

阿蘇カルデラ東壁斜面における 完新世マスマーブメントの特徴と頻度

宮 縁 育 夫* 星 住 英 夫**

Characteristics and Frequency of Holocene Mass Movements on the Eastern Wall of Aso Caldera, Southwestern Japan

Yasuo MIYABUCHI* and Hideo HOSHIZUMI**

[Received 18 September, 2016; Accepted 12 June, 2017]

Abstract

Several volcanoclastic deposits discovered at the foot of the eastern wall of Aso caldera, central Kyushu, southwestern Japan, are divided into two types: lahar deposits (Lh1-Lh5 in descending order), which contain abundant subangular to subrounded lithic clasts (< 3.5 m in diameter) set in a sandy to silty matrix, and debris avalanche deposits (DA1 and DA2), which include numerous plastically deformed fragments of tephra (ash and scoria) and soil layers in a homogenous silty to clay matrix. DA2, which underlies a paleosol dated at 5.4 ka (calibrated ^{14}C age), is the largest volcanoclastic deposit observed in the section (more than 2.5 m thick and about 70 m wide). Because the debris avalanche deposits display no evidence that they were transported by water, they are likely to have originated from landslides triggered by intense earthquakes. Tephra chronology and ^{14}C -dating on paleosols along the succession suggest that lahars occurred once over 900 years (6.3–5.4 ka), three times over 1400 years (5.4–4 ka), once over 400 years (4–3.6 ka) and twice (including the 2012 lahar) in the last 3600 years. This evidence indicates that the lahars occurred at an interval of 400–1800 years. In contrast, two debris avalanche deposits exist in the same succession spanning the last 6300 years. Including landslides and associated debris avalanches triggered by the 2016 Kumamoto earthquake (M_j 7.3), landslides generating debris avalanches in the Aso caldera occurred at least three times in the last 6300 years. This may suggest the frequency of large earthquakes triggering debris avalanches in the central Kyushu region, which has many active faults.

Key words : Aso Volcano, caldera wall, debris avalanches, lahars, frequency of occurrence

キーワード : 阿蘇火山, カルデラ壁, 岩屑なだれ, ラハール, 発生履歴

I. はじめに

2012年7月の九州北部豪雨（福岡管区気象台, 2012）によって阿蘇カルデラ内では死者23名,

行方不明者2名（熊本県によるデータ）を出す甚大な土砂災害が発生した（宮縁, 2012）。このような豪雨による災害は1953年6月（川口・難波, 1954）や1990年7月（平野・橋本, 1991; 石

* 熊本大学教育学部

** 産業技術総合研究所地質調査総合センター活断層・火山研究部門

* Faculty of Education, Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Japan

** Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba, 305-8567, Japan

川ほか, 1992), 2001 年 6 月 (宮縁ほか, 2004a; Miyabuchi and Daimaru, 2004) にも起こっている。また, 最近では 2016 年 4 月 16 日未明の熊本地震 (M_j 7.3) によっても阿蘇カルデラ内で多数の斜面崩壊が発生した (宮縁, 2016)。こうした地震による災害については, 1894 年, 1911 年, 1975 年に山崩れ (本論で述べる斜面崩壊) の報告がある (福岡管区気象台, 1975) が, 人家への被害に言及していないことからごく小規模なものであったとみられる。

このような豪雨や地震に起因するマスマーブメントによる災害はさらに古い時代にも繰り返していると考えられるが, その発生履歴は歴史時代を含めてほとんどわかっていない。阿蘇カルデラ壁斜面においては最終氷期の周氷河作用による岩屑生産と移動が活発であったことが明らかになっている (小口, 1986) が, 完新世の時代のマスマーブメントの特徴や頻度については, 鳥井ほか (2015) 以外にはほとんど報告がない。

2012 年 7 月豪雨による土砂災害発生地点の 1 か所で砂防堰堤の建設が行われた際に過去のラハール堆積物や岩屑なだれ堆積物が発見された。こうした堆積物の発見は過去のマスマーブメント発生履歴を明らかにする上で重要な意味をもっている。筆者らは, その阿蘇カルデラ東壁直下の砂防堰堤掘削断面に露出した堆積物について現地調査を行い, それぞれの堆積物の特徴や年代を明らかにした。本論ではその結果について報告するとともに, 阿蘇カルデラ壁斜面における完新世マスマーブメントの形態や発生履歴について議論する。

II. 調査地域の地形地質と完新世 テフラ層序の概要

阿蘇カルデラ (南北 25 km, 東西 18 km) は約 27 ~ 9 万年前にかけて起こった 4 回の巨大火砕流噴火によって形成された。それぞれの噴出物は, 下位より Aso-1 (27 万年前)・Aso-2 (14 万年前)・Aso-3 (12 万年前)・Aso-4 (9 万年前) 火砕流堆積物と呼ばれている (小野ほか, 1977; 松本ほか, 1991)。カルデラ内には約 9 万年前の Aso-4 噴火直後に活動を開始した中央火口丘群

があり, 現在も活動を続けている (小野・渡辺, 1985; Miyabuchi, 2009)。

阿蘇カルデラ周辺域における完新世テフラ層序は, 中岳火山の北北東麓のテフラ断面 (図 1 の A9418 地点) をもとに, 19 の活動期 (若い方から N1 ~ N19 期) に区分される (渡辺, 1991; 宮縁・渡辺, 1997)。おもなテフラとして, 1.5 ka (^{14}C 校正暦年代, 以下同様) の中岳 N2 スコリア (N2S), 3.6 ka の往生岳スコリア (OjS), 4 ka の杵島岳スコリア (KsS), 4.1 ka の阿蘇中央火口丘第 1 軽石 (ACP1) と, 7.3 ka の鬼界アカホヤテフラ (K-Ah: 町田・新井, 1978, 2003; 奥野, 2002) が認められている (図 2; 宮縁・渡辺, 1997; Miyabuchi, 2009)。

阿蘇カルデラ底は, 中央火口丘群によって南北に分けられ, 北半分は阿蘇谷, 南半分は南郷谷と呼ばれている (図 1)。阿蘇谷のカルデラ壁は, 250 ~ 500 m 程度の高低差があり, 先阿蘇火山岩類の溶岩・火砕岩とそれを覆う阿蘇火砕流堆積物からなる急崖 (小野・渡辺, 1985) と, その下位に崖錐などからなる緩斜面が存在する (小口, 1986)。

今回調査を行ったのは, 2012 年 7 月の九州北部豪雨でもっとも被害が大きかった阿蘇市一の宮町坂梨の土砂災害発生現場である (図 1)。阿蘇谷の東端にあたる国道 57 号線滝室坂の南側のカルデラ壁で斜面崩壊が発生し, その崩壊土砂がラハールとなって流下して人家や農地を襲い, 6 名の尊い人命が奪われた。この付近の阿蘇カルデラ壁の標高 680 ~ 720 m 付近には阿蘇火砕流堆積物からなる急崖が形成されている (図 3)。阿蘇火砕流堆積物は, 下部が Aso-1 火砕流堆積物, 上部が Aso-2 火砕流堆積物からなり, 両者の大部分は溶結しており, 両火砕流堆積物間には降下テフラ, ラハール堆積物や土壌層が挟んでいる。阿蘇火砕流堆積物の急崖直下には高さ 50 m 程度の崖錐斜面が認められる。

2012 年 7 月 12 日未明の崩壊は, 阿蘇火砕流堆積物を覆う阿蘇中央火口丘群起源の降下テフラや土壌層が堆積する傾斜 33° 程度のスギ人工林斜面において発生した。このテフラ斜面におけ

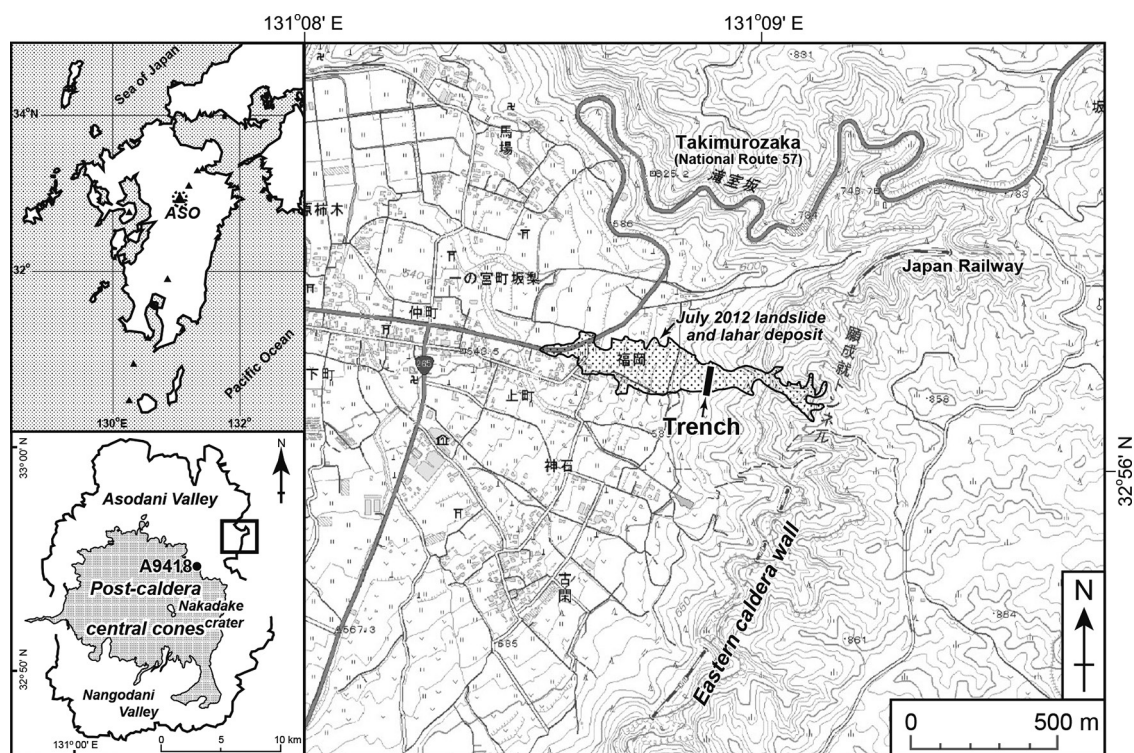


図 1 阿蘇カルデラ東側壁直下（阿蘇市一の宮町坂梨）の堰堤掘削断面の位置. 国土地理院発行 1:25,000 地形図「坂梨」の一部を使用. 緯度経度は WGS84 で表示. 2012 年 7 月の斜面崩壊・ラハール堆積物の分布は熊本県 (2012) による.

Fig. 1 Location of a trench section located at the foot of the eastern wall of Aso caldera (Sakanashi, Aso City). Part of “Sakanashi” 1:25,000 topographic map published by the Geospatial Information Authority of Japan is used. Longitude and latitude are shown as WGS84. Distribution of July 2012 landslide and lahar deposit is from Kumamoto Prefectural Government (2012).

る崩壊長は約 130 m（水平距離約 110 m），幅は最大 40 m に達するが，崩壊深は 1 ～ 1.5 m 程度の浅層崩壊であった。崩壊した土砂と多量の水が Aso-1 火砕流の溶結凝灰岩（以下，Aso-1 溶結凝灰岩）からなる滝を落下し，直下の崖錐斜面を高さ 40 m，幅 20 ～ 30 m 程度にわたって大きく侵食した。そうした土砂は標高 555 ～ 630 m 付近に多量に堆積するとともに，直径 5 m を越える溶結凝灰岩の巨礫が運搬されて，標高 555 ～ 570 m 付近にあった民家を破壊するなどの被害を及ぼした（宮縁，2012）。

2012 年 7 月ラハールが堆積する標高 610 m 付近の斜面において，2014 年初め頃より熊本県阿

蘇地域振興局土木部によって砂防堰堤の建設が行われた（図 3）。筆者らはその堰堤施工のための掘削断面（南北方向に幅約 100 m）を観察し，露出する堆積物の記載を行った。

III. 堆積物の記載

阿蘇カルデラ東側壁直下の砂防堰堤掘削断面に露出した堆積物（図 4A, B）は，緻密な岩塊に富む基質支持の堆積物とパッチ状の未固結なテフラや土壌片を大量に含む堆積物の 2 つに区別される。前者はラハール堆積物，後者は岩屑なだれ堆積物と考えられるが，詳しい成因については後で議論する。掘削断面の表層には，2012 年 7 月の

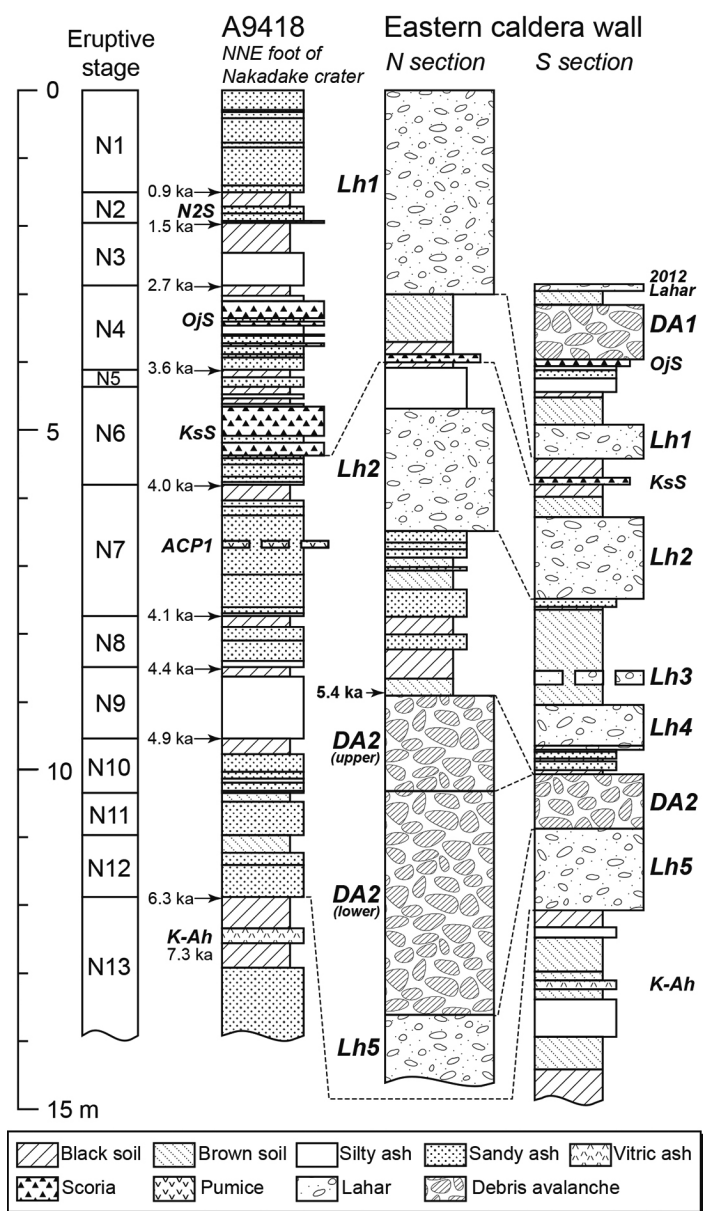


図 2 阿蘇カルデラ東側壁直下の掘削断面と完新世テフラ模式露頭 (A9418 地点) における堆積物層序。調査地点の位置は図 1 を参照。A9418 地点のテフラ層序と年代値 (^{14}C 較正暦年代) は宮縁・渡辺 (1997), Miyabuchi (2009) および Miyabuchi and Sugiyama (2012) による。Lh: ラハール堆積物, DA: 岩屑なだれ堆積物, ACP1: 阿蘇中央火口丘第 1 軽石, K-Ah: 鬼界アカホヤ火山灰, KsS: 杵島岳スコリア, N2S: 中岳 N2 スコリア, OjS: 往生岳スコリア。

Fig. 2 Stratigraphic columns of tephra layers including lahar (Lh) and debris-avalanche (DA) deposits at the foot of the eastern wall of Aso caldera and the NNE foot of Nakadake Volcano (A9418 site; schematic Holocene tephra section). See Fig. 1 for locations of sites. Ages in the figure are shown as calibrated ^{14}C ages. Tephra stratigraphy and ages at the A9418 section are from Miyabuchi and Watanabe (1997), Miyabuchi (2009) and Miyabuchi and Sugiyama (2012). ACP1: Aso central cone pumice 1, K-Ah: Kikai Akahoya ash, KsS: Kishimadake scoria, N2S: Nakadake N2 scoria, OjS: Ojodake scoria



図 3 2012 年 7 月の九州北部豪雨による災害発生地点で砂防堰堤建設のために掘削された断面の全景 (2014 年 2 月 25 日撮影)。写真奥にはおもに Aso-1 火砕流堆積物からなるカルデラ壁が見え、地表付近には 2012 年 7 月ラハールで運搬された巨礫が散在する。

Fig. 3 Measured trench section for constructing sediment retention dam at the foot of the eastern wall (background) of Aso caldera. Boulders transported by the July 2012 lahar can be seen on the ground surface. The photo was taken on February 25, 2014.

ラハール堆積物があり、その下位に 5 層のラハール堆積物 (上位より Lh1 ~ Lh5 とよぶ) と 2 層の岩屑なだれ堆積物 (DA1 および DA2) が認められる (図 2)。それぞれの堆積物の特徴について、上位から下位の順に記載する。

表層に存在する 2012 年 7 月ラハール堆積物は層厚が 1 m 以下で基質支持の堆積物である。表面には最大径 5 m 程度に達する Aso-1 および Aso-2 溶結凝灰岩の巨礫が散在する (図 3, 4B)。基質は泥混じりの淘汰の悪い砂礫であり、植物片を含む。2012 年 7 月 12 日の九州北部豪雨では溶結した阿蘇火砕流堆積物からなる急崖は崩壊していないことから、その直下の崖錐斜面に存在した溶結凝灰岩の巨礫がラハールで洗い出されて運搬されたと考えられている (宮縁, 2012)。

岩屑なだれ堆積物 DA1 は掘削断面の南側のみ認められ (図 4B)、層厚は 0.8 m 以下で、径数 cm 程度のパッチ状の土壌片やテフラ片を多量に含んでいる。3.6 ka の OjS 直上に存在しており、OjS を削り込んでいる部分も認められる (図 5)。

ラハール堆積物 Lh1 は、断面南側では OjS と KsS 間に挟在して層厚 0.5 m 以下である (図 4B) が、断面北側では最上位に存在して層厚は 3.5 m に達する (図 4A)。基質支持の亜円礫に富む堆積物であり、断面北側では最大径 2 m の巨礫が認められる。また、岩塊が少なく、土壌片が多量に含まれる部分も存在する。

KsS の下位 0.7 ~ 0.9 m 付近を占めるラハール堆積物 Lh2 (図 6) は、基質支持で亜円礫 ~ 亜角礫を含む堆積物で、層厚は 1.2 ~ 2.4 m である。基質はシルト質で、岩片の最大粒径 ML (最大の岩片 3 個の長径平均値) は 1.1 m である。掘削断面南側では、下位層を侵食している痕跡が認められる (図 4B)。

ラハール堆積物 Lh3 は、断面南側のみにレンズ状に存在する。層厚は 10 ~ 20 cm で、ML は 10 cm である。Lh3 から暗褐色土壌層 (層厚 30 cm) を挟んだ下位にはラハール堆積物 Lh4 が存在する。Lh4 も岩塊に富む基質支持の堆積物で、層厚は 30 ~ 80 cm、ML は 30 cm である。下部 14 ~ 19 cm は細かく成層した灰色の砂層からなり、黒ボク土層を覆う。

岩屑なだれ堆積物 DA2 は断面南側で K-Ah を含む下位の地層を、北側で 18 ~ 16 ka のテフラ (宮縁ほか, 2004b) を含む地層を大きく侵食したチャンネルを埋めており (図 4A, B, 7)、掘削断面のほぼ全面 (幅約 70 m) にわたって露出している。断面南側での層厚は 0.8 ~ 2.5 m である (図 4B) が、北側では基底が観察できず、2.3 m 以上の層厚を有している (図 4A)。

DA2 のほぼ中央には、ほぼ水平方向に発達するややシャープな面があり、それによって上部と下部に区分することができる (図 8A)。上部 (層厚 1.4 m 程度) は全体的に褐色 ~ 灰褐色を呈する細砂 ~ シルト質の堆積物からなり、そのなかに径 0.5 ~ 数 10 cm のテフラ片や土壌片が多量に含まれている (図 8B)。下部もさまざまな大きさの黒ボク土層やテフラ層の未固結ブロックと細砂 ~ シルト質の基質からなる堆積物である。掘削断面北側では黒ボク土層やテフラ層が著しく変形した構造が認められる (図 7)。断面中央部分での

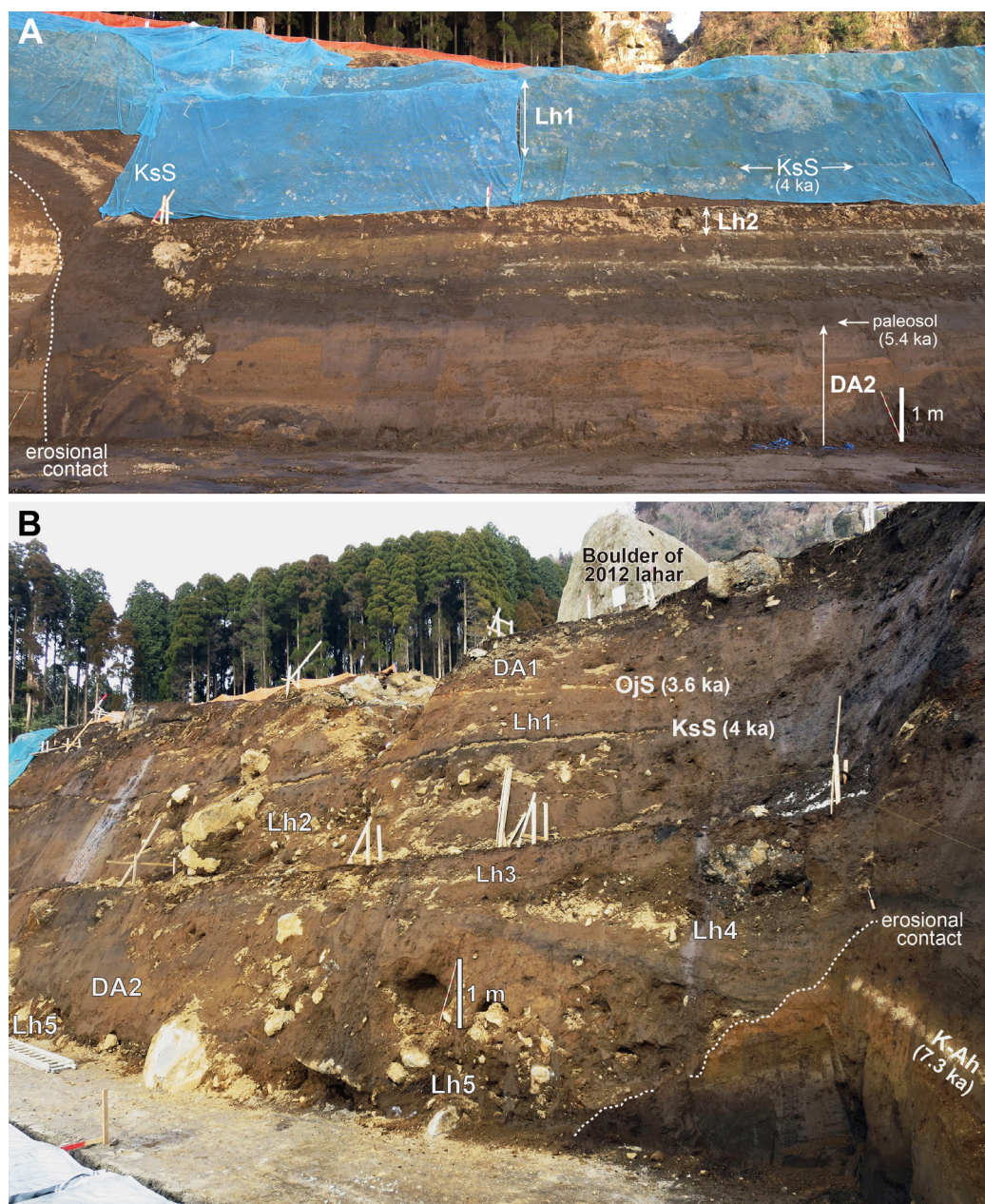


図 4 (A) 掘削断面北側の堆積物 (2014 年 1 月 26 日撮影). Lh1 と Lh2 はラハール堆積物で, DA2 は岩屑なだれ堆積物. KsS は 4 ka に降下した杵島岳スコリア. (B) 掘削断面南側の堆積物 (2014 年 2 月 25 日撮影). 5 層のラハール堆積物 (Lh1 ~ Lh5) と 2 層の岩屑なだれ堆積物 (DA1 と DA2), さらにそれらの間に往生岳スコリア (OjS), 杵島岳スコリア (KsS), 鬼界アカホヤ火山灰 (K-Ah) などの鍵テフラが認められる.

Fig. 4 (A) Northern part of the trench section. Two lahar deposits (Lh1 and Lh2) and one debris avalanche deposit (DA2) can be observed. Kishimadake scoria (KsS) is interbedded between Lh1 and Lh2. The photo was taken on January 26, 2014. (B) Southern part of the trench section. Five lahar deposits (Lh1-Lh5), two debris avalanche deposits (DA1 and DA2) and key tephra beds, including Ojodake scoria (OjS), Kishimadake scoria (KsS), and Kikai Akahoya ash (K-Ah), can be recognized in the section. The photo was taken on February 25, 2014.



図 5 往生岳スコリア (OjS) 直上に存在する岩屑なだれ堆積物 DA1.

Fig. 5 Debris avalanche deposit 1 (DA1) overlying Ojodake scoria (OjS).

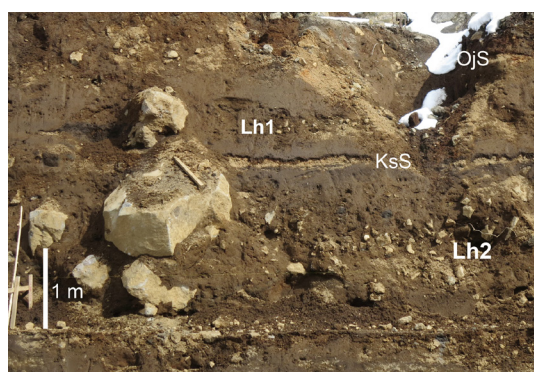


図 6 杵島岳スコリア (KsS) の下位に認められるラハール堆積物 Lh2.

Fig. 6 Occurrence of lahar deposit 2 (Lh2). KsS: Kishimadake scoria, OjS: Ojodake scoria.

DA2 下部でも、18～16 ka に噴出した YmS3 および YmS4 テフラ（宮縁ほか，2004b）がステップ状に分断されている状況などが観察できる（図 8C，D）。DA2 下部にはいくつかの緻密な岩塊が含まれるが，上部にはほとんど存在しない。DA2 上部と下部の境界は明瞭だが，それらの間に侵食間隙は認められないので，一連の崩落イベントなのであろう。

今回観察した掘削断面で最下位に存在するのが

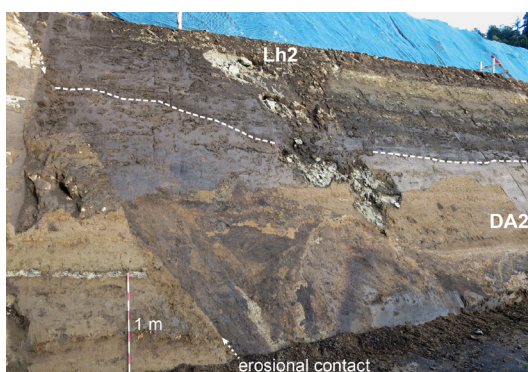


図 7 岩屑なだれ堆積物 DA2 の産状。DA2 下部には著しく変形したテフラ・土壌層が認められる。

Fig. 7 Occurrence of debris avalanche deposit 2 (DA2). The lower part of DA2 is extremely deformed.

ラハール堆積物 Lh5 である。層厚は 1.2 m 以上で，亜円礫～亜角礫の岩塊を多量に含む基質支持の堆積物で，岩屑なだれ堆積物 DA2 に直接覆われている（図 4B）。長径 3.5 m の Aso-1 溶結凝灰岩の巨礫が含まれるほか，径 1 m 程度先の阿蘇火山岩類の輝石安山岩の礫も認められる。

IV. ^{14}C 年代測定

調査断面においては噴出年代が判明しているテフラも存在するが，発見された堆積物の年代をさらに詳細に検討するため，埋没土壌層を採取して加速器質量分析（AMS）法による ^{14}C 年代測定を実施した。

断面北側において岩屑なだれ堆積物 DA2 直上の暗褐色土壌層（層厚 25 cm）の下部から土壌試料を採取した（図 2）。分析は米国 Beta Analytic 社に依頼し，酸処理を行って炭酸塩を除去し，残存した全有機炭素を年代測定に使用した。 ^{14}C 年代の算出には，Libby の半減期 5568 年を使用し， $\delta^{13}\text{C}$ ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) による同位体分別効果の補正が行われている。また，暦年代較正には Beta Analytic 社製のプログラムを用いた。そのプログラムはデータセットとして IntCal13 (Reimer *et al.*, 2013) を使用し，Talma and Vogel (1993) による数学的近似を行っている。

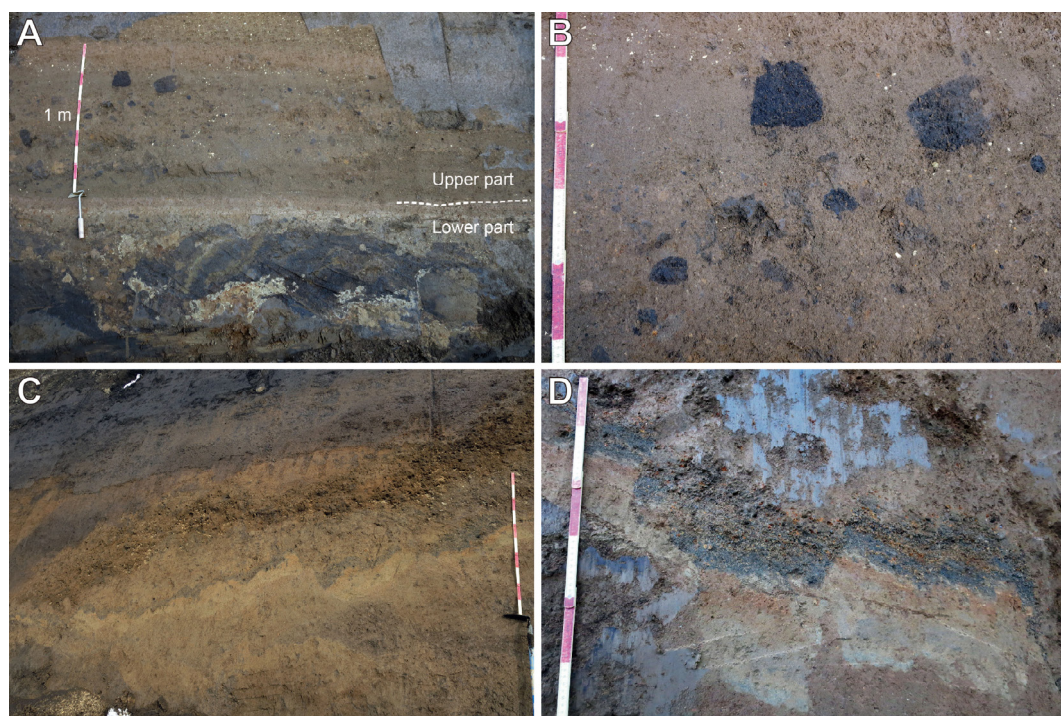


図 8 (A) 岩屑なだれ堆積物 DA2 中にみられる変形構造. (B) DA2 上部に存在するテフラ・土壌片. (C) DA2 下部におけるテフラ層の変形状況. (D) DA2 下部にみられる分断されたテフラ層.

Fig. 8 (A) Deformed structure in debris avalanche deposit 2 (DA2). (B) Tephra and soil fragments contained in the upper part of DA2. Scale segments are 10 cm. (C) Deformed tephra layers in the lower part of DA2. Scale segments are 10 cm. (D) Decoupled tephra beds in the lower part of DA2. Scale segments are 10 cm.

今回採取した埋没暗褐色土層からは、4650 ± 30 years BP (Beta-374643) という ^{14}C 年代が得られた (表 1)。この年代値を暦年代較正すると約 5.3 ~ 5.4 ka となり、上下のテフラ層の年代とも整合的である。

V. 議 論

1) 堆積物断面から推定される阿蘇カルデラ壁斜面におけるマスマーブメントの特徴

上述したように、今回の砂防堰堤掘削断面に露出した堆積物は 2 つのタイプに区分される。一つはラハール起源と考えられる基質支持の堆積物である。先述したとおり、阿蘇カルデラ内においては 2012 年 7 月のほか、1953 年、1990 年、2001 年にも豪雨に伴って、中央火口丘群やカルデラ壁

の急斜面で深さ 1 ~ 2 m 程度の浅層崩壊が多数発生し、その崩壊土砂は多量の雨水とともに直ちにラハールとなって流下し、阿蘇カルデラ内の居住地域にも同様の堆積物をもたらした。今回発見された 5 層の堆積物 (Lh1 ~ Lh5) は歴史時代以前にも豪雨に伴うラハールがカルデラ壁斜面で複数回発生したことを示している。

もう一つは、さまざまな大きさの未固結なテフラや土壌層をブロック状に含む不均質な堆積物である。未固結ブロックが変形しながらもほぐれずに外形を保持していることは、堆積物が流走中に水に不飽和であったことを示す。このような未固結の変形したブロックとその周囲の基質からなる産状は、岩屑なだれ堆積物における岩屑なだれブロックと岩屑なだれ基質 (宇井, 1997; Ui *et al.*,

表 1 調査断面における埋没土壌層の加速器 ^{14}C 年代測定結果.Table 1 Result of AMS ^{14}C age determination for paleosol at the study site.

Stratigraphic position	Sample	Measured ^{14}C age* (years BP)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Conventional ^{14}C age** (years BP)	Lab code	Calibrated result*** (2σ : 95% probability)
Paleosol above debris	humic soil	4450 \pm 30	-12.9	4650 \pm 30	Beta- 374643	5465-5345 cal BP
avalanche deposit 2 (DA2)						5335-5310 cal BP

* ^{14}C age was analyzed based on the Libby's ^{14}C half life of 5568 years.** Conventional ^{14}C age was corrected for isotopic fractionation using $\delta^{13}\text{C}$ values.*** Using the program (Talma and Vogel, 1993) based on the IntCal13 calibration database (Reimer *et al.*, 2013).

2000) に類似している。岩屑なだれは、斜面上部に存在した地層や岩体が崩壊や地すべりを起こして、砕けて混じりながら高速で斜面下方に移動する現象である。岩屑なだれ堆積物中に、やわらかい火砕岩や土壌の破片が含まれる事例もよく知られている (宝田, 1991; 立山ほか, 2002 など)。以上のことから、筆者らはこの堆積物を生じた現象に対して岩屑なだれの用語を使用する。

本論で述べた岩屑なだれ堆積物 DA2 中のブロックには著しい変形構造が認められ (図 7), その産状は阿蘇カルデラ西部の河陽 F 遺跡の発掘調査で発見された濁川岩屑なだれ堆積物 (宮縁ほか, 2003) のそれと酷似している。岩屑なだれを伴う崩壊の発生要因としては、マグマの貫入による火山体の変形、水蒸気爆発や地震などがあげられる (Ui *et al.*, 2000)。また、井口 (2003) はわが国の火山地域で発生した歴史時代の地すべり災害の形態や要因を整理した。そのなかで岩屑なだれ (原著では岩屑流) を生じた 8 件のイベントの短期的要因 (誘因) は、地震が 5 件、噴火 (火山活動) が 2 件、不明なものが 1 件であるとしている。ただし、そのなかで噴火が誘因とされている 1792 年の雲仙火山眉山の崩壊は M 6.4 の地震によるものであることがわかっている (太田, 1969)。また原因が不明とされた八ヶ岳 888 年の災害は 887 年 8 月 22 日の南海・東海同時地震によって八ヶ岳天狗が崩壊して生じた岩屑なだれ (原著では土石なだれ) 堆積物により千曲川に堰止湖ができ、翌年それが決壊して大洪水となった可能性が示されている (早川, 2011)。それら

をまとめると、歴史時代に火山地域で発生した岩屑なだれ 8 例のうち、7 例が地震、1 例が噴火によるものとなる。今回堆積物が発見された場所は阿蘇カルデラ壁直下であり、完新世に火山活動が起こっていない場所である。また、DA1 や DA2 は水で運搬された形跡が認められないことから、斜面崩壊・岩屑なだれの発生要因が豪雨であるとも考えにくい。地震である可能性が高いと考える。実際に 2016 年 4 月 16 日未明の熊本地震 (M_j 7.3) によっては、阿蘇カルデラ西部の南阿蘇村周辺域で多数の斜面崩壊が発生して、その崩壊土砂が岩屑なだれ化して長距離運搬され、人命や建物に甚大な被害が及んだ事例が観察された (宮縁, 2016)。先述した河陽 F 遺跡で発見された濁川岩屑なだれ堆積物の年代は弥生時代中期の cal BC400 ~ 100 年頃 (2350 ~ 2050 cal BP) と報告されている (宮縁ほか, 2003)。この堆積物の産状は 2016 年熊本地震に伴う岩屑なだれ堆積物と類似していることから、濁川岩屑なだれも地震に伴うものである可能性が考えられる。本論で述べた岩屑なだれ堆積物 DA1 は濁川岩屑なだれ堆積物と比較的近い時期に形成されたもので、また DA2 は弥生時代をさらにさかのぼる 7.3 ~ 5.3 ka 頃に発生した大規模なマスマーブメントの証拠である。なお、Lh5 と DA2 間に顕著な時間間隙を示すような堆積物は認められないが、DA2 が Lh5 やその上位にあった土壌層などを削り込んでいる可能性もあるので、Lh5 をもたらしたラハールと DA2 を形成した崩壊・岩屑なだれが引き続いて起こったのかどうかは現時点では

不明である。

2) 調査地における過去のマスムーブメント発生履歴

今回観察したカルデラ壁直下の掘削断面において、5層のラハール堆積物 (Lh1～Lh5) と2層の岩屑なだれ堆積物 (DA1 および DA2) が発見された (図2)。これらの堆積物間に挟在する鍵テフラや今回得られた埋没土壌層の¹⁴C年代値から各堆積物の年代は次のように推定される。

往生岳スコリア (OjS) と2012年ラハール堆積物間に存在する岩屑なだれ堆積物 DA1 の年代は3.6 ka以降となる。ただ、直下のOjSを削り込んでいる部分も観察されるので、現在よりもOjSの噴出年代に近く、3～2 ka頃の堆積物ではないかと考えられる。また、杵島岳スコリア (KsS) とOjS間に挟在するラハール堆積物 Lh1 の年代は4～3.6 kaである。ラハール堆積物 Lh2～Lh4 は5.4 kaの埋没土壌層とKsS間に認められるため、それらの年代は5.4～4 kaとなる。

岩屑なだれ堆積物 DA2 とラハール堆積物 Lh5 は7.3 kaの鬼界アカホヤテフラ (K-Ah) と5.4 kaの土壌層間に存在している。ただ、Lh5は掘削断面南側で6.3 kaに対比できると考えられる黒ボク土層を削り込んで堆積しているので、DA2 とLh5の年代は6.3～5.4 kaに絞り込むことができる。

これらの堆積物の年代から、豪雨に伴うラハールは6.3～5.4 kaの900年間に1回、5.4～4 kaの1400年間に3回、4～3.6 kaの400年間に1回、最近3600年間に2回 (2012年を含む) 発生しており、400～1800年間に1回程度の頻度で起こっていることになる。

鳥井ほか (2015) も同じ掘削断面を観察しており、K-Ah上位にDbf1～Dbf5 (上位から下位) という5層の土石流堆積物 (本論でいうラハール堆積物) を認定し、土石流の発生頻度を1000～3000年に1回程度と推定している。

阿蘇カルデラ内では最近30年間に3回の豪雨災害が発生しているが、今回の掘削断面がある溪流でラハールが発生したのは2012年7月のみで

ある。1990年7月の豪雨では、約400 m南側にある溪流でラハールが起こったが、本溪流では発生が認められていない (熊本県, 2012)。このように、豪雨が原因であってもすべての溪流でラハールが発生するとは限らない。したがって、1溪流でのラハールの発生頻度は数100年～1000年に1回程度であるが、阿蘇カルデラ壁全体では、さらに高い頻度で豪雨に伴う斜面崩壊とラハールが発生しているものと考えられる。

一方、今回の断面観察で岩屑なだれは最近6300年間に2回発生していることが明らかとなった。2016年熊本地震による斜面崩壊・岩屑なだれ (宮縁, 2016) を含めると、少なくとも2000年間に1回程度、こうしたマスムーブメントが起こっていることになる。阿蘇カルデラが位置する中部九州には、2016年の熊本地震を起こした布田川断層帯や日奈久断層帯のほか、別府-万年山断層帯などの活断層群が存在している。斜面崩壊・岩屑なだれを伴うような大きな地震は少なくとも2000年間に1回程度発生しているのかもしれない。とくに、岩屑なだれ堆積物 DA2 が地震によって生じたものであるとすると、阿蘇カルデラ周辺域では6.3～5.4 ka頃に非常に大きな地震が起こった可能性があり、このことは今後の活断層調査や地質調査で詳しく確認する必要がある。

VI. ま と め

2012年7月の九州北部豪雨によって甚大な土砂災害が発生した阿蘇カルデラ東壁直下の砂防堰堤掘削断面の観察結果から、以下のことが明らかとなった。

砂防堰堤掘削断面に露出する堆積物は、石礫に富む基質支持のラハール堆積物と未固結なテフラ片や土壌片を多く含む岩屑なだれ堆積物の2つに区分され、前者は5層 (上位よりLh1～Lh5)、後者は2層 (DA1 および DA2) 確認された。そのなかで、岩屑なだれ堆積物 DA2 は掘削断面のほぼ全面 (幅約70 m) にわたって露出するもっとも特徴的な堆積物で、径数cm～数10 cmのテフラ片や土壌片が多量に含まれるとともに、それらが著しく褶曲したり分断するなどの変形構造

が観察された。この堆積物は水で運搬された形跡が認められないことから、大きな地震に伴うものであると推定される。

発見された堆積物間に挟在する鍵テフラや今回得られた埋没土壌層の ^{14}C 年代値から、豪雨に伴うラハールは6.3～5.4 kaの900年間に1回、5.4～4 kaの1400年間に3回、4～3.6 kaの400年間に1回、最近3600年間に2回(2012年を含む)発生しており、400～1800年間に1回程度の頻度で起こっていることがわかった。同じ豪雨であってもすべての溪流でラハールが発生するとは限らないため、阿蘇カルデラ壁全体では、より高い頻度で豪雨に伴う斜面崩壊とラハールが発生しているものと考えられる。

一方、調査したカルデラ壁斜面では岩屑なだれが最近6300年間に2回発生していることが明らかとなった。2016年熊本地震による崩壊・岩屑なだれを含めると、少なくとも2000年間に1回程度、こうしたマスマーブメントが起こっていることになる。中部九州の活断層群において斜面崩壊・岩屑なだれを伴うような大きな地震の発生頻度については今後詳細に検討する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、熊本県阿蘇地域振興局土木部の鍋田和宏氏には現地調査の許可をいただき、株式会社杉本建設の山本喜久男氏には調査中たいへんお世話になった。また、産業技術総合研究所の宮城磯治氏との現地での議論は有意義であった。査読者である鹿野和彦氏と奥野 充氏、担当編集委員の田中明子氏からのご指摘により本論の内容は大きく改善された。これらの方々には心から感謝いたします。

文 献

福岡管区気象台(1975): 1975(昭和50)年1月22-23日熊本県北東部の地震の調査報告。験震時報, **40**, 55-72. [Fukuoka District Meteorological Observatory (1975): Report on the earthquake of north-eastern part of Kumamoto Prefecture, January 22-23, 1975. *Quarterly Journal of Seismology (Ken-shin Jiho)*, **40**, 55-72. (in Japanese)]
福岡管区気象台(2012): 災害時気象速報 平成24年7月九州北部豪雨。災害時自然現象報告書 2012年第1号, 36p. [Fukuoka District Meteorological Observatory (2012): Preliminary report on the 2012 July

torrential rain. *Report of Natural Phenomena during Disaster, 2012 (1)* (Saigaiji Shizen Gensho Hokokusho 2012-1), 36p. (in Japanese)*]

早川由紀夫(2011): 平安時代に起こったハケ岳崩壊と千曲川洪水。歴史地震, **26**, 19-23. [Hayakawa, Y. (2011): Yatsugatake Volcano collapse and the Chikuma River flood occurred during the Heian era. *Historical Earthquakes (Rekishi Jishin)*, **26**, 19-23. (in Japanese with English abstract)]

平野宗夫・橋本晴行(1991): 古恵川において発生した土石流の特性。文部省科学研究費突発災害調査「1990年7月九州中北部豪雨による災害の調査研究」(代表 平野宗夫)研究成果報告書, 109-120. [Hirano, M. and Hashimoto, H. (1991): Characteristics of debris flows in the Furue River. *Study and Research of Disaster by Heavy Rain in Middle-northern Part of Kyushu in July 1990, Finding of Investigation Research on Sudden Disaster by the Ministry of Education Grants-in-aid for Scientific Research (No.02306013)*, 109-120. (in Japanese)*]

井口 隆(2003): わが国の火山地域における地すべり災害研究の概要と今後の課題。地すべり学会誌, **40**, 1-9. [Inokuchi, T. (2003): General report of research on landslide disaster in Quaternary volcanic areas. *Journal of the Japan Landslide Society*, **40**, 1-9. (in Japanese with English abstract)]

石川芳治・草野慎一・福澤 誠(1992): 熊本県一の宮町における泥流・流木の氾濫・堆積特性と家屋の被害: 土木技術資料, **34**(6), 40-45. [Ishikawa, Y., Kusano, S. and Fukuzawa, M. (1992): Flood and deposition characteristics of the mudflow and flooding logs, and mechanism of damage to houses in Ichinomiya town, Kumamoto Prefecture. *Civil Engineering Journal*, **34**(6), 40-45. (in Japanese)]

川口武雄・難波宣士(1954): 昭和28年6月の九州水害に関する調査報告, 阿蘇地区編, 砂防関係(その1 一般対策)。林業試験場研究報告, **69**, 97-123. [Kawaguchi, T. and Namba, S. (1954): A study of the June flood (1593) in Kyushu: Erosion control (1. general), Aso district. *Bulletin of Government Forest Experimental Station*, **69**, 97-123. (in Japanese with English abstract)]

熊本県(2012): 阿蘇地域土砂災害対策検討委員会第1回委員会討議資料。44p. [Kumamoto Prefectural Government (2012): *Report on the 1st Counter-measure Examination Committee for Sediment Disaster in Aso Region (Aso Chiiki Doshu Saigai Taisaku Kento Iinkai Dai 1 Kai Iinkai Togi Shiryo)*. 44p. (in Japanese)*]

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-アカホヤ火山灰。第四紀研究, **17**, 143-163. [Machida, H. and Arai, F. (1978): Akahoya ash: A Holocene widespread tephra erupted from the Kikai caldera, south Kyushu, Japan. *Quaternary Research (Daiyonkikenkyu)*, **17**, 143-163. (in Japanese with English abstract)]

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。東京大学出版会。[Machida, H. and Arai, F. (2003): *Atlas of Tephra in and around Japan (revised edition)*. University of Tokyo Press. (in Japanese)]
- 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—火山層序との整合性と火砕流試料への適応—。日本火山学会 1991 年度秋季大会講演予稿集, 73。[Matsumoto, A., Uto, K., Ono, K. and Watanabe, K. (1991): K-Ar age determinations for Aso volcanic rocks: concordance with volcanostratigraphy and application to pyroclastic flows. *Programme and Abstracts of the Volcanological Society of Japan, 1991 (2)*, 73. (in Japanese)]
- Miyabuchi, Y. (2009): A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan. *Sedimentary Geology*, **220**, 169–189.
- 宮縁育夫 (2012): 阿蘇カルデラにおいて 2012 年 7 月の九州北部豪雨によって発生した斜面崩壊。地学雑誌, **121**, 1073–1080。[Miyabuchi, Y. (2012): Landslides triggered by the July 2012 torrential rain in Aso caldera, southwestern Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 1073–1080. (in Japanese with English abstract)]
- 宮縁育夫 (2016): 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, **125**, 421–429。[Miyabuchi, Y. (2016): Landslide disaster triggered by the 2016 Kumamoto earthquake in and around Minamiaso Village, western part of Aso caldera, southwestern Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 421–429. (in Japanese with English abstract)]
- Miyabuchi, Y. and Daimaru, H. (2004): The June 2001 rainfall-induced landslides and associated lahars at Aso Volcano, southwestern Japan: Implications for hazard assessment. *Acta Vulcanologica*, **16**, 21–36.
- Miyabuchi, Y. and Sugiyama, S. (2012): Holocene vegetation history based on phytolith records in Aso-dani Valley, northern part of the Aso caldera, Japan. *Quaternary International*, **254**, 73–82.
- 宮縁育夫・渡辺一徳 (1997): 埋没黒ボク土層の ^{14}C 年代からみた完新世阿蘇火山テフラの噴出年代。火山, **42**, 403–408。[Miyabuchi, Y. and Watanabe, K. (1997): Eruption ages of Holocene tephras from Aso volcano, southwestern Japan, inferred from ^{14}C ages of buried Andisols. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **42**, 403–408. (in Japanese with English abstract)]
- 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 ^{14}C 年代。火山, **48**, 229–234。[Miyabuchi, Y., Watanabe, K. and Okamoto, S. (2003): ^{14}C ages of volcanoclastic deposits discovered on the western slope of Aso central cones, southwestern Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **48**, 229–234. (in Japanese with English abstract)]
- 宮縁育夫・大丸裕武・小松陽一 (2004a): 2001 年 6 月 29 日豪雨によって阿蘇火山で発生した斜面崩壊とラハールの特徴。地形, **25**, 23–43。[Miyabuchi, Y., Daimaru, H. and Komatsu, Y. (2004a): Landslides and lahars triggered by the rainstorm of June 29, 2001, at Aso Volcano, southwestern Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **25**, 23–43. (in Japanese with English abstract)]
- 宮縁育夫・星住英夫・渡辺一徳 (2004b): 阿蘇火山における更新世末期, AT 火山灰以降のテフラ層序。火山, **49**, 51–64。[Miyabuchi, Y., Hoshizumi, H. and Watanabe, K. (2004b): Late-Pleistocene tephrostratigraphy of Aso Volcano, southwestern Japan, after deposition of AT ash. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **49**, 51–64. (in Japanese with English abstract)]
- 小口 高 (1986): 阿蘇カルデラ壁の斜面形成過程—周水河作用の影響の可能性—。地形, **7**, 185–196。[Oguchi, T. (1986): A possible effect of periglacial processes on the slope development on the Aso caldera wall, central Kyushu, Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **7**, 185–196. (in Japanese with English abstract)]
- 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, **41**, 225–236。[Okuno, M. (2002): Chronology of tephra layers in southern Kyushu, SW Japan, for the last 30,000 years. *Quaternary Research (Daiyonkikenkyu)*, **41**, 225–236. (in Japanese with English abstract)]
- 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。[Ono, K. and Watanabe, K. (1985): *Geological map of Aso Volcano (1:50,000)*. *Geological Map of Volcanoes 4*. Geological Survey of Japan. (in Japanese with English abstract)]
- 小野晃司・松本徭夫・宮久三千年・寺岡昌司・神戸信和 (1977): 竹田地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅)。地質調査所, 145p。[Ono, K., Matsumoto, Y., Miyahisa, M., Teraoka, Y. and Kambe, N. (1977): *Geology of the Taketa District. Quadrangle Series, Scale 1:50,000*. Geological Survey of Japan, 145p. (in Japanese with English abstract)]
- 太田一也 (1969): 眉山崩壊の研究—1. 崩壊機構について—。九州大学理学部島原火山温泉研究所研究報告, **5**, 6–35。[Ota, K. (1969): Study on the collapses in the Mayu-yama 1. On the mechanism of collapse. *Science Reports of the Shimabara Institute of Volcanology and Balneology, Faculty of Science, Kyushu University*, **5**, 6–35. (in Japanese with English abstract)]
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Haffidason, 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): IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **55**, 1869-1887.
- 宝田晋治 (1991): 岩屑流の流動・堆積機構—田代岳火山起源の岩瀬川岩屑流の研究—. 火山, **36**, 11-23. [Takarada, S. (1991): Flow and depositional mechanisms of debris avalanche—A case study of Iwasegawa debris avalanche deposit, Tashirodake Volcano, northern Japan—. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **36**, 11-23. (in Japanese with English abstract)]
- Talma, A.S. and Vogel, J.C. (1993): A simplified approach to calibration ^{14}C dates. *Radiocarbon*, **35**, 317-322.
- 立山英之・星住英夫・渡辺一徳 (2002): 雲仙, 野岳火山の層序と形成史. 火山, **47**, 739-749. [Tateyama, H., Hoshizumi, H. and Watanabe, K. (2002): Stratigraphy and eruptive history of Nodake Volcano, Unzen, Kyushu, Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **47**, 739-749. (in Japanese with English abstract)]
- 鳥井真之・西山賢一・星出和裕・横田修一郎 (2015): テフラから推定される阿蘇カルデラ斜面における土石流の発生頻度—阿蘇市一の宮町を例として—. 月刊地球, **37**, 228-230. [Torii, M., Nishiyama, K., Hoshide, K. and Yokota, S. (2015): Frequency of debris flow on the Aso caldera steep slope deduced from tephra: A case study at Ichinomiya-machi, Aso City. *Chikyu Monthly (Gekkan Chikyu)*, **37**, 228-230. (in Japanese)]
- 宇井忠英 (1997): 火山噴火と災害. 東京大学出版会, 219p. [Ui, T. (1997): *Volcanic Eruption and Disaster*. University of Tokyo Press, 219p. (in Japanese)]
- Ui, T., Takarada, S. and Yoshimoto, M. (2000): Debris avalanches. in *Encyclopedia of Volcanoes* edited by Sigurdsson, H., Academic Press, 617-626.
- 渡辺一徳 (1991): 阿蘇火山中岳の火山活動. 熊本地学会誌, **98**, 2-13. [Watanabe, K. (1991): Volcanic activity of Nakadake, Aso Volcano. *Journal of the Kumamoto Geoscience Association*, **98**, 2-13. (in Japanese)*]
- * Title etc. translated by Y.M.