

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

Topographic and Geological Features of Landslides Induced by the 2016 Kumamoto Earthquake in the Western Part of the Aso Caldera

佐藤達樹⁽¹⁾・千木良雅弘・松四雄騎

Tatsuki SATO⁽¹⁾, Masahiro CHIGIRA and Yuki MATSUSHI

(1) 京都大学大学院理学研究科

(1) Graduate School of Science, Kyoto university

Synopsis

The 2016 Kumamoto Earthquake, which occurred on 16th April 2016 with a moment magnitude of 7.0, induced many landslides in the western part of the Aso caldera. The bedrocks of the survey area consist of lava flows and pyroclastic rocks with a wide range of chemistry from basalt to rhyolite. They are thickly covered by tephra, of which volcanic soil can be classified from color tone; we classified the volcanic soil into brown volcanic soil, black volcanic soil, and blackish brown volcanic soil. One of the most devastating types of landslides induced by this earthquake was of tephra slopes, because they occurred on rather gentle slopes and ran out long distances. The landslides had sliding surfaces in three types of tephra; these were Kusasenrigahama pumice layer 30,000 years ago (Kpfa), black or blackish brown volcanic soil layer and brown volcanic soil layers that contained felsic lava blocks. These layers that accommodated sliding surfaces had high water content and rich in a clay mineral halloysite, which was formed by the weathering of the buried tephra. Many of the landslides of the tephra layers occurred on slopes where the sliding surface horizon had been undercut beforehand.

キーワード: 平成28年（2016年）熊本地震，斜面崩壊，草千里ヶ浜軽石（Kpfa），火山灰土，ハロイサイト，下部切断

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, Landslide, Kusasenrigahama pumice, Volcanic soil, Halloysite, Undercut

1. はじめに

平成28年4月14日21時26分に熊本県熊本地方を震源とするマグニチュード（M）6.5の地震（熊本地震前震）が発生し，熊本県益城町（ましきまち）で最大震度7を観測した．そして4月16日01時25分には，熊本県熊本地方を震源とするM7.3の地震（熊本地震

本震）が発生し，熊本県益城町および西原村で最大震度7を観測した．これらの地震をはじめとする一連の地震活動は，14日の前震発生から本震の発生した16日までの間，熊本県熊本地方を中心に活発であり，4月16日の本震発生後は熊本県から大分県にかけての広い範囲で地震活動が活発となった．さらに，震度1以上を観測する地震は9月30日までに4,068回発

生し、気象庁はこの一連の地震活動を「平成28年（2016年）熊本地震」（英語名：The 2016 Kumamoto Earthquake）と命名した（気象庁，2016）。

熊本県阿蘇郡南阿蘇村では4月16日の地震により最大震度6強の強い揺れに見舞われ、それに伴う多数の斜面崩壊が発生した（Fig.1）。これらの斜面崩壊および強震動により死者16名の人的被害をはじめ、多数の建物や道路等のインフラ被害をだす大惨事となった。斜面崩壊はおおよそ布田川断層沿いに発生し、この断層の末端付近に位置する阿蘇カルデラ西部に集中的に発生した。阿蘇カルデラ西部において発生した斜面崩壊は、溶岩や溶結・非溶結凝灰岩などの岩盤からなる急崖の崩壊と中央火口丘西側の比較的緩斜面の崩壊（テフラ斜面崩壊）に大別できる。

本報では熊本地震により発生した阿蘇カルデラ西部地域における斜面崩壊の特徴を明らかにし、今後の研究の基礎とするために取得データを整理・記録した。

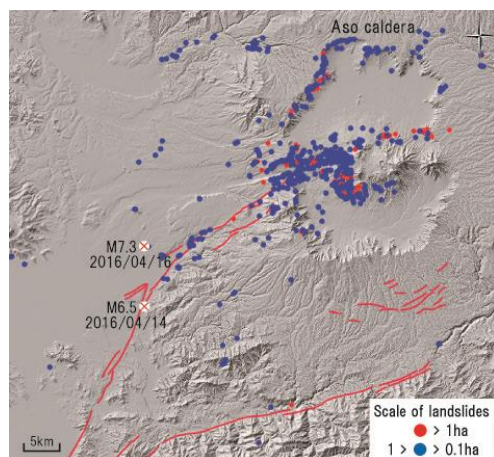


Fig. 1 Distribution of landslides induced by the 2016 Kumamoto Earthquake and the locations of aftershocks and surface fault ruptures (Map provided by Geographical Survey Authority of Japan)

2. 調査地の概要

本報の調査地は熊本地震による斜面崩壊が多発した阿蘇カルデラ西部地域である。阿蘇カルデラ中央部に位置する阿蘇中央火口丘は、南北約25km、東西約18kmの巨大なカルデラウォールに囲まれる。中央火口丘の活動は約9万年前のカルデラ形成直後に始まり、現在も続いている（小野・渡辺，1983）。カルデラ内には流紋岩から玄武岩質の幅広い組成を示す溶岩およびテフラが確認され、調査地域では、中央火口丘起源の溶岩が基盤として広く分布する（Fig.2）。比較的緩傾斜の地表面は軽石、スコリア、

火山灰、そしてそれらの二次堆積物である火山灰土から構成されるテフラに厚く覆われている（小野・渡辺，1985）。渡辺・高田（1990）によると火山灰土は色調によって分類可能であり、本報では黒色を呈する黒ボク（Black soil：Bl）、黄褐色を呈する赤ボク（Brown soil：Br）そして、両火山灰土の中間の色調を示す暗褐色火山灰土（Blackish Brown volcanic soil：BlBr）の3つに分類した。

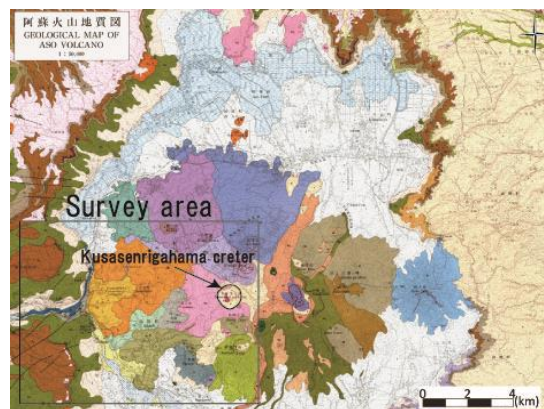


Fig. 2 The geological map of Aso volcano (Geological survey of Japan, 1985) and the survey area.

調査地域において鍵層はテフラ層序の観察を行ううえで、重要な存在である（Fig.3）。広域火山灰である始良丹沢火山灰（AT：約29ka）および鬼界アカホヤ火山灰（K-Ah：約7.3ka）は重要な鍵層の1つである（小野・渡辺，1985）。ATおよびK-Ahはバブルウォール型の火山ガラスからなるガラス質火山灰であり、屈折率（AT:1.498-1.501, K-Ah:1.508-1.516）により同定が可能である（町田・新井，2003）。また、約3万年前（約30ka）に草千里ヶ浜火口から噴出した草千里ヶ浜軽石（Kpfa=ACP2）も最も重要な鍵層の一つであり、その他鍵層となる降下軽石堆積物として阿蘇中央火口丘第1軽石（ACP1：約4.1ka）、阿蘇中央火口丘第3軽石（ACP3：約51ka）、そして阿蘇中央火口丘第4軽石（ACP4：約51ka）が存在する（Miyabuchi，2009）。Kpfaは阿蘇カルデラ地域においてAso-4以降、最大級の噴火堆積物であり、阿蘇カルデラ全周囲で確認できるテフラである（宮縁ほか，2004）。KpfaはATの下位50cmから1mの間に存在することが多く、両者をセットとして認定可能である。この軽石はフォールユニット毎に分布が異なり、東側と南側に特徴的な分布軸をもつため（宮縁ほか，2003），調査地域においては噴出源から西側で層厚が50cmほどとなるが、南側では層厚が2m以上となる場合がある。火口縁から南側および西側斜面は厚く堆積した軽石が溶結してできた赤褐色と黒色の縞状構造を示す火砕岩に覆われている（渡辺ほか，1982）。さらにACP4は、ACP3の下位に出現する軽

石層でKpfaとATと同様に両者をセットとして認定可能である（宮緑ほか2004）。ACP3とACP1は特徴的に黒雲母を含む軽石で、ACP1は中央火口丘において完新世に噴出した最も新しい年代の降下軽石であり、ACP1は純層をなさず、火山灰層などのテフラ層に散在する産状を示す。さらに、局所的な分布を示すスコリア層も分布する範囲により鍵層として利用可能である；それら鍵層は中岳第2スコリア（N2S：約1.5ka）、往生岳スコリア（OjS：約3.6ka）、杵島岳スコリア（KsS：約4ka）である（Miyabuchi, 2009）。

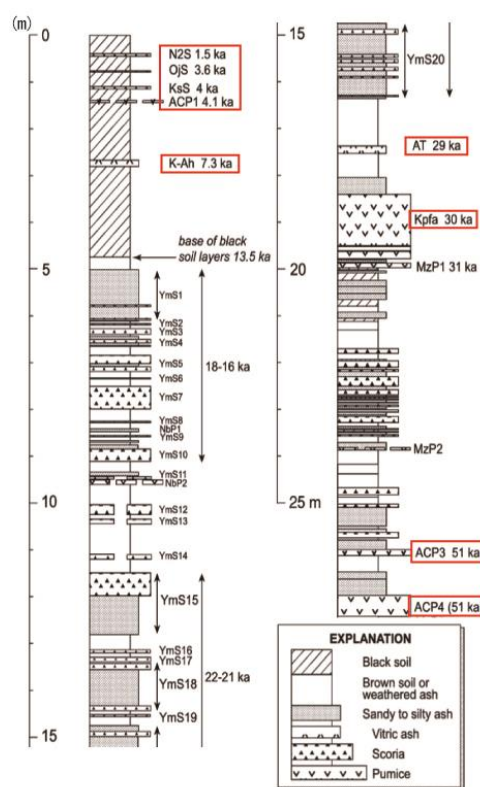


Fig. 3 Generalized columnar section of tephra layers since 51ka in the east of Aso caldera (Miyabuchi, 2009). Red frames indicate tephra layers that we identified in the survey area.

3. 調査方法

調査には、地震発生前の1mメッシュのDEMデータ（2012年）を全域にわたって使用した。また、阿蘇大橋西側斜面で発生した大規模崩壊については、発生後の航空レーザー測量1mメッシュDEMデータ（2016年）も使用した。

崩壊地判読は、地震前後のGoogle earth画像および国土地理院が発行したオルソ画像を用いて行い、熊本地震発生前の1mメッシュDEMデータ（2012年）から作成した地形図に崩壊地をマッピングした。

現地調査は、崩壊地判読を行った地形図から必要箇所を縮尺1/2000～1/4500程度に拡大した詳細地形

図を用いて行った。また、レーザー距離計（TruPluse 360）およびクリノメーターを用いて、崩壊の水平距離、高さ、崩壊深度、見かけの摩擦角、そして、すべり面傾斜の計測も行った。また、崩壊により新たに露出した露頭を中心にテフラの柱状図を作成した。さらに、後述する各エリアのうち2地点以上で確認される層の層厚を平均化した模式柱状図を作成した。厚いテフラの層序が2地点以上確認できない場合は1つの崩壊地の柱状図を模式柱状図とした。

X線分析では、各テフラ層で採取した試料のX線回折ピークから鉱物組成および粘土鉱物の同定を行った。試料を乾燥させると粘土鉱物であるハロイサイトの回折ピークが変化するため、自然含水状態のままペースト化した試料をホルダーにセットし、すぐに分析を行った。測定条件はCu-K α 、20 2°-40°、ステップ幅0.01°、スキャンスピード10°/minである。

含水比の測定は、すべり面形成層を対象に行った。自然含水状態の試料を恒温乾燥器を用いて110℃で24時間乾燥させ、自然含水比を測定した。

火山ガラス屈折率の測定は、温度変化型屈折率測定装置（RIMS）を用い、1試料あたり30個の火山ガラスの屈折率を測定した。

4. 結果および考察

4.1 岩盤からなる急崖の崩壊

岩盤からなる急崖の崩壊は、「カルデラウォール」および「河川の谷壁急斜面」で発生した。

(1) カルデラウォールの崩壊

カルデラウォールは、主に溶結・非溶結凝灰岩、輝石安山岩、火山角礫岩から構成される。様々な規模の落石や岩屑なだれが発生し、いくつかの崩壊は地震後の豪雨（2016年6月20日）により崩壊が拡大した。最大の崩壊は、阿蘇大橋西側斜面において発生し、阿蘇大橋を落橋させ、国道57号線および豊肥線の線路を破壊した（Fig.4）。



Fig. 4 The landslide on the western slope of the Aso bridge. A dotted line shows the crown of the landslide on the lower slope.

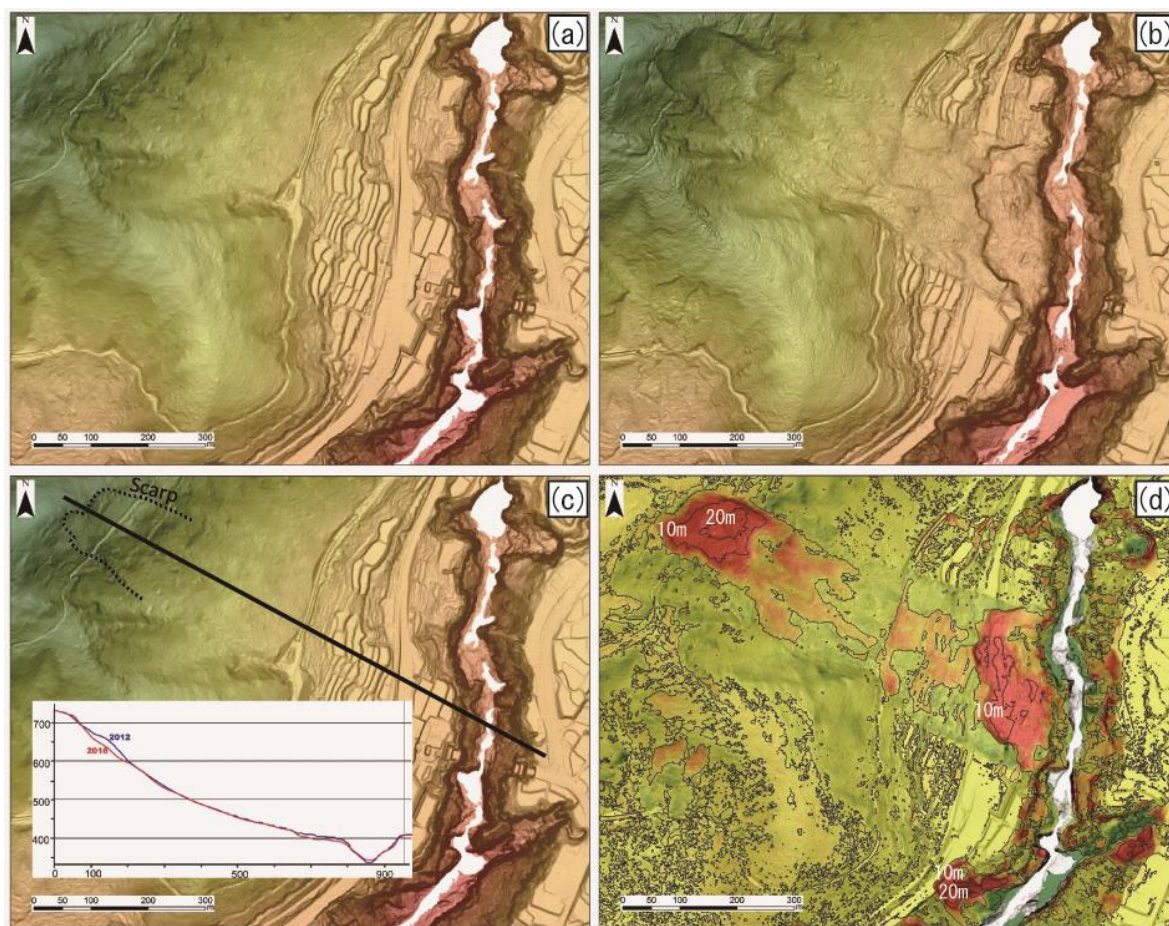


Fig. 5 Figures of the landslide on the western slope of the Aso bridge. (a) Slope map before the landslide. (b) Slope map after the landslide. (c) A cross section of before and after the landslide. (d) Diagram of elevation change before and after the landslide.

この崩壊は、主に輝石安山岩からなる斜面で発生し、水平距離約700m、幅約200m、崩壊深度最大約20mの規模で崩壊した。この崩壊の体積は54万 m^3 と推定されている（石川ほか，2016）。

2011年に紀伊山地で発生した深層崩壊は、1mメッシュDEMデータをもとに、72か所のうち14か所で発生前後の地形の解析が行われており、深層崩壊斜面のほとんどには、崩壊前に前兆的な重力変形による小さな段差(小崖)や線状凹地が崩壊の輪郭に沿って存在している事が明らかとなった(千木良ほか，2012b)。今回発生した大規模崩壊も崩壊発生前後の地形を観察した結果、崩壊発生前に崩壊の輪郭に沿って小崖が存在したことがわかった(Fig.5A, B, C)。この小崖の形成も前兆的な重力変形により斜面が移動した結果であると考えられる。さらに、崩壊に伴う地表面の標高変化をみると(Fig.5D)，この崩壊は斜面上部の崩壊と斜面下部の段丘の緩斜面の崩壊とに分けられることがわかる(Fig.4；点線で示した箇所)。この段丘の崩壊とよく似た形態の崩壊が立野ダムサイト付近の段丘でも発生しており、そこでは崩壊斜面内部にKpfaが広く認められたことから、

Kpfaがすべり面になっていることが推定される。地形および崩壊形態からみて阿蘇大橋西側の斜面下部の崩壊もすべり面は、Kpfaに形成された可能性がある。

(2) 谷壁斜面の崩壊

白川および黒川の谷壁斜面は流紋岩から玄武岩まで様々な組成を示す中央火口丘起源の溶岩から構成される。節理に沿って緩んだ岩盤が分離し、地表面を覆っていた崖錐と共に崩落し、白川および黒川に大量の岩屑を供給した(Fig.6)。



Fig. 6 Landslide of jointed lava on the steep valley slopes along the west side of the Kurokawa River. The right picture is an enlarge picture of the rectangle in the upper picture.

4.2 テフラ斜面の崩壊

調査の結果、テフラの崩壊の多くは、次の3つの層にすべり面を持っていたことが明らかになった。すなわち、降下軽石堆積物である「草千里ヶ浜軽石 (Kpfa)」、 「黒ボク (BI)・暗褐色火山灰土 (BIa)」、

「溶岩塊混じりの赤ボク (Br with lava block)」である。本報では、調査結果をいくつかのエリアに分けて記述する (Table.1)。これらの個々のエリアでは、テフラ層序がおおよそ一致する (Fig.7)。

Table. 1 Data sheet for all the landslides that we investigated. *: measured from the 1-m DEM map. The others were measured in the field.

No.	Landslide	Length (m)	Height (m)	Depth (m)	Apparent friction angle (°)	Slope angle (°)	Sliding surface angle (°)	Materials of sliding surface	Undercut	Undercut cause	Kpfa thickness (m)
1	KGC-1	346	76	6	12.3		23	Br with lava block	yes	Road cut	
2	KGC-2-1	158	41	3	14.7		32	Mixed layer of tephra			
	KGC-2-2	182	42	5.8	13.3		26				
3	KGC-3	78.2	27.9	2.8	19.6	30	30	BI			
4	KGC-4-1	228	56	2.5	13.7		29	Mixed layer of tephra			
	KGC-4-2	172	48	3.1	15.8		30				
5	SWT-1	394	76	8.5	10.9		30	Hydrothermally altered pink gray ash	yes	Road cut	
6	SWT-2			7.4		24	22	Hydrothermal clay (originated from lava)	yes	valley head erosion	
7	SWT-3			7.7		24	24	BIa	yes	valley head erosion	
8	SWT-4	130	25	6.5	10.9		24	BIa	yes	Road cut	0.3+
9	SWT-5							BIa	yes	Road cut	
10	AVL-1	496	92	10.6	10.5*		12	Base of Kpfa and its underlying BIa	yes	Road cut (partially)	0.55
11	AVL-2	110		3.2				Br with lava block			
12	AVL-3	220	60	5.7	15.5		33	Br with lava block	yes	River erosion	0.7
13	AVL-4	105.8	22.5	5+	12	20-24		Br with lava block	yes	Man-made cut	0.3+
14	TKD-1					24.6	15.8-36	Br with lava block	yes	valley head erosion	
15	HNT-1	304	101	4+	16.2			Kpfa			2+
16	HNT-2	100	13	8	7.5	22	22	Kpfa	yes	valley head erosion	0.7+
17	HNT-3							Clayey volcanic sand	yes	valley head erosion	
18	HNT-4	114	34	13?	17	44	24?	ACP4	yes	Man-made cut	1
19	HNT-5	54	19	11?	19.4*	40		ACP4	yes	Man-made cut	1
20	HNT-6	174	79	1-2.5	24.4*	22-30		Kpfa			2+
21	EBS-W1			2.2			28	BIa			
22	EBS-W2			2-3		32		Kpfa			0.3+
23	EBS-W3			3.5			28	BIa			
24	EBS-W4			5			28	BI	yes	River erosion	
25	EBS-W5			14?			14	Kpfa	yes	River erosion	5+
26	EBS-W6							Kpfa	yes	River erosion	0.5+
27	NGN-1							Kpfa	yes	Road cut	2.5+
28	NGN-2	73	23	5.2	18	24	24	Kpfa	yes	Man-made cut	2+
29	NGN-3							Kpfa	yes	Road cut	2.5+
30	NGN-4							Kpfa	yes	River erosion	1.5+
31	NGN-5	50	18		19.9	24		Kpfa	yes	Man-made cut	1.5+
32	NGN-6	88.3	35	3.5+	21.6		24	Kpfa	yes	Road cut	2+
33	NGN-7							Kpfa	yes	Road cut	2.5+
34	NGN-8							Kpfa	yes	River erosion	2+
35	IKN-1	124	30	5.2	14.6		26	BI	No?	Valley head erosion	
36	IKN-2	118	30	4.8	14.4		22	BI	yes	Road cut, Previous landslide	
37	IKN-3L			4.9			26	BI	yes	River erosion	
	IKN-3R			3.3			34				
38	IKN-4L							BI	yes		
	IKN-4R							BI			
39	IKN-5			5.5		32	26?	BI	yes		
40	IKN-6			5.8+		12	12?	BI	yes	Old landslide	
41	IKN-7							BI	yes	Man-made cut	
42	IKN-8							BI	yes	River erosion	
43	IKN-9							BI	yes		
44	IKN-10							BI	No?	Valley head erosion	
45	NGD-1	96	24		13.9	30	30	Kpfa	yes	Man-made cut	2+
46	NGD-2	82	20	3.3	13.6	28	28	Kpfa	yes	Man-made cut	2.5+
47	NGD-3							Kpfa	yes	Road cut	2+
48	NGD-4							Kpfa	yes	Road cut	1

Landslides outside the subareas (Localities are shown in Fig. 7)

49	JNO-1	132	44	3.4	18	38	38?	Clayey Br and weathered scoria	yes	Slope toe erosion	
50	JNO-2	147	50	3.4?	18.4			Clayey Br and weathered scoria	yes	Slope toe erosion	
51	YKS-1	54.4	23.7	4.75	23.5	26	26	Br with lava block	yes	Man-made cut	
52	YKS-2	29.4	17		30			Br with lava block	yes	Road cut	
53	KKS-W1			3.75			24	BIa	yes	Road cut	
54	KKS-W2			2.6			32	BIa			
55	TTN-1	296						Kpfa	yes	River erosion	0.3+
56	HKM-1	203	92	5.2	24.4		30	Br on hydrothermally altered rock			
57	KGC-W1	91.6	21.7	2.2+	13.3		30	Mixed layer of tephra			

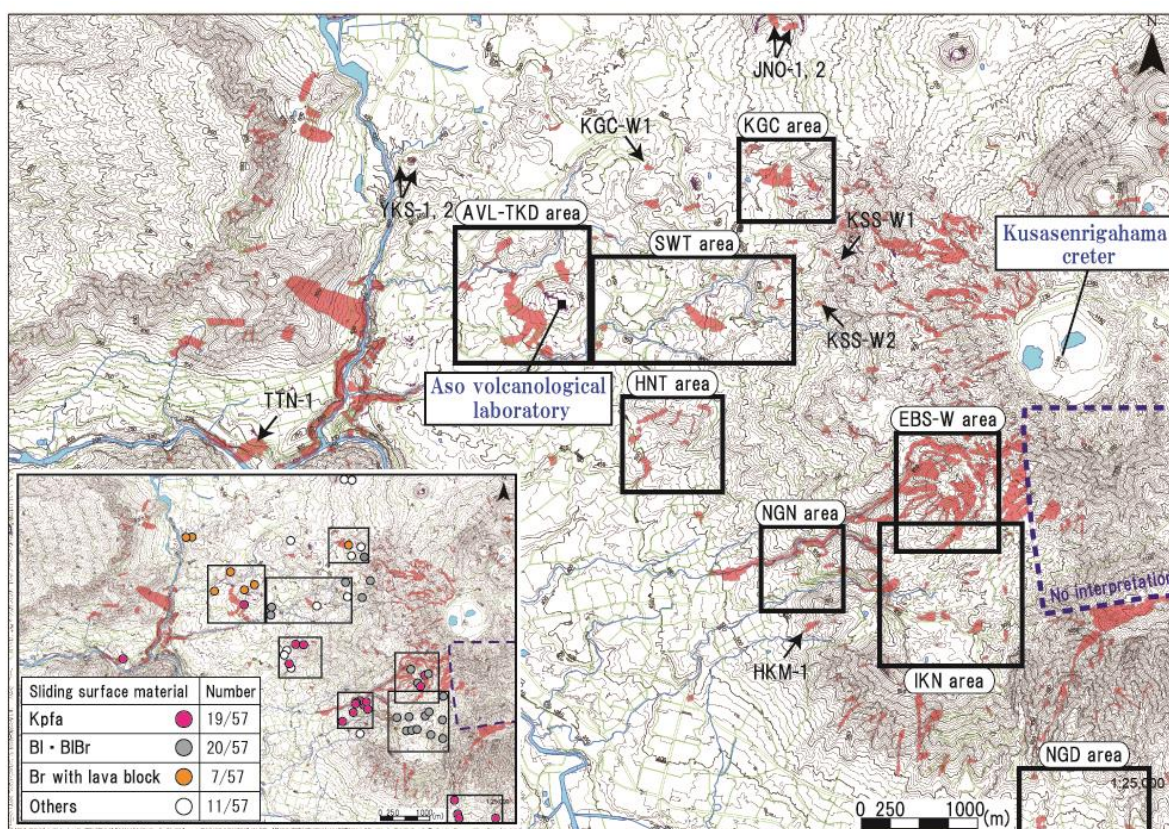


Fig. 7 Landslide areas and the sliding surface materials in the survey area.

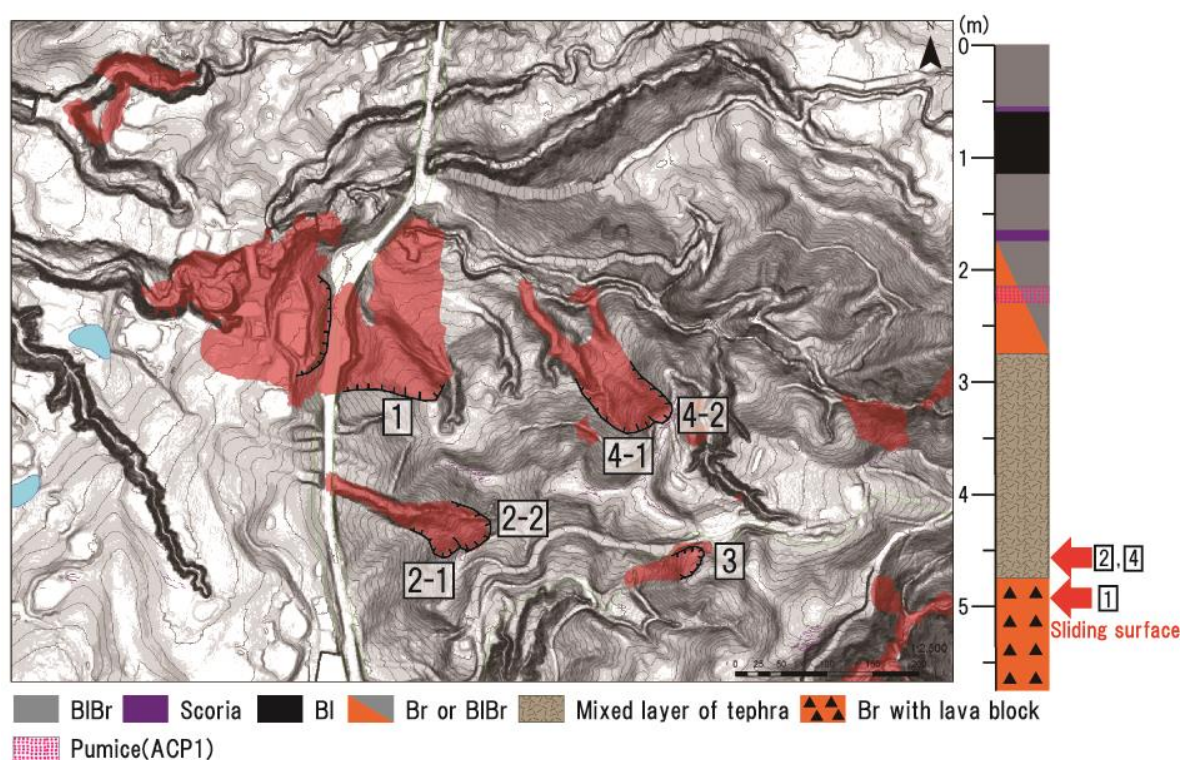


Fig. 8 Landslide distribution and a generalized columnar section in KGC area. Legend of the columnar section is for the whole investigation areas and includes tephra not appearing in this area. Red arrows indicate sliding surface.

(1) 熊本ゴルフ場[KGC]エリア

熊本ゴルフ場[KGC]エリアでは、熊本ゴルフ場の東側の草千里ヶ浜火口から広がる比較的なだらかな斜面において崩壊が発生した (Fig.8) . このエリアのおおよそのテフラ層序は、上位から暗褐色火山灰土層 (層厚55cm) , スコリア層 (層厚<5cm) , 黒ボク層 (層厚55cm) , 暗褐色火山灰土層 (層厚50cm) , スコリア層 (層厚10cm) , 白色軽石粒が散在した赤ボクもしくは暗褐色火山灰土層 (層厚100cm) , 混在層そして、溶岩塊混じりの赤ボクであった (Fig.8柱状図) . Miyabuchi(2009)記載の産状および分布から最上位のスコリア層がN2S, 下位のスコリア層がKsS, そして火山灰土に散在する白色軽石粒はACP1であると推定した. また、混在層とは黒ボク, 暗褐色火山灰土, 赤ボクの混在した層であり幅数mほどのパッチ状に連続する層も含むが、全体として構造の乱れている層を指す用語として使用した (Fig.9) . 最下位の溶岩塊混じりの赤ボク層は、過去の崩壊あるいは土石流堆積物と推定される層であり、赤ボク層に黒色ガラス質の溶岩塊を多数含んでいた. この溶岩は宮縁ほか (2004) 記載のデイサイト質溶岩である沢津野溶岩 (30ka) の分布および状と一致した. また、溶岩塊と共に一部で橙色のKpfaと推定される軽石も混合していたことから過去に発生した崩壊は、Kpfa堆積後に発生したと考えられる.



Fig. 9 Mixed layer of tephra in KGC-2-1. Br, BlBr, and Bl are mixed.

[KGC-1]

KGC-1はKGCエリア最大の斜面崩壊であり、尾根を挟んだ西側と北側の2方向にそれぞれ崩壊土砂が移動した (Fig.10) . 北側に移動した土砂は沢をせき止めて土砂ダムを形成し、6月20日の豪雨により決壊し、県道298号線を分断した. 移動距離の長い方の崩壊は水平距離346m, 高さ76m, 見かけの摩擦角12.3°であった. この崩壊のすべり面形成層は溶岩塊混じりの赤ボクの上部であり、崩壊深度は最大約6m, す

べり面傾斜は約23°であった (Fig.11) . 西側に分岐した崩壊の側方崖は県道298号線の手前で途切れていたことから、道路よりも上の斜面がすべったことが示唆され、道路敷設に伴う斜面の切土により斜面下部の層準が切断されていたと判断される. また、滑落崖には2方向の崩壊にそれぞれ対応する方向の条線が確認された. 条線の形態は滑落崖上部でジグザグしており、下部で直線的になっていた. これは、滑り始めは地震動に伴い横方向に繰り返し変位し、その後直線的なすべりが起こったことを示すのかもしれない.

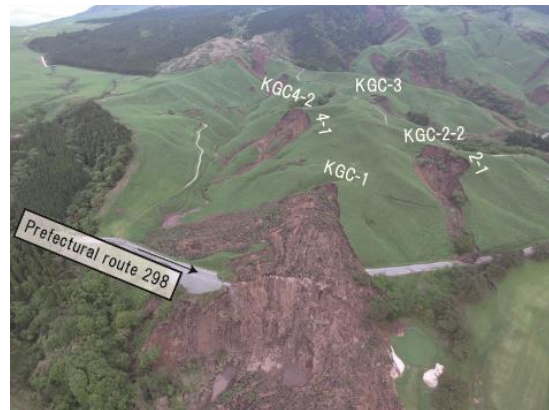


Fig. 10 Oblique view of the landslides in KGC area taken by a drone. (This photograph provided by professor Matsuura.)



Fig. 11 A sliding surface formed in the upper portion of the Br layer with lava block in KGC-1.

[KGC-2]

KGC-2では尾根部の浅い深度の崩壊を挟んだ一帯の滑落崖で崩壊深度の異なる2つの崩壊が発生し、それぞれ浅い方を2-1,深い方を2-2とした (Fig.10) .

(KGC-2-1)

KGC-2-1は水平距離158m, 高さ41m, 見かけの摩擦角14.7°, 崩壊深度約3m, そしてすべり面傾斜は約32°の崩壊であった. 崩壊斜面上部では混在層内の比

較的黒味の強い火山灰土が集中した層に形成されたすべり面が露出しており，下部では混在層の下の溶岩塊混じりの赤ボク層が露出していたため，この崩壊のすべり面は混在層の基底付近に形成されたと考えられる（Fig.12）．

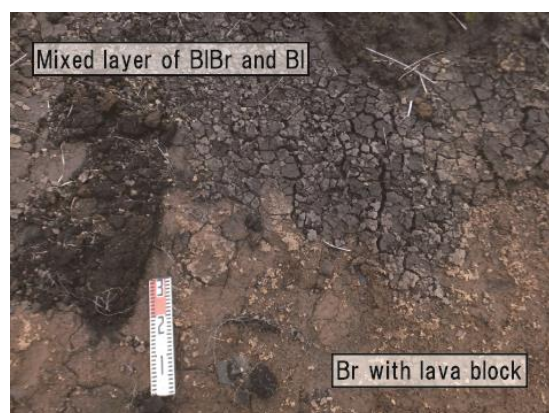


Fig. 12 A sliding surface formed in the base of the mixed layer of BI Br and BI in KGC-2-1

一方，滑落崖露頭には開口亀裂が黒ボクによりが充填されている箇所がみられ，黒ボク層より上位の層には亀裂が連続していなかった（Fig.13）．これは過去の地震時に生じた亀裂が年月を経て，地表面にあった火山灰土に充填された結果であると示唆される．

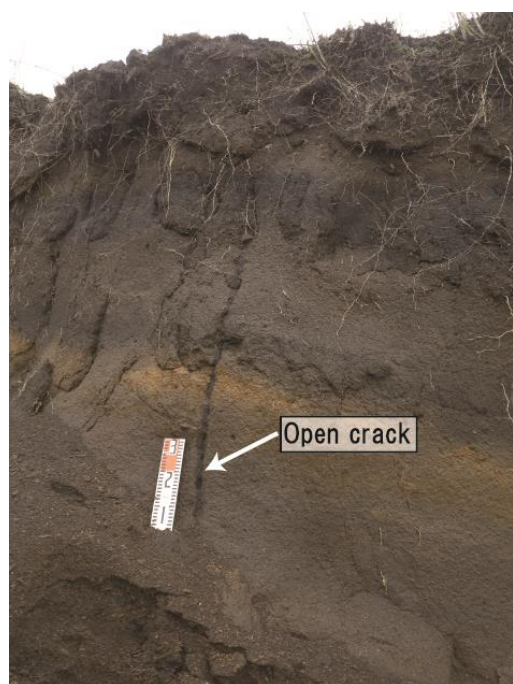


Fig. 13 An open crack filled with BI at the scarp of landslide KGC-2-1. This crack must have been made before the 2016 event.

(KGC-2-2)

KGC-2-2は水平距離182m，高さ42m，見かけの摩

擦角は13.3°崩壊深度約5.8m，そしてすべり面傾斜約26°の崩壊であった．ここでは，層厚475cm以上の厚さで混在層が存在し，すべり面は混在層中のガラス質火山灰が集中する層付近に形成されていた

（Fig.14）．このガラス質火山灰の火山ガラスの屈折率は，1.499-1.500であったためATと同定した．また，混在層中の深度約2m付近にもガラス質火山灰が存在し，調査地域のテフラ層序から考えるとK-Ahである可能性が高いが現時点では不明である．



Fig. 14 A sliding surface formed in the mixed layer of tephra, which contained AT (KGC-2-2). The white layer to the left of the scale is AT.

[KGC-3]

KGC-3は水平距離78.2m，高さ27.9m，見かけの摩擦角19.6°の崩壊であった（Fig.10）．この崩壊のすべり面は高含水の黒ボク層（自然含水率は約160%であった）に形成され，崩壊深度は約2.8m，すべり面傾斜は約30°であった（Fig.15）．KGCエリアにおいて調査した斜面崩壊ですべり面が黒ボク層に形成された崩壊はKGC-3だけであった．

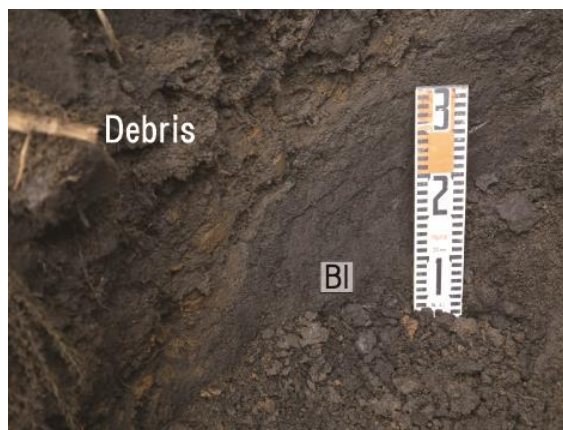


Fig. 15 A sliding surface formed in BI layer with high water content (KGC-3).

[KGC-4]

KGC-4はKGC-2と同様に一つながりの滑落崖で崩壊深度の異なる2つの崩壊が発生し，それぞれ浅い方を4-1,深い方を4-2とした（Fig.10）．この滑落崖の直

上には、おそらく今回の地震前に形成されたアンチセティックな亀裂群が認められた。

(KGC-4-1)

KGC-4-1は水平距離228m、高さ56m、見かけの摩擦角13.7°、崩壊深度は最大約2.5m、そしてすべり面傾斜約29°の崩壊であった。露出したすべり面形成層は混在層であり、崩壊深度はKGC-4-2の方向に浅くなっていた。ピット掘削箇所では、赤ボクのすべり面を確認したが、崩壊斜面に広く露出したすべり面が混在層であったため、ピット掘削を行った箇所では混在層中の比較的赤味の強い火山灰土が集中的に存在する箇所であった可能性が高い (Fig.16)。



Fig. 16 A sliding surface in the mixed layer dominated by Br (KGC-4-1)

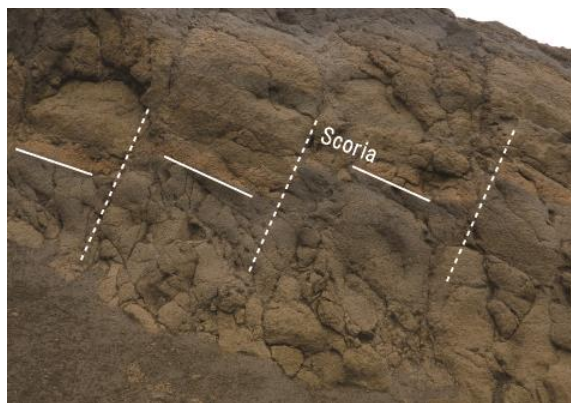


Fig. 17 A cross section in which the scoria layer and Bl layer were cut by antithetic fault.

(KGC-4-2)

KGC-4-2は水平距離172m、高さ48m、見かけの摩擦角15.8°、崩壊深度約3.2m、そしてすべり面傾斜約30°の崩壊であった。この崩壊の右側方崖付近の斜面下部では溶岩塊混じりの赤ボク層が露出していた。右側方崖のピット掘削箇所では、すべり面は混在層に形成されており、滑落崖直下のすべり面の露出と一致していた。このことから、この崩壊はKGC-2-1と同様に混在層の基底付近にすべり面が形

成されたと考えられる。

一方、滑落崖の露頭断面ではガラス質火山灰層および黒ボク層とスコリア層および黒ボク層がそれぞれアンチセティックに切られた露頭断面を確認した。

(Fig.17) また、滑落崖直上にはアンチセティックな亀裂群が形成されていたため、この露頭断面は過去の地震による斜面崩壊が発生した時に斜面がわずかに動いていた形跡かもしれない。

(2) 沢津野[SWT]エリア

沢津野[SWT]エリアでは、熱水変質など風化以外の作用を受けたテフラまたは溶岩が局所的に分布する特徴的なエリアである (Fig.18)。SWTエリアにおいて調査した斜面崩壊のすべり面は、熱水変質粘土層の他、暗褐色火山灰土層に形成されていた。

このエリアのおおよそのテフラ層序は、上位から黒ボク層(層厚約100cm)、赤ボク層(層厚約165cm)、黒ボク層(層厚約25cm)、暗褐色火山灰土層または赤ボク層(層厚約45cm)、黒ボク層(層厚約30cm)、赤ボク層(層厚約155cm)、そして暗褐色火山灰土層(層厚約25cm)まで一致していた (Fig.17柱状図)。SWT-1, 2, 3は柱状図記載の最下位の暗褐色火山灰土層よりも下位の層準にすべり面が形成された。

[SWT-1]

SWT-1はSWTエリア中央部に位置するこのエリア最大の崩壊であり、水平距離394m、高さ74m、見かけの摩擦角10.9°、崩壊深度最大約8.5m、そしてすべり面傾斜は30°であった。すべり面は、軽石混じりの桃灰色火山灰層内の極めて軟質かつ粘土質になっている層(深度850cm付近、層厚約5cm)に形成されていた (Fig.19)。この特徴的な火山灰層はSWT-1のみで確認され、層内のすべり面を境に下方に軽石の存在量が増え、粒径も増える傾向があり、すべり面の形成箇所よりも上方にはほとんど軽石が含まれない。この軽石は黄橙色であるが、火山灰層内に散在する産状を示し、SWTエリア周辺のKpfaの産状と異なっていた。また、すべった地層は、崩壊源斜面下部で道路敷設に伴う斜面の切土により切断されていた。

深度170-180cmには層厚約10cmのガラス質火山灰が存在し、火山ガラスの屈折率が1.508-1.511であったためK-Ahと同定した。桃灰色火山灰層の直上にはラミナの見られる火山砂が存在し、K-Ahまでの深度にATは確認できなかった。

すべり面形成深度を含む桃灰色火山灰層のX線分析を行った結果、純度の高いスメクタイトのピークを確認した。すべり面の形成された物質にスメクタイトが形成されていた崩壊はSWT-1のみであった。このことから、SWT-1は風化作用だけでなく、熱水

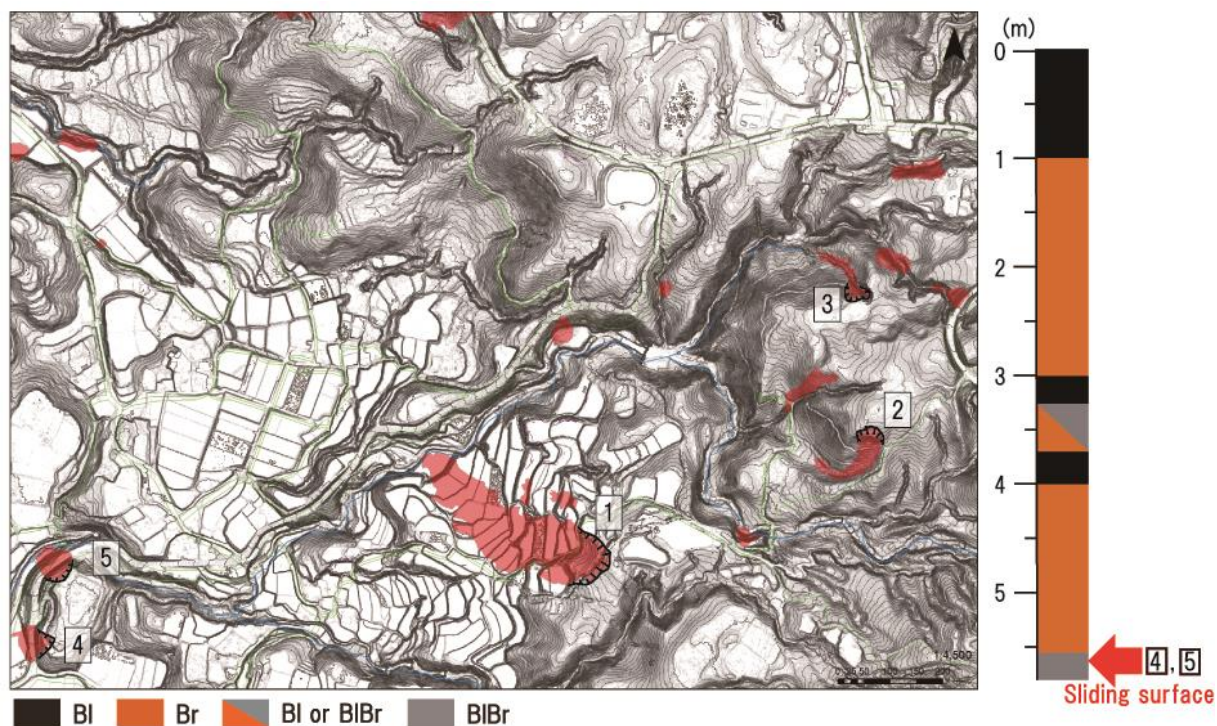


Fig. 18 Landslide distribution and a generalized columnar section in SWT area. Legend of the columnar section is for the whole investigation areas and includes tephra not appearing in this area. Red arrows indicate sliding surface.

変質などの影響を受けた複雑な場で発生した崩壊であると考えられる。



Fig. 19 Hydrothermally altered pink gray volcanic ash, which contains pumice grains (SWT-1).

[SWT-2]

SWT-2は崩壊深度最大約8m, すべり面傾斜22°であった。崩壊斜面中腹から崩壊が谷に沿って湾曲していたため崩壊の水平距離, 高さ, 見かけの摩擦角は測定できなかった。すべり面は, 紫色, 黄色, 白色などの色鮮やかな縞状構造をなした粘土 (縞状粘土) およびその下位の白色の斜長石の残存した (赤色粘土) であった (Fig.20)。縞状粘土や赤色粘土などの粘土層は, 他の崩壊地には見られない特徴的な層であり, 溶岩が熱水変質を受けたものと推定される。

また, 崩壊斜面上部にはSWT-1と同様の溶岩塊が露出していた。この崩壊地では滑落崖直下に水は流れていないが, 滑落崖直下の深度約50cmのピットに10cm程度の水が数十分で溜まった。崩壊斜面上部の縞状粘土の上面付近から水がしみ出し, 小規模な沢を形成していた。このことからすべり面形成層であった縞状粘土が遮水層となっており, この層より上位の層全体が崩壊したと考えられる。また, 崩壊源斜面下部の層準は谷頭浸食により切断されていたと推定される。



Fig. 20 Hydrothermal clay originated from lava in SWT-2. Colorful banding is observed.

すべり面の形成された熱水変質溶岩といくつかのテフラ層でX線分析を行った結果, 熱水変質溶岩には

特徴的にカオリナイトが形成されていた。すべり面の形成された物質にカオリナイトが形成されていた崩壊は、この崩壊とHKM-1の2か所だけであった (Table1)。また、上位のテフラ層にはハロイサイトが形成されていた。

[SWT-3]

SWT-3は崩壊深度約7.7m、すべり面傾斜24°の崩壊であった。この崩壊もSWT-2と同様に崩壊斜面中腹から崩壊が大きく湾曲していたため崩壊の水平距離、高さ、見かけの摩擦角は測定できなかった。滑落崖直下のピット掘削では、すべり面が高含水の赤ボク層（自然含水率は約141%であった）に形成されていたが、崩壊斜面上部から中腹に露出したすべり面は、下位の暗褐色火山灰土層に形成されていた (Fig.21)。このことから上位の赤ボク層から下位の暗褐色火山灰土層に斜交するようにすべり面が形成されたと考えられる。この崩壊地のテフラ層序はSWTエリアに属する他の崩壊地のテフラ層序と異なる点が多く、すべり面形成層よりも下位にはSWT-1, 2と同様の溶岩塊がみられ、部分的に露出したKpfaと推定される橙色の軽石層と直接接していた。深度4m付近の赤ボク層内には、K-Ahと考えられる幅数10cmのパッチ状のガラス質火山灰を確認したが、ATは確認できなかった。また、崩壊源斜面下部の層準は谷頭浸食により切断されていた。



Fig. 21 A sliding surface formed in the Br layer covered by debris, which was observed at the bottom of the head scarp (SWT-3).

[SWT-4][SWT-5]

SWT-4は水平距離130m、高さ25m、見かけの摩擦角10.9°の崩壊であった。この崩壊のすべり面は暗褐色火山灰土層形成されており、崩壊深度は約6.5m、すべり面傾斜は24°であった。この崩壊地では露頭から数m離れ、レーザー距離計を用いて層序を観察した。そのため、SWTエリアでは赤ボク層内に含まれる可能性の高いK-Ahを見落としている可能性がある。観察できた最下位にはSWT-3と同様に溶岩塊がみられ、部分的に露出したKpfaと推定される橙色の

軽石層と直接接していた。また、この層の上位にATと推定されるガラス質火山灰が存在した。

(3) 火山研[AVL]・東海大[TKD]エリア

火山研[AVL]・東海大[TKD]エリアでは、京大火山研究センターの位置する高野尾羽根溶岩ドーム斜面および東海大学の南側の斜面で崩壊が発生した

(Fig.22)。高野尾羽根溶岩ドームは流紋岩質の高野尾羽根溶岩の活動により約51kaに形成された後、テフラに厚く覆われている (宮縁ほか, 2004)。このエリアのおおよそのテフラ層序は、上位から黒ボク層もしくは暗褐色火山灰土層 (層厚約45cm)、層厚約5cmのK-Ahを挟在した赤ボク層 (層厚約150cm)、暗褐色火山灰土層 (層厚約45cm)、黒ボク層 (層厚約50cm)、暗褐色火山灰土層 (層厚約55cm)、黒ボク層 (層厚約30cm)、暗褐色火山灰土層 (層厚約50cm) 赤ボク層 (層厚約130cm)、砂質火山灰層 (層厚約40cm)、ボク層 (層厚約80cm)、層厚約20cmのATを挟在した暗褐色火山灰土層 (層厚約170cm)、赤ボク層 (層厚約70cm)、砂質火山灰層を1層挟在したKpfa (層厚約75cm)、暗褐色火山灰土層 (層厚約100cm)、溶岩塊混じりの赤ボク層 (層厚約30cm以上) であった (Fig.22柱状図)。また、AVLエリアの崩壊地の赤ボク層に含まれる溶岩塊は、デイサイト質の黒色ガラス質溶岩ではなく、流紋岩質の流理構造の発達した部分やガラス質な部分からなる高野尾羽根溶岩起源の溶岩塊であった。

[AVL-1]

AVL-1はこのエリアで発生した最大の斜面崩壊であり、すべり面傾斜約12°と非常に緩い傾斜で崩壊が発生した。崩壊源では暗褐色火山灰土の上面に白～黄橙色の風化した軽石層が部分的に張りついた状態のすべり面が広く露出していた (Fig.23)。

滑落崖直下のピット掘削による露頭断面では、深度約10mに厚さ60cmの橙色のKpfaが認められ、その基底は厚さ約1cmにわたって白色化しており、この層が崩壊地に露出したすべり面に点々と認められたものである。この白色化したKpfaは、非常に軟弱で手で容易に泥漚化することができた (自然含水率は約93%であった)。また、前述のピットでは、白色化したKpfaが液状化して、その上の橙色のKpfaに脈状に侵入している部分が認められた (Fig.24)。また、この崩壊は3つの指状に分かれて流下していた。それぞれ、崩壊源の下部は道路によって下部切断されていたと推定される。

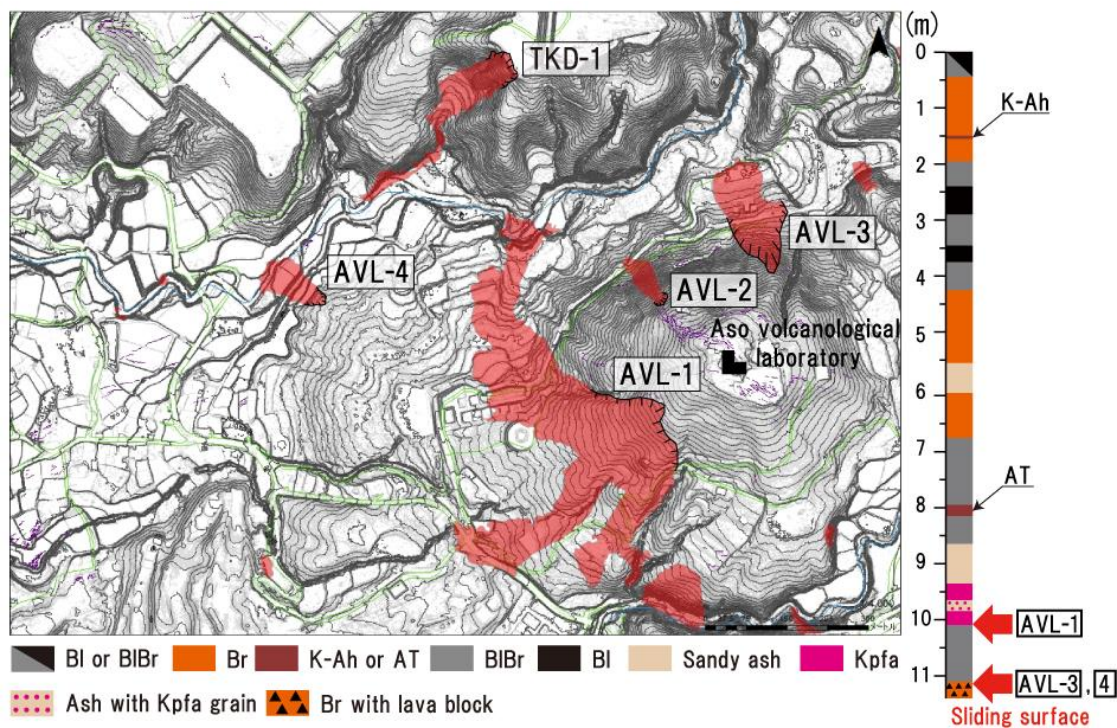


Fig. 22 Landslide distribution and a generalized columnar section in AVL-TKD area. Legend of the columnar section is for the whole investigation areas and includes tephra not appearing in this area. Red arrows indicate sliding surface.



Fig. 23 An exposed sliding surface at the base of Kpfa (white), which occurs in patches on the underlying BILBr in AVL-1.

[AVL-2]

AVL-2は高野尾羽根溶岩の岩塊の混在した赤ボクの上部にすべり面を持つ崩壊で、崩壊深度は約3.2mであった。この崩壊地の露頭には、深度180から310cmの黒ボクおよび暗褐色火山灰土層は構造がやや乱れており鍵層も確認できなかった。この崩壊は崩壊源と堆積域は明瞭であるが、崩壊斜面中腹には植生がそのままになっている範囲が残されていた。

[AVL-3]

AVL-3は水平距離220m、高さ60m、見かけの摩擦

角15.5°、崩壊深度約5.7m、すべり面傾斜約33°の崩壊であった。この崩壊もAVL-2と同様に高野尾羽根溶岩の溶岩塊の混じった赤ボクの上部にすべり面を形成した崩壊であったが、AVL-2に比べ、崩壊深度が

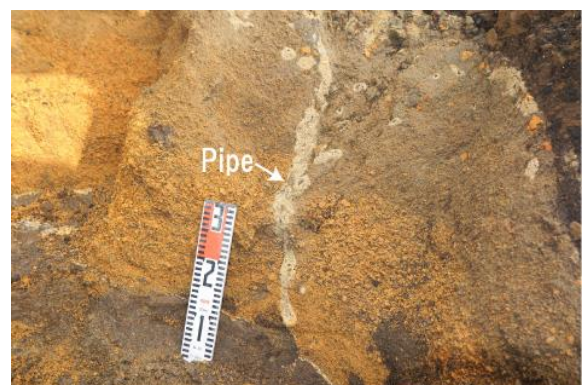


Fig. 24 A pipe of liquefied white Kpfa, which intruded into the upper orange color portion of Kpfa.

深く、Kpfaよりも深い層準にすべり面が形成されていた。斜面の上部と下部では傾斜が変化しており(上部で約30°、中央部で22°、下部で約12°)、崩壊斜面中腹の傾斜が変化した箇所から黒ボク層が1層増えたが、すべりの傾斜には変化がなかったため崩壊深度は傾斜が変化した箇所から再び深くなっていた

(Fig.25)。また、崩壊斜面中腹には、乾燥亀裂の発達した赤ボクに溶岩塊が点在したすべり面が広く露

出していた。崩壊前の斜面下部には道路が敷設され、道路下には数軒の住宅が立ち並んでいたが、崩壊物が激しく攪乱されず、1枚の絨毯のように移動したため、住宅も概形を保ちながら移動体とともに移動した。崩壊後の空中写真やGoogle earth画像では、崩壊地末端は樹林に隠れてよく見えないが、1mメッシュのDEMから作成した傾斜図から、おそらく下方の河川の小段丘の段丘崖よりも上の部分が崩壊したと推定される。つまり、すべての地層はこの部分で下部切断されていたと推定される。

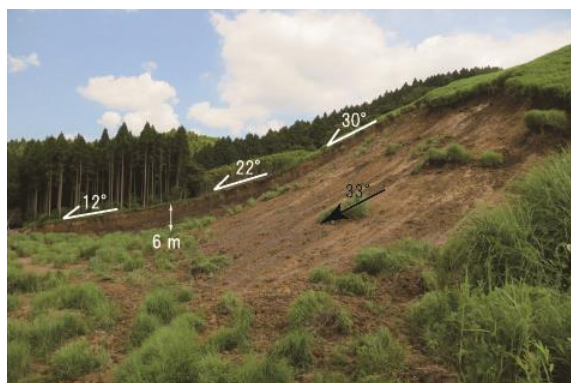


Fig. 25 Oblique view of landslide AVL-3. Surface slope angles changed from 30° in higher elevations to 12° in lower. A sliding surface of Br with lava blocks was widely exposed.

[AVL-4]

AVL-4は水平距離105.8m、高さ22.5m、見かけの摩擦角12°の崩壊であった。崩壊斜面下部では地表面に生えていた笹が移動体の下敷きとなっており、移動体と地山を区別できた。移動体には橙色のKpfaが挟まれていたため、すべり面はKpfaよりも下位に形成されたことが分かる (Fig.26)。移動体の基底付近の赤ボク層には、せん断で引き延ばされた層厚約0.5cmの黒色の層が存在し、条線がみられた。このことから赤ボク層が崩壊のすべり面形成層だったと考えられる。溶岩塊は確認できなかったが、すべり面形成層よりも上位のテフラ層序がAVL-3とほぼ一致するため、おそらくAVL-3と同様の崩壊であると考えられる。また、崩壊地にすべり面の露出はなく、ピット掘削でもすべり面深度に到達できなかったため、正確な崩壊深度は不明であるが、右側方崖露頭において観察したテフラ層序から少なくとも5m以深であると考えられる。

崩壊土砂は沢を挟んで対岸まで移動し、対岸のコンクリート擁壁の上に約2mの厚さをもって堆積していたことから、この崩壊土砂は一時的に沢を堰き止めていたと考えられる。崩壊源の下部は耕作地造成に伴って切断されていたと判断される。



Fig. 26 Landslide AVL-4 (upper) and the contact between the original ground surface and the debris (lower). We see grass stems beneath the debris. surface of Br with lava blocks was widely exposed.

[TKD-1]

TKD-1は、尾根部で薄く谷部で深い形態を示し、2つの沢に沿って長距離流動化し、東海大学の斜面で発生した最大の崩壊であった (Fig.27)。この崩壊のすべり面は、高含水の溶岩塊混じりの赤ボク層（自然含水比は、約106%であった）に形成され、崩壊深度は約3.6mであった。この赤ボク層には根茎の抜けた痕跡を明瞭に確認でき、かつての地表面である古土壌であったことがわかる。また、この層に含まれる溶岩塊はKGCエリアやSWTエリアで確認したデイサイト質な黒色ガラス質溶岩であった。



Fig. 27 Oblique view of landslide TKD-1. Arrows indicate the lava blocks.

滑落崖直下のすべり面傾斜は36°であったが、滑落崖よりも下方に露出したすべり面の傾斜は緩く15.8°であった。すべり面表面にはであったすべり面のせん断破壊繰り返しゾーンがすべり面表面から約5cmの厚さに認められた。

崩壊源は沢の最上部であり、崩壊源は高さ20m、水平距離43mであり、崩壊源の最下部と最上部とを結んだ線の傾斜角は24.6°であった。崩壊源の下方には元の地山が残されており、崩壊源が斜面上部に限られる。さらに谷頭浸食により、下部を切断された斜面が崩壊したことが示唆される。

(4) 火の鳥[HNT]エリア

火の鳥[HNT]エリアでは増田ほか(2004)により定義された長野火山の山体斜面およびその周辺の斜面で崩壊が発生した(Fig.28)。長野火山には過去の崩壊の跡が多数確認され、HNT-2およびHNT-3では、地表直下に最大粒径20cmの黒曜石やKpfaからなる過去の岩屑流積物を確認した(Fig.29)。

このエリアのおおよそのテフラ層序は、上位から黒ボク層(層厚55cm)、赤ボク層(層厚45cm)、黒ボク層(層厚50cm)、赤ボク層(層厚200cm)、層厚15cmのATを挟在した暗褐色火山灰土層(層厚100cm)、砂質火山灰(層厚35cm)、砂質火山灰層を1層挟在したKpfa(層厚85cm)、暗褐色火山灰土層

(層厚100cm以上)となっており、数mの欠落があった後、ACP3混じりの砂質火山灰(層厚35cm)、ACP3(層厚15cm)、スコリア混じりの赤ボク層(層厚25cm)、スコリア層(層厚35cm)赤ボク層(層厚20cm)、そしてACP4(層厚20cm以上)と続いていた(Fig.28柱状図)。



Fig. 29 Old debris avalanche deposit (HNT-2).

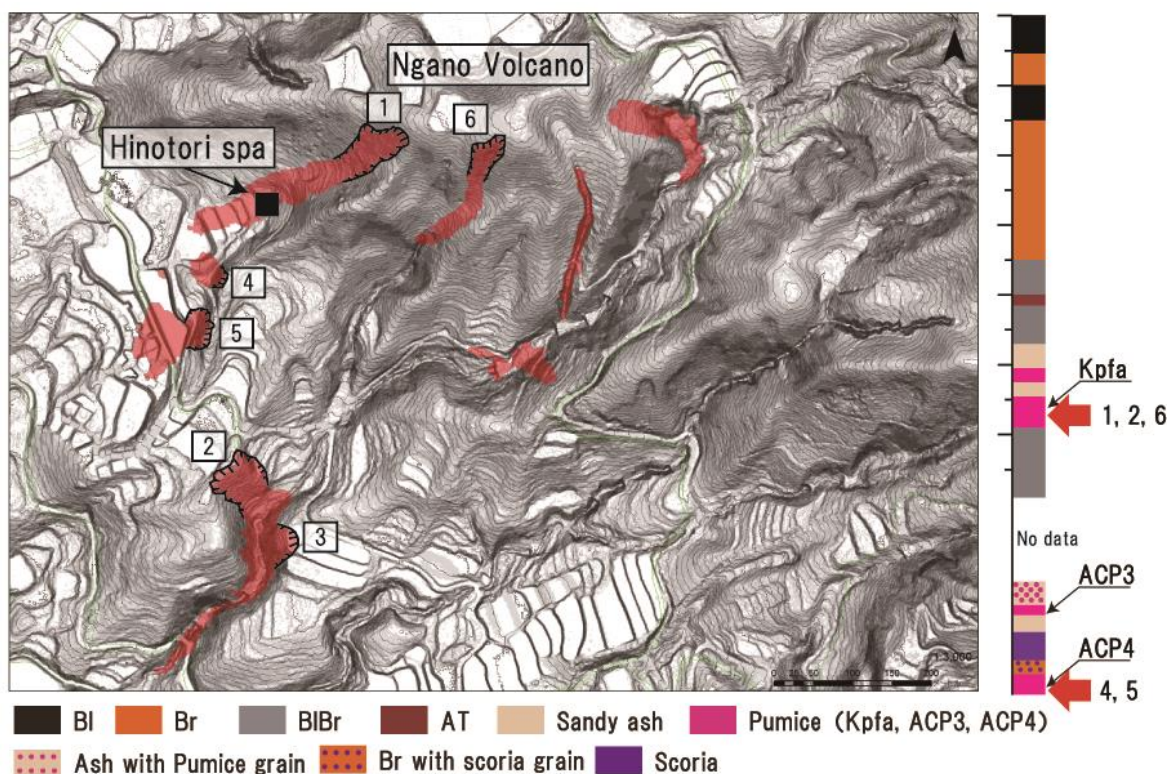


Fig. 28 Landslide distribution and a generalized columnar section in HNT area. Legend of the columnar section is for the whole investigation areas and includes tephra not appearing in this area. Red arrows indicate sliding surface.

[HNT-1, 6]

HNT-1は水平距離355m, 高さ10m, 見かけの摩擦角16.2°, 崩壊深度約4mであった。崩壊斜面にはKpfaと推定される橙色の軽石が広く露出しており, 白色粘土化した箇所も多数確認した。少なくとも2m以上の層厚をもつ橙色の軽石層であることからこの軽石はKpfaであると判断した。さらに, この崩壊地のKpfaの層には溶結火砕岩や黒曜石が含まれており, Kpfaも含めたそれらの粒径は最大25cm以上と大きく, 他のエリアのKpfaと異なる産状を示した。また, HNT-6もHNT-1と同様に長野火山の山体斜面において発生したKpfaにすべり面をもつ崩壊であった。

[HNT-2]

HNT-2は長野火山の麓の斜面で発生した崩壊で, 層厚約210 cmには長野火山の山体斜面を起源とした主に黒曜石とKpfaからなる過去の岩屑流堆積物が堆積していた。熊本地震による崩壊は下流側のHNT-3と共に流動化し, 長距離移動したが, HNT-3手前の谷を挟んだ対岸に崩壊土砂が乗り上げた箇所があったため, そこでレーザー距離計を用いて測量を行った。その結果, この崩壊の水平距離は100m, 高さは13m, 見かけの摩擦角は7.5°であった。崩壊深度は約8mで, 崩壊地内部には白色粘土化した軽石のすべり面が点々と露出しており, すべり面の傾斜は22°であった。HNT-1, 6の軽石に比べ, この崩壊地の軽石は, 風化が著しく進んでおり, 軽石層全体が白色粘土化していた。この軽石層の直上約1mにはガラス質火山灰を認めることができ, 両者をセットして考えると, ガラス質火山灰はAT, すべり面となった軽石層はKpfaであると判断でき, このKpfaの層内にすべり面が形成された。また, この崩壊の斜面下部は, 谷頭浸食によりKpfa層が切断されていた。

[HNT-3]

HNT-3は崩壊斜面中腹から崩壊が谷に沿って湾曲していたため崩壊の縦横断距離, 高さ, 見かけの摩擦角は測定できなかった。この崩壊地でもHNT-2と同様に層厚約230cmの岩屑流堆積物を確認したが, それらの下位に見られる層準は異なっていた。岩屑流堆積物の下位には青灰色と灰白色のラミナつき砂質火山灰層, 赤ボク層および粒径1cm以下の軽石を含む赤ボク層, 粒径1cm以下の粘土質な火山砂層(粒径約1cm, 層厚約5cmの水平堆積した軽石層を挟在した)を順に確認した。崩壊斜面上部では, 広く露出していないものの火山砂の上面にこの軽石層の基底が張り付いた状態のすべり面露出を確認した。すべり面は粘土質な火山砂層内に挟在した軽石層に形成された可能性が高い。

[HNT-4][HNT-5]

HNT-4は調査地域で唯一Kpfa, ACP3, ACP4の3種

類の軽石層を一断面で確認することができる崩壊地である(Fig.30)。この崩壊は水平距離54m, 高さ19m, 見かけの摩擦角19.4°, 崩壊深度約11mであった。この崩壊のすべり面形成層は, Kpfaよりも古い年代の軽石層であるACP4であった。ACP4およびその上位のACP3は粘土質で脆い性質を示し, Kpfaも脆くなっていたものの粘土質ではなく, 橙色で粒子が残存していた。また, すべった地層は, 崩壊源斜面下部で土地造成に伴う斜面の切り取りにより切断されていた。

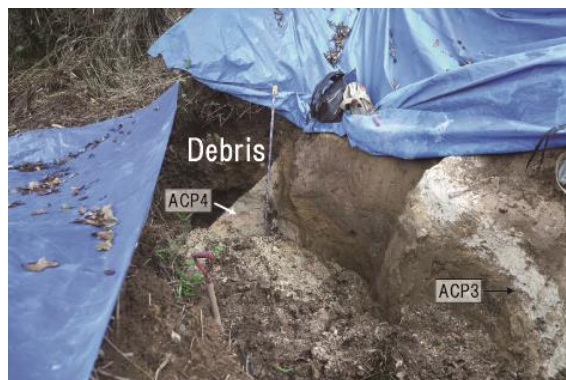


Fig. 30 ACP4 and ACP3 exposed in the lower part of the head scarp of HNT-4.

HNT-5は, 水平距離114m, 高さ34m, 見かけの摩擦角17°, 崩壊深度約13mであった。ピット掘削からはACP4を確認することはできなかったが, 発生箇所およびその地形条件からHNT-4と同様にACP3よりも深い深度にあるACP4にすべり面が形成された可能性が高い。また, この崩壊もHNT-4と同様にすべった地層が崩壊源斜面下部で土地造成に伴う斜面の切り取りにより切断されていたと考えられる。

(5) 烏帽子岳西[EBS-W]エリア

烏帽子岳西[EBS-W]エリアでは, 烏帽子岳の西側の標高975mの小烏帽子岳と称される山体斜面およびその周辺斜面で崩壊が発生した(Fig.31)。このエリアにおいて発生した斜面崩壊のすべり面形成層は, 主にKpfaおよび暗褐色火山灰土層であった。また, 発生した崩壊は隣り合う崩壊と合わさって流動化したタイプや1つの崩壊がいくつかの沢に沿って流動化したタイプなどが認められ, 1つの崩壊を対象としたレーザー距離計による崩壊の水平距離, 高さ, 見かけの摩擦角の計測はできなかった。

EBS-Wエリアでは最も明瞭にテフラ層序を確認できたEBS-W4の滑落崖露頭において作成した柱状図をEBS-Wエリアの模式柱状図とした。その層序は上位から暗褐色火山灰土層(層厚45cm), スコリア層(層厚<5cm), 黒ボク層(層厚20cm), 暗褐色火山灰土層(層厚10cm), 赤ボク層(層厚約10m), 暗

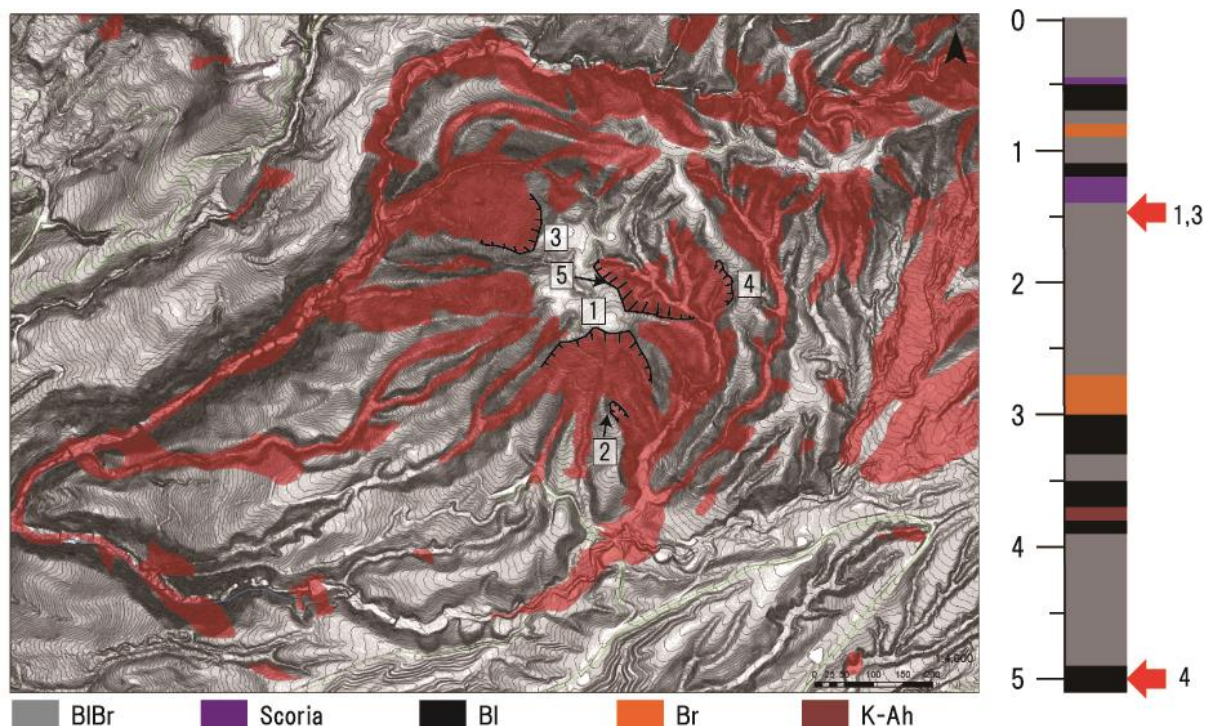


Fig. 31 Landslide distribution and a generalized columnar section in EBS-W area. Legend of the columnar section is for the whole investigation areas and includes tephra not appearing in this area. Red arrows indicate sliding surface.

褐色火山灰土層（層厚20cm）、黒ボク層（層厚10cm）、スコリア層（層厚20cm）、暗褐色火山灰土層（層厚約130cm）、赤ボク層（層厚30cm）、黒ボク層（層厚約30cm）、暗褐色火山灰土層（層厚20cm）、層厚約10cmのK-Ahを挟んだ黒ボク層（層厚30cm）、暗褐色火山灰層（層厚100cm）、黒ボク層（層厚20cm以上）であった。（Fig.31；柱状図）。

[EBS-W1]

EBS-W1は沢沿いに崩壊土砂が枝分かれして流動した崩壊であった。暗褐色火山灰土層にすべり面を形成した崩壊で崩壊深度約2.2m、すべり面傾斜約28°であった（Fig.32）。また、すべり面が形成された暗褐色火山灰土層の下位にあたる崩壊斜面上には岩屑と溶岩が露出していた。

[EBS-W2]

EBS-W1の崩壊斜面内部にはかつての谷を軽石が埋積している箇所が抜け落ちるようにすべった箇所が見られ、この崩壊をEBS-W2とした（Fig.32）。軽石層の最上部は橙色をしており、一部砂質火山灰と混合していた。軽石層全体としては白色から黄白色を呈す粘土質軽石層であり、軽石粒子はレンズ状に引き延ばされていた。観察を行った箇所は軽石が埋積した谷の左側方部であり、層厚は30cmほどであったが、谷の中央部付近における層厚は厚く、1m以上であった。このエリアに分布する軽石で、層厚が1mを超えるものはKpfaしかないためこの崩壊地の軽石

はKpfaであると判断できる。



Fig. 32 Landslides EBS-W1 and 2 (Black arrow and white arrow indicate lava and Kpfa, respectively)

[EBS-W3]

EBS-W3はEBS-W1と同様に暗褐色火山灰土層にすべり面を形成した崩壊で崩壊深度約3.5m、すべり面傾斜約28°であった。EBS-W1よりも崩壊深度は1mほど深い、およそ同じ層準で崩壊が発生した。また、この崩壊の崩壊斜面上にもEBS-W1と同様の岩屑を確認した。さらに、この崩壊は山王谷川の最上流部で発生した崩壊の1つで、付近で発生した他の崩壊とともに流動化し、山王谷川を2 km以上にわたって移動した崩壊の一部となった。

[EBS-W4]

EBS-W4は1つの連続した滑落崖をもつ崩壊の内、比較的深度の深い凹型地形の箇所が黒ボク層をすべり面として抜け落ちるようにして崩壊が発生したものであった (Fig.33) .



Fig. 33 An exposed sliding surface and the head scarp of EBS-W4.

すべり面傾斜は約28°, 崩壊深度は約5mであった。崩壊斜面に広く露出した黒ボクのすべり面は斜面下部の谷底付近まで連続しており、この黒ボク層は河川の浸食により事前に切断されていた。EBS-W4付近では、小烏帽子岳の山体斜面に比べ緩やかな斜面にテフラが堆積しており、溶岩や岩屑は確認できなかった。このことから、EBS-W1, 3で確認した岩屑や

溶岩は小烏帽子岳山体斜面に特有のものである可能性が高い。



Fig. 34 A sliding surface formed in white Kpfa (EBS-W5). The sliding surface dips 14° to the left.

[EBS-W5]

EBS-W5の滑落崖は約20mあり、地表面から約14mのテフラ層の底部に層厚5m以上の軽石層が存在した。EBS-W2と同様に層厚からKpfaであると判断した。Kpfaは層全体が白色粘土化し、その層内に傾斜約14°のすべり面が形成されていた。斜面下部に露出したKpfaは河川の浸食により層が切断された状態で露出しており、その浸食はEBS-W4よりも深い深度の浸食であった (Fig.34) . このことから、EBS-W4の斜面内部にもKpfaは存在するが、河川の浸食がEBS-W5

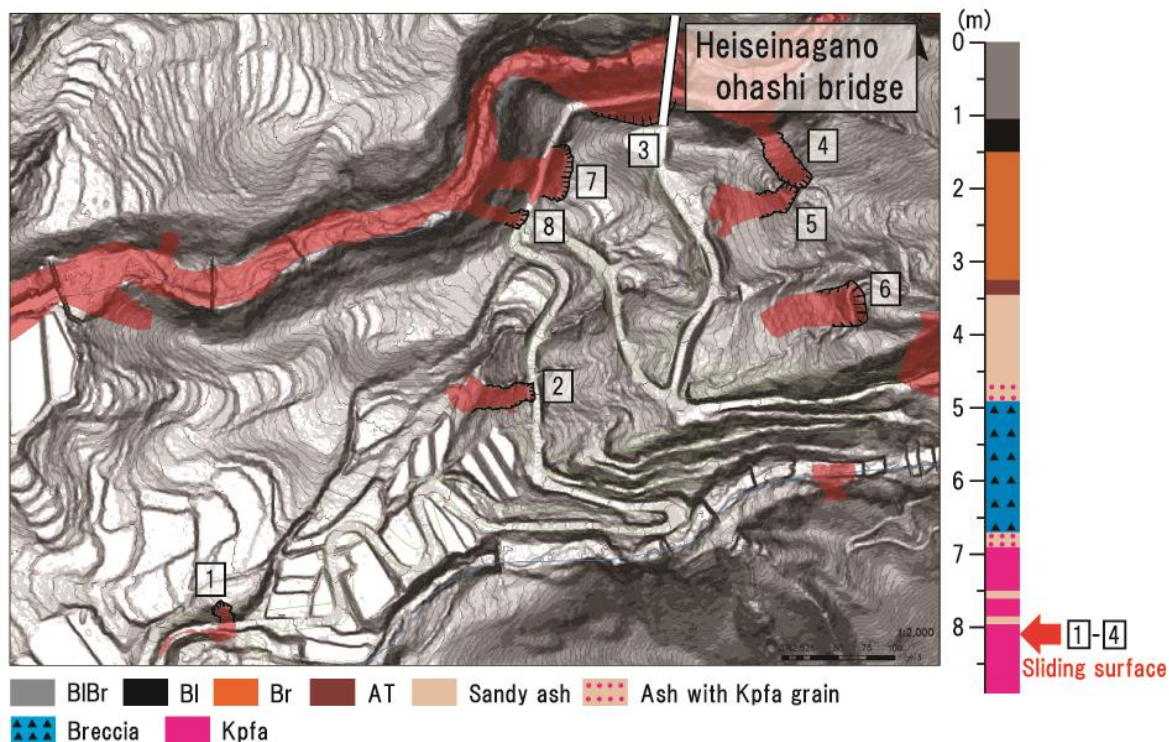


Fig. 35 Landslide distribution and a generalized columnar section in NGN area. Legend of the columnar section is for the whole investigation areas and includes tephra not appearing in this area. Red arrows indicate sliding surface, the landslide by erosion.

よりも浅い深度で起きていているためKpfaが露出するための深度に到達していないことが考えられる。



Fig. 36 Stratigraphic succession observed at landslide NGN-3. The white layer in the bottom is Kpfa, which is overlain by breccia layer consisting of obsidian and pumice grains. the landslide by erosion.

(6) 長野[NGN]エリア

長野[NGN]エリアでは、平成長野大橋周辺で斜面崩壊が発生した (Fig.35)。このエリアにおいて発生した斜面崩壊のすべり面形成層は、すべて白色粘土化したKpfaであり、自然含水率は113-192 %と高含水であった。このエリアのおおよそのテフラ層序は上位から暗褐色火山灰土層(層厚105cm)、黒ボク層(層厚45cm)、赤ボク層(層厚175cm)、AT(層厚20cm)、砂質火山灰(層厚55cm)、ラミナを伴う火山砂(層

厚65cm)、Kpfa混じりの砂質火山灰層(層厚35cm)、角礫層(層厚180cm)、3層の砂質火山灰層を含むKpfa(層厚250cm以上)であった (Fig.35柱状図、36)。角礫層は黒曜石およびKpfaから構成され、基質部が非常に少なく、山王谷川に面した崩壊地の露頭ほど粒径が大きく層厚が厚いことが特徴であった。また、このエリアで発生したすべての斜面崩壊は斜面下部ですべり面形成層が切断されており、その要因はNGN-1, 3, 6, 7が道路敷設に伴う斜面の切土、NGN-4, 8が谷の浸食、NGN-2, 5が土地造成に伴う切り取りであった。

(7) 池ノ窪[IKN]エリア

池ノ窪[IKN]エリアには、池ノ窪園地周辺斜面および地獄温泉背後で崩壊が発生した (Fig.37, 38)。このエリアの斜面崩壊のすべり面形成層は、すべて高含水の黒ボク層(自然含水率は109-197%)であった。ほとんどの崩壊は、崩壊深度が5m前後であり、3m前後の崩壊もあった。数には少ないが、これらにはすべり面傾斜が緩いほど、崩壊深度が厚い傾向があった。また、おおよそのテフラ層序は暗褐色火山灰土(層厚75cm)、スコリア層(層厚<5cm)、黒ボク層(層厚35cm)、赤ボク層(層厚10cm)、暗褐色火山灰土(層厚25cm)、スコリア混じりの赤ボク層(層厚30cm)、暗褐色火山灰土層(層厚10cm)、赤ボク層(層厚50cm)、暗褐色火山灰土層(層厚65cm)、白

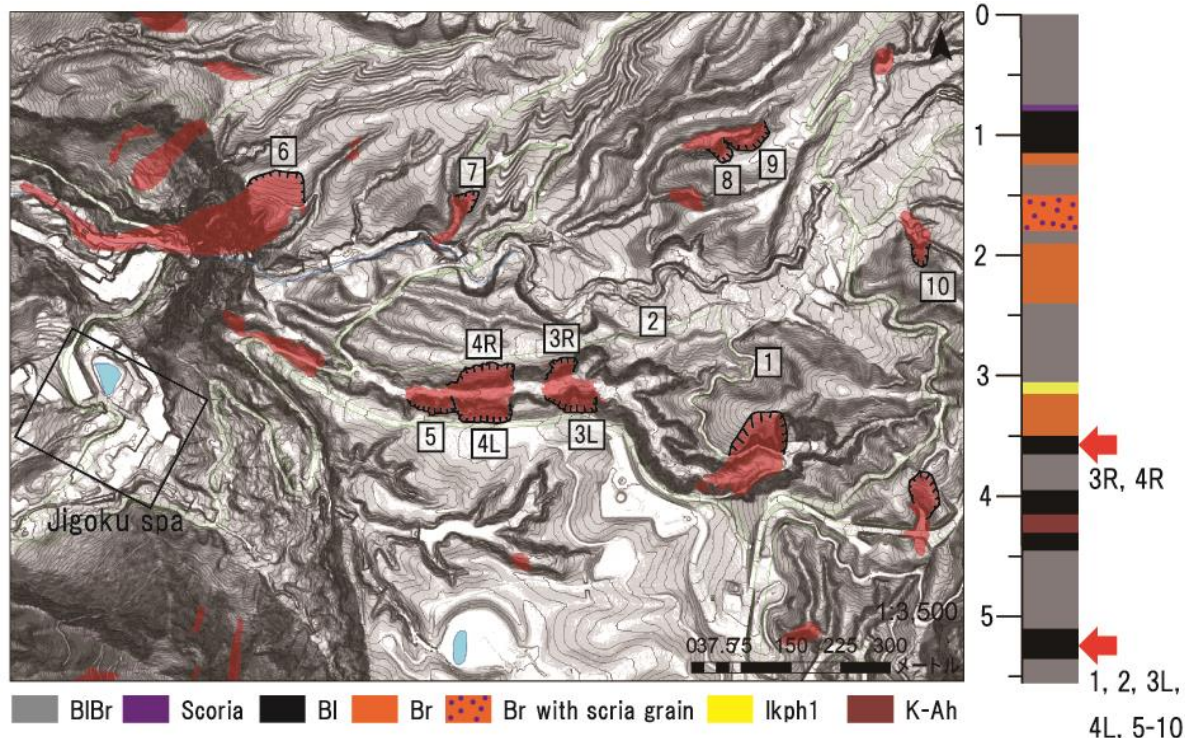


Fig. 37 Landslide distribution and a generalized columnar section in IKN area. Legend of the columnar section is for the whole investigation areas and includes tephra not appearing in this area. Red arrows indicate sliding surface. the landslide by erosion.

色岩片混じり粘土層（層厚10cm），赤ボク層（層厚35cm），黒ボク層（層厚15cm），暗褐色火山灰土層（層厚30cm），K-Ahを挟在した黒ボク層（層厚50cm），暗褐色火山灰土層（層厚65cm），黒ボク層（層厚25cm），暗褐色火山灰土層（層厚20cm以上）であった（Fig.37 柱状図）。このうち，白色岩片混じり粘土層は宮縁・渡辺（2000）に記載された池ノ窪第1水蒸気爆発堆積物（Ikph1:4.5ka）と産状や分布が一致した（Fig.39）。



Fig. 39 Stratigraphic succession observed at the right frank of landslide IKN-2.

しかし，それらより古い年代の池ノ窪第2水蒸気爆発堆積物（Ikph2：10ka）に相当する層は，崩壊地の露頭には露出していなかった．すべり面が形成された黒ボク層はK-Ahよりも下位にあり，Ikph2よりも新

しいと考えられることから7.3kaから10kaに堆積したテフラ層であると考えられる．さらに，このエリアで調査した斜面崩壊のほとんどは斜面下部ですべり面形成層が切断されており，その要因はIKN-3から6, 8, 9が谷の浸食，IKN-2は道路敷設に伴う斜面の切土および過去の崩壊，IKN-6が地獄谷の水蒸気爆発に伴う過去の崩壊（宮縁・渡辺，2000），IKN-7が土地造成に伴う切り取りであった．

(8) 南郷谷[NGD]エリア

南郷谷[NGD]エリアには，パノラマライン沿いの斜面およびその周辺の斜面で崩壊が発生した（Fig.40, 41）．このエリアで調査した斜面崩壊のすべり面は，すべて白色粘土化したKpfaに形成された（Fig.42）．このエリアのおおよそのテフラ層序は上位から暗褐色火山灰土層もしくは黒ボク層（層厚125cm），赤ボク層（層厚295cm），AT（層厚20cm），砂質火山灰層（層厚120cm），Kpfa（層厚200cm以上）であった（Fig.41柱状図）．NGD-4はKpfaの下部に溶岩が多数混在しており，Kpfaの層厚も約1mと比較的薄かった．斜面下部の切断はすべての崩壊地で確認され，その要因はNGD-1，2が道路敷設に伴う斜面の切土，NGD-3，4が土地造成に伴う斜面の切土であった．

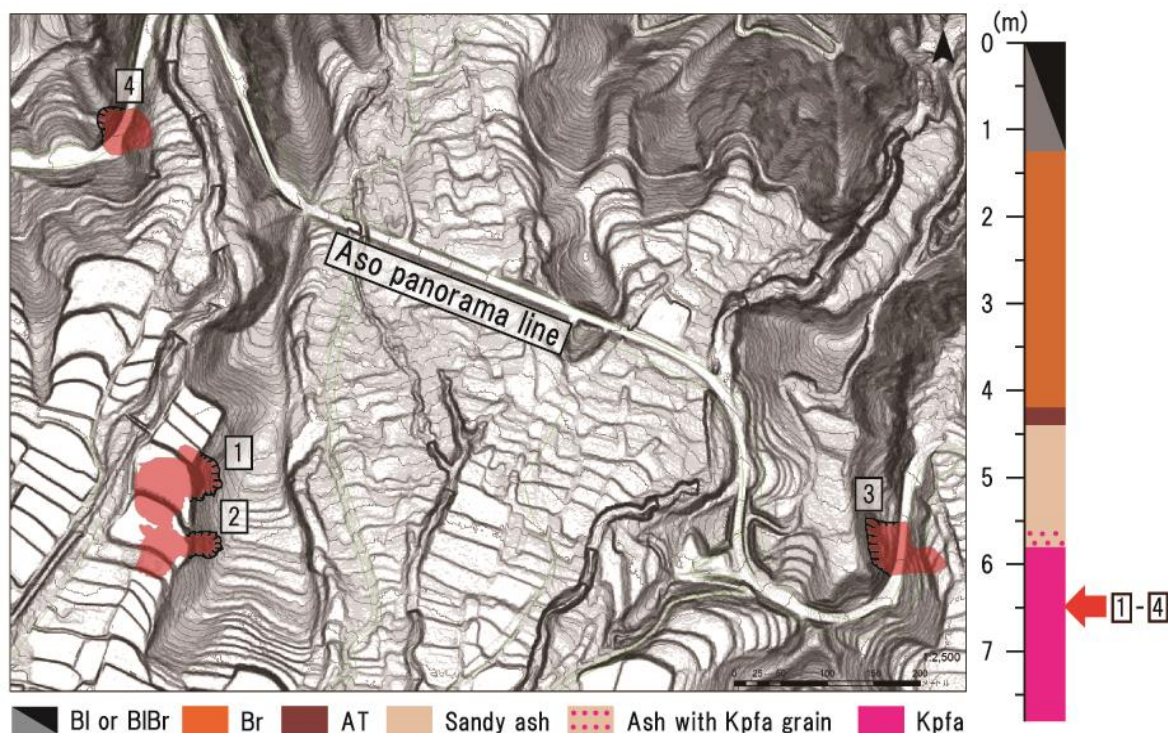


Fig. 40 Landslide distribution and a generalized columnar section in NGD area. Legend of the columnar section is for the whole investigation areas and includes tephra not appearing in this area. A red arrow indicate sliding surface.



Fig. 41 Oblique view of landslide NGD-3. A sliding surface of Kpfa was widely exposed.



Fig. 42 Sliding surface material of white colored Kpfa (NGD-3).

4.3 主なテフラ斜面崩壊の各種データ

テフラ斜面の崩壊は、主に降下軽石堆積物である「草千里ヶ浜軽石（Kpfa）」、「黒ボク（Bl）」および暗褐色火山灰土（BlBr）」、または「溶岩塊混じりの赤ボク（Br with lava block）」にそれぞれすべり面を有していた。

(1) 代表的な崩壊地の各テフラ層における鉱物組成

最もすべり面形成層となった数の多かったKpfa、黒ボク・暗褐色火山灰土、そして、溶岩塊混じりの赤ボクのすべり面形成層のX線分析を行い、鉱物組成を検討した（Fig.43）。Kpfaはオレンジ色の層とすべり面の形成された白色粘土化した層の2層を検討した。その結果、橙色のKpfaには粘土鉱物であるハロイサイトが存在せず、白色粘土化したKpfaにはハロイサイトが多く含まれていることが分かった。また、黒ボク・暗褐色火山灰土および溶岩塊混じりの赤ボクのすべり面形成層にも同様にハロイサイトが多く含まれていた。

すべり面形成層以外の各テフラ層についてもX線

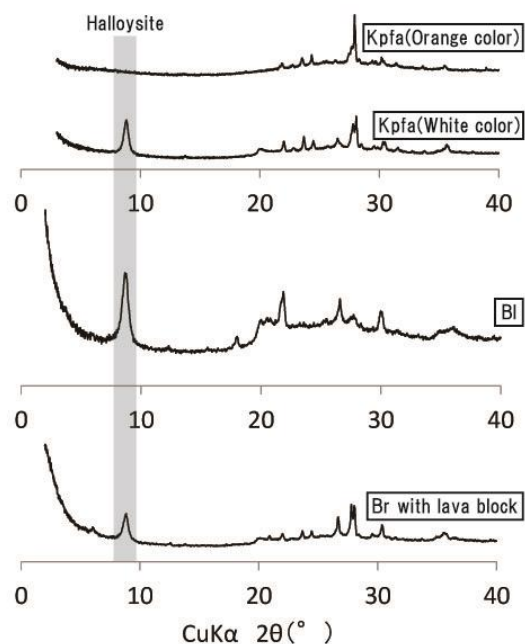


Fig. 43 X-ray profiles of each sliding surface material. Sliding surface materials were Kpfa, Bl or BlBr, and Br with lava block. Orange colored Kpfa is shown as a reference.

分析を行い、黒ボクにすべり面が形成された崩壊およびKpfaにすべり面が形成された崩壊を例に鉱物組成の比較検討を行った。その結果、ハロイサイトは地表付近のテフラ層には存在せず、深度方向に増減および消失・出現を繰り返すことがわかった。したがってテフラ層のハロイサイトは地表付近では形成されず、新たなテフラの堆積により埋没した後に形成されていることが示唆される。また、ハロイサイト化したテフラ層はすべり面形成層以外にも存在するが、熱水変質を受けた箇所以外のX線分析を行った全てのすべり面形成層はハロイサイト化していたことから「テフラ層のハロイサイト化」は熱水変質した場合を除いて、崩壊発生条件の1つだったと考えられる。ハロイサイト化したテフラ層のうちどの層にすべり面が形成されるのかは、地震動の伝わり方や地層の傾斜や厚さなどにも影響されることが考えられる。

(2) 斜面の下部切断

千木良ほか（2012a）はマントルベッディングしたテフラからなる斜面の下部切断された構造が地震時に崩壊が発生する要因の1つであると指摘している。熊本地震により発生した主なテフラ斜面崩壊においても斜面に下部切断が存在したのかを検討した

（Fig.44）。すべり面形成層別にみると崩壊の約7割以上では、道路敷設に伴う切土や沢や谷の浸食、土地造成による切り取りなどによる斜面下部の切断が

あったことがわかった。このことから、斜面の下部で切られた層準にすべり面が形成されやすいと考えられる。「斜面の下部切断」もテフラ層のハロイサイト化と同様に崩壊発生条件の1つだったと考えられる。また、下部切断がなかったもしくは不明瞭だった斜面で発生した全ての崩壊は崩壊深度4m以浅、すべり面傾斜28°以上であったことがわかった。このことから、崩壊深度が浅く、すべり面傾斜の大きかった崩壊は下部切断が存在しなくても発生したと推定される。

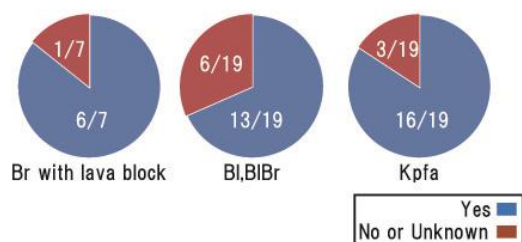


Fig. 44 Diagram showing whether the slid layers were undercut or not before the landslide. Each circle represents each sliding surface material.

(3) すべり面傾斜と崩壊深度

現地調査で測定したすべり面傾斜と崩壊深度について検討した (Fig.45)。

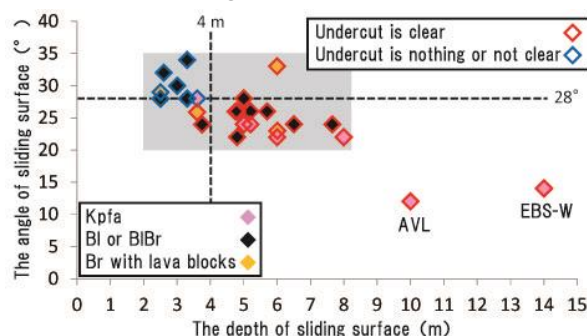


Fig. 45 The relationship between the sliding surface angles and the depths of sliding surface.

計測した全崩壊は、崩壊深度2m以深、すべり面傾斜20 - 35°に集中して発生したことが分かった。それぞれのすべり面形成層で特徴的な違いはほとんど見られず、Kpfaのみ深度10m以上、すべり面傾斜15°以下の条件でも崩壊が発生したことが分かった。さらに、すべり面傾斜および崩壊深度と斜面下部の切断との関係を検討した。その結果、いくつか例外はあるものの崩壊深度4m以深、すべり面傾斜28°以下の条件で発生した崩壊には斜面下部の切断があったことが分かった。

5. まとめ

阿蘇地域で発生した斜面崩壊は「岩盤からなる急

崖の崩壊」と比較的緩傾斜な「テフラ斜面の崩壊」に大別できた。

岩盤からなる急崖の崩壊は、主に「カルデラウォール」と「谷壁斜面」とで発生していた。カルデラウォールの崩壊は様々な規模で発生し、阿蘇大橋西側斜面で発生したものが最大規模であった。この崩壊では、崩壊前に崩壊の輪郭に沿った小崖が存在した。つまり、発生前に重力によって変形していた斜面が崩壊した。谷壁斜面では、節理沿いに緩んだ岩盤が地表面を覆っていた崖錐と共に崩落した。

主なテフラ斜面の崩壊のすべり面は、降下軽石堆積物である「草千里ヶ浜軽石 (Kpfa)」, 「黒ボク (Bl) および暗褐色火山灰土 (BlBr)」, または「溶岩塊混じりの赤ボク (Br with lava block)」にそれぞれすべり面を形成していた。テフラ斜面の崩壊発生地は、テフラ層序のほぼ一致するエリアに区分される。それぞれのエリアでは、すべり面はほぼ同じ層準に形成されていた。すべり面を構成する物質はハロイサイトが認められ、Kpfaでは白色粘土化した層で認められた。また、表層付近のテフラ層はハロイサイト化しておらず、これはテフラ層が埋没した後に起こると考えられる。また、発生した崩壊は深度約2m以深、すべり面傾斜20 - 35°の範囲に集中して発生した。すべり面がKpfaに形成された崩壊は深度10m以深、すべり面傾斜15°以下の条件でも崩壊が発生した。すべり面は斜面下部が切断された層準に多く形成され、特に崩壊深度約4m以深、すべり面傾斜28°以下の場合には、いくつかの例外を除いて下部切断が認められた。

今後は、各崩壊エリアの模式的な崩壊地を定め、テフラ層の深度方向の風化過程について鉱物組成および透水性、含水比、せん断強度、土壌硬度などの観点からすべり面形成過程を検討する予定である。

謝 辞

本研究にあたっては、国土地理院には現場調査に使用した詳細な地形図作成のための1mメッシュDEMデータ (2012年) を提供していただいた。九州地方整備局には阿蘇大橋西側斜面の崩壊後 (2016年) の1mメッシュのDEMデータを提供していただいた。RIMSの使用については、同志社大学大学院理工学研究科の堤浩之教授、京都大学地球熱学研究施設の山田圭太郎様到大変お世話になった。

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」事業費および科学研究費補助金 (26282102), 京都大学防災研究所突発災害研究補助金を使用した。

参考文献

- 石川芳治・久保田哲也ほか（2016）：平成26年熊本地震による土砂災害，砂防学会誌，69巻，pp.55-66.
- 小野晃司・渡辺一徳（1983）：阿蘇カルデラ，月間地球，5巻，pp.73-82.
- 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，地質調査所発行.
- 気象庁（2016）：災害時自然現象報告書 2016年第1号，対象地域 九州地方.
- 千木良雅弘・中筋章人・藤原伸也・坂上雅之（2012a）：2011年東北地方太平洋沖地震による降下火砕物の崩壊性地すべり，応用地質，第52巻，6号，pp. 222-230.
- 千木良雅弘・ツォウチンイン・松四雄騎・平石成美・松澤真（2012b）：台風12号による深層崩壊発生場－発生前後の詳細DEMを用いた地形解析結果－，京都大学防災研究所 特定研究集会「深層崩壊の実態，予測，対応」，pp.24-29.
- 増田直朗・渡辺一徳・宮縁育夫（2004）：阿蘇中央火口丘群西側斜面において新たに発見された流紋岩〜デイサイト質溶岩流，火山，49巻，3号，pp.119-128.
- 町田洋・新井房夫（2003）：火山灰アトラス-日本列島とその周辺-，東京大学出版，p56，61.
- 宮縁育夫・渡辺一徳（2000）：阿蘇火山地獄温泉付近における水蒸気爆発とその堆積物，火山，45巻，1号，pp.25-32.
- 宮縁育夫・星住英夫・高田英樹，渡辺一徳，徐勝（2003）：阿蘇火山における過去約9万年間の降下軽石堆積物，火山，48巻，2号，pp.195-214.
- 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，49巻，5号，267-282.
- 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，27巻，pp.337-338.
- 渡辺一徳・高田英樹（1990）：阿蘇カルデラ周辺における火山灰層と黒ボク土の斜交，火山，39巻，21-27.
- Yasuo Miyabuchi. (2009): A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan, Sedimentary Geology Vol. 220, pp. 169-189.

（論文受理日：2017年6月13日）