

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宮縁育夫<sup>1\*</sup>・大丸裕武<sup>1</sup>・小松陽一<sup>2</sup>Landslides and Lahars Triggered by the Rainstorm of June 29, 2001,  
at Aso Volcano, Southwestern JapanYasuo MIYABUCHI<sup>1\*</sup>, Hiromu DAIMARU<sup>1</sup> and Yoichi KOMATSU<sup>2</sup>

## Abstract

The 29 June 2001 rainstorm (total 238 mm; maximum hourly rainfall 98 mm) triggered more than 700 landslides and associated lahars at Aso Volcano, central Kyushu, SW Japan. Most of the landslides were concentrated in a 20-km<sup>2</sup> area that includes the northeastern slope of post-caldera central cones, the northern slope of Nekodake Volcano and the eastern caldera wall. We mapped landslides triggered by the storm using field observations and 1:20,000-scale aerial photography provided by the Kumamoto District Forest Office taken in December 2001. Most of the triggered landslides were shallow (about 1 m thick) soil slips in unconsolidated airfall tephra layers overlying lava flows and pyroclastic rocks. Average volume of the landslides was 550 m<sup>3</sup>, but some had volumes exceeding 10,000 m<sup>3</sup>. The rupture surfaces of most landslides were formed near the boundary between upper blackish and lower brownish tephra layers. These layers have differences in permeability, grain size and soil hardness. Most landslides mobilized completely into lahars, traveling a few kilometers along stream channels. Although some lahars eroded channel side slopes and transported boulders (2-3 m in diameter), most contained up to about 80 percent silt-to-clay-size particles, similar in composition to the original landslide debris. Sediment discharge volumes by the tephra-slip-induced lahars were estimated at an order of 10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> using sediment volumes trapped by check dams. These volumes are similar or one-order of magnitude smaller than the volumes of the 1953 and 1990 landslide disasters in the same region. The characteristics of landslides and lahars and their estimated volumes provide important information about landslide and lahar hazards at Aso Volcano.

**Key words:** Aso Volcano, landslide, lahar, tephra, sediment discharge.

2003年8月21日受付, 2003年10月24日再投稿, 2003年10月27日受理

<sup>1</sup> 森林総合研究所九州支所 (〒860-0862 熊本市黒髪4-11-16)

<sup>1</sup> Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kurokami 4-11-16, Kumamoto 860-0862, Japan.

\* E-mail: yasuo@affrc.go.jp

<sup>2</sup> 熊本県土木部砂防課 (現 熊本県税事務所) (〒862-8609 熊本市水前寺6-18-1)

<sup>2</sup> Erosion Control Division, Department of Civil Engineering, Kumamoto Prefectural Government, Suizenji 6-18-1, Kumamoto 862-8609, Japan.

## 1. は じ め に

2001年6月28日から29日にかけて停滞前線による豪雨によって、熊本県の阿蘇火山では土砂災害が発生した。阿蘇カルデラ北西部に位置する阿蘇町狩尾地区では、土石流によって家屋が損壊するなどの被害が発生し、新聞やテレビで報道されるとともに、その土砂移動特性が報告されている（植ほか，2001）。一方，同じ豪雨に伴ってカルデラ中東部においても多数の斜面崩壊が起こったが，その土砂移動については居住地域に被害を及ぼさなかったため，報道されることもなく，九州森林管理局による災害直後の実態調査（九州森林管理局・林業土木コンサルタンツ，2002）が行われたのみであった。

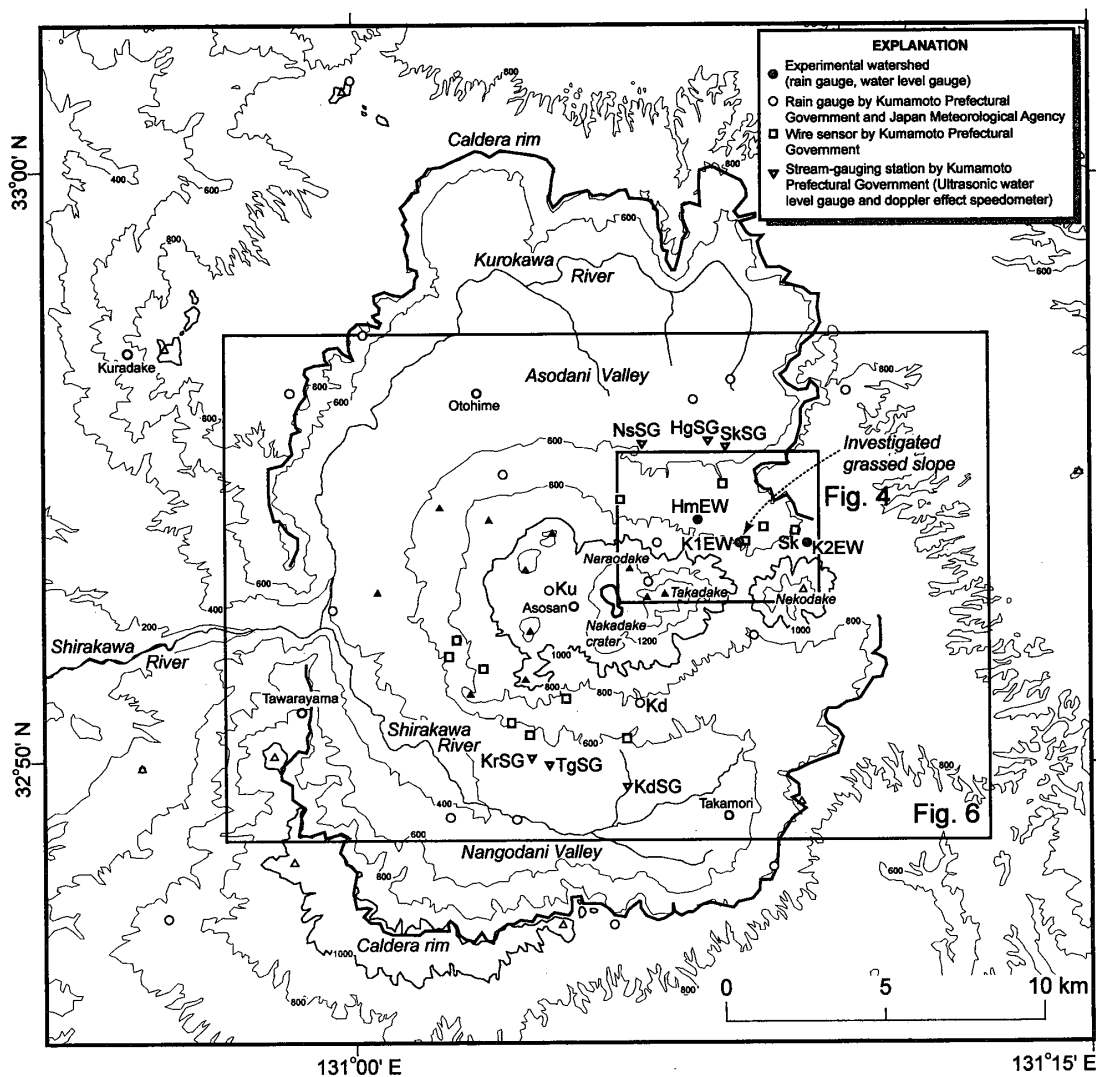
筆者らは，阿蘇カルデラ中東部に設定した3つの試験流域において今回の災害発生時の降雨流出データを得ることができた。また災害後の現地調査を行うとともに，熊本県土木部が構築している土砂災害情報監視システムのデータにより，災害の発生状況がより明らかとなった。本論では，2001年6月29日豪雨に伴って阿蘇火山で発生した土砂災害，とくに斜面崩壊とラハールの実態および特徴について報告する。

本論においては，水を媒介とする火山碎屑物の流動現象をラハール（lahar）と呼ぶ。ラハールとは，もともと火山泥流を意味するインドネシア語であり（地学団体研究会，1996，p. 1365），かつてはさまざまな意味で使用された（Neall, 1976）。しかし近年，地質・火山・堆積学等の分野で，ラハールは通常的水流（normal streamflow）より高速である火山碎屑物と水の混合物の流動現象と定義され（Smith and Fritz, 1989），現在では国際的にも認知されている用語である。ラハールは構成物質や濃度，流動・堆積機構によって，debris flow と hyperconcentrated flow に分類される（Smith and Lowe, 1991）が，一つの流れにおいても両者が共存することが知られている（Pierson and Scott, 1985）。わが国では debris flow の和訳である土石流という用語だけが多用されるが，debris flow は本来，礫含有量（Varnes, 1978）や土砂濃度（Beverage and Culbertson, 1964）で決定されるべき現象であり，堆積物の粒度特性や産状を明らかにしないで，安易に使用すべきではないと筆者らは考える。本論で述べる堆積物は hyperconcentrated flow と debris flow による堆積物も認められることから，両者をあわせて呼ぶ用語が必要である。ラハールの発生過程は多様であり（Neall, 1976），必ずしも噴火現象に関連する必要はないとされている（Vallance, 2000）。わが国においても，火山学ではすでにラハール堆積物という用語が使用されている例があり（山元，1998；宮縁ほか，2003 a），本論で述べる 2001 年 6 月 29 日豪雨に伴う堆積物をラハール堆積物と呼ぶことに何ら問題はない。

## 2. 調査地域の概要

阿蘇火山は，九州のほぼ中央部に位置し，南北約 25 km，東西約 18 km のカルデラを有している。その活動は約 27 万年前の Aso-1 に始まり，約 9 万年前の Aso-4 まで 4 回の大規

模な火砕流噴火を繰り返し、現在のカルデラを形成した（小野ほか，1977；松本ほか，1991）。カルデラはやや南北に長い楕円形で、その中央よりやや南に、Aso-4噴火直後に活動を開始した中央火口丘群（小野・渡辺，1983）が東西方向に配列している（Fig. 1）。この中央火口丘群によってカルデラは、北側の阿蘇谷と南側の南郷谷とに二分される。カルデラの輪郭は半月状の湾入部が多数存在するが、その高度は阿蘇谷側で標高 600 ～ 800 m と定高性を有するのに対し、南郷谷側では標高 900 ～ 1200 m と変化に富んでいる。カルデラ壁は、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（小野・



**Fig. 1.** Map of Aso caldera and its surrounding area, showing locations of meteorological and hydrological measurement sites. HgSG: Higashidake stream-gauging station (SG), HmEW: Higashidakegawa main stream experimental watershed (EW), K1EW: Kurokawa 1st tributary EW, K2EW: Kurokawa 2nd tributary EW, Kd: Kurikaradani rain gauge, KdSG: Kurikaradani SG, KrSG: Karikawa SG, Ku: Kusanenri rain gauge, NsSG: Nishitake SG, Sk: Sakanashi rain gauge, SkSG: Sakanashi SG, TgSG: Takagi SG. Solid triangles and open triangles indicate major peaks of post-caldera central cones and peaks of pre-caldera volcanoes, respectively. Contour interval is 200 m.

渡辺, 1985).

今回調査を行ったのは、カルデラ中東部に位置する中央火口丘群の<sup>ならお</sup>櫛尾岳（標高 1331 m）および高岳（標高 1592 m）から東外輪山の根子岳（標高 1433 m）にかけての北斜面である。その斜面は標高を増す毎に急傾斜となるが、高岳の北側山腹では傾斜は漸増し、900 m 付近から上部が 20° 以上の急斜面となっている。一方、根子岳北側斜面においては傾斜変換点が比較的明瞭で標高 900 m 付近より上部が傾斜 20° 以上の急斜面となっている。地質は、これら火山の溶岩・火砕岩とそれらを覆う中央火口丘群起源の降下テフラ累層からなっている（小野・渡辺, 1985）が、急崖には岩石が露出し、山頂付近は開析が進んでいて岩峰も多数存在している。この地域は阿蘇谷を流れる黒川の源流部にあたり、その本流（黒川）と支流である東岳川、泉川といった水系が発達しているが、約 600 m 以上の高標高域では降雨時以外に流水はない。森林や土地利用の状況は流域毎にやや異なっている。根子岳北斜面に位置する黒川（<sup>ふるえ</sup>古恵川）流域は、東端（第 2 支流）と西端の支流（第 1, 5, 6 支流）を除いて、森林の占める割合が高く、標高約 1000 m 以上の斜面では天然性広葉樹林が、それより低いところはスギ人工林となっている。東岳川および泉川の流域では、阿蘇を代表する景観である草地が広く認められるが、標高約 900 m 以上の斜面は、<sup>むりゅうぼくち</sup>無立木地や矮小化した森林となっている。

阿蘇火山では、これまで 1953 年 6 月と 1990 年 7 月など、豪雨による激甚な土砂災害が発生している。調査地域においては、とくに後者の豪雨によって多数の斜面崩壊・土石流が発生するなど、記録的な災害であったことが報告されている（熊本営林署・林業土木コンサルタント, 1991；一の宮町, 1995）。それらの災害復旧と今後の災害の抑止・軽減を目的として、熊本営林署（現熊本森林管理署）による民有林直轄治山事業や熊本県阿蘇事務所（現阿蘇地域振興局）による治山・砂防事業が行われている。

カルデラのほぼ中央部に位置する阿蘇山測候所（標高 1,443 m）の観測データ（1951～1980 年）によると、年降水量は約 3,400 mm に達しており、6 月～7 月にかけての降水量は 600 mm / 月程度ある多雨地域である。また、年平均気温は 10℃に満たず、最高気温も 30℃を越えることはない（高橋, 1986）。1 月～2 月の月平均気温は 0℃以下で、温帯地域に属しながら冬季は寒冷な気候となっていることが特徴である。

### 3. 2001 年 6 月 29 日豪雨の発生状況

2001 年 6 月は 18 日から 30 日にかけて、前線が本州付近に停滞するようになり、西日本では断続的に強い降雨が出現した。とくに 6 月 28 日から 29 日に前線が西日本に停滞して、熊本県と鹿児島県では大雨となり、浸水害や崖崩れなどが発生し、阿蘇カルデラ北西端付近の気象庁<sup>くらだけ</sup>鞍岳観測所では最大時間雨量 95 mm/hr（29 日 2 時～3 時）を記録している（気象庁, 2001）。

6 月 28 日は阿蘇カルデラ内で日雨量 100 mm 程度の降雨があったが、19 時～20 時頃ま

ではほぼ降り止んでいた。しかし、29 日 0 時過ぎ頃から再び降雨が始まり、徐々に激しい降雨となった。筆者らによる 3 地点の降雨量観測データに、気象庁 AMeDAS（5 地点）および熊本県土木部の土砂災害情報監視システム（20 地点）による観測データを加えた代表的地点における降雨量の時間変化を Fig. 2 に、カルデラとその周辺域における降雨分布を Fig. 3 に示す。6 月 29 日の日雨量は地点によってかなり差があるが、阿蘇カルデラ北西部から中東部にかけて 200 mm を越えており、とくに北西の鞍岳周辺部では 300 mm 近い豪雨となっている（Fig. 3A）。その降雨は午前 1 時～4 時の 3 時間ほどに集中しており、北西の阿蘇町狩尾付近で 200 mm 以上、中東部の根子岳北麓付近でも 180 mm 以上（ともに 3 時間雨量）と集中する部分が認められる（Fig. 3B）。降雨のピークは、カルデラ北西部で午前 2 時～3 時（時間雨量 88～96 mm）、中東部では約 1 時間ほど遅れて、午前 3 時～4 時（時間雨量 93～103 mm 以上）となっている（Fig. 3C, D）。阿蘇町狩尾地区を流れる徳仏川<sup>とくほとけがわ</sup>では降雨ピーク後の午前 3 時 30 分頃に土石流が発生し、民家を半壊するなどの大きな被害が発生した（植ほか、2001）。筆者の一人である宮縁が、民家半壊の被害を受けた河原誠喜氏に直接聞いた証言（2001 年 7 月 2 日）によると、午前 2 時頃より眠れないほど雨が激しくなり、河川の水の音が凄まじくなった 3 時頃に住居周辺を見回り始めたところ、水が家屋に侵入するとともに窓に流木が刺さっているのを確認したそうである。さらに同氏は、午前 3 時 30 分に別棟の納屋が流出しているのに気づいている。こうした証言から、その地区で土石流のピークが通過したのは、午前 3 時～3 時半までの間であることが

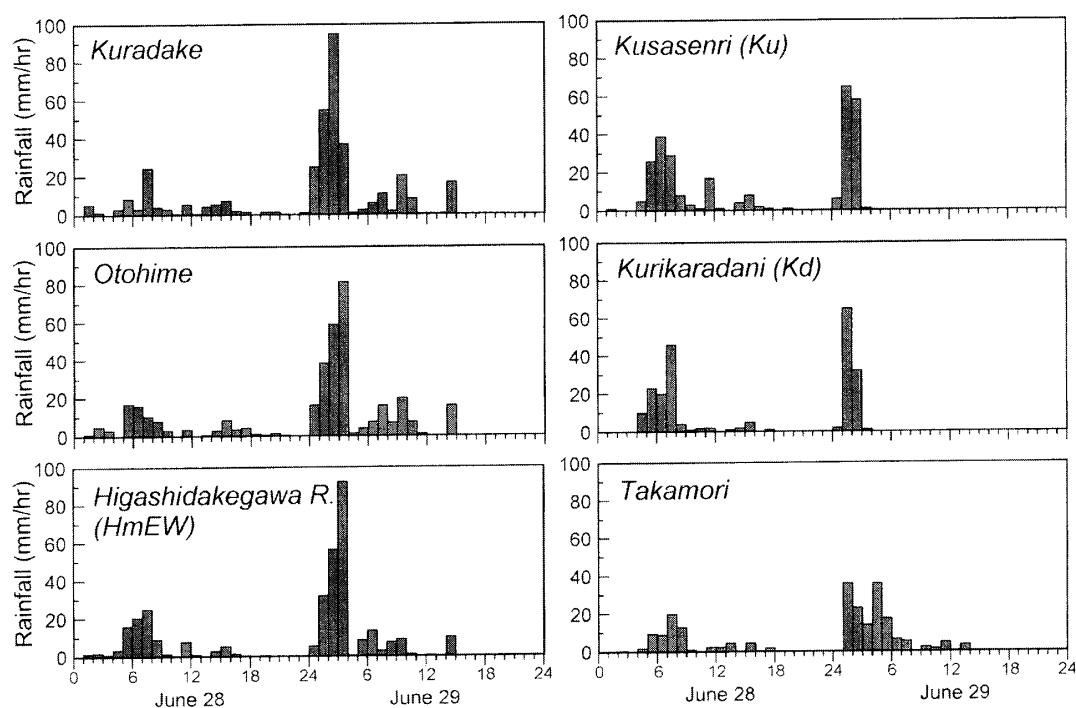


Fig. 2. Temporal changes in hourly rainfall on June 28–29, 2001. Data for Kuradake, Otohime, and Takamori are from the Japan Meteorological Agency. Data for Kusasenri and Kurikaradani are from the Kumamoto Prefectural Government.

判明した. 29日の午前4時以降, 降雨は徐々に穏やかとなり, その後は小さな降雨ピーク(時間雨量10~20 mm程度)が認められるものの, 13時~15時頃までにはほぼ終了している (Fig. 2).

2001年6月29日に阿蘇カルデラとその周辺域において発生した豪雨は, 総雨量としては多いところで240~280 mmと数年に一度程度出現する降雨であり, 過去の災害時よりも少ない値であった. しかし, その降雨は短時間に集中しており, 時間雨量が約100 mmに達する非常に強いものであった. 過去の災害時においては, 雨量観測地点が少なく, 降雨分布等について詳細な解析は行えないが, 今回の豪雨は短時間集中の強雨としては, 記録的なものであったといえる.

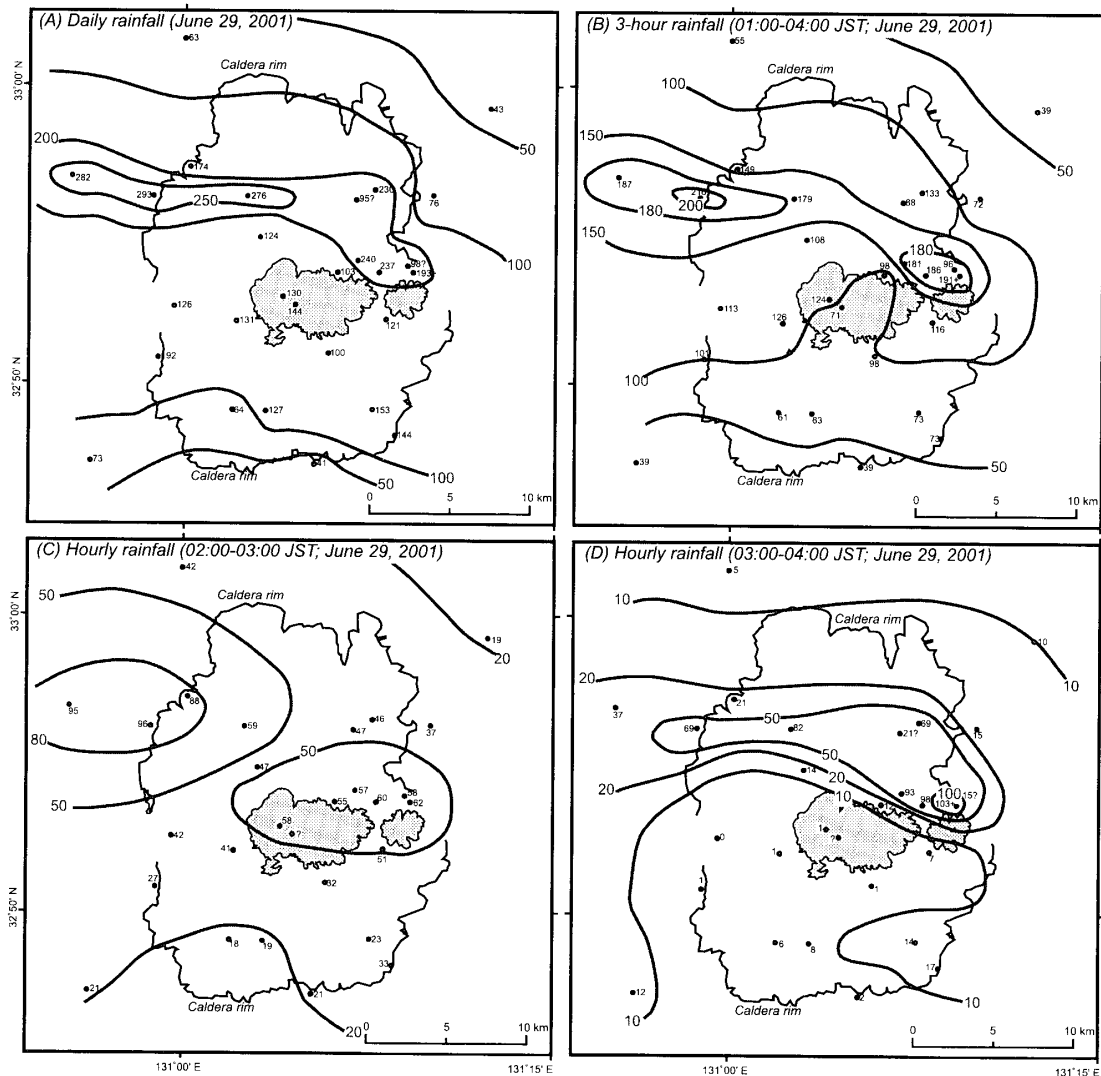
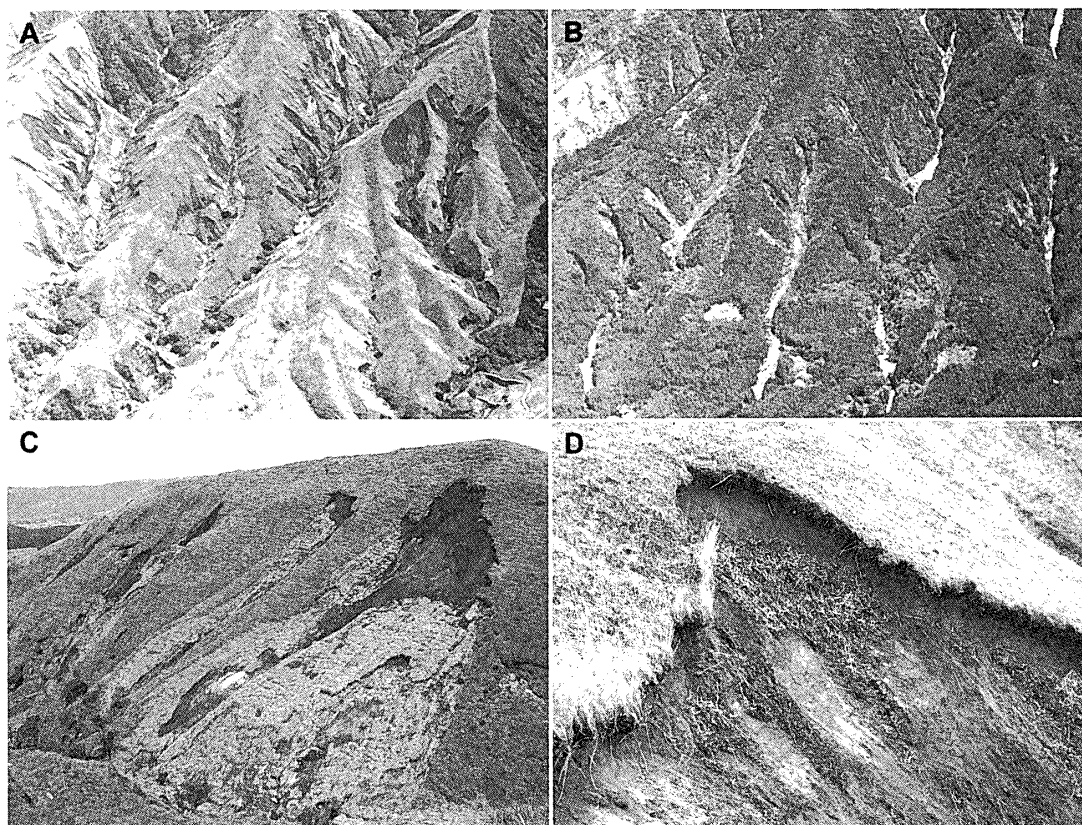


Fig. 3. Contour maps of rainfall (in millimeters) on June 29, 2001, in the Aso caldera region. Shaded areas indicate areas higher than 1,000 m in elevation.

#### 4. 斜面崩壊の分布と特徴

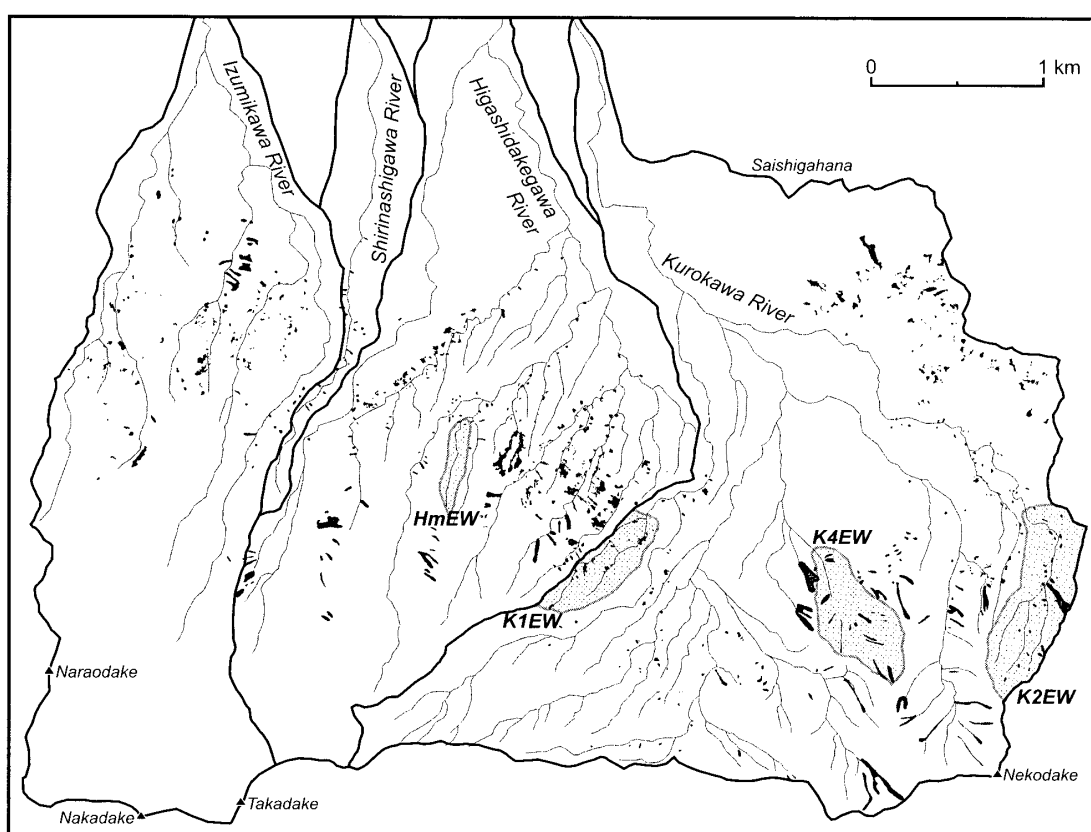
##### 4.1. 斜面崩壊の分布状況

今回の豪雨により阿蘇カルデラとその周辺域においては，斜面崩壊が発生した．その発生地域は降雨量の集中域と良く対応しており，カルデラ北西方の鞍岳周辺，北西カルデラ壁（阿蘇町狩尾地区など），カルデラ中東部を中心としている．その中でも，カルデラ中東部に位置する中央火口丘群の楯尾岳および高岳から東外輪山の根子岳にかけての北側斜面には多くの崩壊が認められた（Photo 1）．その斜面崩壊の実態を明らかにするため，現地調査を行うとともに空中写真判読によって崩壊地の分布を把握した．判読したのは熊本森林管理署によって 2001 年 12 月 12 日に撮影された縮尺 20,000 分の 1 空中写真である．その空中写真を，筆者の一人である大丸がアジア航測株式会社製 3 次元自動画像計測システム「計測名人」を用いてオルソ画像を作成した．斜面崩壊の位置や大きさは作成したオルソ画像を判読して，国土地理院発行 1：25,000 地形図「阿蘇山」および「根子岳」に投影した．



**Photo 1.** Photographs of landslides triggered by the 29 June 2001 rainstorm. (A) A oblique view of landslides on a grassed slope, the northeast foot of Takadake. (B) A oblique view of landslides on a forested slope, the north flank of Nekodake. (C) Shallow soil slips on a grassed slope in the Izumikawa River basin. (D) Head scarp of a landslide on a grassed slope. Height of the scarp is about 1 m. Photos (A and B) taken by the Kumamoto District Forest Office.

今回の豪雨による阿蘇カルデラ中東部での斜面崩壊は、楯尾岳および高岳、根子岳の北斜面とカルデラ壁の妻子が鼻付近の南西向きの斜面に分布しており (Fig. 4), 標高約 700 m 以上で傾斜が約  $25^{\circ}$  を越える斜面に多く認められる. 流域毎の崩壊状況は Table 1 に示すとおりで, 崩壊箇所数は 711 に達している. 流域別の全崩壊面積は, 黒川流域が約  $0.21 \text{ km}^2$ , 東岳川流域が約  $0.12 \text{ km}^2$ , 尻無川流域が約  $0.005 \text{ km}^2$ , 泉川流域が約  $0.06 \text{ km}^2$  であり, それぞれ流域面積の 2.39 %, 2.07 %, 0.63 %, 1.18 % を占めている. 崩壊は, 阿



**Fig. 4.** Distribution of landslides triggered by the 29 June 2001 rainstorm, interpreted from aerial photographs taken by the Kumamoto District Forest Office on December 12, 2001. Shaded areas denote experimental watersheds.

**Table 1.** Summary of landslides triggered by the June 29, 2001 rainstorm.

Basin	Kurokawa River	Higashidakegawa River	Shirinashigawa River	Izumikawa River	Total
Area ( $\text{km}^2$ )	8.939	5.853	0.853	5.179	20.823
Number of landslides	338	229	21	123	711
Total area of landslides ( $\text{m}^2$ )	213,363.0	121,386.4	5,345.5	61,140.9	401,235.8
Areal ratio of landslides (%)	2.39	2.07	0.63	1.18	1.93
Average area of landslides ( $\text{m}^2$ )	631.3	530.1	254.5	497.1	564.3



蘇地域を代表する景観である草地斜面を中心に起こっている (Photo 1A, 1C) が、森林斜面においても存在している (Photo 1B). こうした植生との関係をみると、東岳川や黒川の流域では標高 700 ~ 800 m 付近の草地斜面で多数の崩壊が発生しているが、標高 800 m より高い森林斜面や無立木地においては崩壊が少ない。ただ、大部分が森林に覆われる黒川流域では、植生に関係なく崩壊が認められる。このように、斜面崩壊と植生との関係は明瞭ではなく、地形や地質、植生、降雨分布など、すべての要因が関与していると考えられ、それらの関係解析は今後の課題である。

#### 4.2. 崩壊の地質学的特徴

今回の崩壊は、溶岩・火砕岩を覆う阿蘇中央火口丘群起源の降下テフラが厚く堆積する斜面において発生している。調査地域は、現在も活動が続ける中岳火口の北東域にあたり、埋没黒ボク土層が挟在するテフラ累層の厚さは、過去約 1 万年間でも 10 m 以上に達している (宮縁・渡辺, 1997)。そのテフラ累層は、阿蘇中央火口丘群起源の降下火山灰とスコリア、それらの間に挟在する埋没黒ボク土層からなる。活動の休止期あるいは静穏期を示す埋没黒ボク土層によって、過去約 6,300 年間 ( $^{14}\text{C}$  年代) のテフラ累層は上位より N1 ~ N13 という 13 の活動期に区分されている (渡辺, 1992; 宮縁・渡辺, 1997)。指標となるテフラとして、N2 期に中岳 N2 スコリア (略称 N2S), N4 期に往生岳スコリア (OjS), N6 期に杵島岳スコリア (KsS), N 7 期に阿蘇中央火口丘第 1 軽石 (ACP1), N13 期に広域火山灰である鬼界アカホヤ火山灰 (K-Ah; 町田・新井, 1978) が存在している。模式地 (根子岳北東約 2.5 km) におけるテフラ層序と各層の諸性質は Fig. 5 に示す。なお、この図における粒度組成のデータは、レーザー回折式粒度分布測定装置 (Malvern 社製 Mastersizer S) による分析値であり、土壌硬度は山中式土壌硬度計 (山中・松尾, 1962) による貫入値である。

滑落崖の位置は斜面頂部であったり、下部であったりと多様であるが、崩壊深は 1 m 程度のものが多く、崩壊はすべて降下テフラ累層内で発生していることがわかった (Photo 1D)。また、崩壊の規模は大小さまざまであるが、全流域における 1 箇所あたりの平均崩壊面積は約 560  $\text{m}^2$  であった (Table 1)。

斜面崩壊の地質学的な特徴を明らかにするため、黒川第 1 支流の標高約 760 m の左岸斜面に位置している崩壊地で調査を行った (Fig. 1)。その崩壊は、今回起こった崩壊の中では小規模なもので、南南西向きのほぼ平滑な草地斜面で発生しており、崩壊長 9 m、幅 10 m、深さ約 1.2 m、崩壊面の傾斜は  $38^\circ$  であった。滑落崖のテフラ層を観察すると、表層から約 70 cm 程度が草本の根茎が侵入する砂質な火山灰層で、その下位 47 cm がシルト質の埋没黒ボク土層となっていた。その黒ボク土層直下の褐色シルト質火山灰層 (OjS が混在) 付近 (表層から約 1.2 m 深) をすべり面として、斜面崩壊が発生していることが確認された。こうした事実を反映して、上部と側面の滑落崖は黒色を、すべり面の下位である斜面中～下部は褐色を呈しており、今回発生した大部分の斜面崩壊に共通した特徴となっている。このことは、1990 年 7 月 2 日の斜面災害で指摘されている特徴 (林・梅村,

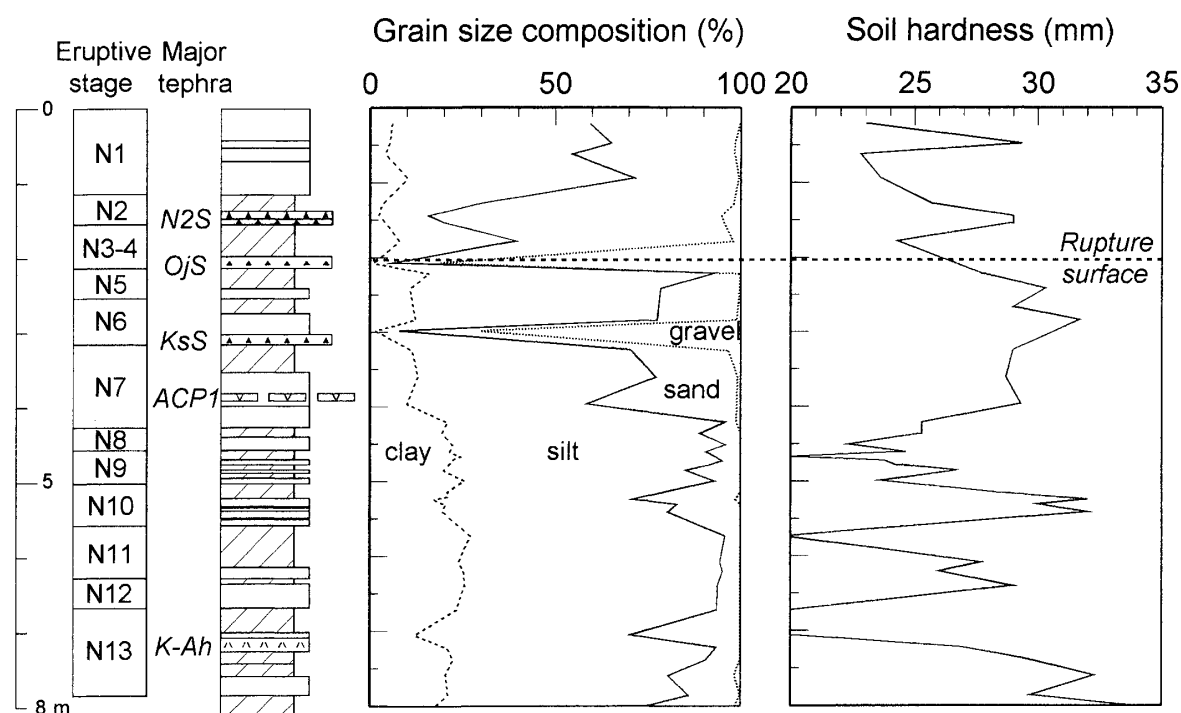


Fig. 5. Schematic tephra stratigraphy near the study site and vertical variations in grain size and soil hardness of tephra layers deposited over the last 6,300 years. Soil hardness was measured by Yamanaka-type soil hardness tester (Yamanaka and Matsuo, 1962). Marker tephra layers are Nakadake N2 scoria (N2S), Ojodake scoria (OjS), Kishimadake scoria (KsS), Aso central cone pumice 1 (ACP1) and Kikai Akahoya ash (K-Ah). Stratigraphic column symbols are as follows: buried blackish soil layers (diagonal), sandy to silty ash (unornamented) and scoria (solid triangle).

1991; 清水ほか, 1992) と類似している。また, 1953 年 6 月に中央火口丘群南側斜面で発生した多数の斜面崩壊 (橋本, 1954; 川口・難波, 1954) も同様の形態をとっているようである。OjS の暦年較正年代は約 3,000 年前と報告されている (宮縁・渡辺, 1997; 宮縁ほか, 2003 b) ので, 調査地域においては 3,000 年前付近の層準をすべり面として崩壊が発生していることが判明した。

## 5. ラハールの発生実態と土砂流出

### 5.1. ラハールの概要と発生実態

2001 年 6 月 29 日の豪雨によっては 700 を越える斜面崩壊が発生し, その崩壊土砂は崩壊地直下に残存することなくラハールとして一気に流下して, 下流部の治山・砂防ダムに堆積したり, 細粒土砂はさらに下流域へと運搬された。泉川や東岳川流域で治山ダムに捕捉されたラハール堆積物を観察すると, 巨礫の量は少なく大部分が砂からシルト粒子で構成されていた。その粒度組成は崩壊が起こった斜面の構成物質である降下テフラの粒度組成

(Fig. 5) と類似したものであり、流下途中に溪床に存在する礫などをほとんど取り込まなかったことを意味している。これらの流域においても高標高域の溪床には岩塊が堆積しているが、そうした高標高域では斜面崩壊が少なく (Fig. 4), 岩塊はほとんど運搬されなかったものと推定される。

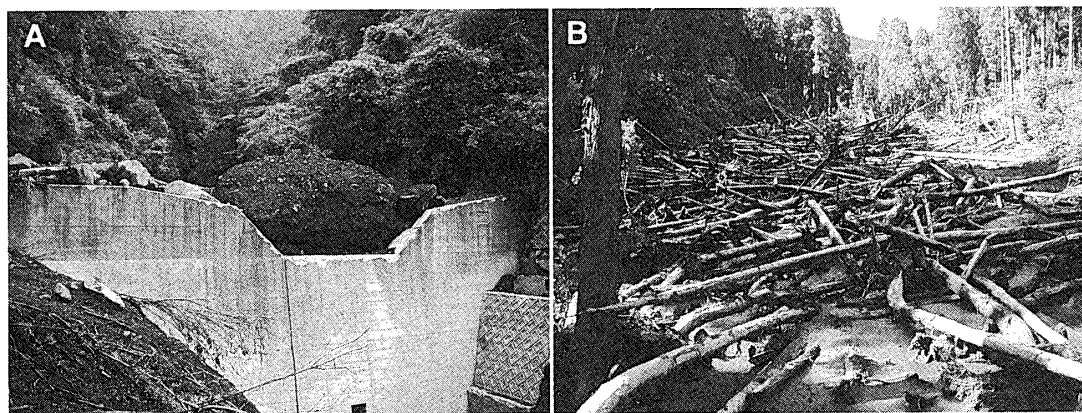
一方、山体が深く開析されている根子岳に源を発する黒川流域では、ラハール堆積物に多量の巨礫が含まれていた (Photo 2A)。根子岳北面では尾根付近の高標高域でも崩壊が発生している (Fig. 4) だけでなく、災害以前の溪床にも多量の岩塊が存在していた。それらがラハールによって運搬されたか、あるいは深く開析された流路沿いの斜面をラハールが侵食して、新たな巨礫を生産したものと考えられる。また、スギ人工林の割合が高い黒川第4支流の斜面崩壊では多量の流木が生産されたが、それらはラハールによって土砂とともに水平距離で 750 m ほど運搬され、すべて治山ダムに捕捉されて堆積した (Photo 2B)。

このように、ラハール堆積物は流域の特徴や斜面崩壊の発生位置を反映した粒度組成を有していることが明らかとなった。

## 5.2. ラハール発生溪流の分布

熊本県土木部による土砂災害情報監視システムでは、2001 年 6 月 29 日時点で阿蘇カルデラ内の 12 溪流にラハールを感知するワイヤーセンサーが設置されていた (Fig. 1 の四角形)。ワイヤーセンサーは治山・砂防ダムの水通し部分に 4 本ずつ張られており、それぞれのワイヤーがラハール通過によって切断されると、その時刻が基地局に無線で通知されることになっている。

ワイヤーセンサー切断によって判明するラハール発生溪流の分布 (Fig. 6) をみると、3 時間で 150 ~ 180 mm の降雨が集中したカルデラ中東部では、5 箇所中 4 箇所でラハールが通過したことがわかった。この地域には筆者らの 3 試験流域も存在し、ラハールによって水位計センサーが破壊されるなどの被害が出ている。その破壊された時刻とワイヤーセンサーの切断時刻は 3 時 30 分 ~ 50 分頃に集中しており、降雨のピーク (3 時 30



**Photo 2.** The June 29, 2001 lahar deposits. (A) A boulder transported by the lahar. Spillway of the dam is 3 m wide. (B) Large amounts of woody debris trapped by a check dam in a forested watershed. Diameter of woody debris is about 20 cm.

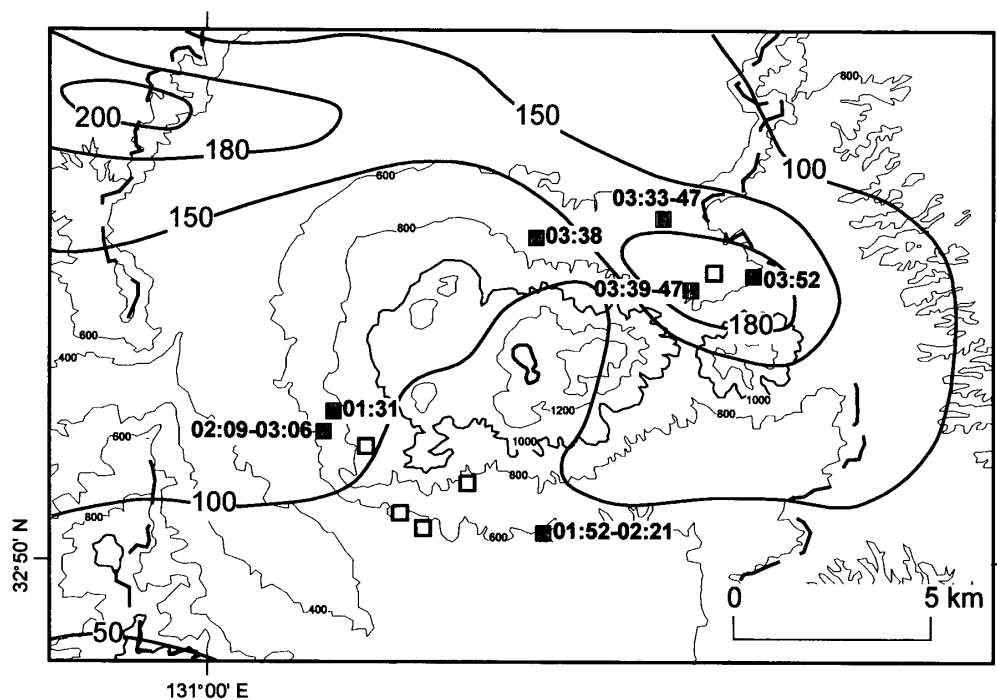


Fig. 6. Distribution of lahars generated by the 29 June 2001 rainstorm, detected by wire sensors at sediment retention dams. Data are from the Kumamoto Prefectural Government. Solid squares with time and open squares show sites of lahar occurrence and no lahar occurrence, respectively. Contours denote distribution of 3-hour rainfall (in millimeters; 01:00–04:00 JST). Broken lines indicate rim of Aso caldera.

分～40分)とよく一致している。

一方、3時間の降雨量が100 mm以下であった中央火口丘群南西から南側斜面においては7箇所中3箇所センサーの切断が確認されたが、その切断時刻は1時30分～3時頃までと、かなりの幅がある。

このように、降雨量が少ない地域でもラハールの発生は認められるが、降雨が集中した地域ではラハールの発生確率は高く、その発生時刻は降雨のピークとほぼ一致していることがわかった。

### 5.3. 2001年6月29日における降雨流出状況

2001年6月29日の災害時に阿蘇カルデラ内では、熊本県土木部によって6箇所の地点で超音波水位計と電波流速計が設置されており、降雨による流出状況が観測されていた。観測地点は、中央火口丘群北麓の黒川(古恵川; 標高585 m)、東岳川(標高580 m)、西岳川(標高570 m)と、同南麓の仮川(標高465 m)、高木川(標高480 m)、倶利伽羅谷川(標高515 m)である(Fig. 1の逆三角形; Table 2)。すべての地点は、両岸に護岸工が施工されており、流路は台形断面に近似して、流量計算を行うことができた。なお、水位と流量のデータは10分間に一度無線で送信され記録されている。雨量は流域内か、できるだけ近接する地点での観測データを採用した。

降雨流出量の計算結果を Fig. 7 および Table 2 に示す. 各観測地点を通過したラハールは多量の細粒土砂を含んでいたと考えられ, ここに示した流出量はそれらの土砂と水を合わせたものである.

まず降雨が集中した北斜面 3 流域における流出結果をみると, どの流域も降雨開始後すぐに流出が始まり, 降雨が強くなるとともに流出が急増している. 流出のピークは, 降雨ピークから 20 ~ 40 分後に出現している. 東岳川でのピーク流出量は 8.5 mm, 総流出量は 68 mm に達し, 流出率は 0.283 であった. また西岳川ではピーク流出量 9.9 mm, 総流出量 85.3 mm で流出率は 0.37 となった. 一方, 黒川では流出の波形は類似しているものの, ピーク流出, 総流出量ともに少なく, 流出率は 0.12 にとどまった. これらの 3 流域では降雨強度が小さくなると, 流出量も急減しており, 流出は降雨の強弱と敏感に対応していることがわかった.

降雨がやや少なかった南斜面の 3 流域でも降雨に対応して流出量に変化しているが, 流出のピークは降雨ピークから 50 分 ~ 2 時間遅れで出現している. また, ピーク後の流出は北斜面の流域とは異なり, 漸減しながら比較的長時間継続していた.

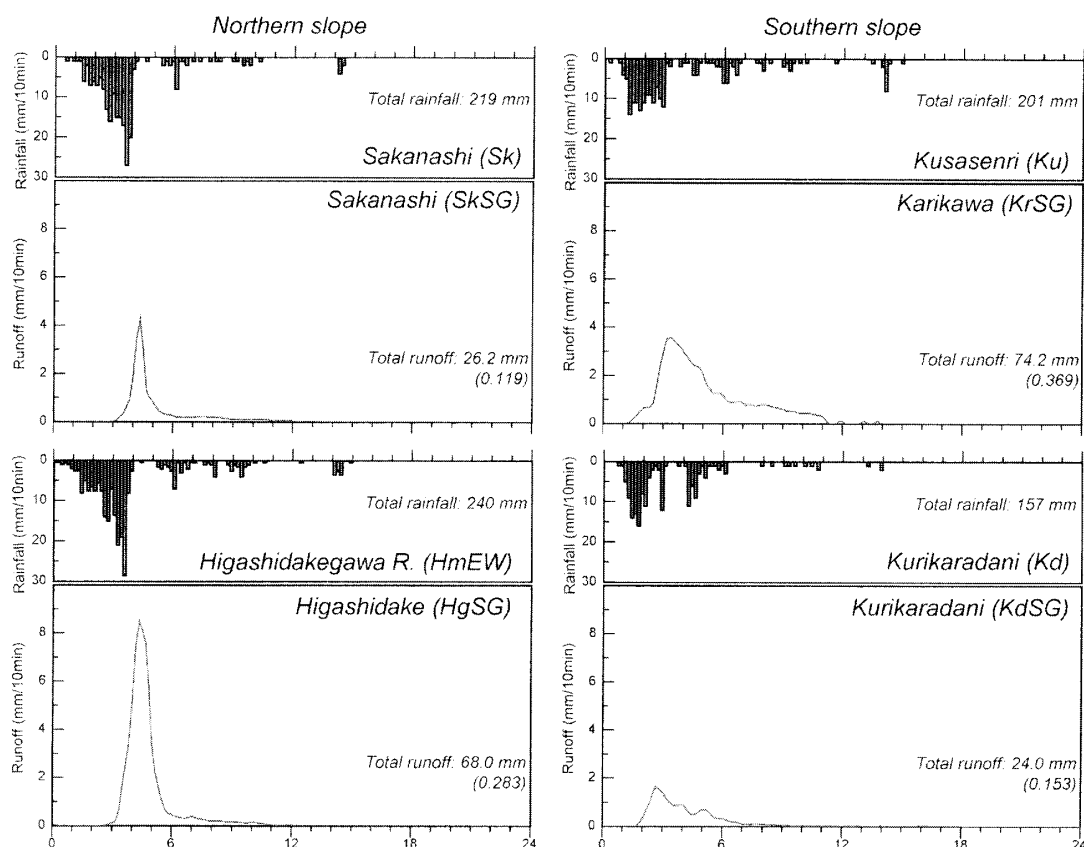
以上のように, 降雨量や強度を反映して, 北側斜面と南側斜面とではラハールによる流出状況に, 差異が認められた.

#### 5.4. ラハールによる土砂流出

熊本県による土砂災害情報監視システムとは別に, 筆者らは中央火口丘群北東部と根子岳北斜面での 3 つの試験流域で降雨流出量の観測を行っていた (Fig. 1 の黒丸). それらの試験流域ではラハール通過によって観測機器が破壊されるなど, 完全なデータ取得はで

**Table 2.** Runoff characteristics of basins in Aso caldera during the June 29, 2001 rainstorm event.

Basin	<i>Northern slope</i>			<i>Southern slope</i>		
	Kurokawa River	Higashidakegawa River	Nishitakegawa River	Karikawa River	Takagigawa River	Kurikaradanigawa River
Stream-gauging station (elevation; m)	Sakanashi (585 m)	Higashidake (580 m)	Nishitake (570 m)	Karikawa (465 m)	Takagi (480 m)	Kurikaradani (515 m)
Basin area (km <sup>2</sup> )	8.939	5.853	8.231	6.589	4.243	5.820
Rainfall-gauging station	Sakanashi	Higashidake main stream watershed	Sensuikyo	Kusasenri	Kusasenri	Kurikaradani
Total rainfall (mm)	219	240	231	201	201	157
Maximum rainfall (mm/ 10 min)	27	29	22	14	14	16
Total runoff (mm)	26.2	68.0	85.3	74.2	21.0	24.0
Peak runoff (mm/ 10 min)	4.3	8.5	9.9	3.6	1.4	1.7
Runoff coefficient	0.119	0.283	0.369	0.369	0.105	0.153



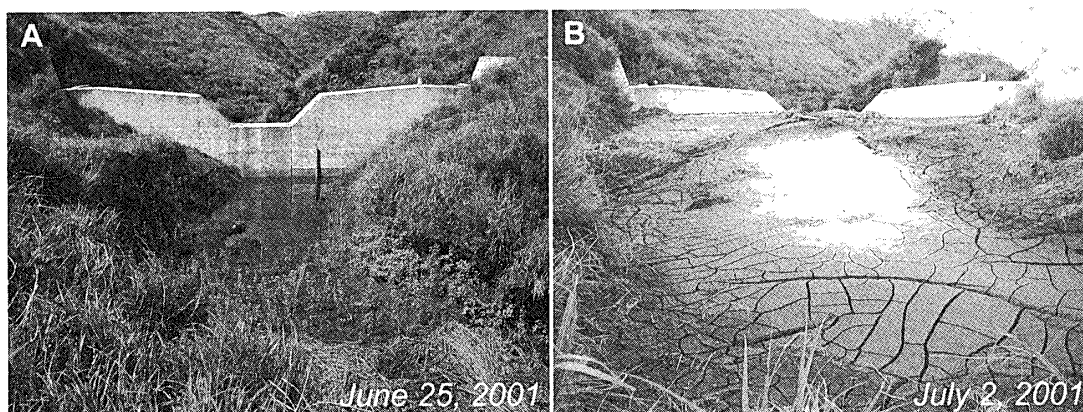
**Fig. 7.** Hydrographs of the 29 June 2001 rainstorm event at four streams located on the northern and southern slopes of the Aso central cones. Runoff at each stream was calculated by water level and velocity data collected by the Kumamoto

きなかったが、災害発生前に流域末端の治山ダム湛水池において精密なレベル測量が実施されていた。災害後に同様の測量を行うことにより、災害時にダムに堆積した土砂量を正確に把握することが可能であった。この堆積土砂量を、ラハールによって流域から流出した土砂量として取り扱う。

森林に覆われる東岳川本流試験流域（面積  $0.058 \text{ km}^2$ ; Fig. 1 および Fig. 4 の HmEW）では、災害後も治山ダムは未満砂で、ラハールによって流出したほぼ全量の土砂を捕捉することができた。その流出土砂量は約  $210 \text{ m}^3$  で、流域面積で除した比流出土砂量は  $3.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$  となった。

草地が優占する黒川第1支流試験流域（面積  $0.175 \text{ km}^2$ ; Fig. 1 および Fig. 4 の K1EW）では、ダム直上流側が高さ  $3 \text{ m}$  ほど未満砂状態であった（Photo 3A）が、今回の災害で多量の細粒土砂が堆積して、一気に満砂となった（Photo 3B）。したがって全量の土砂を捕捉することができず、一部はさらに下流へ流出している。捕捉できた土砂量は約  $730 \text{ m}^3$  で、比流出土砂量は  $4.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$  であった。越流した土砂の量は不明であるが、それらを合わせても  $10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$  のオーダーであろう。

草地および森林からなる黒川第2支流試験流域（面積  $0.351 \text{ km}^2$ ; Fig. 1 および Fig. 4 の



**Photo 3.** Downstream views of a check dam before (A) and after (B) the June 29, 2001 rainstorm event. Spillway of the dam is 3 m wide.

K2EW) では、上流部で 0.86 ha の大きな斜面崩壊が発生し、さらにラハールは溪岸を侵食して巨礫などを運搬した。それらの土砂によってダムは満砂し、一部の土砂は越流している。ダムによる捕捉土砂量は約 1,060 m<sup>3</sup> で、比流出土砂量は  $3.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$  であった。この流域では本流合流点までの治山・砂防ダムがすべて満砂していることから、観測地点を越流した土砂の量は多く、それらを合わせると、ラハールによる流出土砂量は  $10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$  オーダーに達する可能性もある。

また、2001 年 3 月 5 日まで降雨流出観測を行っていた黒川第 4 支流試験流域（面積 0.242 km<sup>2</sup> ; Fig. 4 の K4EW）においても災害前後のダム堆積土砂量を把握することができた。災害前にはダム上流側には 750 m<sup>3</sup> ほどの容量があったが、災害によって多量の土砂や巨礫が堆積して満砂した。この流域でも満砂後は土砂と水が越流しており、全量を捕捉することはできなかったが、少なくとも約 750 m<sup>3</sup> がダムに堆積した。これを流域面積で割ると  $3.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$  となった。

これらのダム堆積土砂量から推定したラハールによる流出土砂量は、流域によって若干の差はあるが、概ね  $10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$  のオーダーであり、ダムを越流した土砂をやや多く見積もると、 $10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$  のオーダーに達する可能性も考えられた。

## 6. 考 察

### 6.1. 斜面崩壊の原因となった堆積物の性質

2001 年 6 月 29 日豪雨による斜面崩壊では、表層から深さ 1 m 付近に存在する黒ボク土層と褐色火山灰層との境界付近がすべり面となっていることが明らかとなった (Photo 1D)。これは 1953 年や 1990 年災害時と共通した特徴である。清水ほか (1992) はこの点に注目し、すべり面上下の土層で試料を採取して飽和透水係数を測定している。実際には、上位の黒色土層は複数の黒色火山灰層と埋没黒ボク土層に細分でき、層位によって飽和透水係

数の値も異なると考えられ、彼らが具体的にどの層位から試料を採取したのか明らかではない。しかし、すべり面下位の土層が上位の土層に比べて、 $1/3 \sim 1/20$  ほど透水性が低く、その透水性の差が崩壊の原因となった可能性を示している。

今回の災害発生地域に近接する阿蘇火山テフラの模式地における層序と各層の粒度組成、土壌硬度の鉛直変化は Fig. 5 に示したとおりである。この模式地点は平坦地にあるため、崩壊が発生した急傾斜の斜面に比べると、テフラ累層の保存が良く、層厚は全体的に厚くなっている。そのため、崩壊斜面では表層から 1 m 深前後にあったすべり面が、模式露頭では約 2 m 深の層準に存在している。各層の粒度組成は層位によって変化しているが、すべり面付近である OjS を境界として差が認められる。礫成分を有する粗粒なスコリア層を除くと、すべり面上位では砂成分が多いのに対して、下位の N5～N6 期堆積物の層準では粘土・シルト成分が大部分を占めている。また、土壌硬度の値はすべり面下位の N5～N7 期の堆積物でとくに大きくなっている。つまり、すべり面上位は粗粒で柔らかい堆積物であるのに対し、下位は細粒で硬く締まった堆積物であることがわかった。これらの堆積物の特性の違いが、清水ほか (1992) が指摘する透水性の差の原因の一つと考えられる。

## 6.2. 過去の災害時との流出土砂量の比較

阿蘇火山においては、1953 年（昭和 28 年）6 月と 1990 年（平成 2 年）7 月においても激甚な土砂災害が発生している（Table 3）。

1953 年の土砂災害は、梅雨前線の活動による豪雨で発生したもので、6 月 25 日から 28 日までの降雨量は、阿蘇山で 733.8 mm、カルデラ北東部の一の宮町宮地で 876.0 mm に達した（岡上, 1954）。とくに阿蘇山での最大時間雨量は 49.1 mm であり、時間雨量 10 mm 以上の降雨が 14 時間にわたって継続した。この記録的な豪雨により、阿蘇火山においては、多数の斜面崩壊が発生し、土石流（本論でいうラハール, 1990 年も同様）として流下したと報告されている（川口・難波, 1954）。被害はカルデラ北側の阿蘇谷よりも南側の南郷谷で大きく、中央火口丘群南側斜面を流下する河川沿いでは、多くの崩壊が起こってい

**Table 3.** Comparison of three landslide-induced lahar disasters occurred at Aso Volcano.

Event	June 1953	July 1990	June 2001
Total rainfall (mm)	734 (June 25-28)	620 (June 28-July 3)	336 (June 28-29)
Maximum daily rainfall (mm/day)	432 (June 26)	375 (July 2)	237 (June 29)
Maximum hourly rainfall (mm/hr)	49.0 (June 26)	71.0 (July 2)	97.5 (June 29)
Number of landslides	—	1177	711
Total area of Landslides (km <sup>2</sup> )	3.5	2.3	0.4
Sediment discharge volume (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	$3.0 \times 10^4$	$3.1-3.9 \times 10^4$	$3.0-4.1 \times 10^3$

Data for 1953 disasters are from Okanoue (1954) and Kawaguchi and Namba (1954), and for 1990 from Kumamoto District Forest Office and Ringyo Doboku Consultants (1991), Hirano and Hashimoto (1991) and Ishikawa et al. (1992), respectively.



る（荻原・小幡，1954）．さらに崩壊土砂は白川を流下し，その下流域である熊本市において多量に氾濫堆積して，多くの家屋や建物が泥によって埋没し，熊本県下で563名の死者が出る歴史的な大災害となった．崩壊面積は山腹崩壊が $0.5\text{ km}^2$ ，溪岸崩壊が $3\text{ km}^2$ 程度であり，生産土砂量はそれぞれ $1700 \times 10^3\text{ m}^3$ と $1200 \times 10^3\text{ m}^3$ と見積もられ，この災害による流出土砂量は約 $3.0 \times 10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$ と概算されている（川口・難波，1954）．

1990年7月の土砂災害も梅雨前線の活発化による豪雨で発生したものである．一の宮町における6月28日から7月3日までの連続雨量は620 mmであり，なかでも7月2日には日雨量375 mm，最大時間雨量71 mmという記録的な豪雨であった．この災害では，カルデラ中東部の高岳および根子岳北斜面の民有林直轄治山事業地内において1,177箇所，総面積 $2.33\text{ km}^2$ に達する斜面崩壊が発生した（熊本営林署・林業土木コンサルタンツ，1991）．崩壊土砂は土石流として流下する過程で溪岸沿いの立木を取り込み，一の宮市街地付近に多量に氾濫堆積した．この豪雨に伴う斜面崩壊と土石流によって，黒川（古恵川）の上流部（約 $9.3\text{ km}^2$ ）から流出した土砂量は，空中写真判読から36万 $\text{m}^3$ （平野・橋本，1991），空中写真および河床縦横断測量から29.1万 $\text{m}^3$ （石川ほか，1992）と推定されている．これらの結果より，1990年7月の土砂災害による流域からの流出土砂量は， $3.1 \sim 3.9 \times 10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$ となり，1953年の災害とほぼ同じ値であった．

2001年6月29日の豪雨は，総雨量としてはそれほど多いものではなかったが，最大時間雨量は約100 mmに達する記録的なものであった．前述したように，今回の災害時における流出土砂量は $10^3\text{ m}^3/\text{km}^2$ オーダーであり，過去の災害時と比較すると1オーダー小さい値であった．また，1990年には総面積約 $2.33\text{ km}^2$ の斜面崩壊が発生しているのに対し，2001年はその1/6程度である約 $0.40\text{ km}^2$ であった．こうした崩壊の箇所数や面積，崩壊土砂量の違いが，流出土砂量の差として現れているものと考えられる．阿蘇カルデラにおいては突発的な豪雨災害時における流域からの流出土砂量は $10^3 \sim 10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$ オーダーであり，こうした値は今後の治山・砂防計画を立てる上での基礎データとなるであろう．

### 6.3. 阿蘇カルデラ中東部における斜面災害の特徴ーテフラ層崩壊発生型ラハールー

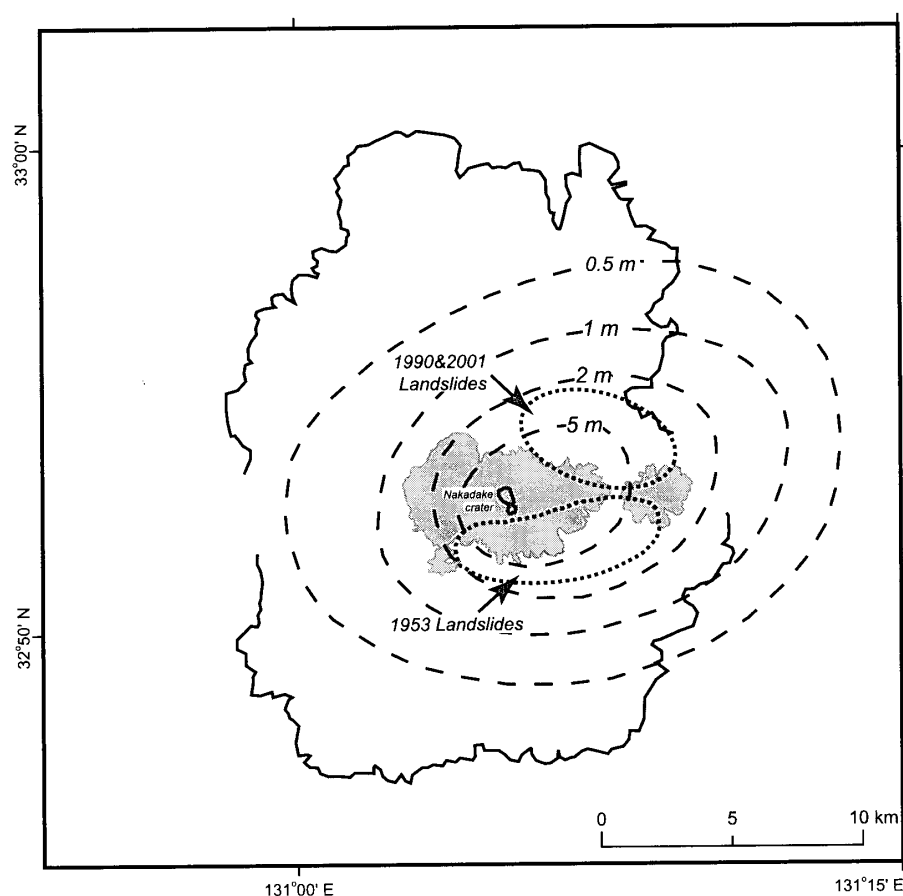
阿蘇火山においては，これまでも豪雨災害時にラハールの発生が確認されているが，それ以外の時期についてはラハールの発生や被害について，ほとんど報告されていない．観測体制の整備が最近まで行われていなかったことにも起因しているが，実際にも多量の土砂を運搬するようなラハールの発生頻度が低かったものと考えられる．

これまで筆者らが7年間にわたって行ってきた黒川第2支流試験流域（Fig. 1のK2 EW）における観測では，日雨量が100～200 mmに達する豪雨が年間に数回出現したが，1回の降雨による流出土砂量は最大約 $3.0 \times 10^2\text{ m}^3/\text{km}^2$ であり，大部分は $5.0 \times 10^1\text{ m}^3/\text{km}^2$ 以下と少なかった．その原因を明らかにするため現地調査を行ったところ，溪床にはラハールの運搬材料となる不安定な土砂が少ないことが判明した．流路沿いの斜面からは主に冬季の凍上融解等による斜面侵食で土砂が生産されるが，その大部分は砂成分以下の細粒土砂であるために，少ない降雨流出でも容易に運搬される．つまり今回の災害時のような斜

面崩壊による多量の土砂生産がないと、規模の大きなラハールは発生しないものと推定される。

前述したように、ワイヤーセンサーによるラハール通過時刻は降雨のピークとほぼ一致していた。また、2つの試験流域（黒川第1支流および第2支流）での観測データをみると、ラハールによって観測機器が破壊されたのは、最大10分間雨量を記録した直後（10分以内）であった。面積が1 km<sup>2</sup>に満たない小流域では、降雨のピークから最大でも10分以内にラハールが通過している。さらに、6～9 km<sup>2</sup>の流域においても降雨と流出のピークのずれは20～40分であった。これらのことから、降雨のピーク時に発生したと考えられる斜面崩壊による土砂は、崩壊地直下に残存することなく、ほぼ同時に溪床を流下したようである。つまり、調査地域におけるラハールは、溪床の不安定土砂が流動化するものではなく、テフラが堆積する斜面での崩壊による土砂が一気に流動化して発生することが特徴である。こうしたプロセスによって起こるラハールを、本論ではテフラ層崩壊発生型ラハール（tephra-slip-induced lahar）と呼ぶ。

調査地域における斜面崩壊は、約3,000年前の層準にすべり面が生じて、その上位のテフラ累層が崩落するという形態をとっている。その崩落物質となる最近約3,000年間の噴出物（地表からOjS間の全テフラ）の層厚分布をFig. 8に示した。埋没土壤層を含むテフラは、中岳付近を中心として東北東方向へ伸びる楕円状に分布している。今回の調査地域における約3,000年間のテフラの層厚は2～5 m程度であり、発生した斜面崩壊の厚さ（約1 m）よりもかなり大きな値である。これは、層厚分布データがテフラが比較的良く保存されている緩斜面や平坦地を中心に得られたためである。実際に崩壊が起こった斜面は20°以上の急傾斜であるため、Fig. 8に示したような厚いテフラは残存していない。Fig. 8には2001年6月の災害だけでなく、これまでの報告（橋本，1954；川口・難波，1954；谷，1975；熊本営林署・林業土木コンサルタンツ，1991）を参考に、1953年6月と1990年7月における主要な斜面崩壊分布域を示した。この図によると、阿蘇火山で発生した過去3回の土砂災害ともに、斜面崩壊の主要分布域は過去3,000年間のテフラの厚さが2 m以上の地域内にあることがわかる。この分布域における土砂移動現象の形態は酷似しており、いずれもテフラ層内の浅層崩壊とその土砂が下流域へ運搬されるラハール、つまり本論で呼ぶテフラ層崩壊発生型ラハールである。過去には、これら以外の地域でも斜面崩壊は発生しているが、その形態や崩壊深、土砂量は異なったものとなっている。テフラ層崩壊発生型ラハールを構成する土砂は細粒分を主体としているために、治山・砂防施設がない状態では下流域まで土砂が流下し、1953年や1990年には居住地域にも多大な被害をもたらした。このラハールは、阿蘇火山全体というよりはむしろカルデラ中東部を中心に認められる現象であり、その発生は崩落物質であるテフラの層厚分布と密接に関係している。崩壊の発生は、斜面の傾斜や降雨の分布・強度にも依存するが、Fig. 8はテフラ層崩壊発生型ラハールによる災害発生のポテンシャルを示しているといえ、今後の災害予測に有効であると考えられる。



**Fig. 8.** Distribution of thickness of tephra layers between ground surface and Ojodake scoria (ca. 3 cal ka) in and around Aso caldera. Shaded areas indicate areas higher than 1,000 m in elevation. Dotted outlines show areas of landslides in 1953, 1990 and 2001.

## 7. ま と め

2001 年 6 月 29 日豪雨によって阿蘇火山で発生した土砂災害について、現地調査や各種観測データを分析した結果、以下の点が明らかになった。

災害をもたらした降雨は、多いところで日雨量 200 mm 程度であったが、6 月 29 日未明の 3 時間程度に集中しており、最大時間雨量は 90 mm 以上に達するなど、記録的な強雨であった。その降雨分布はカルデラ北西部と中東部で多く、災害発生地域の分布ともよく対応していた。

豪雨による斜面崩壊が多発したカルデラ中東部の植尾岳～根子岳の北斜面について、空中写真のオルソ画像を判読した結果、崩壊箇所数は 711 に達し、全崩壊面積は流域の 2 % 程度を占めることがわかった。平均崩壊面積は約 550 m<sup>2</sup>で、崩壊深は 1 m 程度の浅層崩壊が多かった。崩壊のすべり面は、黒色土層と褐色土層の境界付近に生じており、これはすべり面上下のテフラ層の粒度組成、土壌硬度、透水性の違いに起因するものであることが判明した。

斜面崩壊によって生産された土砂は、一気にラハールとなって下流へと運搬された。今回の降雨による流出率は流域によって差があるが0.1～0.4程度で、流出土砂量は $10^3\text{m}^3/\text{km}^2$ オーダーであった。

阿蘇カルデラ中東部においては、斜面崩壊など多量の土砂生産が発生した時に規模の大きいラハールが発生しており、溪床堆積物流動型で大きなラハールはほとんど起こらないと考えられる。これは調査地域に特徴的な現象であり、本論ではテフラ層崩壊発生型ラハール (tephra-slip-induced lahar) と呼ぶこととした。1953年や1990年の災害時に関する報告を加味すると、記録的な豪雨時には流域からテフラ層崩壊発生型ラハールによって $10^3\sim 10^4\text{m}^3/\text{km}^2$ オーダーの土砂流出が発生することが明らかとなった。

## 謝 辞

熊本県土木部砂防課による土砂災害情報監視システムのデータは、本研究を進める上でたいへん有益であった。そのデータ取得の際には、熊本県阿蘇地域振興局土木部治水係の伊藤 彰氏、株式会社日本通信システムの吉永研三氏と大城一夫氏のご協力を得た。熊本森林管理署治山課には空中写真を提供していただくとともに、現地調査の便宜をはかっていただいた。林業土木コンサルタンツ九州支所治山課には災害発生状況に関する貴重な情報をご教示いただいた。京都大学火山研究センターの中坊 真氏にはGPS測量を行う際にご協力いただくとともに、データの解析をしていただいた。熊本大学教育学部の横山勝三教授には草稿を読んでいただき、貴重なご意見をいただいた。また、U.S. Geological SurveyのMark E. Reid氏には英文を校閲していただいた。以上の方々に、心からお礼を申し上げます。

## 引 用 文 献

- Beverage, J. P. and Culbertson, J. K. (1964) Hyperconcentrations of suspended sediment: Hydraulics Division Journal, American Society of Civil Engineers, **90**, 117-126.
- 地学団体研究会編 (1996) 新版地学事典：平凡社, 1443 p.
- 橋本与良 (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, 土壌関係：林業試験場研究報告, **69**, 57-84.
- 林 重徳・梅村 順 (1991) 古恵川流域における土砂と流木の発生：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, 95-108.
- 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.
- 一の宮町 (1995) 一の宮町大水害の記録：68 p.
- 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.
- 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.
- 気象庁 (2001) 気象要覧 (2001年6月)：1222, 58 p.

- 熊本営林署・林業土木コンサルタンツ (1991) 阿蘇地区民有林直轄治山事業山地保全計画調査報告書：249 p.
- 九州森林管理局・林業土木コンサルタンツ (2002) 山地保全計画調査報告書ー阿蘇地区民有林直轄治山事業 (熊本県阿蘇郡一の宮町)：235 p.
- 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, **17**, 143-163.
- 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 年代測定ー火山層序との整合性と火砕流試料への適応ー：日本火山学会 1991 年度秋季大会講演予稿集, 73.
- 宮縁育夫・渡辺一徳 (1997) 埋没黒ボク土層の  $^{14}\text{C}$  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.
- 宮縁育夫・渡辺一徳・岡本真也 (2003 a) 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  $^{14}\text{C}$  年代：火山, **48**, 229-234.
- 宮縁育夫・星住英夫・高田英樹・渡辺一徳・徐 勝 (2003 b) 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**, 195-214.
- Neall, V. E. (1976) Lahars-Global occurrence and annotated bibliography: Publication of Geology Department, Victoria University of Wellington, New Zealand, 5, 18 p.
- 荻原貞夫・小幡 進 (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, 総括：林業試験場研究報告, **69**, 1-19.
- 岡上正夫 (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, 気象関係：林業試験場研究報告, **69**, 21-39.
- 小野晃司・渡辺一徳 (1983) 阿蘇カルデラ：月刊地球, **5**, 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.
- 小野晃司・松本徹夫・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, 145 p.
- Pierson T. C. and Scott, K. M. (1985) Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated stream flow: Water Resources Research, **21**, 1511-1524.
- 清水 晃・竹下 幸・水谷完治 (1992) 7.2 阿蘇災害における浅層崩壊について：日本林学会九州支部研究論文集, **45**, 177-178.
- Smith, G. A. and Fritz, W. J. (1989) Volcanic influences on terrestrial sedimentation: Geology, **17**, 375-376.
- Smith, G. A. and Lowe, D. R. (1991) Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum: Sedimentation in Volcanic Settings, Society for Sedimentary Geology (SEPM) Special Publication, **45**, 59-70.
- 高橋 計 (1986) 阿蘇火山と測候所：気象, **30** (2), 12-15.
- 谷 勲 (1975) 山地の荒廃と土砂の生産・流出 (3)ー阿蘇山周辺, 門司市周辺の災害ー：新砂防, **95**, 39-51.
- 植 弘隆・入江由希子・深沢 浩・飽田恵介 (2001) 阿蘇北カルデラ内壁斜面における土砂移動特性ー平成 13 年 6 月 29 日徳仏川土石流災害を例としてー：熊本自然災害研究会第 10 回研究発表会要旨集, 61-66.
- Vallance, J. W. (2000) Lahars. In H. Sigurdsson ed., *Encyclopedia of Volcanoes*, 601-616, Academic Press, San Diego.
- Varnes, D. J. (1978) Slope movement types and processes. In *Special Report 176*, R. L. Schuster and R. J. Krizek, eds., *Landslides: Analysis and Control*, 11-33, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
- 渡辺一徳 (1992) 阿蘇火山：日本地質学会第 99 年学術大会見学旅行案内書, 13-32.
- 山元孝広 (1998) 安達太良火山西山麓の完新世酸川ラハール堆積物：火山, **43**, 61-68.
- 山中金次郎・松尾憲一 (1962) 土壌硬度に関する研究 (第 1 報) 土壌硬度と含水量の関係：日本土壌肥科学雑誌, **33**, 343-347.