

大分県耶馬溪町金吉地区における地すべりの災害発生機構

Mechanism of a landslide occurring in Yabakei town, Oita Prefecture, on April, 2018

久保田浩路*, 河野貴則, 佐藤重貴夫, 小川内良人, 西野貴裕 (国土防災技術株式会社),

林久人 (大分県北部振興局), 平石将太郎 (大分県森林保全課)

Hiromichi KUBOTA, Takanori KAWANO, Akio SATOU, Yoshito OGAWAUCHI, Takahiro NISHINO

(Japan Conservation Engineers Co.Ltd.), Hisato HAYASHI, Shotaro HIRAISHI (Oita Prefecture Government)

キーワード：無降雨時の崩壊，地すべり，発生機構

Keyword : Slope failure occurring in poor raining season, , Landslide, Occurrence mechanism

1. はじめに

平成30年4月11日、耶馬溪町大字金吉字梶ヶ原地区において、明瞭な先行降雨もなく早朝に突然地区背後の山腹斜面が崩落し、6名が犠牲となる災害が発生した。今回の現象は、地震、降雨等の発生誘因が無い中で発生した極めて特殊な事例であった。このため、その発生機構や原因の究明に当たっては多面的な調査が必要であった。その結果を踏まえ、「山腹崩壊原因究明検討委員会」の学識経験者の知見も反映させて災害発生機構について検討した。

本稿では、各種調査結果を基に考察された崩壊発生機構について報告する。

2. 調査方針

本地区は、山腹斜面の滑動によって形成されたAブロック、その流出土塊の堆積により形成されたBブロックの2つの地すべりブロックと2つの末端崩壊（崩壊1、崩壊2）に区分される（図-1）。本発表は、主にAブロックについて報告する。既往資料調査、現地踏査等の概況調査により、Aブロックの崩壊発生原因として、以下のことが考えられた。

- ・火砕流などの火山噴出物の堆積に由来する脆弱な地質構造（キャップブロック構造や風化・変質作用を受けた基盤岩）
- ・急な斜面勾配
- ・崩壊地内、対象斜面上部の上部台地内に大量の地下水を包蔵（先行降雨がないにもかかわらず、崩壊発生後の崩壊面に大量の地下水が湧出）

- ・地下水の長期作用による岩盤の風化の促進及び土質強度の低下

- ・地下水圧の作用による斜面の不安定化

これらの崩壊発生原因を調査するため、通常的地すべり調査（ボーリング調査、パイプひずみ計、伸縮計等の動態観測、地下水位観測）に加えて、以下の様な多面的な調査を実施した。

①地質構造を把握するための調査

地質踏査、電気探査

②岩盤物性を把握するための調査

すべり面せん断試験、リングせん断試験、岩石のスレーキング試験、X線回析試験等

③地下水についての調査

地下水検層、電気探査、水質試験、湧水及び応急対策工の流量観測、地下水年代測定

④前兆現象確認のための地形解析

差分解析、干渉SAR解析（平成28年4月熊本地震や平成29年7月九州北部豪雨前後の比較）

3. 調査結果

調査結果から、本地区の崩壊の素因について、「地形」、「地質・土質」、「地下水（湧水）」の3つに区分してまとめる。

(1) 地形

崩壊発生前の地形は、耶馬溪溶結凝灰岩の急崖直下に段差地形を伴う凸型緩斜面が形成されていた。緩斜面は、溶結凝灰岩の崖錐堆積物からなる。更に緩斜面の下部の急崖部に谷・ガリ（湧水）等が形成されていた。また、今回の崩壊の滑落崖は、崩壊前の耶馬溪溶結凝灰岩の急崖直下の段差地形付近に形成されている。

干渉SAR解析結果によると、崩壊直前の平成30年3月22日～4月11日間のデータはないものの、斜面変動を示す前駆的現象は確認されていない。

(2)地質・土質

地質は、下位から変質凝灰角礫岩、水中堆積物、耶馬溪溶結凝灰岩、崩積土から構成される(図-2)。崩積土は、過去の大崩壊の旧移動土塊(崩土)と考えられる。この旧移動土塊(溶結凝灰岩巨礫層)の上位に崖錐堆積物が堆積して、頭部載荷により不安定化が進んでいた。

基盤の変質凝灰角礫岩は、周辺に比べて崩壊地内で変質が進んでいる。また、変質凝灰角礫岩の上面形状が凹状となっているため、地下水が集中しやすく、溶存イオンやpH(7.8～8.0)はスメクタイトが生成されやすい水質環境下であり、岩盤自体がスレーキングを起こしやすく、すべり面の土質強度も低下したと考えられる。このため、Aブロックは、スメクタイト化が進んだ変質凝灰角礫岩の上面付近をすべり面とする旧地すべりの再活動と考えられる(図-2)。

(3)地下水(湧水)

崩壊地内の地下水は、水質分析結果(崩壊地周辺の地下水よりも高いイオン濃度や還元的な指標)や年代測定結果(滞留時間5年)から深層地下水の特徴を示し、斜面上方から崩壊地内に地下水が供給される水文地質構造が考えられる。また、地下水は降雨との応答が悪く、水位低下速度が極めて遅い特徴が有り、末端の湧水も無降雨時においても継続的に観測される。このため、深層地下水が斜面上方から恒常的に供給され、Aブロックの崩壊に影響したと考えられる。

さらに、地下水面等値線の尾根方向とスメクタイト化が進んだ範囲が一致しており、Aブロック左側方崖付近の脆弱な地質との関係と結びついている。

4.まとめ

本地区の先行降雨が無い状態での崩壊発生機構は、次のように推察される。

- 1.斜面上方より深層地下水が流入
- 2.変質凝灰角礫岩上面の凹部に地下水が集中
- 3.すべり面直下の変質凝灰角礫岩のスメクタイト化が進行し、すべり面の土質強度が長期的に劣化。
- 4.末端の侵食・小崩壊、斜面上方の地下水水位上昇に伴う地下水供給量の増加等が複合し、先行降雨が無い状態で突発的なすべりが発生

今回の調査で、「地形」、「地質・土質」、「地下水(湧水)」等に特徴が認められていることから、今後はこれらの特徴を整理し、流域の斜面の危険度を定量的に判定する手法について検討を進めていきたい。

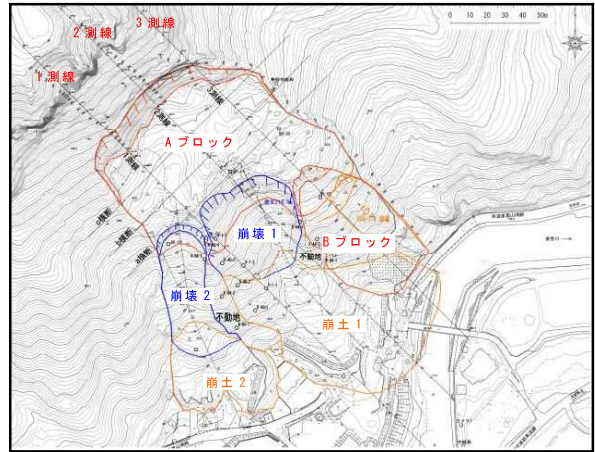


図1 ブロック区分図

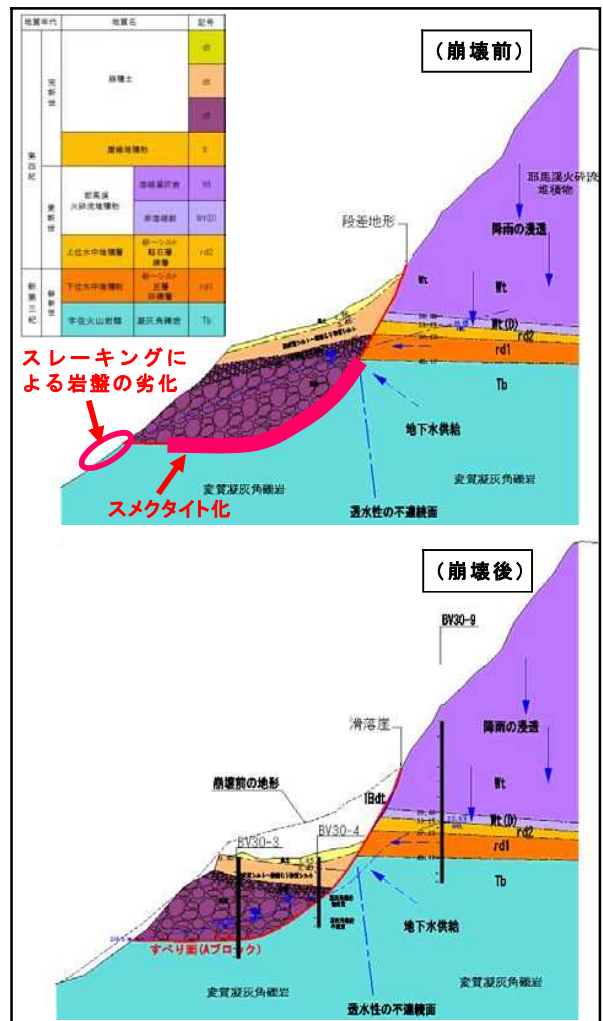


図2 模式断面図(上:崩壊前,下:崩壊後)

再活動地すべりの崩壊前環境復元に関する考察

Reactivation history of non-rain and aseismic triggered landslide

in Yabakei pyroclastic plateau, Oita Pref.

小嶋 孝徳^{1)*}, 河野貴則¹⁾, 小野征一²⁾

Takanori OJIMA*, Takanori KAWANO, Seiichi ONO

1).国土防災技術株式会社、2).株式会社アールデ

キーワード：溶結凝灰岩，広域テフラ，コア解析，褐鉄鉱

Keywords: Welded Tuff, Tephrochronology, Core Analysis, Limonite

1 はじめに

平成30年4月11日、大分県中津市耶馬溪町の梶ヶ原地区において、明瞭な先行降雨もなく早朝に突如地区背後の山腹斜面が崩壊し、6名が犠牲となる災害が発生した。日本地すべり学会をはじめとする災害調査において、今回の災害は一般的な崩壊の発生と関連性が高い地震・降雨などの予兆現象が把握されていない中で発生した、極めて特殊かつ類似事例の稀なものと報告されている。

なお、本災害においてその崩壊機構や原因究明を明らかにするために、多角的な調査を実施した。本発表では素因となる地質構造及び過去の斜面変動履歴を明らかにするために、地表踏査結果およびコア解析結果を中心に整理した。

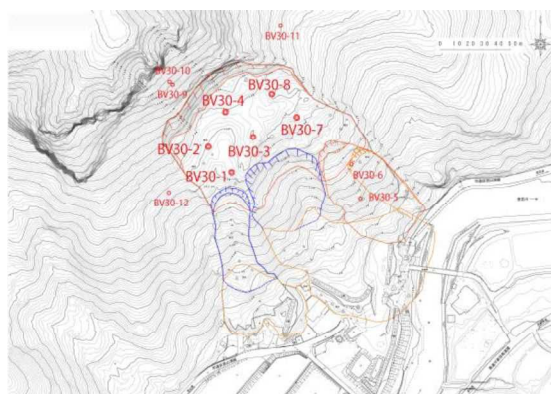


Figure 1 崩壊地および調査ボーリング位置図

2 地形地質概要

本調査地周辺は300万年前頃の新期宇佐火山岩類および堆積岩を基盤とし、その上位に100万年前頃の耶馬溪火砕流が被覆し、後に浸食によって火砕流台地と侵食谷床が形成され現在の地形となる。耶馬溪火砕流堆積物は溶結凝灰岩を主体とし、溶結度の違いにより耶馬溪式といわれる独特の景

コア写真	地質分類	特徴
	溶結凝灰岩 (耶馬溪火砕流堆積物)	比較的粒度の大きい普通角閃石がルーペで確認できる。
	軽石流堆積物	比重の小さい軽石だけ凝集して固結した状態。その下位には流理構造が見られる。
	河床堆積物	基岩層と互層互層が繰り返される。基岩層は境界線の尖度があり、比較的近い距離から供給されており、変理はそれぞれ粒度や有色鉱物が異なる。
	妻朽安山岩質凝灰角礫岩	岩芯の組織は殆ど見られず、割ると絹糸状光沢面を伴った層状構造が見られる。
	弱変質凝灰角礫岩	角礫や微晶は変質はしていないがマトリクスは変質が進み、やや粘りかたがある。ハンマー割面には等軸晶米の光沢面が見られる。
	弱風化変質凝灰岩	岩芯はそのまま残されているが、全体的に風化が進んでいる。ハンマー割面には光沢面や変質構造は見られない。

Figure 2 調査地の代表地層とその特徴

観を形成している。調査地は耶馬溪火砕流台地の北縁部に位置し、鉛直に近い急崖と侵食によって形成された谷床の間に形成された30~40°程度の斜面部に該当する。

崩壊斜面の周辺には、地形判読によって地すべり地形が複数確認でき、斜面崩壊が繰り返し発生しており、今回の崩壊地は尾根状に取り残されていた地形に該当する。

3 調査手法

本調査では崩壊地内外に合計12孔の調査ボーリングを実施し、それぞれ柱状コア解析および地質区分を行った。コア解析においては地質区分に加え層序学的分類も実施し、地層の構成環境についても着目した。また、周辺地質については広域地表踏査を実施し、文献で報告されている地質との整合性を確認したうえでコア解析との対比を行った。

さらに、今回の災害は降雨との関連が見られなかったものの、崩壊直後の斜面に大量の湧水が確認されているため、地下水との接触を示唆する指標の一つでもある褐鉄鉱の付着量分布についても詳細に区分した。

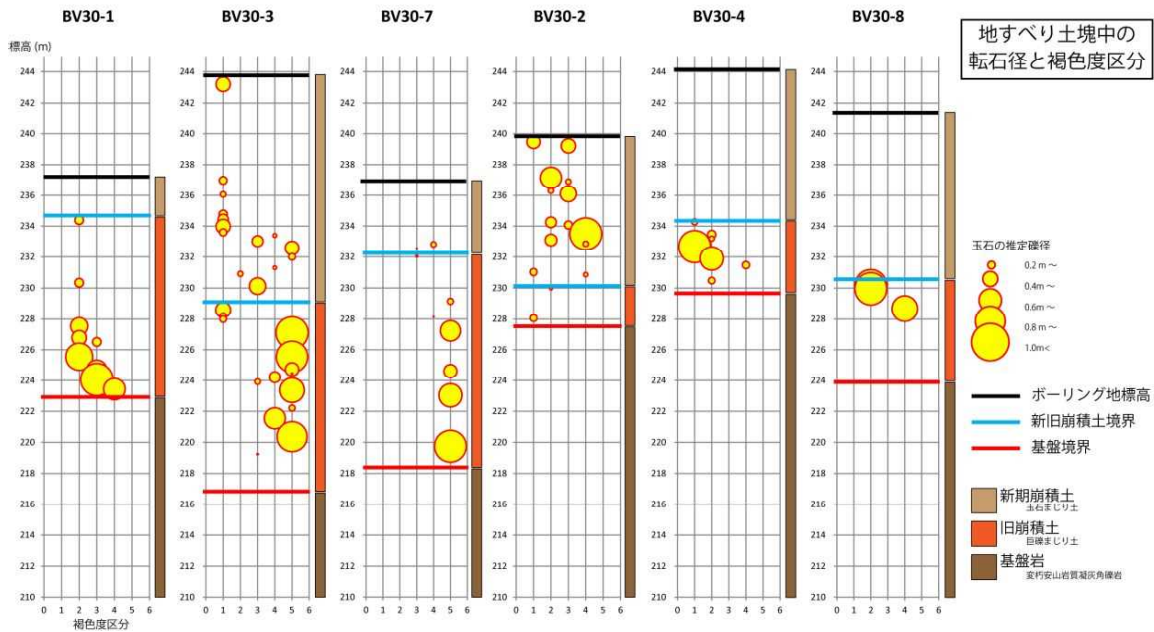


Figure 3 崩壊地に分布する転石の推定礫径および褐鉄鉱による褐色度区分



Figure 4 (左)褐鉄鉱付着のない新鮮な転石表面
(右)褐鉄鉱汚染の著しい転石表面

4 結果

コア観察の結果から、基盤岩とする安山岩質凝灰角礫岩の風化変質度分布が不均一であることが確認できた。新期宇佐火山岩類に該当するこの地層は上端ほど緑灰色の変色が著しく、組織も変質して絹糸状光沢面を伴う細密褶曲構造が認められる。一方、地外においてはこのような変質部は認められず、黄褐色の風化進行が卓越していることが確認できた。さらに滑落崖露頭で確認できた河床堆積物層は崩壊地内には見られないものの、地表踏査によって対岸斜面の同標高程度で確認でき、火砕流台地形成前は河床環境であったことが示された。

また、崩壊地の地質構造について、褐色度区分によって従来斜面の地下水賦存域に横断方向で偏り(非対称性)があり、全体的に左側壁側に集中した地下水の流動傾向が示唆された。

5 まとめ

今回の災害における発生機構は既に各機関から報告されているが、誘因となる降雨や地震との関連が未だ不明であり、今後も素因についての詳細な検討が必要となる。本報告では、周辺地域の地質構造や崩壊地内の地下水環境を復元することで、素因となる地質構造について推察した。

今後発生機構に関する詳細な理解のため、崩壊に至る地層の脆弱化や地下水挙動など、物理特性に着目した調査結果との照査が必要である。

参考文献

- 1) Kamata, H., & Kodama, K. (1999). Volcanic history and tectonics of the Southwest Japan Arc. *Island Arc*, 8(3), 393-403.
- 2) 鎌田浩毅. (1997). 宮原地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 127.
- 3) 鎌田浩毅. (1985). 熊本県宮原西方の火山岩類の層序と噴出年代: 九州中北部の火山活動の時代と分布. *地質学雑誌*, 91(4), 289-303.
- 4) 千木良雅弘, 山崎新太郎. (2018). 耶馬溪の崩壊性地すべりの調査報告. 京都大学防災研究所ニュース
- 5) 星住英夫, & 森下祐一. (1993). 豊岡地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 75p.

大分県耶馬溪町金吉地区で発生した地すべりの土質強度

Shear strength of soils collected from a landslide occurring in Yabakei Town, Oita Prefecture

柴崎達也*・河野貴則・久保田浩路・佐藤亜貴夫・神野郁美・毛利貴子（国土防災技術株式会社）

Tatsuya SHIBASAKI, Takanori KAWANO, Hiromichi KUBOTA, Akio SATOU, Ikumi KAMINO, and Takako MOURI
(Japan Conservation Engineers & Co., Ltd.)

キーワード：地すべり，無降雨期，残留強度，スメクタイト

Keywords: Landslide, Non-rainy season, Residual strength, Smectite

1. はじめに

平成30年4月に大分県中津市耶馬溪町で発生した斜面災害は、過去の地すべり崩土の再活動であったことが地質調査の結果から判明した。過去に大変位を生じたすべり面を利用し再活動したことから、すべり面の大部分は残留強度状態に近かった可能性が認識される。また、前回の地すべりから非常に長い休止期を置いて活動したことも推察されている。本報告では、末端部や集水井内、ボーリングコアから採取したすべり面部位の試料を用いて各種せん断試験を実施した結果と粘土鉱物の分析結果から推察した斜面の不安定化機構について報告する。

2. 試験方法

ボーリングコアや末端部の地表や、地内に施工された集水井で採取されたすべり面部位の不攪乱試料についてすべり面せん断試験（多段階での定体積繰り返し一面せん断試験）、攪乱試料を対象にリングせん断試験を実施した。また、土質試験実施後のせん断面付近の試料を対象にX線回折試験を実施し、外部標準法によりスメクタイト含有量の定量も併せて行った。

3. 試験結果

不攪乱試料を対象に実施したすべり面せん断試験の結果、現場残留強度のせん断抵抗角は、 $16.9 \sim 37.4^\circ$ と強度特性にバラツキがみられた。せん断抵抗角が小さいものほどスメクタイト含有量が多いことが判明した（図-1）。左側壁側のBV30-7'号孔付近は変質作用によってスメクタイト化が進行しており、土質強度も先行的に低下していたことが推察される。スメクタイトを含む土の残留強度に関する先行研究¹⁻⁴⁾にも示されているように、スメクタイト含有率が約30%を超えると純粋なスメクタイトの残留強度相当まで低下することが知られている（図-2）。末端部で採取した粘土の水簸試料を用いてリングせん断試験を実施したところ、最少の 7.6° という残留せん断抵抗角が得られている。現地のボーリング

コアの深度方向での分析によると、すべり面付近や変質した基盤岩のスメクタイト含有率は最大でも30%と評価されており、せん断試験を実施したすべり面付近の試料は、5~20%のスメクタイト含有率であった。

図-2の先行研究データをみても明らかのように、当地区のすべり面部位はスメクタイト含有率という点において強度の急変領域に位置し、スメクタイト含有率がわずかに上昇しただけで、残留せん断抵抗角の低下が容易に進む状況にあることがわかる。この結果からも今回の地すべりの発生に、地質時間をかけたスメクタイト化（含有率の増加）が関与した可能性が示唆される。

4. 考察

滑落崖の付着土壌の放射性炭素年代の分析から、 $11,680 \pm 40$ yrBP年という年代値も報告されており⁵⁾、前回の地すべりから長い休止期を経て再活動したことが推察される。地すべりのすべり面強度が議論される場合、すべり面を構成する岩盤や土質材料が、ピーク強度~完全軟化強度~残留強度のどの状態にあるのかが議論される。過去に大きな移動（変位）を経験し、その部分で再せん

表-1 不攪乱試料を用いたすべり面せん断試験の結果

地点	試料番号	現場残留強度		せん断面付近のスメクタイト推定含有量
		c_{ir}' (kN/m^2)	ϕ_{ir}' ($^\circ$)	
末端部	No.1	27.0	20.6	13.7
	No.3	12.3	22.8	9.5
	No.4	20.2	26.0	5.7
BV30-1'	14.05m	6.9	26.9	11.0
	14.10m	9.2	26.9	9.9
	14.12m	4.7	24.4	9.5
BV30-7'	18.66m	20.8	17.4	19.6
	18.91m	9.9	17.9	17.4
	19.11m	36.1	16.9	15.7
No.1集水井	No.1	6.3	34.0	8.1
	No.2	13.5	37.4	5.3
No.2集水井	No.1	32.6	24.7	15.7

表-1 攪乱試料を用いたリングせん断試験結果

地点	深度 (m)	粒度調整方法	完全軟化強度		残留強度			せん断面付近の スメクタイト 推定含有量
			c_s' (kN/m ²)	ϕ_s' (°)	c_r' (kN/m ²)	ϕ_r' (°)	ϕ_r' (°) C=0	
末端地表		粒径0.425mm以下分	15.6	22.8	11.5	12.0	15.0	9.5
末端地表		水簾試料	0.0	15.0	7.6	5.9	7.8	37.7
BV30-1'	13.9~14.1m	粒径0.425mm以下分	0.0	25.7	9.2	17.2	19.4	9.6
BV30-7'	19.0~19.2m	粒径0.425mm以下分	0.0	25.5	10.1	10.4	12.9	15.1
No.1集水井		粒径0.425mm以下分	0.0	30.2	10.7	16.8	19.3	9.5
		粒径0.425mm以下分	0.0	26.1	6.0	7.2	8.7	16.8
No.2集水井		粒径0.425mm以下分	0.0	27.8	7.0	9.7	11.5	17.5

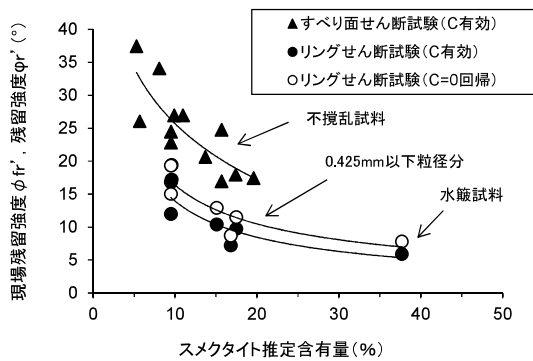


図-1 スメクタイト含有率とすべり面試料のせん断抵抗角との関係

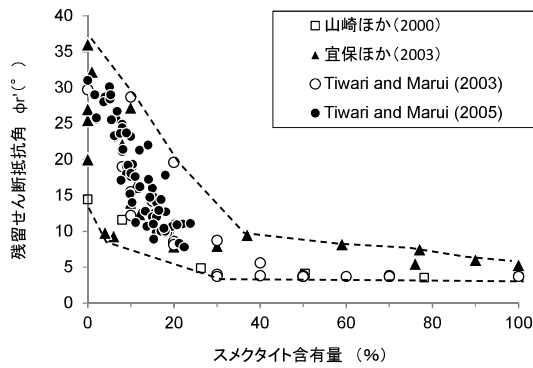


図-2 スメクタイト含有率と残留せん断抵抗角との関係に関する先行研究データ^{1~4)}

断されたことにより移動した地すべりという意味において、当地区のすべり面の大部分は残留強度状態と考えられる。一般的に、岩石や土の残留強度は、大変位のせん断作用を受け、せん断強度が定常せん断状態にある強度を言うが、すべり面材料の粒度構成や粘土鉱物種などが異なれば、残留強度のレベルは大きく異なる。また、残留強度の概念は、工学的には変位量と強度との関係に基づいて認識されており、地質時間に伴う強度劣化は一般的に考慮されていない。自然界でのスメクタイトの生成速度はよくわかっていないが、ヨー

ロッパアルプスの表層土壤に含まれる粘土鉱物の研究によれば、数千年程度で土壤中のスメクタイトが増大しているとする報告もある⁶⁾。数百～数万年スケールの地質時間で進行する変質作用や風化作用によって、残留強度状態にあったすべり面粘土中のスメクタイト含有量がさらに上昇することで、その残留強度もさらに低下していく可能性も考えられる。当地区での一連の調査結果より、基盤岩がスレーキングしやすい地山であることも明らかとなっている。地下水が関与することによる岩盤強度の長期劣化に加え、地質時間を要すスメクタイト化進行に伴って、残留強度が更に劣化するという概念での斜面変動機構の検証も必要である。

引用文献：

- 1) 山崎孝成・眞弓孝之・由田恵美 (2000)：高純度粘土鉱物のリングせん断特性：すべり面粘土との対比。地すべり, 37, 2, 30-39
- 2) 宜保清一・中村真也・佐々木慶三 (2003)：地すべり土のリングせん断挙動に及ぼす鉱物組成の影響。日本地すべり学会誌, 40, 4, 259-265
- 3) Tiwari B. and Marui H. (2003)：Estimation of residual shear strength for bentonite-kaolin-Toyoura sand mixture, 日本地すべり学会誌, 40, 2, 124-133
- 4) Tiwari B. and Marui H. (2005)：A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with mineralogical composition. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131, 9, 1139-1150
- 5) 太田岳洋・撰田克哉・松澤真・黒木貴一 (2018)：2018年4月耶馬溪斜面崩壊地の地質構造と考えられるいくつかの崩壊モデル。平成30年度応用地質学会研究発表会講演集, 77-78
- 6) Egli M., Mirabella A., and Fitze (2003)：Formation rates of smectites derived from two Holocene chronosequences in the Swiss Alps. Geoderma, 117, 81-98