

# 地震後の降雨による土砂災害発生への影響因子 とその相対的な寄与度について—2016 年熊本地 震後の阿蘇外輪地域における分析事例—

IMPACT FACTORS AND RELATIVE INFLUENCE TO LANDSLIDES OCCURRENCE  
CAUSED BY POST-QUAKE RAINFALL: AN ANALYSIS OF ASO OUTER RING AREA  
AFTER KUMAMOTO EARTHQUAKE

後根裕樹<sup>1</sup>・海原荘一<sup>2</sup>・中谷洋明<sup>3</sup>・坂井佑介<sup>3</sup>・瀧口茂隆<sup>3</sup>

・木下篤彦<sup>4</sup>・北本楽<sup>5</sup>・小杉恵<sup>5</sup>・山本悟司<sup>5</sup>

Yuki USHIRONE, Soichi KAIHARA, Hiroaki NAKAYA, Yusuke SAKAI, Shigetaka TAKIGUTI,  
Atsuhiko KINOSHITA, Gaku KITAMOTO, Megumi KOSUGI and Satoshi YAMAMOTO

<sup>1</sup>株式会社エイト日本技術開発 (〒812-0018 福岡県福岡市博多区住吉 3-1-80)

E-mail: ushirone-yu@ej-hds.co.jp

<sup>2</sup>株式会社エイト日本技術開発 (〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町 3 丁目 1 番 21 号)

<sup>3</sup>国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-8516 茨城県度つくば市旭 1 番地)

<sup>4</sup>国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター

(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々 3027-6)

<sup>5</sup>国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 (〒637-0002 奈良県五條市三在町 1681)

**Key Words:** Kumamoto earthquake, rainfall, maximum acceleration, secondary sediment disaster

## 1. はじめに

2016 年熊本地震では、阿蘇外輪を中心として崩壊・土石流が多発し、さらにその 2 箇月後の 2016 年 6 月豪雨時においても新規の拡大崩壊や土石流等が発生した。渡邊ら<sup>1)</sup>は、熊本地震前後の降雨による土砂移動発生時の降雨指標値を比較した結果、2016 年 6 月豪雨時に発生した土砂移動は、解析に使用した降雨指標によっては地震前に比べ 3~8 割の低い値で発生したとしている。また、木藤ら<sup>2)</sup>は、2010 年以降に阿蘇カルデラ内にて取得された 5 時期の LP の差分データから、土砂移動実態把握を検討した結果、熊本地震後は地震前よりも同程度の降雨量に対する比流出土砂量が多いことを明らかにした。こ

れらの報告から、2016 年 6 月豪雨時では、熊本地震による影響により斜面が不安定化したことで、降雨により多くの土砂移動が発生した可能性がある。しかし、阿蘇外輪地域において、2016 年 6 月豪雨時の土砂移動発生箇所の地形的特徴や熊本地震時の地震動、その後の降雨との関係性について、地質別に分析した事例は少ない。各要因の相対的な寄与度を明らかにすることで、大規模地震後の降雨により発生する土砂移動の発生エリアを予測し、二次災害を防止する上でよりの確な説明ができる可能性がある。

本稿では、10m メッシュを評価単位とし、阿蘇外輪地域において熊本地震時と 2016 年 6 月豪雨時に発生した土砂移動箇所を対象として、傾斜量、最大加速度、降雨指標データを要因とした土砂移動の発

生・非発生との判別分析を行い、標準化された判別関数係数の値に基づいて土砂移動発生に対する各要因の相対的な寄与度について検討した。

## 2. 調査手法

### (1) 解析対象範囲と土砂移動範囲の設定方法

阿蘇外輪山周辺のうち、熊本地震時と2016年6月豪雨時の土砂移動発生範囲を解析対象とし(図-1)、土砂移動範囲は、①2016年4月～7月上旬と②2016年10月～2017年1月で計測されたLPの判読結果を基に2016年熊本地震時と2016年6月豪雨による地震後の降雨で発生した土砂移動範囲を設定した。

具体的には①の時期のLPの判読結果より得られた土石流及び崩壊の範囲を2016年熊本地震時の土砂移動範囲とし、②のLPの判読による土石流及び崩壊の範囲と①の熊本地震後の土砂移動範囲の差分を2016年6月豪雨による熊本地震後の降雨で発生した新規・拡大崩壊の土砂移動範囲とし、解析単位である10mメッシュで少しでも土砂移動範囲がかかっている範囲を土砂移動メッシュとした。ただし、阿蘇外輪の東側のエリア(図-1の黒点線の範囲)は、熊本地震前の2012年7月豪雨時に土石流などが多発したエリアであり<sup>3)</sup>、熊本地震前に発生した土砂移動範囲を誤抽出する可能性があるため、解析対象エリアから除外した。

地質区分は、阿蘇火山地質(5万分の1)<sup>4)</sup>に基づき、地層・岩盤の種類、地質年代を踏まえ、図-1に示す6区分とした。このうち、熊本地震時に土砂移動が多発した5つの火山性の地質を解析対象とし、土砂移動の発生が少なかった崖錐・扇状地・段丘堆積物は解析から除外した。

2016年熊本地震時に発生した斜面崩壊は、「テフラ斜面の崩壊」と「岩盤からなる急崖の崩壊」に大別される<sup>5)</sup>。「テフラ斜面の崩壊」は、主にテフラ層が厚く堆積する緩斜面にて発生した崩壊であり、崩壊に関与したすべり面は、テフラ層中にある軽石層や風化した火山灰層、黒ボク層など、複数のタイプがあることが報告されている<sup>5)</sup>。これらは、阿蘇中央火口丘付近の降下火山灰、軽石・スコリア等、溶岩・火砕岩エリアのうち、上位にテフラ層が厚く堆積した丘陵地で発生した崩壊に概ね該当する<sup>5)</sup>。

「岩盤からなる急崖の崩壊」は阿蘇カルデラ壁、谷壁斜面の急傾斜にて発生した崩壊とされる。阿蘇カルデラ壁の崩壊は、さまざまな規模の落石や岩屑なだれ<sup>5)</sup>、深層崩壊<sup>6)</sup>であったとされ、先阿蘇火山岩類とAso1-4エリアで発生した崩壊に概ね該当する。谷壁斜面の急斜面にて発生した崩壊は、落石・トッ

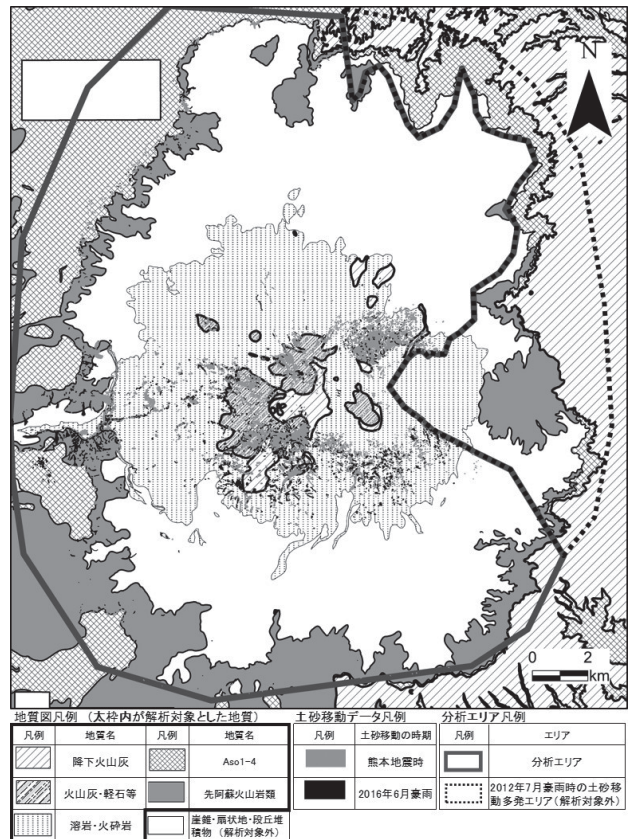


図-1 解析対象範囲

リング・岩盤崩壊等<sup>6)</sup>であったとされ、溶岩・火砕岩エリアのうち、白川・黒川合流部など河道の左右岸で発生した崩壊に該当する<sup>6)</sup>。

### (2) 検討方法

#### a) 土砂移動の面積率と各要因の関係性分析

地震またはその後の降雨で発生する土砂移動に関係する各要因(傾斜量、最大加速度、降雨指標)と熊本地震時及び2016年6月豪雨時に発生した土砂移動箇所との関係性について、熊本地震時と2016年6月豪雨時に発生した土石流および新規・拡大した土砂移動の面積率((崩壊箇所面積+崩壊土砂の堆積域の面積)÷エリア面積×100)を傾斜量、最大加速度のカテゴリ別・地質別に集計し、その傾向を確認した。2016年6月豪雨時に発生した土砂移動発生箇所については、2016年6月豪雨の降雨指標との関係性についても確認した。

図-2(a)・(b)と図-3(a)・(b)に解析に用いた各要因のデータのヒストグラムを示す。それぞれのデータの内容および特徴は以下のとおりである。

傾斜量は、地震前に計測された1mDEMをGISの内挿処理にて10mメッシュ単位に変換したデータを用いた。図-2(a)のヒストグラムに示すように、30°未満の傾斜量データが全データの7割以上を占め、全体的には傾斜の緩やかな地形が多い傾向にある。また傾斜量が大きくなるほどデータ数が徐々に少な

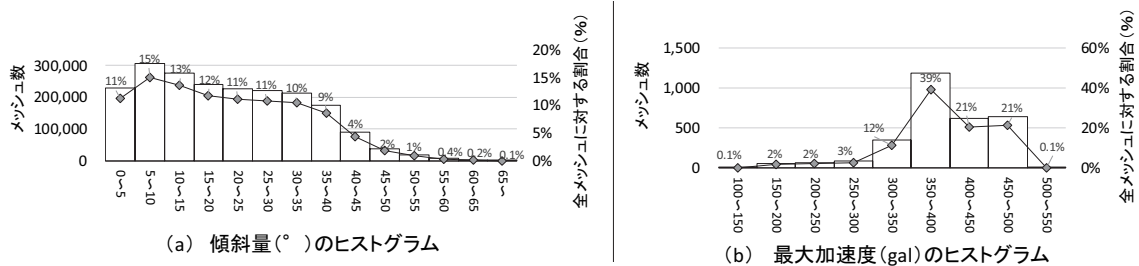


図-2 傾斜量・最大加速度のヒストグラム

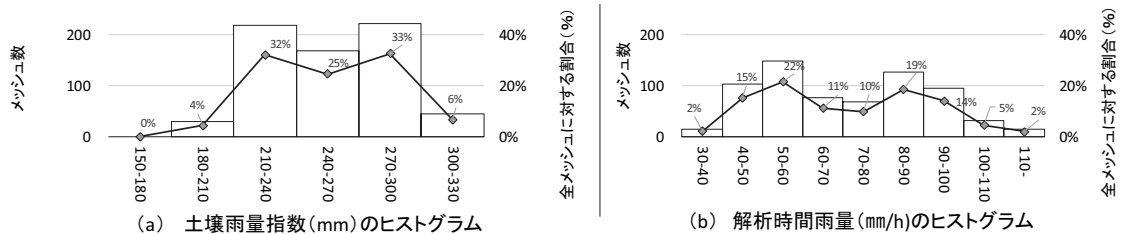


図-3 土壌雨量指数・解析時間雨量のヒストグラム

くなり、40~45°以上から全体に占める割合は著しく少なくなる傾向にある。

最大加速度は Quakemap<sup>7)</sup> (2016.4.16 熊本地震の本震) を使用した。Quakemap は、防災科学研究所が公開する地震観測記録をもとに、平均S波速度(Vs30マップ) から地盤のゆれやすさを考慮して地震動分布を作成したものである(250m メッシュ単位)<sup>8)</sup>。本稿では Quakemap のホームページで公開されている GEO-TIFF データを使用した。

解析エリアの最大加速度は 145~510gal の範囲にあり、その平均はおおよそ 390gal 程度であった。図-2b のヒストグラムに示すように、350~400gal のデータが特に多く、全データの 4 割程度を占める。

降雨指標は、気象庁による土壌雨量指数と解析時間雨量と(1km メッシュ単位)のデータを用い2016年6月1日~6月30日までの最大値を採用した。

土壌雨量指数は 185~310mm の範囲にあり、その平均は 250mm 程度であった。図-3(a) のヒストグラムに示すように、210~240mm から 270~300mm にかけてのデータ数が特に多く、全データの 9 割程度を占める。解析時間雨量は 34~110mm/h の範囲にあり、その平均は 70mm/h 程度であった。図-3(b) のヒストグラムによると、解析時間雨量はおおよそ 50~60mm/h と 80~90mm/h でのデータ数が多く、2 つのピークをもった二峰性の分布を示している。

### b) 判別分析

熊本地震時と 2016 年 6 月降雨による土砂移動の発生・非発生について、傾斜量、最大加速度、降雨指標(土壌雨量指数、解析時間雨量)を要因とした判別分析を行い、土砂移動発生に寄与した要因を地質別に検討した。

表-1 判別分析のケース

要因	単位	2016年6月豪雨の崩壊		
		地震時の崩壊 ケース1	ケース2	ケース3
傾斜量	度	●	●	●
最大加速度(PGA)	gal	●	●	●
土壌雨量指数最大(2016年6月)	mm	●	●	●
解析時間雨量最大(2016年6月)	mm	●	●	●

分析では、表-1 に示されるように、熊本地震時の土砂移動については、傾斜量、最大加速度を検討対象として分析したケース(ケース1)を行ったほか、2016年6月豪雨時の土砂移動は、傾斜量、最大加速度を対象とした分析(ケース2)に加え、傾斜量、最大加速度、地震後の降雨指標を対象としたケース(ケース3)を分析した。なお、分析にあたっては統計解析ソフト(SPSS)を使用し、各要因の代入は、ステップワイズ法を用いた。ステップワイズ法は、1つずつ要因を削除したりしながら最適な項目の組み合わせを検索する手法であり、土砂移動発生との関連性が極めて低い項目は除外する目的で使用した。

土砂移動の発生・非発生は、10m メッシュ内に土砂移動のポリゴンが一部でも含まれるメッシュを発生メッシュとし、含まれないメッシュを非発生メッシュとして分析した。解析に使用した全メッシュ数は2,044,301メッシュであり、このうち、熊本地震時と2016年6月豪雨時の発生メッシュはそれぞれ83,114(全メッシュの約4.1%)と15,424(約0.75%)メッシュであった。

各ケースの判別分析結果より、各要因が判別に寄与した程度を示す標準化された正準判別関数係数(以下、「係数」と表記)を求め、その大小から土砂移動に対する各要因の寄与を評価した。判別分析結果の妥当性の確認にあたっては、発生メッシュは非発生メッシュに対してデータ数が少なく、発生メッシュ数と非発生メッシュ数の不均衡が著しいため、



表-2 判別分析の正答率の算出

		判別分析結果による予測		□ : 正判別 ■ : 誤判別
		非発生メッシュ	発生メッシュ	
実際の土砂移動	非発生メッシュ	①	②	
	発生メッシュ	③	④	

非発生メッシュの正答率 = ① / (① + ②)  
 発生メッシュの正答率 = ④ / (③ + ④)

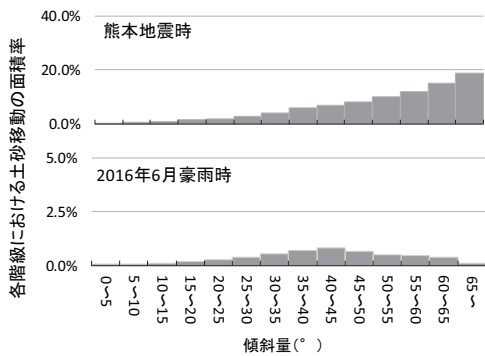
全体のデータに対する発生と非発生を統合した正答率では適切に判断できない可能性があるため、各ケースでの非発生メッシュ、発生メッシュの各々の正答率を算出した(表-2)。

### 3. 検討結果

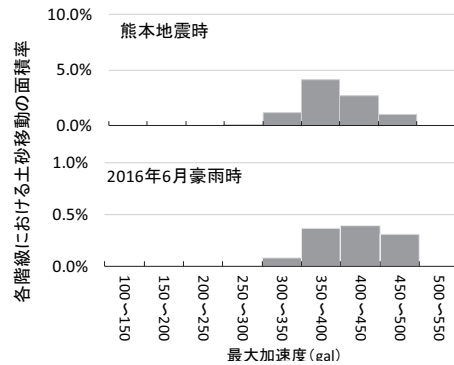
#### (1) 土砂移動の面積率と各要因の関係性分析結果

図-4(a)・(b)に傾斜量・最大加速度と土砂移動の面積率との関係を示す。この図では、熊本地震時は、傾斜量が大きくなるほど土砂移動の面積率が大きくなる正の相関性が確認される。一方、2016年6月豪雨時については40~45°までは熊本地震時と同様の傾向にあるが、それより急勾配の範囲では、土砂移動面積率が減少する傾向となっている(図-4(a))。

最大加速度については、傾斜量に比べ土砂移動の面積率との相関性が明確ではないが、熊本地震時は350~400gal から400~450gal, 2016年6月豪雨時は350~400gal から450~500gal にかけたエリアでの土砂移動の面積率の頻度が大きい。300~350gal 以下のエリアは、全体に占めるエリア面積が20%未満と少

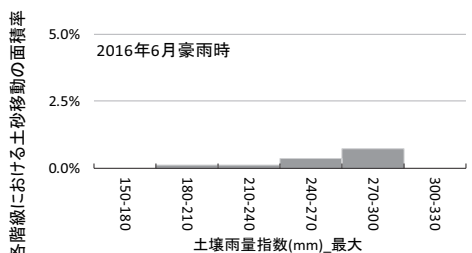


(a) 傾斜量(°)と土砂移動の面積率との関係

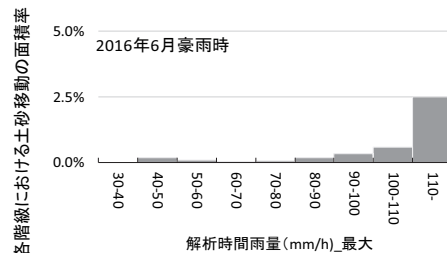


(b) 最大加速度(gal)と土砂移動の面積率との関係

図-4 傾斜量・最大加速度と土砂移動の面積率との関係



(a) 土壌雨量指数(mm)\_最大と土砂移動の面積率との関係



(b) 解析時間雨量(mm/h)と土砂移動の面積率との関係

図-5 土壌雨量指数・解析時間雨量と土砂移動の面積率との関係

ないものの、いずれも土砂移動の面積率はほとんど認められないという特徴がある(図-4(b))。

図-5(a)・(b)に、2016年6月豪雨時に発生した土砂移動の面積率と降雨指標(土壌雨量指数, 解析時間雨量)との関係を示す。この図では降雨指標(土壌雨量指数, 解析時間雨量)が大きいほど2016年6月豪雨時に発生した土砂移動の面積率が大きくなる正の相関となっている。

#### (2) 判別分析結果

図-6に各ケースにおける判別分析結果を地質別に示す。図-6下側の発生メッシュ、非発生メッシュの正答率に着目すると、いずれの地質・ケースにおいても60~80%程度と比較的良好な正答率となった。

各ケースの係数分布(図-6上側)に着目すると、いずれのケース・地質においても傾斜量の係数が全般に大きい傾向となっている。ただし、2016年6月豪雨時を対象としたケース2では、熊本地震時を対象としたケース1よりも、傾斜量の係数が小さいという特徴がある(ただし、Aso1-4を除く)。

最大加速度の係数は、地質により傾向が異なっている。火山灰・軽石等とAso1-4の結果では、他の地質よりも最大加速度の係数が0に近いか負の値を示す特徴があった。しかし、それ以外の地質では、いずれのケースも正の値を示していた。

2016年6月豪雨時のみを対象としたケース3に着目すると、降雨指標の係数についても、最大加速度

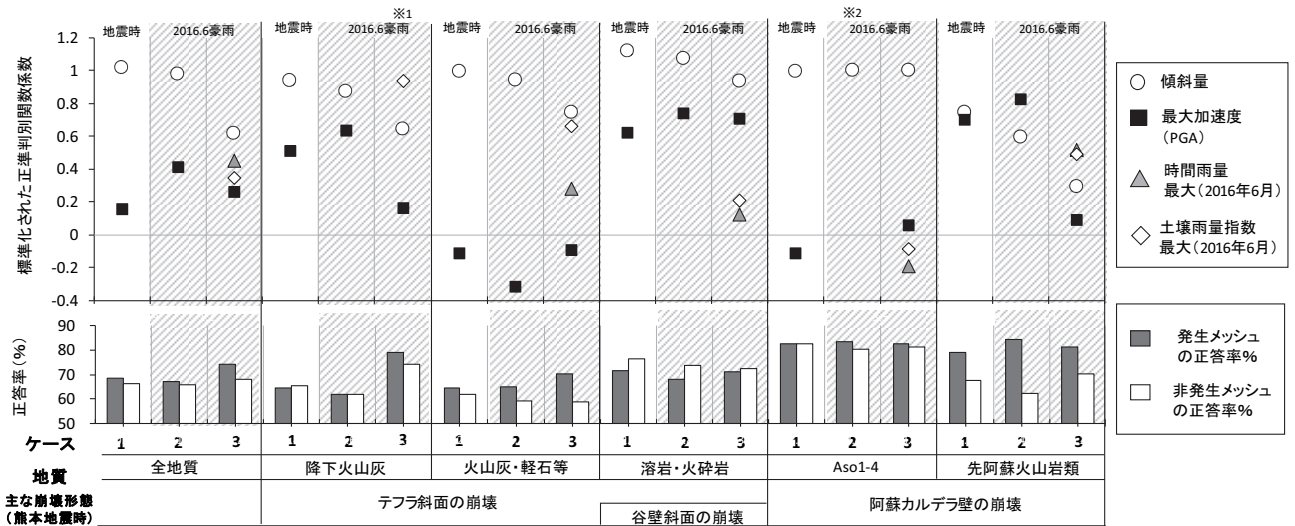


図-6 各地質の判別分析結果による各要因の係数と正答率

※1,2 グラフにない項目は、ステップワイズ法により寄与がないものとして削除された。

と同様、地質によって傾向が異なっている。

全地質では、降雨指標の係数が最大加速度よりも大きくなり、崩壊メッシュの正答率がケース2に比べ7%程度増加している。地質別にみると、先阿蘇火砕岩類と降下火山灰は、降雨指標の係数が最も大きく、特に降下火山灰では、崩壊メッシュ、非崩壊メッシュともに正答率が12~17%程度増加している。一方、溶岩・火砕岩、Aso1-4では、降雨指標の係数は小さく、ケース2と比較した正答率の向上もほぼなかった。

#### 4. 考察

判別分析結果によると、熊本地震時・2016年6月豪雨時ともに傾斜量の係数が大きい傾向にあり、いずれも土砂移動発生に対する寄与は全体に大きかったと考えられる。

傾斜量と土砂移動の面積率との関係については、2016年6月豪雨時の土砂移動は、40~45°にて土砂移動の面積率がピークとなり、熊本地震時より傾斜が緩いエリアでの土砂移動発生が中心である傾向にあった。このような特徴がみられた理由として、地震と降雨による誘因の違いにより土砂移動多発エリアの傾斜量の傾向に違いが生じたこと、あるいは、既に熊本地震時に傾斜量が大きいエリアにて高密度で土砂移動が多発したため、崩壊しうる斜面数が減少したことから、その後の2016年6月降雨では、相対的に土砂移動の発生が少なくなったことが、可能性として考えられる。

判別分析の結果、熊本地震時を対象としたケース1より2016年6月豪雨時を対象としたケース2の方が相対的に傾斜量の係数が小さい傾向にあった。こ

れは、前述の2つの理由のいずれか、あるいはその両方の理由が関連し、2016年6月豪雨時の土砂移動発生に対する傾斜量の寄与がやや小さくなった可能性が考えられる。

Aso1-4は他の地質と異なり、ケース別の判別分析結果において傾斜量の係数にほとんど変化がみられなかった。この理由を考察するため、傾斜量と土砂移動の面積率との関係を地質別に確認した結果、Aso1-4では他の地質より全般に傾斜量の大きいエリアでの土砂移動が多く、熊本地震・2016年6月豪雨時ともに40~45°以上の急傾斜での土砂移動発生が中心であったことが確認された(図-7)。これは、調査地内のAso1-4の分布が阿蘇外輪にあることを踏まえると、熊本地震・2016年6月豪雨ともにAso1-4ではカルデラ壁の急崖における土砂移動が主体であり、土砂移動発生に対し傾斜量が大きく寄与する地形状況であったため、判別分析結果のケースによらず、傾斜量の係数が概ね一定であったと考えられる。

最大加速度は、熊本地震時・2016年6月豪雨時ともに350gal以上にて土砂移動の面積率が大きく、判別分析結果によると、火山灰・軽石等とAso1-4の結果を除くと係数は正の値を示す特徴がみられた。そ

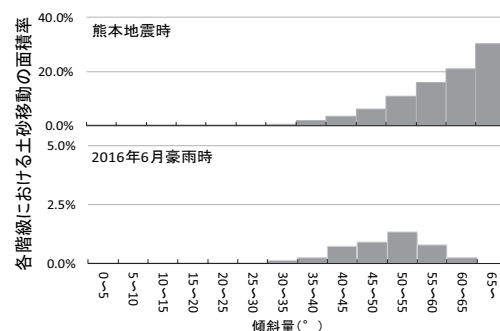


図-7 傾斜量と土砂移動の面積率との関係(Aso1-4)

のため、2016年6月降雨についても、火山灰・軽石等とAso1-4以外のエリアでは、熊本地震時同様、最大加速度が土砂移動発生に寄与しており、熊本地震時に揺れが大きかったエリアのほうが、土砂移動は発生しやすかった可能性が示唆される。

降雨指標（土壌雨量指数、解析時間雨量）は、熊本地震時・2016年6月豪雨時ともに土砂移動の面積率との間に正の相関性があった。また、全地質での判別分析結果（ケース3）では、最大加速度よりも降雨指標のほうが、係数が大きかったほか、先阿蘇火砕岩類と降下火山灰は、降雨指標の係数が最も大きく、2016年6月降雨時においては、最大加速度よりもその後の降雨の影響の方が土砂移動への寄与が大きかった可能性がある。

一方、溶岩・火砕岩での判別分析結果（ケース3）では、降雨指標よりも最大加速度の係数が大きく、その後の降雨より最大加速度の影響の方が土砂移動への寄与が大きかった可能性がある。ただし、溶岩・火砕岩については、熊本地震時に河道の両岸での岩盤崩壊のほか、上位のテフラ層の崩壊が多く発生しており、2016年6月降雨時においてもその両方の地質特性が解析に反映されたものと考えられる点に留意が必要である。

## 5. まとめ

本稿では、阿蘇外輪地域において熊本地震時と2016年6月豪雨時に発生した土砂移動を対象として、傾斜量、最大加速度、降雨指標データを用いた土砂移動の発生・非発生の判別分析により、土砂移動発生に対する各要因の相対的な寄与度について検討した。主要な結果は以下のとおりである。

- (1) 熊本地震時・2016年6月豪雨時ともに傾斜量の係数が大きく、いずれも土砂移動発生に対する寄与は全体的に大きかったと考えられる。
- (2) 最大加速度は、熊本地震時・2016年6月豪雨時ともに350gal以上での土砂移動の面積率が大きく、係数は火山灰・軽石等とAso1-4を除き正の値を示す特徴から、この2つの地質を除いたエリアでは、揺れが大きかった方が土砂移動は発生しやすかった可能性が示唆される。
- (3) 降雨指標（土壌雨量指数、解析時間雨量）は、全地質、先阿蘇火砕岩類と降下火山灰において、最大加速度よりも係数が大きく、2016年6月豪雨時においては、最大加速度よりも降雨の影響の方が土砂移動への寄与が大きかったことが示唆される。

本稿で使用した最大加速度、降雨指標はそれぞれ

250mと1kmのメッシュであり、10mメッシュであった傾斜量に比べるとかなり粗い解像度のデータを一律に割り当てざるをえなかった。このため、土砂災害発生への寄与をより詳細に検討するためには、より解像度が高いデータによる解析を行うことが望ましいと考えられる。また、判別分析の結果において、係数の分布傾向に違いが認められた地質区分については、具体的に各地質の特性やその特性によって異なる崩壊形態の違いとどのように関連しているかどうかは十分な考察ができていない。このため、今後は、他の地震事例も踏まえ、解像度の揃ったデータに基づいて、より多種類のデータ解析の蓄積・検証を行っていくことも重要と考えている。

**謝辞：**本稿で使用した土砂移動データは九州地方整備局より提供いただいた。また、産業技術総合研究所の地震動マップ即時推定システム(Quakemap)による最大加速度、地質調査総合センターの地質データを用いた。また、雨量データについては気象庁保有のデータを使用した。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 渡邊輝嗣, 桂真也, 林真一郎, 梅谷涼太, 齋藤はるか, 野呂智之, 村田郁夫:平成28年熊本地震前後の阿蘇地域における土砂移動現象発生の各種降雨指標値の比較, 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp151-156, 2018.
- 2) 木藤賢一, 吉村真, 飯田弘和, 内柴良和, 吉田桂治, 江口秀典, 寺本泰之, 宮元謙次:阿蘇カルデラ内の降雨による土砂移動実態把握について, 令和4年度砂防学会研究発表会概要集, pp.53-54, 2022.
- 3) 久保田哲也, 地頭菌隆, 清水収, 平川泰之ほか18名:平成24年7月九州北部豪雨による阿蘇地域の土砂災害, 砂防学会誌, vol.65, No.4, p50-61, 2012.
- 4) 小野晃司, 渡辺一徳:火山地質図 No.4「阿蘇火山地質図」, 地質調査所, 1985.
- 5) 佐藤達樹, 千木良雅弘, 松四雄騎: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・地質の特徴, 京都大学防災研究所年報 第60号B, pp.431-452, 2017.
- 6) 北園芳人, 笠間清伸, 矢ヶ部秀美;平成28年熊本地震における土砂崩壊, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp49-54, 2016.
- 7) 産業総合技術研究所, QuiQuake—地震動マップ即時推定システム—, <https://gbank.gsj.jp/QuiQuake/>, 2022.3.1.
- 8) 松岡昌志, 山本直孝:250mメッシュ Vs30 と強振記録に基づく地震動マップの即時推定システム(QuiQuake), 地域安全学会梗概集, No.25, pp.107-108.

(2022.5.30 受付)