

地震によって発生する特異な土砂移動現象についての研究

谷本 進¹⁾・海堀 正博¹⁾・高田 昊生²⁾

¹⁾ 広島大学大学院総合科学研究科

²⁾ 日本工営株式会社

Study on Distinctive Landslides Induced by an Earthquake

Shin TANIMOTO¹⁾, Masahiro KAIBORI¹⁾ and Kosei TAKADA²⁾

¹⁾ Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

²⁾ NIPPON KOEI Corporation

Abstract

The Kumamoto earthquake of 2016 triggered numerous landslides. One feature of these landslides was fluidic movement of soil mass, which occurred despite little rain having fallen for a long time before the earthquake. To understand this distinctive phenomenon, we analyzed the seismic and soil characteristics of the area and evaluated their association with landslides. The results showed landslides to be concentrated in areas where seismic acceleration exceeded 800 gal. Through soil tests, we found that a mass of clay with abundant Halloysite easily becomes fluid. Therefore we inferred that some landslides were induced by fluidization of such clay layers.

1. はじめに

2016年4月に熊本県熊本地方を震源とする強い地震が連続的に発生した。4月14日21時26分頃には、マグニチュード6.5、震源の深さが11kmの地震が発生し（前震）、益城町で震度7を観測したほか、玉名市、西原村、嘉島町、宇城市、熊本市では震度6弱が観測された。さらに、その約28時間後4月16日1時25分頃には、マグニチュード7.3、震源の深さが12kmの地震が発生し（本震）、益城町と西原村で震度7を観測したほか、熊本県と大分県の一部で震度6弱以上の揺れを記録した¹⁾。この強い揺れによって震源に近い益城町付近を中心に、全壊8673棟、半壊34726棟、一部損壊162479棟の建物被害が発生した（図1）²⁾。また震源からやや離れた阿蘇カルデラ付近では、

様々な形態の土砂移動現象が確認されており³⁾⁻⁷⁾（図2）、国土交通省によると、がけ崩れ123件、地滑り10件、土石流57件で合計190件が発生したと報告されている⁸⁾。人間生活に大きな影響を与えていなかったものを含めるとさらに多く発生したと思われる。死者数は、前震時は9名、本震時は41名であり、関連死を含めると合計で267名であった⁸⁾。このうち10名は本震時の土砂災害による死者であった。

本地震による土砂移動現象は以下の2点において特徴的であった。1つ目は、先行雨量がほとんど無かったにも関わらず、勾配が比較的緩やかな場所において、流動的な土砂移動現象も発生しているという点である。本来、流動的な現象には水の存在が必要であると思われるため、土の含水状態や、地震動に対する特殊な挙動がそれらの現象の

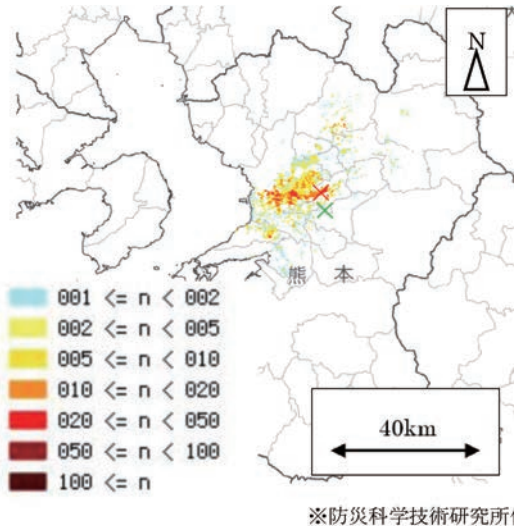


図1 全壊棟数分布図

建物被害のうち全壊したものの分布を示している。図左下に凡例を示している。×は前震央、×は本震央を表している。

発生に大きな影響を与えたと思われる。2つ目は、前震時も本震時も最大震度7という大きな揺れを観測したにも関わらず、本震時に集中して土砂移動現象が発生したことである。また本震時においても、震度や震源からの距離に必ずしも依存しておらず、阿蘇カルデラ周辺に集中して土砂移動が見られた。このことは、震度だけではない地震特性や、火山地域における特殊な地形・地質等が土砂移動の発生に影響を与えていた可能性があることを示唆している。

過去にも地震によって土砂移動現象が発生した事例はいくつかある。例えば、2008年岩手・宮城内陸地震では移動土砂が6700万 m^3 という大規模な地滑りが発生した。この地滑りは、特有な地質構造や1000 gal程度の大きな地震の加速度などが発生の要因だったと指摘されている⁹⁾。また、2011年東北地方太平洋沖地震では流動性の高い地滑りが発生したが、降下火砕物の存在や大きな地震加速度が要因であったと報告されている¹⁰⁾。そのほかにも、先行研究では、地震と土砂移動現象の関係性について、地形効果や周波数特性などに注目して説明されているものが多くある¹¹⁾⁻¹³⁾。熊本地震においては、土砂移動の発生場所やその形態、一部の現象については発生メカニズムの仮説を立てられているものもある。例えば南阿蘇村

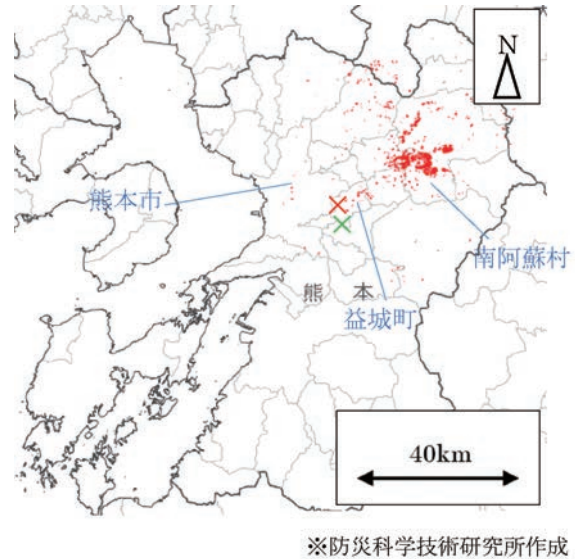


図2 土砂移動分布図

赤印は土砂移動発生個所を表している。

の京大火山研究所の地点においては、地震動により軽石層内部で剪断破壊が発生し、すべり面が液化化して見かけの摩擦角が著しく低下することによって、土砂移動が発生したと言及されている³⁾。この機構を考える上で、地震動の強度や継続時間とその分布、土質の流動化のしやすさなどの諸因子と、土砂移動の発生箇所との関係を理解することは重要であるが、そのような知見はまだ十分には得られていない。このことは、熊本地震においても、上記以外の場所で発生した土砂移動現象についても同様に言えることであり、詳細な発生原因をさらに議論する必要がある。

そこで、本研究では特に土砂移動現象が多く発生した、阿蘇カルデラ南西部の南阿蘇村付近を対象に、誘因となった地震の特性や素因となる土質特性を明らかにするため現地調査を行い、採取した土質試料を用いた室内実験及び分析を通じて、地震と土砂移動現象の関係を明らかにすることを試みた。本研究は今後発生しうる地震に対して、特に火山地域における土砂災害のリスクを評価するうえで有用なデータになるとと思われる。

2. 地震特性の解析とその結果

2-1. 使用データ

本地震では、2度の震度7を記録したが、土砂

移動現象が発生したのは、ほとんど本震時であったことから、両者を比較することでその発生条件を考察した。データは、気象庁（前震4点、本震7点）¹⁴⁾、地方公共団体（前震33点、本震57点）¹⁵⁾、防災科学技術研究所（前震35点、本震34点）¹⁶⁾の強震観測点で記録されたものを用いた。解析内容は、従来から土砂移動に影響を与えると報告されている地震動の最大加速度に加え、土の流動化に影響を与える揺れの継続時間とした。なお土砂移動判読図は、防災科学技術研究所によって作成されたものを用いた¹⁷⁾。解析対象範囲は土砂移動現象が特に多く発生していた図3中の赤枠の範囲とした。

2-2. 結果・考察

前震時、本震時の3次元合成最大加速度と土砂移動分布の重ね合わせ図をそれぞれ図4に示す。表示範囲は図3中の赤枠の南阿蘇村周辺を拡大したものである。等値線は加速度 (gal) を示している。また、赤印は土砂移動発生箇所を示す。なお、比較のため前震時の図中にも最終的に土砂移動が発生した箇所を示しているが、土砂移動が発生したのは本震時であり、前震時にはほとんど発生していない。また、中央火口丘北側 (N32.90 E131.10付近) で土砂移動が集中して発生している領域は、過去の豪雨時においても断続的に発

生している場所である。この領域は地形的に特に急な場所でもあり、土砂移動現象がより起きやすかった可能性が指摘できるため、地震特性に着目する上では除外して考察する。図4より当該地域では、前震時は最大加速度は大きくても450 gal程度であったのに対し、本震時は1200 galを超えている場所もあったことが分かった。また、比較的傾斜が急である中央火口丘や外輪山のうち、本震時の最大加速度が400 gal程度を境に一部で土砂移動が見られ、800 galを超えるあたりからはその発生数はさらに多くなっていることが分かる。次に、

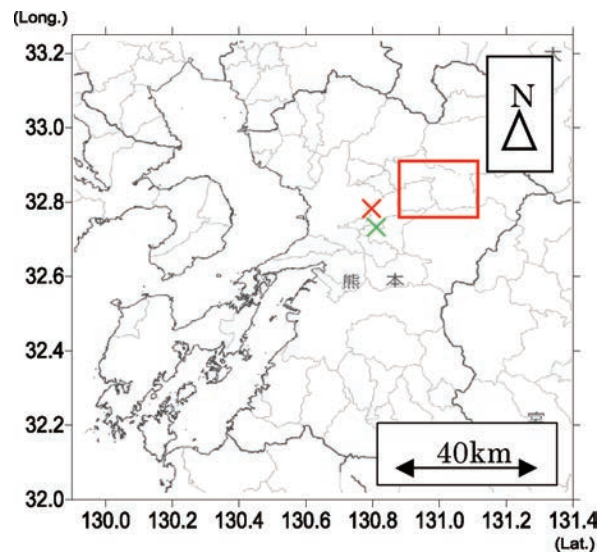
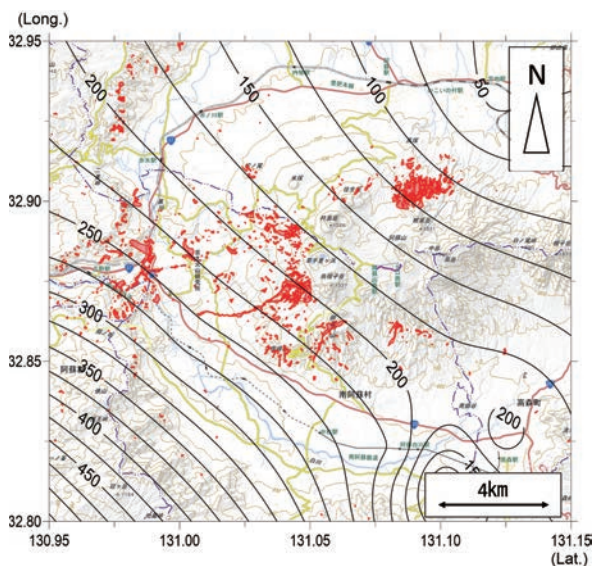
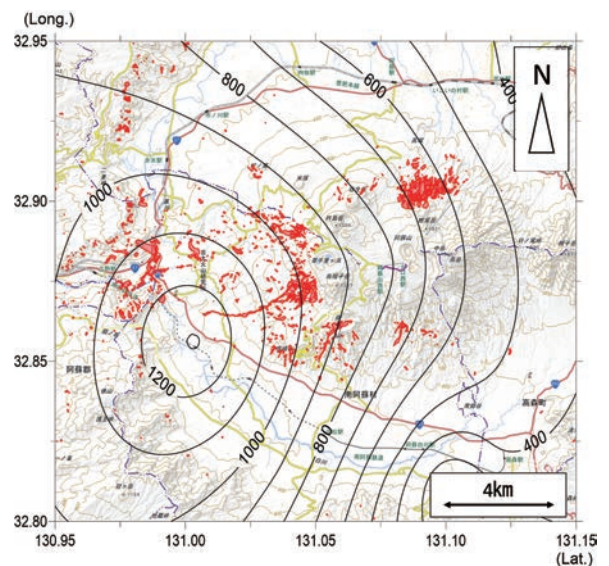


図3 震央と解析地域の位置関係図

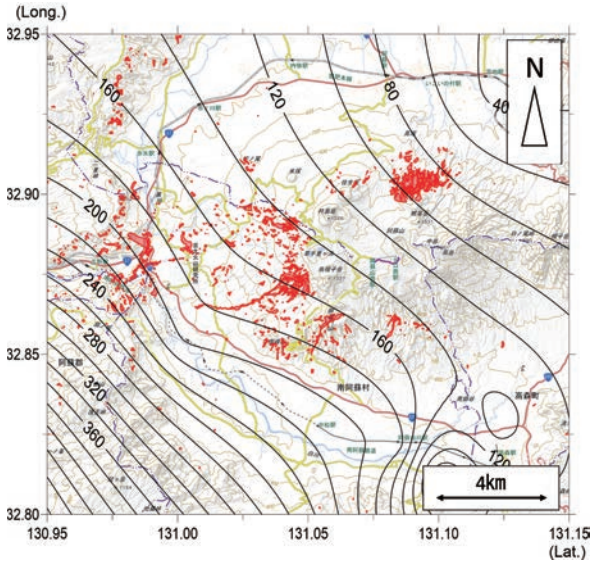


前震

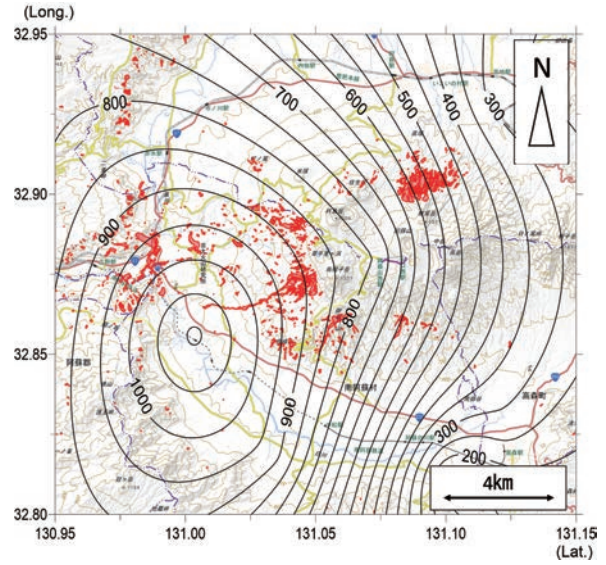


本震

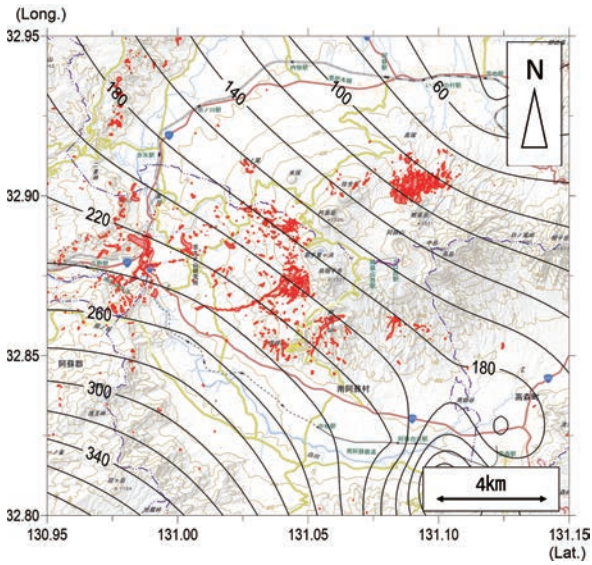
図4 3次元合成最大加速度 (gal) 分布と土砂移動分布の重ね合わせ図
(※ ベースの判読図は防災科学技術研究所による)



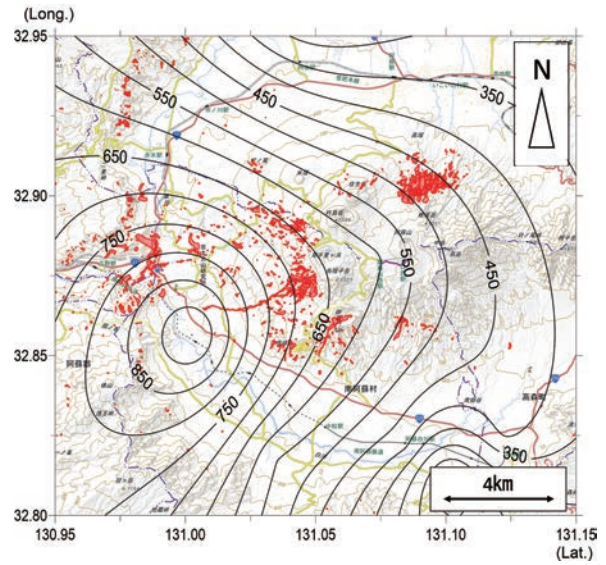
前震N-S



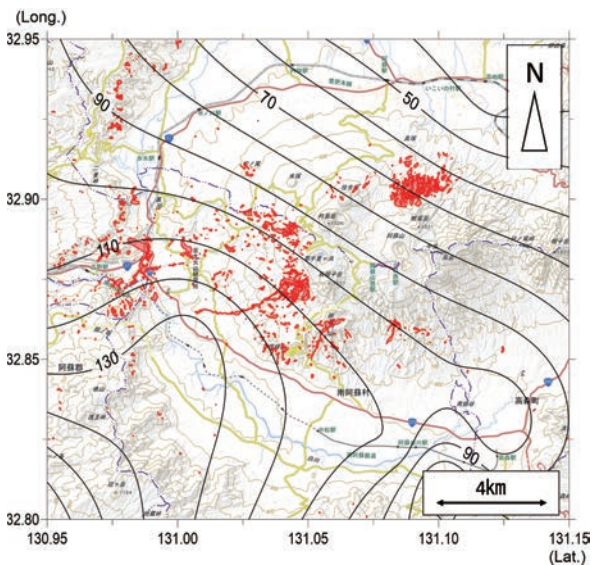
本震N-S



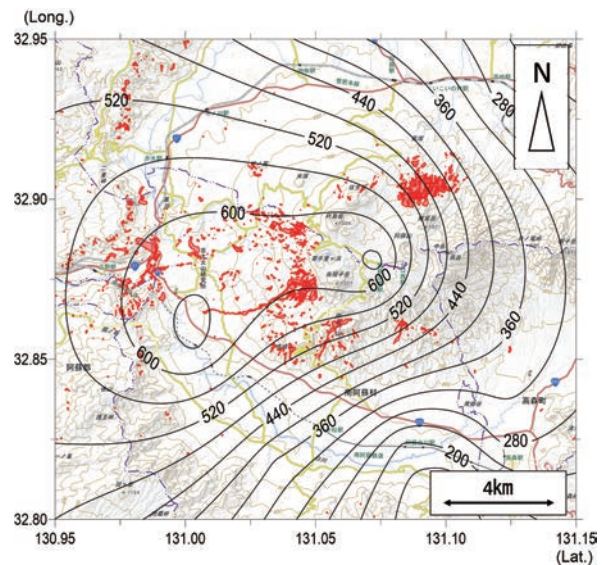
前震E-W



本震E-W



前震U-D



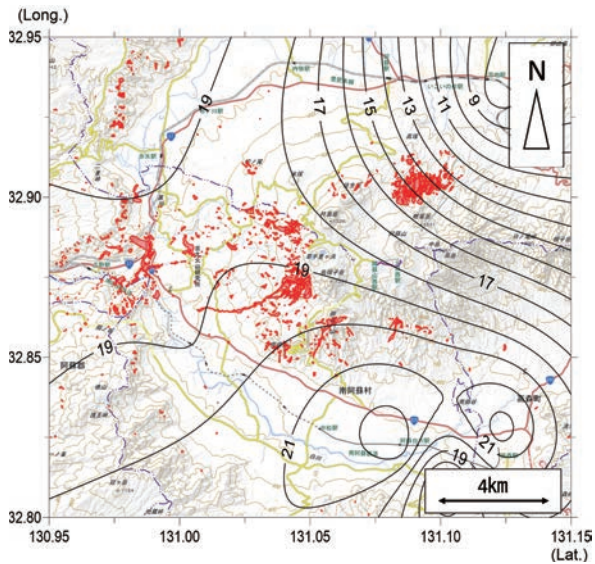
本震U-D

図5 N-S U-D E-W成分の最大加速度 (gal) 分布と土砂移動分布の重ね合わせ図
(※ ベースの判読図は防災科学技術研究所による)

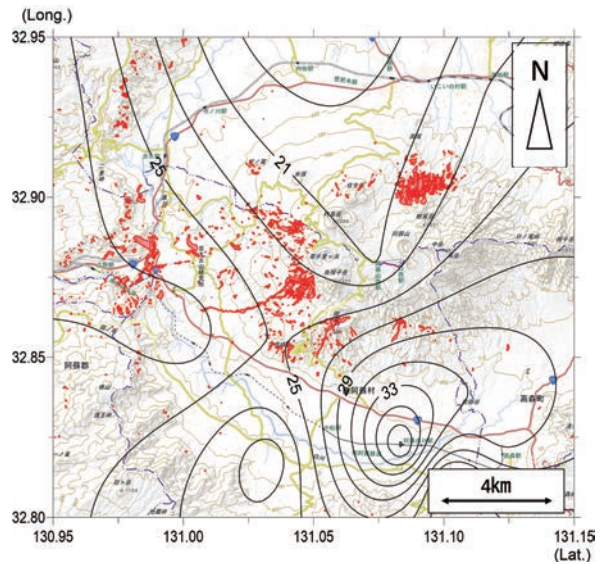
N-S、E-W、U-Dの各成分の最大加速度分布を図5に示す。この図から、本震時に水平動は1000 galを超えていた場所がある一方で、上下動はその半分程度であったことから水平方向に卓越する揺れだったことが分かる。最大震度は前震も本震も7であったが、本震時の方がいずれの成分においても格段に大きな加速度が観測されていた。

次に継続時間については、それぞれの条件における加速度の記録打点間が3秒以内であった場合に継続したとみなしている。例えば、30 gal以上の継続時間の場合、初めに30 gal以上の加速度を記録してから、次に30 gal以上を記録するまでの時間が2秒で、さらにその2秒後および6秒後

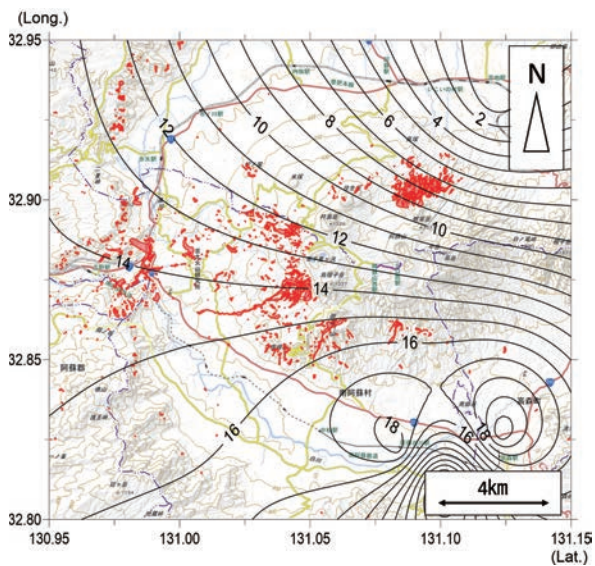
に観測されていたとする。この場合継続時間は $2 + 2 = 4$ 秒と判断している。3次元合成加速度において、前震時と本震時の30 gal、50 gal、100 gal、200 gal以上の加速度の継続時間の分布図を作成した(図6-1、図6-2)。本震時については400 gal以上の継続の分布図も作成した(図7)。図6-1、図6-2よりいずれの条件でも土砂移動が集中して発生した地域では本震時の方が長い継続時間であった。最終的に土砂移動が特に集中して発生した領域において30 gal以上という条件では、前震時18～21秒、本震時21～29秒、50 gal以上という条件では前震時12～16秒、本震時16～21秒、100 gal以上という条件では前震時7.5～11秒、本震



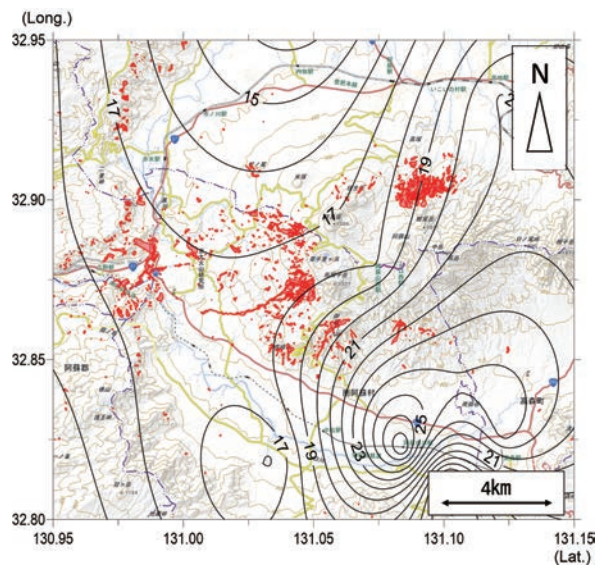
前震加速度30 gal



本震加速度30 gal



前震加速度50 gal



本震加速度50 gal

図6-1 各加速度 (gal) 以上の継続時間 (秒) の分布と土砂移動分布の重ね合わせ図
(※ ベースの判読図は防災科学技術研究所による)

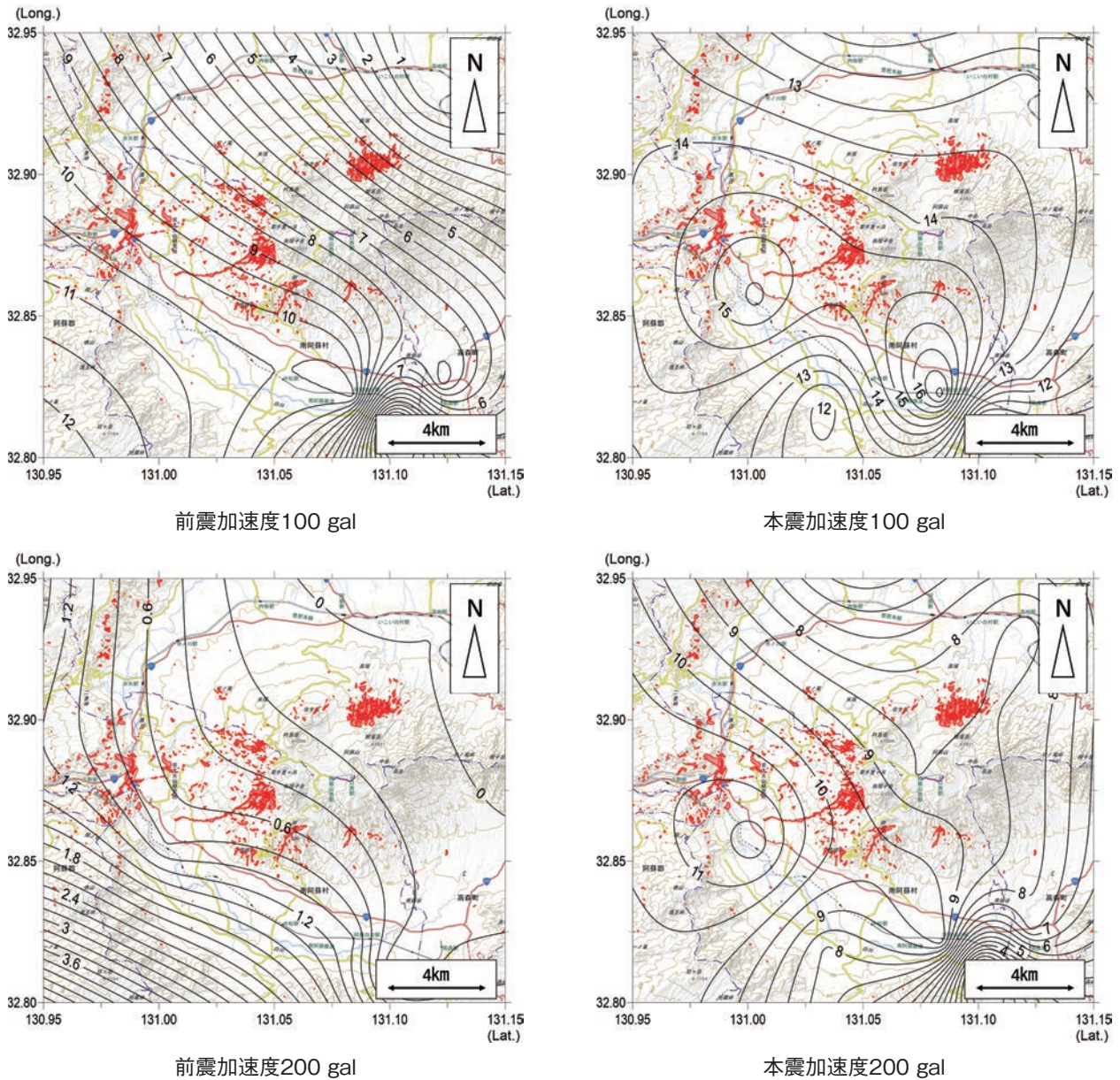


図6-2 各加速度 (gal) 以上の継続時間 (秒) の分布と土砂移動分布の重ね合わせ図
 (※ ベースの判読図は防災科学技術研究所による)

時14～15.5秒、200 gal以上という条件では、前震時0.3～1.2秒、本震時9～11.5秒、400 gal以上だと本震時に5～7.5秒という結果になった。30 gal、50 gal、100 gal以上という条件では前震時も比較的長い時間揺れているが、200 gal以上の継続時間という条件では前震時は長くても1秒程度であり、本震時との差がより顕著に表れている。さらに、本震時の継続時間分布の外形に着目すると、100 gal、200 gal、400 gal以上という条件においては、土砂移動の発生がより明瞭に見られる場所付近で相対的に継続時間も長くなっている。以

上のことより100～200 galを超えるような比較的大きな加速度が10秒程度継続することが土砂移動の発生に重要な影響を与えていた可能性があると考えられる。

3. 現地調査

2017年11月14～17日、21～23日、2018年3月14～17日の3回に渡って南阿蘇村の京大火山研究所、火の鳥温泉周辺、山王谷川砂防堰堤付近を中心に調査を行った(図8)。

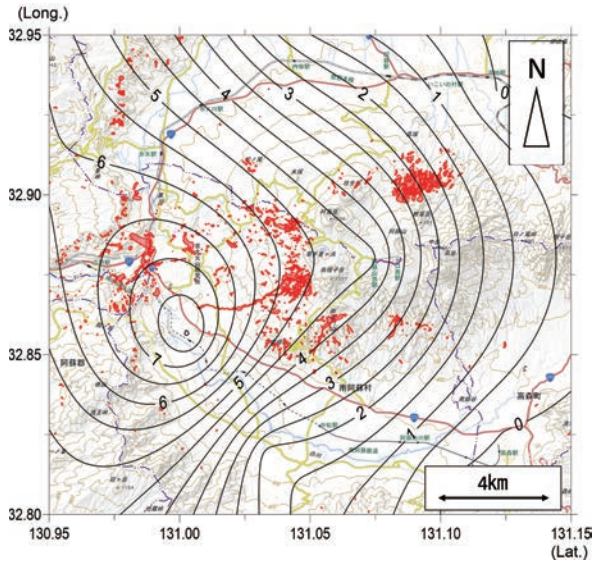


図7 本震時加速度400 gal以上の継続時間(秒)の分布と土砂移動分布の重ね合わせ図
(※ ベースの判読図は防災科学技術研究所による)

京大火山研究所では、オレンジ色の草千里ヶ浜軽石層が分布しており、近くで観察すると軽石層とその下位の黒灰色層の間に厚さ数mm程度の白色の層が存在していることが確認できた(写真1)。これまでの報告では地震動により軽石層が流動化し、黒灰色層との境界をすべり面として地滑りが発生したと説明されている。また、白色の物質については地震前には存在せず、地滑り時に軽石層が擦れて生成されたとの報告もある³⁾。しかし、筆者らの調査では一部の箇所では白色の層の流動化が疑われるような痕跡も認められた(写真2)。そのため、この物質は地震前からもと存在していたものであり、地震動によってこの層でも流

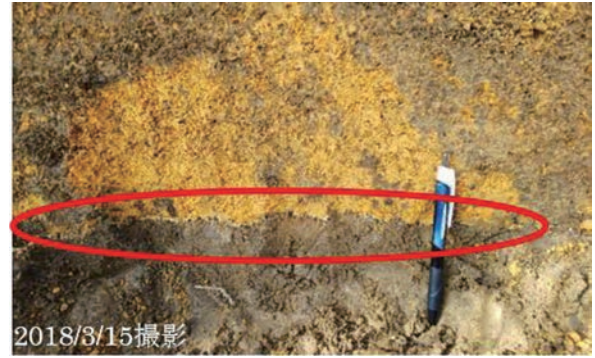


写真1 火山研究所での軽石層と黒灰色層の間に存在する白色層

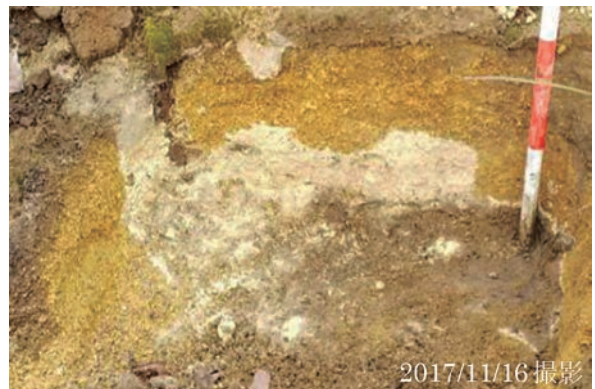


写真2 火山研究所で見られた白色物質層の液状化が疑われる痕跡

動化が発生した可能性があると考えている。

火の鳥温泉周辺では、主に3つの土砂移動現象が発生した。図8中の火の鳥温泉周辺の土砂移動のうち最も南側で発生した地すべりの頭部では、京大火山研究所で見られた写真1のようなオレンジ色-白色-黒灰色の層構造も確認できたが(写



図8 調査地域
(※ ベースの判読図は防災科学技術研究所による)

真3)、ここではこの面よりも数メートル下位の層ですべりが発生していたため、オレンジ色の下位の白色層はすべり面にはなっていない。このことから写真2中に存在した白色物質は地震以前から存在していたものであると断定できる。なお、この層がすべり面にならなかったのは、層の存在箇所が一部の小高い部分に限定されており、含水状態があまり高くなかったからだと推測できる。また、周辺での土砂移動現象のうち2か所では写真4で示すような粘土質の白色物質の存在を確認できた。写真4は、3つの土砂移動のうち中央に位置する小規模な地滑りの移動土塊中に見られたものを撮影している。この物質は写真2の層構造よりも下位に存在するものであったが、手のひらで振動を与えるとすぐに流動化する性質を持っていた。そのためこの層で地震動により流動化が起き、崩壊や地滑り的な現象の発生に影響を与えた可能性が示唆される。なお写真3と写真

4は撮影日時が異なるが、撮影場所はすぐ近くであり、大きな状況の変化は見られなかった。

山王谷川砂防堰堤のすぐ上流の右岸側では、山腹崩壊が発生しており、左岸側では地すべりが発生していることを確認できた(写真5)。右岸側での崩壊地では、表層の崩壊土砂を取り除くと崩壊面に沿って白色物質が存在することが確認できた。この物質は火の鳥温泉周辺と同じように外力を与えることによって容易に流動化する性質を持っていた。写真6は右岸側の崩壊地の中腹に存在した上記の物質を撮影したものである。火の鳥温泉周辺で見られた白色物質よりはやや変色していたが、火の鳥温泉周辺の白色物質においても、試料のサンプリング後、時間の経過とともに変色し同じような色になったため、この崩壊地の物質も変色していたのだと思われる。また、左岸側での地すべりにおいては、白色物質の存在は確認されず、摩擦係数の小さい黒灰色層がすべり面に



写真3 図8中の火の鳥温泉付近の最南部で発生した地滑りの頭部



写真4 図8中の火の鳥温泉付近中央で発生した崩壊土砂中に存在した白色粘土



写真5 山王谷川砂防堰堤付近の左岸側地すべり



写真6 山王谷川砂防堰堤右岸側付近の崩壊地で見られた白色に近い粘土

なっていた可能性が高いと思われる。この地滑りは、写真5からも分かるように樹木の倒れ方が規則的であり、斜面上部では上向きに倒れ、下部では下向きに倒れていることが確認できた。このような規則性は地盤強度が比較的高い場所で見られるため、左岸側で発生した地すべりは他の場所で発生したような流動性の高い現象ではなかったと推定できる。

ここで、各地で見られた白色物質について、火山研究所に存在していたものは、一部砂質土を含んでいたが、粘土を主成分としており、火の鳥温泉周辺と山王谷川で見られた白色物質は共にほぼ粘土質のものであった。一般的には砂質土において流動化が発生すると考えられているが、本地震では多くの場所において、白色粘土層が振動によって容易に支持力を失う鋭敏粘土としての振る舞い¹⁸⁾をしたことが、土砂移動の発生に影響を与えたと思われる。

4. 土質試験とその結果

4-1. 方法

地盤工学会によって出版された「土質試験基本と手引き 第二改訂版」¹⁸⁾を参考に試験を行った。試験内容は、土の物理的性質を表す含水比試験、土粒子密度試験、液性限界・塑性限界試験とした。

液性限界とは、土が塑性状から液状に移る時の境界の含水比をいい、塑性限界とは、土が塑性状から半固体状に移る時の境界の含水比をいう。ここで、土の流動化のしやすさを評価する指標として、水の滲出性に注目した解釈がある²⁰⁾。それによると、滲出水が多いほど繰り返し荷重により急激に強度が低下し、流動化しやすい可能性があると考えられている。本研究ではコンシステンシー指数 $I_c = (W_L - W_n) / (W_L - W_p)$ (ただし、 W_L :液性限界 (%), W_n :自然含水比 (%), W_p :塑性限界 (%)) を求めることで流動性を評価した。 I_c は W_n が W_p に近ければ1に近く強度は高い。 W_n が W_L に近い場合は、 I_c は小さくなり液状の不安定な状態を示す。よって、 I_c の値が小さいものほど流動化しやすい物質であると解釈した。

4-2. 結果・考察

表1は試験結果の一例を示している。なお、比較のために、2011年東北地方太平洋沖地震のときに発生した葉ノ木平地すべりのすべり面物質の物性値を合わせて示している²¹⁾。表より天然の状態での自然含水比は黒ボクを筆頭に高く、火山研究所、火の鳥温泉付近、山王谷川で見られた白色物質はそれよりは低い値となった。ただし、コンシステンシー指数に着目すると、各地で見られた白色物質は、自然含水比が液性限界に近いが、それ

表1 土質試験結果

	黒ボク土層 (火山研)	橙色軽石層 (火山研)	白色物質層 (火山研)	埋没褐色土層 (火山研)	黒ボク土層 (山王谷)	黒灰色土層 (山王谷)
自然含水比 (w_n)	163.80	127.69	114.12	121.27	141.73	151.22
土粒子密度 (g/cm^3)	2.39	2.61	2.59	2.75	2.53	2.78
液性限界 (w_L)	200.90	150.0	113.0	136.1	167.50	175.30
塑性限界 (w_p)	137.92	78.40	69.88	66.18	90.80	113.70
コンシステンシー指数 (I_c)	0.59	0.31	-0.03	0.21	0.34	0.39

白色物質層 (山王谷)	黒ボク土層 (火の鳥)	橙色軽石層 (火の鳥)	白色物質層 (火の鳥)	葉ノ木平
66.08	121.95	124.25	93.21	88.60
2.55	2.70	2.53	2.55	2.67
68.20	146.8	154.90	81.7	97.00
38.39	82.80	79.01	49.96	50.00
0.07	0.39	0.40	-0.36	0.18

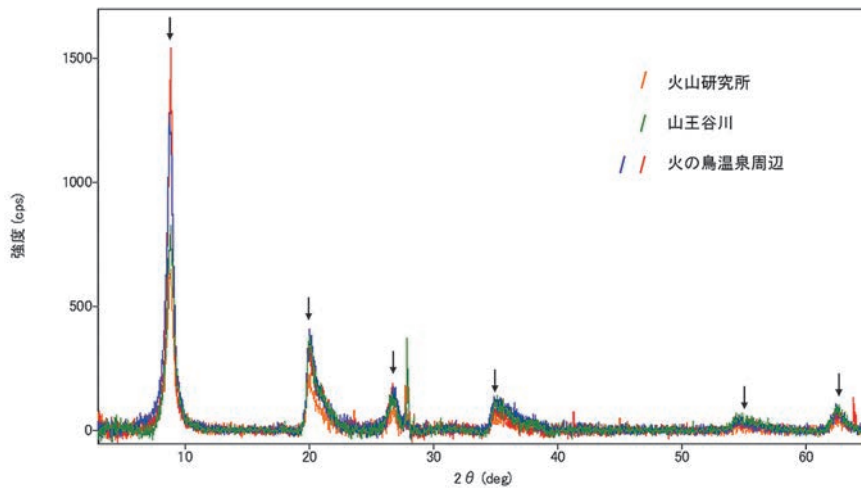


図9 白色物質のX線回折結果
矢印はハロイサイトのピーク位置を示している

を上回っていたことから、非常に小さい値となっており、現地では不安定な状態であったと考えられる。また、いずれの白色物質も葉ノ木平地すべりのすべり面物質よりも低い値となった。この結果より、やはり地震動によって白色物質の層で流動化に近い状況が発生した可能性が高いと思われる。ただし、オレンジ色の軽石層に関しては、粒径が大きいものを多く含み空隙も大きく、自然含水比も高かったため、砂地盤でよく見られる流動化に近い現象をこの層が起こした可能性も否定はできない。

次に、X線回折試験によりそれぞれの物質に含まれている鉱物を調べた。図9において、表1中の京大火山研究所で採取した白色物質（オレンジ線）、山王谷川で採取した白色物質（緑線）、火の鳥温泉周辺の最南部で発生した地すべり地で採取した白色物質（赤線）と、表1にはないが、火の鳥温泉の中央で発生した地すべり地の白色物質（青線）の試験結果をまとめている。図より、各地で見られた白色の物質は全て同様のピークを持っていることが分かった。このピークは粘土鉱物のハロイサイトのものと同様であった。さらに、電子顕微鏡によってハロイサイトの特徴である円柱状や球状の構造をもった鉱物を確認することが出来た（写真7）。

よって白色の物質は粘土鉱物であるハロイサイトに富んでいたと断定できる。なお、黒ボク

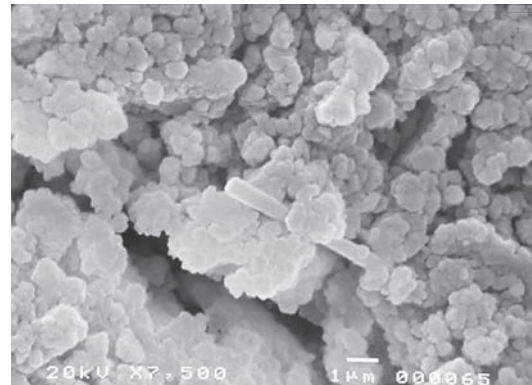


写真7 火山研究所において採取した白色物質の電子顕微鏡写真

や草千里ヶ浜軽石層にはX線回折で同様のピークは確認されなかった。また、ハロイサイトは、例えば2011年東北地方太平洋沖地震の時に発生した葉ノ木平地滑りでも確認されている粘土鉱物である¹⁰⁾。今回の熊本地震においても地震動を受けて流動化するような現象につながった可能性がある。流動化のメカニズムは、ハロイサイトの粒子間に保持されていた水が、地震動による圧縮力や剪断力を受け押し出され、間隙水圧が高まり、支持力を失うという過程であったと考えられる。

5. まとめ

熊本地震によって発生した土砂移動現象について、地震特性と土質特性の視点からアプローチし

た結果以下のようなことが明らかになった。

- 1) 土砂移動現象が多発した本震時は、前震時に比べ、N-S、E-W、U-Dいずれの成分も格段に大きな加速度を記録していた。3成分合成最大加速度においては800 galを超えるあたりでその発生数は特に多くなっていた。
- 2) 揺れの継続時間に注目すると、30 gal、50 gal、100 gal以上という条件においては、前震時にも比較的長い時間の揺れが広範囲に起きていた。一方、200 galを超えるような加速度は前震時には長くて1秒程度であったのに対し、本震時は10秒前後継続しており、その差がより顕著に表れていた。そのため、200 galを超えるような大きな加速度の継続が土砂移動現象の発生に大きな影響を与えていた可能性が高い。
- 3) 現地調査を行った地点ではいずれも、粘土鉱物であるハロイサイトを含む白色の物質が存在していた。この物質は実験の結果、熊本地震当時、不安定で流動化しやすい状態であった可能性があることがコンシステンシー指数を使って定量的に示された。その不安定な層に上記のような一定条件以上の地震動が加わったときに、この白色物質の層が流動化し、流動性の高い土砂移動につながったと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省河川砂防技術開発公募の砂防技術分野（平成29～31年度）「大規模地震とそれに伴う地盤の劣化に起因する連鎖複合型土砂災害の発生機構と対策」（研究代表者：丸谷知己北海道大学大学院特任教授）から支援を受けて行うことができました。

また、本研究を進めるにあたり、独立行政法人防災科学技術研究所、気象庁、地方公共団体から地震データや、土砂移動の情報を使わせていただきました。実験や現地調査には多くの方々に協力をさせていただきました。査読者様のご指摘、アドバイスは大変参考になりました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 気象庁,平成28年(2016年)熊本地震の関連情報,
http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html
- 2) 消防庁,熊本県熊本地方を震源とする地震(第114報),
<http://www.fdma.go.jp/bn/4dcd38fac5307f09c2f45e0016c29a56c35a0501.pdf>
- 3) 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: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,2016.
- 4) 防災科学技術研究所:土砂災害予測に関する研究集会-熊本地震とその周辺-プロシーディング,防災科学技術研究所研究資料, No.411, pp.74-93, 2017.
- 5) 熊本県土木部砂防課:平成28年熊本地震概要, 2016.
- 6) 石川芳治,久保田哲也ほか:平成28年熊本地震による土砂災害,砂防学会誌, Vol.69, No.3, pp.55-66, 2016.
- 7) 石川芳治,赤澤史顕ほか: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, pp.25-36, 2016.
- 8) 国土交通省,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
- 9) 原義文,田村圭司ほか:平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による土砂災害に関する報告,土木研究所報告(215), 1-37, 2010-03.
- 10) 千木良雅弘,中野真帆:2011年東北地方太平洋沖地震などの地震による降下火砕物の崩壊,第62回平成25年度砂防学会研究発表会概要集, T1-06, 2013.
- 11) 川邊洋,林拙郎,近藤観慈,沼本晋也:1999年台湾集集地震による草嶺の大規模崩壊とその発生要因,砂防学会誌, Vol.56, No.4, pp.32-39, 2003.
- 12) 浅野志穂,落合博貴,黒川潮,岡田康彦:山地における地震動の地形効果と斜面崩壊への影響,日本地すべり学会誌 Vol.42, No.6, pp.457-466, 2006.
- 13) 川邊洋:斜面表層の振動特性と不安定化,日本地すべり学会誌, Vol.42, No.2, pp.112-114, 2005.
- 14) 気象庁,強震波形,
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/index.html, 2018.05.25

- 15) 気象庁, 地方公共団体震度計の波形データ, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/index2.html, 2018.0525 <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>, 2018.0525
- 16) 防災科学技術研究所, 地震選択 & ダウンロード, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>, 2018.0525
- 17) 防砂科学技術研究所, 熊本地震による土砂移動分布図, <http://map03.ecomplat.jp/map/map/?cid=20&gid=587&mid=2908>, 2018.0525
- 18) Denys Brunsten・David B.Prior: Slope Instability, p457-460, 1984.
- 19) 社団法人地盤工学会: 土質試験基本と手引き 第二回改訂版, pp.17-26, pp.39-44, 2010
- 20) 中濃耕司, 海堀正博: 本震直後の土砂移動の特徴と要因把握のための簡易試験について, 第66回平成29年度砂防学会研究発表会概要集 T1-10, 2017.
- 21) 飛田哲男, 河原尚徳, 千木良雅弘: 崩壊性地すべりのすべり面に見られる粘性土の力学特性, 京都大学防災研究所平成27年度発表会