

JSECE Publication No.80

平成 28 年熊本地震による土砂災害 に関する緊急調査報告書

平成 28 年度(公社)砂防学会講習会

テーマ「熊本地震から学ぶ地震と土砂災害」

平成 28 年 12 月 13 日

公益社団法人 砂防学会

平成 28 年熊本地震に係る土砂災害緊急調査団

はじめに

熊本県熊本地方を震源として平成 28 年 4 月 14 日の M=6.5 の前震に続き 4 月 16 日に M=7.3 の本震が発生し、いずれも最大震度 7 を記録した。特に熊本県の阿蘇地方およびその周辺ではこの地震により多数の斜面崩壊、地すべり、土石流等が発生し人命、家屋、道路、鉄道等に大きな被害が発生した。さらに、地震後の降雨によっても多数の土砂移動現象が発生し、人命、家屋、道路、鉄道に被害が発生し、9 月 30 日現在、熊本県内では地震およびその後の降雨による土砂災害による死者は 15 名にのぼる甚大な被害となっている。

公益社団法人砂防学会は平成 28 年熊本地震に起因する阿蘇地方およびその周辺地域における土砂移動現象の発生・流下・氾濫堆積実態を明かにするとともに、余震や梅雨期における二次災害の危険性を調査し、今後の二次災害の軽減のために必要な緊急対応を検討することを目的として 4 月 15～17 日に先遣調査を行うと共に、「平成 28 年熊本地震に係る土砂災害第一次緊急調査団」を組織し 4 月 22～24 日に現地調査等を実施した。現地調査の結果を基にした分析を行い、4 月 27 日に東京都千代田区において緊急報告会を開催し広く一般に公開した。さらに熊本地震による土砂移動現象の実態と二次災害の危険性ならび二次災害の軽減のための対応方法を示した緊急提言を作成し、5 月 6 日に国土交通省西山砂防部長に緊急提言を手渡し、内容を説明した。その後も「第二次緊急調査団」を 5 月 14～15 日に、「第三次緊急調査団」を 5 月 28～29 日に、「第四次緊急調査団」を 7 月 22～24 日に現地に派遣した。さらに、(公社)砂防学会は第一次～第四次緊急調査により得られた調査成果をもと 10 月 26 日に熊本地震による土砂災害に関する提言を行った。なお、これらの緊急調査の成果の一部は日本学術会議が主催し、防災学術連携体が共催する熊本地震に関する 5 月 2 日、7 月 16 日の報告会ならびに日本学術会議と防災学術連携体が主催する 8 月 28 日の熊本地震に関する報告会において公表している。

第一次～第三次緊急調査により得られた成果を基に阿蘇地方およびその周辺において地震により発生した主な土砂移動現象(斜面崩壊、地すべり、土石流等)とそれらの土砂移動現象による災害については砂防学会誌(Vol.69.No.3)の災害報告として、主として第四次の緊急調査により得られた調査成果を基に、4 月 16 日の本震から 7 月末までの間の豪雨により引き起こされた二次的な土砂移動現象ならびにそれらの土砂移動現象による災害の実態等については砂防学会誌(Vol.69.No.4)の災害報告として報告した。

本報告書は第一次～第四次緊急調査により得られた調査成果をまとめたものである。

平成 28 年 12 月 13 日

公益社団法人 砂防学会

平成 28 年熊本地震に係る土砂災害緊急調査団

公益社団法人砂防学会 平成 28 年熊本地震に係る土砂災害緊急調査団メンバー

先遣調査 調査日：2016年4月15日～17日			
班	氏名	所属	
先遣班	石川 芳治	東京農工大学	

第一次緊急調査団 調査日：2016年4月22日～24日			
班	氏名	所属	
総括班	団長 石川 芳治	東京農工大学	
	桂 真也	北海道大学	
第1班	班長 下田 義文	八千代エンジニアリング(株)	
	地頭 蘭 隆	鹿児島大学	
	藤澤 康弘	(一財)砂防・地すべり技術センター	
第2班	班長 海堀 正博	広島大学	
	古賀 省三	日本工営(株)	
	寺田 秀樹	国土防災技術(株)	
	相楽 渉	(一財)砂防・地すべり技術センター	
第3班	班長 藤田 正治	京都大学	
	清水 収	宮崎大学	
	山下 伸太郎	(株)建設技術研究所	
	加藤 誠章	(一財)砂防・地すべり技術センター	

第二次緊急調査団 調査日：2016年5月14日～15日			
班	氏名	所属	
第1班	団長 久保田 哲也	九州大学	
	班長 平川 泰之	アジア航測(株)	
	山口 和也	アジア航測(株)	
	岡野 和行	アジア航測(株)	
	内村 雄一	応用地質(株)	
第2班	班長 鳥田 英司	国際航業(株)	
	江川 佳苗	国際航業(株)	
	山根 誠	応用地質(株)	
	上原 祐治	応用地質(株)	
	篠原慶規	九州大学	
第3班	班長 植 弘隆	砂防エンジニアリング(株)	
	鈴木 正美	八千代エンジニアリング(株)	
	飯島 康夫	八千代エンジニアリング(株)	
	池田 誠	八千代エンジニアリング(株)	
	地頭 蘭 隆	鹿児島大学	
第4班	班長 中濃 耕司	東亜コンサルタント(株)	
	川原 慎一郎	日本工営(株)	
	鈴木 滋	日本工営(株)	
	田方 智	日本工営(株)	
	古賀 省三	日本工営(株)	
第5班	班長 坂島 俊彦	パシフィックコンサルタンツ(株)	
	飛岡 啓之	パシフィックコンサルタンツ(株)	
	花田 良太	パシフィックコンサルタンツ(株)	
	堂ノ脇将光	パシフィックコンサルタンツ(株)	
	寺本行芳	鹿児島大学	

第三次緊急調査団 調査日：5月28日～29日			
班	氏名	所属	
	団長 久保田 哲也	九州大学	
第2班	班長 上原 祐治	応用地質(株)	
	山根 誠	応用地質(株)	
	池上 忠	応用地質(株)	
	正木 光一	応用地質(株)	
	宮田 直樹	国際航業(株)	
	青戸 一峰	国際航業(株)	
	西川 友章	国際航業(株)	
	瀬戸 康平	国際航業(株)	
第3班	班長 植 弘隆	砂防エンジニアリング(株)	
	飯島 康夫	八千代エンジニアリング(株)	
	池田 誠	八千代エンジニアリング(株)	
	井川 寿之	八千代エンジニアリング(株)	
	福塚 康三郎	八千代エンジニアリング(株)	
	横尾 公博	八千代エンジニアリング(株)	
	地頭 蘭 隆	鹿児島大学	
第4班	班長 中濃 耕司	東亜コンサルタント(株)	
	鈴木 滋	日本工営(株)	
	田方 智	日本工営(株)	
	清水 収	宮崎大学	

第四次緊急調査団 調査日：7月22日～24日			
班	氏名	所属	
総括班	団長 石川 芳治	東京農工大学	
	小山内 信智	北海道大学	
	野呂 智之	国土技術総合研究所	
第1班	班長 地頭 蘭 隆	鹿児島大学	
	古賀 省三	日本工営(株)	
	武士 俊也	(一財)砂防・地すべり技術センター	
	平川 泰之	アジア航測(株)	
第2班	班長 海堀 正博	広島大学	
	権田 豊	新潟大学	
	西 真佐人	砂防フロンティア整備推進機構	
	中濃 耕司	東亜コンサルタント(株)	
第3班	班長 藤田 正治	京都大学	
	大野 宏之	(一財)砂防・地すべり技術センター	
	松尾 新二郎	日本工営(株)	
	植 弘隆	砂防エンジニアリング(株)	
第4班	班長 清水 収	宮崎大学	
	山田 孝	三重大学	
	樽角 晃	砂防フロンティア整備推進機構	
	坂島 俊彦	パシフィックコンサルタンツ(株)	
第5班	班長 久保田 哲也	九州大学	
	平松 晋也	信州大学	
	赤澤 史顕	土木研究所	
	鳥田 英司	国際航業(株)	

平成 28 年熊本地震による土砂災害に関する緊急調査に基づく提言

熊本県熊本地方を震源として平成 28 年 4 月 14 日に M=6.5 の前震に続き 4 月 16 日に M=7.3 の本震が発生し、いずれも最大震度 7 を記録した。特に熊本県の阿蘇地域およびその周辺ではこの地震により多数の斜面崩壊、地すべり、土石流等が発生し人命、家屋、道路、鉄道等に大きな被害が発生した。8 月 26 日現在、土砂災害による死者は 15 名にのぼる甚大な被害となっている。

公益社団法人砂防学会は平成 28 年熊本地震に起因する土砂移動現象の発生・流下・氾濫堆積実態を明かにするとともに、余震や梅雨期における二次災害の危険性を調査し、二次災害の軽減のために必要な緊急対応を検討することを目的として 4 月 15～17 日に先遣調査を行うと共に、「平成 28 年熊本地震に係わる土砂災害第一次緊急調査団」を組織し 4 月 22 日～24 日に現地調査等を実施した。現地調査の結果を基にした分析を行い、4 月 27 日に東京都千代田区において緊急報告会を開催し広く一般に公開した。さらに熊本地震による土砂移動現象の実態と二次災害の危険性ならびに二次災害の軽減のための対応方法を示した緊急提言を作成し、5 月 6 日に国土交通省西山砂防部長に緊急提言を手渡し、内容を説明した。その後も「第二次緊急調査団」を 5 月 14 日～15 日に、「第三次緊急調査団」を 5 月 28 日～29 日に、「第四次緊急調査団」を 7 月 22 日～24 日に現地に派遣した。

これらの緊急調査に基づき得られた地震による土砂移動現象と土砂災害、ならびにその後の降雨による二次的な土砂移動現象と土砂災害に関する知見を踏まえ、今後の地震による土砂災害対策や研究に役立てることは極めて重要と考える。このことから、今後の地震による土砂災害対策の推進および研究の進展に資することを目的として、以下の提言を行う。

1. 地震による土砂移動現象の発生

今回の熊本地震においては地震断層に近い阿蘇カルデラおよび中央火口丘の西側で地震動が大きかったと推定される。このためカルデラ内壁の西側やカルデラ内の中央火口丘の西側、ならびに外輪山の周辺において、斜面崩壊、地すべり、土石流などの多様な土砂移動現象が集中的に発生し、人命、家屋、道路、鉄道等に大きな被害を与えた。以下、地域ごとに地震による土砂移動現象について整理する。

(1) カルデラ内壁

概して斜面勾配が急であり、表層は火山灰でその下部は溶岩、あるいは溶結凝灰岩を含む火砕流堆積物からなっている。特にカルデラ内壁の西側では、地震による強い震動により、大規模な斜面崩壊（阿蘇大橋地区）や中～小規模の斜面崩壊（南阿蘇村立野地区、阿蘇市三久保地区など）が多数発生している。これらの崩壊土砂は崩壊地内および下部に堆積しており、一部は地震時に下流に流下した。

(2) カルデラ内の中央火口丘群およびその周辺（河岸段丘を含む）

表層が火山灰、その下部が火砕物(火山灰、軽石、溶岩片)および溶岩からなる急勾配の斜面において斜面崩壊が多数発生した（火の鳥温泉など）。さらに同様の地質構造の緩斜面でも地すべり（京大火山研究センター周囲など）が多数発生した。これらの斜面崩壊や地すべりによる不安定な土砂は崩壊地内や地すべり地内に堆積した。それらの土砂の一部は土石流（山王谷川）となって流下、氾濫堆積した。

(3) 外輪山の周辺

西原村、益城町等の外輪山周辺の斜面は表層が火山灰、その下部が火砕流堆積物あるいは溶岩からなり、地震により、中～小規模の斜面崩壊が多数発生した。これらの斜面崩壊による崩壊土砂は崩壊地内や下部斜面ならびに下流の河道内に堆積した。

(4) 地震による亀裂の発生

今回の地震により発生した斜面崩壊ならびに地すべりの頭部周辺において、さらに、斜面崩壊等が発生していない斜面の上部や尾根沿いの地域においても多数の亀裂が発生した。これらは上記3地域に共通して確認された。

2. 地震後の降雨による土砂移動現象の発生

地震後の4月末、6月末には比較的大きな降雨が発生し、新たな斜面崩壊、崩壊の拡大、崩壊土砂の流出などの二次的な土砂移動現象が発生し、家屋や道路等に被害を与えた。これらは主に4月21日（アメダス阿蘇乙姫で日雨量125mm）および6月19～29日（アメダス阿蘇山で総雨量1031mm、20日の日雨量212.5mm）の降雨により生じたと考えられるが、これらはこの地域で毎年発生する程度の降雨であり、近年、阿蘇地域で大規模な土砂災害を発生させた2012年7月の降雨と比べるとやや小規模な降雨である。過去の他の地域における大地震の後でも認められているように、小規模の降雨でも地震後には土砂移動現象が発生することが確認された。すなわち、強い地震による影響を受けた阿蘇地域では土砂移動現象の発生するポテンシャルが上昇していると認められる。以下、地域ごとに地震後の降雨による土砂移動現象について整理する。

(1) カルデラ内壁

地震後の降雨により新たな斜面崩壊が多数発生するとともに、斜面内および下流に堆積していた土砂が土石流となって下流に流下した（南阿蘇村立野地区の山腹斜面、阿蘇市三久保地区の山腹斜面等）。また、地震後の降雨により崩壊が拡大するとともに、崩壊した土砂が土石流となって流下した事例（南阿蘇村立野地区の山腹斜面等）も認められた。これらの土砂移動現象により、国道や鉄道、建物が被害を受けた。

(2) カルデラ内の中央火口丘群およびその周辺（河岸段丘を含む）

地震後の降雨により新たな斜面崩壊が多数発生するとともに、斜面内および溪流内に堆積していた土砂が土石流となって下流に流下した事例（南阿蘇村山王谷川）が見られた。また、地震後の降雨により崩壊が拡大した斜面も認められ、これに伴い土石流が発生して下流で氾濫した事例（南阿蘇村東下田川）も認められた。これらの土砂移動現象により家屋や国道が被害を受けた。

(3) 外輪山の周辺

西原村、益城町等の外輪山周辺の急斜面では地震後の降雨による新たな崩壊の拡大は比較的少なかった。また、地震により斜面下部や河道内に堆積した土砂が地震後の降雨により流下した事例（布田川等）が認められたが、流出した土砂量は少なく、家屋等への被害は認められなかった。

(4) 地震による亀裂の発生とその後の亀裂の推移

地震後の降雨により崩壊地頭部や周辺部の急斜面の遷急線付近において表層崩壊が発生した事例が認められた。一方、尾根や緩斜面の亀裂は内部に土砂が流入・堆積して埋まりつつあり、崩壊は発生していなかった。亀裂については今後さらに大きな降雨が発生した場合や長期的な影響について引き続き監視していく必要がある。

(5) 流域における土砂流出の可能性

前述したように、阿蘇地域においては、小規模な降雨でも地震後には新たな崩壊、崩壊の拡大、堆積土砂の再移動による土石流の発生等の土砂移動現象が発生したことが確認された。阿蘇地域の崩壊斜面内やその下部、さらに溪流内には多量の土砂や流倒木が不安定に堆積しており、今後の強い降雨により土石流・流木となって下流に流出する可能性が高い。

3. 今後の降雨による二次災害の発生の可能性

阿蘇山は我が国国有数の活火山であり、約三十万年から九万年前の巨大噴火によりカルデラ地形が形成された。約九万年前の巨大噴火では大規模な火砕流が発生し、多量の火山砕屑物を周辺に堆積させた。さらに近年においても活発な噴火活動を続けており、周辺に多量の火山灰（降下火砕物）を堆積させている。このため、地質的には火山灰（降下火砕物）、火砕流堆積物および溶岩が表層およびその下部に厚く堆積しており、堆積年代の違いや、風化・土壌化の程度の違いにより強度や透水性が異なり、さらに火山地帯特有の地質や地質構造により多量の地下水が地層の中に存在していると推定され、斜面崩壊や地すべりが発生し易い条件にある。

このような特徴を持つ阿蘇山のカルデラ内や周辺地域では最近でも1990年（死者8名）、2001年、2012年（死者・行方不明者25名）の豪雨により大規模な土砂災害が発生している。前述したように、今回の地震により斜面崩壊等が発生した地域では小規模な降雨でも土砂移動現象が発生していることが確認された。このため、今後、地震後から9月末までに発生した降雨を上回る降雨が発生した場合には、新たな斜面崩壊や崩壊の拡大、斜面内や溪流内に堆積している崩壊土砂や流木・倒木等が土石流・流木となって流下する可能性が高く、これらの土砂移動により家屋や道路が被害を受ける可能性が高い。

4. 二次的な土砂災害を軽減するための対応

前述のように、今後も大きな降雨が発生すれば新たな斜面崩壊、崩壊の拡大、堆積土砂等の再移動にともなう土石流・流木が発生する危険性は依然として高い。このような二次的な土砂移動による人命や家屋等に対する被害を防止軽減するために次のような対応を講じる必要がある。特に、人家や道路、鉄道等に影響を与える可能性が高い斜面や溪流について優先的に対応を進める必要がある。

（1）二次的な土砂災害のおそれのある危険箇所の調査

航空レーザ計測や現地調査等により危険な亀裂の分布とそれらの拡大の可能性を把握するとともに、今後の降雨により土砂移動現象の発生が予想され、下流の人家や公共施設等への影響が予想される溪流や斜面について調査を行う。

（2）土砂災害特別警戒区域の見直し

地震により山腹斜面や溪流内に多量の不安定な土砂が新たに堆積していたり、流木や倒木が多量に存在する場合にはこれらが土石流や流木となって流下した場合の氾濫・堆積区域への影響の有無などについての検討を行い、当該斜面や溪流に関して過去に土砂災害特別警戒区域の設定がされている場合には、必要に応じて基礎調査を再度実施して土砂災害特別警戒区域の見直しを行う。

（3）モニタリングと早めの避難

二次災害ならびに新たな土砂災害の発生の可能性のある亀裂や堆積土砂について、モニタリング（監視）を行い、早めの避難により人命への被害を防止する。危険性の高い斜面上の亀裂については、伸縮計等を用いて余震の強さ、降雨の量・強さと亀裂の拡大との関係を分析・判断し、早めの避難を行う。堆積土砂の流下については監視カメラ、ワイヤーセンサー等によりモニタリングを行い、降雨の量・強さとの関係を分析・判断し、早めの避難を行う。

特に、緩い斜面で発生している地すべり地域では地下水の影響が大きいと考えられることから、地下水の水位や分布の調査およびモニタリングを行う。

（4）下流の影響も含めた水系的な対応

地震とその後の降雨により、土砂と流木が下流の河川や海岸域にまで流下し、影響を与えている。この傾向は今後も続くことが予想されることから、流域全体の調査を早急に行い、その結果を踏まえ、必要な対策の検討、実施を進めて行く。

（5）雨量観測データ等の利活用

降雨の量・強度を把握するために、短時間降雨予測やXバンドMPレーダーの雨量観測データを利活用する。

(6) 既設砂防えん堤の除石の実施

斜面崩壊、地すべりおよび土石流による土砂が堆積している溪流や斜面においては、土砂や流木の堆積状況を精査し、必要な場合には既設の砂防えん堤の緊急除石を実施するなど、極力、下流への土砂流出を抑える対策を実施する。

(7) 応急復旧工事の留意点

応急復旧工事等のために斜面崩壊や地すべりの下部に立ち入る場合には、斜面の監視を行うと共に、特に崩壊頭部の不安定な土砂の除去について検討する。また、余震による突然の崩壊や土砂の流出に備えて防護ネット等の設置を検討する。さらに、二次災害の発生の危険性が高い地区での復旧工事では無人化施工を実施する。

5. 今後の地震による土砂災害への対応

熊本地震により、特に阿蘇地域においては多数の土砂移動現象が発生し人命、家屋、道路、鉄道、公共施設等に大きな被害を与え、さらに地域の社会や経済に対し、広域的な被害を与えた。さらにその後の降雨が原因で被害が拡大し、復旧・復興をさらに困難なものとしている。今回の地震により阿蘇地域では土砂災害ポテンシャルが増大しており、以前にも増して土砂災害を受ける危険性が高くなっている。わが国では、南海トラフで発生する巨大地震や首都直下型地震の発生に対する対策が講じられている中、地震による土砂災害についてもこれまで以上に対策を強力に推進する必要がある。このためには、調査研究の分野のみならず、行政においても、さらには住民一人一人においても地震による土砂災害の軽減についての対応が必要となる。

地震による土砂災害の対応としては、主として地震の発生前に行う震前対応と地震の後に行う震後対応があり、これらを共に進める必要がある。

今後進めるべき震前対応としては次の事項がある。

(1) 地震による土砂移動現象の発生機構に関する研究

今回の地震に起因する土砂移動現象の発生・流下・氾濫堆積の実態を明らかにするため、土砂移動現象と火山砕屑物(火山灰、軽石、溶岩片等)に代表される地質、地下水、地形、地震動、降雨といった様々な因子との関連について調査研究を推進する必要がある。さらに、過去に全国で発生した地震による土砂移動現象についても同様の調査研究を推進し、地震による土砂移動現象の発生機構を解明していく必要がある。

(2) 地震による土砂災害発生箇所の特性的に関する研究

今回の地震において多数の土砂移動現象が発生した南阿蘇村の立野地区は2012年の九州北部豪雨によっても土砂災害が発生した地域である。両者を比較すると、土砂移動現象の発生箇所について異なる点も多い。このため、今後は降雨による土砂災害発生箇所の特性とは別に、地震による土砂災害発生箇所の特性を解明していく必要がある。

(3) 地震による土砂災害に対する効果的な震前対策工法の開発

今回の地震においては、地震前に設置していた土砂災害対策施設は地震による土砂移動現象に対しても効果を発揮していた(南阿蘇村東下田川2溪流、立野地区の新所川2溪流など)。しかしながら、地震における土砂移動現象の発生機構や発生箇所に異なる点、未解明な点があることを考えると、より効果的な震前対策工法を開発することも必要である。

(4) 地震による土砂災害に対する知識の普及

地震による土砂災害を防止軽減するための対応としては、家屋の構造補強や地震後の避難等がある。この様な対応を促進するためには地震による土砂災害および二次災害について住民や市町村の防災担当者等に知識の普及を進める必要がある。

今後進めるべき震後対応としては次の事項がある。

(5) 地震により発生する亀裂が二次的な土砂災害に与える影響の解明

今回の地震により斜面崩壊や地すべりの頭部付近、ならびに尾根部付近の斜面において多数の亀裂が発生した。これらの亀裂が地盤の強度や透水性にどの程度の影響を与え、ひいてはそれらが新たな斜面崩壊の発生や崩壊の拡大にどの程度影響するのかについては、今回の緊急調査では明らかにすることができなかった。さらに、これらの亀裂が長期的に

斜面の安定に与える影響については現時点で不明である。したがって、今後とも亀裂のモニタリングを継続すると共に、地盤の強度や透水性についても研究を進め、それらが斜面の安定に与える影響を明らかにする必要がある。

(6) 地震後の降雨による土砂移動ポテンシャルの把握手法に関する研究

今回の地震でも、立野地区を中心として地震後の降雨により多数の新たな斜面崩壊、土石流の発生、斜面崩壊の拡大、堆積土砂や流倒木の再移動が発生し、これらにより、家屋や道路が大きな被害を受けた。このような二次的な土砂移動を予測して警戒避難ならびに応急対策を効果的に実施するためには、大きな地震動により影響を受けた地域における地震後の降雨による土砂移動ポテンシャルの把握手法を開発する必要がある。

なお、火口壁から下流の中流区間や支川の一部では、堤防天端が沈下しており、今後の土砂流出に伴う河床上昇により、洪水被害の発生する危険性について、今後の詳細な調査が必要である。

(7) 地震後の二次的な土砂移動現象による災害に対する効果的な応急対策工法の開発

今回の地震では地震後の降雨により多数の二次的な土砂移動現象が発生し、大きな被害が発生した。このような二次的な土砂移動現象による災害を防止・軽減するための効果的な応急対策工法を開発する必要がある。

(8) 火山噴火等に起因する土砂災害に対する対策

阿蘇山は活発な活火山であり、2014年の夏頃から断続的に噴火を繰り返しており平成28年10月8日には比較的大きな噴火が発生し、周辺に火山灰を堆積させた。このため、地震による土砂災害への対応と共に、今後の噴火に備え、降灰後の降雨による土石流を始め、噴火に起因する土砂災害に対しても、ハード・ソフト一体となった対策を進める必要がある。

6. 土砂災害対策に関する教育・研究の強化

平成28年10月21日には鳥取県中部地震が発生しており、さらに近い将来南海トラフを震源とする巨大地震や首都直下型地震などの発生が予想されている。また、日本各地で火山噴火が発生している。今後発生する地震や火山噴火による土砂災害について早急に対策を講じる必要がある。さらに地球温暖化の影響によると見られる激しい降雨の発生頻度も増加しており、今後も土砂災害が増加していくことが予想される。頻発する多様な土砂災害の対策を効果的に計画・実施するためにはこれらの土砂災害に関する調査研究を一層進めるとともに、高度で専門的な知識を備えた人材を育成する必要がある。しかしながら、現状では、全国の大学において土砂災害対策について専門的に教育・研究している教員の数は減少傾向にあり、山積する課題の解決や人材の育成の体制は極めて脆弱なものとなっている。このようなことから、最近、毎年のように発生する大規模な土砂災害対策を着実に実施し、将来の安全で安心な国土を築くための礎となる人材の育成と研究開発を強力に推進するためには土砂災害対策に関する教育・研究者の大幅な増員と研究開発予算の確保を図る必要がある。

以上、ここに提言する。

平成28年10月26日
公益社団法人 砂防学会
会長 丸谷 知己

はじめに

公益社団法人砂防学会 平成 28 年熊本地震に係る土砂災害緊急調査団メンバー

平成 28 年熊本地震による土砂災害に関する緊急調査に基づく提言

平成 28 年 10 月 26 日 公益社団法人 砂防学会 会長 丸谷知己

目 次

1. 地震の概況	1
2. 地形・地質の概況	6
3. 地震およびその後の降雨による被害状況	8
4. 地震による土砂移動現象の実態	9
4.1 地震による土砂移動現象の分布	9
4.2 地震による土砂移動現象の特徴	10
5. 地震後の降雨の状況	12
5.1 降雨の特性	12
5.2 2012年九州北部豪雨災害時の降雨との比較	13
6. 地震後の降雨による二次土砂移動現象と二次土砂災害の分布	14
7. 代表的な土砂災害	15
7.1 阿蘇大橋地区の大規模崩壊	15
7.2 京大火山研究センター周囲（高野台地区）の地すべり	25
7.3 カルデラ壁の崩壊と土石流	34
7.4 中央火口丘群周辺の崩壊と土石流	41
7.5 西原村の崩壊と土石流	66
7.6 立野地区およびその周辺	69
8. 砂防施設の効果	73
8.1 新所川2	73
8.2 東下田川1（無施設）と東下田川2（施設有）の比較	74
9. 警戒避難の実態	77
9.1 地震後の土砂災害警戒情報等の設定状況	77
9.2 土砂災害警戒情報の発表状況	77
10. 今後の課題	79
謝 辞	80
引用文献	80

(参考)

平成 28 年熊本地震による土砂災害緊急調査に基づく緊急提言

平成 28 年 5 月 6 日 公益社団法人 砂防学会 会長 石川芳治

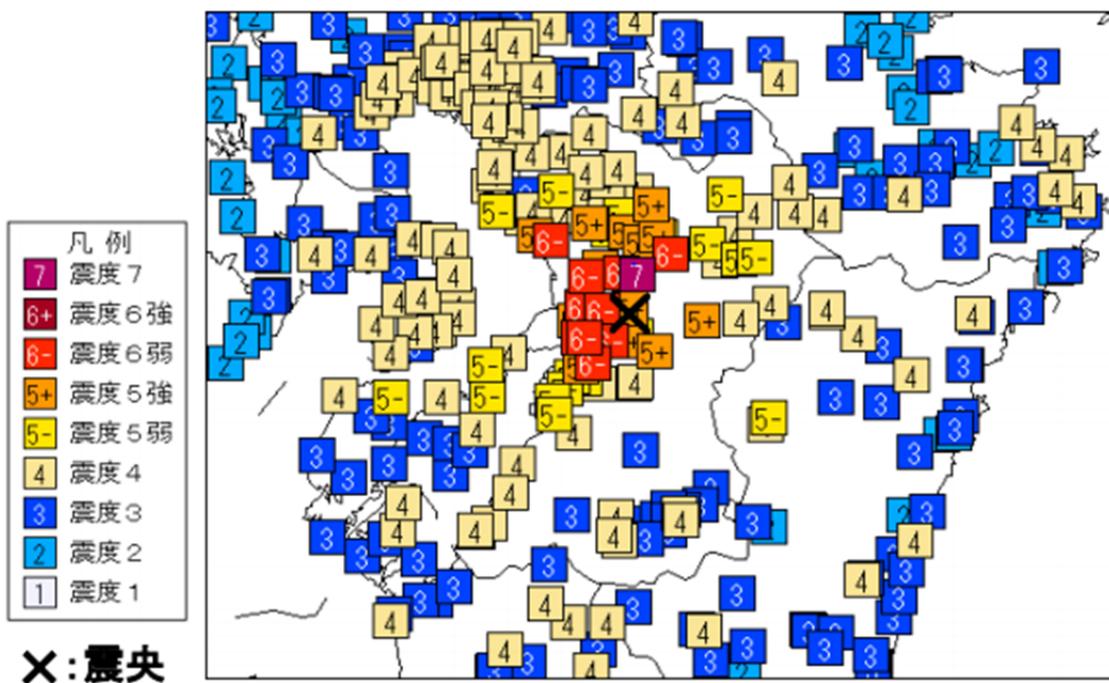
1. 地震の概況

2016年4月14日21時26分頃に熊本県熊本地方(32°44.5'N; 130°48.5'E)を震央とする地震が発生した。震源の深さは11km, マグニチュード(M)は6.5であった。熊本県益城町宮園で震度7が観測された他, 玉名市, 西原村, 宇城市, 熊本市で震度6弱が観測された(図-1.1)。余震への警戒が続けられていた中, 4月16日1時25分頃に熊本県熊本地方(32°45.2'N; 130°45.7'E)を震央とする地震が発生した。震源の深さは12km, M7.3であった。西原村小森と益城町宮園で震度7が観測された他, 熊本県内の広い範囲と大分県別府市, 由布市では震度6弱以上が観測された(図-1.1)。それ以降も, 活発な地震活動が続き, 4月30日までに最大震度5弱以上を観測した地震が18回発生した。気象庁は, 4月14日に発生した地震を平成28年(2016年)熊本地震と名付けたが, 4月16日に発生した地震を踏まえ, 4月16日の地震を本震, 4月14日の地震を前震とした。

図-1.2には, 産業技術総合研究所が作成した九州中部の主な活断層の分布および地質図と2016年4月14日~16日の地震活動による震央の分布を示す。また, 図-1.3には気象庁の震度データベース検索に基づいて作成した地震の震央分布を示した。一連の地震の震央は, 熊本県南部から大分県中部に向けて, 北東方向へ幅広く分布していた。この領域には, 布田川断層帯, 日奈久断層帯, 別府-万年山断層帯の3つが存在している。地震調査研究推進本部地震調査委員会は, 4月14日の地震は, 日奈久断層帯の高野-白旗区間の活動によるもので, 4月16日の地震は, 主に布田川断層帯の布田川区間の活動によるものと考えられると評価した。

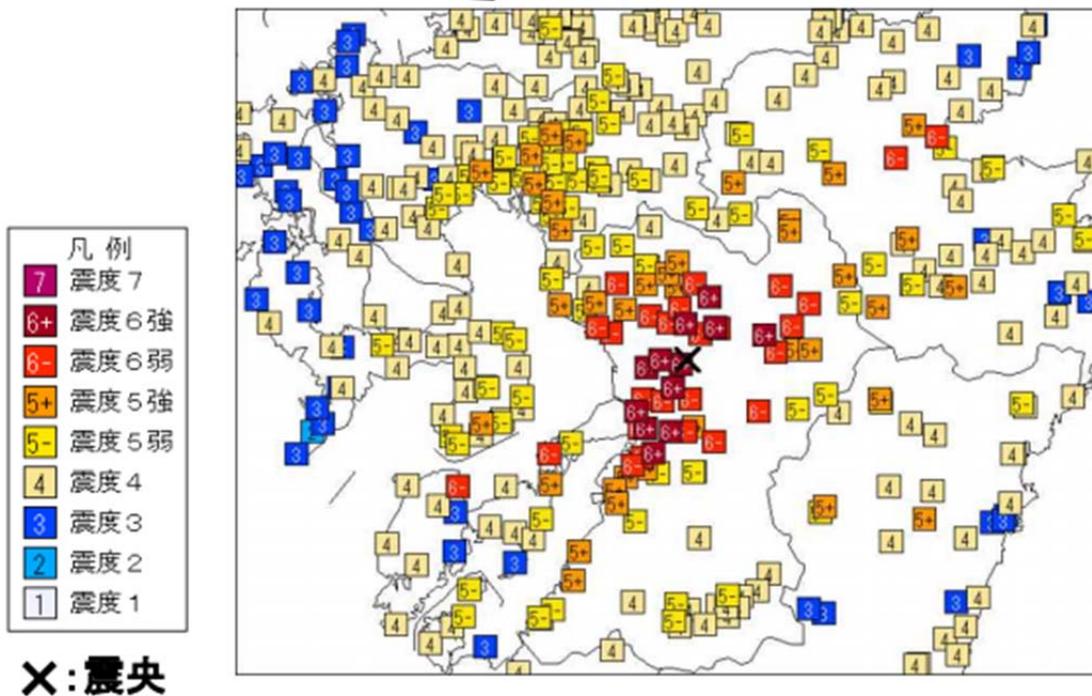
4月14日, 16日の地震を含む多くの地震は, 概ね南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型であった。4月16日の地震で震度7を記録した西原村小森と益城町宮園の最大加速度(3成分合成値)は, それぞれ899.1, 904.0galであった。震度はそれよりも小さかったものの, 最大加速度が, それより大きくなった地点も存在した。震度6弱以上を観測し, 最大加速度が1000galを超えたのは, 南阿蘇村河陽(1316.3gal), 大津町大津(1791.3gal), 熊本北区植木町(1026.9gal), 大分県別府市鶴見(1155.0gal)であった。4月14日の地震では, 最大震度が観測された益城町宮園で, 816.7galを観測されたが, その他の地点の最大加速度はこれを下回った。地震による地殻変動も観測されており, 南阿蘇村長陽では, 4月16日の地震で, 南西方向に約98cm移動した。なお, これらの情報は, 主に政府の地震調査研究推進本部(<http://www.jishin.go.jp/>)によって行われた熊本地震の評価から得たものである。

国土地理院は, 干渉SARによる観測結果(2016年3月7日~2016年4月18日, 2015年2月10日~2016年4月19日)を組み合わせ, 2.5次元解析を行い, 地殻変動の準上下成分を求めた。さらに変動量が大きい可能性がある布田川断層に沿って, 干渉SARだけでは変動が充分確認できない地殻変動の全体像を把握するため緊急GNSS観測(4月21日~22日及び5月3日~5日)を実施した。その結果, 図-1.4に示すように最大で2.1mの沈降が確認された。なお, 国土地理院は図-1.3に関して「観測点(1), (2), (5), (9), (10), (11)は, 干渉SARで得られた上下変動量と整合的な結果が得られていることから, 干渉SARでは明瞭な干渉が得られなかった西原村西部も含め, 布田川断層の北西側では周辺地盤全体が緩やかな傾斜で最大2m程度の沈降が生じたものとみられます」と述べている。



各観測点の震度分布図（震央近傍を拡大）

(a) 4月14日21時26分頃の熊本地震の震度分布



各観測点の震度分布図（震央近傍を拡大）

(b) 4月16日01時25分頃の熊本地震の震度分布

図-1.1 4月14日および16日の地震の震度分布（気象庁HP，2016より）

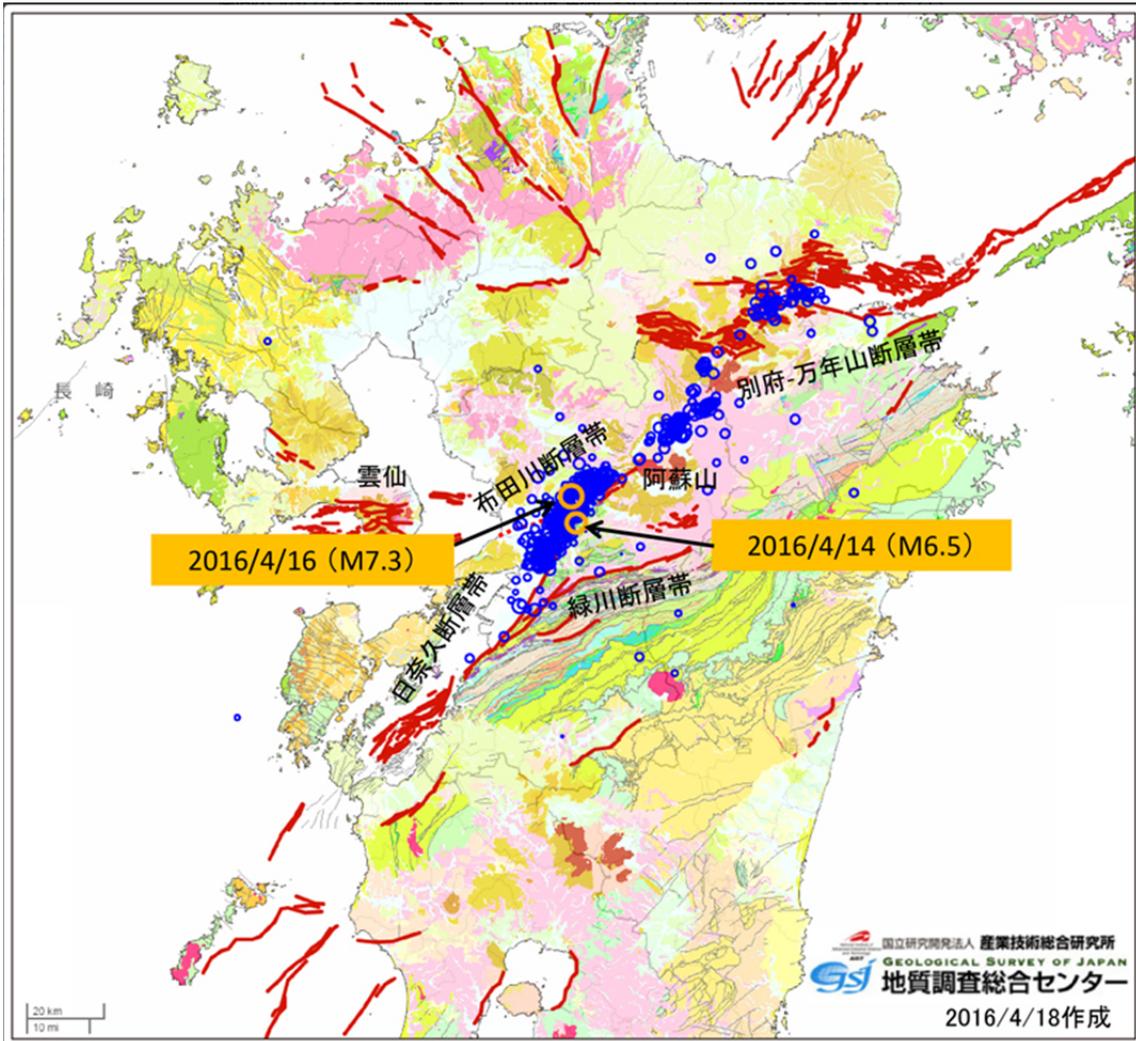


図-1.2 2016年4月14日0時から16日12時に熊本県，大分県で発生した地震の震央分布と九州地方の活断層の分布ならびに地質図（産業技術総合研究所，地質調査総合センターHP，2016より）

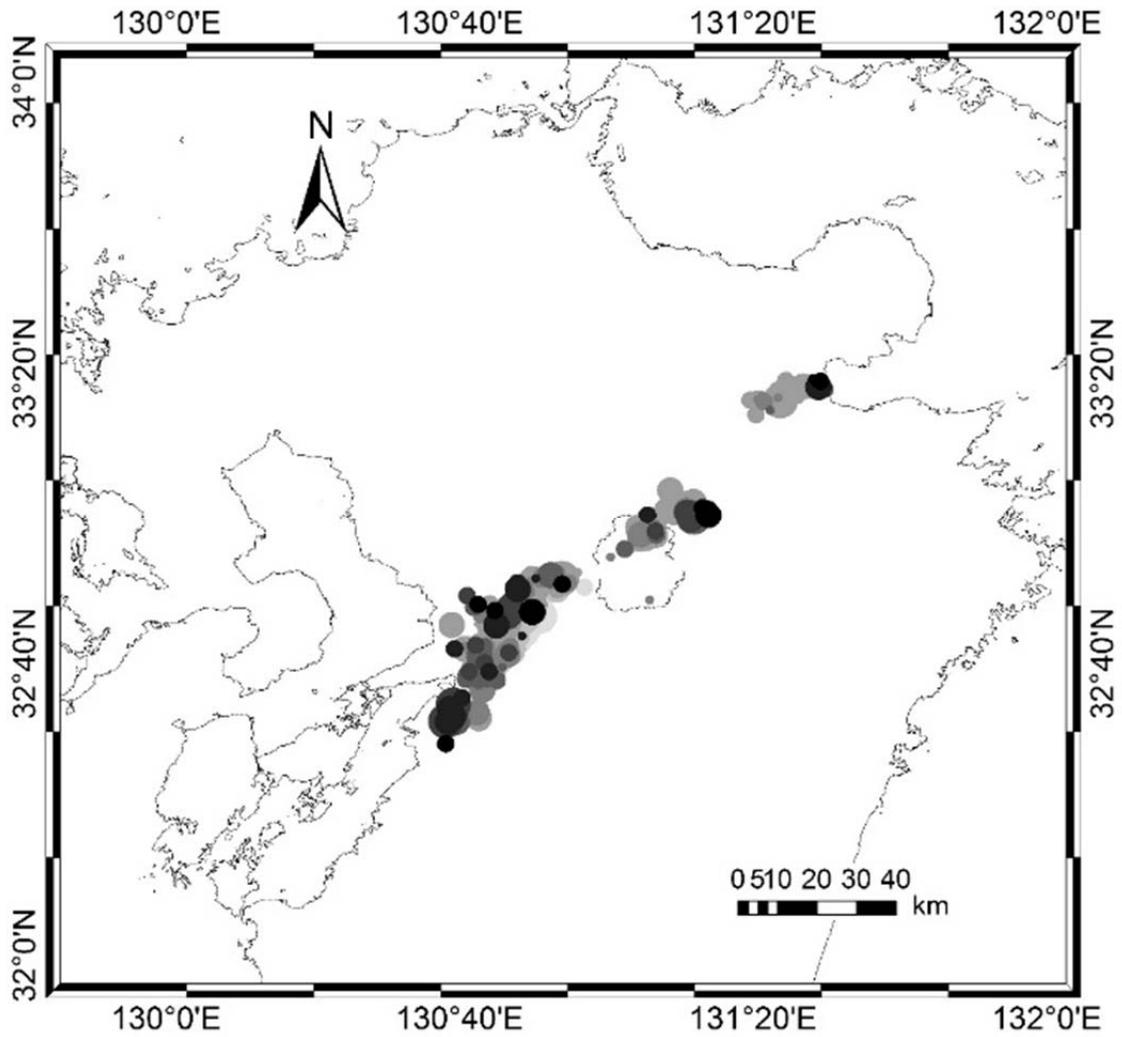


図-1.3 2016年4月14日から21日に熊本県、大分県で発生した地震の震央分布
 丸の大きさは地震の規模（マグニチュード）、色の違いは発生日の違いを示す（4月16日の色が最も薄く、21日の色が最も濃い）

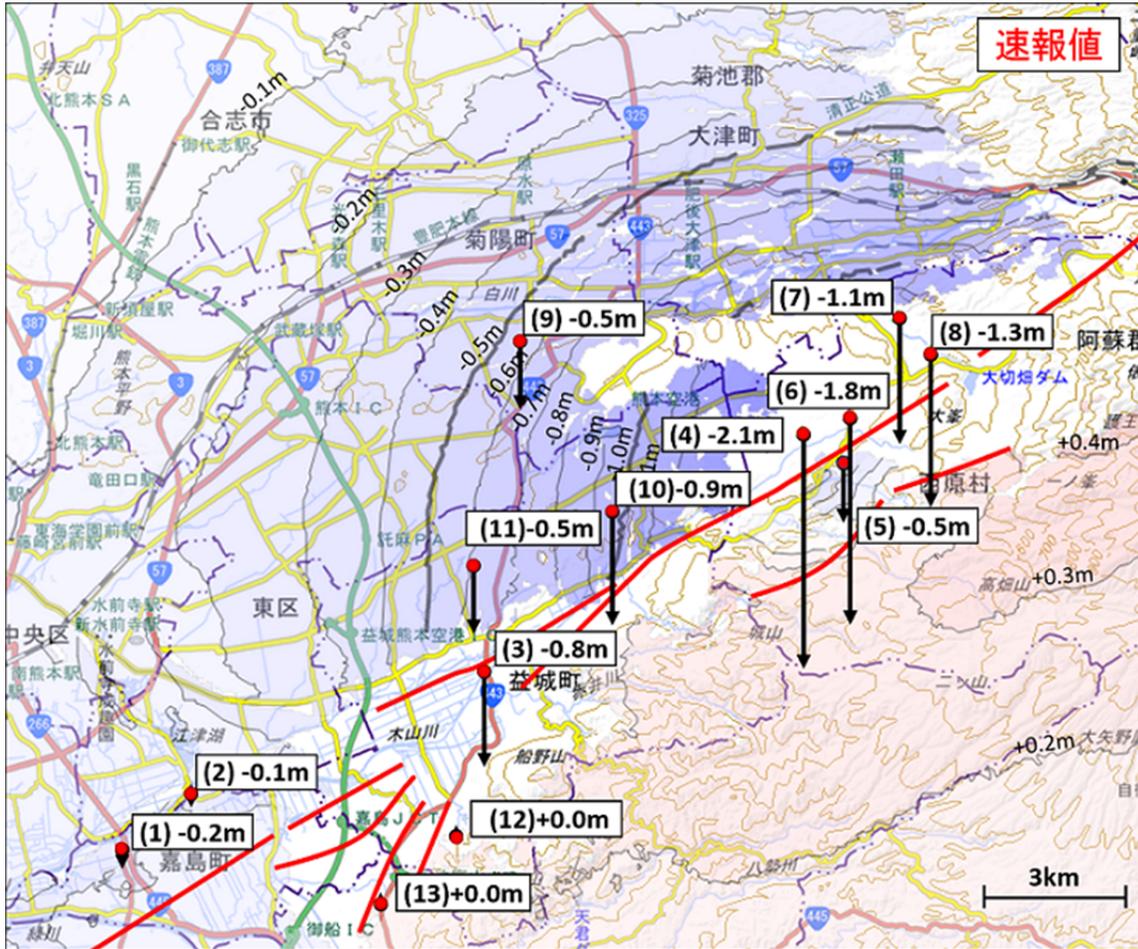


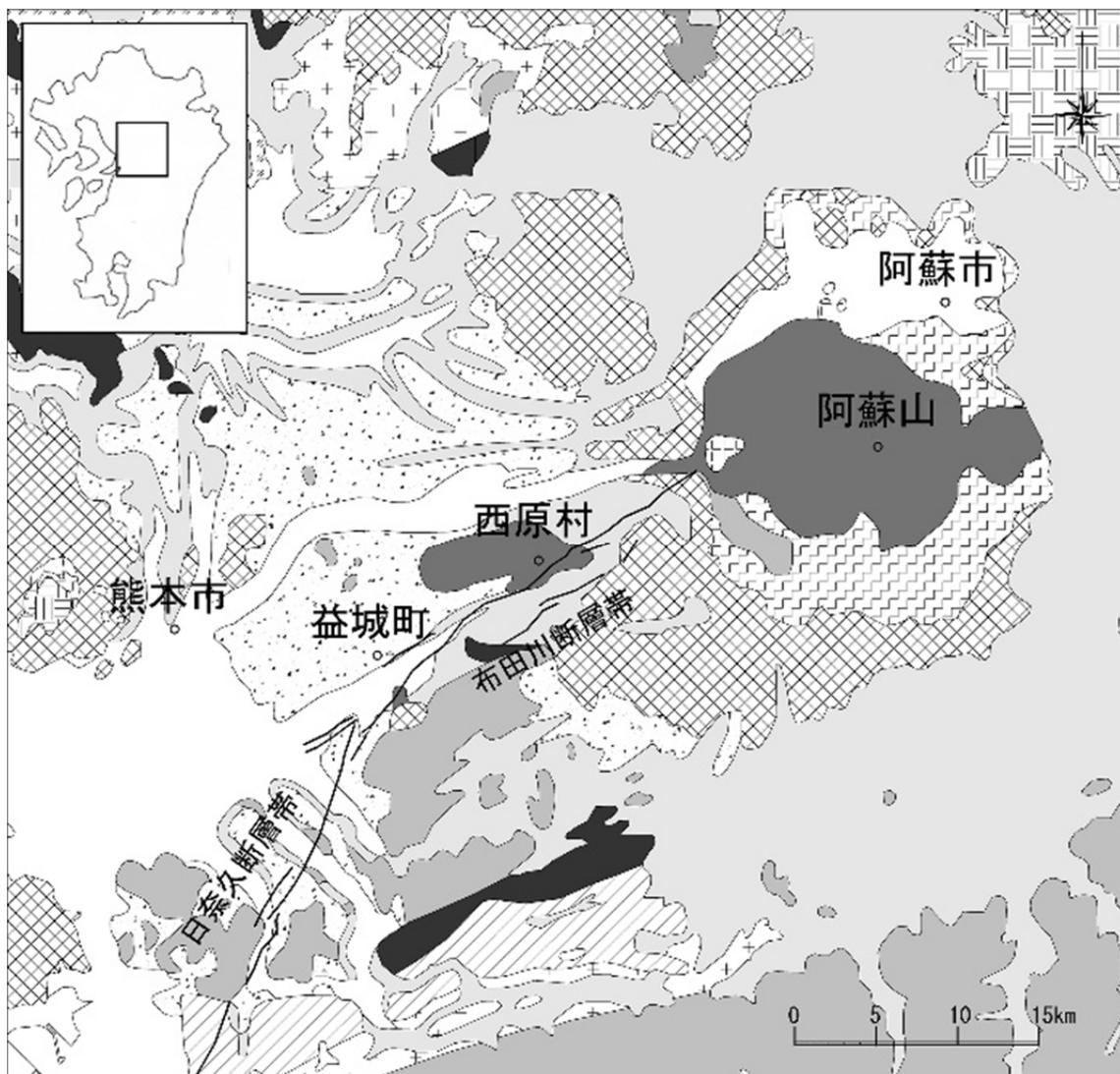
図-1.4 国土地理院による GNSS 観測に基づく地震後の地殻変動量測定結果（背景は地理院地図に干渉 SAR で得られた上下変動を重ねたもの）※ 活断層（赤線）は地震調査推進本部による。（国土地理院のHP, 2016 より）

2. 地形・地質の概況

熊本県は九州本島の中央部に位置している。東部の阿蘇地方には世界有数の規模を誇るカルデラ地形があり、標高 1500m 前後で比較的なだらかな中央火口丘群や、その周囲を取り巻く急峻な外輪山が特有の地形を呈している。また、外輪山西斜面から続く洪積台地と、有明海に流れ込む白川・緑川などが形成した沖積低地が広大な熊本平野を形成している。

図-2.1 に阿蘇地方から熊本平野にかけての地質図を示す。阿蘇の中央火口丘群には新生代第四紀の新しい火山岩が分布している。この地域の火山活動は約 7 万年前以降に開始されたものと推定されており、地表には各火口から噴出した溶岩類と共に火山灰やスコリア等が堆積している。一方、カルデラの外周を成す外輪山には鮮新世から更新世前期までの古い安山岩等が分布しており、カルデラ内壁の急崖部分でよく観察することができる。また、更にその外側には阿蘇火砕流がみられ、外輪山の外側のなだらかな山麓を形成している。

熊本平野に関しては、白川・緑川起源の砂礫層が広く分布している。平野の南には活断層である日奈久・布田川断層帯が存在しており、さらに南では秩父帯や肥後帯に属する中～古生代の堆積岩・変成岩類が広くみられるようになる。



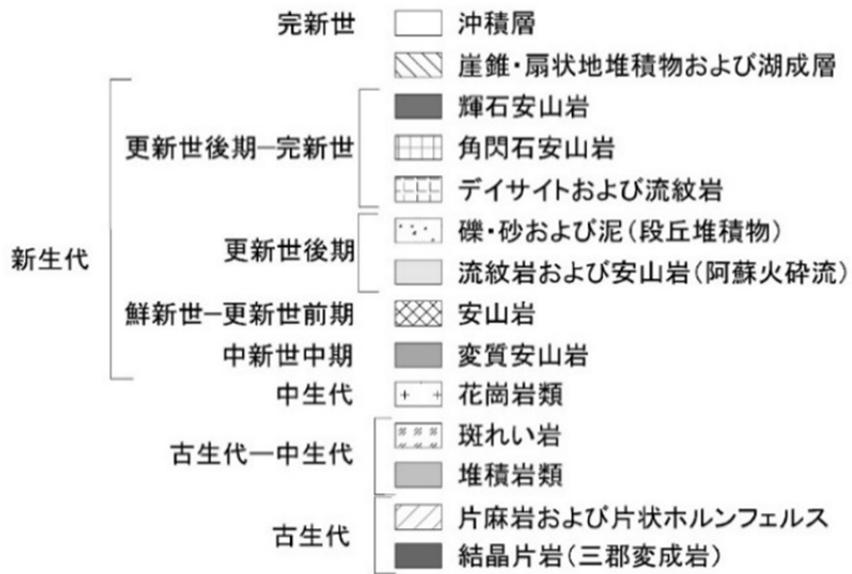


図-2.1 熊本地域の地質図
 50万分の1地質図幅 No.14「福岡(第3版)」(1976), No.15「鹿児島(第2版)」(1980), 50万分の1活構造図 No.14「福岡」(1985), No.15「鹿児島」(1984)より合成, 加筆

3. 地震およびその後の降雨による被害状況

大きな被害を発生させたのは、4月14日21時26分の地震と4月16日1時25分の地震である。4月14日の地震では、益城町において特に著しい家屋倒壊被害、九州自動車道の路面陥没・通行止め、九州新幹線の列車脱線等が発生した。死者数は、倒壊家屋の下敷きによる益城町の8名と家屋内転倒による熊本市の1名（内閣府非常災害対策本部4月15日18時現在のまとめ）であった。

そして、4月16日の地震による被害は4月14日よりも格段に大きく、震度6強以上の揺れを観測した10市町村などで建物損壊、道路不通、水道・電気・ガスの供給停止等が大規模かつ激甚に発生した。死者数は、内閣府非常災害対策本部9月14日現在のまとめによると、警察が検視により確認している数が累計50名であり、先の4月14日の地震による9名を差し引くと、41名となる。次に述べるように、このうちの10名が4月16日の地震時に発生した土砂災害による死者である。

地震による土砂災害について、国土交通省の6月7日現在の調べによると、熊本県における発生数は土石流57件、地すべり10件、がけ崩れ123件で、合わせて190件である。これらは、国土交通省が所管する人家等に影響を与えた災害の件数であり、これ以外にも崩壊等の発生箇所は非常に多く存在した。地震により直接的に発生した死者を伴う土砂災害（一次災害）は合計4件であり、死者数はあわせて10名である（表-3.1）。このうちの1件は、道路走行中の車が斜面崩壊に巻き込まれて1名が行方不明になっていた事案で、マスコミ報道によると8月10日に崩壊現場近くで埋まった車が発見され、同14日に1名の死亡が確認された。これらの4件はいずれも南阿蘇村において4月16日の地震により発生した。4箇所は東西4km南北1kmの比較的狭い範囲内に集まっているが、崩壊した深さやすべり面付近の土質・岩質、土砂の移動形態や発生斜面の傾斜などが多様であった。このことは火山性斜面・地盤が崩壊を起こす素因を各種有していることの表れと考えられる。

地震後の6月19日から6月25日の梅雨前線により九州中部では豪雨が発生した。特に6月20日夜～21日朝にかけては豪雨が激しくなり、熊本県の各地で土砂災害が発生し、あわせて5名の尊い命が失われた（表-3.2）。

表-3.1 地震に伴う土砂災害（一次災害）による死者数

場所	発生現象	死者数
南阿蘇村 立野 立野川地区	斜面崩壊に伴う土石流が下方の集落到に氾濫	2
南阿蘇村 河陽 高野台地区	地すべりにより団地の複数の家屋が土砂に埋没	5
南阿蘇村 長野 火の鳥温泉地区	斜面崩壊によりホテルの離れの宿泊棟が倒壊	2
南阿蘇村 立野 阿蘇大橋付近	大規模な斜面崩壊により下方のJR線路、国道、阿蘇大橋が押し流される。通行中の車が巻き込まれる。	1

表-3.2 地震後の降雨に伴う土砂災害（二次災害）による死者数
（熊本県土木部砂防課，2016）

場所	発生現象	死者数
熊本市北区津浦町	斜面崩壊	2
宇土市椿原町	斜面崩壊	1
宇土市住吉町	斜面崩壊	1
上天草市大矢野町登立字岩谷	斜面崩壊	1

4. 地震による土砂移動現象の実態

4.1 地震による土砂移動現象の分布

国土交通省国土地理院が地震発生後の2016年4月16日、19日および20日に撮影した空中写真より作成した土砂崩壊地分布のKMLファイル(国土交通省国土地理院, 2016)を用いて、崩壊地の分布図を作成した(図-4.1.1)。崩壊地は、地震の震源断層に沿って分布している。とくに、カルデラ内壁、中央火口丘群周辺、阿蘇外輪山周辺に崩壊地が集中している。また、崩壊地の多くは、震源断層から両側に約20km以内の距離に含まれる。さらに、面積が1ha以上の大規模な崩壊地は震源断層から両側に約10km以内の距離に分布している。

崩壊地の空間的分布を支配している要因として、①地震の規模、②地質、③地形が挙げられる。①については、地震の規模が大きかった場所ほど崩壊地が集中するとともに、大規模な崩壊地が分布している。②については、阿蘇の火山噴出物に覆われた斜面において崩壊地が集中して分布している。③については、火山灰・軽石の厚く堆積した緩斜面においても崩壊地が分布しているが、その多くは、カルデラ内壁、中央火口丘群、河成段丘、火砕流堆積物などにおける急斜面に分布している。

なお、砂防学会第一～第四次調査団による主な調査地の位置を図-4.1.2に示す。図中の布田川断層の位置は産業技術総合研究所, 2016に基づいている。

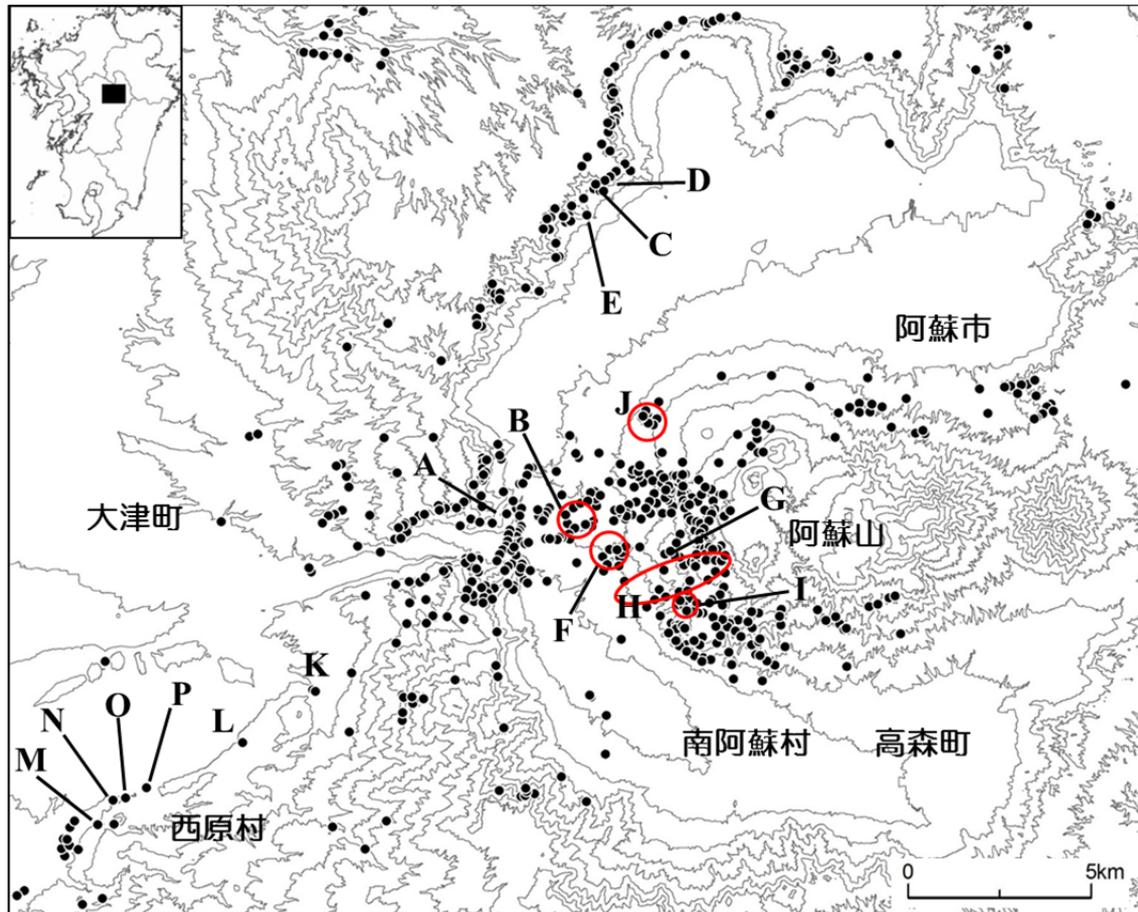


図-4.1.1 崩壊地の分布図(国土交通省国土地理院, 2016に加筆)



図-4.1.2 砂防学会第一～第四次調査団による主な調査地の位置図
(布田川断層の位置は産業技術総合研究所, 2016 による)

4.2 地震による土砂移動現象の特徴

今回の地震に伴って大きな被害を引き起こした主な土砂移動現象の形態および特徴は以下のようにまとめられる。

4.2.1 カルデラ内壁の崩壊

カルデラ内壁の草地や林地の急斜面において、表層の火山灰などの降下火砕物とその下位の風化した溶岩類の崩落が多数発生した (図-4.2.1 a)。崩壊規模は、土砂量数百 m^3 から 7.1 で示す阿蘇大橋地区で発生した崩壊のような数十万 m^3 という大規模なものまで様々である。同時に斜面脚部に発達した崖錐が崩壊した箇所もみられた (7.3.2 で示す上の小屋川 2 流域など)。また、今回の地震ではカルデラ壁の尾根周辺斜面や崩壊地周囲に多数の亀裂が発生したことも特徴である。さらに、カルデラ内壁の崩壊は凸地形の急斜面でも発生し、尾根近くから崩壊したものが多かった。また、カルデラ内壁の急斜面からは落石も多数発生している。

4.2.2 中央火口丘群周辺の急斜面の崩壊

中央火口丘群周辺の草地や林地の急斜面では火山灰を主体とする表層土が滑り落ちる表層崩壊が多数発生した (図-4.2.1 b)。崩壊規模は土砂量数百 m^3 から数千 m^3 であるが、多数発生したため、多量の土砂が溪流に堆積している。また溪流に入った崩壊土砂が土石流や土砂流となって流下し、農地等に被害をもたらした箇所もあった (7.4.4 で示す山王谷川流域など)。特徴として、崩壊地周辺には地震で生じた亀裂が多数みられた。

4.2.3 中央火口丘群周辺の緩斜面の崩壊や地すべり

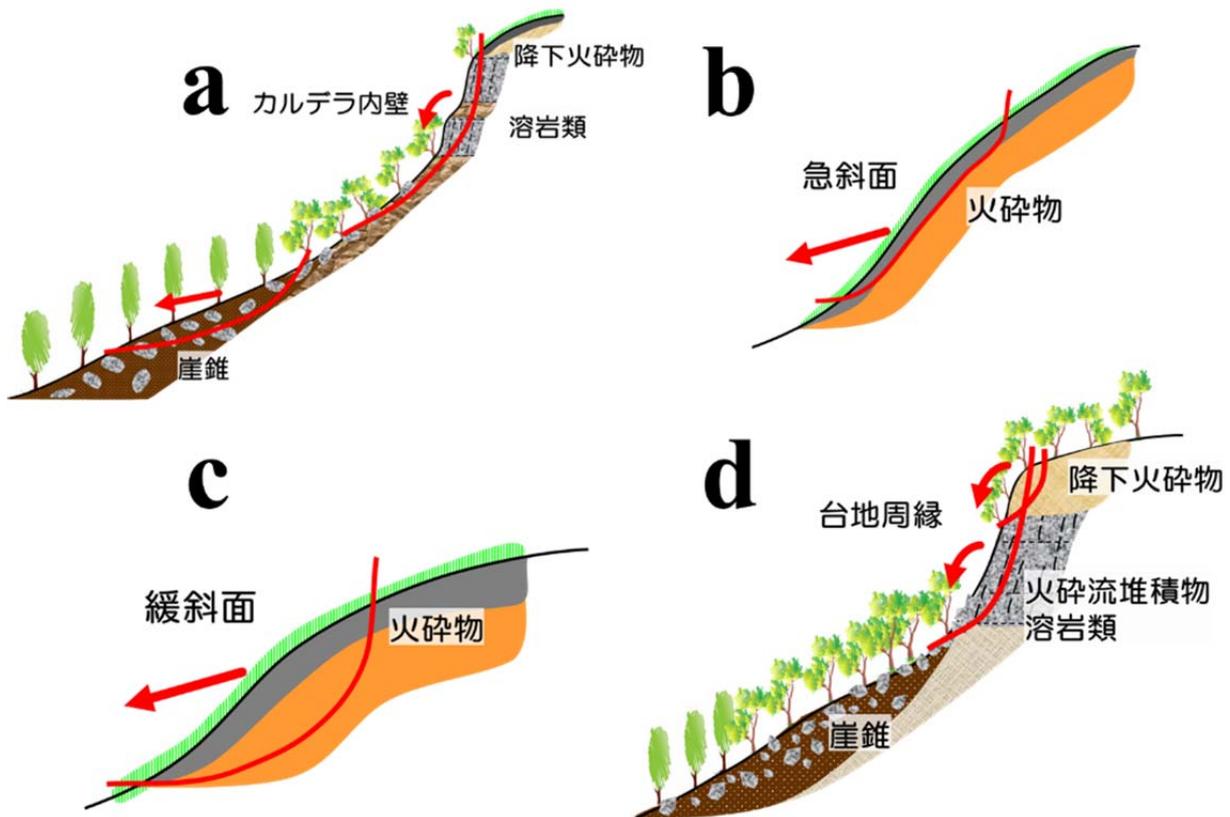
中央火口丘群周辺には、火山灰やスコリアなどの火砕物や溶岩類が厚く堆積した丘陵地

が分布している（図－4.2.1 c）。丘陵地の緩斜面において深さ数 m から 10m 程度の崩壊や地すべりが発生した。崩壊深が大きいと、前項で述べた急斜面の表層崩壊より移動土砂量が大きい。7.2 で示す京大火山研究センターが位置する丘陵地では地すべりが発生し、人的被害をもたらしている。また丘陵地の緩斜面でも地震による亀裂が多数生じている。

4.2.4 外輪山周辺の台地周縁の崩壊

阿蘇外輪山周辺域には火砕流堆積物や溶岩からなる台地が広く分布し、台地周縁の急斜面では多数の崩壊が発生した（7.5.2 で示す西原村布田川流域など）。表層の火山灰などの降下火砕物やその下位の火砕流堆積物や溶岩が崩壊した（図－4.2.1 d）。台地に刻まれた溪流には多量の土砂が堆積している箇所もある。

以上のほか、南阿蘇立野地区の白川河岸の急斜面では崩壊や地すべりが発生し、その斜面上部段丘上の農地や道路が被災した。



図－4.2.1 崩壊の模式図

5. 地震後の降雨の状況

5.1 降雨の特性

4月16日の本震以降、阿蘇山周辺では4月21日および5月上旬に降雨があったが、いずれも連続雨量100~200mm、最大時間雨量20mm程度の、それほど大きくない雨量であった。しかし、6月19~25日に本州付近には梅雨前線が停滞し、その前線上を次々と低気圧が通過した。その後前線は南下し、一時活動が弱まったが、27日以降再び本州付近に北上し活動が活発となった。これらの影響で、西日本を中心に大雨となった。19日から29日までに観測された総降水量は九州地方の広い範囲で500mmを超え、南阿蘇村阿蘇山では1031mmを記録した。本項では、降雨の影響を地震前後で比較するため、雨量観測所は今回崩壊が多発した地域に加え、2012年豪雨災害で崩壊が多発した地域の近傍として阿蘇乙姫を選定した。

図-5.1.1に示したように、2016年6月19日からの降雨は、阿蘇カルデラ内外では比較的一様に降り続き、連続雨量では約1週間をかけて700~1000mm程度に達している。時間雨量としては6月20日22時から23時頃に、益城で64.5mm、南阿蘇で68.5mm、阿蘇乙姫で41.5mmと比較的強い雨を記録したが、強雨が連続することはなかった。

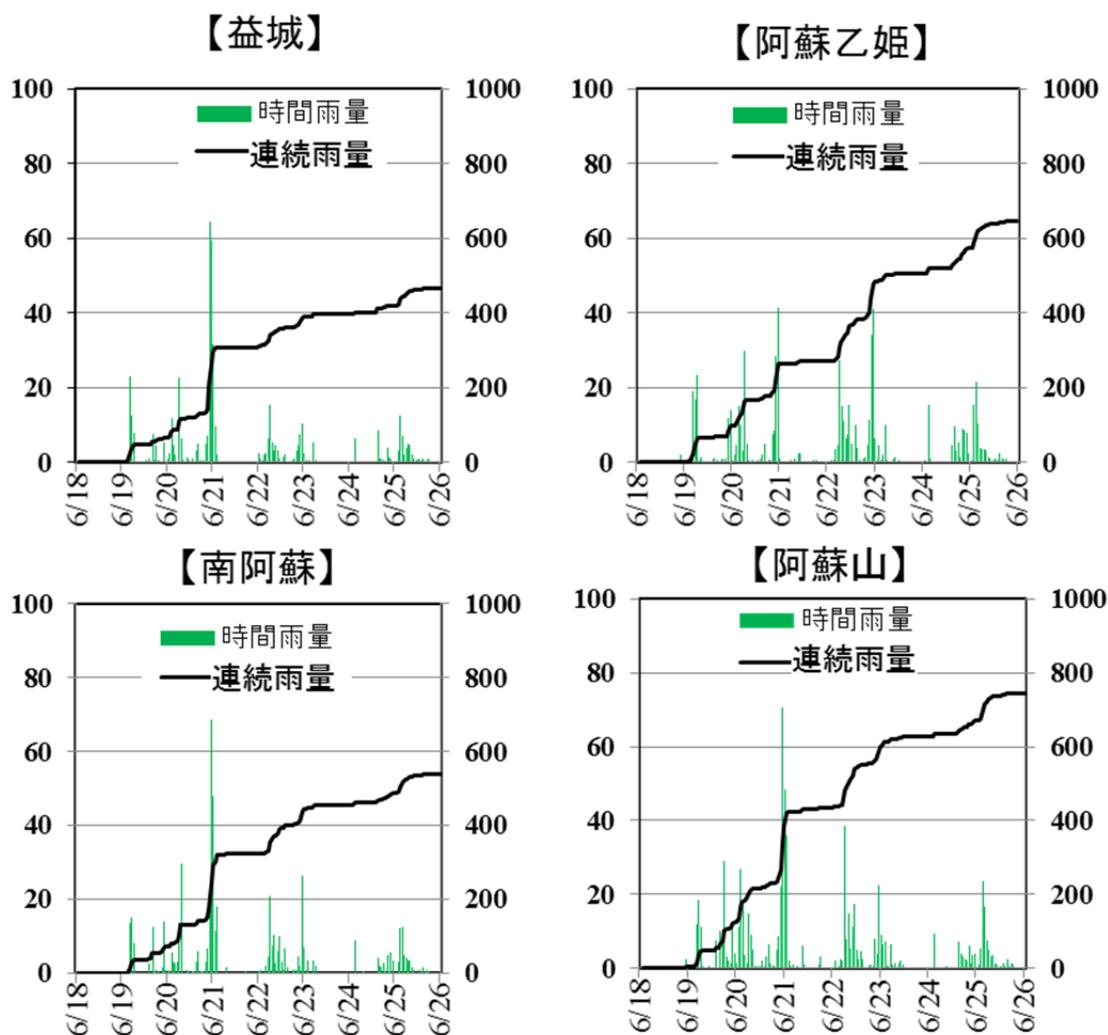


図-5.1.1 2016年6月18日~25日の阿蘇山周辺での降雨量
左軸：時間雨量 (mm)，右軸：連続雨量 (mm)

5.2 2012年九州北部豪雨災害時の降雨との比較

2016年6月の降雨はカルデラの西側、2012年7月九州北部豪雨災害(久保田ら, 2012)の降雨は東側で多く降っており、代表としてカルデラ中央に位置する阿蘇山のハイエトを図-5.2.1に示した。連続雨量としては2016年の方が大きい、2012年は7月12日未明の5時間程度に強雨が集中していた。

図-5.2.2に阿蘇山・南阿蘇・阿蘇乙姫・湯ノ谷のスネーク図を示した。なお、熊本県では土砂災害警戒情報を「AND/OR」方式で現在運用しており、このスネーク図にはCLを記載していない。

今回の地震後の雨ではカルデラ東壁部分では殆ど土砂崩壊現象が発生していないが、この地域が震源断層から遠いことに加え、阿蘇乙姫の雨量を比較すると2016年の方が2012年よりはるかに少ないことが影響していると考えられる。

他方、阿蘇山・南阿蘇・湯ノ谷では、今回の地震後のスネークラインは2012年のレベルに近い状況であったことが分かる。このエリアでの拡大崩壊・新規崩壊の発生時刻を特定できれば、地震後のCL引き下げ基準の妥当性検証に寄与するものと考えられる。

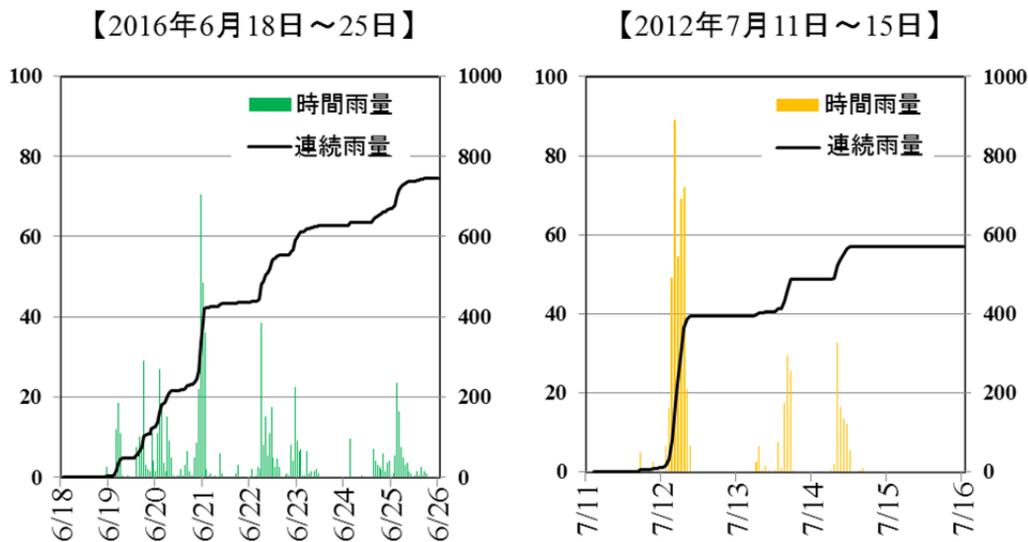


図-5.2.1 2016年災害と2012年災害の降雨量比較(阿蘇山)
左軸：時間雨量(mm)，右軸：連続雨量(mm)

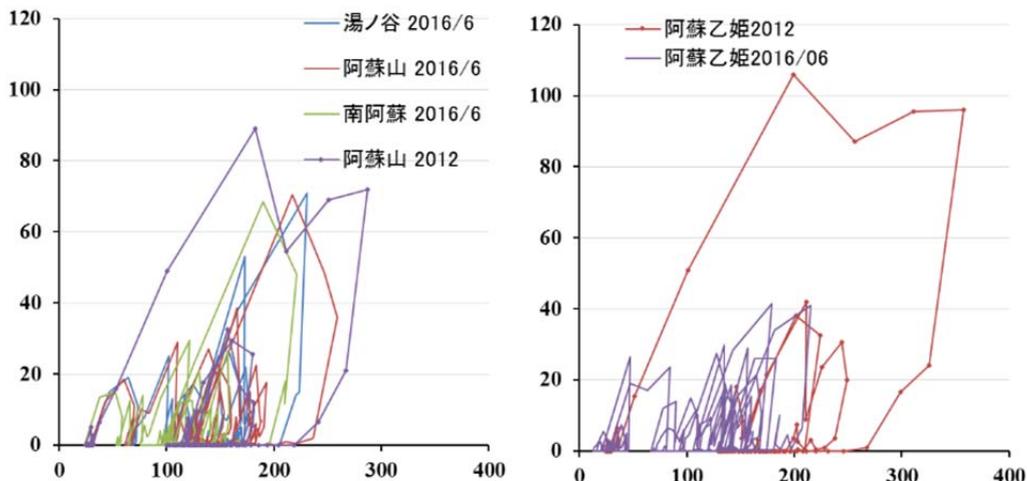


図-5.2.2 2016年災害と2012年災害のスネーク図の比較
縦軸：時間雨量(mm)，横軸：土壌雨量指数(mm)

6. 地震後の降雨による二次土砂移動現象と二次土砂災害の分布

国土地理院がホームページで公表している4月15日、4月16日、4月19～20日、4月29日、5月30～31日、7月5日、7月5～24日に撮影された空中写真を比較することにより、本震後の4月21日の降雨、6月19～29日にわたる降雨により二次土砂移動現象が発生したと推定される範囲を判読した。これらの降雨による二次土砂移動現象が集中したのは、南阿蘇村の立野地区（白川右岸側山腹斜面）およびその南の白川左岸および山腹斜面（大津町、南阿蘇村、西原村）であった。図-6.1には国土地理院が公表している空中写真を基に判読した立野地区およびその周辺における地震およびその後（4月16日～7月24日）の降雨による土砂移動現象の影響範囲の変化を示す。4月21日の降雨による二次土砂移動現象は発生数も面積も少ない。一方、6月19～29日の降雨による二次土砂移動現象は発生数も面積も大きい。これは前述したように主として降雨量の違いによるものと考えられる。後述するように、立野地区およびその周辺以外でも地震後の降雨により二次土砂移動現象は発生し、家屋や道路、鉄道に被害を与えた。

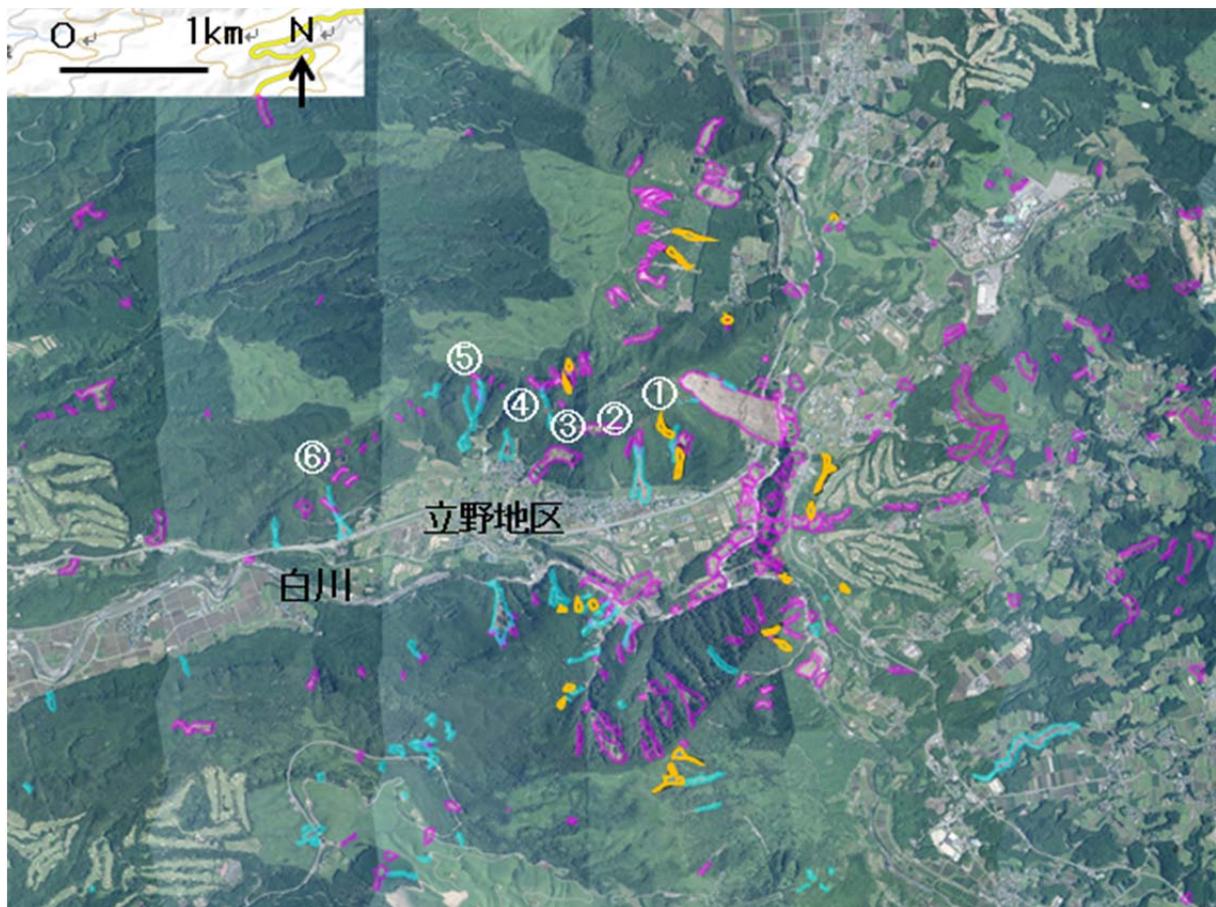


図-6.1 南阿蘇村立野地区周辺における地震による土砂移動現象とその後（4月16日～7月29日）の降雨による二次土砂移動現象の影響範囲の分布（国土地理院のHP掲載の空中写真を用いて判読）赤色の区域は地震により発生した土砂移動現象の影響範囲、黄色の区域は4月21日の降雨によるもの、水色の区域は6月19～29日の降雨によるものを示す。白抜き①～⑥は本文中の7.6.1において説明している土砂移動現象の位置を示す。

7. 代表的な土砂災害

7.1 阿蘇大橋地区の大規模崩壊（図-4.1.1のA）

7.1.1 地形・地質・植生および土地利用

崩壊が発生した斜面は、阿蘇カルデラ壁の西側の切れ目に位置し、南西～北東方向に張り出した支尾根の南東斜面にあたる（図-7.1.1.1）。支尾根の頂部は丸みを帯びた緩斜面であるのに対し、その南東側側面は勾配 37～40 度程度の急斜面となっており、その下方に勾配 20 度前後の崖錐地形が広がる。崖錐の末端は 5～10 度程度の緩斜面に連続した後、黒川の河道で縁切られ、比高 40m 程度の深い溪谷となっている。

斜面上部の地質は、上位から順に黒ボク、黄褐色ローム層（以上 2 層を合わせて、以下では表土と呼ぶ）、基岩となっており、基岩の上部は風化して角礫状になっている。表土の厚みは、斜面上部の緩斜面の亀裂や段差で確認できた範囲では、少なくとも 2m 以上であった。基岩は阿蘇火山地質図によれば先阿蘇の輝石安山岩溶岩となっている（図-7.1.1.1）が、現地では崩壊面を遠望観察および崩壊堆積物を観察した結果によれば、溶岩や凝灰角礫岩等が互層をなしている。現地観察および支尾根を挟んだ南北の斜面形状の対比から、基岩の層理面は北方に傾いており、崩壊面に対してはやや受け盤をなすと考えられる。

斜面下部は立野溶岩または赤瀬溶岩の上位に、ローム、シルト、礫などが黒川に向かって傾斜しながら互層をなしている。現地では礫層とローム・シルト層の間から地下水がしみ出しているのが確認された。

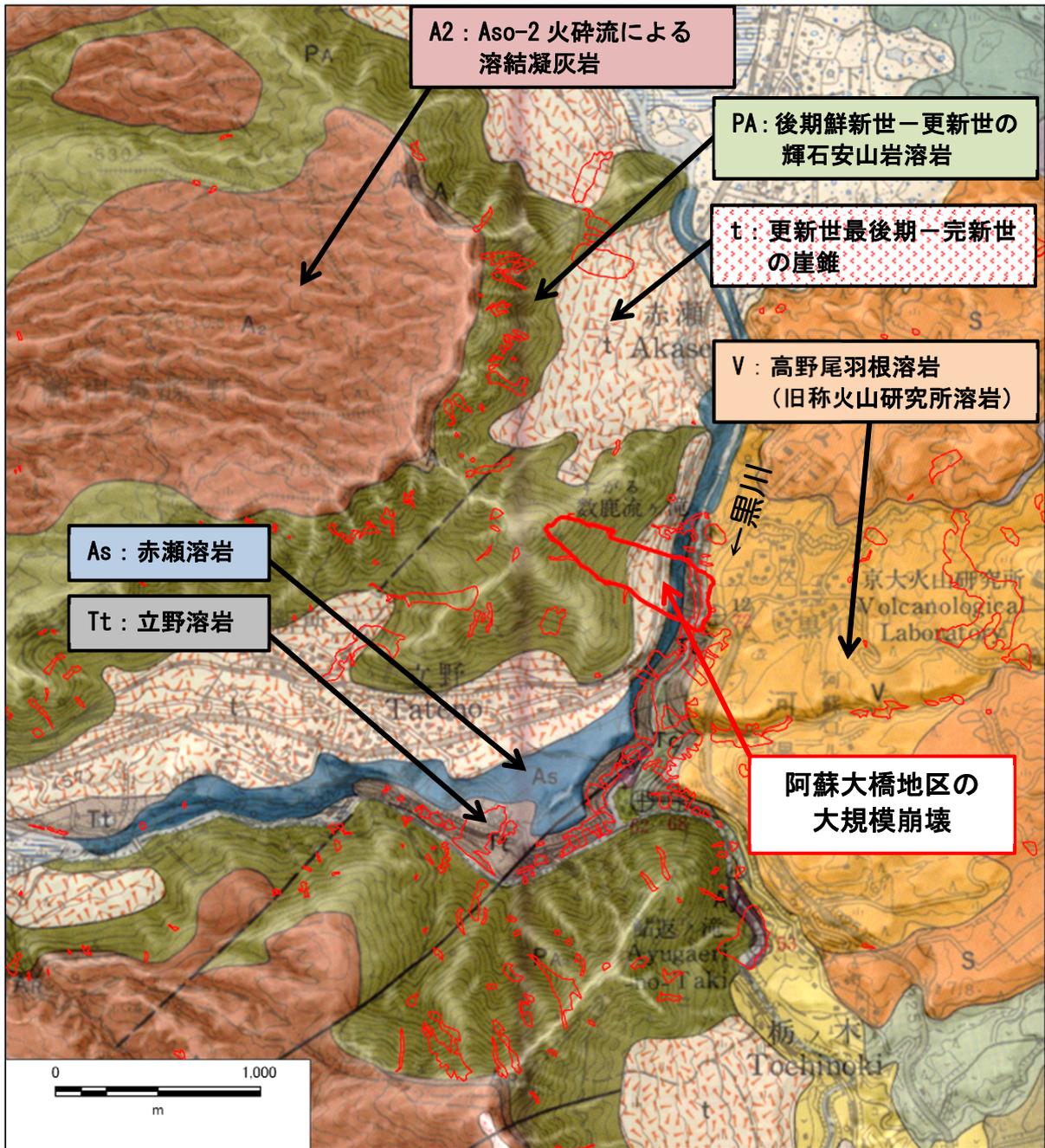
植生は大部分がヒノキ林であり、斜面頂部付近のみ高さ 2m 程度のササ密生地となっている。斜面下部は JR 豊肥本線や国道 57 号が走り国道 325 号の阿蘇大橋の架かる交通の要衝であったが、崩壊発生によって流失した。

7.1.2 崩壊地全体の概況

図-7.1.2.1 に崩壊発生直後の空撮写真を示し、図-7.1.2.2 に地震後の航空レーザ計測データ（以降 LP データと呼ぶ）から作成した崩壊地概況平面図を示す。

図-7.1.2.2 に示すように、崩壊地は概ね、一次崩壊発生域（約 2.6ha）、流下・堆積域（約 10.0ha）、および、JR・国道の横過部より下流側の二次崩壊発生域（約 2.9ha）の 3 つに区分することができる（合計約 15.5ha）。さらに、その下に黒川への河道流入部が存在する。一次崩壊発生源から黒川河道までの直線距離は約 800m で、それに対して直角方向に幅を取ると、一次発生域の最大幅は約 170m、流下堆積域の最大幅（二次崩壊発生域も同じ）は約 280m である。

図-7.1.2.3 には地震前後の LP データを用いた縦断図を示す。発生域の縦断勾配は約 37 度、流下・堆積域は約 22 度、二次崩壊発生域は約 17 度である。対岸の土砂到達点から発生点までの見通し角は約 22 度である。最大崩壊深は一次崩壊で 20m 以上、二次崩壊で 10m 以上となっている。流下・堆積域においては侵食・堆積深は大きくない。LP データの標高差分解析によって土砂量を算出した結果（表-7.1.2.1）、崩壊地全体の生産土砂量は約 54 万 m³ 以上、堆積土砂量は約 5 万 m³ 以上で、その差約 49 万 m³ が黒川河道に流出したことになる。



地質図： 地質調査所による 1:50,000「阿蘇火山地質図」(1985年)を使用。
崩壊地分布(赤枠)： 防災科学技術研究所による「熊本地震による土砂移動分布図」を使用。

図-7.1.1.1 阿蘇大橋地区の崩壊地付近の地形・地質



図-7.1.2.1 阿蘇大橋地区の崩壊（2016年4月16日撮影）

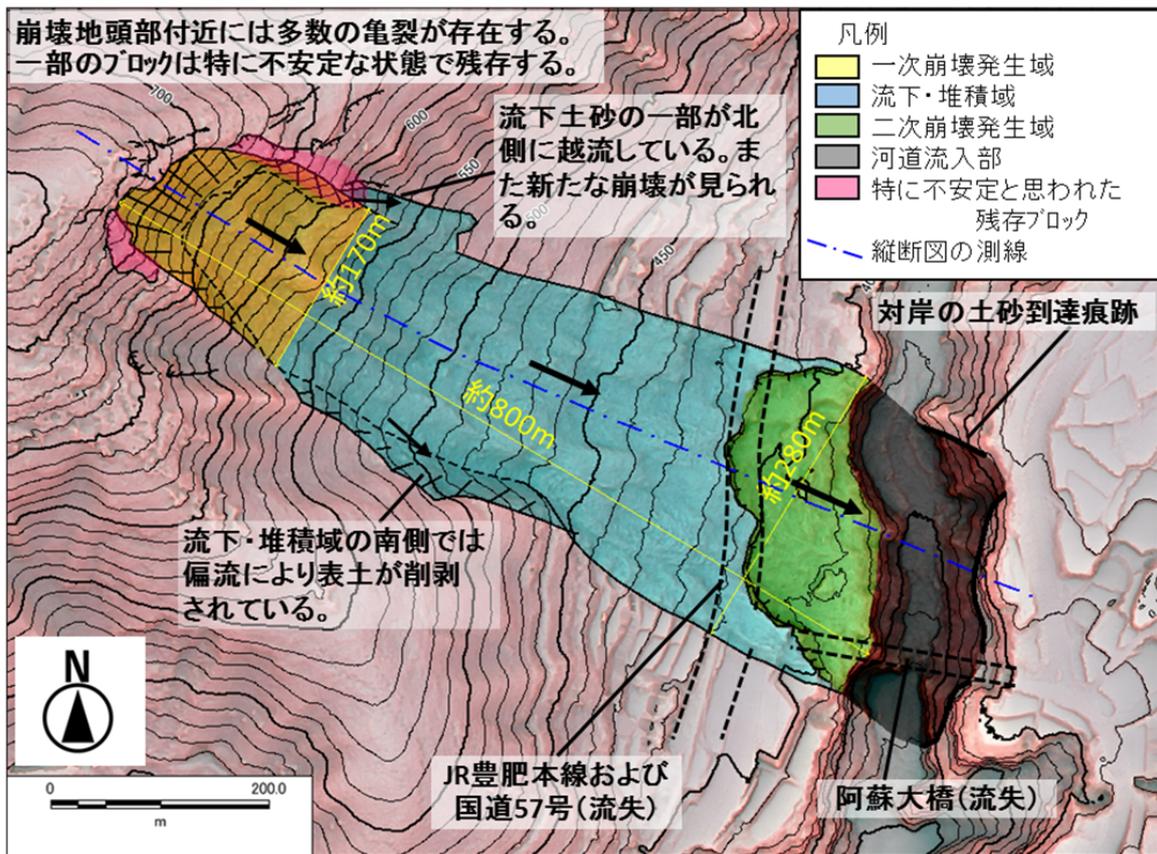


図-7.1.2.2 阿蘇大橋地区の崩壊地概況平面図

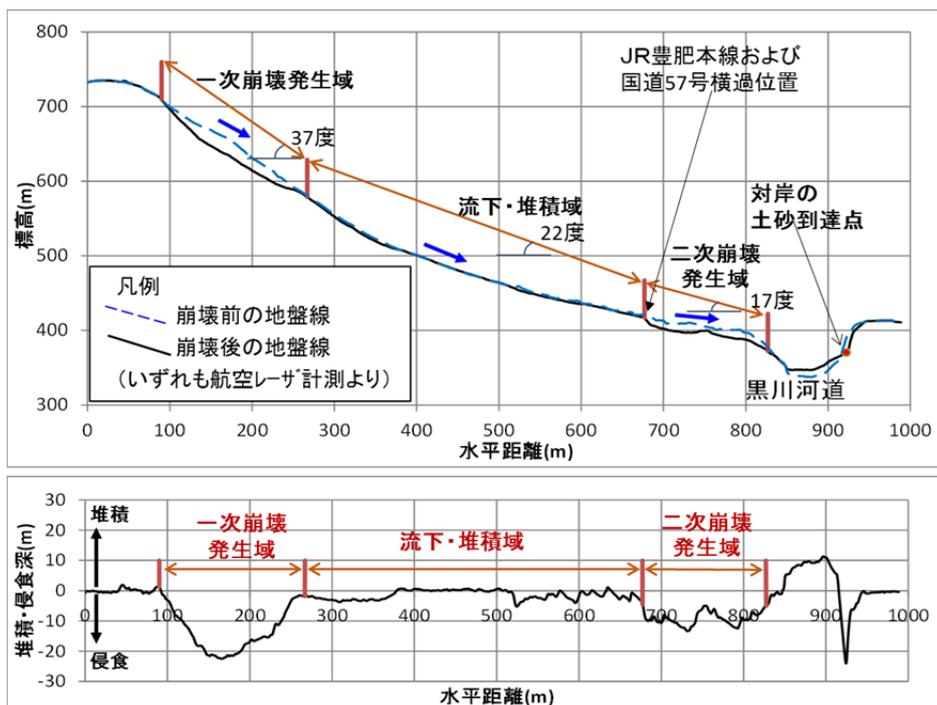


図-7.1.2.3 縦断面図および堆積・侵食深縦断面図

表-7.1.2.1 土砂量概算集計表 (単位: 万 m^3)

	当該領域内の		上流からの 流入土砂量	下流への 流下土砂量
	生産土砂量	堆積土砂量		
一次崩壊発生域	25	0	0	25
流下堆積域	10	5	25	30
二次崩壊発生域	19	0	30	49
合計	54	5	-	-

7.1.3 一次崩壊発生域とその周辺の状況

一次崩壊は支尾根の側部の遷急線付近で発生したものである。崩壊地の形状は末端に向かって横方向にやや開いており、斜面の縦断的凸部が下方に向かって抜け落ちたような形状をなす。発生域下端では北側に一部の土砂が越流している。

地震前後のLPデータより作成した赤色立体地図と等高線を比較すると(図-7.1.3.1)、崩壊発生範囲では地震前の時点で、崩壊跡地と、その上方に岩盤クリープ状の地形が存在したことがわかる。また崩壊地の北側に隣接した斜面(図-7.1.3.1の④)では、地震前に比較して地震後の方が、岩盤クリープ状の地形が明瞭になっているように見える。

現地では崩壊地周辺から内部を観察した結果、溶岩と凝灰角礫岩の互層が露出しており、崩壊面に対してやや受け盤をなすことが確認できた。崩壊地周辺から観察する限りにおいては、地下水の関与を積極的に示す情報(パイピング痕跡等)は見あたらなかった。

崩壊域の周辺には多数の亀裂が存在し斜面の不安定さを想起させたが、中でも当時、図-7.1.2.2にピンク色で示したブロックは、特に不安定な状態で残存していると考えられたものである。そのうち北側、図-7.1.3.1の④で示したブロックでは、崩壊面(つまりブロックの断面)の遠望観察によれば、基岩風化部の段差と開口が存在し、その上を厚く黒ボクが覆っているように見えた(図-7.1.3.2(a))。さらにこのブロックの末端において、4月17日時点には確認できない崩壊地が、5月14日の現地調査時点で確認され、その他にも新旧の段差地形やヒノキの樹幹変形が多数確認された。これらから、当該ブロックでは崩壊前から岩盤クリープが発生していたが地震によって変位が発生しており、特に不安定な状

態にあると、地震直後には考えられた。

一方で南側の不安定ブロックは、周囲全てを段差・亀裂で縁切られていた。崩壊面（つまりブロック断面）の観察によれば、表土直下で基岩の風化した角礫が斜面下方に一斉に傾いているのが確認された（図-7.1.3.2(b)）。よって表土のみのすべりであり、ササ高さとの比較からすべり面深度は2m程度と考えられた。

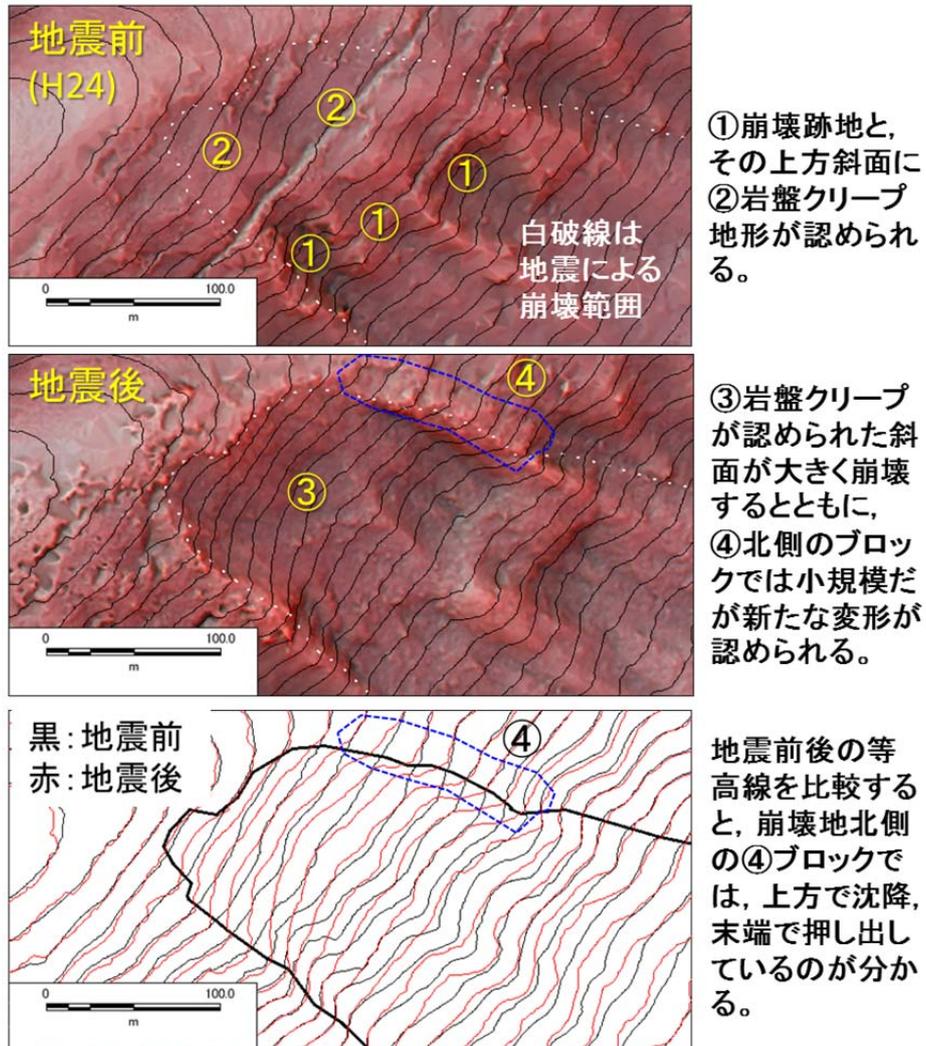


図-7.1.3.1 一次崩壊源頭部付近の地震前後の地形比較（等高線間隔10m）



(a) 崩壊地北側

(b) 崩壊地南側

図-7.1.3.2 崩壊地側面に見えた不安定ブロックの断面（2016年5月14日撮影）

7.1.4 流下・堆積域の状況

流下・堆積部では、流下方向が一次崩壊の方向からわずかに左向きに変化している（図-7.1.2.2）。これは、右側から張り出す支尾根に規制されたためと考えられ、それを示すように支尾根脚部では10m以上の高さまで表土が削剥されている。現地観察および図-7.1.2.3からは、流下・堆積域においては侵食・堆積のいずれも発生しているが、その深さはさほど大きくないと推察される。

崩壊直後の空中写真（図-7.1.2.1）を見ると、崩壊した表土とヒノキ・ササが流下・堆積域を広く覆っていたが、5月14日の現地調査時点ではそれらが洗い流され、礫が露出した範囲が広がっているように見受けられた。

7.1.5 二次崩壊発生域の状況

二次崩壊はJRおよび国道の横過地点を頭部として発生したものである。馬蹄形の滑落崖を2つ繋げたような段差状の頭部と、崩壊地内部に5度程度の緩斜面を持つ点が特徴的である。崩壊地内部には数段の段差があり、1段あたりの比高は5~10m程度である。段差には地山の堆積構造が乱れることなく保存されているのと、その上位に一次崩壊から流下した土砂が1~2m程度の厚さで堆積しているのを確認できた（図-7.1.5.1）。地山の堆積構造は、二次崩壊頭部の段差では数十cmの大礫を含む崖錐堆積物とロームの互層、それより下方の段差ではローム・シルトを中心に時折1cm以下の細礫を含む互層であり、両者は明らかに異なるものであった。崩壊発生域末端の黒川河道側岸には堅固な溶岩が露出しており、崩壊前後のLPデータを比較すると黒川河岸方向への押し出しは見られなかった。

二次崩壊発生域には、一次崩壊からの流下物が堆積していた。これらは、安山岩溶岩からなる角礫、凝灰角礫岩からなる亜角礫~亜円礫、および表土であった。まれに長径2m程度の大礫も見られたが、大部分は数十cm程度以下であった。崩壊地内部の緩斜面においては、表面は広範囲にわたって細粒分に覆われていたが、それが雨水侵食された箇所では下位に大礫が埋もれているのが確認できた。一部には、ササを載せたままの高さ2m程度の表土の土塊、すなわち小規模な流れ山が確認された。



図-7.1.5.1 二次崩壊地内部の緩斜面と層理（望遠撮影）（2016年5月14日撮影）

7.1.6 河道流入部の状況

崩壊発生直後の空中写真では、黒川河道内の堆積土砂は少なく、若干の湛水は見られるものの明確な天然ダムは形成されていなかった。

現地調査時に対岸斜面の状況を確認したところ、河岸崩壊とは別に、斜面下部の樹木が流失あるいは倒伏しており、その上端付近の樹木が土埃を被った痕跡が見られた。よって、植生流失部の上端（植生残存部の下端）の高さまでは崩壊土砂が到達したと考えられ、黒川河床からの比高は30～60m程度となる（図－7.1.6.1）。一方でこの想定土砂到達範囲の上流では、対岸の樹木に泥水で汚れた形跡がないことから、天然ダムは形成されなかったと考えられる。



図－7.1.6.1 対岸の黒川河岸の植生破壊状況（2016年5月14日撮影）

7.1.7 周辺斜面の亀裂の状況

崩壊地の周辺斜面には多数の亀裂が存在した（図－7.1.7.1）。5月14日に現地調査を行った範囲では、亀裂の分布域と非分布域は比較的明瞭に区切られ、特に密に分布する箇所では1m内外の間隔で至る所に無数に存在する状況であった。斜面位置ごとの亀裂の方向・形状は概ね次のようであった。

①尾根上：ほとんどが分水線（等高線ではない）に平行して走る開口クラックである。一部は亀甲状に走る。隣接する開口クラックの間が陥没しているケースもある。

②崩壊地付近の急斜面：開口亀裂、谷落ちの段差、およびその複合タイプが見られる。斜面方向の引っ張りや、斜面をせん断するすべりによるものと考えられる。

③崩壊地から尾根を挟んだ反対側の緩斜面：開口亀裂、谷落ちの段差、山落ちの段差、およびその複合タイプが見られる。谷落ちは斜面方向の引っ張りや、斜面をせん断するすべりによるものと考えられる。山落ちには、すべり末端の圧縮によるもの（山側斜面が谷側斜面の下層に潜り込むような形）や、樹木の根返りと複合したものが見られる。1つの斜面の中に、谷落ちと山落ちが入り乱れて混在している。

亀裂の規模は、現地計測できたものはいずれも深度2m未満であり、大部分において断面に見えるのは表土層のみであった。

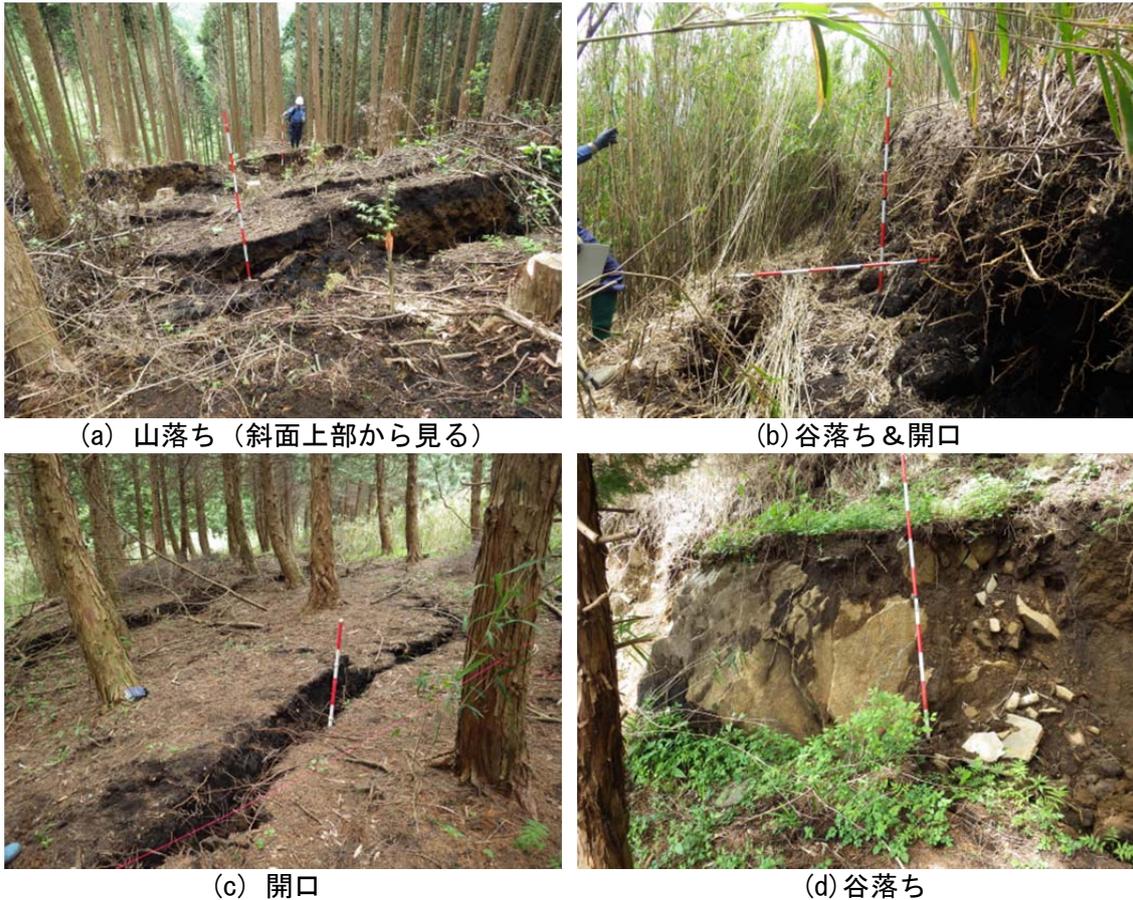


図-7.1.7.1 山腹斜面の亀裂発生状況

7.1.8 考察

以上の調査結果に基づいて、崩壊の発生機構等について考察した結果を、以下に記す。

1) 一次崩壊の発生機構

一次崩壊は遷急線付近で発生し、斜面下方に開いて抜け落ちたような形状を示す。一般に地震動による加速度は斜面凸部で増幅されることがわかっている。一方で基岩の堆積構造は受け盤であるため、特定の弱層や難透水層に沿ってすべり落ちたとは考えにくい。実際、地下水の関与を示す積極的な証拠は現地では見当たらなかった。これらから崩壊の主な誘因は前期降雨や地下水ではなく、地震動であると考えられる。また素因として、崩壊発生前に当該斜面で岩盤クリープが発生していた可能性も示唆される。

2) 二次崩壊の発生機構

二次崩壊発生域の崩壊前後のLPデータを比較すると、二次崩壊発生域末端にあたる黒川河岸の地形は変化していない。また現地露頭観察によれば地表付近の土層構造はローム～礫質土砂の互層からなっているが、その層理の連続性を対比した結果、頭部の段差は滑落崖ではないと判断された。層理面は河道下流方向に5度程度の勾配を持つ流れ盤となっており、この勾配は崩壊地内部の緩斜面の勾配とほぼ一致していた。礫層とローム層の境界の一部では、水のしみ出しが見られた。

以上から二次崩壊の発生メカニズムとしては次の2通りが考えられる。①斜面上部からの崩土の流下に伴って地表が強いせん断力を受け、強度や含水条件の異なる土層境界をすべり面として、黒川河道方向にブロック状にせん断された。または、②斜面上部からの崩土の流下に伴って、緩勾配となっている河岸付近では表層の比較的柔らかい土層が削り取られながら黒川に流れ込んだ。なお、これらの現象の発生には地震動の影響も加わっている可能性がある。

3) 崩土の流動性について

上述したように、崩壊発生直後に明瞭な天然ダムは形成されなかったと考えられる。一方で崩土の流下方向と黒川河道のなす平面的な角度は 70 度程度である。

上述したように一次崩壊において地下水が関与した痕跡が見られないことから、崩土は不飽和の状態であったと考えられる。それにも関わらず、70 度程度の高角度で河道に流入しても天然ダムを形成しないほどに崩土が流動化していたことは重要であり、地震動による崩土流動化の可能性が示唆される。

4) 周辺斜面の亀裂の評価

崩壊地の周辺斜面には多数の亀裂（深度 2m 程度以下）が存在し、特に密なところでは 1m 内外の間隔で無数に存在する状況であった。しかし現地を見る限り、広範囲からの表面流が亀裂を通じて集中的に地下に供給されるようなシステムは形成されていない。このため、崩壊地直近を除けば、亀裂が今後の崩壊発生の原因となる積極的な根拠は思いつかない。しかし、亀裂の多さが既に強い地震動を受けた証拠であり、かつ、土質によっては繰り返し荷重によって強度低下を招く可能性があるならば、今後の崩壊発生の危険を示す指標となる可能性がある。

5) 今後の課題

地震によって遷急線付近が崩壊しやすいことは周知の事実であり、一次崩壊の発生はこれと矛盾しない。本事例で注目すべきは次の点であり、今後研究を進める必要がある。①同様の地形・地質を持つ斜面が多数有る中で、この斜面だけが大規模に崩壊した点、および亀裂の発生した周辺斜面における今後の崩壊発生の危険性。②不飽和崩土の流動化に地震動が影響した可能性。③5 度程度という極めて緩勾配な層理面を境界としたせん断あるいは削剥の発生に地震動が影響した可能性。

7.1.9 地震後の降雨による土砂移動現象

阿蘇大橋地区では、地震によって土砂量約 54 万 m^3 という大規模な崩壊が発生し、同時に崩壊地周辺の斜面には最大幅約 2m の亀裂が多数発生した。以下、大規模崩壊地周縁および崩壊地内において地震後の降雨によって生じた土砂移動現象と二次土砂災害防止のための緊急対応について述べる。

阿蘇大橋地区を撮影した国土地理院の空中写真（撮影日：①2016 年 4 月 16 日、②5 月 31 日、③7 月 5 日）の判読と現地調査（2016 年 7 月 23 日、9 月 7～8 日）によって地震後の降雨による土砂移動現象を調査した。

①－②期間に大規模崩壊地の北側縁の標高 630m で表層崩壊が発生した（図－7.1.8.1 の A）。この崩壊は、第 3 章で述べたように、4 月 21 日に発生したと推定される。崩壊斜面は 40 度以上の急斜面であり、崩壊規模は長さ約 70m、幅約 15m、平均崩壊深約 1m、土砂量約 1,000 m^3 であった。

②－③期間の 6 月 19～22 日の降雨により崩壊 A の隣と大規模崩壊地の南側縁の標高 650m で崩壊が発生した（図－7.1.9.1 の B と C）。崩壊 A に隣接したふたつの崩壊 B は、勾配 45 度の急斜面で発生し、長さは約 60m と約 30m、幅と平均崩壊深は両方とも約 10m と約 1m、土砂量は約 600 m^3 と約 300 m^3 の小規模な表層崩壊であり、0 次谷で地震による亀裂付近から発生していた。大規模崩壊地の南側縁で発生した崩壊 C は、勾配 44 度の急斜面で発生し、長さ約 25m、幅約 20m、平均崩壊深約 1m、土砂量約 500 m^3 の小規模な表層崩壊であった。

また、5 月 31 日と 6 月 26 日の UAV 撮影に基づく DEM データから大規模崩壊地内の地形変化量を算出した結果（国土交通省、2016b）によると、降雨により崩壊地内の不安定土砂が部分的に深さ 2m 程度侵食されて再移動し、崩壊斜面の遷緩線付近に堆積している。

以上のように、大規模崩壊地周縁および崩壊地内においては、地震後に比較的大きな降雨はあったが、土砂移動は小規模であった。

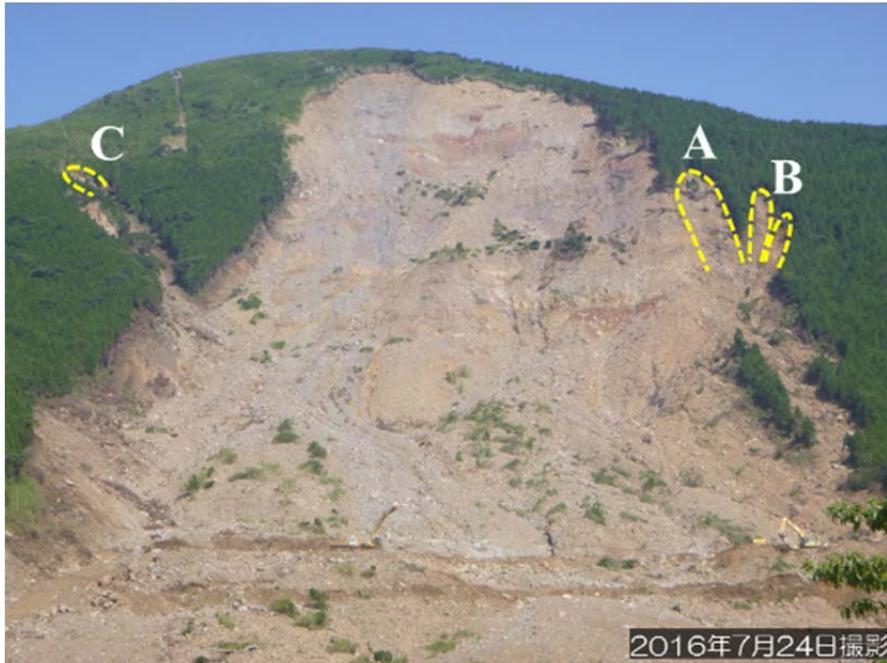


図-7.1.9.1 阿蘇大橋地区の大規模崩壊地周囲の降雨による崩壊
崩壊Aは4月21日、崩壊BとCは6月19～22日の降雨で発生

7.1.10 地震で生じた崩壊地周辺の亀裂と今後の土砂移動

地震によって崩壊地周辺の斜面には多数の亀裂が生じた(図-7.1.7.1)。図-7.1.10.1は、地震で生じた亀裂の降雨後の変化を現地観察に基づいて示したものである。7月23日および9月7～8日の現地調査によると、尾根や緩斜面の亀裂は、その肩部が侵食や崩落によって丸みをおび、内部に土砂が堆積していた(図-7.1.10.1a)。地震直後、大規模崩壊地周囲の亀裂から円弧すべりが発生し、数万 m^3 規模の崩壊土砂となることが心配されたが、①-③期間の1,500mmを超える雨量でも生じなかった。地震による亀裂は、主に表層の黒ボクとローム層に生じ、その下位の溶岩部までは達しなかったと推定され、今後も規模の大きな円弧すべりが発生する可能性は低いと思われる。一方、前節で述べたように、急斜面の遷急線の亀裂付近からは降雨によって表層崩壊が発生していた(図-7.1.10.1b)。さらに、大規模崩壊地の滑落崖は不安定な状態にあり、滑落崖の小規模な崩落や落石は①-③期間にも発生しており、今後も起こりうると考える。

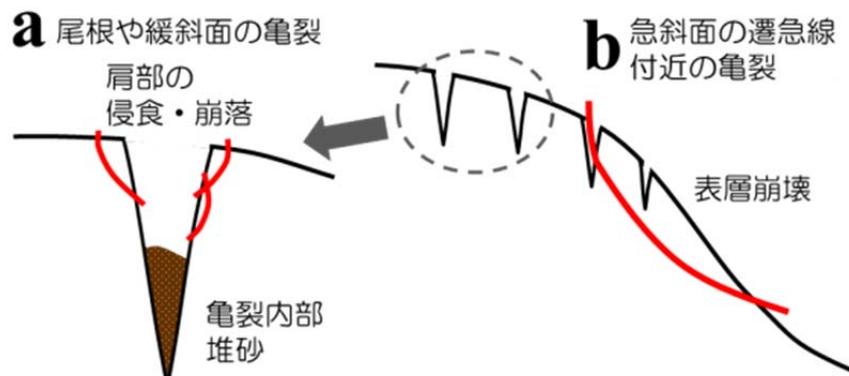


図-7.1.10.1 地震で生じた亀裂の降雨後の変化

7.1.11 緊急対応

国土交通省は、降雨や余震による二次土砂災害を防止するために、伸縮計、地盤傾斜計、カメラ等による土砂移動の監視、無人化機械による崩壊地下部における土留盛土工の設置、崩壊地上部の滑落崖付近の不安定土砂の排土等を進めている(国土交通省, 2016b)。

7.2 京大火山研究センター周囲（高野台地区）の地すべり（図-4.1.1のB）

京大火山研究センターが位置する溶岩ドーム周辺で発生した斜面における5つの土砂移動現象を対象に調査を実施した（図-7.2.1）。これらはいずれも移動土塊の乱れが少なく、ほぼ原型を保っていることと、移動土塊の大部分が斜面内にとどまっていることから地すべりと考えられる。



図-7.2.1 京大火山研究センター周囲の地すべり発生状況

7.2.1 地形・地質，発生機構および規模

調査箇所は高野尾羽根（たかのおぼね）火山による溶岩ドーム（標高 567m）である。ドーム北部斜面の斜面勾配は 30 度以上と急峻だが，南部斜面は概ね 20 度以下の緩斜面であった。

ドームを構成する地質は，約 5 万年前に噴出した高野尾羽根溶岩（流紋岩溶岩，旧火山研究所溶岩）であり，上位の表層地質は，黒ボクと黄褐色のロームが 2～3 層で互層し，一部では，橙色の軽石層（草千里ヶ浜降下軽石）が数 cm～30cm 程度の厚さで挟在するのが確認できた。

植生は，南西斜面（地すべり①，②）では，格子状に桜が植林されているが成熟していない。地面には芝を中心とした草本植生が見られる。北側斜面（地すべり③，④）は草本植生で覆われており，水が豊富な場所では出現するフキが斜面上部で見られた。地下浅くには枯れたササの根系が多く見られた。南側（地すべり⑤）は，スギ・ヒノキの植林地である。

地すべり①，②の頭部は南西向きな平滑な斜面に伏在する橙色のやや湿潤した橙色軽石層付近をすべり面とし，その上位のローム，黒ボクが 3 つのローブに分かれて流下した（図

ー7.2.1.1)。軽石層の深度が深い南のブロックは地塊状にすべり，深度が浅くなる西側では小塊状となり全体として流動しながら流下した。



図ー7.2.1.1 地すべり①頭部の滑落崖と背後のクラック
位置は図ー7.2.2.1の写真-3

災害前の地形には，地すべり①，②を包含する凸型緩斜面がみられ，過去の斜面変動領域の再活動が推定される。

地すべり③では頭部の滑落崖には過去の斜面変動によってローム，黒ボクが相互に混在するのが確認され，遷急線にある基盤を覆う崖錐性岩屑堆積物上面をすべり面としている（図ー7.2.1.2）。



図ー7.2.1.2 過去の斜面変動により混在したローム，黒ボク
位置は図ー7.2.2.1の写真-4

地すべり④は，混在したローム，黒ボクがすべり落ち，段丘面上のロームとともに河床まで押し出した（図ー7.2.1.3）。側方崖に過去の地すべりの低角度で平滑なすべり面が確認され（図ー7.2.1.4），災害前の地形にも段差地形がみられる。災害前の地形の連続から地すべり③，④を両側部とする過去の斜面変動領域が推定され，今回の災害ではその一部が再活動したと考えられる。

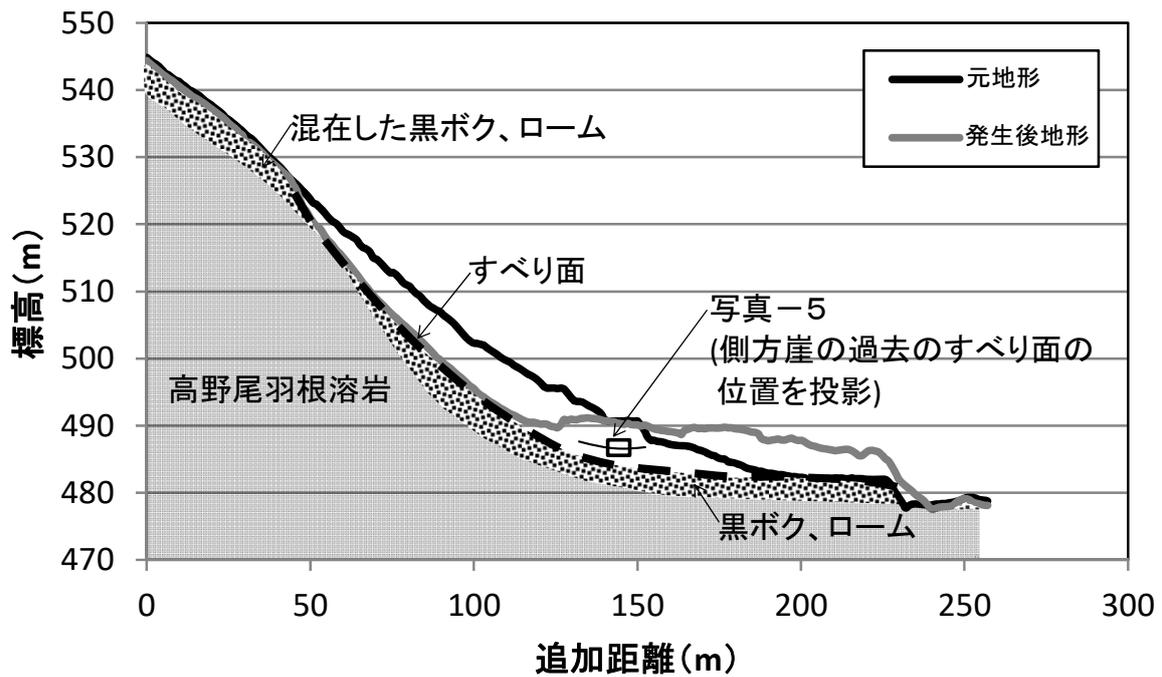


図-7.2.1.3 地すべり④の推定断面図



図-7.2.1.4 過去の地すべりの低角度なすべり面
西側の側方崖をなす直壁を水平方向に撮影，位置は図-7.2.1.3 および図-7.2.2.1 の写真-5

地すべり⑤は，斜面のローム，黒ボクがすべり落ち，一時的に河道閉塞が発生している。地すべり⑤の北側には馬蹄形凹地とその内部の凸型緩斜面により示唆される過去の斜面変動領域がみられ，その先端部に地すべり⑤が位置している。

地震発生前後のLPデータ（H25年1月とH28年4月17日計測，1m DEM）の差分解析により地すべりの規模を計測した（図-7.2.1.5）。5地すべり中，①が侵食幅150m，最大侵食深10.3m，侵食量15.3万 m^3 と最大であり，次いで，④，②，⑤，③の順であった

(表-7.2.1.1)。5箇所の地すべり共に侵食量と堆積量はほぼ等しく(収支は数千 m³以内), 生産土砂の大部分は斜面下部に残されている。

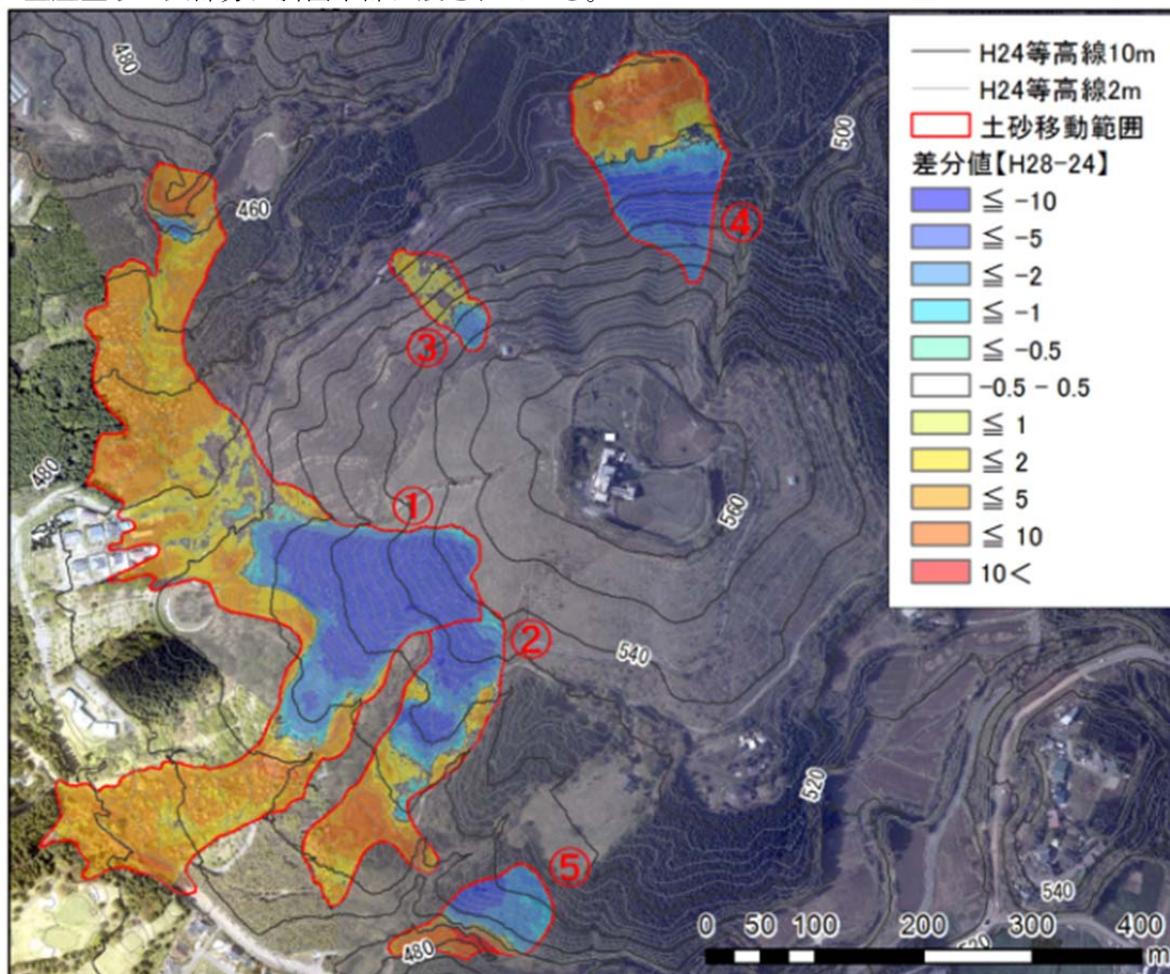


図-7.2.1.5 京大火山研究センター周囲の土砂移動状況図

表-7.2.1.1 地すべりの規模 (単位: m, 万 m³)

番号	侵食幅	侵食深	侵食量	堆積量	収支
①	150	10.3	-15.3	15.1	-0.2
②	70	10.5	-4.0	3.3	-0.7
③	30	5.5	-0.3	0.2	-0.1
④	120	8.6	-4.3	4.0	-0.3
⑤	90	10.6	-1.9	1.8	-0.1

7.2.2 滑落崖上部および溶岩ドームの亀裂と危険度評価

滑落崖上部の亀裂は、開口幅、深さ共に1m以上と大きく、不安定な状況にある。溶岩ドームの亀裂の分布や災害前地形、過去の斜面変動を示す地質要素から、亀裂の一部は古い地すべりやクリープゾーンの輪郭に沿って形成された可能性がある。当該調査では顕著な変化はなく、急激な斜面の不安定化は予測されない(図-7.2.2.1)。

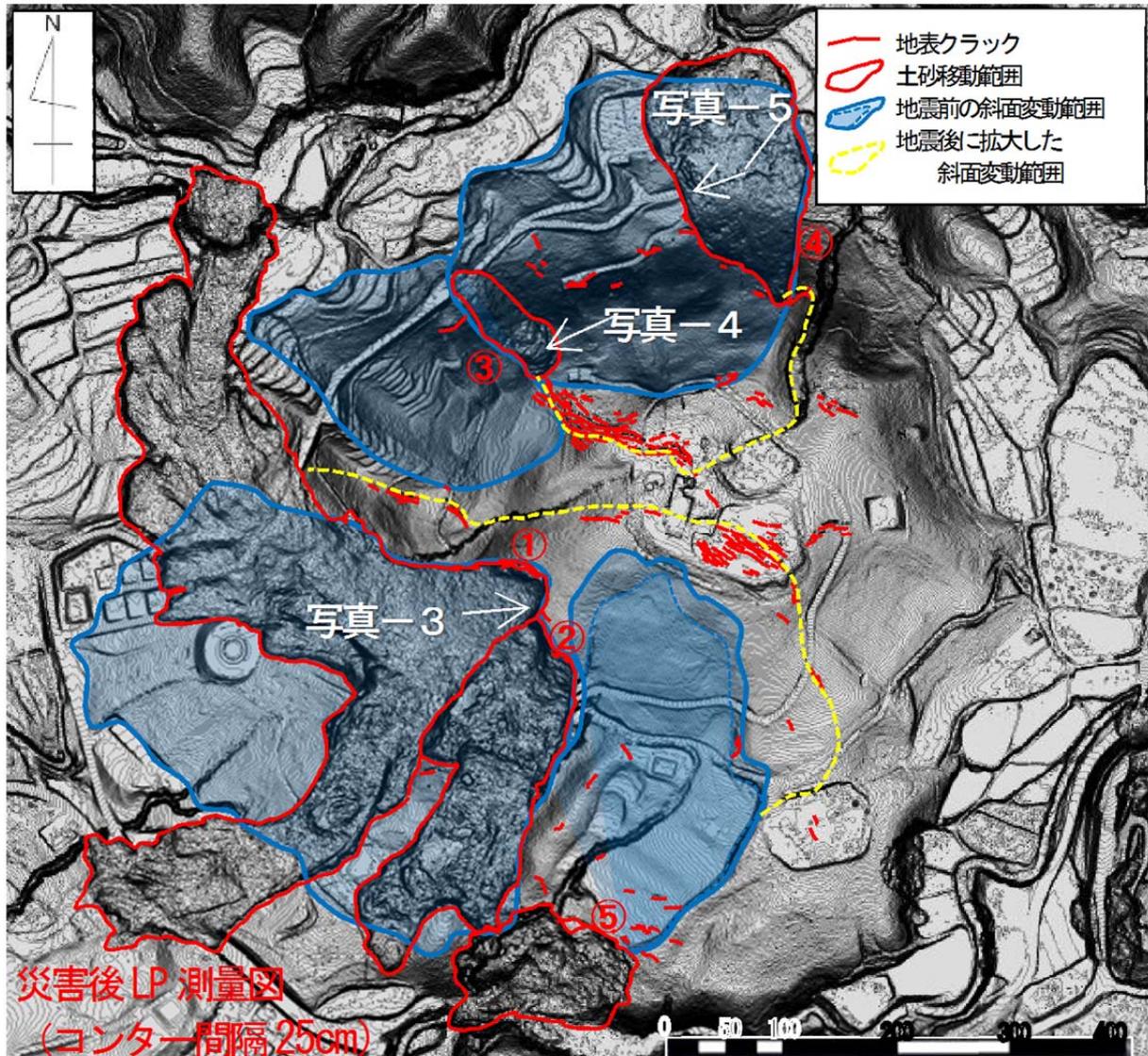


図-7.2.2.1 京大火山研究センター周囲の地震前後の斜面変動

7.2.3 警戒対応や恒久対策検討に向けての基本的な提案

今回の緊急調査では、緊急性を要するような進行性の高い変状は確認されなかったが、流動性の大きな地すべり(地すべり①, ②, ④)や過去の地すべりの再活動, 丘頂平坦面にみられた斜面変動領域拡大などの挙動について警戒していく必要がある。今後も、すでに構築されている地表面伸縮計による観測や定期的な目視点検等の低負荷の観測を維持し、地すべりの活動性と降雨や地震動との関連性についてデータを蓄積し、恒久対策の方法を検討していくことが望まれる。

すべり性(③, ⑤)と高流動性(①, ②, ④)の2つの変動タイプの土砂移動が認められた。今後、滑走領域の地形特性や植生と移動距離との関係などを整理し、火山地域の地震による土砂移動範囲の推定手法の開発等に関する基礎データを提供したい。

7.2.4 梅雨明け後の調査に基づく地震による地すべりの発生機構

2016年7月24日、京大火山研究センターの周辺斜面で発生した複数の地すべりのうち、南西側斜面で発生し北方に分流したものを再度調査した。

5月25日の現地調査時点では、1~2m程度のブロック状にほぐされた草付きの土塊群が、発生域を広く覆っていた。しかし7月24日の調査時にはその土塊群がかなり多くの割合で消失していた(図-7.2.4.1)。これによって、次に述べるように地震時の地すべり(一次土砂移動)の発生機構を考察することができた。

土塊群のほとんどが消失した領域では、ほぼ全面に、平滑で難透水性の固くしまった埋没黒ボク土層が露出していた。この土層の表面には、最大傾斜方向を向く流水による侵食痕跡とは別に、それと斜交する擦痕が認められた(図-7.2.4.2)。また一部では埋没黒ボク土層の表面に、後述する橙色風化軽石層が押し付けられ固くこびりついている様子も確認できた(図-7.2.4.3)。これらから、この埋没黒ボク土層の上面がすべり面であったと考えられる。

滑落崖・側方崖の露頭や、埋没黒ボク土層より上位の土砂が残存している箇所ではいずれも、埋没黒ボク土層のすぐ上位に層厚10~30cm程度の橙色風化軽石層が確認できた(図-7.2.4.4)。この橙色風化軽石は第一次~第二次調査時点で地すべり滑落崖の基底部分近に認められたものと同一であり、指で圧迫すると容易に破碎・粘土化した。また地すべり発生から1週間後に行われた第一次調査時点で、橙色降下軽石を含めて滑落崖に露出している土層はいずれも高含水状態であることが確認されていた。

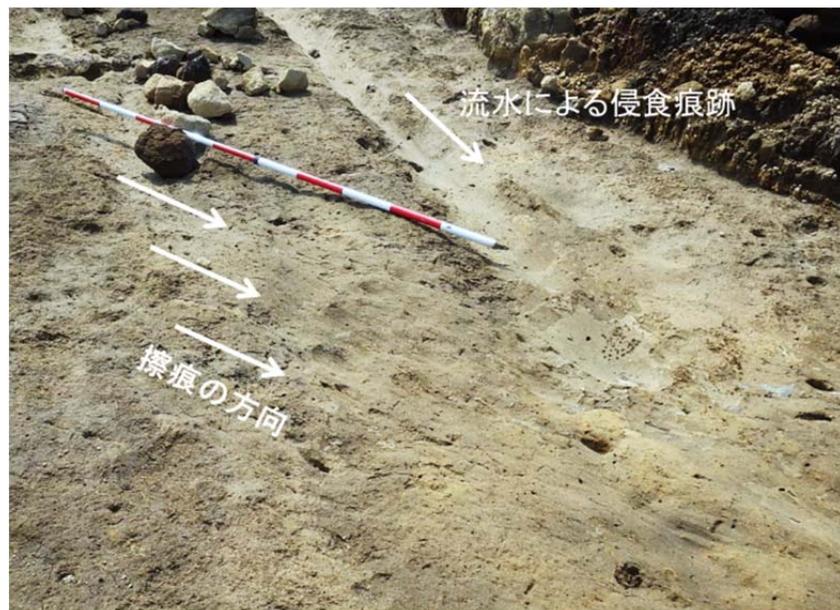
なお滑落崖での露頭観察では、鍵層となる広域テフラとして、地表から2m深に鬼界アカホヤ火山灰、7m深に始良Tn火山灰が認められた(後者については現地サンプルの鏡下観察によりバブルウォールガラスを多く含むことを確認した)。橙色風化軽石層は8m深にあり、上記の広域テフラや埋没黒ボク土層との層序関係、および既存のテフラ層序学的研究(たとえば、Miyabuchi, 2009)から、約3万年前に噴出した草千里ヶ浜軽石であると考えられる。

粒子破碎とそれに伴う体積減少をしやすい性質を持つ土質材料が、非排水載荷・非排水せん断を受けると、間隙水圧の上昇による見かけ摩擦角の低下という「すべり面液状化」が発生し高速長距離地すべりの原因となることが知られている(例えば、佐々ら, 1998)。地震後の航空レーザー計測データから計測したすべり面勾配は13度程度、流下~堆積域の勾配は7度程度であるが、すべり面液状化発生時の見かけ摩擦角は2~5度程度にまで低下することもある(同報告による)ため、そのような緩勾配での地すべり発生・流下も可能となる。

以上から、本地すべりは次のような機構によって発生した可能性がある。素因として、細粒の黒ボクやローム等が厚く互層する中に、風化した草千里ヶ浜軽石が挟在し、湿潤状態にあった(図-7.2.4.5)。地震動による強い圧縮およびせん断荷重を繰り返し受けた結果、草千里ヶ浜軽石層の内部でせん断破壊が発生した。草千里ヶ浜軽石は破壊すると体積減少するため、すべり面液状化によって見かけ摩擦角が著しく低下し、その上位層の土塊がすべり落ちた。地すべり開始後は土塊移動によってせん断破壊が継続するため、すべり面液状化も継続し、生産土砂は流下しつづけた。



図一7.2.4.1 京大火山研究センターの地すべり地の降雨による土塊流出



図一7.2.4.2 埋没黒ボク土層の表面に見られる侵食痕跡と擦痕（2016年7月24日撮影）



図-7.2.4.3 広く分布する橙色風化軽石 (2016年7月24日撮影)



図-7.2.4.4 広く分布する橙色風化軽石 (2016年7月24日撮影)

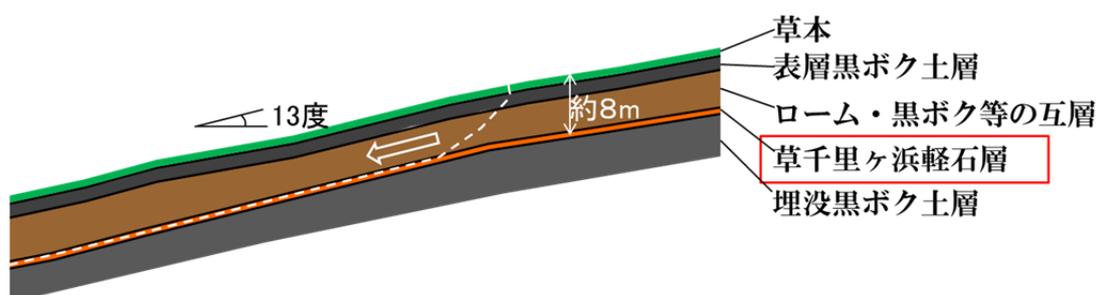


図-7.2.4.5 地すべり発生域の模式断面図

7.2.5 地すべり土塊の二次流出状況

地すべり流下域は明瞭な集水地形ではないので、ブロック状の土塊を押し流すほどの水深が発生するとは考えにくいですが、実際には土塊が多く消失していた。この理由としては、土塊の細粒化と、すべり面となった埋没黒ボク土層の性質が挙げられる。

土塊は黒ボクやロームが湿潤状態で固結したものであるが、乾燥収縮によってひび割れが発生していることを現地を確認した（図-7.2.5.1）。一方、現地でペットボトルの水を埋没黒ボク土層の表面に垂らして流下させたところ、コンクリート水路のようにほとんど浸透することなく高速で流下した。これは埋没黒ボクが細粒でよく固結しているためである。なお滑落崖から約30m下流の地点で埋没黒ボク土層が露出を始め、侵食痕跡が発生していることから、表面流はこの地点から発生したと考えられる（図-7.2.4.1）。

すなわち、固く平滑な埋没黒ボク土層によって生じる高速の表面流が、乾燥伸縮によって脆くなった土塊を削りながら流下した結果、多くの土塊が消失するに至ったと考えられる。



図-7.2.5.1 土塊の乾燥収縮によるひび割れ（2016年7月24日撮影）

一方で、地すべりによる土砂が流出して厚く堆積した下流部では、全体的な堆積形状は地震直後から大きくは変化していなかった。しかし上流側の埋没黒ボク土層からの表流水によって、堆積土砂の一部がV地状に大きく侵食され、内部に含まれた流木が洗い出され始めていた。

7.2.6 地すべり末端部の状況

一次調査時に確認できていなかった末端部の状況を、7月24日に確認した。その結果、堆積土砂の末端部は黒川支川の溪床に押し出すように流入し、支川の流向を左岸側から右岸側に変化させていたが、対岸に乗り上げるほどではなかったことを確認した。末端部から地すべり源頭部までの移動方向に沿った見通し角、すなわち等価摩擦係数は9.5度である。

7.2.7 斜面に存在する亀裂の状態

第一次調査の時点で地すべり周辺には多数の亀裂が認められ、拡大崩壊等が懸念されたが、7月24日の調査時点においても、それらが拡大している状況は認められなかった。むしろ、亀裂の肩部が崩れ落ちて亀裂内部を埋めるなど、消滅に向かっているようであった。

7.2.8 今後発生が懸念される現象

地すべり発生域では、多くはないもののブロック状の土塊が一部残存している。また下流部では堆積土砂の大部分が残存したままである。これらの土砂は、7.2.6で記したのと同様に今後も流下すると考えられる。ただしほとんどが細粒土砂であり、溪床勾配も緩やかであるため、土石流災害が発生する可能性は低いと考えられる。一方で、下流部の堆積土砂の再侵食が進み、内部に含まれた流木が再流出するようになると、下流域における橋梁・カルバートの閉塞といった流木災害の発生も懸念される。それら構造物の有無やクリアランスなどを確認しておくことが望ましい。

7.3 カルデラ壁の崩壊と土石流

阿蘇市狩尾・三久保の崩壊地 3 箇所周辺を調査した (図-7.3.1, 図-7.3.2)。



図-7.3.1 阿蘇市狩尾・三久保のカルデラ壁の崩壊地 (国際航業株式会社撮影)



図-7.3.2 調査対象地の全景

7.3.1 カルデラ壁における崩壊地の特徴

主に先阿蘇火山岩類（一部阿蘇火砕流堆積物）で大規模な崩壊が発生している。崩壊機構は先阿蘇火山岩類の構造により二つに分類される。一つは硬質で割れ目を有する溶岩（透水層）と割れ目の無い自破砕溶岩・凝灰岩等（不透水層）が層状に分布する地点で、上の小屋川2～3がこれに相当する。二つ目は全体が硬質で割れ目の多い溶岩から構成される地点で、宇土川がこれに相当する。前者は崩壊斜面に湧水（沢水）があり、崩壊により生産された礫混じり土砂が崩壊後の雨で土石流化している。後者は揺れによる崩落・崩壊が見られ、生産物は細粒分が少ない瓦礫の集積であるため土石流が生じにくい。

上の小屋川2～3は角閃石安山岩溶岩（阿蘇火山地質図）が分布し、滑落崖に湧水が見られ、土石流等の発生が確認された。一方、近隣溪流の輝石デイサイト軽石・火砕流、輝石安山岩溶岩の分布域には、湧水・沢水がなく、土石流の発生は無い。崩落・崩壊が主にみられる宇土川も輝石安山岩溶岩の分布域である。以上から、地震時の崩壊と土石流の危険性を考えるうえで湧水が生じる水理地質構造を有する角閃石安山岩溶岩分布域は重要と考える。ここでの湧水は中腹部の沢水水量が35ℓ/分（上の小屋川2、2016年5月15日計測）とやや多いが、EC値は4～5mS/mとやや小さく、浅い地下水と考えられる。湧水が連続と沢枯れする（2016年6月2日確認）ことから、降雨時に浅い地下水が集まりやすい構造にある。

カルデラ壁で最も多い地震後の土砂移動は、安山岩溶岩急崖部の崩落であり、宇土川等の直線型や凸型斜面で発生している。急崖部から崩落した礫が下方の崖錐斜面表層を削剥しているが、宇土川を除くと、深さは1m程度と小さい。

崩壊土砂量が比較的多い上の小屋川2～3の崩壊地では、安山岩溶岩急崖部の崩落、急崖部上方の表層崩壊、急崖部下方の崖錐斜面の崩壊・削剥・侵食が複合的に発生し、巨礫混じりの土砂が生産されている。崩壊斜面の形状は凹地型で、恒常的な湧水が確認された。複合的な崩壊の発生箇所では、地震動以外に、湧水が影響した可能性がある。

7.3.2 上の小屋川2（図-4.1.1のC）

1) 地震による土砂移動現象と土砂災害

谷出口から約1.2km上流の本川左岸斜面に並列する3支溪で崩壊が発生した。中央部の崩壊が最も大規模で、その概略値は幅70m、長さ250mである（図-7.3.2.1）。3支溪の崩壊地から生産された土砂量は約3.5万m³であった。

多数の亀裂が分布する表層・ローム層の斜面で、崩壊に関連する亀裂は、「崩壊地の頭部周辺の亀裂（拡大崩壊）」と「斜面の遷急線付近にある亀裂（新規崩壊）」である。上の小屋川2の崩壊地頭部には遷急線付近に位置する亀裂（L=7m程度）があり、拡大崩壊の可能性が高い。

斜面頂部で発生した崩壊は、急勾配斜面を流下し、本川にほぼ直角に流入し堆積している。堆積土砂は細粒分が多く、本川対岸まで到達している。2016年4月20日撮影の航空写真では、崩壊地下部の崖錐斜面で堆積土砂の二次移動が確認された。2016年4月16日22時～翌7時に連続雨量40.5mm、最大時間雨量13.5mmの降雨（気象庁阿蘇山観測所）があり、この降雨により二次移動が生じた可能性が高い。流出した土砂は、崩壊地より下流約300mの治山谷止工堆砂敷に薄く堆積していたが、治山谷止工より下流約300mの砂防堰堤までは到達していないことが確認された。



図-7.3.2.1 上の小屋川2の崩壊地

2) 地震後の降雨による二次土砂移動現象と二次土砂災害

谷出口から約 1.2km 上流の本川左岸斜面に並列する 3 支渓で本震により発生した崩壊地の状況変化を確認した。崩壊地頭部には遷急線付近に位置する亀裂 (L=7m 程度) があり、地震直後の 5 月調査時点では、拡大崩壊の可能性が高いとみられていた。しかし、2016 年 6~7 月の降雨では崩壊地の拡大は見られず、崩壊斜面に侵食流路が発達している様子が見えた。また、堆積地にも流路が形成され、5 月調査時点で確認された細粒分が多い堆積土砂が下流に流出し、溪床に礫が洗い出されていた (図-7.3.2.2)。



図-7.3.2.2 上の小屋川2における崩壊地と堆積土砂の変化
(上段：2016年5月14日撮影，下段：2016年7月24日撮影)

崩壊地より下流約 300m の治山谷止工上流部には、比較的粒径の大きい石礫が堆積していた。また、5 月調査時点では、治山谷止工より下流約 300m の砂防堰堤までは土砂が到達していなかったが、7 月時点では、治山谷止工の堆積土砂に比べて、粒径の細かい砂成分が砂防堰堤堆砂敷に堆積し、明瞭な堆砂肩が見られた（図-7.3.2.3）。

このように、崩壊発生後、降雨時に斜面や堆積地で流路が発達し、土砂が下流に流出した。粒径の大きなものが治山谷止工に捕捉され、細かなものは砂防堰堤に捕捉され、それより下流にはあまり流出していないと思われる。砂防堰堤での堆積から推定すると、2016 年 6～7 月の降雨による総侵食量は約 5,000 m³ である。なお、上の小屋川 2 下流の流路工においては、土砂の流下・堆積の痕跡が確認されなかった。



図-7.3.2.3 上の小屋川 2 における最上流砂防堰堤堆砂状況の変化
（上段：2016 年 5 月 14 日撮影，下段：2016 年 7 月 24 日撮影）

7.3.3 上の小屋川 3（図-4.1.1 の D）

1) 地震による土砂移動現象と土砂災害

谷出口から約 700m 上流が Y 字状の谷形状を呈し、その両支溪で崩壊が発生している。そのうち、右岸側の崩壊が顕著で、最も大規模な崩壊で概略値は幅 50m、長さ 120m である（図-7.3.3.1）。両支溪からの生産土砂量は約 2.5 万 m³ であった。

崩壊・崩落は本震で発生した。上流域には、崩壊・崩落で溪床に供給された多量の不安定土砂が急勾配で堆積し、谷出口から 600m 上流の最上流治山谷止工付近まで崩壊土砂が到達していた。その後、2016 年 4 月 21 日 12 時～13 時の間に土石流が発生した（工事関係者聞き取り）。

発生した土石流は、上流 3 基の治山谷止工袖部を全面越流したが、巨礫群が堆砂敷で停止した。また、細粒土砂は最下流に位置する施工中の砂防堰堤の床堀面（高さ 1.5m まで打設）で捕捉され、下流溪流保全工に土砂は流下しなかった。土石流発生後の除石・除木量から、上流 2 基目の治山谷止工下流に到達した土砂量は約 1.2 万 m³、流木量は約 500m³ と推定される。また、最上流の治山谷止工と、その上流域（図-7.3.3.2）の 2 箇所土砂流の痕跡を基にしたピーク流量を試算したところ、いずれの断面においても 400m³/s 程度であった。

下流の工事現場事務所で観測された土石流発生までの降雨は、累加雨量 72.25mm（2016 年 4 月 21 日 6 時～13 時）、最大時間雨量 21.5mm（同日 12 時）であった。



図-7.3.3.1 上の小屋川3の崩壊地



図-7.3.3.2 上の小屋3の源頭部と流量算定断面

2) 地震後の降雨による二次土砂移動現象と二次土砂災害

上の小屋川3では、第三次調査後の2016年6月19日～7月20日にかけて、上の小屋川3工事現場事務所の雨量計で、時間雨量30mm以上の降雨が8回、連続雨量100mm以上の降雨が6回観測された。このうち、2016年6月25日午前4時44分に連続雨量100mmを超過した降雨では、上の小屋川3で土石流が発生した。工事関係者が現場を確認した午前6時頃には既に土石流が発生していた。発生した土石流は、5月に除石工事を行った上流から3基目の治山谷止工で停止した。土石流発生後の除石量から、治山谷止工に到達した土砂量は約3,000m³と推定される。2016年4月21日の土石流（石川ら、2016）と異なり巨石等の流出はなく、泥土及び直径300～500mm程度の礫の大きさであった（図-7.3.3.3、工事関係者聞き取り）。

近傍の気象庁阿蘇乙姫観測所データを基に、地震後に土石流が発生した2016年4月21日と6月25日降雨を、近隣溪流における豪雨時の土石流発生実績（2001年、2012年）と対比すると、地震により崩壊が生じた溪流では小規模降雨でも土石流が発生することが確認された（表-7.3.3.1）。



図-7.3.3.3 上の小屋川3での2016年6月25日発生土石流の除石状況(若宮誠二氏撮影)

表-7.3.3.1 気象庁阿蘇乙姫観測所の確率雨量と土石流発生時雨量

確率年数		100	50	30	20	10	5	2	今回の地震後	
日雨量 (mm/day)	確率雨量	488.4	442.7	408.9	381.8	334.6	285.5	211.3		
	土石流発生時	493.0 H24.7.12					276.0 H13.6.29		125.0 H28.4.21	72.0 H28.6.25
時間雨量 (mm/hr)	確率雨量	109.1	99.2	91.8	85.9	75.7	65.0	48.9		
	土石流発生時	106.0 H24.7.12			81.0 H13.6.29				28.0 H28.6.25	26.0 H28.4.21

確率雨量の使用データ: 気象庁阿蘇乙姫観測所 S54~H27の37年間, ゲンベル法により算出

7.3.4 宇土川(図-4.1.1のE)

1) 地震による土砂移動現象と土砂災害

直線型斜面で崩落・崩壊が発生した。崩落した岩塊により斜面中腹の表層が4m程度の深さで、長さ約300mに亘り削剥されている。崩落・崩壊の概略規模は、幅80m、崩落部の長さ100m、崩落・崩壊・削剥による生産土砂量は約3.3万m³であった。

斜面頂部で発生した崩壊は、林道を分断し、市道の手前約100mで停止している。崩落した岩塊(最大礫径1.6m)は、崖錐斜面の遷緩線下方に1/4勾配で堆積している。崩落土砂の末端は、流木が立木に噛み合って停止し、4m程度の高さでダムアップしている。削剥された斜面に存在したスギ林は、崩壊地縁辺以外に認められず、殆どの立木は崩落した巨礫によりなぎ倒され、堆積土砂の下方に埋没したとみられる(図-7.3.4.1)。倒木量は、隣接斜面の立木状況から約1,300m³と推定される。

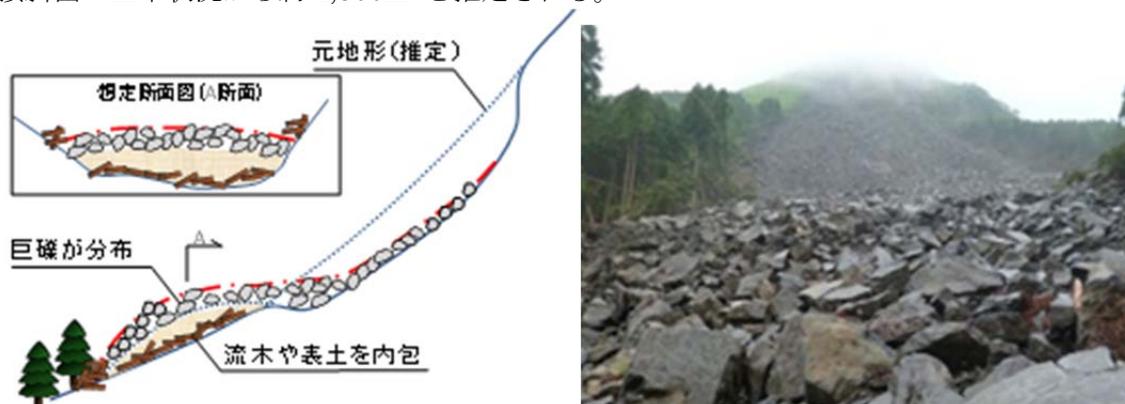


図-7.3.4.1 宇土川の土砂堆積イメージ

2) 地震後の降雨による二次土砂移動現象と二次土砂災害

宇土川の崩壊地では、崩壊地の拡大は見られなかった。崩壊地の下方斜面に堆積した岩塊（最大礫径 1.6m）は大きく、また、斜面形状が直線型であり、集水地形でないため表面流の発生も見られず、崩壊土砂は下流に流出していなかった（図-7.3.4.2）。



図-7.3.4.2 宇土川における崩壊地の変化
(上：2016年5月28日撮影，下：2016年7月24日撮影)

7.3.5 今後の課題

熊本地震に伴うカルデラ壁での土砂移動現象から、比較的大規模な土砂移動の発生には、湧水の影響があることが推測された。カルデラ壁斜面の溪流における地震後の土砂生産・流出特性を評価し、土砂災害対策優先度が高い溪流を抽出するには、地形・地質・水文調査を組み合わせ、溪流内の恒常的な湧水の有無を評価することが必要である。

7.4 中央火口丘群周辺の崩壊と土石流

調査を実施した阿蘇山中央火口丘の南西麓は、火山噴出物である安山岩・玄武岩質の溶岩により緩斜面が形成されている。山麓斜面に発達する水系は東西方向に卓越して流下し、侵食によって溪岸斜面は急峻（40～50度）な崖地形を形成している。地質は、上述の硬質な岩体や熱水変質を受けて粘土状に変質・脆弱化した領域が不規則に分布していると推測される。

中央火口丘群における調査地は、中央火口丘群西側の火の鳥温泉地区、吉岡地区、山王谷川流域、垂玉温泉地区、蛇の尾地区である。

7.4.1 火の鳥温泉地区（図-4.1.1のF）

火の鳥温泉地区では「ログ山荘火の鳥」（図-7.4.1.1）及び「南阿蘇リゾート」（図-7.4.1.2）の背面の斜面が崩壊し、2名の犠牲者等被害が発生した。これらの変状状況を図-7.4.1.3に示す。地震発生時は前期降雨（一週間）がほとんどなく降雨の影響は考えられないが、これらの地域はやや凹地形であったために、周辺に比べて土中水分の高い状態にあったと推測される。ここに、本震の強振動が加わったことにより、地中にあった特定の土層に過剰間隙水圧が発生し強度低下し安定性が失われ、崩壊等の発生に至ったものと考えられる。

「ログ山荘火の鳥」の北西側の崩壊は、源頭部の傾斜約35度、崩壊地の平均傾斜角約25度、崩壊規模が幅約50m、長さ約100m、平均深さ約5mと推定される（図-7.4.1.4）。「ログ山荘火の鳥」では崩壊土砂が直撃し、2棟を残して建屋が全壊し、2名の犠牲者が生じた。崩壊源頭部付近には、非常に高含水で脆弱な物性を示す強変質した火砕物が存在（図-7.4.1.5）し、崩壊の素因と推測される。なお、崩壊頭部の上位斜面や周辺には、多くの亀裂が確認された（図-7.4.1.6）。

一方、「南阿蘇リゾート」東側では、幅約50m、奥行き約25mの崩壊が発生した（図-7.4.1.7）。滑落崖の高さは約10mで、元斜面の全体の傾斜が15度と緩く、崩壊した土塊の一部が斜面の上部や中部にもとどまっていることから「地すべり」に近い現象と考えられる。土砂流出の谷側先端は、滑落崖から約130mの位置まで到達しており、崩壊長さに対して土砂移動距離が長いことが特徴である。LPデータに基づき算定した等価摩擦係数の値を表-7.4.1.1に示す。南阿蘇リゾートの方が、流動性が高いことがわかる。なお、「南阿蘇リゾート」の崩壊箇所の滑落崖の上部にも、連続的な亀裂が確認されている。本震後の豪雨では大きな状況の変化は生じていないが、余震や豪雨により崩壊が拡大する恐れがある。崩壊地下方には別荘等が多く分布しており、滑落崖や亀裂の継続的監視や崩壊地対策が必要である。



図-7.4.1.1 ログ山荘火の鳥北西側の崩壊地

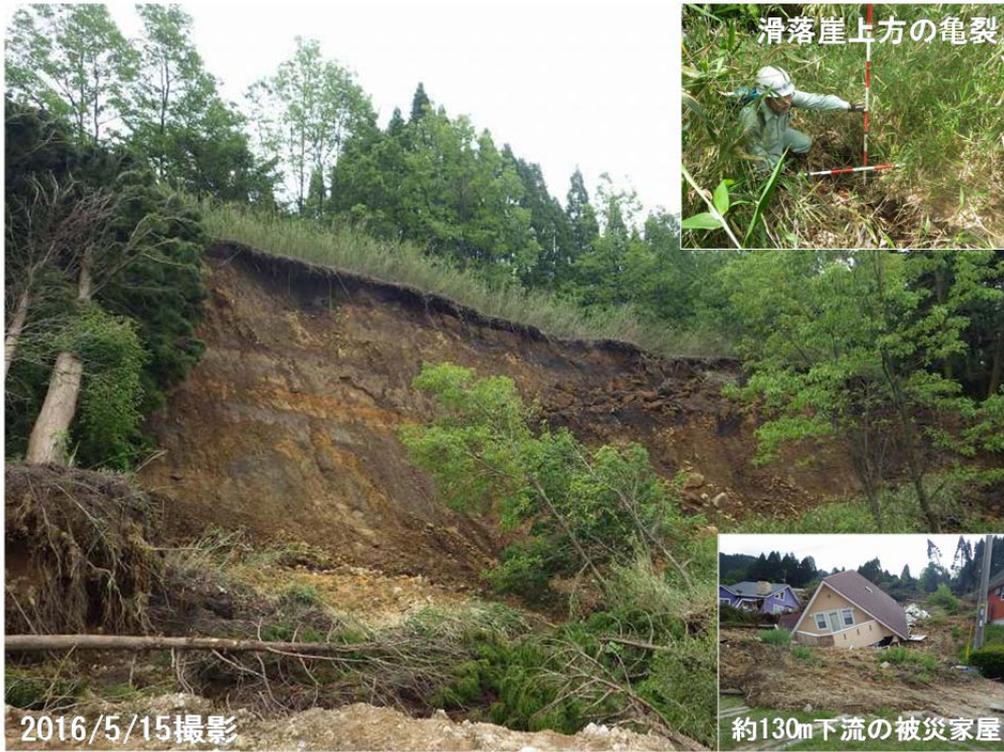


図-7.4.1.2 南阿蘇リゾート東側の崩壊状況

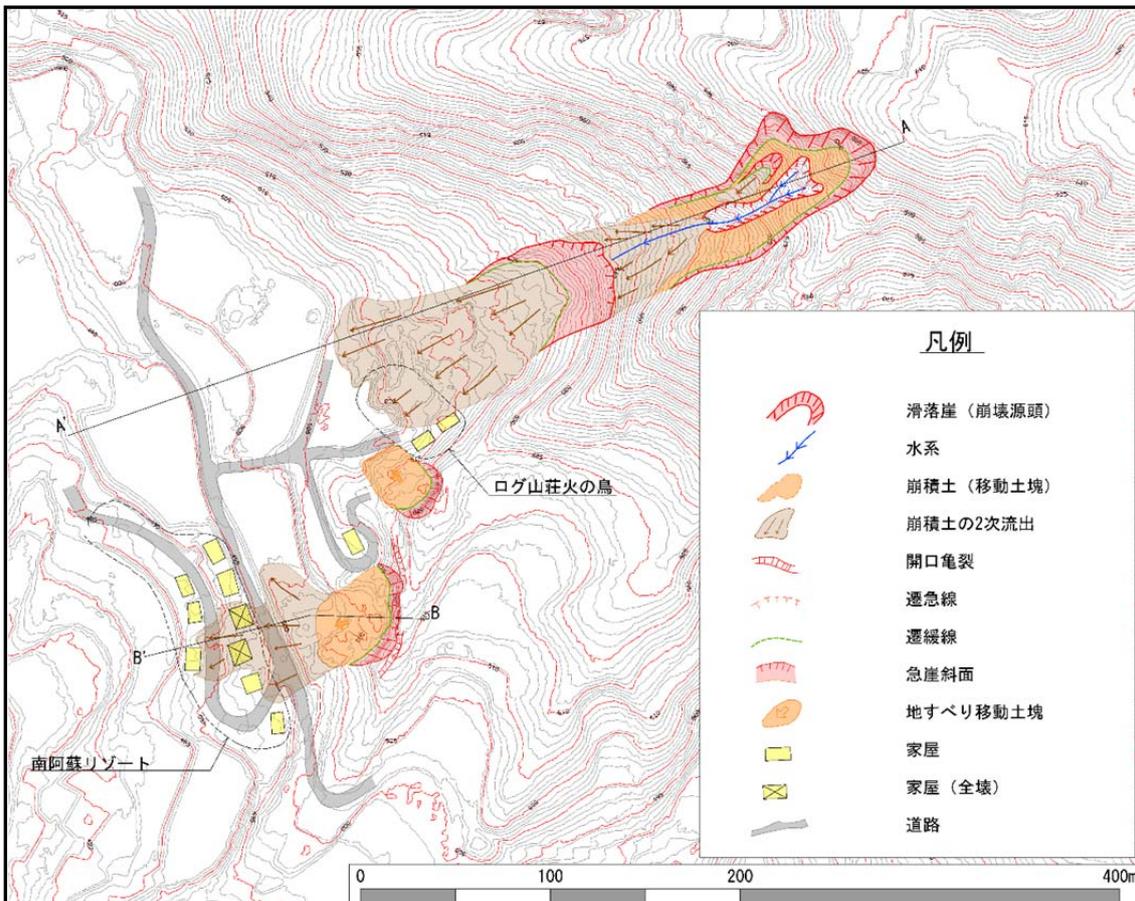


図-7.4.1.3 火の鳥温泉周辺の崩壊地と被災・被害状況

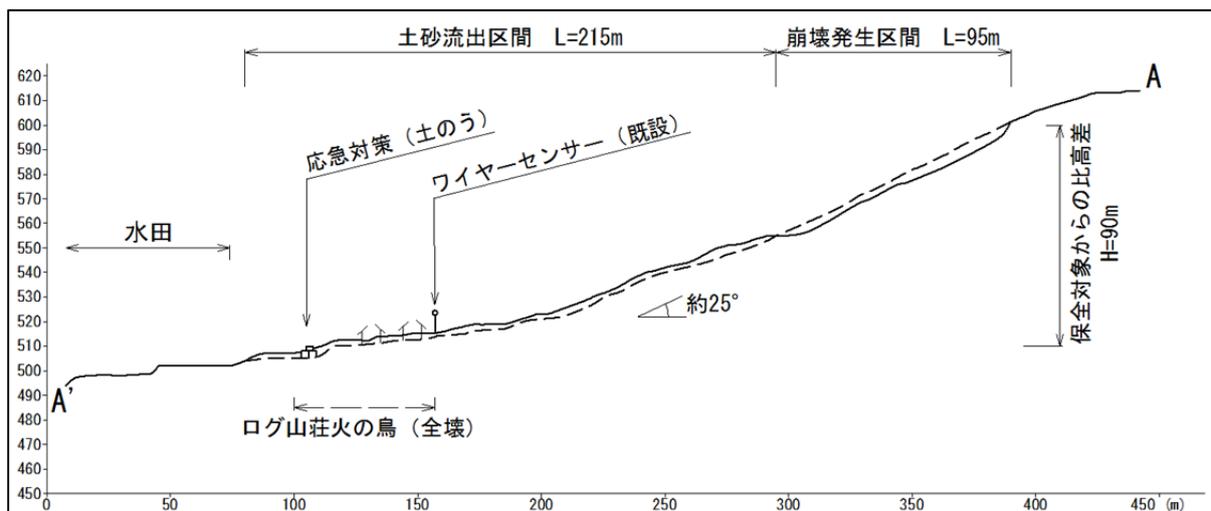


図-7.4.1.4 火の鳥温泉における崩壊の模式断面図



図-7.4.1.5 火の鳥温泉の崩壊源頭部に認められる強変質した火砕物



図-7.4.1.6 滑落崖上部の亀裂状況

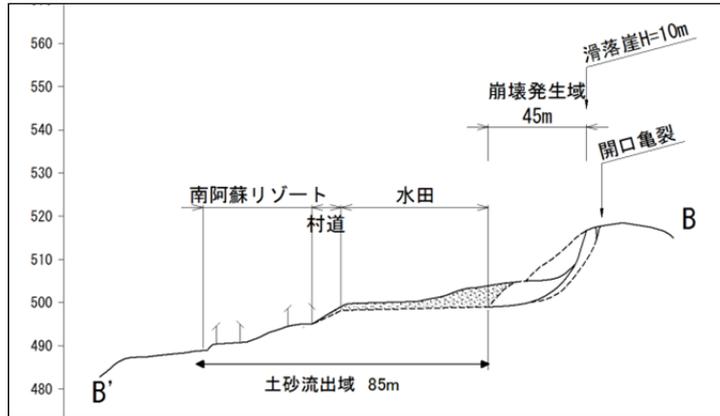


図-7.4.1.7 南阿蘇リゾートにおける崩壊の模式断面図

表-7.4.1.1 ログ山荘火の鳥と南阿蘇リゾートの崩壊地の土砂移動から算定した等価摩擦係数

	比高差 (m)	水平移動距離 (m)	$\tan \alpha$	α (度)
ログ山荘 火の鳥	100	305	0.328	18
南阿蘇 リゾート	30	112	0.268	15

7.4.2 吉岡地区 (図-4.1.1のG)

吉岡地区の崩壊は、草千里の西南西約2.1kmに位置する。緩やかなやせ尾根の頂部付近の遷急線から、南向き斜面内に多数の亀裂と、上・下方の2つの崩壊の発生を確認した (図-7.4.2.1)。

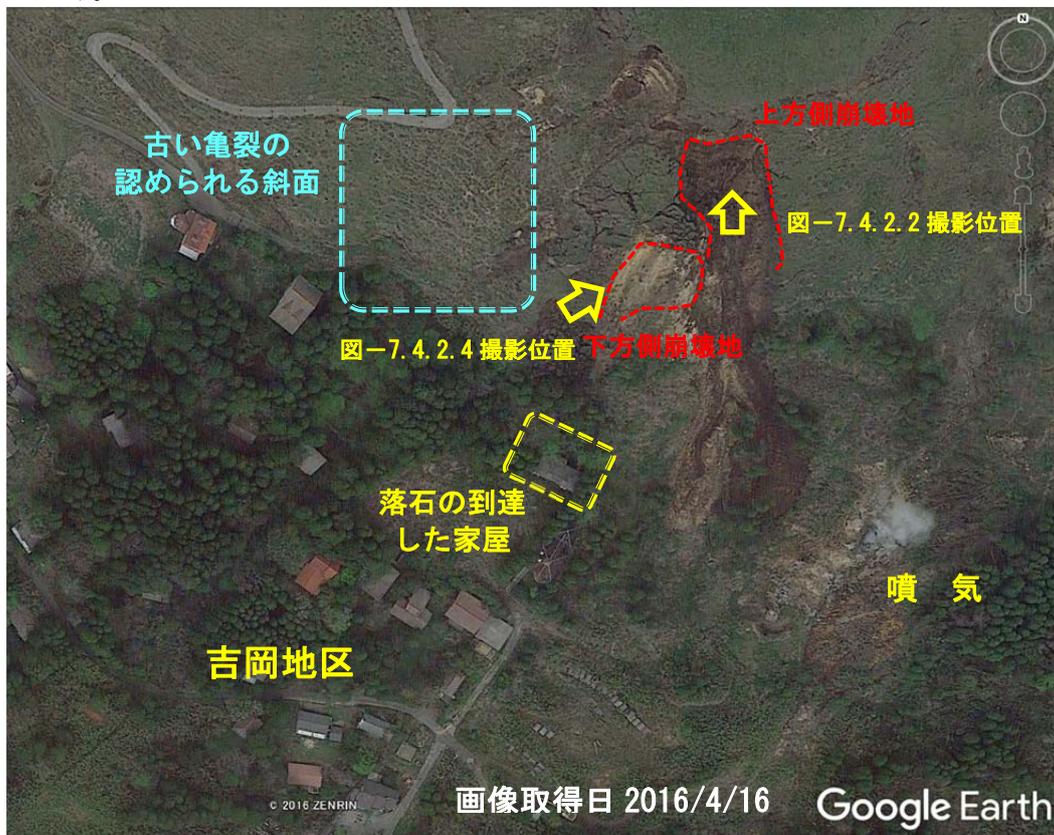


図-7.4.2.1 吉岡地区における崩壊状況

上方側の幅約 25m, 長さ約 70m, 平均深 5m 程度の崩壊は, 流出方向が居住区域と異なり, 人的被害の危険性は低い。なお, 滑落崖には, 高含水比で粘性土化した白色系の強変質火砕物が比較的厚く分布する (図-7.4.2.2)。下方側の幅約 25m, 長さ約 25m, 平均深さ 0.5~1m 程度の崩壊は, 崩壊地上部に複数の新しい亀裂が存在 (図-7.4.2.3) し, 崩壊が拡大することが懸念される。また, 崩壊地の勾配は約 40 度と急で, 崩壊地内に浮石状の径 1m を超える巨石・岩塊が認められる。この巨石・岩塊の一部が落石化し, 人家 (非住家) に到達していた (図-7.4.2.4)。

ここで, 図-7.4.2.1 及び図-7.4.2.3 右上にも示したように, 当該崩壊の周辺には, 平成 28 年熊本地震以前に発生したとみられる古い亀裂が存在する。近傍に噴気が認められるように, 地盤が変質を受けやすい環境にあり, 吉岡地区では潜在的に崩壊の発生しやすい地質的素因を有しているものと推測される。

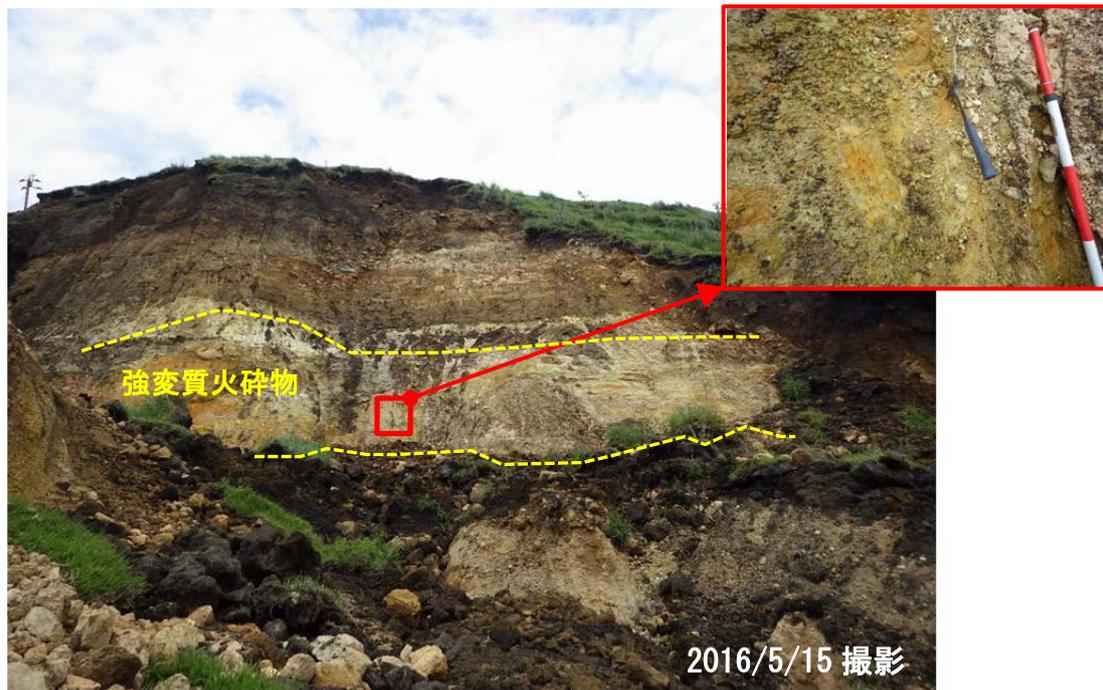


図-7.4.2.2 吉岡地区における上方側崩壊地の頭部 (滑落崖) の状況



図-7.4.2.3 下方側崩壊地内の上部斜面に認められた新しい亀裂 (右上は古い亀裂例)

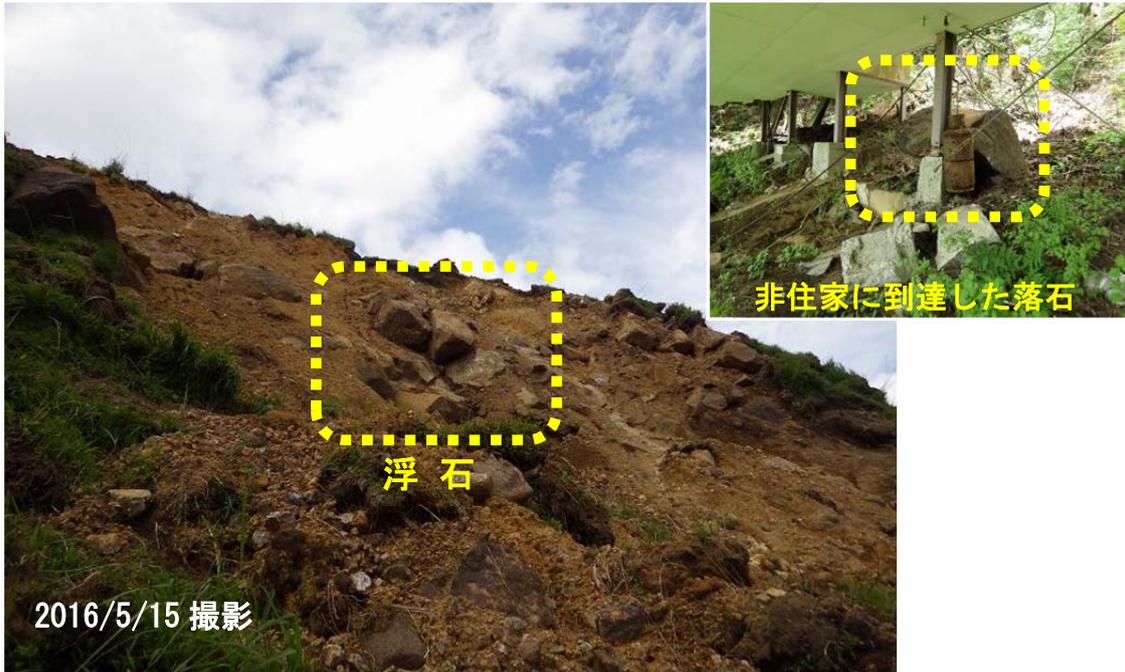


図-7.4.2.4 吉岡地区における下方側崩壊地内の浮石と非住家に到達した落石

7.4.3 山王谷川の上流域（図-4.1.1のH）

1) 山王谷川の流域概要

山王谷川は、標高 1,336.7m の烏帽子岳の西～南西側斜面を源頭部とし、南西方向に流下する土石流危険渓流である（図-7.4.3.1）。平成 13 年に作成された土石流危険渓流カルテによれば、山王谷川は、流域面積 2.34km²、保全対象人家 7 戸の土石流危険渓流 I（溪流名；三王谷川 2）である。また、現地計測によれば谷出口に相当する三王谷川砂防堰堤直下で勾配 5 度程度、長野橋より下流側で勾配 3 度程度以下となる（図-7.4.3.2）。なお、当該溪流名は、国土地理院図等では“山王谷川”と表記され、土石流危険渓流カルテや砂防堰堤名等では“三王谷川”と表記されている。このような状況を考慮し、本報告書では溪流名は国土地理院図に示された“山王谷川”と表記し、谷出口の砂防堰堤名は、銘板に示された名前を尊重し“三王谷川砂防堰堤”と表記するものとした。

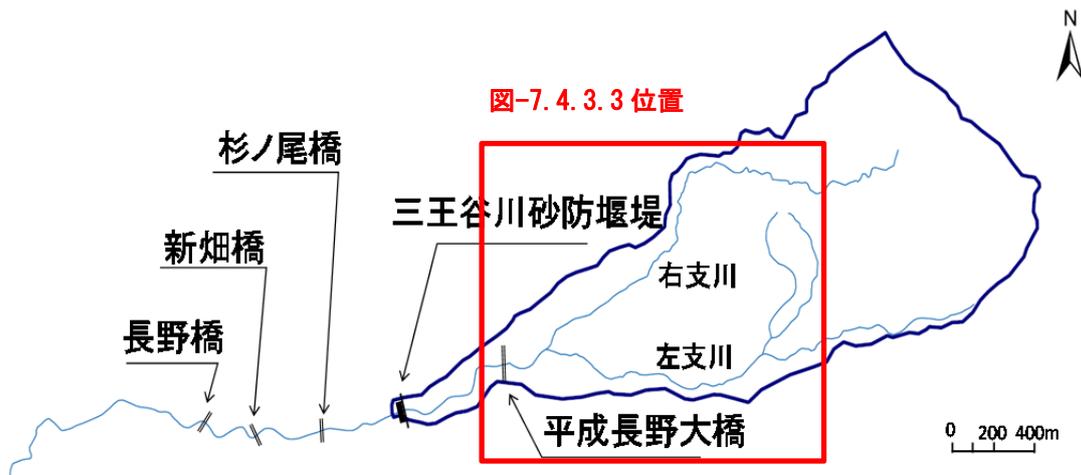


図-7.4.3.1 山王谷川流域概要図

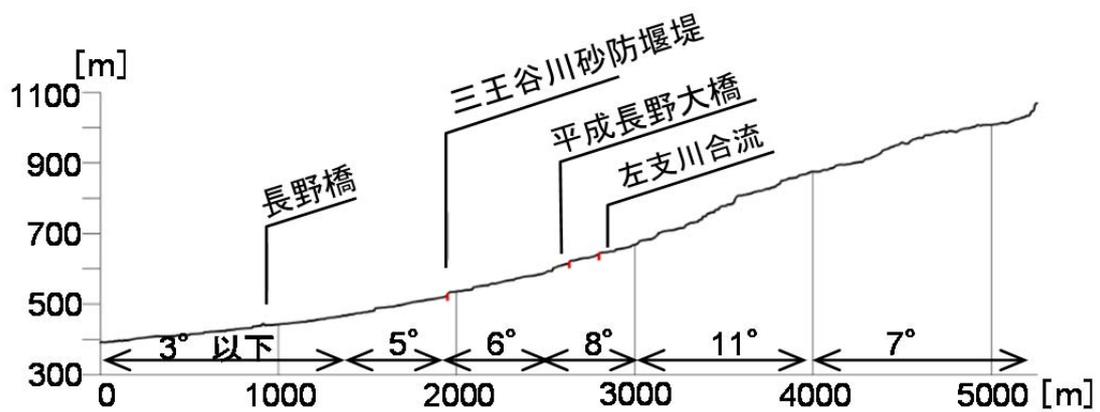


図-7.4.3.2 山王谷川縦断概要図

2) 山王谷川上流域の崩壊状況

図-7.4.3.3 に本震前後の山王谷川上流域の状況を示す。山王谷川の上流域では、4月14日の前震時には崩壊は認められないものの、4月16日の本震で、崩壊が多発したことが確認できる。これらの崩壊は、表土、黒ボク、ロームなどを主体とする表層の崩壊であった。

前震:震度7(4/14 21:26) →



本震:震度7(4/16 1:25) →



図-7.4.3.3 山王谷川上流崩壊地分布状況

図-7.4.3.4には、本震後と6月19～29日の降雨後の上流域崩壊地の状況を示す。6月19～29日の降雨後には、新規の崩壊発生は少ないものの、崩壊地内及び溪床部に堆積した黒ボク層の流出していることが確認された。さらに、本震以降の山王谷川上流域における崩壊および溪床の変化状況を調べるために、国土地理院が公表している4月19～20日撮影、5月30～31日撮影、および7月5～24日撮影の3時期の空中写真を比較判読した。4月19～20日撮影の写真には本震時に発生した非常に多くの崩壊地が記録されている。その後、5月30～31日撮影、7月5～24日撮影の写真では、崩壊の拡大や新規発生はごくわずかに認められるのみである。一方、3時期の写真比較において明瞭な変化が認められるのは、4月写真で崩壊地滑落面や溪床を一面に覆っていた黒色に見える土砂が、6月19～29日の降雨をはさんだ、5月写真から7月写真までの間に、明瞭に流出していることである。

本震:震度7(4/16 1:25) →



6月19～29日の降雨 →

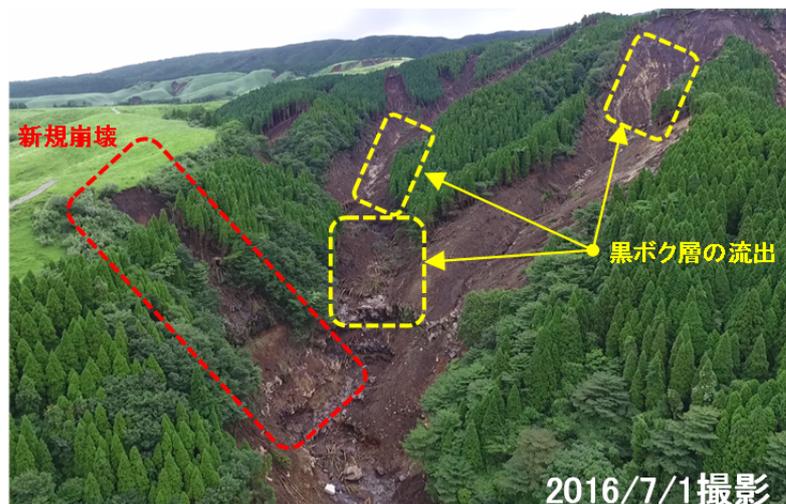


図-7.4.3.4 山王谷川上流崩壊地状況 (東亜コンサルタント株式会社撮影)

3) 山王谷川本川沿いの崩壊

山王谷川本川の源頭部の崩壊地とその周辺を2016年7月23日に調査した。ここでは、この時の調査結果に基づき、山王谷川上流域における本震による一次土砂移動について述べる。

山王谷川本川沿い標高750～900m付近には、多数の斜面および溪岸崩壊が発生している。地震以降、数回撮影されたドローンによる上空からの映像によれば、6月19～29日の降雨による崩壊の拡大や新規発生等の二次土砂移動は顕著ではないが、河道や沢沿いの土砂移

動は確認される。なお、調査地付近では平常時の河川水は伏流している。

現地確認できた崩壊地は土砂量1,000～2,000m³規模であり、滑落崖の勾配は55～65度、すべり面の勾配は20度の椅子型を呈する（図－7.4.3.5）。すべり面付近には、粘土化が進み含水比が高い軽石層が存在し、滑落崖の下底面付近に連続して分布する（図－7.4.3.6）。すべり面より上位の軽石層、黒ボクとロームの互層部が崩落し、河道沿いにこれらが堆積している。また、対岸斜面には崩壊土砂が乗り上げた痕跡が存在するが、崩壊の際に一時的な河道閉塞が発生したかどうかは不明である。

滑落崖の崖面には、径1cm程のパイピング跡が確認され、地震時かあるいは6月19～29日の降雨時かは不明だが、地山からの出水があったものと推察される。



図－7.4.3.5 山王谷川源流部の地震による崩壊地の全景（2016年7月24日撮影）



図－7.4.3.6 山王谷川上流の崩壊地における崩土に覆われたすべり面
すべり面は粘土化した軽石層（図中の円）の中に位置する。

4) 山王谷川の土砂流動現象

山王谷川谷出口の三王谷川砂防堰堤の左岸直下に氾濫・堆積した泥流（一次土砂移動）の横断面は、顕著な凸レンズ状を呈し、堆積厚は最大約 2m である。その堆積先端部の縦断勾配は、約 38 度とほぼ安息角に近い。スコップで堆積物の表面下約 20cm まで掘削した箇所（採取土砂 No.1）ならびに堆積底部（地盤との接地付近）での土砂（採取土砂 No.2）は、黒ボクが主体で、指でねじりつぶすと容易にヒモ状になるのが特徴である。

この泥流の主要な発生場は、上流域で本震により多発した山腹崩壊地であると考えられる。それらの山腹崩壊地のうち、踏査した箇所（図-7.4.3.5）では、崩壊深さ約 7m のうち地表付近に明瞭な黒ボク（採取土砂 No.3）が認められる。

図-7.4.3.7 に、上記の 3 か所で採取した土砂の粒度分布と採取場所の写真を示す。粒度分布曲線の全体的な形状には、大きな違いは認められない。No.1 の砂分は 37.3%，シルトは 44.0%，粘土は 16.3%，No.2 の砂分は 33.7%，シルトは 42.0%，粘土は 16.5% である。No.3 については、砂分は 39.1%，シルトは 52.0%，粘土は 8.9% であり、No.1 及び 2 よりもシルト成分が多く、粘土成分が少ない。

以上のことから、本震後に山王谷川で発生した土砂の流れは、本震直後に発生したと考えられる土石流以外は、粘土やシルトを多く含み、粘性が高い状態であったことが想定される。上流域の黒ボクおよびローム層が地震によって崩壊して泥流化し、河道内を流下する過程においても粒度組成をあまり変えることなく、谷出口から氾濫・堆積したと想定される。また、山腹崩壊地と接する河道内（勾配 6～8 度）には、黒ボクの堆積物はほとんど認められない。河道内に堆積した黒ボクのほとんどは、6 月 19～29 日にわたる降雨などによって既に流出したと考えられる。

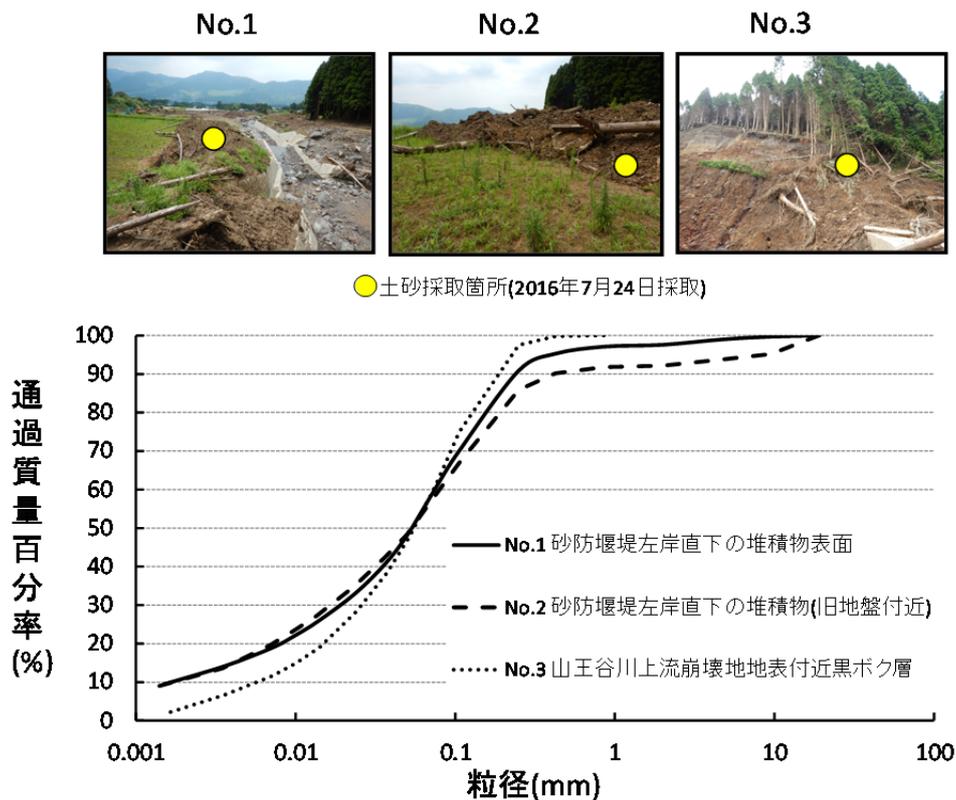


図-7.4.3.7 山王谷川の砂防堰堤直下の泥流堆積物と上流域の黒ボクの粒度分布の比較

7.4.4 山王谷川の下流域（図-4.1.1のH）

山王谷川の谷出口に位置する三王谷川砂防堰堤より下流域は、地震後の 2016 年 4 月 23～24 日（一次調査）、5 月 14～15 日（二次調査）および 5 月 28～29 日（三次調査）と梅

雨後の7月23日（四次調査）に調査した。

1) 地震による一次土砂移動現象と一次土砂災害

山王谷川流域では、上流域で多数の崩壊地が確認（図-7.4.3.3～7.4.3.4）されるとともに、谷出口の直下流および谷出口より約1,600m下流の2箇所です砂・流木の氾濫が認められた（図-7.4.4.3～7.4.4.4）。ここで、気象庁南阿蘇村観測所における本震前の1週間における降雨量は2016年4月13日の5.5mmのみと少なく（図-7.4.4.1）、山王谷川における一次土砂移動現象は一般的な土石流と異なる形態であったものと推測される。

ここで、5月14～15日の二次調査では、谷出口の三王谷川砂防堰堤より上流域内の川幅10～30mで切り立った溪岸において、連続的な崩壊が発生し、崩壊土砂の堆積に伴う溪床上昇及びその後の侵食による溪床低下、溪岸斜面の高い位置までの湛水や土石流の流下痕跡を確認した。これらの痕跡から小規模な天然ダムが一時的に形成され決壊・流出したことが推察される（図-7.4.4.2）。なお、溪流内には多くの崩壊土砂および流木が堆積しているが、本震前後の地形データを用いた差分解析では崩壊土砂量の概略値は、約80万m³と算出された。

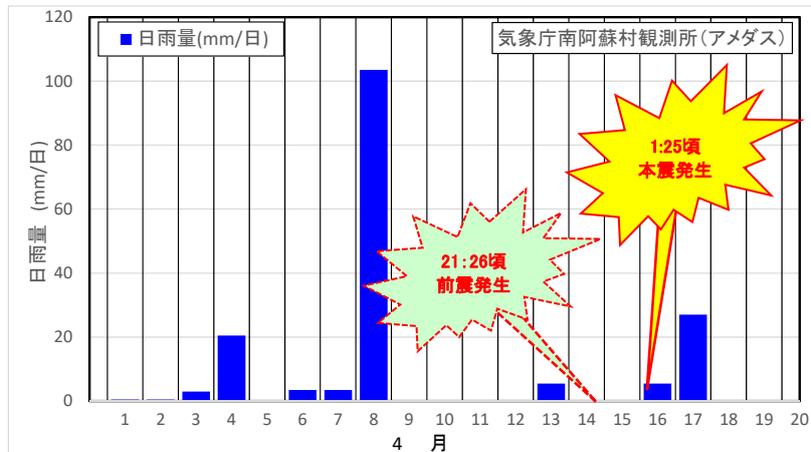


図-7.4.4.1 平成28年熊本地震前後の南阿蘇村の降雨状況 (H28.4.1～4.19)

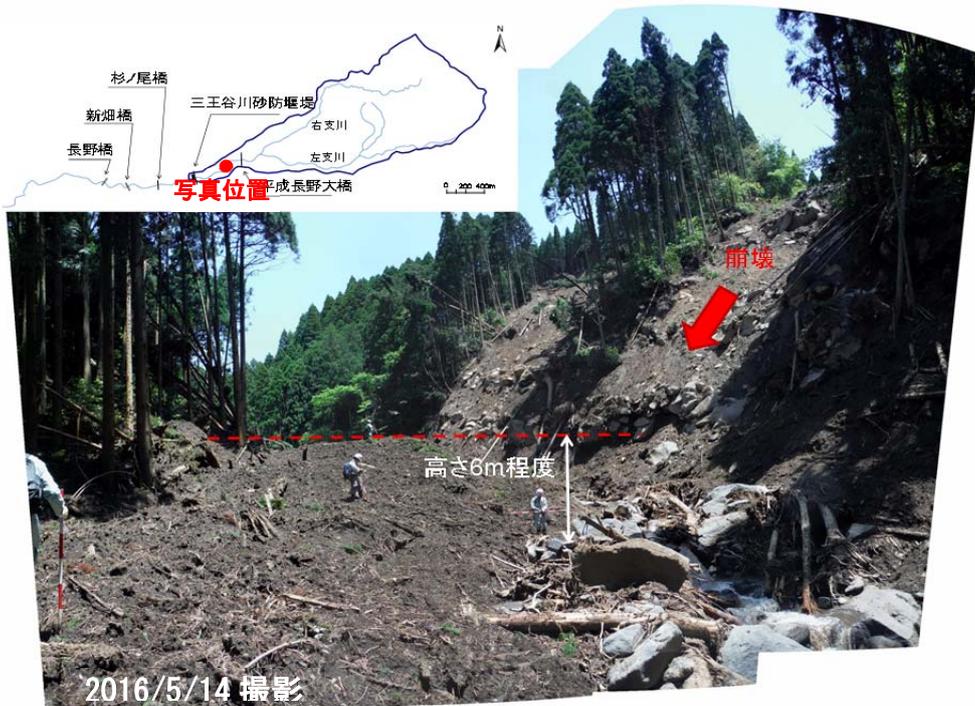
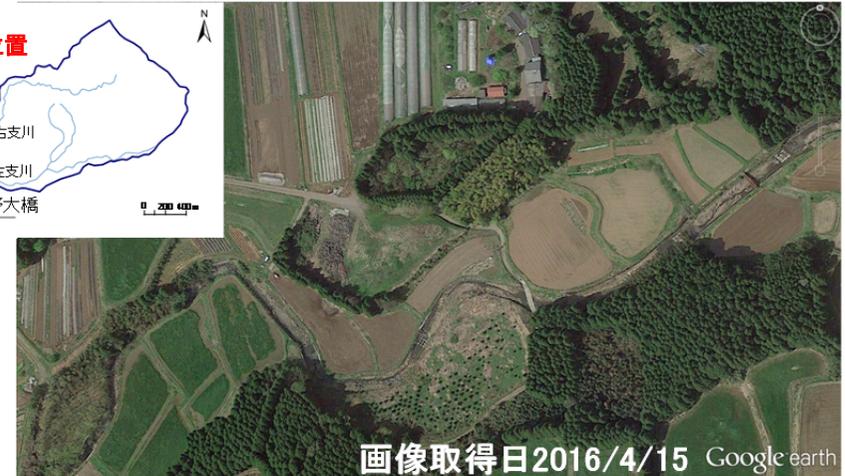


図-7.4.4.2 小規模な天然ダムの形成・決壊が発生したと推測される地点例

前震:震度7(4/14 21:26) →



前震:震度7(4/14 21:26) →



本震:震度7(4/16 1:25) →



本震:震度7(4/16 1:25) →

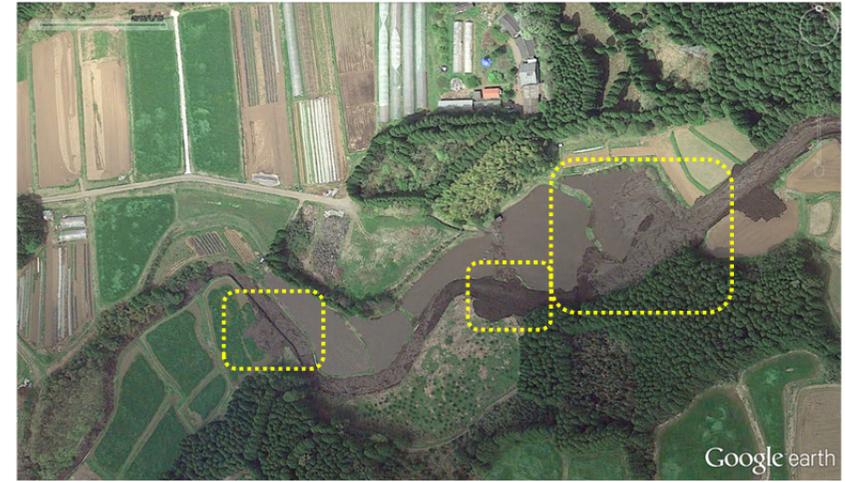


図-7.4.4.3 三王谷川砂防堰堤下流の氾濫状況

図-7.4.4.4 三王谷川砂防堰堤下流約1,600m地点の氾濫状況

図-7.4.4.3 に示した氾濫域では、三王谷川砂防堰堤の右岸袖部が塊状で、約 100m 下流に流出している。この右岸袖部は、堰堤の直上流左岸の地すべり性の崩壊に規制された土石流が右岸側に乗り上げ、破壊されたものと推察される。ただし、堰堤本体は大量の土石や流木をしっかりと捕捉し機能している。また、堰堤下流約 400m の橋梁部（杉ノ尾橋、桁下 3.7m）では、巨石による閉塞に伴い、橋梁～堰堤間には黒ボクを主体とする土砂と流木の氾濫・堆積し、土砂の一部が家屋に到達している状況（図-7.4.4.5）が認められる。後述するが、本震のあった 4 月 16 日の早朝に住民により、溪流保全工の護岸高を超える泥状のゆっくりとした流れが確認されている。このゆっくりとした流速で家屋に到達したため、家屋が倒壊するような被害は発生しなかったものと推測される（図-7.4.4.6）。



図-7.4.4.5 杉ノ尾橋の氾濫状況（東亜コンサルタント株式会社撮影）



図-7.4.4.6 泥状の流れの到達家屋状況（長野正男氏提供）

砂防堰堤下流には溪流保全工が整備されているが、杉ノ尾橋～図-7.4.4.4に示した下流側の氾濫域までの区間では、一部で護岸天端より上位に泥状のゆっくりとした流れの上面到達し、護岸天端面の上部に土砂が乗り上げているものの、ほとんどの土砂が溪流保全工内を流下している。なお、調査時には、同区間の溪流保全工内に径1.5m程度の巨礫が多く残存しており、当該土砂流出において、巨石を含んだ流れが存在したことを確認した。三王谷川砂防堰堤の袖部を破壊するような巨石を多く含む土石流形態での土砂移動は、後述する住民の証言によれば、本震直後に発生していたものと判断される。

図-7.4.4.4に示した下流側の氾濫地の勾配は約1~2度と緩く、湾曲する地点近傍で氾濫が始まっている。当該氾濫地の堆積面では、図-7.4.4.7に示すように黒ボクが主体の土砂に加え、流木が多く堆積している。

堆積面上の流木の長さや直径の計測結果（調査本数n=100本）を図-7.4.4.8に示す。図-7.4.4.8に示したように、流木の平均直径は22cm程度であったが、平均長さ4.1mと短いものであった。これは、流木は溪流内を流下する際に折れて長さが短くなったことが推測されるが、流木長が短くなったため新畑橋や長野橋では閉塞しなかったものと考えられる。



図-7.4.4.7 山王谷川下流氾濫地における土砂氾濫状況

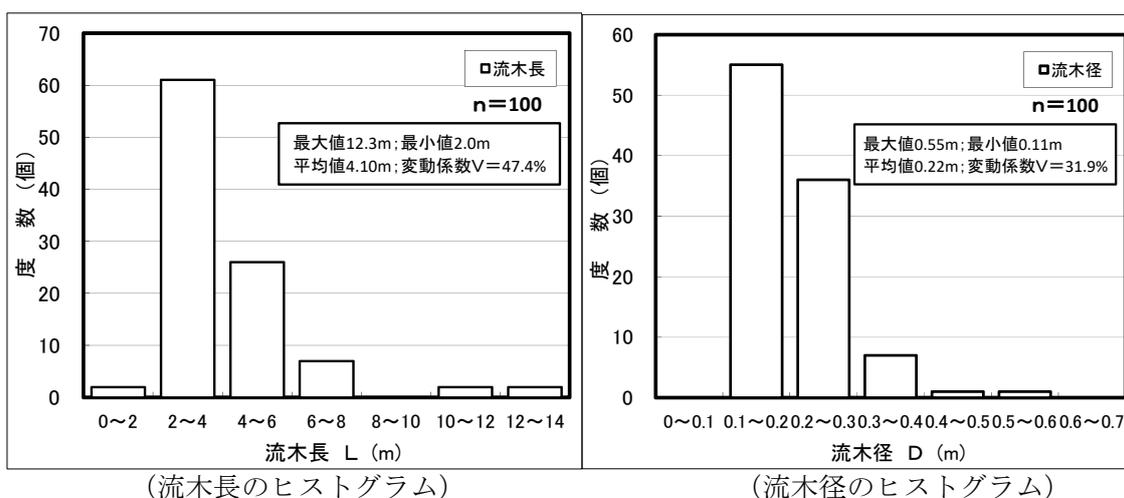


図-7.4.4.8 山王谷川下流氾濫地における流木長・径調査結果

5月29日に、本震直後及び本震発生日の状況を、三王谷川砂防堰堤の下流約400～1,000mの山王谷川沿いの範囲に居住する5名（全て男性、年齢47～79歳）の住民にヒアリングした。図-7.4.4.9に、ヒアリングを実施した住民の居住地、すなわち本震時の所在を示す。なお、ヒアリング実施日が本震後1ヶ月以上経過した時点であったことから、証言には多少あいまいな部分もあることを前提に実施した。

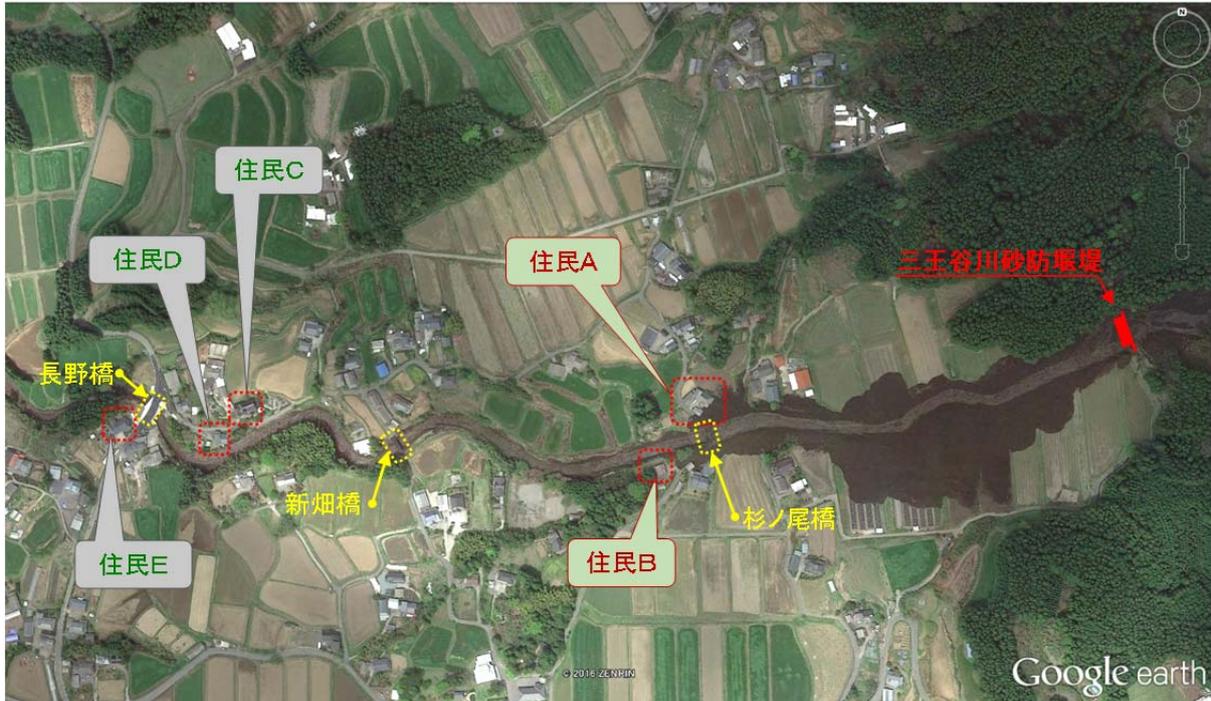


図-7.4.4.9 ヒアリングを実施した住民の居住地（本震時の所在）

表-7.4.4.1にヒアリングに基づく住民の目撃証言を示すとともに、図-7.4.4.10には住民の目撃情報と起こった現象の時系列的整理結果を示す。

表-7.4.4.1 住民の目撃証言

時刻	上流氾濫域の住民		下流氾濫域の住民		
	住民A	住民B	住民C	住民D	住民E
本震(4/16 AM1:25)後 5~10分後	<ul style="list-style-type: none"> ・地面が二つに裂けるような、ジェット機のようなゴーッという轟音、巨石が引きずられているような音 ・土砂の堆積により橋が渡れないことを懐中電灯で確認 ・樹木が鉛直方向に立った状態でゆっくり流下(?) 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震直後の音等記憶なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・戦闘機の飛ぶような音 	<ul style="list-style-type: none"> ・ゴーゴーといった音、雷が落ちたような音 ・樹木が鉛直方向に立った状態でゆっくり流下(?) ・泥のにおい 	<ul style="list-style-type: none"> ・流路工内の水位は半分以下からだんだんと水位が上昇 ・樹木が鉛直方向に立った状態でゆっくり流下(?)
本震後 10~15分後			<ul style="list-style-type: none"> ・流路工高さの半分以下からだんだんと上昇 ・その約2/3くらいの水深で「さらっとした」流れ 		
本震後 15~20分後	<ul style="list-style-type: none"> ・車両で自主避難 	(自主避難なし、自宅待機)	<ul style="list-style-type: none"> ・車両で自主避難 	<ul style="list-style-type: none"> ・車両で自主避難 	
午前2時頃					<ul style="list-style-type: none"> ・車両で自主避難
本震後 1時間後		<ul style="list-style-type: none"> ・道路工事のようなガタンガタンと機械音のような音が朝方まで絶えず継続 			
午前5時頃~			<ul style="list-style-type: none"> ・流路工の高さの約1/2くらいの水深のゆっくりと泥と流木が流れていた ・泥状でゆっくりとした流れで、歩く速度より流速が遅かった ・その後1時間(AM6:00)くらいに泥状流れの上面が、流路の護岸天端まで上昇 	<ul style="list-style-type: none"> ・流路工内の水位は低下を開始。 ・流木は縦方向に流れていた ・表面の流下速度は歩く速度よりも遅く、止っては流れ出していた 	
午前6時頃~	<ul style="list-style-type: none"> ・帰宅後、黒ボクは家屋に到達 ・泥状でゆっくり流れる流れを長時間にわたり確認 ・その後、水状の流れは泥の上を流下 	<ul style="list-style-type: none"> ・土砂が家屋近傍まで来ていた ・自宅の壁面や屋根に泥水の飛沫跡あり 			<ul style="list-style-type: none"> ・泥状でゆっくりな流れ ・見ている間に水位が上昇し、30~40分後に下った ・流動深が下がるとき、表面に流水があった
16日午前中					<ul style="list-style-type: none"> ・黒ボクが流路工内に堆積
16日夕方				<ul style="list-style-type: none"> ・流路工を埋めた泥の上を水が流れていた 	
21日			<ul style="list-style-type: none"> ・21日の雨で大部分が流出 ・降雨後に巨石を含む堆積土砂の存在を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・黒ボクの大部分が流出 	<ul style="list-style-type: none"> ・雨の後、巨石が露出



- ・斜面の連続的な崩壊発生
- ・土石流・土砂流の発生
- ・高濃度の泥状のゆっく
- ・黒ボク等が厚く堆積
- ・その後の降雨により堆積した黒ボク等が流出、河床には土石流堆積物が残る

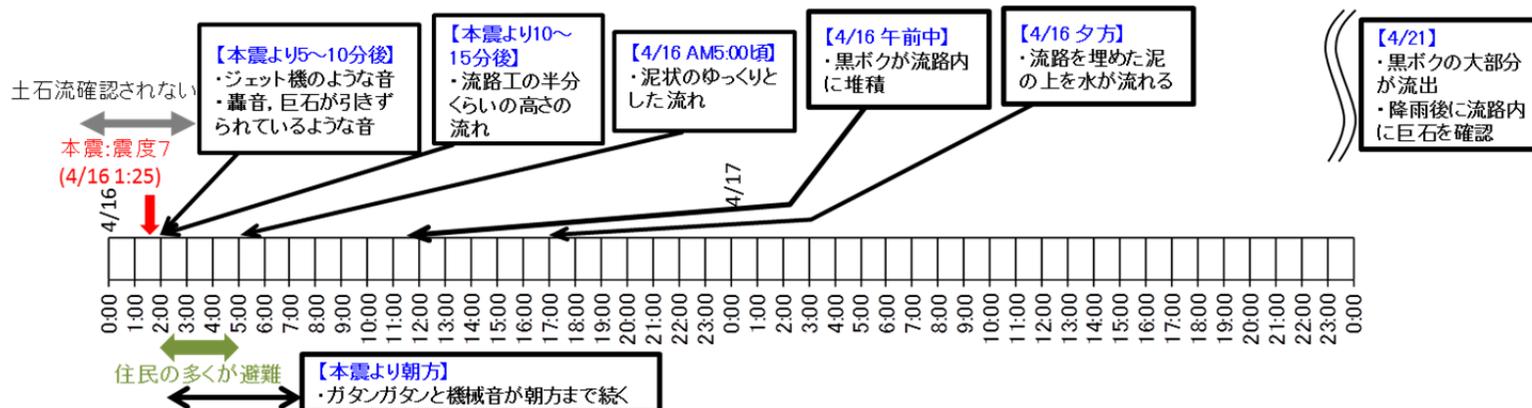


図-7.4.4.10 住民の目撃情報と起こった現象の時系列的整理

住民より得られた証言より、本震直後に「ジェット機のような音」、「巨石が引きずられるような音」を聞いたことが確認された。これより、本震後まもなく土石流が発生していたことが推察される（2016年4月15日の衛星画像では本溪流内では大規模な崩壊や天然ダム形成の確認されないことから、本震による崩壊や小規模な天然ダム形成・決壊による土石流流出が推測される）。また、「夜明け後に、長野橋付近にて、護岸天端まで流木を含む“歩く速度より遅い泥状のゆっくりした流れ”を住民が目撃している。（図-7.4.4.11～7.4.4.14）。これより、本震発生から4～5時間後に三王谷川砂防堰堤下流の長野橋付近において流量 $20\text{m}^3/\text{s}$ 程度（徒歩速度（ $\approx 1.3\text{m/s}$ ）と想定）より遅かったという証言から流速 0.5m/s と想定し、長野橋での流路断面約 40m^2 より推定）の高濃度の泥状の流れがあったと推定される。さらに、「ガタンガタンと機械音が朝方まで続いた。」（自主避難しなかった住民B氏）との証言を得ており、このような土砂移動は本震後から朝方まで継続していたと考えられる。



図-7.4.4.11 泥状のゆっくりした流れ（その1，4/16撮影写真は長野精一郎氏提供）



図-7.4.4.12 泥状のゆっくりした流れ（その2，4/16撮影写真は長野精一郎氏提供）



図-7.4.4.13 泥状のゆっくりした流れ（その3，4/16撮影写真は長野精一郎氏提供）



図-7.4.4.14 泥状のゆっくりした流れ（その4，4/16撮影写真は長野精一郎氏提供）

長野橋で高濃度の泥状の流れが確認されている時間帯に杉ノ尾橋周辺では、表面に水状の流れが発生したことが住民により目撃されている（図-7.4.4.15）。これは表-7.4.4.1の住民Aおよび住民Bの証言（午前6時頃～）にある，泥状の流れ後に確認された流れと考えられる。この水状の流れは，山王谷川の常時流水を主成分とすることが推測される。目撃されるまで三王谷川砂防堰堤より上流の渓流内に形成された小規模天然ダムに貯留していたり，高濃度の泥状の流れの下位を流下していたりすることが推測されるが，詳細は不明である。ただし，この流れにより，渓流保全工内に堆積した黒ボク，ローム等の細粒土砂が洗掘され，下流域まで流出したものと推測される。



図-7.4.4.15 泥状の堆積物上を通過する水状の流れ（杉ノ尾橋近傍，長野正男氏提供）

2) 地震後の降雨による二次土砂移動現象と二次土砂災害

南阿蘇村では，6月20日21:00～6月22日3:00の7時間に時間雨量10mm/h以上の降雨が連続して発生した（当該時間内連続雨量169mm，最大時間雨量68.5mm，6月20日21:00前にも少雨の連続あり。気象庁アメダス南阿蘇村観測点データによる）。この降雨（以下，“6月20～21日の降雨”と称す）により山王谷川では，土石流が発生し，谷出口に位置する三王谷川砂防堰堤の下流域で，二次土砂移動・二次土砂災害が認められた。

図-7.4.4.16に本震後の氾濫地点（4/16氾濫地点）及び山王谷川で二次土砂災害を確認した6月20～21日の降雨時の氾濫地点（6/21氾濫地点）を示す。

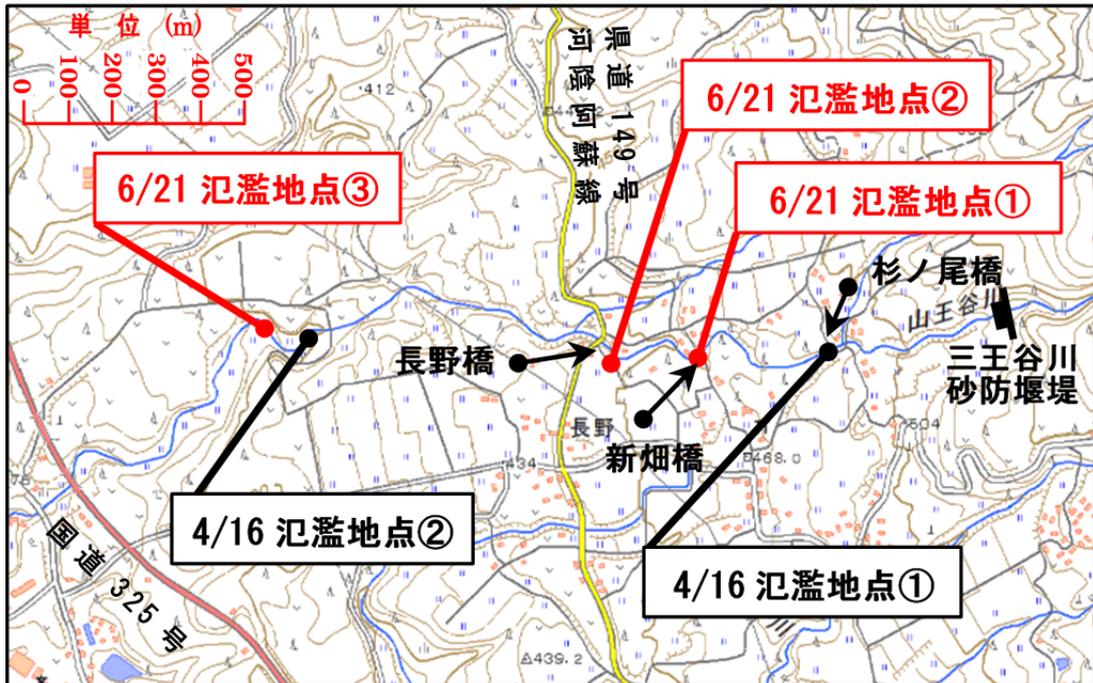


図-7.4.4.16 山王谷川における氾濫地点（国土地理院地形図に加筆）

本震直後の4月16日に氾濫が確認された谷出口下流約400mの杉ノ尾橋では新たな氾濫は認められなかったが、下流約750mに位置する新畑橋（6/21氾濫地点①）が土石流により閉塞し、河床上昇に伴い上流湾曲部で右岸側へ氾濫が発生し、家屋及び倉庫に被害が生じた（図-7.4.4.18）。また、長野橋の直上流の溪流保全工湾曲部（6/21氾濫地点②，谷出口から約1km下流）では、流速の低下に伴い土砂堆積の遡上・河床上昇が発生し、右岸側では民家への泥水の流入が、湾曲部左岸側では直進した泥水や流木による建設機械車庫の倒壊が確認された（図-7.4.4.19～7.4.4.20）。谷出口より下流側約1.6～1.9kmの勾配が緩く（2度程度）下流側で溪流保全工が蛇行する区間（6/21氾濫地点③，以下，“下流氾濫地”）にも二次土砂移動（氾濫・堆積）が認められるとともに、その上流側の溪流保全工内にも土砂堆積の遡上による溪床上昇が認められた（図-7.4.4.21）。



図-7.4.4.17 二次土砂災害被災前の新畑橋周辺の状況

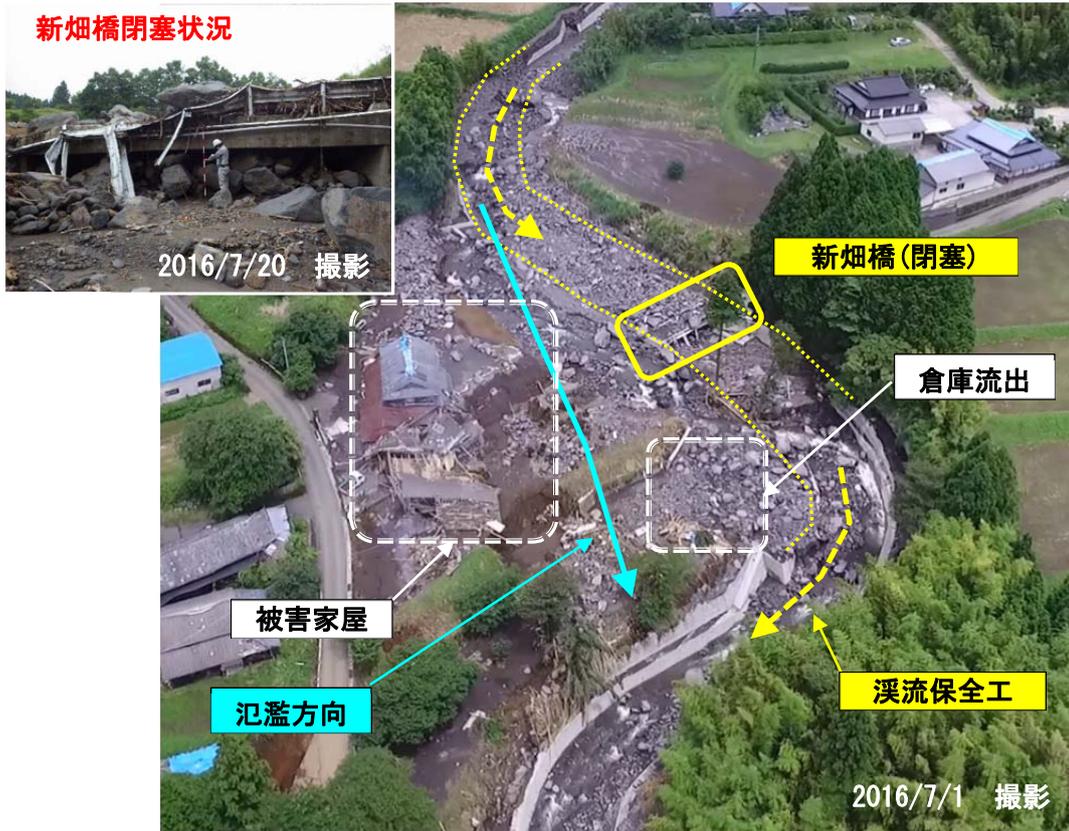


図-7.4.4.18 山王谷川の新畑橋周辺の二次土砂災害(東亜コンサルタント株式会社撮影)

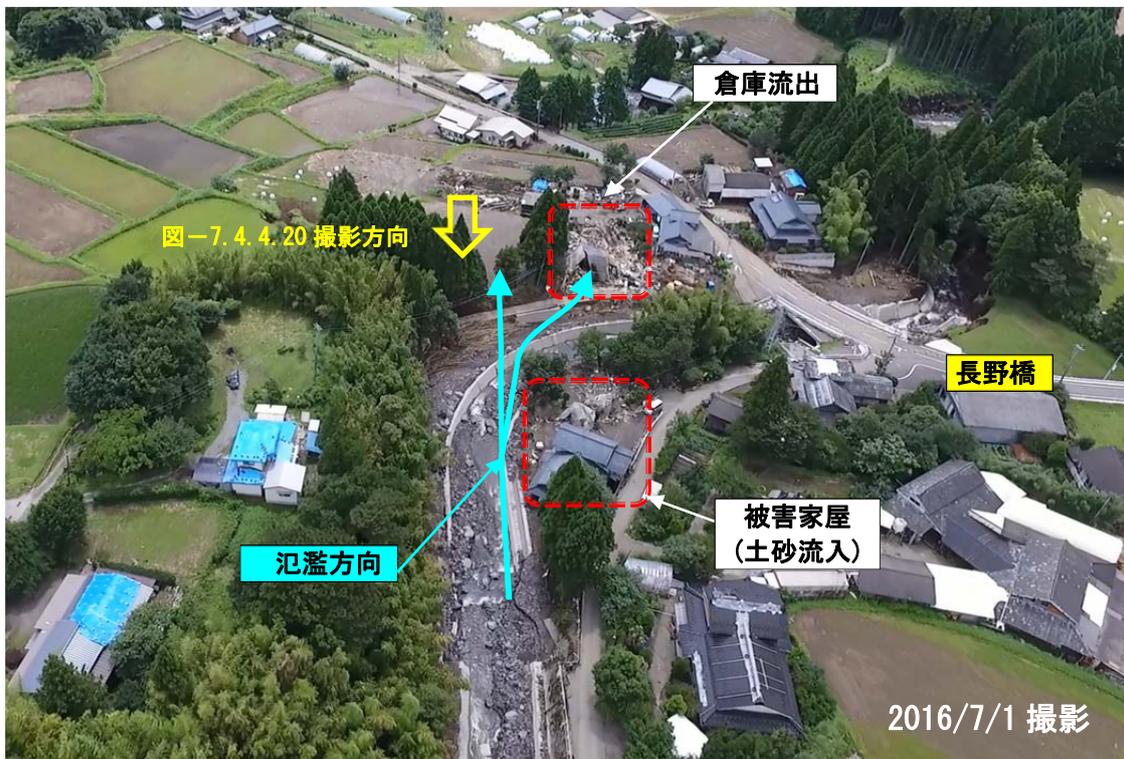
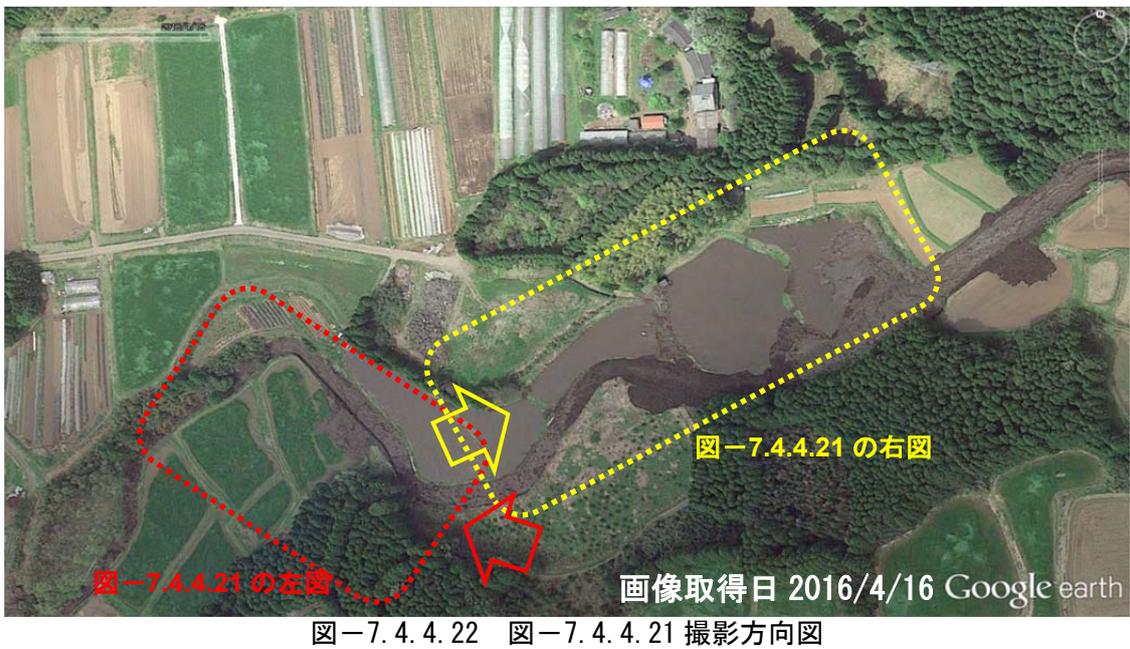
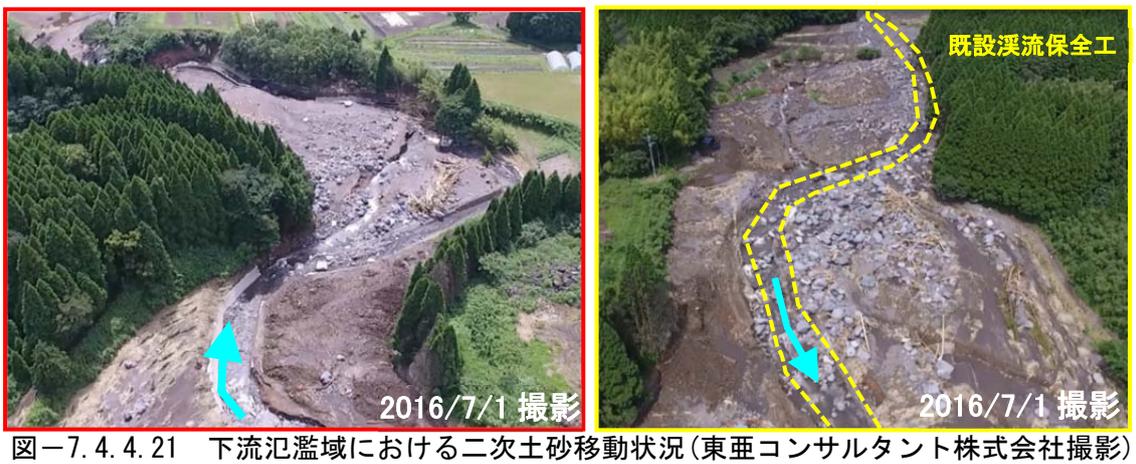


図-7.4.4.19 山王谷川の長野橋周辺の二次土砂災害(東亜コンサルタント株式会社撮影)

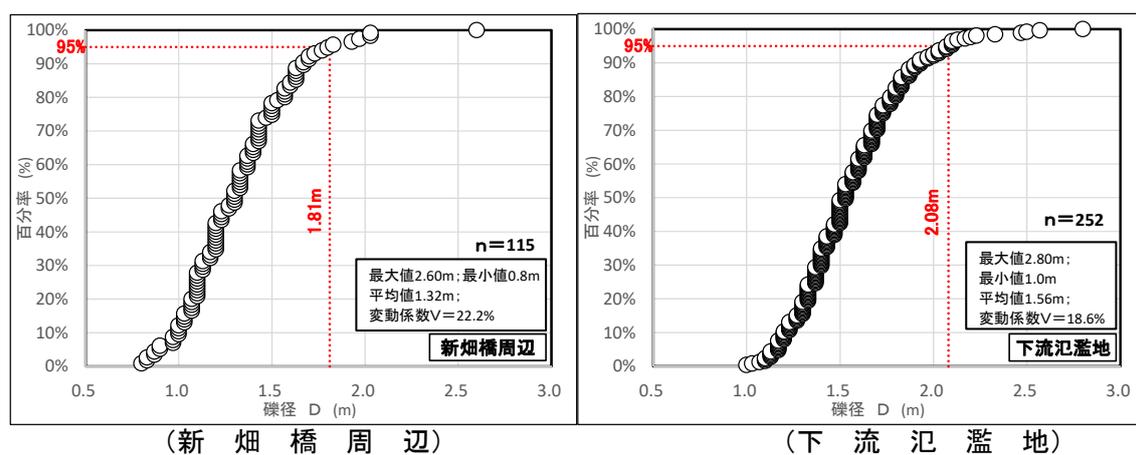


対象降雨後の二次土砂移動は、砂礫～巨石を多く含有し、図-7.4.4.18～7.4.4.19 に示し

たように直進性を有する土石流形態での流れであったと判断される。

図-7.4.4.23 に新畑橋周辺及び下流氾濫地における礫径調査結果を示す。新畑橋周辺における最大礫径 D_{95} は約 1.8m (n=115 個計測), 下流氾濫地における最大礫径 D_{95} は約 2.1m (n=252 個計測) が計測された。

二次移動土砂中の巨石には、前震・本震前から溪床に転在していたものと、今回の地震により溪岸等から崩落し溪床に堆積していたものが存在する推測される。実際に 6 月 20~21 日の降雨により、三王谷川砂防堰堤及びその上流域から巨石を含む溪床堆積土砂が流出していることが確認できた(図-7.4.4.24)。なお、本震直後に認められた黒ボク、ローム等の細粒土砂の厚い堆積は、今回の三王谷川砂防堰堤より下流域の調査では認められず、これらの細粒土砂は流水とともに白川本川まで流出したものと推測される。



(新畑橋周辺) (下流氾濫地)
図-7.4.4.23 新畑橋周辺及び下流氾濫地における礫径調査結果



図-7.4.4.24 三王谷川砂防堰堤上流の土砂堆積状況(東亜コンサルタント株式会社撮影)

山王谷川の二次土砂移動・二次土砂災害は、横過構造物(橋梁)の閉塞や、流速が低下する溪流保全工湾曲・蛇行部及び緩勾配区間等で発生した。ここで、県道 149 号河陰阿蘇線横過部では、長野橋により、溪流保全工の線形が規制されることから、その上流域では必然的に湾曲部を有する構造となる。そのため、長野橋近傍まで到達する二次移動土砂量を低減させることが必要と考えられる。そのためには、上流崩壊地における生産源対策や谷出口より上流側での溪床や溪岸の侵食対策に加えて、三王谷川砂防堰堤から下流約 300m の地点に広がる平坦地において遊砂地等で流出土砂・流木を捕捉することが効果的と考えられる。また、本震及び 6 月 20~21 日の降雨による流出土砂が堆積した三王谷川砂防堰堤

下流約 1,600m 地点（下流氾濫地）では、土砂堆積しやすい環境にあることから、当該地点においても遊砂土工等の土砂・流木捕捉施設を構築し、除石など適切な維持管理を行うことで土砂災害の軽減化が図れると考えられる。

7.4.5 垂玉温泉地区（図-4.1.1の1）

垂玉温泉地区では「北側」及び「東側」に崩壊が認められた。垂玉温泉の「北側」の斜面において、幅約 30m、長さ約 25m、平均深さ 3m で崩壊が発生している（図-7.4.5.1～7.4.5.2）。崩壊した土塊は黒ボク・ロームを主体とするが、その直下位に分布する亀裂の多い溶岩部を一部巻き込んで流下している。崩壊・流下した土砂は斜面下方に残存しており、垂玉温泉や道路に達してはいない。

一方、「東側」に位置する滝状の斜面上部で発生した崩壊による土砂が流下し、垂玉温泉に被害を及ぼしている。崩壊の上部には多数の亀裂が残存していることから、今後の地震や降雨により崩壊地が拡大することが懸念される。



図-7.4.5.1 垂玉温泉における崩壊状況（東亜コンサルタント株式会社撮影）



図-7.4.5.2 垂玉温泉における北側崩壊の状況

7.4.6 蛇の尾地区（図-4.1.1のJ）

阿蘇山北西部の蛇ノ尾地区はスコリア丘からなり、これを覆う黒ボクおよび火山灰が地震により崩壊、堆積している。スコリア丘の北・南側に計6箇所の崩壊が発生しており、南側の2箇所を調査した。両方とも表層崩壊であり、勾配34~36度、幅40~50m、斜面長90~100m、深さは平均約2m、崩壊土砂量0.8万~1万m³程度である（図-7.4.6.1）。両崩壊地の移動土砂の等価摩擦係数は約0.31-0.36、見通し角は約17-20°（現地測定）であり、ほぼ同様な流動性であると考えられる。今回の地震により斜面脚部にあった部分が背後から押されるように水平部の堆積先端へ移動したように見えた。また、未崩壊斜面においても、斜面脚部の波打ち(皺状の景観)が至るところに認められ、今後、同じような崩壊が生じる可能性があると考えられる。さらに、崩壊地上端より上方の尾根・遷急部には、崩壊とは関係なく尾根筋に沿って連続した亀裂が多数生じている。亀裂幅2-3cm~1-2m、亀裂深さ50~100cm、尾根の上部ほど大きく、今後の地震活動や豪雨の際、崩壊の拡大や新規崩壊が発生する危険性が高いと考えられるが、周辺には人家等は存在しない。



図-7.4.6.1 蛇の尾地区南側の崩壊状況

7.4.7 今後の課題

中央火口丘群周辺における崩壊・土石流では、黒ボクやロームなどの緩い表層が非常に強い地震動の影響で流出したこと、その時土砂・土塊中の含水の湧出や地下水・流水等の影響により移動土塊が流動化した可能性があること、崩壊地や溪流には崩壊残土や溪床堆積物等不安定土砂がきわめて多いこと、崩壊地周辺には亀裂が多いこと等が特徴であった。今後、高含水比の土質層が分布する火山地域における地震時等における流動化及び到達距離の把握、今後の豪雨による不安定土砂の土石流化の監視や効果的な土砂・流木流出防止対策の検討等が必要である。

7.5 西原村の崩壊と土石流

図-4.1.1において西原村・益城町には大小54箇所以上の崩壊が確認された。このうち布田川断層沿いに分布する規模の大きな崩壊地、河道閉塞を伴う崩壊地を対象に2016年4月22日～24日と5月14日～15日に現地調査を実施した。

7.5.1 大切畑橋南側斜面の崩壊（図-4.1.1のK）

大切畑大橋の南側斜面において崩壊が発生し、崩壊地中腹を横断する県道28号と並走する道路が破壊され、袴野川を河道閉塞する被害が発生した（図-7.5.1.1）。崩壊は、標高280m付近の遷急線付近を発生源とし、高さ約80m、幅約200m、崩壊深は、1～3mであり、推定崩壊土砂量は約1.5万 m^3 程度と推定される。崩壊地斜面の傾斜は約60度の直線型斜面であり、基盤地質は溶結凝灰岩、火山灰質粘性土であり、崩壊面には黒色火山灰が認められた。地震により大きな加速度が斜面土層に加わり表土層を滑動させたものと考えられる。

現地調査時には、斜面下部には、小規模なガリー（最大幅1.6m、高さ1.1m）が見られ、地震後の降雨により堆積土砂の二次移動が生じている様子が見られたが、斜面上に湧水などは確認されない。また、斜面上部の樹木が一部倒れこみ、わずかに滑った痕跡のある崩壊土塊が斜面にそのままの形状で残っており、これらの再移動が懸念される。

崩壊地斜面背後の山地稜線部において、落差を伴う開口亀裂が等高線沿いに多数発生しており、それが弱線となり、今後の降雨により崩壊が拡大する恐れがある。また、大切畑ダム側の斜面にも亀裂が見られ、今回発生した河川側とは異なる方向への崩壊も懸念される。斜面上部の亀裂が発生している箇所、熊本県による伸縮計などによる監視が行われている。

河道閉塞は、河道幅約4m、高さ1.2m、延長約25m区間で発生しており、上流側は湛水している。深さ約0.1m、幅1.4mの水みちが形成され、閉塞区間を越流しており、細粒分が一部下流側へ流出しているものの、大きな侵食状況はみられない。規模が小さいため、河道閉塞区間の土砂が急激に決壊し土石流や泥流、段波状の洪水が発生する恐れは低いものの、洪水時の越水氾濫や閉塞土砂の二次移動が懸念されることから、閉塞部土砂撤去を早急に行う必要がある。また、崩壊斜面の安定化を図るため、山腹工・法面对策工などによる恒久対策が必要である。



図-7.5.1.1 大切畑橋南側斜面の崩壊状況（国際航業株式会社撮影）

7.5.2 布田川下流の崩壊（図-4.1.1のL）

布田川下流の約300m区間の両岸において、崩壊が連続的に発生した（図-7.5.2.1）。当該箇所は、今回の地震前から崩壊跡地となっており、今回の地震により再崩壊や拡大崩壊を起こした。また、崩壊跡地沿いの河道には3基の砂防堰堤が連続配置されており、崩壊土砂のほとんどが堰堤間に堆積している。

右岸側の斜面崩壊は、標高280m付近の遷急線付近を発生源とし、高さ70m、幅270m、崩壊深4～6m、推定崩壊移動土砂量は、約6万m³程度である（図-7.5.2.2）。崩壊地斜面の傾斜は約65度の直線型斜面であり、基盤地質は溶結凝灰岩や自破碎溶岩である。崩壊堆積物は、直径3～5m程度の巨礫を含む砂礫である。岩塊の大きさは、溶結凝灰岩の節理間隔に支配されている。

また河道閉塞を起こしているが、流水は堆積土内を浸透し、湛水している状況はみられない。左岸側の斜面崩壊も、右岸側と同様に標高260m付近の遷急線付近を発生源とし、大きく6箇所で崩壊が発生している。崩壊高さは、25～55m程度、崩壊深2～3mであり、右岸側と比べると崩壊規模は小さい。

3基の砂防堰堤のうち、最下流に位置する練石積堰堤が倒壊・流出しており、堆積土砂の一部が流出した痕跡が確認された。また、下流から2基目に位置する布田川砂防堰堤（昭和61年竣工、コンクリート重力式堰堤）は、右岸側袖部縦目地が10cm程度開いている状況が確認された。

崩壊の上端は、侵食前線と一致し、侵食前線上部には溶結凝灰岩の岩盤と既設堰堤が位置することから、上流側へ崩壊が拡大する可能性は低い。一方、左右岸崩壊斜面背後には、複数の開口亀裂が生じていることから、今後の降雨により崩壊が拡大する可能性が高い。

布田川砂防堰堤等の効果により、河道閉塞区間の土砂が急激に決壊し土石流や泥流、段波状の洪水が発生する恐れは低いものの、崩壊斜面及び河道閉塞部からの土砂流出により下流河道沿いの保全対象に影響を受けることがないように、河道閉塞部下流端に対策の基幹となる砂防堰堤の設置、および崩壊斜面の安定化を図るため山腹工や法面对策工等の恒久対策が必要である。



図-7.5.2.1 布田川下流の崩壊状況（国際航業株式会社撮影）



図－7.5.2.2 布田川下流の崩壊（2016年5月15日撮影）

7.5.3 木山川及び布田川沿いの崩壊（図－4.1.1のM～P）

西原村及び益城町の布田川断層沿いにおいて発生した斜面崩壊のうち、木山川及び布田川沿いの河道閉塞を起こした4箇所について、崩壊諸元を表－7.5.3.1に示す。

いずれの箇所も、河川湾曲部の攻撃斜面で、周辺斜面と比較し急勾配の斜面で発生している。また、崩壊高と崩壊幅が、ほぼ同等で、高い斜面ほど崩壊の幅が大きい特徴がある。

いずれの箇所も河道を閉塞してはいるが、対岸へ崩壊土砂が乗り上げた形跡は見られず、閉塞土砂が下流に流出した痕跡も確認されない。また、調査時点でいずれの箇所も緊急的な対応として仮排水路掘削工事が実施済みであり、河道閉塞部の決壊の可能性は低い。一方、斜面上部に開口亀裂が複数見られ、また斜面上にも崩土が残存しており、拡大崩壊や二次移動が生じる可能性がある。伸縮計などの設置による施工時の監視、恒久的な法面対策や溪岸対策が必要である。

表－7.5.3.1 崩壊地諸元

崩壊箇所	崩壊幅 (m)	崩壊深さ (m)	元斜面傾斜 (度)	崩壊高さ (m)	推定崩壊土砂量 (m ³)
木山川沿い M	65	2～7	48	60	17,500
布田川沿い N	30	2～5	51	25	500
布田川沿い O	30	4	40	30	5,000
布田川沿い P	40	1～2	50	45	3,000

M～Pの位置は図－4.1.1に示す。

7.6 立野地区およびその周辺

7.6.1 立野地区（白川右岸側山腹斜面）

立野地区（阿蘇大橋以西の白川右岸側山腹斜面）では図-6.1に示すように4月14日・16日の地震により約30箇所の斜面崩壊・土石流が発生した。さらに4月21日の豪雨で2箇所、6月19～22日の豪雨で11箇所において崩壊・土石流の発生ならびに土砂移動範囲の拡大が認められた。大半は地震による斜面崩壊が拡大したもの（10箇所）であるが、豪雨により新たに発生したと考えられる斜面崩壊が3箇所認められた。また、立野地区を走る国道57号には、6月19～22日の降雨による土砂移動現象（斜面崩壊と土石流）により、土砂が流出して一時不通となった。これらの斜面崩壊・土石流のうち、人家、国道57号、JR線路の付近で発生した比較的大きな斜面崩壊・土石流の6箇所について概要を述べる。

1) 崩壊①, ②, ⑤, ⑥（地震により小崩壊, 降雨により崩壊が拡大）

崩壊①, ②, ⑤, ⑥は山腹斜面において地震により小崩壊が発生し、その後の降雨により崩壊が拡大したものである。崩壊①は阿蘇立野病院の裏山に位置し（図-7.6.1.1）、大きくは東側と西側に分かれる。東側の崩壊（勾配約31度）は地震により発生し、その後の降雨で堆積土砂が下方（勾配約17度）へ流下した。西側の崩壊は上部（勾配約36度）が地震により発生し、その後の降雨で下方斜面に新たに崩壊（勾配約26度）が発生した（図-7.6.1.2）と考えられる。崩壊⑤は後述する新所川2の源頭部の崩壊である。地震により尾根部に近い位置から小崩壊（勾配約39度）が多数発生した。その後の降雨により0次谷（勾配約26～28度）に沿って（勾配約26度）崩壊・侵食が拡大して土砂が下流に流下した。崩壊⑥では崩壊土砂が谷を侵食しながら（勾配約36度）流下して（図-7.6.1.3）、JR豊肥本線および国道57号を横切り、下流に堆積した。



図-7.6.1.1 南阿蘇村立野地区周辺における阿蘇立野病院と崩壊①（右側）と崩壊②（左側）崩壊の位置は図-6.1に示す。



図-7.6.1.2 崩壊①の西側の崩壊部（2016年7月23日撮影）崩壊の位置は図-6.1に示す。



図－7.6.1.3 南阿蘇村立野地区周辺における崩壊⑥の崩壊・侵食部と JR 豊肥本線の流出土砂は国道 57 号上に堆積した。地震により小崩壊，降雨により崩壊が拡大した。崩壊の位置は図－6.1 に示す。

2) 崩壊・土石流③（地震により小崩壊，降雨による拡大はない）

尾根部に近い位置から本震により崩壊（勾配約 28 度）が発生した（図－7.6.1.4）。崩壊土砂は斜面の下方で谷地形に入り，比較的緩勾配（勾配約 12 度）の斜面を流下して，最下流では土石流となって人家数戸を損壊して停止した。この土石流により死者が 2 名発生した。



図－7.6.1.4 崩壊③の下流における土砂の流下部（2016 年 7 月 23 日撮影）崩壊の位置は図－6.1 に示す。

3) 崩壊④（降雨により崩壊が新規に発生）

尾根部に近い位置から降雨により小崩壊（勾配約 33 度）が発生した（図－7.6.1.5）。崩壊部は東側と西側に二股に分かれて流下した。崩壊部の深さは約 1m と薄く，表層は黒ボクおよび強風化溶岩であり，これらの表層部が崩壊した。崩壊土砂は比較的急勾配（勾配約 17 度）の斜面内で停止した。



図-7.6.1.5 崩壊④の西側崩壊部（2016年7月23日撮影）
崩壊の位置は図-6.1に示す。

7.6.2 立野地区南の白川左岸および山腹斜面

図-7.6.2.1は立野地区南の白川左岸および山腹斜面の2016年7月23日時点の状況である。図-7.6.2.2は2016年4月16日のGoogle earthの画像である。本震後、右岸の斜面がその上部の台地の一部も含めて崩壊し、土砂が白川の対岸まで達しているが、橋梁の状況を見るとそれほど厚い堆積ではないように見える。左岸の山腹斜面にはこの時点で表層崩壊が発生していることがわかるが、7月23日の写真と比べると、本震後、崩壊が拡大しているように見える。河道堆積土砂は7月23日の時点では見られなかったが、これは工事関係者による除石によるところが大きい。



図-7.6.2.1 立野地区南の白川左岸および斜面の崩壊状況（2016年7月23日撮影）



図-7.6.2.2 立野地区南の白川左岸および山腹斜面の状況
(2016年4月16日 Google earth 画像)

8. 砂防施設の効果

砂防施設（堰堤）の効果が判断できた代表例の調査結果を報告する。

8.1 新所川2（立野地区 崩壊⑤）

JR 豊肥本線立野駅近傍に位置する新所川2では、2016年6月20日から降り続いた豪雨により右岸斜面で多数の崩壊が発生し土石流となった（図-8.1.1）。土石流は、流域下流部の谷出口に建設されていた鋼製砂防堰堤により、堰堤（堰堤有効高約7m）が満砂容量で捕捉できる土砂量の半分程度（堆積高さ3.8m程度）の土砂が堰堤上流に堆積した（図-8.1.2右）。その堆積勾配は10度程度である。

図-8.1.2左に示すように、堰堤の堆砂域上流に位置する湾曲部には、多量の土砂礫や流木の堆積が確認された。堰堤直下流の農道へ少量の細粒土砂の流出が見られたこともあり、堆積した土砂の細粒分は、今後の降雨により堰堤下流に位置する農地や鉄道へと流下する危険性があると認められ、応急対応が必要である。



図-8.1.1 新所川2（最も左側）の航空写真
（国際航業株式会社提供，2016年7月5日撮影）



図-8.1.2 新所川2の砂防堰堤堆砂域と堰堤による土砂捕捉状況
（2016年7月23日撮影）

8.2 東下田川1（無施設）と東下田川2（施設有）の比較

2016年6月20日から降り続いた豪雨により、中央火口丘南西側の南阿蘇鉄道阿蘇下田城ふれあい温泉駅近傍に位置する東下田川1では、流域上流の森林域と草原との境界部で崩壊が発生し、土石流となり下流の国道325号にまで到達した（図-8.2.1, 図-8.2.2上）。流域内に砂防施設は未設置であった。一方、東側に隣接する東下田川2には砂防施設が設置済みであったために、両流域の状況を比較することにより、砂防施設の効果が確認される。東下田川1では、谷出口より下流の扇状地は棚田として利用され、この棚田により地形勾配が緩和され、土石流が減勢されたものと推察される。図-8.2.2下に示すように、中・上流の急勾配区間では、河床や溪岸が洗掘され、基岩が露出している。流域内には砂防施設が設置されていない事実に加え、多量の流木や不安定土砂が堆積しているため、応急対策を実施する必要がある。

東下田川1の東側に隣接する東下田川2の谷出口には、2002年3月に熊本県により施工された鋼製砂防堰堤（東下田2砂防堰堤、堤高：8.5m）が設置されており、地震発生後である2016年4月21日の日雨量113mm、最大時間雨量24.5mmを記録した降雨により発生した土砂や流木を捕捉していた（図-8.2.3）。この時点では未満砂であったが、2016年6月19～29日の豪雨（阿蘇山：連続雨量1031mm、最大時間雨量85mm）により再度土石流が発生し、図-8.2.4と図-8.2.5に示すように、満砂状態となった。満砂状態となった堰堤を越流した土砂（細粒）と流木の一部は、堰堤下流の広範囲にわたり堆積していた。今後の降雨を迎えるにあたり、堰堤の空き容量の確保などの対応が急務である。



図-8.2.1 東下田川1と東下田川2（国際航業株式会社提供、2016年7月18日撮影）



図-8.2.2 東下田川1全景(上)と流下部(下)(2016年7月24日撮影)



図-8.2.3 東下田川2の地震直後の状況（2016年4月26日撮影）



図-8.2.4 東下田川2の砂防堰堤の土砂捕捉状況（2016年7月24日撮影）



図-8.2.5 東下田川2 砂防堰堤の土砂捕捉状況

9. 警戒避難の実態

9.1 地震後の土砂災害警戒情報等の設定状況

地震等の発生後には、地盤条件等が変化し、通常よりも少ない降雨で土砂災害が発生する可能性がある。このため県砂防部局と地方気象台等では、揺れの大きかった市町村について（震度5強以上）、土砂災害警戒情報の発表基準を引き下げて運用している。熊本県では気象台基準の土壌雨量指数と、県砂防部局基準の実効雨量の両方を用いるAND/OR方式により土砂災害警戒情報が発表されており、それぞれの基準に、震度5強の地域では8割を乗じ、6弱以上の地域では7割を乗じることで、地震後の暫定基準としている。

実際の設定としては、前震発生後の4月15日に、熊本県では通常基準の7割の暫定基準を設ける市町村として、益城町、宇城市、玉名市、西原村、熊本市、氷川町の6市町村、8割の暫定基準を設ける市町村としては、菊池市、宇土市、大津町など10の市町村（一部地域の市町村も含む）である。

本震発生後の4月16日には、熊本県では通常基準の7割の設定基準を設ける市町村は、既に前震により7割で運用されている6市町村の他に、本震で8割の暫定基準となっていた10市町村に加え阿蘇地方の南阿蘇村、阿蘇市、産山村などを含む16市町村であり、8割で運用される市町村は、阿蘇地方の南小国町、小国町、高森町を含む8市町村である。以下に列記する（国土交通省、2016c）。

・通常基準の7割の暫定基準を設ける16市町村

南阿蘇村、産山村、八代市西部、菊池市、宇土市、大津町、嘉島町、合志市、阿蘇市、菊陽町、御船町、美里町、山都町西部、和水町、上天草市、天草市東部

・通常基準の8割の暫定基準を設ける8市町村

南小国町、小国町、高森町、山鹿市、甲佐町、芦北町、玉東町、長州町

なお、気象台の発表する大雨警報（土砂災害）の土壌雨量指数基準及び大雨注意報の土壌雨量指数基準も、震度に応じた上記の市町村ごとに7割基準と8割基準により運用している（気象庁b, 2016）。

9.2 土砂災害警戒情報の発表状況

地震後の土砂災害で大きな被害を受けた阿蘇市や南阿蘇村における、地震後から梅雨時期を含む8月末までの土砂災害警戒情報の発表状況は次のとおりである。

9.2.1 阿蘇市における土砂災害警戒情報

阿蘇市ではこの期間で以下の5回発表されている。

- ・6月20日 3:45～6月25日 21:15（継続時間（以下同じ）5日と17時間30分）
- ・6月28日 6:10～6月30日 13:20（2日と7時間10分）
- ・7月8日 21:35～7月9日 7:52（10時間17分）
- ・7月13日 2:47～7月14日 20:35（1日と17時間48分）
- ・7月21日 16:50～同日 18:30（1時間40分）

9.2.2 南阿蘇村における土砂災害警戒情報

南阿蘇村ではこの期間で以下の6回発表されている。

- ・6月20日 7:13～6月24日 8:10（4日と57分）
- ・6月24日 19:15～6月25日 21:15（1日と2時間）
- ・6月28日 5:40～6月30日 13:20（2日と7時間40分）
- ・7月8日 22:42～7月9日 7:52（9時間10分）
- ・7月13日 2:47～7月14日 20:35（1日と17時間48分）
- ・7月17日 4:15～7月17日 8:15（4時間）

9.3 避難勧告等の発令状況と実際の避難の状況

阿蘇市と南阿蘇村では、土砂災害警戒情報の発表等をもとに避難指示・避難勧告・避難準備情報などを、市村内の地区ごとに発令している（図-9.3.1）。ここでは南阿蘇村（2015年度4,744世帯、11,619人）での降雨等に対する避難勧告等の経緯や発令地区数等について記載する。なおこれらは熊本県を通しての南阿蘇村への聞き取り調査の結果による。

本震発生後、地震による避難指示が12地区に発令されていたが(地区の一部のみ等含む)、4月21日朝に大雨警報(土砂災害)が発表され、新たに避難指示が8地区に発令された。その後、4月21日夜に大雨警報(土砂災害)が解除され、22日昼に前述の18地区(2,000世帯4,694世帯人数)全てで避難勧告に引き下げられた(一部地区のみの発令等もあり、解除時の地区の全体数は必ずしも合わない)。

5月10日朝に大雨警報(土砂災害)が発表され、前述の18地区が避難指示に引き上げられた。その後、10日夜に大雨警報(土砂災害)が解除され、翌11日朝、18地区で避難勧告に引き下げられた。

6月19日未明に大雨警報(土砂災害、浸水害)が発表されたため、避難勧告が13地区(1,368世帯、3,199人)に発令されるとともに(それ以前から避難勧告継続中の9地区含む)、26地区(3,319世帯、8,172人)で避難準備情報が発令された。また20日朝に土砂災害警戒情報が発表されたため避難勧告13地区と、避難準備地区のうち4地区の計17地区が避難指示に引き上げられた。また避難準備22地区は避難勧告に引き上げられた。なお21日夜に避難勧告1地区が避難指示に引き上げられ、さらに24日夕方に避難勧告1地区が避難指示に引き上げられた。その後、6月24日夜に土砂災害警戒情報が解除されたため、25日朝に避難指示19地区のうち3地区の避難指示が継続されるとともに、6地区が避難勧告へ、10地区で避難準備へ引き下げられ、避難勧告20地区は解除された。

6月28日朝に土砂災害警戒情報が発表されたため、避難勧告3地区(336世帯、834人)と避難準備16地区(1,658世帯、3,931人)の全てが避難指示に引き上げられるとともに、20地区(2,693世帯、6,606人)に避難勧告が発令された。その後、6月30日午後に土砂災害警戒情報が、夕方に大雨警報(土砂災害)が解除されたことにより、避難指示19地区のうち3地区の避難指示が継続されるとともに6地区を避難勧告へ、10地区が避難準備へ引き下げられ、避難勧告20地区は解除された。

7月13日未明に土砂災害警戒情報が発表されたため、避難勧告と避難準備16地区全てが避難指示に引き上げられるとともに、20地区に避難勧告が発令された。その後、7月14日夜に土砂災害警戒情報及び大雨警報(土砂災害)が解除され、国道57号が通行可能であることと今後の降雨も少ないことから、避難指示19地区のうち、それまで避難指示が継続されていた3地区を含め9地区が避難勧告へ、10地区で避難準備へ引き下げられるとともに、避難勧告20地区は解除された。

8月末時点で発令されているのは、避難勧告9地区、避難準備10地区となった。

南阿蘇村においては、地震後の降雨に関して、大雨警報(土砂災害)、土砂災害警戒情報、そして今後の降雨の見込みなどを勘案して、地区ごとに避難指示等が発令されている。また道路通行の可否による避難指示等の判断も行われている。さらに土砂災害警戒情報が夜間に解除された場合などでは、避難勧告等の解除は翌日の朝に実施されている。

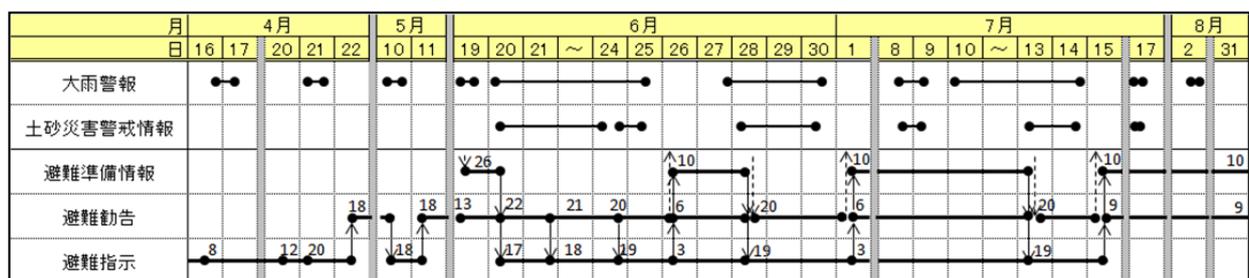


図-9.3.1 避難勧告等の発令～解除の期間と地区数
避難指示等の上にある数値は発令地区数

10. 今後の課題

平成28年熊本地震およびその後の降雨により、特に阿蘇地方においては多数の土砂移動現象が発生し人命、家屋、道路、鉄道、公共施設等に大きな被害を与え、さらに地域の社会や経済に対し、広域的な被害が発生した。また、阿蘇地方では地震に起因して山地斜面には亀裂が発生し、地震およびその後降雨に起因する斜面崩壊・地すべり・土石流などにより発生した不安定な土砂が多量に存在しており、以前に比べ土砂災害ポテンシャルが増大しており、土砂災害を受ける危険性が高くなっている。火口壁から下流の白川中流区間や支川の一部では堤防の天端が地震により沈下しており、今後の土砂流出に伴う河床上昇により、洪水被害が発生する危険性について今後さらに調査が必要である。1999年に台湾で発生した集集大地震、2008年に中国で発生した発生した四川大地震では地震後長期にわたり降雨による土砂移動現象や二次土砂災害が頻発し、流域に甚大な被害が発生した。一方、阿蘇山は活発な活火山であり、2014年の夏頃から断続的に噴火を繰り返しており、平成28年10月8日には比較的大きな噴火が発生し、周辺に火山灰を堆積させた。このため、地震による土砂災害への対応と共に、今後の噴火に備え、降灰後の降雨による土石流を始め、噴火に起因する土砂災害に対しても、ハード・ソフトが一体となった対策を進める必要がある。平成28年10月21日には鳥取県中部地震が発生しており、さらに近い将来、南海トラフを震源とする巨大地震や首都直下地震などの発生が予想されている。このような巨大地震の発生に対する種々の対策が講じられている中、地震による土砂災害ならびに地震後の降雨による二次土砂災害についてもこれまで以上に対策を強力に推進する必要がある。地震による土砂災害の対応としては、主として地震の発生前に行う震前対応と地震の後に行う震後対応があり、これらを共に進める必要がある。これまで、降雨による土砂移動現象ならびに災害に関する調査研究、対策が主として進められてきているが、効果的な震前、震後の対応を行うためには、今後は地震ならびにその後の降雨による土砂移動現象について、次の事項に関する調査研究を進める必要がある。

- 1) 地震による土砂移動現象の発生機構に関する研究
- 2) 地震による土砂災害発生箇所の特性に研究
- 3) 地震による土砂災害に対する効果的な震前対策工法の開発
- 4) 地震による土砂災害に対する知識の普及
- 5) 地震により発生する亀裂が二次土砂災害に与える影響の解明
- 6) 地震後の降雨による流域の土砂移動ポテンシャルの把握手法に関する研究
- 7) 地震後の二次土砂移動現象による災害に対する効果的な応急対策工法の開発
- 8) 火山噴火等に起因する土砂災害に関する研究

阿蘇地方、熊本地方を含む白川流域では地震の影響による土砂移動現象が引き続き発生すると考えられ、今後とも降雨による二次土砂移動現象に関する調査研究、ならびに二次災害についての的確な対応が必要である。

謝 辞

国土交通省の皆様には、データ・資料・情報の提供並びに現地調査に対する便宜供与において多大な協力をいただいた。利用した航空レーザ計測データは、地震前は国土交通省九州地方整備局、地震後はアジア航測株式会社および国際航業株式会社によって計測されたものである。また、地震後の降雨データの解析には国立研究開発法人土木研究所の清水孝一様の協力を得た。これらの皆様方に心から感謝の意を表するとともに、被災地及び被災された方々の一日も早い復興を心より祈念する次第である

引用文献

- 石川芳治・久保田哲也・青戸一峰・飯島康夫・井川寿之・池上忠・池田誠・植弘隆・上原祐治・内村雄一・江川佳苗・大石博之・岡野和行・海堀正博・桂真也・加藤誠章・川原慎一郎・古賀省三・坂島俊彦・相楽渉・地頭菌隆・篠原慶規・清水収・下田義文・鈴木滋・鈴木正美・瀬戸康平・田方智・寺田秀樹・寺本行芳・堂ノ脇将光・飛岡啓之・鳥田英司・中濃耕司・西川友章・花田良太・平川泰之・福塚康三郎・藤澤康弘・藤田正治・正木光一・宮田直樹・山口和也・山下伸太郎・山根誠・横尾公博 (2016a) : 平成 28 年熊本地震による土砂災害, 砂防学会誌, Vol.69, No.3, p.55-66
- 石川芳治・赤澤史頭・植弘隆・大野宏之・小山内信智・海堀正博・久保田哲也・古賀省三・権田豊・坂島俊彦・地頭菌隆・清水収・武士俊也・樽角晃・鳥田英司・中濃耕司・西真佐人・野呂智之・平川泰之・平松晋也・藤田正治・松尾新二郎・山田孝 (2016b) : 平成 28 年熊本地震後の降雨による二次土砂移動と二次土砂災害, 砂防学会誌, Vol.69, No.4, p.25-36
- 熊本県土木部砂防課(2016) : 平成 28 年熊本地震、土砂災害の被災状況について、被害概要版
- 国土交通省 (2016a) : 平成 28 年熊本地震による土砂災害の概要,
http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/160914_gaiyou_sokuhou.pdf
参照 2016-09-26
- 国土交通省 (2016b) : 阿蘇大橋地区復旧技術検討会資料,
http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kisyahappyou/h28/data_file/1474877355.pdf
参照 2016-09-26
- 国土交通省 (2016c) : 平成 28 年 4 月 16 日 1 時 25 分頃の熊本県熊本地方の地震に伴う土砂災害警戒情報発表基準の暫定的な運用について
http://www.mlit.go.jp/report/press/sabo01_hh_000026.html
参照 2016-09-25
- 国土地理院 (2016a) : 平成 28 年熊本地震・空から見た (航空写真判読による) 土砂崩壊地分布・KML ファイル
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>
参照 2016-06-10
- 国土地理院 (2016b) : 熊本地震関連情報 ; 地理院地図 (空中写真等) による情報提供、および緊急 GNSS 観測の結果 (7 月 26 日 13 時 40 分追加)
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html#1>
参照 2016-09-25
- 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 (2016) : 熊本地震による土砂移動分布図
<http://www.bosai.go.jp/mizu/dosha.html>
参照 2016-11-15

気象庁 (2016a) : 「平成 28 年 (2016 年) 熊本地震」について (第 7 報) ,4 月 16 日発表
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/16a/kaisetsu201604160330.pdf>

参照 2016-09-25

気象庁 (2016b) : 警報・注意報発表基準一覧表 (熊本県)

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kijun/kumamoto.html>

参照 2016-09-25

久保田哲也・地頭蘭隆・清水収・平川泰之・本田健・飯島康夫・泉山寛明・海堀正博・北原哲郎・小林浩・松本俊雄・松尾新二郎・松澤真・宮縁育夫・長野英次・中濃耕司・奥山悠木・島田徹・篠原慶規・杉原成満・武澤永純・田中信・内田太郎 (2012) : 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, p.50-61
佐々恭二・福岡浩・汪発武 (1998) : 秋田県澄川地すべり, 鹿児島県針原川土石流における高速長距離土塊移動のメカニズムについて, 地すべり, Vol.35, No.2, p.29-37

産業技術総合研究所 (2016) : 平成 28 年 (2016 年) 年熊本地震に関する情報、

<https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/kumamoto2016/index.html>

参照 2016-06-08

通商産業省 工業技術院 地質調査所 (1985) : 阿蘇火山地質図

内閣府非常災害対策本部 (2016) : 熊本県熊本地方を震源とする地震に係る被害状況等について

<http://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/index.html>

参照 2016-06-08

Miyabuchi Y.(2009) : A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan, Sedimentary Geology, Vol.220, p.169-189

(参考)

平成 28 年熊本地震による土砂災害緊急調査に基づく緊急提言

平成 28 年 4 月 14 日の前震ならびに 4 月 16 日の本震ではいずれも震度 7 を記録し、特に熊本県では多数の地震に起因する土砂災害が発生した。4 月 26 日現在、阿蘇地域での土砂移動現象による死者・行方不明者は 10 名にのぼる甚大な被害となっている。

公益社団法人砂防学会は平成 28 年熊本地震に起因する土砂移動現象の発生・流下・氾濫堆積実態を明かにするとともに、余震や梅雨期における二次災害の可能性を調査し、二次災害の軽減のために必要な緊急対応を検討することを目的として本震の前日から先遣調査（4 月 15～17 日）を行うと共に、13 名 3 班からなる「平成 28 年熊本地震に係わる土砂災害第一次緊急調査団」を組織し 22 日～24 日に現地調査等を実施した。現地調査の結果ならびにそれらを基にした分析の結果は、平成 28 年 4 月 27 日に東京都千代田区において緊急報告会を開催し広く一般に公開した。

公益社団法人砂防学会は、現在も余震が続き、また梅雨による降雨が間近に控えていることに鑑み、これまでの調査・分析結果を基に、主として、今後の土砂移動現象に伴う二次災害の可能性を推察し、さらに二次災害を軽減するための緊急対応に資することを目的として、以下の提言を行う。

1. 地震による土砂移動現象の発生状況

今回の地震においては阿蘇山のカルデラ内の中央火口丘、カルデラ内壁ならびに外輪山の周辺において、多様な土砂移動現象が発生しており、これらにより人的、物的被害が発生している。特徴的な土砂移動現象ならびに関連する現象を整理する。

(1) カルデラ内の中央火口丘群およびその周辺（河岸段丘を含む）

表層が火山灰、その下が火砕流堆積物および溶岩からなる急勾配の斜面ならびに、表層が火山灰やスコリアからなる緩斜面～急斜面において斜面崩壊ならびに地すべり（京大火山研究センターなど）が多数発生し、比較的勾配の緩い斜面でも発生している。これらの斜面崩壊ならびに地すべりによる不安定な土砂は斜面崩壊地ならびに地すべり地内に堆積しているとともにそれらの一部は土石流（山王谷川）となって流下、氾濫堆積している。

(2) カルデラ内壁

概して斜面勾配が急であり、それらは主として表層の火山灰とその下の溶結凝灰岩を含む火砕流堆積物および溶岩からなっている。これらのカルデラ内壁では、地震による強い震動により、大規模な斜面崩壊（阿蘇大橋地区）ならび、中～小規模の斜面崩壊が多数発生している。これらの斜面崩壊による不安定な土砂は崩壊地内および下部に堆積しているとともに一部で土石流となって下流に流下・氾濫している。

(3) 外輪山の周辺

表層が火山灰、その下が火砕流堆積物および溶岩からなる急勾配の斜面では、地震による強い震動により、中～小規模の斜面崩壊が多数発生している。これらの斜面崩壊による不安定土砂は崩壊地内および下部斜面ならびに下部の河道内に堆積している。これらの不安定土砂の一部は土石流となって流下・氾濫している。

これら 3 地域に共通して、多くの斜面崩壊ならびに地すべりの頭部周辺では地震により多数の亀裂が発生しており、さらに、斜面崩壊や地すべりが発生していない場所、森林に覆われている斜面でも、斜面の上部や尾根沿いの地域において多数の亀裂が発生している。

2. 余震及び梅雨期における二次災害の発生の可能性

阿蘇山は我が国有数の活火山で有り約三十万年から九万年前の巨大噴火によりカルデラ地形が形成された。約九万年前の巨大噴火により大規模な火砕流を発生させ、多量の火山砕屑物を周辺に堆積させている。さらに近年においても活発な噴火活動を続けており、周

辺に多量の火山灰（降下火砕物を）を堆積させている。このため、地質的には新しい年代の火山灰および火砕流堆積物および溶岩が表層およびその下に厚く堆積しており、堆積年代の違いや、風化・土壌化の程度の違いにより強度や透水性が異なり、さらに火山地帯の特有の地質や地質構造により多量の地下水が地層の中に存在していると推定され、斜面崩壊および地すべりが発生し易い条件にある。

このような特徴を持つ阿蘇山のカルデラ内および周辺地域では今回の強い地震動により上述のように多数の斜面崩壊、地すべり、一部で土石流が発生し、さらに、斜面崩壊や地すべり頭部の周辺には多数の亀裂が発生している。これらの亀裂は今後の斜面崩壊や地すべり発生の前駆現象の可能性があり、さらに、これらの亀裂を通して雨水が直接地中に流入することにより、地下水位（水圧）が急上昇して斜面崩壊や地すべりの発生を助長する可能性がある。

このため、今後の強い余震や降雨により次の3点の可能性が推察される。

- ① 斜面崩壊や地すべりの周辺部において無数の亀裂が発生しており斜面崩壊や地すべりの拡大が発生し、周辺や下流の人命、人家、施設等に新たな被害や拡大をもたらす
- ② 斜面崩壊地内や地すべり地内に堆積している土砂が流出し下流の人命、人家、施設等に新たな被害や拡大をもたらす
- ③ これまで斜面崩壊や地すべりが発生していない地区でも新たな土砂移動現象が発生し、人命、人家、施設等に新たな被害をもたらす

3. 二次災害ならびに新たな土砂災害を軽減するための対応

前述のように、現地には、今回発生した多数の斜面崩壊や地すべり、及びそれらの周辺に多数の亀裂が存在し、さらに斜面崩壊地内や地すべり地内ならびにその下流には多量の不安定な土砂が堆積しており、今後の強い余震や降雨により下流に流下、氾濫して被害が発生、拡大させる可能性がある。

このような二次的な土砂移動現象による人命の被害を防止し、家屋や施設に対する被害を軽減するために次のような対応を採る必要がある。

（1）二次災害及び新たな土砂災害危険箇所の判定

航空レーザ計測、現地調査等により危険な亀裂の分布する範囲を早急に把握するとともに、周辺ならびに下流に人家、人が集まる施設、公共施設等が存在する地域および復旧工事等を行っている地域の斜面崩壊、地すべりならびに土石流の発生箇所においては周辺の斜面上の亀裂の大きさや方向ならびに崩壊・堆積土砂の量や安定度を精査し、二次災害ならびに新たな土砂災害の発生の可能性を判定する。

（2）危険区域の見直し

山腹斜面や溪流内に多量の不安定な土砂が堆積していたり、流木や倒木が多量に存在する場合にはこれらが土石流や流木となって流下した場合の氾濫・堆積区域の見直しを行い、避難が必要な区域の見直しを行う。

（3）モニタリングと早めの避難

二次災害ならびに新たな土砂災害の発生の可能性のある亀裂や堆積土砂について、モニタリング（監視）を行い、早めの避難により人命への被害を防止する。斜面上の亀裂については、伸縮計等を用いて余震の強さ、降雨の量・強さと亀裂の拡大との関係を分析・判断し、早めの避難を行う。堆積土砂の流下については監視カメラ、ワイヤーセンサー等によりモニタリングを行い、余震の強さや降雨の量・強さとの関係を分析・判断し、早めの避難を行う。

特に、緩い斜面で発生している地すべりや土石流の発生地域では地下水の影響が大きいと考えられることから、地下水の水位や分布の調査およびモニタリングを行う。

（4）雨量観測データ等の利活用

余震の強さを直前に知るために緊急地震速報を活用するとともに、当該地区の降雨の量・強さを知るために、短時間降雨予測やXバンドMPレーダーの雨量観測データを利活用する。

(5) 既設砂防えん堤の除石の実施

崩壊や地すべりによる土砂が斜面や溪流内に堆積している溪流においては、堆積土砂や堆積流木の状況を精査し、必要な場合には既設の砂防えん堤の緊急除石を実施し、極力、下流への土砂流出を抑える対策を実施する。

(6) 応急復旧工事の留意点

応急復旧工事等のために斜面崩壊や地すべりの下部に立ち入る場合には、上記の監視を行うと共に、特に亀裂により不安定となっている土砂は、除去も検討する必要がある。さらに、余震による突然の崩壊や土砂の流出に備えて防護ネット等の設置を行う。また、二次災害の発生の危険性が高い地区での復旧工事では無人化施工を実施する。

今回の地震により発生した斜面崩壊、地すべり周辺や山腹斜面では多数の亀裂が発生しているが、それらの中でも、早急に対応を行う必要があるのは、人家や人が集まる施設、道路や鉄道等に影響を与える地区にある斜面上の亀裂である。今後これらの亀裂を優先してこれらの対応を急ぐべきである。

4. 今後の調査研究への対応

今回の地震に起因する土砂移動現象の発生・流下・氾濫堆積の実態を明らかにするために、火山灰に代表される地質、地下水、地形、地震動、降雨といった様々な因子とその関連について調査研究を推進する必要がある。また、今回の地震により発生した亀裂や地盤の緩みが今後の降雨や地震による土砂移動現象の発生に与える影響を明らかにするために、亀裂の分布や亀裂の発生した斜面における土質強度の低下やその後の変化を把握することも必要である。地震が引き起こす土砂災害危険区域の把握が現状では課題となっており、その他の事例も含めて調査研究を一層進めるとともに、その体制の強化を急ぐべきである。

以上、ここに緊急提言する。

平成 28 年 5 月 6 日

公益社団法人 砂防学会
会長 石川 芳治