

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

宮 縁 育 夫*

Landslide Disaster Triggered by the 2016 Kumamoto Earthquake in and around Minamiaso Village, Western Part of Aso Caldera, Southwestern Japan

Yasuo MIYABUCHI*

[Received 12 May, 2016; Accepted 18 May, 2016]

Abstract

The Kumamoto earthquake (M_j 7.3) on April 16, 2016 triggered numerous landslides in and around Minamiaso Village, which is located at the western part of Aso caldera, southwestern Japan. The landslides were divided into two types: landslides occurring at steep caldera walls and landslides generated on the slopes of post-caldera central cones of Aso Volcano. Several landslides occurred on slopes steeper than 25° at the northwestern to western caldera walls, which comprise pre-Aso volcanic rocks (lavas and pyroclastics). The largest landslide (*ca.* 300 m high, 130–200 m wide) occurred on the western caldera wall, damaging National Route 57 and the Hohi line of the Japan Railway. Because a clear rupture surface could not be observed, unstable blocks which had been divided by cracks, were likely to collapse due to the intense earthquake on April 16. At the post-caldera central cones of Aso Volcano, earthquake-induced landslides were generated not only on steep slopes but also on slopes gentler than 10° . They occurred in unconsolidated superficial tephra deposits overlying lavas and agglutinates, and the thickness of the slides usually ranged from 4 to 8 m. The sliding masses traveled long distances (< 600 m), compared to small differences in elevation. The deposits were composed of tephra blocks of a few meters and there was no evidence that they were transported by water. These facts suggest that some landslides mobilized rapidly into debris avalanches, traveling a few hundred meters. The associated debris avalanche resulted in five casualties and severe damage to houses at the foot of the Takanoobane lava dome. The characteristics of the April 16, 2016 earthquake-induced landslides differ from those of rainfall-induced landslides in July 2012, June 2001, and July 1990 at Aso Volcano, and provide important information for preventing or mitigating future landslide disasters in the Aso caldera region.

Key words : 2016 Kumamoto Earthquake, landslides, debris avalanche, tephra deposits, geological characteristics

キーワード : 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震, 斜面崩壊, 岩屑なだれ, テフラ層, 地質学的特性

* 熊本大学教育学部

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

I. はじめに

2016年4月14日21時26分(M_j 6.5; 気象庁によるマグニチュード)と4月16日01時25分(M_j 7.3)に熊本県熊本地方を震源とする大きな地震が発生した。これらの地震では、熊本県益城町や西原村で震度7が記録されるなど、中部九州を中心とした広い地域で強い揺れが観測された。気象庁は4月15日に前者の地震を「平成28年(2016年)熊本地震(the 2016 Kumamoto earthquake)」と命名した(気象庁による平成28年熊本地震に関する第4報)が、4月16日に前者が前震、後者が本震であるという見解を示した。4月14日21時26分の地震以降、30日15時までに震度1以上を観測する地震の回数は1079回に達している(同第37報)。この一連の地震活動による熊本県内での被害は、死者49名、災害関連死19名、行方不明者1名、さらに建物被害は7万棟以上に及び(5月12日発表の熊本県災害対策本部資料による)、政府は4月25日に激甚災害に指定した。

4月16日01時25分の本震によって熊本県阿蘇郡南阿蘇村では震度6強の強い揺れに襲われ、多数の建物倒壊とともに、100か所以上の斜面で崩壊が起こり、死者15名、行方不明者1名(5月12日現在)をだす大惨事となった。筆者はこの災害発生後から同村とその周辺域において現地調査を行い、阿蘇カルデラ周辺域で発生した地震に伴う斜面崩壊の実態について把握したので、その結果を報告する。

II. 調査地域の地形地質概要

今回の平成28年熊本地震によって多数の斜面崩壊が起こった熊本県南阿蘇村は阿蘇カルデラ西部地域に位置している(図1)。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(古い方からAso-1~Aso-4噴火)によって形成された(小野ほか, 1977; 松本ほか, 1991)。西側カルデラ壁の高低差は300~450 m程度であり、その大部分は先阿蘇火山岩類の輝石安山岩(溶岩お

よび火砕岩)からなるが、それを覆って阿蘇火砕流堆積物(おもにAso-1およびAso-2)も存在している(小野・渡辺, 1985)。西側カルデラ壁直下には北側(阿蘇谷)から黒川が、南側(南郷谷)から白川が流れ、それらはカルデラ西端の南阿蘇村戸下で合流して白川となり、阿蘇カルデラ唯一の地形的切れ目である立野火口瀬を通過して西方へ流出している。この立野火口瀬からは2016年熊本地震の震源断層とされる布田川断層が南西方向へ伸びている(図1)。

黒川および白川の東方域は阿蘇カルデラ形成後に活動を開始した中央火口丘群の噴出物に厚く覆われている。この中央火口丘群西部地域は、玄武岩から流紋岩までさまざまな化学組成をもつ溶岩流や火砕岩が分布しており、地質的にも地形的にも複雑な構造をもつ地域である(小野・渡辺, 1985)。この地域の東端付近には輝石安山岩からなる成層火山の烏帽子岳(30 ka; K-Ar年代はMiyoshi *et al.*, 2012による)と御竈門山(56~57 ka)、かんらん石輝石安山岩の夜峰山がある。烏帽子岳火山の北側山腹には、直径約1 kmの火口をもつ溶結した軽石丘(輝石デイサイト)である草千里ヶ浜火山があり、30 ka(較正¹⁴C年代)にブリニー式噴火を起こし、周辺地域に厚い軽石を堆積させている(Miyabuchi, 2009)。草千里ヶ浜火口西縁からは緩やかに続く斜面(平均傾斜7~14°程度)が広がっており、玄武岩質の吉岡溶岩(71 ka)、無斑晶質安山岩の栃ノ木溶岩(64 ka)、輝石デイサイトの沢津野溶岩などが分布し、標高600 m付近には輝石デイサイトの長野火山(増田ほか, 2004; 60 ka)、その北西には黒雲母流紋岩の溶岩ドームを形成する高野尾羽根火山(渡辺, 2001)がある。さらに西側の白川・黒川に下刻された河床には鮎返ノ滝溶岩(80 ka)がみられ、それを覆って立野溶岩(54 ka)と赤瀬溶岩(較正¹⁴C年代30 ka; 宮縁ほか, 2004a)が存在し、立野火口瀬に流れ込んでいる。立野溶岩を含む、いくつかの溶岩は立野火口瀬を堰き止めて、阿蘇カルデラ内は複数回湖沼化したことが明らかになっている(渡辺, 2001)。最後のカルデラ湖は北側の阿蘇谷に8.9 ka頃まで存在した

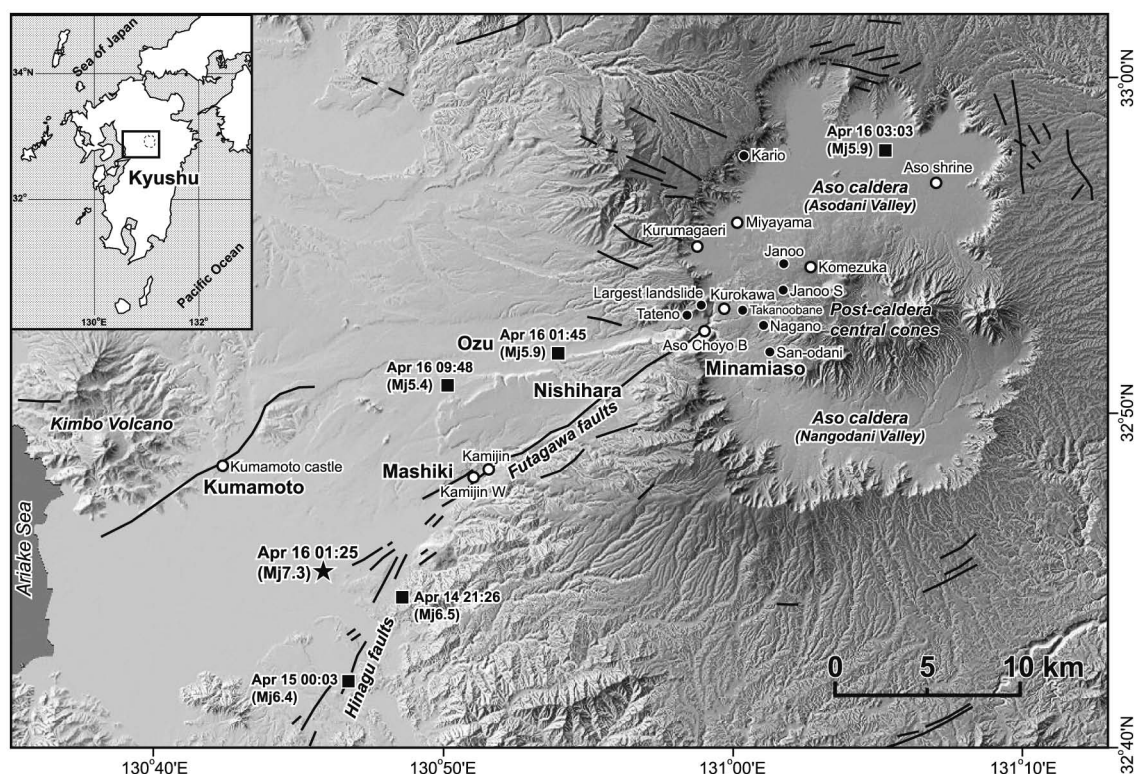


図 1 熊本地域の活断層の分布と平成 28 年熊本地震の震央および調査地点の位置。活断層分布は活断層研究会 (1991) および渡辺 (1987) による。星印と黒四角は本震と 2016 年 4 月 14 ~ 16 日のおもな地震の震央を示す。また、黒丸は斜面崩壊の調査地点、白丸は断層や建物被害等の観察地点を表している。レリーフマップは国土地理院 50 m メッシュ標高データを使用してカシミール 3D で作成した。

Fig. 1 Distribution of active faults in the Kumamoto region and locations of epicenters of the main shock (star) and major fore- and after-shocks (solid squares) of the 2016 Kumamoto earthquake and investigated sites. Distribution of active faults is after Active Fault Research Group (1991) and Watanabe (1987). Solid and open circles show locations of investigated landslides and sites observed for faults and damaged buildings, respectively. The relief map was produced by Kashmir 3D using 50-m-mesh DEM data published by the Geospatial Information Authority of Japan.

ことがわかっている (宮縁ほか, 2010)。なお、調査地域においては以上述べた溶岩や火砕岩を中央火口丘群起源の降下テフラが厚く覆っており、たとえば高野尾羽根溶岩ドーム上のテフラ全体の厚さは最大で 13 m 程度である (宮縁ほか, 2004a)。

III. 斜面崩壊の発生状況

2016 年 4 月 16 日未明の熊本地震本震による斜面崩壊の発生地域は、布田川断層が立野火口瀬から阿蘇カルデラ内に伸びた位置にあり、震度 6

強の揺れに襲われた南阿蘇村とその周辺域を中心としている (図 1)。そうした斜面崩壊は阿蘇カルデラ壁斜面の崩壊と中央火口丘群斜面の崩壊に大きく区分することができる。以下、それぞれの特徴について述べる。

1) 阿蘇カルデラ壁斜面の崩壊

今回の熊本地震によっては阿蘇カルデラの北西～西側壁の急斜面で大小さまざまな規模の崩壊が発生している (図 2)。この地域の阿蘇カルデラ壁の標高差は 300 ~ 450 m 程度であり、大部分の崩壊は先阿蘇火山岩類の輝石安山岩からなる



図 2 阿蘇カルデラ北西壁の斜面崩壊 (阿蘇市狩尾).

Fig. 2 Landslides on the northwestern wall of Aso caldera at Kario, Aso City.



図 3 南阿蘇村立野の森林斜面における崩壊.

Fig. 3 Landslide on a forested slope at Tateno, Minamiaso Village.

傾斜 25° を越える斜面で発生している。もっとも大規模な崩壊は黒川に架かっていた阿蘇大橋の西側斜面で起こったもの(口絵 1- 図 9)で、崩壊頂部の位置は標高 710 m 付近で、崩壊の高さは約 300 m、幅は 130 ~ 200 m に達している(いずれも土砂が堆積する部分を含む)。この崩壊は国道 57 号線と JR 豊肥本線を寸断しただけでなく、地震発生当時、この付近の国道 57 号線を車で走行していた阿蘇市在住の大学生 1 名がこの崩壊に巻き込まれたとみられており、行方不明となっている。黒川左岸から遠望すると、明瞭なすべり面は認められず、崩壊面にはほぼ水平に堆積した先阿蘇火山岩類の溶岩や火砕岩などが観察できる。なお、この崩壊土砂によって国道 325 号



図 4 南阿蘇村立野の斜面崩壊に伴う土砂の流下状況.

Fig. 4 Downstream view of landslide at Tateno, Minamiaso Village.

線の阿蘇大橋が流失したと報道されているが、地震そのもので橋が倒壊した可能性もあり、検討が必要である。

阿蘇カルデラ壁における斜面崩壊の一例として南阿蘇村立野の土砂災害があげられる。この崩壊は、立野集落北側に位置する標高 410 ~ 480 m 付近の西北西向きの森林斜面(傾斜約 25°)で発生した(図 3)。滑落崖の高さは 8 m、その幅は 30 m 程度(標高 450 m より下部は幅 80 m)であり、崩壊面には先阿蘇火山岩類の輝石安山岩が露出している。その安山岩は角礫化が進んで脆弱な状況であった。阿蘇大橋付近の大規模な斜面崩壊も含めて、強い地震動によってカルデラ壁急斜面に存在した不安定な溶岩・火砕岩がクラックなどによって崩壊したものと考えられる。この立野の崩壊では、崩落土砂が水を含んで谷沿いを流下し(図 4)、2 名の住民が犠牲となり、土砂は標高 340 m 付近の JR 豊肥線まで達して堆積している(口絵 1- 図 18)。

2) 中央火口丘群斜面の崩壊

阿蘇カルデラ内の中央火口丘群斜面で起こった崩壊は今回の地震災害を特徴づける現象である。この崩壊は急斜面でも認められるが、傾斜 10° 以下の緩斜面でも発生していることが特筆すべき点である。崩壊が多発した中央火口丘群西側斜面は、玄武岩から流紋岩に及ぶ広い組成の溶岩・火砕岩が分布しているが、そうした火山岩を厚さ



図 5 高野尾羽根火山の斜面崩壊に伴って流下した土砂の末端部。

Fig. 5 Distal end of sliding debris associated with the landslide on the southwestern slope of Takanoobane Volcano.

数 m ～数 10 m の未固結な降下テフラ層（おもにシルト質火山灰と土壤層）が覆っている（宮縁ほか, 2004a）。大部分の斜面崩壊は深さ 4 ～ 8 m 程度であり、溶岩を覆うテフラ層内で起こっていることが現地調査の結果から明らかとなった。

この中央火口丘群の急斜面における崩壊の例として、南阿蘇村長野の森林斜面での崩壊について述べる。この崩壊が起こったのは長野火山（増田ほか, 2004）の傾斜 25 ～ 30° 程度の南西側斜面で、谷地形を呈している。崩壊頂部の位置は標高 595 m 付近で、崩落幅は 30 m 程度である（口絵 1- 図 16）。滑落崖の高さは 5 m ほどで、約 30 ka の草千里ヶ浜軽石（渡辺ほか, 1982; Miyabuchi, 2009）と考えられる降下軽石堆積物中にすべり面が発生している。この軽石層（厚さ 3.5 m 以上）は全体的に粘土化が進んでいて、下部は比較的固結しているが、上部はルーズである。軽石層上部のルーズな部分とさらに上位のテフラ層（厚さ 2 ～ 3 m で、上部が黒ボク土層で下部がシルト質火山灰層）が地震動によって不安定化して崩落したものと考えられる。崩落した土砂は急斜面を一気に流下し、標高 510 m 付近にあった温泉宿泊施設を襲い、宿泊客 2 名が犠牲となった。

つぎに、死者 5 名をだした南阿蘇村河陽の京都大学火山研究センターがある丘（標高 567.7 m）



図 6 高野尾羽根火山の斜面崩壊に伴って発生した岩屑なだれに襲われた南阿蘇村高野台地区の住宅。

Fig. 6 Houses damaged by debris avalanche associated with the landslide at Takanoobane Volcano.

で発生した土砂災害（口絵 1- 図 10, 11）について報告する。崩壊が起こったのは 51 ka（松本ほか, 1991）に形成された高野尾羽根火山（溶岩ドーム）南西斜面であり、7° 前後と極めて緩傾斜で、しかも凸型の斜面形を呈している。崩壊頂部の標高は 540 ～ 545 m で、その付近の崩落幅は 50 ～ 60 m 程度である。滑落崖の高さは約 8 m で、その滑落崖に高野尾羽根溶岩は露出しておらず、滑落崖基底部付近には 29 ka（奥野, 2002）の始良 Tn テフラ（町田・新井, 2003）が認められるため、溶岩を覆う最近約 3 万年間のテフラ層（おもにシルト質火山灰および土壤）が崩壊したものと考えられる。斜面下部に向かって崩壊幅は拡大して標高 510 m 付近では幅 200 m 程度となっており、その付近まで達した崩壊土砂は南西側と西側に分かれて流下している。南西側に流下した土砂は標高約 485 m の県道 149 号線まで達して停止した（幅約 100 m; 図 5）。一方、西側に崩落した土砂は標高 500 m 付近（幅約 120 m）から北西～北方向へと向きを変えて標高 450 m の小さな河川にまで到達している。その途中で、高野台地区にあった住宅（標高 495 m 付近）を半壊させる（図 6）とともに 5 名の尊い人命が奪われた。南西方向および西～北方向に流下した流れの高度差 / 水平到達距離比 (H/L 比)

はそれぞれ 0.13 および 0.17 となり、高度差が小さいわりに長い距離を流下していることが特徴である。なお、南西方向に流下した堆積物の両側には明瞭な堤防状の地形が形成されている。崩壊した土砂は滑落崖から下位の斜面全体に堆積している。堆積物は崩壊したテフラ層が流下途中にほぐされて、平均 1～2 m 程度の大きさになった無数のブロックからなり、溶岩などの岩石は認められない（口絵 1- 図 11）。標高 505 m 付近には比高 3 m 程度の崖に乗り上げて堆積しているテフラのブロックも観察された。それらの堆積物は水によって運搬されたような形跡はなく、おもに重力によって緩斜面を流下した産状を呈していた。崩壊土砂が広がっている部分の面積は約 8 万 m^2 で、堆積土砂の厚さを 2～3 m と仮定すると、崩壊土砂量は $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 程度と概算することができる。

最後に、崩壊した土砂が谷沿いにさらに長距離移動した現象として、南阿蘇村山王谷川の事例を紹介する。国土地理院が 4 月 20 日に撮影した空中写真によると、上流部の標高 800～950 m 付近の森林斜面に多数の崩壊が認められる。上流部の現地調査は実施できていないが、空中写真を判読する限り、それほど深い崩壊ではなく、表層のテフラ層（厚さ 2～3 m 以内）の浅層崩壊と考えられる。そうした崩壊によって生産された土砂は谷に沿って流下し、標高 525 m 付近に設置されていた谷止め堰堤の一部を破壊して、その下流にあたる標高 480～520 m に最大幅約 120 m にわたって氾濫堆積した（口絵 1- 図 17）。4 月 16 日未明の地震発生時に降雨はなかったが、山王谷川には普段から少量の表流水があり、崩壊土砂はその流水とともに 1.5 km 以上流下したものと考えられる。しかし、氾濫した堆積物の末端部や側面は急傾斜のローブ状地形を呈していた（図 7）。また、土砂の堆積域には樹木を含むテフラのブロックが観察された。こうした堆積物の産状は、崩壊土砂がそれほど多くの水分を含まない状態で流下堆積したことを示唆している。さらに、標高 490 m の右岸に居住する住民から、朝方明るくなった頃（詳細な時間不明）にスギの造林木が



図 7 山王谷川上流部の斜面崩壊に伴って流下した土砂の堆積状況（標高 480 m 付近）。

Fig. 7 Deposits transported from landslides upstream along the San-odani River.

立った状態で流れ下る様子を目撃したという証言が得られた。樹木がその生えていた地面のブロックごと流下していたようである。こうした証言からも、山王谷川で発生した土砂移動現象は通常のラハール（水を媒介とする火山砕屑物の流動現象；Vallance, 2000）とは異なるプロセスであった可能性が高い。

IV. 2016 年熊本地震による斜面災害の特徴 —過去の豪雨災害との比較—

以上述べたように、南阿蘇村周辺域で 2016 年 4 月 16 日未明の地震（ M_j 7.3）によって発生した斜面崩壊は、阿蘇カルデラ壁斜面の崩壊と中央火口丘群斜面の崩壊の 2 つのタイプがあり、双方ともに傾斜 25° 以上の急斜面での崩壊が多いが、特筆すべき点としてあげられるのは中央火口丘群の緩斜面での崩壊である。その代表例である南阿蘇村河陽高野台地区で起こった土砂災害は、かなり緩傾斜の凸型斜面で深さ 8 m 程度の崩壊が発生し、その崩壊土砂が高度差に比べて長距離運搬された。こうしたことは、2012 年 7 月などの豪雨による急斜面での深さ 1～2 m の浅層崩壊（Miyabuchi and Daimaru, 2004; 宮縁ほか, 2004b; 宮縁, 2012）とは著しく異なる特徴である。また、堆積物は径数 m 程度のテフラのブロックが散在するという産状を呈しており（口絵

1- 図 10, 11), それらは水で運搬された形跡が認められないことから, 以下のような土砂移動現象が発生したと考えられる。

2016 年 4 月 16 日午前 1 時 25 分に発生した M_j 7.3 の地震によって, 南阿蘇村河陽に位置する高野尾羽根火山の溶岩ドームは相当に強い揺れに襲われた。このことはドーム頂部の京都大学火山研究センター周辺に多数のクラック（北西-南東方向に発達）が形成されていることからわかる（口絵 1- 図 12）。この激しい地震動によって, 高野尾羽根火山南西斜面を覆うテフラ層は標高 540 ~ 545 m から深さ 8 m 程度にわたって崩壊した。崩壊したテフラ層の塊は岩屑なだれとなって急速に斜面を滑り落ちた。この崩壊物質は未固結なテフラ層からなるために, 流下途中で容易に変形・分断されて径 1 ~ 2 m 以下のブロックになりながら, 南西方向と西~北方向に分かれて, 水平距離で 450 ~ 570 m ほど流下して停止した。岩屑なだれ (debris avalanche) とは, 不安定な山体斜面が何らかの原因で崩壊して, 雪崩のように高速で滑り落ちる現象をいう（宇井, 1987）。今回の場合, 崩壊した物質が高速で流下したかどうかは明らかではないが, 堆積物が極度に分断されて表面が凹凸の激しい産状を呈すること, 標高 495 m 付近にあった住宅を半壊させていること（図 6）, さらに高度差が小さいわりに崩壊土砂が長距離運搬されていることからみても, 今回の土砂移動現象は斜面崩壊に伴う岩屑なだれであったと推察される。

高野尾羽根火山南東端に位置する河陽 F 遺跡の発掘調査によって, 弥生時代の遺物や遺構を覆う岩屑堆積物が発見されており, 濁川岩屑なだれ堆積物と命名されている（宮縁ほか, 2003）。その堆積物の最大層厚は 3 m であり, テフラや土壤層からなるブロックを多量に含むことが特徴である。そうした堆積物の産状は, 2016 年 4 月 16 日未明に高野尾羽根火山南西斜面で起こった岩屑なだれによる堆積物と類似している。濁川岩屑なだれ堆積物中に含まれる木片の ^{14}C 年代は, 直下で発見された土器など遺物の年代とも整合的であり, 弥生時代中期の BC 400 ~ 100 年頃に岩屑

なだれが発生していることになる。岩屑なだれの起源となる崩壊の発生地点は濁川流域内であることしかわからないが, 高野尾羽根火山の東~南東斜面である可能性も十分に考えられる。濁川岩屑なだれ堆積物と同時期の噴火堆積物が認められないこと（宮縁ほか, 2003）から, 弥生時代の岩屑なだれも地震による崩壊が原因なのかもしれない。したがって, 南阿蘇村では過去においても同様の災害が発生していることが明らかであり, 防災的観点からも重要な事実である。

V. おわりに

2016 年 4 月 16 日未明の M_j 7.3 の地震によって阿蘇カルデラ西部に位置する南阿蘇村では多数の斜面崩壊が発生し, 激甚災害に見舞われた。今回の災害は 2012 年 7 月などに発生した豪雨による土砂災害とは異なった特徴を有している。強い地震動によっては, 緩斜面や凸型斜面であっても崩壊が発生して, その崩壊土砂が岩屑なだれ化して, 長距離運搬されて人命や建物に甚大な被害を及ぼすことが明らかとなった。今回の地震では地表断層とみられる変位が出現する（口絵 1- 図 5）など, 九州屈指の活断層である布田川断層が阿蘇カルデラ内にも伸び, 南阿蘇村河陽付近を通っている可能性もでてきている。南阿蘇村とその周辺域においては豪雨災害に加えて, 地震災害にも警戒する必要がある, 今後の防災対策を根本的に見直さなければならない。

最後に, 2016 年熊本地震によって被災された方々に心よりお見舞い申し上げます。

謝 辞

国土地理院が 2016 年 4 月 16 日および 20 日に撮影した空中写真は, 今回の土砂災害の概要を把握する上で重要であった。現地調査の一部は東京大学地震研究所の中田節也氏と前野 深氏とともに行った。査読者の意見により本論の内容は大いに改善された。これらの方々に心から感謝いたします。

文 献

活断層研究会編 (1991): 新編日本の活断層—分布図と資料. 東京大学出版会. [The Research Group for Active Faults of Japan ed. (1991): *Active Faults*

- in Japan: Distribution Maps and Data (revised edition) (Shinpen Nihon No Katsudanso: Bunpuzu To Shiryo). University of Tokyo Press. (in Japanese)*]
- 町田 洋・新井房夫 (2003): 新編 火山灰アトラス—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)]
- 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**, 119-128. [Masuda, N., Watanabe, K. and Miyabuchi, Y. (2004): Rhyolite to dacite lava flows newly-discovered on the western slope of Aso central cones, southwestern Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **49**, 119-128. (in Japanese with English abstract)]
- 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)]
- 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.
- 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・増田直朗・渡辺一徳 (2004a): 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**, 267-282. [Miyabuchi, Y., Masuda, N. and Watanabe, K. (2004a): Geologic history of the western part of post-caldera central cones of Aso Volcano, southwestern Japan, based on stratigraphic relationships between lava flows and airfall tephra layers. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **49**, 267-282. (in Japanese with English abstract)]
- 宮縁育夫・大丸裕武・小松陽一 (2004b): 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. (2004): 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・杉山真二・佐々木尚子 (2010): 阿蘇カルデラ北部, 阿蘇谷千町無田ボーリングコアの植物珪酸体および微粒炭分析. 地学雑誌, **119**, 17-32. [Miyabuchi, Y., Sugiyama, S. and Sasaki, N. (2010): Phytolith and macroscopic charcoal analyses of the Senchomuta drilling core in Asodani Valley, northern part of Aso caldera, Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 17-32. (in Japanese with English abstract)]
- Miyoshi, M., Sumino, H., Miyabuchi, Y., Shinmura, T., Mori, Y., Hasenaka, T., Furukawa, K., Uno, K. and Nagao, K. (2012): K-Ar ages determined for post-caldera volcanic products from Aso volcano, central Kyushu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **229-230**, 64-73.
- 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. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **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・松本恒夫・宮久三千年・寺岡易司・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*. Geological Survey of Japan, 145p. (in Japanese with English abstract)]
- 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, **8**, 83-93. [Ui, T. (1987): Flow behavior of volcanic debris avalanche. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **8**, 83-93. (in Japanese with English abstract)]
- Vallance, J.W. (2000): Lahars. in *Encyclopedia of Volcanoes* edited by Sigurdsson, H., Academic Press, 601-616.
- 渡辺一徳 (1987): 活断層としての立田山断層. 熊本地学会誌, **85**, 6-13. [Watanabe, K. (1987): Tatsudayama fault. *Journal of Kumamoto Geoscience*

Association, **85**, 6–13. (in Japanese) *]

渡辺一徳 (2001): 阿蘇火山の生い立ち—地質が語る大地の鼓動—. 一の宮町史編集委員会編: 一の宮町史自然と文化阿蘇選書 7, 熊本県一の宮町. [Watanabe, K. (2001): *Geology of Aso Volcano. Ichinomiya Choshi* (*History of Ichinomiya Town, Kumamoto Prefecture, Japan*, 7) (*Aso Kazan No Oitachi. Ichinomiya Choshi Shizen To Bunka Aso Sensho* 7) ed-

ited by Ichinomiyamachi. (in Japanese) *]

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**, 337–338. [Watanabe, K., Ono, K. and Hiratsuka, S. (1982): Pumice deposits from Kusasenrigahama Volcano, Aso Caldera. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **27**, 337–338. (in Japanese)]

* Title etc. translated by Y.M.