 1525–1534.
- 4) 土志田正二・新井場公徳・尾川義雄 (2016): 2016年4月16日に発生した熊本地震による南 阿蘇村周辺の斜面崩壊事例. 日本地すべり学会 誌, Vol. 53, No. 3, 100-104.
- 5) 福岡 浩・酒井直樹 (2016): 平成 28 年熊本地震 による南阿蘇村地域における地すべり災害の初 動調査. 日本地すべり学会誌, Vol. 53, No. 3, 95-99
- 6) 長谷川陽一・柴崎達也・和田大祐・川嶋睦義 (2017): 高野台地区地すべりの試料を用いて 液状化強度を求めた繰返し非排水一面せん断試 験. 第56回日本地すべり学会研究発表会講演集, 146-147.
- 7) 石川芳治・久保田哲也・青戸一峰・飯島康夫・ 井川寿之・池上忠・池田誠・植弘隆・上原祐治・ 内村雄一・江川佳苗・大石博之・岡野和行・海 堀正博・桂真也・加藤誠章・川原慎一郎・古賀 省三・坂島俊彦・相楽渉・地頭薗隆・篠原慶規・ 清水収・下田義文・鈴木滋・鈴木正美・瀬戸康平・ 田方智・寺田秀樹・寺本行芳・堂ノ脇将光・飛 岡啓之・鳥田英司・中濃耕司・西川友章・花田 良太・平川泰之・福塚康三郎・藤澤康弘・藤田 正治・正木光一・宮田直樹・山口和也・山下伸 太郎・山根誠・横尾公博(2016):平成28年熊本 地震による土砂災害、砂防学会誌, Vol. 69, No. 3, 55-66.
- 8) 釜井俊孝 (2016): 2016 年熊本地震による斜面災害. 日本地震工学会誌, No.**29**, 27-32.
- 9) 木村 誇・酒井直樹 (2017): リモートセンシン グによる熊本地震後の斜面・地盤変動の広域的 評価. 防災科学技術研究所研究資料, No. 411, 177-182.
- 10) 木村 誇・酒井直樹・田中義朗・長倉 賢・松谷和彦(2017a):阿蘇火山高野尾羽根溶岩ドームの降下火砕物斜面で発見された古期地すべりとその発生年代.日本地球惑星科学連合2017年大会HDS17-01.

- 11) 木村 誇・酒井直樹・上石 勲・寳楽 裕・園部雅 史・木村詩織・下村博之・武田大典・吉川和男 (2017b): 衛星画像解析による熊本地震被災地域 の斜面・地盤変動調査 – 多時期ペアの差分干渉 SAR 解析による地震後の変動抽出 – . 防災科学 技術研究所研究資料, No. 412, 107pp.
- 12) 木村 誇・酒井直樹・田中義朗・長倉 賢・松谷 和彦(2017c):阿蘇火山高野尾羽根溶岩円頂丘で 発見された古期地すべりの発生年代推定.日本 火山学会 2017 年度秋季大会講演予稿集,92.
- 13) Kimura, T., Sato, G., Higaki, D., Hayashi, S., Doshida, S., Wakai, A., Goto, S., and Sakai, N. (2017): Landslide history in post-caldera central cones of Aso volcano, Japan. Abstracts of the 4th Slope Tectonics Conference, 87.
- 14) Lin, A., Chen, P., Satsukawa, T., Sado, K., Takahashi, N., and Hirata, S. (2017): Millennium recurrence interval of morphogenic earthquakes on the seismogenic fault zone that triggered the 2016 M<sub>w</sub>7.1 Kumamoto earthquake, southwest Japan. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 107, No. 6, 2687–2702.
- 15) 町田 洋・新井房夫(1978): 南九州鬼界カルデラから噴出した広域テフラーアカホヤ火山灰. 第四紀研究, Vol. 17, No. 3, 143-163.
- 16) Machida, H. and Arai, F. (1983): Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large late Quaternary eruptions. Volcanology and Geothermal Research, Vol. 18, No. 1-4, 151–164.
- 17) 町田 洋・新井房夫 (2003): 新編 火山灰アトラス一日本列島とその周辺. 336pp, 東京大学出版会.
- 18) 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳(1991): 阿蘇火山岩類の K-Ar 年代測定一火山層序との 整合性と火砕流試料への適応一. 日本火山学会 1991 年度秋季大会講演予稿集, 73.
- 19) Miyabuchi, Y. (2009): A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan. Sedimentary Geology, Vol. 220, No. 3-4, 169–189.
- 20) Miyabuchi, Y. (2011): Post-caldera explosive activity inferred from improved 67-30 ka tephrostratigraphy at Aso Volcano, Japan. Journal

- of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 205, No. 3, 94–113.
- 21) 宮縁育夫 (2016a): 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震 によって南阿蘇村周辺域で発生した斜面災害. 地学雑誌, Vol. 125, No. 3, 421-429.
- 22) 宮縁育夫 (2016b): 2016 年熊本地震によって阿蘇カルデラ内で発生した斜面崩壊のテフラ層序学的特徴. 日本火山学会 2016 年度秋季大会講演予稿集,81.
- 23) 宮縁育夫・渡辺一徳・岡本真也 (2003): 阿蘇中央火口丘群西側斜面で発見された岩屑堆積物とそれらの <sup>14</sup>C 年代. 火山, Vol. 48, No. 2, 229-234.
- 24) 宮縁育夫・増田直朗・渡辺一徳 (2004): 溶岩流 とテフラとの層序関係からみた阿蘇火山中央火 口丘群西部地域の発達史.火山, Vol. 49, No. 5, 267-282.
- 25) 岡本真也 (2003):河陽 F 遺跡. 熊本県文化財調 查報告第 209 集, 320pp, 熊本県教育委員会.
- 26) 奥野 充(2002): 南九州に分布する最近約 3 万年 間のテフラの年代学的研究. 第四紀研究, Vol. 41, No. 4, 225-236.
- 27) 奥野 充・鳥井真之・西山賢一・中西利典・横田 修一郎・井口 隆・高見智之・加藤靖郎・宮崎精介・ 長谷中利昭・北園芳人・九州応用地質学会熊本 地震 WG (2016): 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震 で誘発された阿蘇カルデラ内のアースフロー堆 積物. 日本応用地質学会九州支部・九州応用地 質学会平成 28 年度(第 32 回)研究発表会論文集, 47-50.
- 28) 小野晃司・渡辺一徳 (1985): 阿蘇火山地質図 (5万分の1). 火山地質図 4, 地質調査所.
- 29) 王功輝・土井一生・釜井俊孝(2016): 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震時に生じた南阿蘇村の流動性崩壊. 第 55 回日本地すべり学会研究発表会講演集, 56-57.
- 30) Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott,

- E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M., and van der Plicht, J. (2013): IntCall3 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP, Radiocarbon, Vol. 55, No. 4, 1869–1887.
- 31) 酒井直樹・木村 誇・上石 勲・田中義朗・村松 広久・九鬼和広・水谷 佑・長倉 賢・近藤雅信・高野正範・植野 亮(2017):熊本地震被災地域に おける地形・地盤情報の整備—航空レーザ計測 と地上観測調査に基づいた防災情報データベースの構築—. 防災科学技術研究所研究資料, No. 413, 154pp.
- 32) 佐藤達樹・千木良雅弘・松四雄騎(2017): 2016 年熊本地震により発生した阿蘇カルデラ西部に おける斜面崩壊の地形・地質的特徴. 京都大学 防災研究所年報, No. 60B, 431-452.
- 33) 高木将行・児玉 浩・石井靖雄・藤平 大(2017): 熊本県南阿蘇村高野台地区で発生した地すべり の地質的特徴. 第 56 回日本地すべり学会研究発 表会講演集, 167-168.
- 34) 田中大貴・笠間清伸・古川全太郎・山縣史郎 (2017): 熊本地震による崩壊斜面の形状分析と

- 草千里ヶ浜火山降下軽石の土質特性. 第 56 回日本地すべり学会研究発表会講演集, 152-153.
- 35) 宇井忠英(1987): 火山体で発生する岩屑流の流動プロセス. 地形, Vol. 8, No. 2, 83-93.
- 36) 宇井忠英(1997): 火山現象の多様性, 宇井忠英(編)「火山噴火と災害」, 17-47, 東京大学出版会.
- 37) Ui, T., Yamamoto, H. and Suzuki-Kamata, K. (1986): Characterization of debris avalanche deposits in Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 29, No. 1-4, 231–243.
- 38) Ui, T., Takarada, S. and Yoshimoto, M. (2000): Debris avalanches, In Encyclopedia of Volcanoes, edited by Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J. and McNutt, S., 617–626, Academic Press.
- 39) 渡辺一徳・小野晃司・平塚勝一(1982): 草千里ヶ 浜火山の軽石噴火について.火山, Vol. 27, No. 4,337-338.
- 40) 渡辺一徳 (2001): 阿蘇火山の生い立ち一地質が 語る大地の鼓動一. 一の宮町史編纂委員会(編) 「一の宮町史 自然と文化 阿蘇選書 7」, 241pp, 熊本県阿蘇郡一の宮町.

#### 要旨

2016 年熊本地震により,阿蘇カルデラ西部の高野尾羽根溶岩円頂丘の南西向き斜面で大規模な地すべり(高野台地すべり)が発生し,甚大な被害をもたらした.地震前の航空レーザ測量データから作成した詳細地形図上では,地すべり・斜面崩壊により降下火砕物層が削剥されてできたとみられる凹地が高野台地すべりの発生箇所周辺に多数認められた.高野台地すべりの頭部滑落崖と隣接する南向き斜面にある幅約 130 m の凹地で地質調査を行った結果,高野台地すべりの発生箇所では 3 枚の鍵層 (30 ka の草千里ヶ浜軽石,29 ka の姶良 Tn 火山灰,7.3 ka の鬼界アカホヤ火山灰)を含む過去約 30,000 年間に発達した降下火砕物層が残されていた一方で,凹地中央の降下火砕物層は厚さ 4.7 m しかなく,3 枚の鍵層をいずれも欠くことがわかった.また,凹地中央の不整合面を覆う埋没古土壌(クロボク)からは 7164-6976 cal BP という暦年較正  $^{14}$ C 年代( $^{26}$ )が得られた.以上より,高野尾羽根溶岩円頂丘では約7,200 ~ 7,000 年前 (71 ka) 頃にも地すべりが発生していたことが示唆される.その誘因として阿蘇カルデラ西部地域を襲った未詳の古地震が考えられる.

キーワード:地震地すべり,降下火砕物層,古土壌,高野尾羽根溶岩円頂丘,阿蘇カルデラ

## 改測で明らかになった熊本地震の地表の水平変動の向きと崩壊面積率の関わり

佐藤 浩\*・宇根 寛\*\*

## Relation between Horizontal Direction of Crustal Surface Deformation and Slope Failure Area Ratio Revealed by Triangulation Point Renewal Survey

Hiroshi P. SATO\* and Hiroshi UNE\*\*

\*College of Humanities and Sciences, Nihon University satou.hiroshi37@nihon-u.ac.jp

キーワード:地震,地殻変動,斜面,異方性

Key words: Earthquake, Crustal deformation, Slope, Orientation bias

#### 1. はじめに

熊本地震(平成28年4月16日: Mj7.3)によって、 布田川断層から北西側の益城町と西原村に設置された地震計から東向きの永久変位が捉えられた<sup>1)</sup>.本地震による斜面崩壊面積率の斜面方位に応じた傾向が、布田川断層の北西側と南東側で明らかに違うことを指摘された<sup>2)</sup>.この違いが地殻変動に起因していると考え、地震時の三角点変動<sup>3)</sup>から内挿・計算した地殻変動の水平の向きと斜面崩壊分布データ(http://www.bosai.go.jp/mizu/dosha.html)を重ね合わせ、断層からの距離ごとの崩壊面積率(地殻変動のある向きの面積のうち崩壊した面積の割合)を算出した.

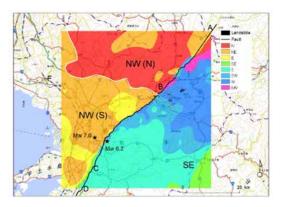


図1 地殻変動の水平の向きと対象とした斜面崩壊

#### 2. 結果とまとめ

2 時期の航空レーザ計測による阿蘇カルデラ地域における地表変位<sup>4)</sup>を参考に、地震前後の布田川断層の北西側と南西側に分けた. **図1**に、求めた地殻変動の水平の向きと断層から8km以内にある崩壊を示す.

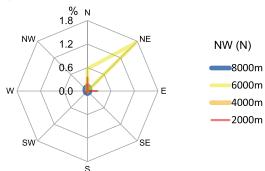


図2 断層から北西側(北部分)の崩壊面積率

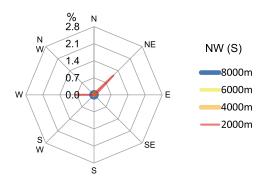


図3 断層から北西側(南部分)の崩壊面積率

<sup>\*\*</sup>Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of Japan

<sup>\*</sup>日本大学文理学部

<sup>\*\*</sup> 国土地理院地理地殻活動研究センター

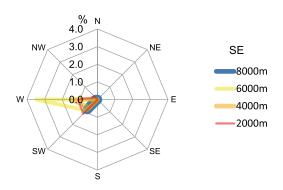


図4 断層から南東側の崩壊面積率

また, 図2~4に, 地殻変動の水平の向き(8方位)に応じた崩壊面積率を示す. 北西側については地殻変動の向きの違いに着目して, さらに北部分と南部分に細分類した. 図3では西向きにも異方性が見られ, 局所の変動の影響を受けている可能性もある.

図2~4 を見ると、距離帯 2,000 m と 6,000 m を中心に、断層から北西側では北東向きに異方性が認められ、南東側では西向きに異方性が認められ、地殻変動の水平の向きと崩壊面積率に関連性があることが示唆された.

#### 参考文献

- 1) 岩田知孝 (2016): 益城町宮園・西原村小森本震 記録の解析. http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/topics /masiki-nishihara0428ver2.pdf (平成 29 年 12 月 20 日参照)
- 2) 佐藤 浩・宇根 寛 (2016): 2016 年熊本地震に よる斜面崩壊の異方性. 第 55 回地すべり学会発 表会予稿.
- 3) 国土地理院(2017): 九州・沖縄地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **97**, 10-4.
- 4) 向山 栄・佐藤 匠・高見智之・西村智博(2016): 2 時期の航空レーザ計測地形データ解析による 平成 28 年(2016 年):熊本地震前後の阿蘇カ ルデラ地域における地表変位. http://www.jseg. or.jp/00-main/pdf/20160822\_kumamoto\_rep.pdf(平成 29 年 12 月 20 日参照)

## 熊本地震高野台地区地すべりの試料を用いて液状化強度を求めた 繰返し非排水一面せん断試験

長谷川陽一\*·柴崎達也\*\*·和田大祐\*\*·川嶋睦義\*\*

キーワード:間隙水圧測定,一面せん断機構,草千里ヶ浜軽石,乱さない試料,繰返し非排水三軸試験

#### 1. はじめに

筆者は、乱さずに採取した地すべりのすべり面試料の強度を一面せん断によって計測しながら、かつ、供試体各所で発生する間隙水圧を精度良く測定することで、地すべりが滑動する際のすべり面の間隙水圧挙動を評価できるようにすることを目的として、非排水一面せん断試験装置を開発した(特許 6103658号)1). 本稿では、平成28年熊本地震で発生した高野台地すべりのすべり面である草千里ヶ浜軽石(以下 Kpfa)を用いて実施した、繰返し非排水一面せん断試験(以下一面 Test)および繰返し非排水三軸試験(以下三軸 Test)の結果について報告する.

#### 2. 試験概要

Kpfa を採取した高野台地区地すべり(B, Cブロック)の平面図を図1に示す。B-1 および C-1 地点は B ブロックおよび C ブロックの滑落崖直下である。試験試料は各地点で土塊が滑動せずに残っている箇所を手掘りで掘削してブロックサンプリングしており、この位置における土塊は地すべりブロック内と比較してあまり乱されていないと判断されることから、"地すべりが滑動する前の状態を保っている"と 仮定して試験を実施している。

B-1, C-1 地点における Kpfa の写真および各種物理試験を写真 1 および表 1 に示す。試料に触ってみると、C-1 地点の Kpfa は乾いており、間隙が疎で、粘着力のない砂・礫質土の様相を呈している。B-1 地点の Kpfa は湿っており、間隙が密で、粘着力がある粘性土の様相を呈している。どちらの Kpfa も軽石を手で潰すと水がしみ出てくる。

試験装置の概要 (供試体サイズ等) については長谷川ら 1) の文献を参照いただきたい. 一面 Test は, 土

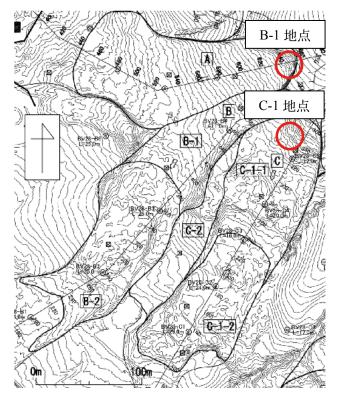


図1 高野台地区平面図(B, Cブロック)





**写真1** 草千里ヶ浜軽石(左: C-1, 右: B-1)

の繰返し非排水三軸試験方法 (JGS 0541-2009) を参 考にして試験方法を決定した. 一面 Test と三軸 Test

<sup>\*</sup>国土防災技術株式会社, 現国土技術政策総合研究所

<sup>\*\*</sup> 国土防災技術株式会社

					<b>AX</b> 1 1/1/1	生机物火巾口	*					
	土粒子	自然		粒度	分布(%)		コ	ンシス	テンシー		湿潤	乾燥
試料名	の密度	含水比	礫分	砂分	シルト分	粘土分	液性 限界	塑性 限界	塑性 指数	液性 指数	密度	密度
<b>武</b> 村名	$ ho_{ m s}$ $({ m g/cm}^3)$	W <sub>n</sub> (%)	2-75 mm	0.075-2 mm	0.005 -0.075 mm	0.005 mm未満	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	${ m I}_{ m P}$	${ m I_L}$	$ ho_{ m t}$ $({ m g/cm}^3)$	$ ho_{ m d}$ $({ m g/cm}^3)$
C-1	2.53	101	3	50	29	19	131	101	30	0.0	1.12	0.53
B-1	2.55	155	0	33	32	36	209	92	117	0.5	1.27	0.46

表1 物理試驗結果

表 2 試験条件

討	<b></b>	試験種	圧密応力 σc (kN/m²)	背圧 (kN/m²)	初期 せん断応力 τ i (kN/m²)	ή	繰返し応力振幅比 τ d/σ c			
	C-1	一面Test	160	100	0	0.194	0.234	0.251	0.287	0.2
	C-1	三軸Test	160	100	0	0.291	0.303	0.331	0.353	0.2
	B-1	一面Test	157.7	100	27.8	0.252	0.227			0.2
	D-1	三軸Test	160	100	0	0.350	0.370	0.390		0.2

の試験条件について表2に示す。B-1地点の一面 Test は、原位置のすべり面傾斜10°を想定して土被 り圧によるすべり面の垂直応力およびせん断応力を 計算し、初期せん断応力を与えてから繰返し載荷を 行っている。

#### 3. 試験結果と考察

一面せん断ではせん断ひずみ $\gamma$ の定義が難しいが、大藤ら $^{2)}$ の実験結果を参考にし、① $\gamma$ は軸ひずみ $\epsilon$ の2倍とし、②せん断高さ H'(せん断域幅)は供試体長さ L の 0.25 倍としたうえで、三軸 Test における軸ひずみ DA5% のときのせん断変位両振幅  $\delta$ 5%を 1.75 mm、DA10%のときのせん断変位両振幅  $\delta$ 10%を 3.5 mm とした( $\gamma$ =2 $\epsilon$ ,  $\gamma$ = $\delta$ /H', H'=0.25L).

C-1 地点の一面 Test および三軸 Test の液状化強度 曲線を図2 に示す。繰返し回数 Nc が 20 回のとき の過剰間隙水圧比 Nu95 % の繰返し応力振幅比 (液状化強度) は,一面 Test は三軸 Test の 3 分の 2 程度 となっており,静止土圧係数  $K_0$  を 0.5 と仮定する と理論通り  $^3$ )である。また,三軸 Test では DA5 %,DA10 %,Nu95 % の液状化強度がほぼ同じなのに 対し,一面 Test では DA5 % の強度が低く,Nu が 95 % に達する前に変形が大きく発生する特徴がみられた.

B-1 地点の一面 Test および三軸 Test の液状化強度 曲線を図3 に示す. 試料の物性の違いにより, B-1 地点の三軸 Test の液状化強度は C-1 地点より少し大 きくなっている. 初期せん断応力を与えた一面 Test

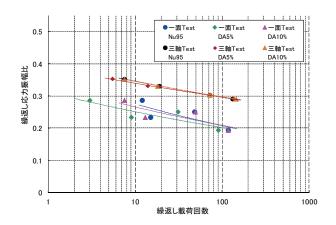


図2 液状化強度曲線(C-1)

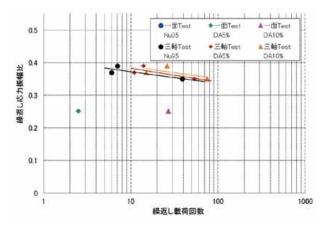


図3 液状化強度曲線(B-1)

では、繰返し載荷が片振り載荷になっている影響で Nuが95%に達するような挙動はみられなかったが、 DA5%の強度は C-1 地点の一面 Test よりも低くなっ ている.

#### 4. おわりに

一面 Test では三軸 Test と比較して DA5 % の強度 が特に低く、過剰間隙水圧比が 95 % に達する前に 変形が大きく発生する特徴がみられた. この挙動の 違いは試験機構の違いによるものと判断される. また、初期せん断応力を与えた試験では、与えなかった試験よりもさらに DA5 % の強度が低く、実斜面が不安定化する強度は三軸 Test で評価される液状化強度よりもずっと低いことが示唆された. 以上から、今回のような特定のすべり面を想定した液状化強度を把握する場合は、一面 Test (繰返し非排水一面せん断試験)による液状化試験が有効であると考える.

#### 謝辞

熊本県阿蘇地域振興局土木部には"高野台地区 28 年発生災害復旧事業地質調査委託"で得られたデー 夕および現地採取土の使用を承諾いただいた.ここ に記して感謝の意を表します.

#### 引用文献

- 1) 長谷川陽一・柴崎達也 (2016): 非排水一面せん 断試験機構の圧力室を組み込んだ三軸試験装置 の開発. 第51 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2047-2048.
- 2) 大藤泰彦・上野勝利・望月秋利 (1999): 一面せん断をうける砂供試体の変形. 土木学会第 54 年次学術講演会概要集, Ⅲ-A21, pp.42-43.
- 3) 石原研而(1976): 土質動力学の基礎, pp.231-293.

# 熊本地震高野台地区地すべりの 試料を用いて液状化強度を求めた 繰返し非排水一面せん断試験

国土防災技術(株), 現 国土技術政策総合研究所 〇長谷川陽一

国土防災技術(株) 柴崎達也,和田大祐,川島睦義

#### ● 国土防災技術株式会社

#### スライド1

国土防災技術にて昨年度実施した業務, 研究の成果 の発表になります.

# 本日の発表内容

- 1.はじめに:研究目的
- 2. 概要: 高野台地区の概要, 試験試料, 試験方法について
- 3.結果と考察 4.おわりに:まとめ

#### ● 国土防災技術株式会社

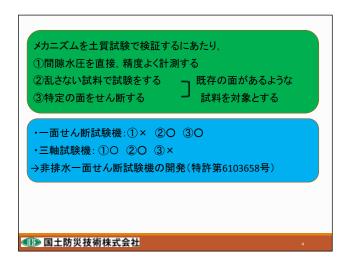
## 1.はじめに

- ・地すべりの誘因
- 【地震時に滑動する地すべり(地震誘因) 降雨・融雪時に滑動する地すべり(降雨・融雪誘因)
  - ・地震で滑動する要因
- (1)すべり面の残留強度の速度依存性
  - せん断速度个残留強度↓=地震誘因型
  - せん断速度个残留強度个=降雨・融雪誘因型
  - ②層理面のひずみ軟化
    - →ピーク強度と残留強度の差が著しいもの
  - ③高含水土(ハロイサイト)の強度低下(過剰間隙水圧)

#### ● 国土防災技術株式会社

スライド2

## スライド3



①~③を同時に満たす試験を実施するため新しく試験機を開発しました.



## スライド 5

三軸試験装置の圧力室部分に一面せん断機構の部材を組み込みました.



#### スライド 6

高野台地区の流動性地すべりが発生

- →調査業務で"繰返し非排水三軸試験(液状化強度試験)"を実施
- →研究目的で"繰返し非排水一面せん断試験"の実施の許可を得た



●● 国土防災技術株式会社

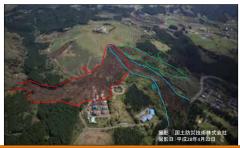
スライド7

## 2.概要

#### 高野台地区の概要

•平成28年4月16日発生

- ・A, Bブロックは流動化: すべり面は草千里ヶ浜軽石(Kpfa)
- ・Cブロックは斜面に留まる: すべり面はKpfaの数m下位の古土壌



● 国土防災技術株式会社

スライド8

#### 試験試料について

A, Bブロックのすべり面のKpfa, 下位の古土壌(Kpfa混在層)と 褐色火山灰土

 $\downarrow$ 

B, Cブロックの滑落崖直下を掘りこんで乱さずに採取。

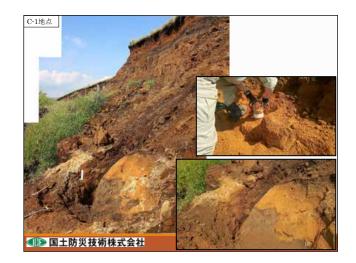
 $\downarrow$ 

不動地側の試料なので、地すべり滑動による乱れがほとんどないと仮定した(地すべり滑動前の状態を保っていると仮定)。



● 国土防災技術株式会社

スライド9



滑落崖は 10 m ほどで、そこを  $1 \sim 2 \text{ m}$  堀り込んで 試料を採取しました.

黄色の土が Kpfa です. 層厚は 50 cm 程度. Kpfa が不動地側にあり、その左下に乗っている土層が移動体です.



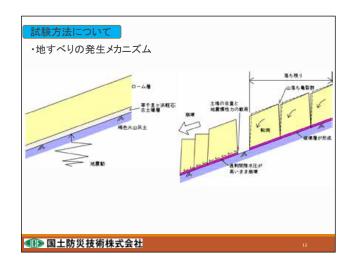
## スライド 11

こちらも滑落崖は 10 m ほどです.

オレンジ色が Kpfa ですが、C ブロックに比べて不均質で層厚も 10 cm 程度と薄いです.



スライド 12



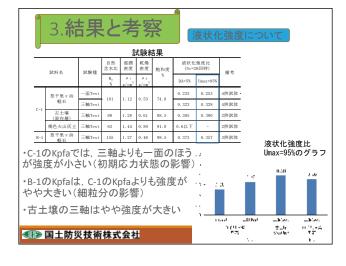
- ・Kpfaでは過剰間隙水圧が上昇しやすく、下位の褐色火山灰土では上昇しにくいのではないか?
- →液状化判定手法で斜面の安全率(液状化抵抗率)を評価すると差が 出るのではないか
- →「土の繰返し非排水三軸試験方法」(液状化強度試験)にて,液状化強度を求める
- +繰返し非排水一面せん断試験による液状化強度も求めてみた ←ただし、特定の面を狙ったせん断ではなく、Kpfaの中をせん断

				試	験条件					
	武料名	試験種	圧密応力 σ <sub>c</sub> (kN/m²)	背圧 (kN/m²)	初期 せん断応力 τ <sub>i</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	σ	周波数 f(Hz)			
	草千里ヶ浜	一面Test				0.194	0.234	0.251	0.287	
	軽石	三軸Test	1			0.291	0.303	0.331	0.353	Ī
C-1	古土壌 (混在層)	三軸Test	160	100	0	0.410	0.370			0.2
	褐色火山灰土	三軸Test	Ī			0.800	0.640			Ī
B-1	草千里ヶ浜	三軸Test	160	100	0	0.350	0.370	0.390		0.2
D-1	軽石	— īfrī Test	157.7	100	27.8	0.252	0.227			0.2

#### ● 国土防災技術株式会社

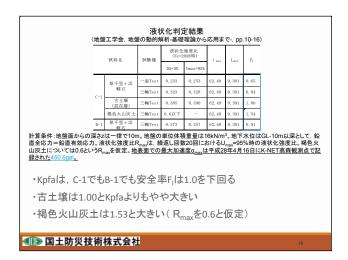
#### スライド 14

B-1 試料の一面 Test については、概要集で説明していますが、ここでは省略します.

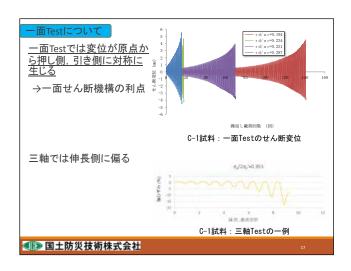


## スライド 15

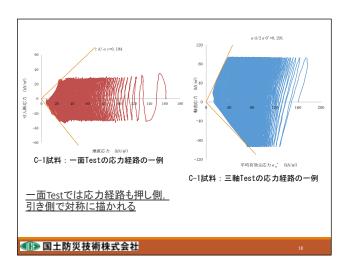
褐色火山灰土では過剰間隙水圧比が95%まで上昇する挙動が確認できなかったため、液状化強度比の数値はありません.



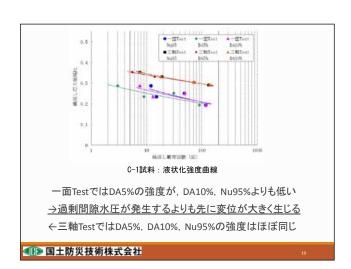
地下水位がすべり面以下という条件でも液状化抵抗率は1.0を下回りました.



スライド 17



スライド 18



C-1 試料の Kpfa の液状化強度曲線です.上の3本が三軸 Test の結果,下の3本が一面 Test の結果です.

## 4.おわりに

- ・Kpfaの液状化強度は、三軸TestのNu95%、Nc20回で0.33程度となり、 緩い砂の強度に近かった(緩<0.3, 0.5<密)。
- ・土質試験による液状化強度とK-NET観測点で得られた加速度を用いて液状化判定を行ったところ、Kpfa層の安全率は1.0を下回った。
- ・繰返し非排水一面せん断試験で液状化強度試験を実施したところ、 せん断変位が原点から対称に生じるなかで過剰間隙水圧比が95%を 超える挙動が確認できた。
- ・三軸Testと比較し一面TestではDA5%の強度が特に低く、過剰間隙水圧比が95%に達する前に変形が大きく生じる特徴がみられた。
- ←草千里ヶ浜軽石は変形すると軟弱になる(土粒子がつぶれると水が出てぬるぬるになる)性質があることから、変形が始まれば斜面の不安定化が加速度的に進行すると考えられる。

#### ●● 国土防災技術株式会社

### スライド 20



#### スライド 21

Kpfa とその下位の古土壌の採取試料です.

間に白っぽい層があります. ここを対象とした土質 試験を試みましたが、薄すぎて実施できませんでし た.

## 重力変形斜面における地震観測と震動特性の把握 - 奈良県天川村栃尾地区の事例-

土井一生\*・釜井俊孝\*・佐藤 朗\*\*・王功輝\*・千木良雅弘\*・小川内良人\*\*\*・川島正照\*\*\*

キーワード: 地震時地すべり, 南海トラフ巨大地震, 増幅特性, 加速度計, 傾斜計

#### 1. はじめに

近年,活発化している地震活動に伴って,2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震に代表されるように,地震による斜面災害が頻発している.しかしながら,観測事例が僅少であるがゆえ,地震時に斜面がどのようにふるまうかについてはほとんど解明されていない.地形や内部物質,状態に由来する斜面の増幅特性は未解決な課題の一つである.近年の計算機の発達によって,解析上はそのような効果が確認できるようになったものの,実際の斜面の動きを正しく把握できているかは,斜面の震動を実測することによって明らかになると考えられる.

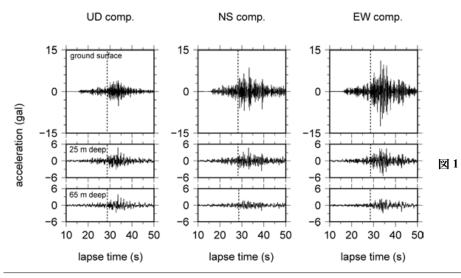
京都大学防災研究所では、文部科学省の建議「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について」の一環として、さまざまなタイプの斜面において地震観測を全国数カ所でおこなっている。本発表では、将来の南海トラフ巨大地震の減災を目指し、紀伊山地の重力変形斜面において展開したボアホールを用いた鉛直観測によって得られた斜面の震動特性に関する解析結果を紹介する。

#### 2. 観測概要

紀伊半島中央部の奈良県天川村栃尾地区に位置する流れ盤構造を持つ四万十帯の重力変形斜面を観測対象斜面とした.ボーリングコアから緩み域は深さ65 m程度であると考えられたため、その直下と緩み域中央部深さ25 m、および、地上に計器を鉛直に設置した.計器として、電力が乏しい山間部でも使用できる省電力のMEMS型加速度センサーと傾斜センサーを耐圧・耐水プローブに封入したものを開発した(土井ほか、2017).観測は、地震動、傾斜とも200 Hz サンプリングで連続でおこなった.

#### 3. 観測結果

図1に2016年4月1日に三重県南東沖で発生した 地震(Mj 6.5)の記録を示す.最大加速度は地表,深 さ25 m,深さ65 mの順に地表に近いほど大きい値 を示した.S波部分についてスペクトルを計算した ところ,1-6 Hz において,基盤(深さ65 m)に比べ重 力変形を受けた岩盤(深さ25 m)において2-7倍大き な値を示したが,深さ25 mと地表では大きな違い



観測された加速度波形(土井ほか, 2017). 上から, 地表, 深さ25 m, 深さ65 m の記録をあらわす. また, 左から, 上下, 南北, 東西の各成分をあらわす. 破線はS波の到達時刻.

- \* 京都大学防災研究所
- \*\* ジオテクサービス株式会社
- \*\*\* 国土防災技術株式会社

はなかった.このことから, 1-6 Hz の周波数帯の地震動が重力変形を受けた岩盤の崩壊に大きく寄与することが示唆された.一方,この地震に伴う傾斜変動は認められず(0.0005 度以下),10 gal 程度の地震動に対してこの斜面が安定であることが示された.

#### 謝辞

国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所の 今森直紀氏(現:国土交通省関東地方整備局)には、 地震観測に便宜を図っていただき、ボーリングデー 夕を供与していただいた.

## 譲原地すべりにおける地震動観測に基づく複数の地震動加速度波形の比較

柴崎宣之\*·石井靖雄\*\*

キーワード; 地震動観測, 地すべり, 固有周期, スペクトルの増幅率

#### 1. はじめに

地すべり斜面の不安定化に影響を及ぼす地震動特性としては、地盤の固有周期のほか、最大加速度や最大速度、卓越周波数、主要動の継続時間などが考えられる(川邉、2005;社団法人日本地すべり学会、2012). 地震発生時の地すべりの安定性を考える上で、地すべり斜面における地震動特性を把握することが重要と考えられるが、現地での観測に基づいた研究事例は少ない(秦ほか、2012).

筆者らは、地すべり斜面において、すべり面下位、想定すべり面付近、地表に地震計を設置し、観測された地震加速度波形から地すべり土塊の固有周期を検討した結果を報告している(柴崎・石井, 2016).

本稿では、既往発表のうち譲原地すべりでの観測結果の一部を新たに示した上で、地すべり土塊での地震加速度波の増幅状況を考察した結果の概要を紹介する. 考察結果の詳細については、既往発表(柴崎・石井、2016)を参照願いたい.

#### 2. 解析方法

#### (1) 譲原地すべりおよび地震計

譲原地すべりは群馬県藤岡市に位置する(図1). 地震計は栢ヶ舞地区の地すべり頭部に設置されており、その設置深度は、地表(図2)、想定すべり面付近(深度42 m) および想定すべり面の下位(深度52 m) である。設置された地震計の性能は、サンプリング周波数100 Hz、測定範囲±2,000 gal、周波数特性0~40 Hzの加速度計である。

#### (2) 解析対象とした地震の概要

解析対象地震は,2011年3月11日14時46分に 発生した平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 の本震(以下,「地震①」という),本震直後の14時 51分に発生した余震(以下,「地震②」という),お よび 15 時 15 分に発生した余震(以下,「地震③」という)とした. なお, 今回解析対象とした地震において, 地すべりによるとみられる変動は観測されていなかった.

#### (3) 解析方法

解析には、南北方向(北が正)と東西方向(東が正)において観測された地震加速度波形を、地すべり谷側を正として地すべり測線方向に変換(Huang et al., 2001)したものを用いた。その上で、地表での観測値に対する深度 42 m、深度 52 m での観測値の比を求め、地すべり土塊での地震加速度波の増幅状況を考察した。

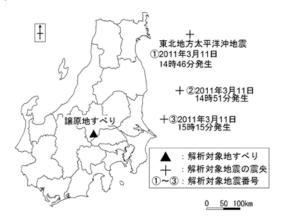


図1 譲原地すべりおよび検討対象地震の震央 (柴崎・石井, 2016)



図2 地震計設置状況(地表)

<sup>\*</sup>日本工営(株)(元国立研究開発法人 土木研究所)

<sup>\*\*</sup> 国立研究開発法人 土木研究所

#### 3. 観測結果および解析結果

観測により得られた水平方向最大加速度は、地震①で75.5 gal、地震②で3.98 gal、地震③で15.6 galであった. 図3に地震①における想定すべり面下位(深度52 m)、想定すべり面付近(深度42 m)および地表の水平方向加速度波形を示した. 地表の最大加速度はすべり面下位(深度52 m)の約2.8 倍を示し、水平方向の加速度波形の振幅は地表に向かうに連れて大きくなっている.

また,表1,図4に示したように,今回解析した事例では,地表の水平方向加速度に対する想定すべり面下位の水平方向加速度の比は,0.35から0.68の値を示した.平地地盤において,最大加速度が地表に比べて地表面下約100mで地表の0.50以下となった既往の観測事例(社団法人日本道路協会,2002)と大きく異なる傾向は示していない.

表2は、地震①、②、③における水平方向のフーリエ振幅スペクトルが最大値を示した周期とスペクトル増幅率の最大値が表れた周期を示したものである。解析した3つの地震動のスペクトルの増幅率の最大値を示した周期は、0.22秒から0.25秒の値を示したことから、当該地すべり土塊の固有周期は0.22秒から0.25秒付近と考えられた(柴崎・石井、2016)。また、水平方向のフーリエ振幅スペクトルが最大値を示した周期とスペクトル増幅率で最大値が表れた周期が異なっていることから、解析対象とした地震動では、地すべり土塊での極端な地震加速度波の増幅は生じなかったものと推察された。

#### 4. おわりに

大きな地震動における地すべり土塊の加速度増幅 特性は、今回の解析結果とは異なる傾向を示す可能 性も考えられる. 地震発生時の地すべりの安定性を 考えていくためには、今後も同様な観測事例を積み 重ねていくことが重要と考えている.

#### 謝辞

地震動観測結果を提供頂いた国土交通省関東地方 整備局利根川水系砂防事務所および気象庁震度階の 計算,高速フーリエ変換ソフトウェアを使用させて 頂いた立命館大学伊津野教授に感謝申し上げる.

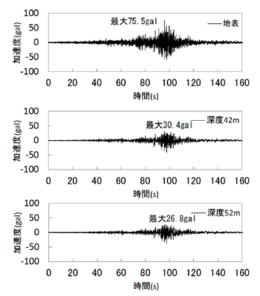


図3 地震①における深度別の水平方向地震動 加速度波形

表1 各地震における水平方向最大加速度, 柴崎・石井(2016)より抜粋

項目	観測	地震①	地震②	地震③
	深度			
水平方	地表	75.5	3.98	15.6
向最大		(1.00)	(1.00)	(1.00)
加速度	深度 42 m	30.4	2.74	11.5
(gal)		(0.40)	(0.69)	(0.74)
	深度 52 m	26.8	2.48	10.6
		(0.35)	(0.62)	(0.68)

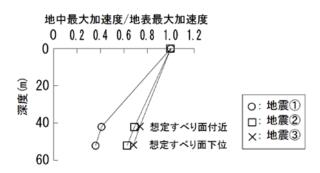


図4 地表最大加速度を1.0 とした場合の地中最大 加速度の分布, 柴崎・石井(2016)より作成

表2 各地震における水平方向最大加速度, 柴崎・石井(2016)より作成

項目	地震①	地震②	地震③
フーリエ振幅スペ	0.41 秒	0.84 秒	0.82 秒
クトル max	0.94 秒		
増幅率	0.25 秒	0.22 秒	0.23 秒
max		0.24 秒	

注) フーリエ振幅スペクトル max:加速度フーリエ振幅 スペクトルで最大値が表れた周期,増幅率 max:ス ペクトル増幅率で最大値が表れた周期(固有周期)

#### 参考文献

- 1) 秦吉弥・王功輝・釜井俊孝・末峯章・野津厚 (2012): サイト特性置換手法に基づく 2011 年 東北地方太平洋沖地震における葉ノ木平地すべ り地での地震動の推定. 日本地すべり学会誌, Vol.49, No.3, pp.109-118.
- 2) Huang, C.-C., Lee, Y.-H., Liu, H.-P., Keefer, D.K. and Jibson, R.W. (2001): Influence of Surface-Normal Ground Acceleration on the Initiation of the Jih-Feng-Erh-shan Landslide during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.91, No.5, pp.953-958.
- 3) 川邊 洋(2005): 斜面表層の振動特性と不安 定化. 日本地すべり学会誌, Vol.42, No.2, pp.112-114.
- 4) 日本道路協会(2002): 道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説, pp.301-303.
- 5) 日本地すべり学会 (2012): 地震地すべり 地震地 すべりプロジェクト特別委員会の総括編. 社団 法人日本地すべり学会, pp.131-133.
- 6) 柴崎宣之・石井靖雄(2016):複数深度での地震 動観測結果に基づく地すべり土塊の固有周期. 日本地すべり学会誌, Vol.53, No.6, pp.227-234.

### 線状降水帯と土砂災害の危険度

岡田憲治\*

\*kenji-okada@met.kishou.go.jp

#### 1. はじめに

全国各地で大雨を誘因とした土砂災害が毎年発生しており、近年は雨域の北上傾向に伴って北日本でも土砂災害の発生の増加が顕著である。これら土砂災害の中でも崩壊規模が大きな土砂災害発生時は、上空に筋状に長く伸びる雨雲があり雨が長時間継続していたことが多いことが以前から知られており、この雨雲は「ニンジン状の雨雲」あるいは「テーパリング・クラウド」と呼ばれていた。近年、観測技術や解析技術の向上により、筋状に長く伸びる雨雲が同じ場所で大雨を降らせ続けるメカニズムが解明され、『線状降水帯』と呼ばれるようになった。

ここでは雲から雨が降る仕組み,線状降水帯の発生メカニズム,線状降水帯と地球温暖化との関連性等を説明する.

#### 2. 雲が発生する仕組み

太陽の日射により地面が熱せられると地上付近の水蒸気を含む空気塊が温められて膨張し、浮力が発生して上昇する。通常は高度が高くなるほど気温が低下(高度100 mにつき気温0.6 ℃低下)するので、水蒸気を多く含む空気塊ほど低い高度で飽和し水蒸気の粒が生成される。水蒸気の粒は小さく軽いため浮力と重力が釣り合って空中に浮遊し太陽光を遮って白く見える。これが雲である。また、空気塊上昇により地上付近の気圧が低く(空気が薄く)なった分を補うための水平方向の空気の移動が発生する。これが地上付近で発生する風の仕組みである。

#### 3. 雨が発生する仕組み(上昇気流)

雲の中では飽和水蒸気の小さな粒が浮遊している だけだが、さらに冷やされると浮遊している粒が結 合して雨粒(あるいは雪の結晶や氷粒)となって浮 カよりも重力が勝って落ちてくる(通常の気象レーダーは、発射した電波が雨粒に反射し、それを受信した電波の強度から雨の密度を推定するものであり、雨雲ではない雲には反応しない。雨雲が映っているのに雨が降らないのは、落下中に蒸発した場合や風により流された場合が多い。風速 15 m/s 程度ならば高度 2 km から降る雨は落下点が 4~5 km 程度ずれる).

雨を降らせる雲は積雲系と層雲系に大別されるが、大雨になるポテンシャルを持っているのは積雲系の雲である。通常は2km前後の高度に発生し、数 mm から10数 mm 程度の雨を降らせて消滅するため、1つの積雲の雨だけで土砂災害が発生することは稀である。

一方、積雲の中で上昇気流が継続して上空に向かって発達した場合は積乱雲と呼ばれ、雲頂高度が10 km を越える場合もある。積乱雲の下では1時間に数10 mm 程度の強い大粒の雨が降り、雷・ダウンバースト・竜巻等の突風現象も発生することがあり、夏の夕立が典型例である。積乱雲も雨を降らせると消滅するが、同じ場所で積乱雲が次々と発生して雨を降らせ続けると土砂災害発生の危険性が高まる。

#### 4. 大雨が降る仕組み(水平方向)

雨が継続するには水蒸気の補給が必要であり、それには水平方向から水蒸気を多く含んだ空気が補給され上昇気流によって上空に運ばれる必要がある. このような雨の典型例が図 4.1 に示す地形性降雨である.

地形性降雨は山等の特定の地形で発生するが,近 年各地に大雨を降らせ災害につながっているのが地 形に依存せず平坦部の上空でも発生する積乱雲によ

<sup>\*</sup> 気象庁予報部

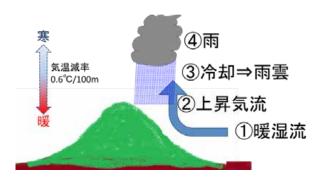


図4.1 地形性降雨の仕組み

る雨であり、今回のテーマである線状降水帯も地形 に依存しなくても発生する雨である(島や孤立峰の 下流側に発生する線状降水帯もある).

上昇気流が発生する仕組みを空気塊の重さと温度で考えてみる。同じ温度の空気塊が2つあり、1つは水蒸気を多く含む空気塊、もう1つは乾いた空気塊の場合、水蒸気を多く含む空気塊の方が重いだろうと考え勝ちだが、実際は水蒸気を多く含む空気塊の方が軽い。これは、空気の主成分である窒素の分子量は28、酸素は32だから空気の分子量は28.8となるが、空気の一部を分子量18の水蒸気で置き換えると空気塊の分子量は28.8よりも小さくなるからである。つまり同じ温度では湿った空気ほど軽い。

一方,気温に目を転じると,冷たい空気よりも暖かい空気の方が膨張した分軽い.そのため,冷たい空気塊と暖かく水蒸気を多く含む空気塊(暖湿気)がぶつかった場合に強い上昇気流が発生しやすくなる.この場合,(相対的に重い)冷たい空気塊(冷気)は下層にもぐりこんで,山がないのに,あたかも山があるかごとく踏み台となって,上昇した暖湿気が上空で冷やされて雲となり雨を降らせ,暖湿気の流入が継続した場合に大雨となる.

空気中に含まれる水蒸気の量は温度によって異なり、含み得る水蒸気の最大量(と飽和水蒸気量)は、1 立方 m あたり 10 ℃で約9g(12 hPa)、20 ℃で約17g(23 hPa)、30 ℃で30g(42 hPa)と、温度が高いほど含まれる水蒸気は大きく増える。つまり、暖湿気ほど軽いために上昇気流になりやすいだけでなく大雨になるポテンシャルも高いことになる。秋に台風や秋雨前線(停滞前線)により大雨となるのは、まだ夏の高い気温が残っている南の海上からの大量の暖湿気が高気圧の縁辺流や台風によって列島に流入し、列島上の秋の冷気とぶつかり続けるためである。

災害をもたらすような大雨は「(短時間の)局地的大雨」と「集中豪雨」に大別される.「局地的豪雨」は単独の積乱雲が発達することにより概ね1時間以内の短時間に狭い範囲で数10 mm 程度の雨をもたらす現象である.一方,災害をもたらすような雨という意味で使われている「集中豪雨」は積乱雲が同じ場所で次々と発生・発達を繰り返すことにより同じ場所で数時間あるいはそれ以上にわたって雨が強く降り続く現象であり,山に雨が降る地形性降雨や前線の雨,あるいは台風の周りを取り囲んでいる強い降水帯等が典型例である.つまり「集中豪雨」は「局地的大雨」が継続したものである.

#### 5. 線状降水带

災害をもたらす集中豪雨の例として近年クローズアップされたのが「線状降水帯」である。線状降水帯の発生メカニズムが十分には解明されていなかった時代には、その形状から「にんじん状の雨雲」とか「テーパリング・クラウド」と呼ばれていた。なお、昭和51(1976)年9月に香川県小豆島で発生し死者39名の土石流の誘引とされている湿舌は台風を取り巻く雨雲が3日間にわたって降り続いたものであり線状降水帯とは異なるものと考えられる。

近年レーダーの観測処理技術 (解像度・観測精度) が向上して雲の時間的・空間的 (立体的) な発達・衰弱を詳細に観測できるようになり、さらに数値シミュレーション解析技術の向上や多くの事例の蓄積によって降水のメカニズムが判明し、現在は積乱雲が次々と発生して積乱雲群を作り、それがいくつも筋状に並ぶこと (図 5.1) を『線状降水帯』と呼んでいる.

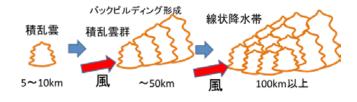


図 5.1 線状降水帯の発生メカニズム

気象庁気象研究所での調査研究により、日本では (台風による直接的な大雨を除くと)集中豪雨事例の 約2/3(梅雨期に限れば約3/4)に線状の形態が見られ(津口・加藤2014)、日本で集中豪雨をもたらし た線状降水帯の大半が、次々と積乱雲発生し積乱雲

表 5.1	集中豪雨に占める線状降水帯の割合(加藤	2016))

	擾乱の分	la la	降水系の形状の分類						
	18K DU V 7 7 7	N.	線	状	₹0	つ他			
低気	圧	55	33	60%	22	40%			
寒冷	前線	30	18	60%	12	40%			
停滞	前線	82	62	76%	20	24%			
台風・熱低	本体	(125)	-		-				
口调、粉料	遠隔 遠隔		45	65%	24	35%			
その	他	25	10	40%	15	60%			
		243 (368)	168	69%	93	31%			

表 5.2 線状降水帯の形成と土砂災害被害の関係

線状降水 帯の有無	対象降雨 事例数	人的被害 合計	家屋被害 合計	· σ,	斯例当 人的初 <sup>方不明都</sup>	按害	1事例当たり の家屋被害 (全壊が対象	1戸	を と と と と と と い さ い さ い さ れ た れ れ れ れ れ れ れ れ れ れ れ れ れ れ れ れ れ	·IJ
① あり	12	188	485		15.7	·	40.4		0.39	)
② なし	5	25	69		5.0		13.8		0.35	i
1)/(2)	2.6	7.6	4.6		3.1		2.9		1.1	
700	=/	人的被害合計	70	災害発生 年月	都道府 根名	市町村名	5 災害原因	土砂災害 初発時刻	全填	犠牲者 数
600	- 3	7屋被害合計	- 60	H23.9.4	和歌山	影智饒浦	町 台風12号/豪雨	2:30	89	2
	-0-1	事例当たりの人的被	8 50 細	H23.9.4	和歌山	新宮市	台風12号/豪雨	4:00	6	
500				H21.7.21	山口	防府市	豪雨	12:00	29	14
§ .	<b>-</b> 0−1	事例当たりの家屋も	142	H24.7.12	熊本	阿蘇市	豪雨	4:30	60 28	2
400			40 6	H24.7.14	福岡	八女市	豪雨	8:00	28	
1			3.	H25.7.28	山口	萩市	豪雨	11:00	21	- :
200		_	30 ☆	H25.8.9	秋田	仙北市	変用	11:34	5	3
1 300										
300			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	H25.10.16 H26.8.17	東京	大島町 丹波市	豪雨/台風26号 豪雨	2:00 3:00	50 18	3

線状降水帯が形成された場合、人的・家屋被害とも非常に大きくなる

(加藤 中小規模気象学 2016)

群を作り出す『バックビルディング型』(吉崎・加藤 2007) であることも見出されている. 表 5.1 からは 大雨における線状降水帯の出現率の高さ, 国土技術 政策総合研究所の資料から作成した表 5.2 からは顕 著な土砂災害が発生した際の線状降水帯発生割合が 大きいことが分かる.

100

線状降水帯あり 線状降水帯なし

線状降水帯は図5.2、図5.3のように暖湿気と冷気 がぶつかり続け, 下に潜った寒気が山のような役目 をして暖湿気が上昇気流になることで継続する. 都 市部の場合は、最下層にヒートアイランド現象によ る蓄熱が加わることもある.

あるいは、図5.4のように暖湿気と暖湿気が収束 して上昇気流を形成する場合もある. 地形に因らず

平坦地にも大雨をもたらすのが特徴である.

平成27年の広島豪雨後に、「バックビルディング 型の線状降水帯はビルのような建造物が風下側に 次々と建っていく様子」という誤った情報が連鎖反 応的に広がった. これではスクラップ・アンド・ビ ルドにより風下側に積乱雲が移動することになる. バックビルディング現象は、複数の積乱雲が生成さ れながら線状に並んで風下に流される時に, 成熟期 や衰退期の積乱雲から放出される冷気により風上側 に新たな積乱雲が生まれることを繰り返し、雲を流 す風は吹いているのに積乱雲が同じ場所で次々と発 生を繰り返すことである.

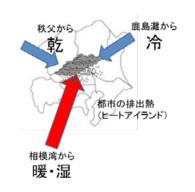


図 5.2 都心で発生する線状降水帯のメカニズム



図 5.3 都心で発生する線状降水帯の メカニズム(断面)

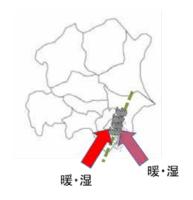


図 5.4 沿岸前線による線状降水帯

#### 6. 土砂災害を引き起こした線状降水帯の例

#### 6.1 平成 29 年 7 月九州北部豪雨

九州北部豪雨では、図6.1のように南の高気圧か ら停滞前線に向かって西回りで流入する暖湿気に加 え、台風第3号が形成した大陸経由の暖湿気の流れ も残っており、この2本の流れにより大量の水蒸気 が九州北部に供給され、さらに上空の寒気や島根県 で大雨を降らせた停滞前線が南下したことも加わっ て,2つの暖湿気の流れが福岡県朝倉市周辺で収束 して大雨となった. 背振山が線状降水帯の出現をも たらしたとの研究結果もあるが、背振山を除いた数 値シミュレーションでも線状降水帯の形成を再現し ており、上空の2つの暖湿気の収束が主要因と考え られる. このように前線に向かって2つの暖湿気が 収束する(多くの場合、台風が遠ざかった後も台風 起因の暖湿気の流れが残ったものである) 事例の頻 度は少ないものの、水蒸気の供給量が倍増するため 大雨となる事例が多い.

福岡県朝倉市付近では東西に伸びる線状降水帯が継続し(図 6.2), 1 km メッシュの解析雨量(図 6.3)でも東西に伸びる大雨の帯が見られる. 図 6.4 の土壌雨量指数でも50年に一度程度と推定される高い指数値が東西に伸びていた.

台風通過後も暖湿気の流れが残って線状降水帯による大雨となった事例は、平成26年7月に沖縄で特別警報が発表された事例(台風第8号)や平成27年9月の関東・東北豪雨(6.2参照)等でも見られる.

平成15年7月20日に熊本県水俣市で発生した土 石流災害(死者19名)ではレーダーが数時間にわた る東西に長い降水域を観測しており、被災直後に上

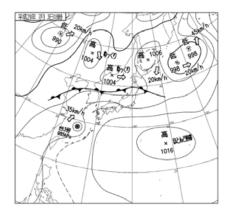
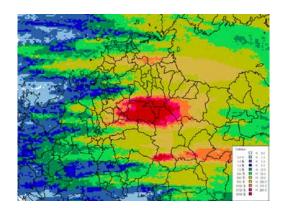




図6.1 大雨2日前(上)と大雨当日(下)の天気図

空を飛んだ航空機の機長が「南北に数 100 m, 東西に数 kmの細長い範囲で山肌が崩れていた」と報告している。この事例や平成9年7月に鹿児島県出水市で発生した土石流(死者 21 名)は、西からの暖湿気の流れが甑列島で一旦南北に分かれ、島の下流側で合流して暖湿気の収束により線状降水帯が出現する、九州本土での典型的な大雨パターンである。



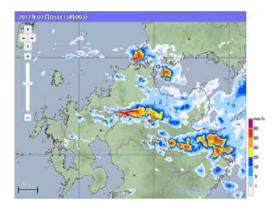


図 6.2 7月5日15時のレーダー画像(上)と5日18時までの12時間積算雨量(下)

-				-						_									
167	168	174	198	203	212	225	247	275	297	301	304	328	327	303		1	301	299	277
180	189	196	213	234	264	258	265	282	310	335	331	338	342	322	342	372	353	335	375
180	189	199	219	<b>2</b> 56	285	285	298	328	344	351	365	342	350	359	376	393	389	400	388
182	199	208	226	259	268	285	290	330	347	342	359	380	405	397	109	434	412	416	416
191	205	187	161	169	233	231	269	308	351	350	327	346	3/93	415	398	395	408	476	452
134	121	123	137	151	191	225	214	303	315	326	311	221	326	369	371	40%	386	398	390
128	133	127	124	136	159	177	208	248	282	305	245	300	311	310	360	378	327	350	380
148	144	164	169	169	168	168	191	298	342	328	274	271	285	293	352	321	319	343	395
150	151	183	223	188	257	215	218	313	376	383	304	291	375	424	450	321	330	385	406
169	189	214	230	319	301	320	346	471	474	439	495	601	646	614	532	418	413	404	375
467	367	442	553	390	433	499	402	404	450	531	474	643	796	719	627	511	505	482	509
60	792	855	870	872	869	902	875	824	719	721	782	790	743	709	568	555	554	597	562
593	671	669	812	789	810	774	941	866	830	882	794	791	797	668	641	599	572	597	604
225	367	489	594	583	605	554	678	741	684	749	739	619	721	723	651	536	585	599	598
179	232	260	312	280	399	420	489	464	611	558	552	564	543	606	629	489	523	663	582
147	183	220	263	274	324	347	359	441	394	558	463	470	485	455	472	522	572	489	521
128	1265	201	233	235	274	271	<del>30</del> 9	278/	313	392f	393	418	409	442	426	419	441	427	464
115	153	166	166	190	195	208	195	264	222	263	235	265	299	302	342	392	349	351	384
139	140	141	146	111	135	112	160	158	192	174	236	177	205	225	265	294	336	208	304
$\perp$						_			$\vdash$	_							<u> </u>		$\vdash$

図 6.3 朝倉市の1 km メッシュ解析雨量(7月5日24時までの24時間積算)

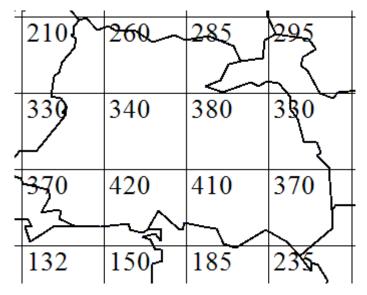


図 6.4 朝倉市の 5 km メッシュ土壌雨量指数 (7月 5日 24 時までの 24 時間の最大値)

#### 6.2 平成 27年9月関東・東北豪雨

北関東〜東北南部にかけて大雨が続いて鬼怒川が 氾濫した事例である。台風第 18 号が南からの暖湿 気の流れを形成し、遠ざかった後も南からの暖湿気 の流れが残り(図 6.5)、また、北東からは東の台風 第 17 号による冷気が流入し暖気が積乱雲になるの をアシストした(図 6.6)。さらに、東の背が高く勢 力が強い高気圧が台風第 17 号の動きを阻んだ(ブ ロッキング現象)ため同じ気圧配置が長時間続き(図 6.7)、北関東〜東北南部にかけて南北に連なる線状 降水帯が継続した。

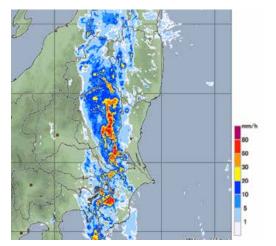


図 6.5 9月10日6時のレーダー画像

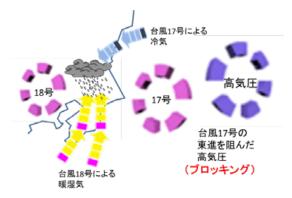


図 6.6 暖気と冷気の流れを示す模式図



図 6.7 9月10日15時の天気図

#### 6.3 平成 26 年 8 月広島豪雨

8月15日から20日にかけて前線が本州付近に停滞し、19日から20日は九州北部地方や中国地方で局地的に猛烈な雨となった。日本の南海上では西に台風第15号・東に高気圧という高気圧だけの場合よりも暖湿気が大量に流入しやすい気圧配置(図6.8)が続き、広島市付近では南西からと南の豊後水道からの2つの暖湿気の流れがぶつかった結果、積乱雲を次々と発生させて積乱雲群を形成し連なった降水帯が停滞するという典型的なバックビルディング型の線状降水帯が形成されて大雨となった。図6.9の積算雨量の分布からも線状の降水帯の存在が分かり、図6.10に示す19日24時頃~20日02時頃のレーダー画像からは典型的なバックビルディング型であることが分かる。

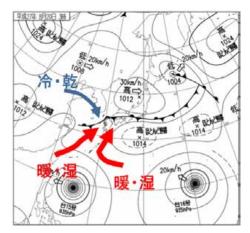


図 6.8 8月20日03時の天気図

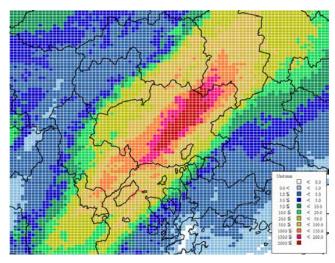


図 **6.9** 8月19日18時から20日06時までの 12時間の雨量積算

これを土壌雨量指数の分布図で見ると、図 6.11 では広島市内、特に安佐南区を含むメッシュの指数値は 245 と高かった. 指数値 200 を越えると花崗岩以外の地質でも土砂災害が発生する可能性が高くなり、図 6.12 のように過去 24 年間と比較した履歴順

位でも1位となっており、平成11年広島豪雨時の同じメッシュの指数値165や、同豪雨時の安佐北区の土石流発生現場のメッシュの指数値184も越えていたことから、土砂災害発生のポテンシャルは十分に高かったと推定される.

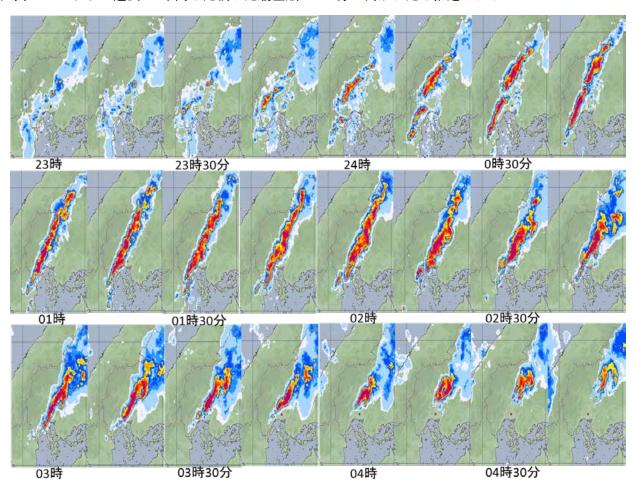


図 6.10 7月19日~20日にかけてのレーダー画像(15分間隔)

			<u>~</u>		1 1	43		R	
55/ 60	64 70	72 70	68 60	55 55		28 DO	96 72	96	55
50 64	70 72	72) 70/	70 66	68 78	86	96 124	90 72	62	60
0 450 64	68 68	68 68	70 68	80 11	6 102	130 122	96 72	55	55 :
0 55 64	55 38	-69- <sub>1</sub> 701	74 102	132 12	6 132	154 122	787 68	600	50,
5 55 45	45 55	62 78	110 146	150 12	2 770	160 118	72 50	\$55	45 -
8 45 40	50 62	68 110	132 54	180 23	e4214	154 86	55 50	312	40 -
8 45 45	55 682	104 126	132 156	210 25	0 200	1123/60	40 40	40	40 -
2 39 59	64 86	114 114	150 190	235 24	5 130	62 40	40 40	30	30
0 45 60	68 92 4	102 150	L	230 10	6 70	30	30 30	J#	30
5 55 62	68 84	136 179	180 200	. ~	~~~	30 30	302 30	30-	30 :
5 60 55	70-198		142 106	7894	300	30 30	30 30	بهدر	200 T
0 55 55	76 132	170 124	126 92	550 8	20	20 30	30	364	,20
Q 50 55	96 140	7	155	20/2	224	30 730	30 30	30	201
5 \$5 76	92 90	<del>78</del> 98≅	55 30	20 27	20	30) 30,	330/20	\$200	20
0 60 76	74 72	66/	20	7-20 20	30		20	20 .	۸20 T

図 6.11 広島市付近の土壌雨量指数の最大値(7月19日18時~20日06時)

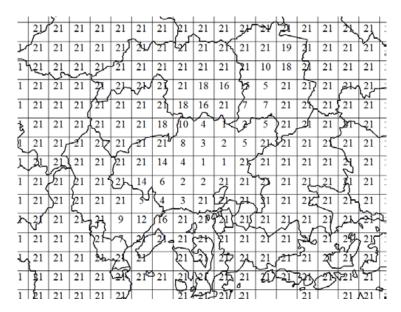


図 6.12 広島市付近の土壌雨量指数履歴順位の最高値(7月19日18時~20日06時)



図 6.13 平成 26 年 8 月の広島豪雨時の土壌雨量指数時系列図 (雨量は安佐南区八木地区を含む1kmメッシュの解析雨量)

図 6.13 に広島市安佐南区八木地区の土壌雨量指数の時系列図を示す. 平成 11 年に広島市安佐北区を中心に土石流が多発した広島豪雨時と同様に 2 日前に降った先行降雨が効いている. 線状降水帯が形成される前に土壌雨量指数を用いた大雨警報 (土砂災害)が発表され、さらに線状降水帯の形成とほぼ同時刻に土砂災害警戒情報が発表された. 指数値のピーク時には土壌雨量指数で 50 年に一度の大雨に相当していたと推定される. さらに線状降水帯が継

続していれば数百年に一度の大雨となり,更なる土砂災害が発生していたかも知れない.

なお、平成11年の広島豪雨でも南西から北東に伸びる雨雲がレーダーで観測されていた。当時のレーダーは5kmメッシュと今よりも解像度が荒かったので平成26年の事例との単純比較は出来ないが、気圧配置や雨雲の移動の記録から線状降水帯が発生していたと推定される。

#### 7. 線状降水帯によらない大雨

線状降水帯は丘陵部や平坦部等の少雨エリア,つまり大雨の頻度が少ない分風化が進み土砂災害発生の素因ポテンシャルが高いエリアにも大雨をもたらしている.

一方,台風に伴う線状降水帯ではない大雨の出現もある。例えば、平成17(2005)年9月には宮崎県の鰐塚山で土壌雨量指数値で400年に一度と推定される雨により崩壊量560万立方mの土石流(図7.1)が発生した事例、平成13(2001)年7月に台湾の阿里山で大規模土石流が発生した事例、日雨量1,317mmの日本記録を観測し大規模土石流が発生した徳島県上那賀町の事例、がある。これらは多雨地帯で地形の影響により日単位の雨が降り続けていた。一方、少雨地帯の香川県小豆島でも昭和51(1976)年9月には台風第17号の外側を取り巻く雨雲が長時間かかり、島内で死者39名・山・がけ崩れ280箇所・家屋倒壊245棟の被害が発生し、内、島内の池田町では土石流による24名の死者が発生している。

これらの事例は線状降水帯のように直近の短時間の気象レーダーだけでは土砂災害発生危険性の高まりを判断できないが、土壌雨量指数や土砂災害警戒情報でフォロー可能な事例である.

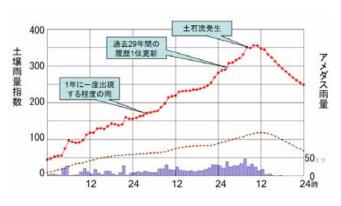


図 7.1 宮崎県鰐塚山の土石流

また、森林総合研究所が平成15年に筑波山北麓で実施した自然斜面での人工降雨による崩壊実験では土壌雨指数値が400と200年に一度と推定される指数値200よりも遥かに大量の人工雨を降らせてようやく崩壊した(図7.2). これは、何度かの大雨に耐えてきた斜面であっても雨が降り続くことにより崩壊可能性を持っていることに他ならない.

これらの事例から, 土砂災害の誘因として線状降 水帯の有無だけに着目し続けると判断を誤る可能性 があり、降っている雨量を客観的に把握することが 重要である.

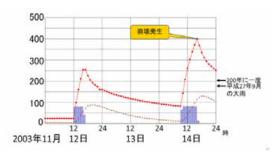


図7.2 森林総合研究所による崩壊実験

#### 8. 風化

土砂災害の多発地域は、素因である地質の風化の進行が早い地域と、誘因である雨の頻度が高い地域、あるいは両者の複合に大別出来る。風化の進行が早い地質の代表例である鹿児島のシラス土壌では、崩落後8年で次の崩落が発生した記録もあるが、一般的には数十年あるいはそれよりも長期間であるとされている。一方、雨の頻度が高い地域では風化の進行のみによる自然崩落を待たずして雨による土砂災害が繰り返し発生していることが多い。図8.1 は、地質が類似したエリアの中に存在する多くの崖の中から前回の崩壊からの年月が異なる3つの崖を比較したモデルである。大雨が降ると風化が進んでいる崖は崩壊し、その崖は免疫性が生じる。大雨の都度、この状況が繰り返されることを示している。

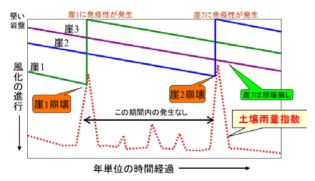


図8.1 風化途中での雨による崩壊の概念

一方,数十年に一度のような大雨が降ると多くの崖が崩壊し,図8.2のように広範囲に免疫性が生じ、その後しばらくは大雨が降っても崩壊は発生しないと考えられる.しかし、図8.3のように、現実には崩壊しないまでも脆弱性が生じた崖や、宅地造成・道路建設等により新たな崖が出現するため、広域の免疫性が必ず継続するとは限らない.

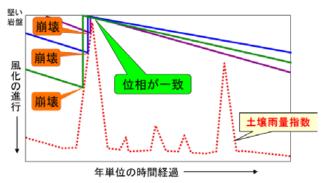


図8.2 豪雨による免疫性の発生

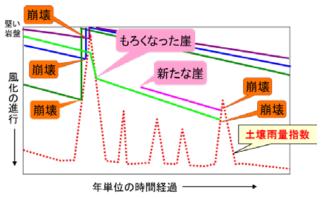


図8.3 免疫性が必ずしも継続しない例

風化による数十年以上と推定される自然崩落の周期程度の長期間にわたる雨のデータと、その間の詳細な土砂災害データの蓄積があれば、風化の度合いを雨の関数に置き換えて土砂災害が発生するための雨量が予測できる可能性が出てくるが、それを待つ間にも毎年各地で土砂災害が発生しており現実的ではない。むしろ、風化により危険度の高まっている斜面、土石流が発生する可能性のある渓流等を抽出する技術を実用化して住民に周知すべきである。

#### 9. 最後に

地球温暖化が進行すると上空を流れている偏西風(ジェットストリーム)の勢いが弱まり大きく蛇行(ブロッキング)する可能性が指摘されている. また,温暖化により地面付近の気温が上がり上空は冷えることから上昇気流が発生しやすくなる可能性も指摘されている. 一方,海では水温が上昇して水蒸気の蒸発が進み,しかも海面付近の気温が上昇するため,空気中に含まれる水蒸気量が増えて大雨の発生ポテンシャルは今以上に高まると予想されている. このように地球温暖化は線状降水帯を含む大雨の出現頻度の増加・雨量の増大・雨域の北上を示しており,

結果として今以上に土砂災害の発生頻度の増加や崩壊規模等の拡大が予想される.近年北日本でも大雨が増え土砂災害が多発しているのは地球温暖化の具現化かも知れない.土砂災害の危険性が少しでもあるエリアに住んでいる場合には、少雨・多雨エリア問わず大雨警報(土砂)や土砂災害警戒情報、自治体からの情報による速やかな安全確保行動をお願いする.

「線状降水帯と土砂災害の危険度」というテーマで 書いたが、「地球温暖化と土砂災害の危険度」とすべ きだったかも知れない.

#### 参考文献

- 1) 岡田憲治(2016.3): 土壌雨量指数から見た土砂 災害の発生タイミング. 土砂災害予測に関する 研究集会, 61-70.
- 2) 岡田憲治 (2006): 土壌雨量指数による崩壊危険 度予測,豪雨時における斜面崩壊のメカニズム および危険度予測. 実務シリーズ,地盤工学会, 131-137.
- 3) 岡田憲治 (2004): 土壌雨量指数からみた先行降 雨の影響. 文部科学省平成 16 年度科学技術振興 調整費緊急研究「新潟県中越地震」シンポジウム, pp.92-100.
- 4) 気象研究所報道発表資料(2014): 平成 26 年 8 月 20 日の広島市での大雨の発生要因~線状降水帯の停滞と豊後水道での水蒸気の蓄積~.
- 5) 倉嶋厚・岡田憲治他(2016): 雲と風のことば辞典, 講談社学術文庫.
- 6) 倉嶋厚・原田稔他 (2000): 雨のことば辞典, 講 談社学術文庫.
- 7) 豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関する研究委員会(2003):新しい降雨指標 土壌雨量指数.豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関する研究報告書,地盤 工学会,43-52.
- 8) 津口裕茂・加藤輝之 (2014): 集中豪雨事例の客 観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析. 天気, **61**, 455-469.
- 9) 増田善信(2017): 異常気象と風水害, 一地球温暖化の影響か? 一共生サイエンス・アカデミア2017年度第6回共学会.
- 10) 吉崎正憲・加藤輝之(2007): 豪雨・豪雪の気象学. 朝倉書店, 187pp.

## 土砂災害に関する豪雨度,豪雨階の設定法

林 拙郎\*·山田 孝\*\*

# Setting a Method for Determining the Intensity and Scale of Heavy Rainfall Regarding Sediment-Related Disasters

Setsuo HAYASHI \* and Takashi YAMADA\*\*

\*Shizuoka Univ. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards (Guest professor), Japan hayashi-s@ztv.ne.jp \*\*Hokkaido Univ., Research Faculty of Agriculture, Japan tyamada@for.agr.hokudai.ac.jp

#### **Abstract**

Until now, an emphasis has been placed on the time prediction of the early stages of sediment-related disasters occurring due to heavy rainfall. However, when the rainfall continues after the occurrence of a disaster, the degree of the damage caused by the sediment-related disasters is determined by the slope failure based on final "quantity of the heavy rainfall." Making the "quantity of the heavy rainfall" equivalent to the degree of the damage caused by sediment-related disasters, antecedent rainfall and triggering rainfall are introduced as factors of heavy rainfall. Antecedent rainfall ( $R_{2-15}$ ) is the amount of rainfall for the two weeks prior to two days before the disaster. Triggering rainfall ( $R_{0-1}$ ) is the amount of rainfall over two day period, the day of the disaster and the day before the disaster. However, these factors are affected by the locality of the heavy rainfall. Therefore, to eliminate the influences of locality, a local rainfall ( $R_{1/2}$ ) factor is introduced. By using this local rainfall factor, two rainfall amounts are evaluated, and criteria indicators for heavy rain are established. The indicators for heavy rainfall are formulated by the intensity of antecedent soil moisture ( $R_{2-15}/R_{1/2}$ ) and the intensity of triggering rainfall ( $R_{0-1}/R_{1/2}$ ). Using this scale indicator of heavy rainfall, a class of heavy rainfall, from H0 to H6, is introduced to evaluate rainfall levels that cause sediment-related disasters. The Tokai, Kiihanto, and 2017 Kyushu hokubu heavy rainfall events qualify as H6 class heavy rainfall.

**Key words**: Disaster caused by heavy rainfall, Antecedent rainfall, Triggering rainfall, Quantity of the heavy rainfall, Instrumental seismic intensity

#### 1. はじめに

豪雨によって発生する土砂災害の発生予測は,実 効雨量,土壌雨量指数,連続雨量を用いるなどの方 法によって,降雨状況をみながら実用上行われるよ うになって来た.これらの発生予測は,土砂災害の 発生初期の時刻を予測するものであって(林・山田, 2015;岡田・牧原,2001),最終的な豪雨の量によっ てどのような土砂災害が発生するのかなど、豪雨の結果としての全体への影響を評価するものではない(林・山田, 2013, 2017). これまで豪雨性土砂災害については、1時間雨量から数時間の短時間雨量や、日雨量から3日間雨量までの各総雨量、さらには1週間雨量、2週間雨量まで、調査者によって異なる収集データが報告されていた。これは、日本が多雨

<sup>\*</sup>静岡大学防災総合センター(客員)

<sup>\*\*</sup> 北海道大学農学研究院

地域から少雨地域まで広い範囲にあるのと、土砂災害の発生初期をみるのか、終局期の全体をみるのかによって視点が異なっていたものと考えられる。最終的な豪雨の量によってどのような被害が発生するかは、例えば、崖崩れ件数と雨量(累積雨量や大滝の実効雨量(大滝、1962))の関係が知られている(浦・樋野、1978;岸田・小山、1968)ところであり、被害を発生させた豪雨の量を定義し、全体像を明らかにしようとする研究は、網干・低引(1972)の研究を除くと少ない(林・山田、2017).

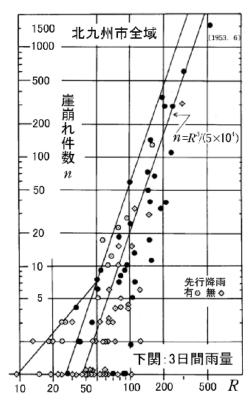
一方,地震関係では,マグニチュードや計測震度などがあり,竜巻ではFスケールがあるのに対して,土砂災害に関係する豪雨の関連では,地域性の影響や原因が複雑ということもあって計測震度に相当するようなスケールは設定されていなかった.以下では,日雨量を用いてトリガー雨量の日数と先行雨量の期間を設定し,最終的に豪雨度,豪雨階と被害状況を考察する.これらの豪雨度,豪雨階は,基本的に雨量計毎に求められるので,地震において知られている計測震度に相当する豪雨度を雨量計毎に求めようとするものである.

## 2. 従来の研究および研究方法

#### 2.1 累積雨量と被害箇所数の関係

土砂災害に関係する「豪雨量」は、発生初期の「豪雨量」から終局時における「豪雨量」まで、山地斜面の土層内の水貯留量を増加させ、斜面を不安定化させる。被害の大きさを知るためには、最終的な「豪雨量」の大きさを求めることが必要であり、それによって、被害の全体像が明らかになる。豪雨による水貯留量の大きさは、予め土層に水分を与える先行雨量の大きさと直接影響するトリガー的な雨量(以下、トリガー雨量)の大きさが関係すると考えられている。このうち、トリガー雨量は被害に直結しており、注目されることが多く現在でも  $1 \sim 3$  日程度の累積雨量が第一義的な要因として採り挙げられることが多い。浦・樋野(1978)は北九州における崖崩れ件数nに対して3日間の累積雨量  $R_{0-2}$  を用い、図1に示すようなべき乗関係を得ている。

一方, 先行雨量については, 取り扱いが難しく, 当初あまり採り挙げられることが少なかったが, 大滝の実効雨量の考え方がそれを解決した. 岸田・小山 (1968) は, 大滝 (1962) の実効雨量 Do を用いて崖



**図1** 崖崩れ件数と累積雨量 R<sub>0-2</sub> (浦・樋野、1978)

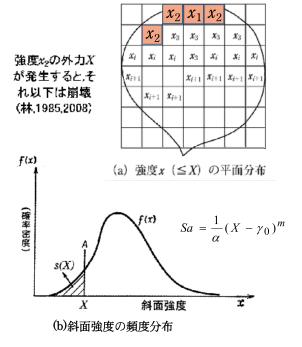


図2 外力の作用による斜面崩壊の発生過程

崩れ件数に対するDo との関係をべき乗関係式で示した.累積雨量や大滝の実効雨量にしても斜面土層の間隙水圧を増加させ,不安定にさせるので,地震力と同様,広い意味での作用外力に相当する.斜面強度が図2(a) に示すように分布する場合,斜面強度 $x_2$  に相当する外力Xが作用すると,それ以下の斜面強度 $(x_1, x_2)$  の斜面はすべて崩壊することになる.地震と異なるのは,「豪雨量」の大きさによって,最初 $x_1$  の斜面が崩壊し,「豪雨量」が増加すると, $x_2$  に拡大し,さらに増えれば $x_3$  の強度の斜面も崩壊することになる.このような経過によって豪雨被害の全体像が形成される.斜面強度の頻度分布と作用外力との関係を図2(b) に示す.斜面強度の頻度分布に Weible 分布を仮定すると,作用外力Xと崩壊面積率Sa との関係は,図2 に示すように

$$Sa = (X-\gamma_0)^m/\alpha$$

で示される (林, 1985; 2008). ここに, $\gamma_0$ : 斜面強度分布の最小値,m, $\alpha$ : パラメータである. この作用外力 X と崩壊面積率 Sa の関係を累積雨量  $R_{0-2}$  と崖崩れ件数 n の関係に置き替えると**図1** の関係式が導出される. ここで,豪雨の全体像,すなわち豪雨の量は作用外力 X に相当する.

### 2.2 先行雨量とトリガー雨量による被害状況

最初に、被害の大きさに着目して豪雨の量を直接表す方法を考えた研究に網干・低引(1972)の研究がある。網干・低引は、広島付近の被害当日の日雨量(トリガー雨量)と2週間累積雨量(先行雨量)を用いて被害の大きさを示す方法を考えた。その後、この検討方法は、長崎豪雨における土砂災害の分析に用いられた(長大調査団、1982)。図3は佐々木(2008)が網干・低引のデータに追加した図であり、両座標値の上位(右上)のデータほど災害の規模が大きくなっていることがわかる。

この図3の横軸は前日までの2週間雨量であり、縦軸は災害当日の日雨量である.しかしながら、豪雨は24時(0時)をまたぐことも多く、トリガー雨量としては、災害当日と前日を含めることが必要である.以下、トリガー雨量は当日と前日の2日間雨量 $R_{0-1}$ とする.一方、先行雨量の期間については、ここでは網干・低引(1972)に従い、先行雨量としては前々日からの2週間雨量 $R_{2-15}$ を用いる.

次に、豪雨性の土砂災害に対する採用すべき雨量 計の位置関係に配慮が必要である。雨量計の選択に

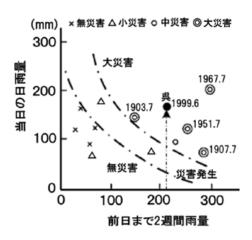


図3 前日までの2週間雨量と当日の日雨量の関係 (佐々木(2008)を修正)

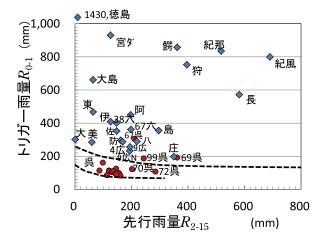


図4 土砂災害の豪雨の状況(2週間先行雨量)

あたっての注意点として以下の3つの方針を採用する(林・山田, 2017).

- (1) 斜面山側の雨量計を選択
- (2) 上記が無理であれば、直近の雨量計を選択
- (3) 古い災害で上記2つが無理であれば、代表点の雨量計を選択

先行雨量  $R_{2-15}$  とトリガー雨量  $R_{0-1}$  による顕著な土砂災害の豪雨をプロットしたものが**図 4** である. 図中,最も下側の破線は,呉の土砂災害発生雨量の推定限界線を示したものであり,その上側の破線は呉以外の推定限界線である. 呉はかなり少ない「豪雨量」で土砂災害が発生している.

図4中の「紀風」、「紀那」は2011年紀伊半島豪雨によるアメダス風屋とアメダス色川の「豪雨量」であり、深層崩壊を含む斜面崩壊および表層崩壊を含む土石流が目立った豪雨域に対応している。この他、「伊」は1961年伊那谷豪雨の前アメダス飯田、「長」

-H1	<b>幸ごか</b>	구리하다	7 8
表Ι	蒙雨名.	雨量計な	کے

災害年	豪雨名	略記	雨量計の名称と それとの位置関係	地域雨量
1938年7月	六甲	38六	前アメダス神戸(2)	アメダス神戸
1958年9月	狩野川	狩	気象庁湯ヶ島(2)	アメダス湯ヶ島
1961年6月	伊那谷	伊	前アメダス飯田(3)	アメダス飯田
1967年7月	神戸	67六	前アメダス神戸(2)	アメダス神戸
1967年7月	呉	67呉	前アメダス呉(2)	アメダス呉
1967年7月	佐世保	佐	前アメダス佐世保(3)	アメダス佐世保
1969年7月	呉	69呉	前アメダス呉(2)	アメダス呉
1970年6月	呉	70呉	前アメダス呉(2)	アメダス呉
1971年9月	尾鷲	尾	前アメダス尾鷲(2)	アメダス尾鷲
1982年7月	長崎	長	アメダス長崎(3)	同左
1983年7月	島根県西部	島	アメダス浜田(3)	同左
1999年6月	呉	99呉	アメダス呉(2)	同左
1999年6月	99広島	9広N	NEXCO八幡川(2)	魚切ダム
1999年6月	99広島	9広	広島県魚切ダム(1)	魚切ダム
2000年9月	東海	東	アメダス稲武(2)	アメダス稲武
2004年7月	美山	美	アメダス美山(2)	同左
2004年8月	徳島	徳	国交省_沢谷(2)	同左
2004年9月	宮川	宮ダ	三重県_宮川ダム(2)	同左
2005年9月	鰐塚	鰐	アメダス鰐塚山(1)	同左
2009年7月	防府	防	国交省_真尾(2)	アメダス防府
2010年7月	庄原	庄	広島県大戸(2)	アメダス庄原
2010年7月	八百津町	八	アメダス伽藍(2)	同左
2011年9月	紀伊那智	紀那	アメダス色川(2)	同左
2011年9月	紀伊風屋	紀風	アメダス風屋(2)	同左
2012年7月	阿蘇	阿	熊本県阿蘇城山(1)	アメダス阿蘇乙姫
2012年8月	大津南部	大	滋賀県大石(2)	アメダス大津
2013年10月	伊豆大島(*1)	大島	都_御神火茶屋(1)	アメダス大島
2014年8月	広島	4広	広島県上原(2)	アメダス三入
(*1)一部都	野増雨量より	推定		

は 1982 年長崎豪雨のアメダス長崎,「島」は 1983 年島根県西部豪雨のアメダス浜田の「豪雨量」である. 徳島豪雨のトリガー雨量 1,430 mm は多雨地域でもあるが,極端に多い.トリガー雨量の 800 mm 以上の降雨点はいわゆる多雨地域に属する豪雨である. 図中の略記などの説明は表1に示す.

#### 2.3 基準化豪雨指標

先の**図4**は,発生した「豪雨量」をそのままの値で示したものであり,降雨の地域性の影響は考慮していない.ここで,降雨の地域性を表す地域雨量  $R_{1/2}$  として確率雨量 2 年に 1 回発生する日雨量を採用した.こうして,同図の横軸,縦軸の降雨の地域性を地域雨量  $R_{1/2}$  で除し,基準化豪雨指標として表したものが**図5**である.ここで横軸,縦軸をそれぞれ

 $\{$ 先行水分度 $(R_{2-15}/R_{1/2})$ ,トリガー度 $(R_{0-1}/R_{1/2})\}$ と呼ぶ.トリガー度はトリガー雨量を基準化した名称であり,先行水分度は先行雨量を基準化した名称である.ここで,先行雨量に 2 週間雨量を用いたのは,一つには網干・低引 (1972) の研究によっているが,「紀風」と「長」の縦軸トリガー度が [4-5] の枠にあり,横軸の先行水分度も [4-5] の範囲に入っているからである.これによって縦軸の数値と横軸の数

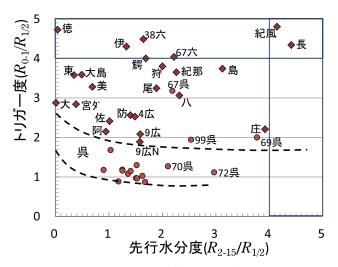


図5 地域雨量 R<sub>1/2</sub> で基準化した基準化豪雨指標 (先行雨量が2週間の場合)

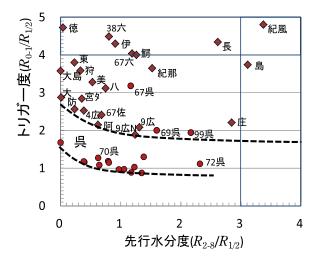


図6 先行雨量が1週間の場合の基準化豪雨指標

値の最大値がほぼ同一の大きさとなり、数値軸として同じ意味合いともたせることが可能となる。実際、先行期間を1週間とした場合、図6のようになり、「紀風」にしても横軸が [4-5] の枠に入らない。また、3週間にした場合には、横軸が [4-5] の枠を出ることはないが、少し大きくなるだけであるので、わざわざ3週間とする必要性は感じられない。以上から先行雨量の期間は2週間に決定される。さて、改めて図5をみると、多雨地域の「徳」のトリガー度は高い数値のままであるが、この枠には、伊那谷豪雨の「伊」や六甲豪雨の「38六」、「67六」が来ており、枠下限境界付近に地すべり性崩壊の発生した「鰐」が来ている。地すべり性崩壊や深層崩壊に着目すると「徳」や、「紀風」、「長」も同様の被害が発生した豪雨である(西山・外山・他、2012;近畿地整、2014;長大調査団、

1982). ただし、「紀風」、「長」には表層崩壊の箇所数も3千箇所以上はある(近畿地整,2014;長大調査団、1982). この他、先行水分度の高い「69 呉」や「庄」は表層崩壊が目立った豪雨である.

さらに、この図における 1938 年六甲豪雨「38 六」と 2014 年広島豪雨「4 広」とを比較すると、先行水分度はほぼ同じであるが、トリガー度が約1.8 倍「38 六」の方が上回っている。両者とも花崗岩の同じような山地山麓にあり、この方法によって豪雨を直接比較できる。1938 年六甲豪雨の甚大さが 2014 年広島豪雨を直接知っている (テレビ体験をしている) 我々によみがえる。つまり、2014 年広島豪雨があの倍近く発生したと考えると、「38 六」の土砂災害の大きさを実感できる、と同時に「4 広」の豪雨があの程度で収まったとことに安堵する。基準化豪雨指標を表す図5からこのようなことが読み取れる。

#### 3. 豪雨度, 豪雨階の設定および考察

#### 3.1 豪雨度の設定法

先の**図5**をみると、トリガー度と先行水分度の最大値はどちらも5であり、縦軸と横軸の最大値は同一となっていて、少なくとも数値上は横軸と縦軸の影響度は同一に設定されている。これにより、**図7**のように豪雨 A と豪雨 B の大きさは同一とみることができ、豪雨度 H は次式で表される。

$$H = \sqrt{x_R^2 + y_R^2}$$
 (1)

ここに、 $x_R=R_{2-15}/R_{1/2}$  (先行水分度)、 $y_R=R_{0-1}/R_{1/2}$  (トリガー度) である。こうして(1) 式より各豪雨に対して豪雨度が設定されるので豪雨全体のスケールを表す豪雨階も設定出来る。

#### 3.2 各豪雨の豪雨度、豪雨階

先に示した**図5**の縦軸,横軸の目盛2~6に対して豪雨階を設定すると**図8**が得られる。また,各豪雨に対して(1)式の豪雨度式を適用すると各豪雨度が求められる。

ここで目立つことは、「67 呉」の豪雨階が H3、「69 呉」の豪雨階が H4、また「72 呉」が豪雨階 H3 という結果となったが、各豪雨による崖崩れ箇所数は、それぞれ 1,563 箇所、145 箇所、34 箇所となっていることである(呉市消防局、1977)、「69 呉」の豪雨度が「67 呉」の豪雨度より大きいにも関わらず、後の豪雨の方が崖崩れ箇所数が少ないのは、両者の期間が

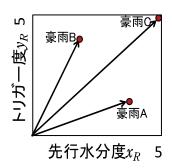


図7 等スケールの豪雨 A と豪雨 B

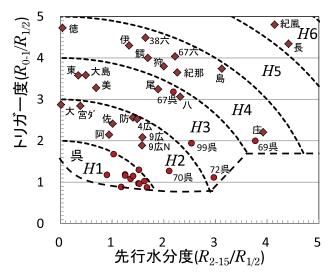


図8 各豪雨に対する豪雨度,豪雨階

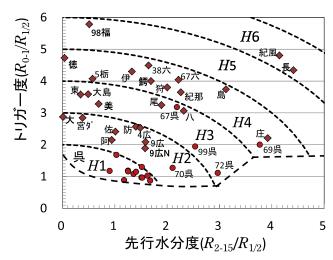


図9 各豪雨に対する豪雨度,豪雨階(追加)

短いために、後の豪雨は前の豪雨で崩れずに残ったより斜面強度の大きい箇所だけが崩れたものと考えることが出来る(先の図2(a)参照). さらに、豪雨階H4の庄原豪雨の崩壊数は1500箇所とされており(海堀・杉原・他、2011)、伊那谷豪雨や1938年六甲豪雨を考えると、この豪雨階の範囲が崩壊箇所数にお

いて概略同程度と考えられる. しかし, 徳島豪雨における崩壊数が825箇所(西山・外山・他, 2012)と少なめであるのは, 必ずしも明確ではないが, 地質の影響か大規模崩壊が含まれるためとも考えられる.

この他、豪雨階 H5 の豪雨の区域が空白であり、ここまでのデータの中にはみられない。これは、ここまでの豪雨データは西南日本が中心であったためであり、東北日本の豪雨 2 つを追加したものが、図9である。図9には「98福」と「5栃」が追加されている。「98福」は 1998 年福島豪雨であり、福祉施設「太陽の国」が被災したときの豪雨(鈴木・南・他、1998)である。これまでのところ、豪雨階 H5 の土砂災害を発生させた豪雨は少ないが、その理由ははっきりしない。図9の「5栃」は、2015年栃木豪雨であり、いわゆる 2015年9月の関東・東北豪雨の際に日光市周辺に土砂災害を発生させた豪雨(竹歳、2016)である。

#### 3.3 顕著な豪雨による土砂災害の程度

表 2 は、過去に発生した土砂災害豪雨に対する豪雨階を一覧表にしたものである。これまでの中で最大級の豪雨 H6 が長崎豪雨 (H=6.1) と紀伊半島豪雨 (H=6.3) であることが改めてわかる。また、2017年九州北部豪雨も豪雨階が最大級の H6 である。この豪雨の最大豪雨度は、H=6.9 であり、これまでの豪雨の中では最大値となっている (雨量計:福岡県北小路公民館)。

ここまで、土砂災害としての代表地点の雨量計を 主に採り挙げて解析を行った.しかし、雨量計は各 地に用意されているので地震における計測震度と併 せて考えると、当然雨量計毎に豪雨度、豪雨階が算 出されるので、その結果を基に豪雨の被害状況を解 析することが可能となる.この点は、計測震度に対 して建物などの倒壊率を検討するのと同様である. ただし、このとき降雨域が小面積であれば、先の 2.2 の 3 つの方針が特に重要となる.

#### 4. 結語

これまで豪雨による土砂災害に関しては、豪雨の 比較的初期における発生時刻の予測に重点が置かれ てきた.しかし、降雨がその後も続く場合、豪雨災 害の全体像(程度)としては、最終的な「豪雨量」に よって土砂災害の被害の程度が決定される.これが 求めるべき土砂災害を発生させた豪雨の全体像であ

表2 豪雨階と発生豪雨

豪雨階H (H スケール)	顕著な土砂災害豪雨
0	
1	呉(小豪雨)
2	佐世保, 70呉, 宮川, 4広島 9広島*, 防府, 阿蘇, 大津
3	伊豆大島, 美山, 東海, 67呉 尾鷲, 72呉, 99呉, 八百津
4	38六甲, 67六甲, 69呉, 島根, 狩野川, 庄原, 徳島, 紀那智, 伊那谷, 鰐塚, 栃木
5	福島
6	長崎, 紀風屋, 2017 九州北部
*:9広島N(	は省略

注)各図より豪雨名称を詳しく表記

る. 一方, 地震の場合は被害の程度を表す計測震度 などが設定されているが, 豪雨の場合はそれに相当 する豪雨度, 豪雨階の設定はなされていなかった.

このような全体像としての「豪雨量」を明らかにするために、日雨量に基づく2つの豪雨因子、つまり先行雨量、トリガー雨量を選定した。被災当日と前日の2日間雨量をトリガー雨量 $R_{0-1}$ とし、前々日から2週間(14日間)雨量 $R_{2-15}$ を検討の上、先行雨量として設定した。ここで、トリガー雨量 $R_{0-1}$ は被害に対して豪雨の仕上げとしての役割を担っている。

以上のことを明確にするために過去の多くの土砂 災害豪雨を収集し、考察を行った. 結論は以下のよ うにまとめられる.

- ① 地域雨量  $R_{1/2}$  によって豪雨指標の基準化を行った.基準化豪雨指標は先行水分度  $(R_{2-15}/R_{1/2})$  とトリガー度  $(R_{0-1}/R_{1/2})$  によって表される.これにより各豪雨データの全国比較が可能である.
- ② 2017年の広島豪雨のように、テレビ体験を通して被害の状況が知られている場合、過去の豪雨災害を先行水分度とトリガー度に基づき、現代の被害と比較することによって過去の災害の全体像や程度を実感することが可能となる.
- ③ 基準化豪雨指標より算出した豪雨度より,土砂 災害豪雨に対し H0 ~ H6 までの豪雨階を設定 した.過去の豪雨の中で,長崎豪雨と紀伊半島 豪雨が最大級の豪雨階 H6 であり,2017 年九州 北部豪雨も最大級の H6 である.

本稿の検討によって,今後適切な日雨量が得られれば,豪雨の発生直後に豪雨度,豪雨階が算定され

る. これらの値より,過去における全国の豪雨性土砂災害の発生状況を直接,比較検討することが可能となる.必要なデータは各雨量計の16日間の日雨量(災害当日と前日の2日間雨量と前々日からの14日間雨量)と適切な地域雨量であり,豪雨度,豪雨階は雨量計毎に算定可能である.また,豪雨性土砂災害時における収集データの必要な雨量の種類を明確にすることができ,発現豪雨の評価法も一般化が可能になるものと考えられる.

#### 謝辞

本稿をとりまとめるに当たり、福岡県県土整備部 からは雨量データの提供を頂きました.記してお礼 を申し上げます.

### 参考文献

- 1)網干寿夫・低引洋隆(1972):真砂土自然斜面の崩壊について、第7回土質工学研究発表講演集,507-510
- 2) 林 拙郎(1985): 崩壊面積率と水文データとの 二, 三の関係. 日本林学会誌, 67(6), 209-217.
- 3) 林 拙郎(2008):保全砂防学入門-土砂災害の 予知と防災. 電気書院, 198-234.
- 4) 林 拙郎・山田 孝(2013): 最近の土砂災害に おける実効雨量の係数の特性について. 砂防学 会誌, 66(2), 31-39.
- 5) 林 拙郎・山田 孝(2015): 豪雨による斜面表 層崩壊と実効雨量-斜面内土層の浸透流からの 検討-. 地盤工学電子ジャーナル, **10**(1), 157-162.
- 6) 林 拙郎・山田 孝(2017): 土砂災害を発生させた豪雨のファクターとスケールの設定法. 自然災害科学, **36**(3), 239-252.
- 7) 海堀正博・杉原成満・中井真司(2011): 広島県

- 庄原災害の誘因としての降雨と斜面で起きていた現象についての考察. 第50回砂防学会研究発表会概要集,112-123.
- 8) 岸田英明・小山邦勇 (1968): 第3回土質工学研究発表講演集, 363-369.
- 9) 国土交通省近畿地方整備局(略称;近畿地整) (2014): 2011 年紀伊半島大水害 - 災害対応の記 録、国土交通省近畿地方整備局、1-199、
- 10) 呉市消防局(1977): 呉市の火災と水災の記録, 1-125.
- 11) 長崎大学学術調査団(略称;長大調査団)(1982): 昭和57年7月長崎豪雨による災害の調査報告書, 長崎大学工学部、1-145.
- 12) 西山賢一・外山 真・岡田憲治(2012): 2004年 台風10号により徳島県で発生した斜面崩壊に影響する雨量・地形・地質特性. 徳島大学ソシオ・ アーツ・アンド・サイエンス研究部,自然科学 研究, 26(4), 17-29.
- 13) 岡田憲治・牧原康隆・新保明彦・永田和彦・国 次雅司・斉藤 清(2001):土壌雨量指数,天気, **48**(5), 59-66.
- 14) 大滝俊夫 (1962): 横浜市内の崖崩れの予報. 研究時報, **14**(7), 13-19.
- 15) 佐々木康 (2008): 土に関する三つの話題. JICE REPORT, **13**, 74-85.
- 16) 鈴木勇二·南 哲行·土屋 智·北原 曜·逢坂興宏· 執印康裕(1998): 砂防学会誌, **69**(3), 40-42.
- 17) 竹歳健治(2016): 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨 による日光市芹沢地区の土石流災害への対応砂 防学会誌, **69**(3), 67-74.
- 18) 浦 勝・樋野克巳(1978):北九州市の崖崩れ件数と降雨量について、九州工業大学研究報告(工学), **36**, 13-24.

#### 要旨

これまで豪雨による土砂災害の研究は,災害初期の発生時刻の予測に重点が置かれてきた.しかし,降雨がその後も続く場合,豪雨災害の全体像(程度)は,最終的な「豪雨量」によって斜面崩壊などの被害の程度が決定される.全体像としての「豪雨量」を明らかにするために,必要な豪雨ファクターとして,トリガー雨量と先行雨量を設定した.トリガー雨量は被災当日と前日の2日間雨量  $R_{0-1}$  であり,先行雨量は前々日から2週間(14日間)雨量  $R_{2-15}$  である.しかし,このファクターは豪雨の地域性を含んでおり,その影響を除去するために,地域雨量  $R_{1/2}$  を導入した.この  $R_{1/2}$  によって2つの雨量を基準化した.これが基準化豪雨指標である.基準化豪雨指標は先行水分度  $(R_{2-15}/R_{1/2})$  とトリガー度  $(R_{0-1}/R_{1/2})$  によって表される.この2つの指標より豪雨のスケールとして豪雨度が設定される.設定された豪雨度より,土砂災害用に  $H0 \sim H6$  までの豪雨階を設定した.豪雨階 H6 には,長崎豪雨と紀伊半島豪雨,2017 年九州北部豪雨が該当した.

キーワード:豪雨災害,先行雨量,トリガー雨量,豪雨の量,計測震度

# 降雨を誘因とする深層崩壊の発生メカニズム解明と 危険地評価に向けた水文学的アプローチ

山川陽祐\*・谷口未峰\*・堀田紀文\*\*・江草智弘\*\*・小田智基\*\*・ 小杉賢一朗\*\*\*・松四雄騎\*\*\*・勝山正則\*\*\*・正岡直也\*\*\*

キーワード:深層崩壊,地下水,地質構造,水質指標

降雨による深層崩壊の特徴として, ①発生タイミ ングは降雨ピークとのタイムラグが様々であり、長 期的な先行降雨が崩壊発生に大きく影響する可能性 (例えば、内田ら、2011)、②崩壊に至る予備段階と して斜面の重力変形が生じており、 小崖や線状凹地 などの微地形として現れる可能性が指摘されている (千木良ら, 2012). ①については、地質構造に支 配された岩盤内の地下水挙動が関係していると考え られるが、その実態は不明な部分が多い. ②につい ては、崩壊危険度の高い斜面を微地形情報からある 程度抽出できる可能性があるが、重力変形の予兆を 示す全ての斜面が同等に危険な斜面ではなく、発生 予測や対策の上では危険度の分類が重要と考えられ る. 本発表では、これらの背景を踏まえ、深層崩壊 の主要な発生場である付加体堆積岩山地において, 地形および地質構造特性を踏まえた水文学的な手法 を用いた下記2つの研究成果を報告する.

# 1. 湧水の詳細な観測による基岩地下水システムの実態解明

斜面上の湧水(上部に流水痕が見られない湧出水) に着目し、滋賀県安曇川水系および静岡県大井川水 系のそれぞれにおいて湧水量を複数地点において観 測した。

安曇川水系では、安曇川上流に位置する葛川谷の 右岸にあたる流れ盤斜面を対象とした. 葛川谷は花 折断層に沿う断層谷であり、これに付随する断層(破 砕帯)と考えられるリニアメントや馬蹄形の重力変 形地形が対象斜面上に複数見受けられた(図1). 対 象斜面には多くの湧水が確認され、その内9地点に おいて三角堰を用いた流量観測を行った. ほとんど の湧水点には断層ガウジ(断層粘土)が確認された.また、対象斜面では標高の異なる湧水が多数存在する.これらのこととボーリンング孔内水位から、断層ガウジが遮水層となり、これに規制されて基岩地下水が斜面上に湧出するという地下水流動機構が推定された(図2).9地点の湧水はおおよそ20haの範囲内に収まる同一斜面上に近接して分布しているにも関わらず、湧水量の降雨応答の速度は湧水ごとに顕著に異なり(図3)、断層ガウジや重力変形によって分断された地下水帯システムが存在すると考えられた.湧水の水温季節変動幅および水安定同位体比



図1 葛川地区の研究対象斜面の地形および湧水点, ボーリング井戸の位置 (太い等高線は50m間隔)

<sup>\*</sup> 筑波大学

<sup>\*\*</sup> 東京大学

<sup>\*\*\*</sup> 京都大学

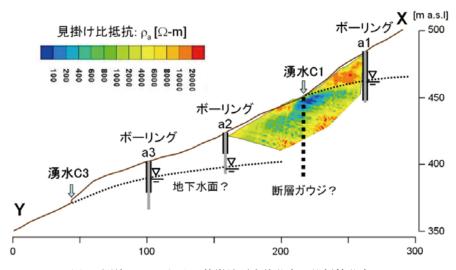


図2 測線 X-Y における基岩地下水位分布と比抵抗分布

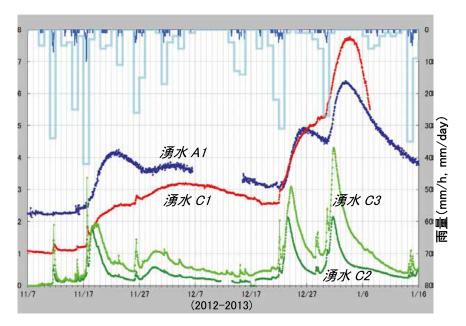


図3 雨量,基岩湧水ハイドログラフ

の季節変動特性の情報からも分断された地下水帯システムの存在が示唆された.

大井川水系では、約23.5 km²の流域面積をもつ東河内沢流域の左右岸斜面のそれぞれ2地点、計4地点において湧水の流量観測を行った。降雨条件が概ね一様と考えられる4地点間において、湧出量増加および逓減の応答は大きく異なり、湧水量と実効降雨の相関解析では、それぞれ相関係数が最も高くなる最適半減期が数十時間から百数十時間の範囲で顕著な相違が認められた。また、降雨時の流量増加は左岸側の湧水は右岸側に比べて顕著に大きいことが

観測された.流域内の支川小流域において平水時の 比流量は4つの右岸側小流域において5つの左岸小 流域のいずれよりも大きいこと(山川ら,2015)と併 せて,右岸側と左岸側で特徴づけられる降雨流出プ ロセスが存在することが示唆された.東河内沢の地 質構造が大局的には左岸側は流れ盤,右岸側は受け 盤の地質構造を呈すること(久田,1990)がこれらの 水文プロセスに影響していると考えられた.

2つのサイトでの湧水観測に基づき,層理面,断層, 重力変形などの地盤構造特性によって地下水システムが規制される実態が示唆された.

# 2. 台湾における渓流水の水質指標を用いた深層崩壊 危険度評価の試み

深層崩壊の潜在的なすべり面形成の進行に伴い, 斜面からの流出水の量や質が変化することが考えら れる. 特に, 基岩内において比較的透水性の高い潜 在すべり面周辺を経由する地下水流動が増加し、そ れを反映して流出水の無機イオン濃度や電気電導度 (EC) が高まることが考えられる. このような仮定 に基づき、台湾をフィールドサイトとして、多地点 の水質データを比較することにより、水質指標によ る潜在危険流域および斜面の評価方法の有効性を検 討した. 台湾では航空レーザー測量データを用いた 微地形判読による深層崩壊危険地 (potential landslide area: PLA) の抽出作業が進んでおり、水質指標との 比較が可能である. また、台湾は日本に比べて深層 崩壊発生頻度が高いために, 今後, 実際の崩壊発 生による検証を進めることが出来ると期待される. PLA が密集する潮州層 (新第三紀頁岩砂岩互層) を中 心に採水を行い,無機イオン濃度,シリカ(Si)濃度, EC を測定した. 潮州層では、特異的に EC と Si 濃 度の逆相関が見られ、流域面積に対する PLA 面積 率の高い採水地点では EC および Si 濃度の両値が高 い傾向が確認された. このことから、潮州層におい ては EC と Si 濃度を組み合わせた水質指標が有効で あること, また, 地質帯に特有の水質指標が想定さ れることが示唆された.

#### 引用文献

- 1) 内田太郎 (2011):深層崩壊 (技術手帳). 地盤工 学会誌, Vol. 59, No.9, pp.55-56.
- 12 千木良雅弘・松四雄騎・ツォウ・チンイン・平石成美・松澤真・松浦純生(2012): 2011 年台風12 号による深層崩壊。京都大学防災研究所年報,55(A),pp.193-211.
- 3) 山川陽祐・堀田紀文・經隆悠(2015): 南アルプス破砕帯流域における水・土砂流出特性の解析-大井川水系・東河内沢流域における観測事例-. 中部森林研究,第63号,pp.141-142.
- 4) 久田健一郎 (1990): 井川演習林内の地質. 筑波 大学農林技術センター演習林報告, 第6号, pp. 23-43.

## 平成29年度九州北部豪雨を引き起こした線状降水帯に伴う降水量の予測可能性

加藤亮平\*・下瀬健一\*・清水慎吾\*

キーワード:集中豪雨,線状降水帯,数値予測,予測可能性

#### 1. はじめに

平成29年7月5日から6日にかけて九州北部で集中豪雨が発生した.この豪雨に伴い土砂崩れや河川の氾濫が多発し、住家被害1,300棟以上、家屋浸水1,500棟以上、死者・行方不明者40名以上の甚大な被害が生じた.福岡県朝倉市では気象庁解析雨量により12時から18時(日本標準時)の6時間に630mmが解析された(図1).この集中豪雨は"線状降水帯"が発生し、長時間同じ場所に停滞したことで引き起こされた.事前の避難喚起等を行うためには線状降水帯の発生および停滞を十分な精度で予測する必要がある.本研究では、数値予測による線状降水帯に伴う降水量の予測可能性を以下の4点に焦点を当て調査を行った:(1)線状降水帯の発生は予測できるか(2)線状降水帯の停滞が予測できるか(3)予測のリードタイム(4)定量的な予測精度.

## 2. 数値予測の実験設定

水平格子間隔 1 km の雲解像数値モデル (CReSS) を用い数値予測を行った. 予測のリードタイムを調べるために, 線状降水帯の形成が始まった 12 時頃以前の複数の初期時刻 (09, 10,

11,12時)から計算を開始した.

### 3. 結果と議論

(1) の線状降水帯の発生に関しては、どの実験でも複数の線状降水帯の発生が予測できた. しかしながら,(2)の停滞は、観測と同様の線状降水帯の停滞(組織化・局地化)を予測することができなかった. その結果、予測された6時間積算雨量の最大値は観測と比べ大きく過小(観測の半分以下)となっていた(図1). 一方,

豪雨域周辺で平均した雨量は予測の方が大きかった(図1). したがって、予測された雨量がより局地化すれば観測された最大雨量は予測可能である. このような予測を行うためには、線状降水帯の停滞(組織化・局地化)メカニズムを解明することが重要である.

(3) の予測のリードタイムについては,6 時間積算雨量が150 mm以上の強雨域を精度良く予測するには豪雨直前(11 時と12 時)からの予測が必要であることがわかった.

(4) の定量的な予測精度については、精度が高い 豪雨直前 (11 時と 12 時) からの予測でも 6 時間積算 雨量 100 mm 以上の強雨域に対して 30 ~ 40 km 四方の位置ずれが存在していた。また、予測された積 算雨量の最大値は観測の半分以下であった。したがって、土砂災害等の予測計算のインプットとして 気象モデルで予測された降水量分布を利用する場合、このような位置ずれや降水量の誤差を踏まえて入力を加工する必要がある。

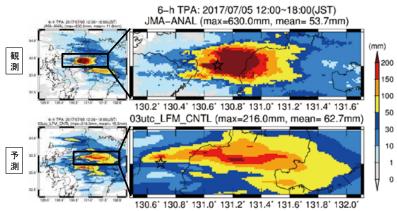


図1 2017年7月5日12時から18時までの6時間積算雨量. 観測は気象庁解析雨量, 予測は12時を初期値とするCReSSによる数値予測である. max は最大値, mean は領域平均値を示す.

<sup>\*</sup>国立研究開発法人 防災科学技術研究所

# 平成 29 年度九州北部豪雨に伴う土砂・地盤災害の現地調査報告

山田隆二\*・若月 強\*・石澤友浩\*・木村 誇\*・檀上 徹\*・吉原直志\*

キーワード: 平成29年度九州北部豪雨、土砂・洪水災害・地盤被害、現地調査、ヒアリング調査

2017年7月5日~6日にかけて対馬海峡付近に 停滞した梅雨前線に向かって暖かく非常に湿った空 気が流れ込んだ影響で、同じ場所に豪雨が長時間滞 在する線状降水帯が発生したため、福岡県朝倉市や 朝倉郡東峰村、大分県日田市で記録的な大雨となっ た. 朝倉市や東峰村では、筑後川支川の佐田川、荷 原川(いないばるがわ), 桂川, 妙見川, 奈良ヶ谷川, 北川, 寒水川(そうずがわ), 白木谷川, 赤谷川, 大 肥川(おおひがわ)などで多数の斜面崩壊・土石流・ 河川氾濫が発生し、橋梁の流出・破損、道路の破壊、 土砂堆積や倒流木によって多数の集落が一時孤立し た、日田市では、小野地区椰野(なぎの)で発生した 大規模な斜面崩壊が同地区を流れる小野川を堰き止 め、住家や道路を破壊したほか、橋梁の流出・破損、 道路の破壊、土砂堆積や倒流木によって多数の集落 が一時孤立した. この豪雨による福岡県・大分県で の人的被害は死者・行方不明者 41 名, 負傷者 22 名, 住家被害は全壊316棟,半壊1,099棟,一部破損44棟, 床上・床下浸水 1,597 棟にのぼる (2017 年 12 月 7 日 時点:消防庁). 災害発生地域の地質は, 主に三畳 紀の高圧型変成岩類(三郡変成帯の泥質片岩など), 後期白亜紀の深成岩類(杷木花崗閃緑岩など),新第 三紀の火山岩類(安山岩-デイサイト溶岩および凝 灰角礫岩など)で構成される. 地質は流域ごとに 異なっており、佐田川、荷原川、桂川、妙見川、奈良ヶ

谷川,寒水川では高圧片岩類が卓越するのに対し, 北川,白木谷川,赤谷川は深成岩類が卓越する.一 方で,大肥川と小野川は火山岩類が卓越する.植生 は大半がスギ・ヒノキ・サワラ植林地となっている. 流域別にみると,桂川,北川,寒水川ではアカマ ツ群落や落葉果樹園の占める面積割合が大きくス ギ・ヒノキ・サワラ植林地の面積割合は2~4割と 相対的に低いものの,その他の流域ではスギ・ヒ ノキ・サワラ植林地の面積割合が5~8割を占める. このため,豪雨時に流出した流木群に含まれる材と しても植林木の幹が多い.

今回、豪雨によって発生した土砂・洪水災害・地盤被害について、災害発生から約2週間後(7月18日~21日)に2班に分かれて現地調査を実施して把握した災害発生状況と、ヒアリング調査や現地採取試料の分析結果、および簡易な雨量分析・斜面崩壊箇所の要因分析を行った。なお、本稿の調査結果は、防災科学技術研究所ホームページ(http://www.bosai.go.jp/)にて公開した災害関連情報(速報)「平成29年7月九州北部豪雨に伴う地盤災害調査報告」および「2017年7月の豪雨により九州北部地方(福岡県・大分県)および島根県で発生した土砂・洪水災害の現地調査報告」の内容に基づくものであり、また数値等は2017年12月20日時点での値であるため、今後の調査・解析により変更する可能性がある。

<sup>\*</sup>国立研究開発法人 防災科学技術研究所



図1 佐田川本川・寺内ダムの湛水域に漂着した流木群. スギなど植林木の幹が大半を占める.

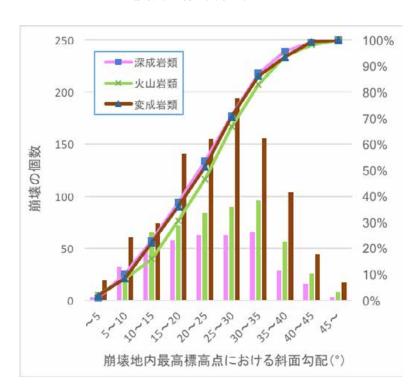


図2 各地質(変成岩類・深成岩類・火山岩類)の斜面崩壊箇所と斜面勾配の関係. 崩壊斜面の勾配は,変成岩類では25~30°を中心とした分布,火山岩類では30~35°を中心とした分布を示すのに対し,深成岩類では最頻値が15~35°と幅が広い分布を示す. 崩壊箇所は国土地理院の判読図(国土地理院,2017. 平成29年7月九州北部豪雨正射画像判読図(朝倉・東峰地区),

http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka\_ooita-heavyrain.html) をもとにした.

# 九州北部豪雨により発生した崩壊の発生時刻と雨量・崩壊形態との関係 -- 日田市柳瀬地区の事例--

松澤 真\*

キーワード: 九州北部豪雨, 崩壊発生時刻と崩壊形態, X バンド雨量データ

#### 1. はじめに

九州北部豪雨により大分県日田市鶴河内柳瀬地区 では大規模崩壊が2箇所と表層崩壊が1箇所発生し た. 本災害により人的な被害は出なかったが、2017 年9月3日に現地調査を行った際, 近隣住民から詳 細な崩壊発生時刻をヒアリングすることが出来た 為、崩壊の発生時刻と雨量・崩壊形態との関係につ いて検討を行った.

#### 2. 崩壊の発生時刻と雨量との関係について

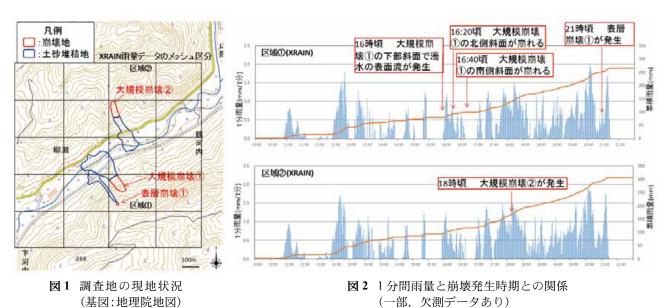
調査地の現地状況を図1に示す、調査地では、鶴 河内川が北東から南西に向かって流下しており,川 沿いに集落が分布している. 大規模崩壊①は左岸側, 大規模崩壊②は右岸側で発生しており、大規模崩壊 ①の付近では、表層崩壊①が発生していた. 崩壊地 の地質は、全箇所が安山岩質溶岩または凝灰角礫岩 が分布する.

X バンド雨量データのメッシュ区分を図1内に黒 枠で示しているが、この範囲のうち区域①および区 域②の1分間雨量データを図2(7月5日10時~22 時) に示す. 雨量データ一部欠測しているが, 区域 ①の総雨量は230 mm, 区域②は320 mm 程度と区 域②の方が90mm程度多い結果となった.

図2には、近隣住民からのヒアリングにより明 らかとなった各崩壊の発生時刻を記載しているが, 16:20~16:40に大規模崩壊①が発生し、18時頃に 大規模崩壊②が発生、そして、21 時頃に表層崩壊① が発生したとのことである.

#### 3. 崩壊の発生時刻と崩壊形態との関係について

崩壊地の現地調査を行った結果、大規模崩壊①お よび②のすべり面には層理面および断層面が分布 しており、表面の一部には粘土が形成されていた. XRD 分析を行った結果、層理面、断層面にはハロ イサイトが形成されていた事が明らかとなった.



\*パシフィックコンサルタンツ株式会社

一般的に、豪雨時には大規模な崩壊より先に表層 崩壊が発生すると言われているが、今回は表層崩壊 より先に大規模崩壊が発生していた。大規模崩壊の すべり面に膨潤性粘土鉱物であるハロイサイトが形 成されていた事が、崩壊が先行した原因の1つと考 えられる.

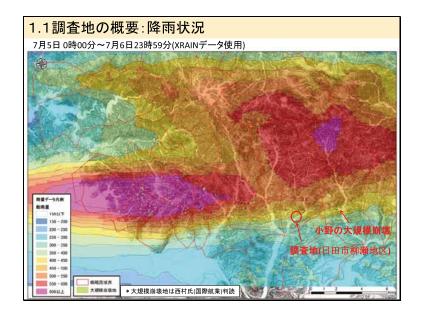
#### 謝辞

本発表の一部には、一般社団法人 日本応用地質学会「九州北部豪雨災害調査団」の団員として2017/9/1~9/3 に現地調査を行った際のデータを用いた、関係者の方々に深く謝意を表します.



# 本日の発表内容

- 1.調査地の概要
- 2.崩壊の発生時刻(近隣住民へのヒアリング)
- 3.崩壊の発生時刻と雨量との関係
- 4.崩壊地の地質的特徴
- 5.おわりに





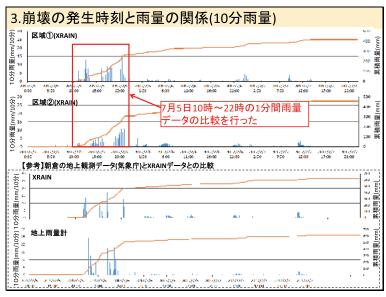


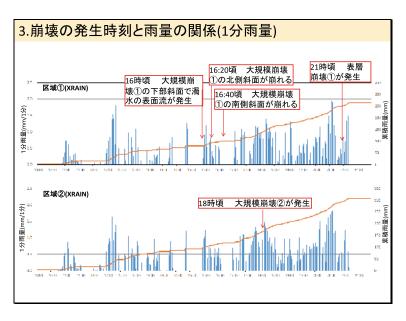


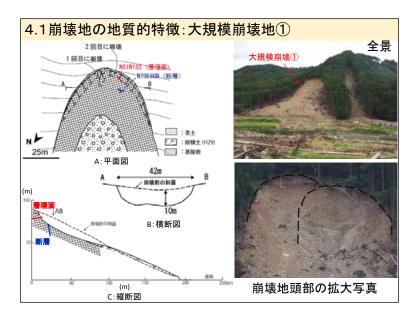




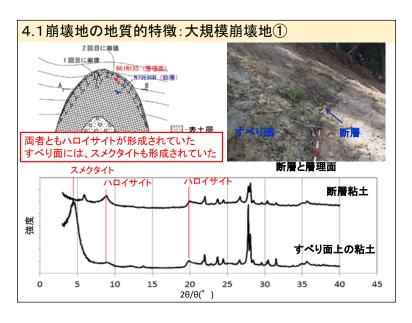




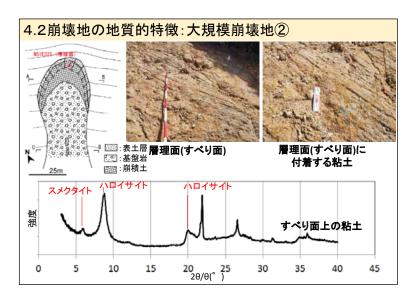
















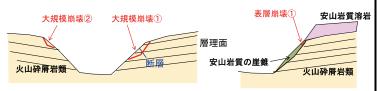


#### 5.おわりに

 日田市柳瀬地区を事例として、崩壊発生時刻(住民ヒアリング)と雨量・崩壊形態と の関係を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

#### 【明らかになった点】

- 1. 崩壊は、表層崩壊より大規模崩壊が先に発生していた。
- 2. 大規模崩壊①、②のすべり面には、膨潤性粘土鉱物であるハロイサイト、スメクタイトが形成されていた。
- 3. 大規模崩壊①では、層理面および断層が斜面に斜交する形で分布しており、地下水が溜まりやすい構造を形成していた可能性がある。
- 4. 表層崩壊①は、キャップロック構造を構成する安山岩質溶岩の崖錐堆積物にて 発生していた。



以上の地質的背景を反映し、崩壊は、大規模崩壊①→大規模崩壊② →表層崩壊①の順番で発生したと考えられる。

# 2017年7月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布および 植生状況との関係について

村上 亘\*·鶴崎 幸\*\*·安田幸生\*·大丸裕武\*

キーワード: 2017年7月九州北部豪雨、レーダー解析雨量、崩壊、植生状況

#### 1. はじめに

2017年7月5日から6日にかけて福岡県および 大分県において発生した豪雨(2017年7月九州北部 豪雨)により多数の崩壊が発生した. 筆者らは斜面 崩壊と豪雨状況との関係について災害後に撮影され た空中写真判読により崩壊箇所(1,713 カ所)を抽出 し, 気象庁のレーダー解析雨量より作成した雨量分 布との関係について検討を行い、最も雨量が多かっ た7月5日の10時から22時までの12時間雨量が 500 mm を超えていた範囲で崩壊が多発したことを 報告した(村上・安田, 2018:印刷中). 今回の豪雨 に伴い、多数の流木が発生し、被害が拡大したこと から、崩壊が発生した斜面に成立していた植生の状 況(樹種, 樹齢構成, 施業履歴など)との関連性が新 聞等より指摘されている. しかしながら、これまで の報告では崩壊が発生した斜面の植生状況について は明らかとなっておらず、上記の指摘は推測の域を 出ていない. 今回の崩壊は多量の雨が崩壊の誘因と なったことは事実であるが、素因となる斜面の地形 (傾斜), 地質, 土壌, 植生状況などとの関係につい ては不明な点が多い.

本報告では崩壊が発生した斜面における,誘因となった雨量以外の素因のうち,植生状況との関係について調査した.解析方法およびその結果については他の素因との関係も含め検討の途中であるが,これまでの結果について取り急ぎ報告する.なお,本報告の内容は,2017年12月8日の発表に基づくが,発表後の検証の結果,解析に用いたデータの使用に不備があったため,再解析を行った結果を掲載するものである.以下の報告内容は,発表時の報告内容とは異なる結果となっていることをお詫びする.

#### 2. 調查方法

解析した範囲は村上・安田(2018, 印刷中)で判読 した範囲のうち、福岡県朝倉市および東峰村のエリ アである(図1). 本調査では、福岡県が編成してい る樹種や樹齢, 地質, 土壌などの属性データが格納 されている森林簿のデータ(ポリゴンデータ)と,国 土地理院が撮影した空中写真より筆者らが判読した 崩壊地のデータ(ポイントデータ)のうち、森林簿に 記載されているエリアで発生した崩壊(1,420カ所) を解析に使用した. 森林簿に記載されていない国有 林などのエリア、あるいは大分県側で発生した崩壊 は、本調査の解析の対象から除外した. 今回の豪雨 では 12 時間雨量が 500 mm 以上のエリアで崩壊の 発生が急増していたことから、500 mm 以上の降雨 のエリアと 500 mm 未満の降雨のエリアで発生した 崩壊をわけ、それぞれのエリアで発生した崩壊地点 の植生状況(樹種, 樹齢)を抽出し, 集計した.

#### 3. 調査結果

解析範囲で発生した崩壊のうち、12 時間雨量が500 mm以上の降雨のエリアで発生した崩壊は1,350 カ所(単位面積あたり26.2個/km²)、500 mm 未満の降雨のエリアでは70 カ所(同0.95個/km²)であり、500 mm以上の降雨のエリアでは500 mm 未満の降雨のエリアよりも単位面積あたりの崩壊発生数がおよそ30倍多い結果となった。解析範囲における樹種と崩壊発生数との関係を図2aおよび図2bに示す。図2aは12時間雨量が500 mm以上のエリアでの解析結果、図2bは500 mm未満のエリアでの解析結果、図2bは500 mm未満のエリアでの解析結果である。どちらのエリアもスギ林とヒノキ林の占める面積が多く(下段のグラフ)、崩壊発生数もスギ林とヒノキ林で多い(中段のグラフ)、しかし、単位

<sup>\*</sup>国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

<sup>\*\*</sup> 福岡県農林総合試験場

面積あたりの崩壊発生数(上段のグラフ)でみると、 500 mm 以上降ったエリアではどの林分でも 20 個 /  $km^2$ 以上の崩壊が発生していたのに対し、500 mm未満では面積が狭かったタケ林で 3.7 個 /km<sup>2</sup>, 非森 林地で1.9個/km<sup>2</sup>となり、エリアが広いスギ林と ヒノキ林の単位面積あたりの崩壊発生数は1個/km<sup>2</sup> 未満となった. 解析範囲で大半を占めるスギとヒノ キ林については、林分の樹齢と崩壊発生数との関係 も調べた. 調査結果は図3a, 3b および図4a, 4b に 示すとおりである. 500 mm 以上、未満のどちらの エリアも 51 ~ 60 年生の樹齢のスギ林あるいはヒノ キ林が占める割合が多かった(下段のグラフ). 崩壊 発生数は単位面積あたりでみると,500 mm 以上, 未満のスギ林、ヒノキ林とも0-10年生で発生が多く、 500 mm 以上のエリアではスギ林で  $68 \text{ 個} / \text{km}^2$ , ヒ ノキ林では 82 個  $/km^2$  であった.500 mm 未満のエ リアではスギ林で 9.9 個 /km<sup>2</sup>, ヒノキ林で 5.5 個 / km<sup>2</sup>であった. 11 年生以上の林分では 500 mm 以上, 未満のどちらのエリアでも樹齢の違いによる差は小 さかったものの、エリアによる発生数には違いが認 められた。500 mm 以上のエリアの 11 年生以上のス ギ林では20個/km<sup>2</sup>前後,ヒノキ林では25個/km<sup>2</sup> 前後の崩壊発生数に対し、500 mm 未満のエリアで はスギ林では0.5個/km<sup>2</sup>,ヒノキ林では1個/km<sup>2</sup> となり、崩壊の発生数に25倍以上の差が認められ た.

#### 4. 考察およびまとめ

今回の解析結果では 500 mm 以上の降雨のエリアでの崩壊発生数と 500 mm 未満のエリアでの崩壊発生数の差が大きいため単純に比較することはできないと考えており、この結果については更なる検討が必要である. しかしながら、今回の解析において、500 mm 以上の降雨のエリアでは森林、非森林地に関係なく、崩壊が発生したことが示されたと考えるが、500 mm 未満のエリアでは、夕ケ林を含む非森林地で発生がやや多い結果となった. このことは500 mm 以上の降雨では斜面の森林、非森林地の違いは崩壊の素因としての影響が小さい一方で、500 mm 未満の降雨においては、斜面の森林、非森林地の違いが崩壊の発生に影響を与えることを示唆していると考える. 樹齢については 500 mm 以上、未満のどちらのエリアでも 0-10 年生の幼齢林で崩壊の

発生が多い結果となった. 11 年生以上の林分では、崩壊の発生数が 10 年生以下の林分に比べると少ないが、500 mm 以上のエリアでは未満のエリアに対して 25 倍以上の崩壊発生数となっていた. このことは、スギ林、ヒノキ林とも 500 mm 以上の降雨になると 11 年生以上の林分でも崩壊が発生しやすくなる、すなわち、崩壊の素因としての影響が小さくなっていることを示すものと考える. これらのことについては、地質や土壌、地形 (傾斜など)等の他の素因と合わせて検討していく予定である.

### 参考文献

1) 村上 亘・安田幸生(2018): 2017年7月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布の関係について.森林総合研究所研究報告,17-1,印刷中.

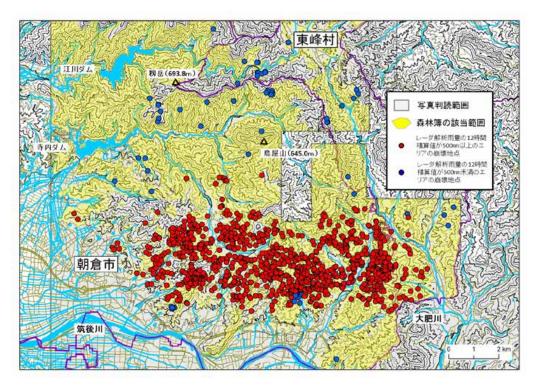


図1 調査地および解析範囲. 崩壊地点は解析対象のみ示す.

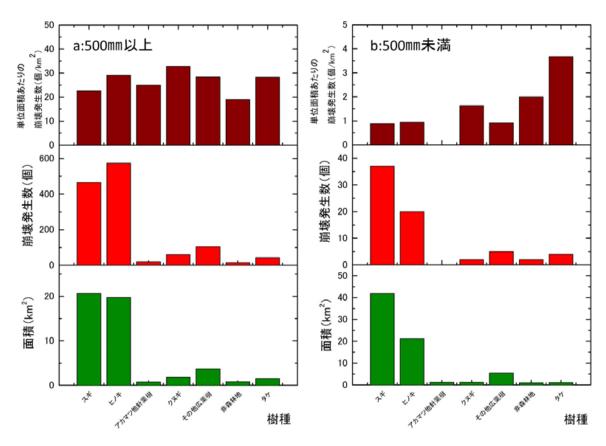


図2 樹種ごとの存在面積と崩壊発生数および単位面積あたりの崩壊発生数. a はレーダー解析降水量の12時間の積算値が500 mm以上のエリア,bは500 mm未満のエリアでの解析結果.

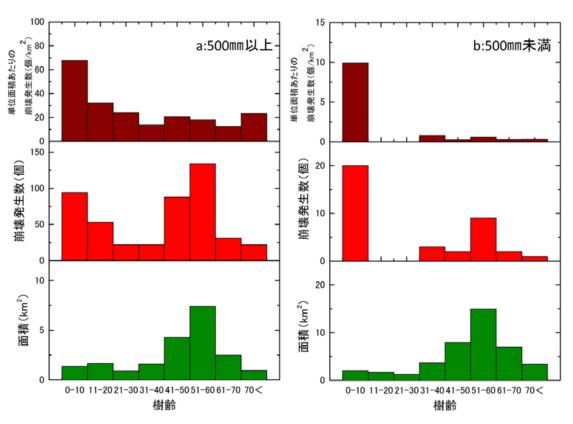


図3 スギの樹齢ごとの存在面積と崩壊箇所数および単位面積当たりの崩壊箇所数. a はレーダー解析降水量の12時間の積算値が500mm以上のエリア, b は500mm未満のエリアでの解析結果.

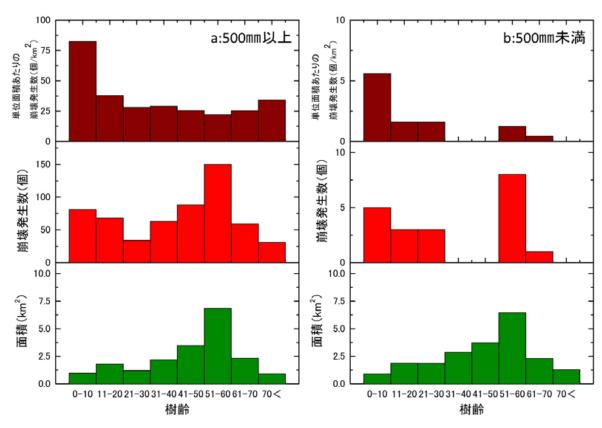


図4 ヒノキの樹齢ごとの存在面積と崩壊箇所数および単位面積当たりの崩壊箇所数. a はレーダー解析降水量の12時間の積算値が500mm以上のエリア, b は500mm 未満のエリアでの解析結果.

## 人工衛星データ等による平成29年7月九州北部豪雨の土砂移動分析

古田竜一\*·宮崎景太\*\*

キーワード: 平成 29 年 7 月九州北部豪雨, ALOS-2/PALSAR-2, 土砂移動

#### 1. はじめに

災害時の被害状況把握手法の一つとして、空中リ モートセンシングによる方法が挙げられる. 空中リ モートセンシングには、人工衛星による方法、航空 機(固定翼,回転翼を含む)による方法に加え,近年 ではドローン(UAV)による方法の活用が増加してい る. 空中リモートセンシングによる方法の利点は, 被災地を上空から俯瞰することで調査効率を向上で きること, 被災地に立ち入る必要がないため安全な 調査が可能であることなどが挙げられる. 撮像範囲 は解像力とのトレードオフになるが、撮影高度が上 がるほど一度の撮影で俯瞰できる範囲が広くなり. 人工衛星による方法では観測幅が数十~数百 km に 及ぶ. 人工衛星による方法は広域性, 周期性, 耐災 害性において他手法に比べて特徴的であり、また、 多波長センサの利用やレーダセンサの利用による被 災地分析が可能である点も特徴的である. さらに, 近年,人工衛星画像の解像力が向上しており,ある 程度詳細な被災地の分析が可能である.

本稿では、平成29年7月九州北部豪雨を対象として、人工衛星搭載型合成開口レーダ(SAR)により取得されたデータによる土砂移動の分析についての中間結果を報告する。なお、分析においては、ドローンにより撮影された画像との比較等も実施した。SARによる速報的な解析では、災害前後画像のRGBカラー合成画像が利用されることが一般的である。本手法では変化箇所が赤色又は青色で表示され、解析者はそれに基づいて被害判読を実施しているが、変化箇所には被害によるもの、季節変化によるもの、土地利用変化によるもの、その他あらゆる変化が含まれるため、被害とそれ以外の変化を区別することが課題となっている。また、レーダに用いられているマイクロ波の位相の僅かな違いを解析す

るコヒーレンス解析(複素相関解析,位相相関解析) も変化抽出手法として利用されているが,土砂移動 分析に利用するための検討が課題であり,これら課 題の解決に向けた分析・検討が必要となっている.

#### 2. 全体のレイアウト

#### 2.1 観測データの取得

本研究では、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が運用中の陸域観測技術衛星2号「だいち2号(ALOS-2)」搭載のフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ「PALSAR-2」により取得された災害前後のデータを利用した。表1に、JAXAが実施した平成29年7月九州北部豪雨を対象とした災害緊急観測の一覧を示す。また、図1に、各画像の撮像範囲を示す。災害緊急観測は、平成29年7月7日から11日にかけて実施されており、合成開口レーダの特徴である昼夜観測性能とPALSAR-2の進行方向左右の観測性能を活かして、最大半日に1度の観測が実施されている。また、複数の観測角度(オフナディア角)で観測が実施されていることも特徴的で、最適な観測角度の分析等が可能である。

表 1 ALOS-2/PALSAR-2 による平成 29 年 7 月九州北部 豪雨の災害緊急観測実績

観測日	観測時刻	観測方向	観測角度
2017/07/06	23:24	西向き	46.4 度
2017/07/07	12:53	東向き	29.1 度
2017/07/07	23:44	西向き	21.9 度
2017/07/09	11:58	西向き	52.1 度
2017/07/10	12:18	西向き	32.4 度

<sup>\*</sup>一般財団法人リモート・センシング技術センター

<sup>\*\*</sup> 宇宙航空研究開発機構



図1 ALOS-2/PALSAR-2 による平成29年7月九州北部豪雨の災害緊急観測画像の範囲

#### 2.2 解析方法

本研究では、まず、PALSAR-2の標準処理データレベル 1.1 (シングルルック複素データ)を入力として差分干渉解析を実施した。差分干渉解析の過程で得られる災害前後の後方散乱強度画像、コヒーレンス画像を利用して、災害前後の後方散乱強度画像の RGB カラー合成画像、災害前後の後方散乱強度画像とコヒーレンス画像の合成画像 (Multi Temporal Coherence mapping、MTC 画像)を作成し、崩壊型の土砂移動箇所を可視化した。また、差分干渉解析画像により地すべり変動箇所を可視化した。

ついで、上記の解析結果と国土地理院公開の「平成29年7月九州北部豪雨に関する情報」に掲載の被害状況判読図や九州大学から提供された UAV 画像とを比較し、各手法の感度分析を実施した。

#### 3. 実施結果

朝倉市須川地区の一部の土砂移動箇所について、図2に災害前後の後方散乱強度画像のRGBカラー合成画像、図3にMTC画像を示す.土砂移動箇所は、図2では赤色と青色、図3では赤色と緑色で可視化され確認することができる.但し、観測方向により西側又は東側の斜面の土砂移動箇所の視認が難しく、図2、図3では東側斜面の土砂移動箇所の視認が難しく、図2、図3では東側斜面の土砂移動箇所の視認が難しい.土砂移動箇所の視認性の観点では、RGBカラー合成画像に比べてMTC画像での視認性が高く、流動域も判読可能である。また、国土地理院公開の正射画像判読図1)とも調和的であり、観測方

向により視認できない箇所を除いては土砂移動箇所をおおよそ抽出できると考えられる.一方,視認性が悪い箇所については共通的であり,衛星と地上とのジオメトリによる影響に差異はみられない.

図4はある土砂移動箇所の後方散乱係数及びコヒーレンスのプロファイルで、比較のため、後方散乱係数を-14dBで正規化して表示してある。図より、土砂移動箇所では災害前と災害後の後方散乱係数の差が大きく、土砂移動箇所の外側では災害前後の後方散乱係数が同等であることがわかる。一方、コヒーレンス値にはあまり特徴はみられないが、土砂移動箇所では土砂移動箇所の外側と比べてコヒーレンスが低い傾向がみられた。その他の箇所についても同様の傾向がみられており、これらの特徴を利用することで土砂移動箇所を自動的に判別ができる可能性が示唆された。今後、更に詳細な分析を進めていく、

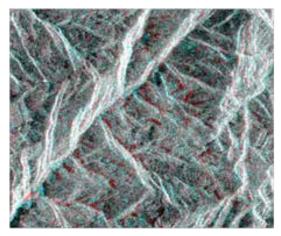


図2 災害前後の後方散乱強度画像の RGB カラー 合成画像

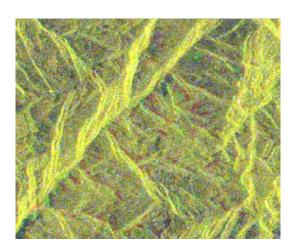


図3 災害前後の後方散乱強度画像と コヒーレンス画像の合成画像

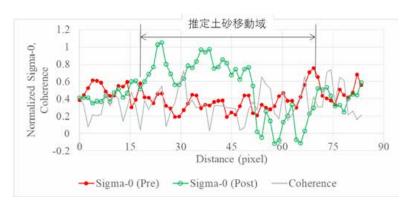


図4 災害前後の後方散乱係数およびコヒーレンス値のプロファイル

#### 4. まとめ

本研究では、平成29年7月九州北部豪雨を対象にALOS-2/PALSAR-2で観測されたデータを用いて土砂移動箇所の可視化および分析を実施した。その結果、以下のことが示唆された。

- 土砂移動箇所の視認性の観点では、RGB カラー 合成画像に比べてMTC 画像での視認性が高く、 流動域も判読可能である.一方、視認性が悪い 箇所は共通的であり、衛星と地上とのジオメト リによる影響に差異はみられない.
- 土砂移動箇所では災害前後で後方散乱係数の差が大きく、土砂移動箇所の外側では災害前後の後方散乱係数が同等である。また、土砂移動箇所では土砂移動箇所の外側と比べてコヒーレンスが低い傾向がみられる。

今後、更に詳細な分析を実施し、抽出率、誤検出率の定量評価を実施するとともに、後方散乱係数及びコヒーレンス値の特徴分析結果に基づく自動抽出手法の検討を実施する.また、差分干渉解析結果により地すべり変動の有無の調査等を実施する.

#### 参考文献

1) 国土地理院, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨に関する情報 (正射画像判読図), http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka\_ooita-heavyrain.html, 最終閲覧日: 2017 年 10 月 30 日.

# 地すべり地形の場で発生する斜面崩壊 -日田市小野地区地すべりを例にして-

田近 淳\*

キーワード: 2017年九州北部豪雨,地すべり地形分布図,キャップロック型地すべり,深層崩壊

#### 1. はじめに

2017年7月九州北部豪雨による斜面崩壊のなかで、最大規模(崩壊源の幅約250 m, 奥行き約300 m) の崩壊が日田市小野地区の斜面崩壊である. 小野川右岸山腹の東-南東向き緩斜面(標高250~400 m) で発生し、崩壊した土砂は小野川を部分的に閉塞した. 報道等によれば、この崩壊は7月6日午前10時前に発生した. これはアメダス日田観測点の1時間降雨のピークのおよそ15時間後であった. 斜面下で避難誘導を行っていた消防団員1名が死亡し、2人の住民も負傷した.

すでに釜井ほか (2017) などが指摘しているように、斜面崩壊の発生した場所は明瞭な地すべり地形を示す.小論では、この事例をもとに地すべり地形の場で発生する斜面崩壊とその地形発達における意義について述べ、急速な斜面崩壊の発生場所予測における地すべり地形分布図の重要性を強調したい.なお、現地調査は日本応用地質学会九州北部豪雨災害調査団の一員として9月1日~2日に行ったものであり、本報告はその成果の一部である.

ここで使用する「地すべり」と「斜面崩壊」について簡単に定義しておく、「地すべり」は斜面変動 (landslide の意味で使用) の崩壊源と移動堆積域とがほとんど重なるもの、つまり移動体がほとんど崩壊源に残っているものをいう。また、「斜面崩壊」は崩壊源と堆積域が異なるもの、言い換えれば崩壊源から移動体がほとんど失われたものとする。すなわち滑落崖とその前面の移動体の組み合わせからなる地すべり地形を作るものが「地すべり」である。このように定義をしたとしても、多くの方々は暗黙の裡に「地すべり」は「緩慢な繰り返し活動(走って逃げられる)」を、また「斜面崩壊」については「急速な突発的

な活動(走って逃げられない)」をイメージしている と思われる.しかし,ある種の地すべり地形の場は, 急速で危険な斜面崩壊の場になるということを小野 地区の例は示している.

#### 2. 何が起こったか、その地質要因

小野地区の斜面変動は斜面崩壊と地すべりの複合 した変動で、崩壊源は北側と南側で様相を異にする (図1). 北側の崩壊土砂はほとんどが滑落し、崩壊 源には地すべり面がむき出しになった(北エリア). 土砂は多量の水とともに遷急線下の旧崖錐堆積物も 削剥し流下している. 一方, その南側に隣接するや や低くなった緩斜面(南エリア)では移動体は滑落 しているが,変形しながらも多くは崩壊源域にとど まった. この緩斜面の縁(遷急線付近)で移動体はさ らに崩壊して流下した. 現地での観察によれば、こ の縁での崩壊はスライドやフォールではなく、トッ プルのように見える. それぞれの崩壊の前後関係に は不明な点があるが、6日早朝までには南エリアの 遷急線下の斜面崩壊は始まっていたとされる(砂防 学会, 2017). また, 南エリアの滑落崖の一部は北 エリアの崩壊土砂を切るように見えるので, 北エリ アで初めに斜面崩壊が発生し、引き続いて南エリア で地すべりが発生、押し出された末端がさらに崩壊 したと考えられる.

この地区の地質は、中新世後期~鮮新世の火山砕屑岩類(K:北坂本累層)とそれを覆う鮮新世安山岩溶岩(Lv:夜明火山岩類)からなっている(木戸、1992).滑落崖はおおむね安山岩溶岩由来の岩屑崩土からなり、北エリアにむき出しになった崩壊面は、火山砕屑岩類(多くは火砕流・ラハール堆積物)最上部の赤色火砕岩類(Krと呼ぶ)の細粒火砕岩(赤色シ

<sup>\*</sup>株式会社ドーコン、日本応用地質学会平成29年7月九州北部豪雨災害調査団



図1 日田市小野地区斜面変動の区分と移動方向(田近ほか, 2018) 矢印は移動体の移動方向,小三角は湧水点,写真は㈱パスコ(7月7日撮影)提供

ルト岩) やそれと粗粒火砕岩の境界面に形成されている。この面は20度程度南東~東方向に傾く流れ盤(柾目盤)である。一方、南エリアの遷急線の下の崖にはLv由来の岩屑崩土とKr/Kの緩やかに変形した境界が分布しており、この付近のKは緩い受け盤となっている。発生直後の画像では、この境界付近にそって横に複数の湧水が確認される(図1)。

崩壊に関わる地質的要因は次のよう推定される. 溶岩やそれに由来する岩屑崩土は一般に高透水性地盤である.それに対して赤色火砕岩類やその下位の火砕岩は難透水性岩盤である.記録的な豪雨に伴い地下水位が上昇,この境界付近の間隙水圧が上昇して崩壊と地すべりが発生した.なお,南エリアと北エリアのKrは地質構造的に明らかにギャップがあり単純に連続しない.これが北と南で斜面変動の様式が異なる原因かもしれない.これらの点については,南エリアの地すべり面の位置の問題とともに,関係機関による詳しい調査の結果を待ちたい.

#### 3. 崩壊前の地形とその変化

今回の斜面変動の発生以前の状況を把握するために、1965年、1974年、2009年撮影の空中写真を国土地理院のウエブサイトからダウンロードして地形判読を行った。その結果、どの写真でも今回の変動の発生源に地すべり地形を確認することができた。滑落崖の左側(北側)の崖が不明瞭で、判読者によっ

て滑落崖の位置は多少異なる可能性があるが、山腹の緩斜面全体が移動体(以下、旧移動体と呼ぶ)と認識できる。遷急線下の斜面は北側と南側の崖錐斜面として認識できる。また、旧移動体を横切るよう南側低下の二次滑落崖のような崖が見え、北と南のエリアを画している。今回の滑落崖は北エリアでほぼ旧移動体の上部 1/4 程度を残した位置に形成している。このことは北エリアの滑落崖に露出した堆積物が著しく風化した溶岩由来の岩屑崩土や火砕岩類由来の岩屑からなることと調和的である。一方、南エリアの滑落崖の頂部は旧右側崖を切り取るように形成しており、この崖が比較的新鮮な安山岩岩屑からなることと調和的である。

撮影時期の異なる3枚の空中写真で旧移動体に大きな変化が見られなかったので、直前までの状況を確認するためGoogle Earthの衛星画像を閲覧した.Google Earthでは2004年、2009年、2012年、2014年(2回)、2015年および2016年の衛星画像が公開されている(2017年11月20日確認).2004年の画像では旧移動体にはほとんど植生の乱れはない.2012年九州北部豪雨の前までには、わずかに南側遷急線直下の崖錐の北頂部に裸地の拡大が見えるが、大きな変化はない。ところが2014年の画像では旧移動体の南の末端で明瞭な斜面崩壊が認められる。さらに、2015年には小野川に面した南側崖錐斜面が明らかな斜面崩壊を起こし、2016年にはこれが拡

大しているようである。今回の斜面変動の前にこの 地すべり地の少なくとも南側の末端部では何らかの 変動が進んでいた可能性がある。なお、小野川の河 道周辺に変化はなく、この期間に河川による側方侵 食が進んで、これらの崖錐斜面が特に不安定になっ ていたとは考えにくい。

#### 4. 地すべりの地形発達と斜面崩壊

時系列的に見ると、単一の地すべりは、地すべり活動の発生、滑動と休止などを経て解体し消滅にいたる(たとえば、横山、2004). 一般には、この地すべり活動は同一の運動様式の繰り返しと考えられているが、実際には活動の繰り返しによる構成物の変化や地形条件の変化によって、運動の様式は変化する. たとえば、初生的に地すべりが発生した時の岩盤や破砕岩である移動体と、滑動によって岩屑となった移動体では、豪雨や地震に対する応答が異なるはずである. 地形が従順化する前に、谷が入り開析が進めば、移動体はより不安定化するであろう. このような場所で斜面崩壊が発生すると考えられる.

少しこじつけのようではあるが、このような見方で今回の斜面変動を見ると、2012 ~ 2014 年以来発生した南側の地すべり移動体末端の小崩壊やその拡大は次の滑動に向けての活動期の現象と考えられる。一方、北エリアの斜面崩壊は地すべり移動体のほとんどが(おそらく)高速流動して流下したもので、移動体の開析が進んだ結果生じた地すべり地形の解体・消滅期の現象といえる。

# 5. どの分布図にも載っていなかった - 結論と今後の 課題

以上のように、小野地区の斜面変動は地すべり地 形の場が斜面崩壊の場に転化する事例として重要で ある.ここで改めて斜面崩壊の発生場所の予測の上 で地すべり地形の把握の重要性を指摘したい.

ところで、小野地区の地すべり地形は、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図(清水ら、2008)や、同じく地すべり地形を判読した「九州の活構造」(九州活構造研究会、1989)では抽出されていなかった。また、大分県の「土砂災害危険個所情報」(Web版)でも地すべりとして表示されていない。どうして抽出ができなかったのであろうか。この地すべり地形

には、滑落崖や輪郭の明晰さがやや欠けることや、 規模がやや小さいなどの判読上の難点がある. 地す べり地形の空中写真判読は微妙に難しいところも多 い. さらに広域的に網羅的に判読を行うのは筆者の 経験でも大変な作業であるといえる.

このような地すべり地形の空中写真判読における 難点や課題を克服するためには2つのアプローチの 方法があると思われる. ひとつは、被災する側から のアプローチである.被災するかもしれない我が家 の裏山に地すべり地形があるのか、ないのか、たと えば「地区防災会議」単位で専門家とともに地形判読 や踏査するような仕組みがほしい. かつて羽田野・ 大八木 (1986) が提案した「裏山巡検のすすめ」であ る. もうひとつは,空中写真判読の止揚(?)である. わが国には現在多くの航空レーザー測量データが蓄 積されつつある. これまでの分布図に加え,このデー 夕を使った地形図等の判読を併用すれば、地すべり 地形は植生や日陰の部分の影響を排除し, より小規 模なものから正確に抽出できる可能性がある. 詳細 な DEM を使った地すべり地形分布図の組織的なリ ニューアルの必要性を訴えたい.

#### 引用文献

- 1) 羽田野誠一・大八木規夫 (1986): V 斜面災害の 発生し易い場所 (場所の予測) 5.1 地形的位置. 斜 面災害の予知と防災,白亜書房,95-154.
- 2) 釜井俊孝・王功輝・土井一生 (2017): 九州北 部豪雨災害・大分県日田市小野地区における斜 面崩壊の調査結果, 2017年7月31日. 京都大 学防災研究所, http://landslide.dpri.kyoto-u.ac.jp/ report/2017/20170731hita.pdf.
- 3) 木戸道男(1991):第三章新生界,3.2 北部~中部 九州7英彦山-耶馬溪地域.日本の地質9九州 地方,共立出版,136-140.
- 4) 九州活構造研究会 (1989): 九州の活構造. 東京 大学出版会, 562pp..
- 5) 田近 淳・太田岳洋・千田敬二・長谷川怜思・ 碓井敏彦・田村浩行・西村智博・松澤 真・西 山賢一・撰田克哉・戸邉勇人・池見洋明・佐伯 佳美・磯部勇作・松尾達也・小野田敏・小林 洋・ 江口貴弘・井口 隆 (2018): III -2.2 火山岩地域 でおきた特徴的な斜面変動 - 日野市日田地すべ りを中心に、平成 29 年九州北部豪雨災害調査

報告書, 日本応用地質学会, 34-42 (印刷中).

- 6) 砂防学会 (2017): 2017 年九州北部豪雨災害第一次緊急調查報告. 平成 29 年 8 月 28 日. http://www.jsece.or.jp/survey/20170714/20170828\_1.pdf.
- 7) 清水文健・井口 隆・大八木則夫 (2008):5 万分 の1地すべり地形分布図第37集「福岡・中津」. 防災科学技術研究所研究資料,322号.
- 8) 横山俊治(2004): I .4 章進化系列と進化過程. 地 すべり地形地質的認識と用語,日本地すべり学 会,46-52.

# 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における災害対応現場での情報共有と利活用 -福岡県災害対策本部での対応を事例に-

佐野 浩彬\*

# The Sharing and Utilization of Information at the Disaster Response Site during the July 2017 Northern Kyushu Heavy Rainfall

- A Case Study of the Correspondence of the Fukuoka Prefecture Disaster Countermeasures Headquarters -

Hiroaki SANO

\*Disaster Risk Reduction and Resilience Social System Research Division, Center for comprehensive management of disaster information, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan sano@bosai.go.jp

#### **Abstract**

In the sharing and utilization of information in a disaster response, the following two points are important: (1) to be able to promptly share the damage condition of the site and unify the awareness of the situation among disaster response agencies, and (2) to be able to proceed with subsequent decisions to prevent secondary disasters based on the local situation. In this paper, I describe the sharing and utilization of information in the case of the Fukuoka Prefecture Disaster Countermeasures Headquarters during the July 2017 Northern Kyushu Heavy Rainfall. For information sharing, it is possible to effectively utilize the information of other organizations through the sharing of the road permission information collected by the disaster response agencies and aerial photographs of private companies on Web-GIS. As a result, information sharing appears to have led to the unification of awareness of the situation in the disaster response. Also, information was utilized to consider the range of activities by the disaster response agencies and the removal of driftwood based on information on the search range and the driftwood shedding locations.

**Key words**: Disaster response site, Disaster information, Sharing and utilization of information, July 2017 Northern Kyushu Heavy Rainfall

#### 1. はじめに

2017(平成 29)年7月5日から6日にかけて,対馬海峡付近に停滞した梅雨前線により,西日本では記録的な大雨(気象庁,2017a)となり,福岡県では死者34名,行方不明者3名の人的被害のほか,住宅全壊260棟,半壊829棟,床上・床下浸水592棟の被害をもたらした(消防庁,2017).気象庁は,発災

から約2週間後の7月19日に,この豪雨を「平成29年7月九州北部豪雨」と命名した(気象庁,2017b).

災害が発生すると、国・県・市町村・社協・民間 団体等、数多くの機関および組織によって活動が同 時並行的に行われる.しかし、各機関で個別に情報 収集を行い、各機関それぞれで意思決定を行うこと は災害対応の重複や欠落を生じる可能性がある.そ

<sup>\*</sup>国立研究開発法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門,総合防災情報センター

れを回避するためには、各機関が保有する災害情報 を共有することが有効である。各機関が保有する災 害情報を共有することで、当該災害に対する組織間 での状況認識が統一され、的確かつ効率的な活動を 行うことが可能となる。

国立研究開発法人防災科学技術研究所(以下,防 災科研)では、今回発生した大雨による被害を受け て、福岡県および大分県で災害対応に資するための 情報支援活動を実施した. 具体的には, 各災害対応 機関で収集されている様々な災害情報やデータを集 約し、二次利用しやすい形に変換を行った上で、集 約したデータを一元的に管理するとともに,統合加 工処理を施して, 各種情報・データの提供を行い, 災害対応現場での利活用につなげる活動を実施し た. 災害対応における情報共有および利活用におい ては、①現地の被害状況を迅速に共有し、災害対応 機関間における状況認識の統一を図ることができる かに加えて、②現地の状況を踏まえた上で、二次災 害を防ぐための次の判断に繋げることができるか, が重要である. 本稿では, 福岡県災害対策本部を事 例に, 災害対応現場での情報共有・利活用について 述べる.

#### 2. 福岡県災害対策本部における情報共有・利活用

防災科研では、福岡県における記録的な大雨を受けて、7月5日夕刻に福岡県庁へ研究員を派遣し、翌朝より現地での情報支援活動を開始した。当日9時10分に行われた福岡県の災害対策本部会議に参加し、そこで収集した各種被害情報(行方不明者位置情報、集落の孤立状況、道路規制状況、道路冠水状況、土砂災害等)をWeb-GIS(インターネットを介してアクセスできる地理情報システム)で集約し、一元的に管理できるようにした。それらの情報を掲載した最初の災害対応支援地図が提供できたのは、同日13時00分であった。

福岡県災害対策本部において,防災科研は災害対応の最前線で活動している警察,消防,自衛隊,海上保安庁などの実動機関が駐在している部屋に滞在し,実動機関の活動に対して各種情報を提供するなど,情報共有の取り組みを行った.これらの実動機関も当初は災害対策本部の居室中央に設置された大判の紙地図へ,各機関の活動状況や収集した情報を手描きで掲載していた.こうした情報集約は,現状

を俯瞰的に把握する上で重要である.しかし,各機関からの情報が集約されていくにつれて,情報が煩雑となっていき,誰がいつ,どの情報を追加したのかが分かりにくくなる.災害対策本部に滞在する職員(リエゾン)も,日々人員の入れ替えが生じるため,残された情報を詳細に確認する手段がなくなる場合がある.

そこで防災科研では、それら各機関が手描きで記した情報を Web-GIS へ集約することにより、手描きでは時間が経つにつれて消えてしまい煩雑になる情報を、一元的に管理するとともに、端末では常に最新の情報が閲覧できるようにした。

災害対応の初期段階で、各機関での情報共有に有 効だった情報は道路の通行可否である. 実際に現地 へ訪れる実動機関にとって、どの場所まで行くこと ができるのかはその後の活動を左右する. 現地では 土砂崩落や道路冠水等によって通行できない、また は,通行制限のある道路が発生しており,被害状況 を確認できないエリアや孤立集落が生じた地域が存 在していた. 現地を訪れた実動機関の職員が災害 対策本部で到達可能な場所や状況を報告し、その 他の機関に情報が共有されることで, 現地を訪問す る際の参考情報として活用することが可能となった (図1). また, 道路の通行可否は復旧等により, 日々 刻々と変化するものである. 各機関がその度に現地 の道路状況を確認するよりも, 各機関がそれぞれ情 報を持ち寄って共有することにより、意思決定を柔 軟に行うことが可能となった.

なお、情報の集約および共有は Web-GIS を用いて実施しただけでなく、紙地図として印刷し各機関への配布も行った(図2). 各機関が対応方針を検討するために、その場でのメモ書きを行う際には、情報の記入に柔軟性や自由度が高い紙地図のほうが適している. 基礎となる最新の情報は Web-GIS 上で管理しつつも、各機関が個別に必要とする情報は紙地図に手書きで反映し、対応の検討に活用した. また、手書きした情報は Web-GIS で一元的に管理するとともに、他機関にとっても有用なものである場合は、Web-GIS を介して情報共有が行われた.

今回の災害では、朝倉市や東峰村で土砂崩落や道路冠水等が起こっていることを災害対策本部でも確認していたが、被害状況に関する具体的な情報が本部に伝わってこなかった。その原因として、7月6

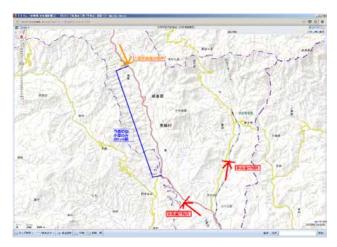


図1 道路通行可否情報の事例

Fig. 1 Example of road permission information.



図2 災害対策本部へ提供した紙地図の事例

**Fig. 2** Example of the paper map provided to the Disaster Countermeasures Headquarters.

日以降も悪天候が続いており、現地の様子を航空機で広域かつ面的に上空から撮影することが難しかったことが挙げられる。そこで、公的な情報ではないが、民間企業がヘリコプターから撮影した空中写真(斜め写真)等を集約し、災害対策本部へ提供することで現地の被災状況を把握する参考情報として活用した(図3).

現地での被害状況が不明であった例として,県道 52 号線が挙げられる.東峰村を通る県道 52 号線では,筑前岩屋駅から北側に延びる道路が通行止めとなっており,そこから先の状況を把握することができなかった.そこで,筑前岩屋駅付近からドローンを県道 52 号線に沿って,撮影した動画を Web-GIS を介して提供する仕組みを構築した(図4).このように,外部機関の情報を有効に利活用すること

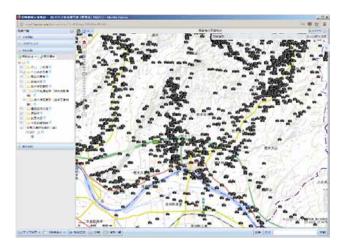


図3 民間企業の空撮写真位置情報

**Fig. 3** Aerial photograph location information provided by private companies.

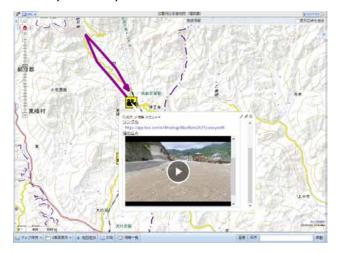


図4 Web-GIS を介したドローン映像の提供

Fig. 4 The provision of drone video via Web-GIS.

で、災害対応にあたる職員が災害対策本部にいながら、現地の被害状況を把握できるようになった.

このように、災害対策本部や現場での情報共有・利活用が行われると、各機関も情報を共有し利活用することの有効性を感じて、さらなる情報共有・利活用が促進されることになった。具体的な事例の1つとして、行方不明者の捜索活動エリアの共有が挙げられる。行方不明者の捜索活動は、自衛隊、消防、警察といった様々な実動機関によって行われる。もし、これらの機関による捜索活動の情報が共有されなかった場合は、同じ場所を各機関が重複して捜索している可能性を生じることになり、災害対応としては非効率なものとなる。九州北部豪雨における道路情報等の情報共有の取り組みで、組織間の情報共有が次の情報共有を促進することとなった。その結

果として実動機関による捜索活動範囲の情報も共有 されることになり、捜索範囲の重複を防いだ対応 方針の検討へとつながったと考えられる.

同様の事例として、流木の堆積箇所に関する情報 共有も挙げられる. 九州北部豪雨における被害の特 徴として、河川氾濫や土砂流出による流木の堆積が 発生したことが挙げられる. 捜索範囲における流木 の堆積は、捜索活動を阻害する要因となっており、 捜索活動を行う他機関にも共有することが望ましい 情報であった. こうした捜索活動中に得た情報を フィードバックし、災害対策本部にも共有すること で、流木の撤去作業に必要な資機材等の検討・調達 に繋げることができる. 流木の堆積箇所に関する情 報は、捜索活動における二次被害を防止するために 重要なものであり、実動機関が相互に情報を共有す ることで、撤去に対する方針の検討や効率的な活動 に繋げることが可能となった.

#### 3. おわりに

災害対応現場における情報共有・利活用に関しては、①現地の被害状況を迅速に共有し、災害対応機関間における状況認識の統一を図ることができるか、②現地の状況を踏まえた上で、二次災害を防ぐための次の判断に繋げることができるか、が重要である.

「①現地の被害状況を迅速に共有し,災害対応機関間での状況認識の統一を図ること」については,各機関が収集した被害情報を Web-GIS 上に集約し共有することで,その後の災害対応を効率的かつ適切に進めることが可能となったと考えられる.九州北部豪雨における福岡県災害対策本部の事例でも,実動機関による道路通行可否情報や捜索活動情報の共有が行われた.また,九州北部豪雨では発災後も悪天候が続いたことにより,現地の土砂崩落や道路冠水等の被害状況を空中から広範囲かつ面的に把握するまでに時間がかかった.そこで,民間企業によるヘリコプターから撮影した大量の空中写真や,ドローンによって撮影された被災現場の映像を,災害対策本部等へ提供・共有することで,現地の被害状況の把握を促進することができた.

さらに,「②現地の状況を踏まえた上で,二次災害を防ぐための次の判断につなげること」については,共有された道路通行可否情報や捜索活動情報を

もとに、実動機関等が現地を訪問する際の参考情報としての活用や捜索活動範囲のすみわけなどというかたちで、適切かつ効率的な災害対応を実現することができたと考えられる。また、こうした情報共有および利活用の取り組みを通じて、捜索活動の障害となっていた流木堆積箇所の把握という、次の判断につながった。現場で発生している課題が複数機関から災害対策本部に共有され、次の対応を検討することにつながったことは、情報の利活用による効果が示されたと考えられる。

#### 謝辞

本稿で述べた九州北部豪雨における情報共有・利活用の取り組みは、総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」の一環として実施した。また、この取り組みは福岡県および実動機関の協力を得て実施したものである。(株)パスコとアジア航測(株)からはヘリコプターから撮影した斜め写真を、内閣府革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の田所プログラムからはドローン映像をご提供頂いた。最後に、研究集会においては、消防研究センターの土志田正二氏、日本工営(株)の田中義朗氏に貴重なご意見を頂いた。ここに記して感謝申し上げる。

#### 参考文献

- 1) 気象庁 (2017a): 梅雨前線および台風第3号による大雨と暴風(平成29年7月11日公表), http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2017/20170711/jyun\_sokuji20170630-0710. pdf (2017.11.6 参照).
- 2) 消防庁 (2017): 平成 29 年 6 月 30 日からの梅雨 全盛に伴う大雨及び台風第 3 号の被害状況及び 消防機関等の対応状況等について (第 69 報) (平 成 29 年 11 月 2 日公表), http://www.fdma.go.jp/ bn/80031a04734bba19c8e33519b379471a3b6602c7. pdf(2017.11.10 参照).
- 3) 気象庁 (2017b): 平成 29 年 7 月 5 日から 6 日に 九州北部地方で発生した豪雨の命名について(平 成 29 年 7 月 19 日 公 表), http://www.jma.go.jp/ jma/press/1707/19a/20170719\_gouumeimei.pdf (2017.11.10 参照).

#### 要旨

災害対応における情報共有および利活用においては、①現地の被害状況を迅速に共有し、災害対応機関間における状況認識の統一を図ることができるか、②現地の状況を踏まえた上で、二次災害を防ぐための次の判断に繋げることができるか、が重要である。本稿では、平成29年7月に発生した九州北部豪雨災害における福岡県の災害対策本部での対応を事例に、情報共有・利活用の実態を述べた、情報の共有においては、実動機関によって収集された道路通行可否情報や民間企業の空中写真をWeb-GIS上で共有したことで、他機関の情報を有効に活用でき、災害対応における状況認識の統一に繋がったと考えられる。また、情報の利活用では、捜索活動範囲や流木堆積箇所の情報をもとにして、実働機関による活動範囲のすみわけや、現場対応の障害となっている流木撤去に向けた検討に活用された。

キーワード:災害対応現場,災害情報,情報共有・利活用,平成29年7月九州北部豪雨

# Proceedings of the Workshop on the Prediction of Landslide Disasters 2017

Edited by Ryuji YAMADA\* and Tomoyuki IIDA\*

\* National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience iida@bosai.go.jp, ryamada@bosai.go.jp

#### **Abstract**

On December 7-8, 2017, "Workshop on the Prediction of Landslide Disasters" was held at the Wadachi Memorial Hall of National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. This workshop aimed to offer the occasion for researchers, engineers and all stakeholders to share the perceptions, to find out the status quo of the landslide prediction technologies, and to discover the practical application to reduce the damages. It consisted of one special lecture and 21 presentations in four sessions on; potential sites of deep-seated catastrophic landslides, earthquake triggered landslide, heavy rain triggered landslides, and 2017 heavy rains in Kyushu, Japan. In recent years, many landslide disasters have drawn growing concerns nationwide, and consequently ca. 120 people participated in this workshop.

**Key words**: Sediment disaster, Deep seated landslide, Gravitational deformation, Band-shaped heavy rainfall, 2017 heavy rains in Kyusyu