

2016年4月の熊本地震によって発生した 特異な土砂移動現象についての考察

CONSIDERATION ABOUT DISTINCTIVE LANDSLIDES INDUCED BY THE
KUMAMOTO-EARTHQUAKE IN APRIL, 2016

谷本進¹・海堀正博²・高田晃生³

Shin Tanimoto, Masahiro Kaibori and Kousei Takada

¹広島大学大学院総合科学研究科（〒739-8521 東広島市鏡山1-7-1）

E-mail: m172875@hiroshima-u.ac.jp

²広島大学大学院総合科学研究科（〒739-8521 東広島市鏡山1-7-1）

E-mail:kaibori@hiroshima-u.ac.jp

³日本工営株式会社（〒812-0007 福岡市博多区東比恵1-2-12）

E-mail:a8612@n-koei.co.jp

Key Words: Kumamoto-earthquake, distinctive landslide, sensitive clay, Halloysite, consistency

1. はじめに

2016年4月に熊本県を中心に断続的に地震が発生し、一連の活動の中で最大震度7の揺れが2度観測された¹⁾。この強い揺れに伴って、特に4月16日の本震の際には、建物の倒壊や様々な形態の土砂移動現象による被害が多数発生した^{2)~6)}。過去にも2008年岩手・宮城内陸地震では移動土塊が約6700万m³という大規模な地滑りが⁷⁾、2011年東北地方太平洋沖地震では流動性の高い地滑りなど特異な土砂移動の起きていることが報告されている⁸⁾。

先行研究では、地震と土砂移動現象の関係について、最大加速度、地形効果、周波数特性などに注目して説明されているものが多い^{9)~11)}。熊本地震においても、どのような現象が発生したのかについての報告はあるが、それぞれの現象の発生メカニズムについては十分には説明できていないと思われる。

そこで本研究では土砂災害の影響が大きかった阿蘇地方を対象に、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およ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。

2. 地震特性の解析とその結果

気象庁（前震4点、本震7点）¹²⁾、地方公共団体（前震33点、本震57点）¹³⁾、防災科学技術研究所（前震35点、本震34点）¹⁴⁾の観測点で記録されたデータをもとに最大加速度や、一定加速度以上の継続時間の分布を土砂移動発生個所と重ね合わせることでその関係を評価することにした。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¹⁵⁾。解析対象範囲は特に土砂移動現象が特に多く発生していた図-1中の赤枠の範囲とした。なお、図中の星印は本震央を表している。

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の一例を図-2に示す。表示範囲は図-1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、100gal間隔で引いている。また、赤印は土砂移動発生個所を示す。この図から比較的傾斜が急である中央火口丘や外輪山のうち、最大加速度が400gal程度を境に一部で土砂移動が見られ、800gal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。前震時は、この周辺では大きくても300gal程度であり土砂移動はほとんど発生しなかった。

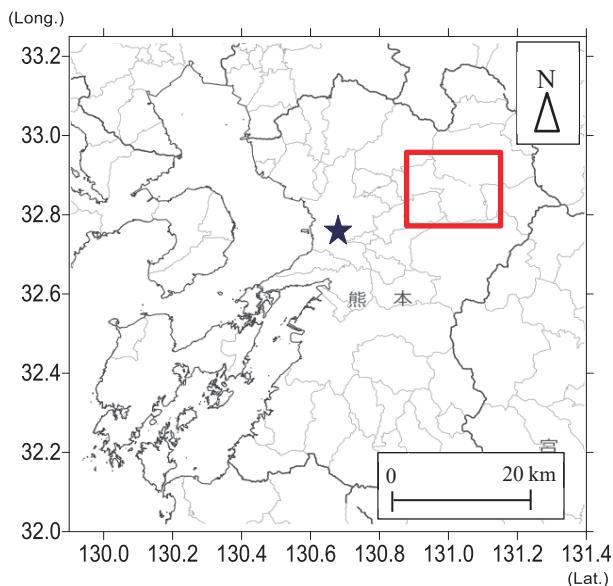


図-1 本震央と解析地域の位置関係図

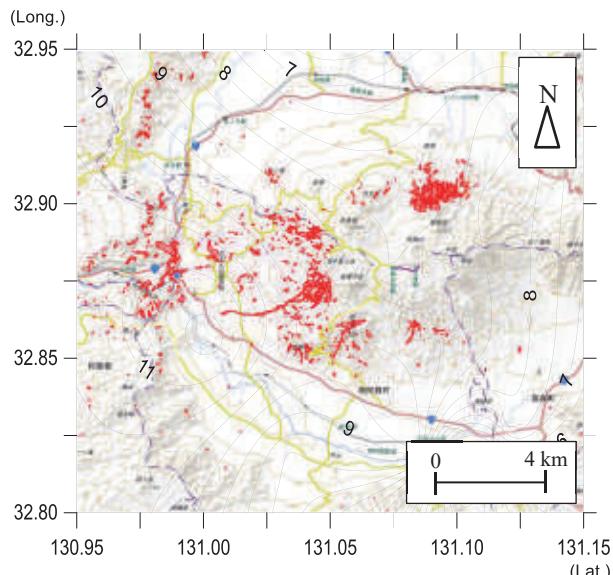


図-3 本震時 200gal 以上の継続時間(秒)分布と土砂移動現象の発生位置との重ね合わせ図

次に、土砂移動が多く発生した中央火口丘西部から立野地区付近の領域において記録された、N-S, E-W, U-D の各成分も含めた最大加速度の値をまとめたものを表-1 に示す。この表から、水平動は 1000gal 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。

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

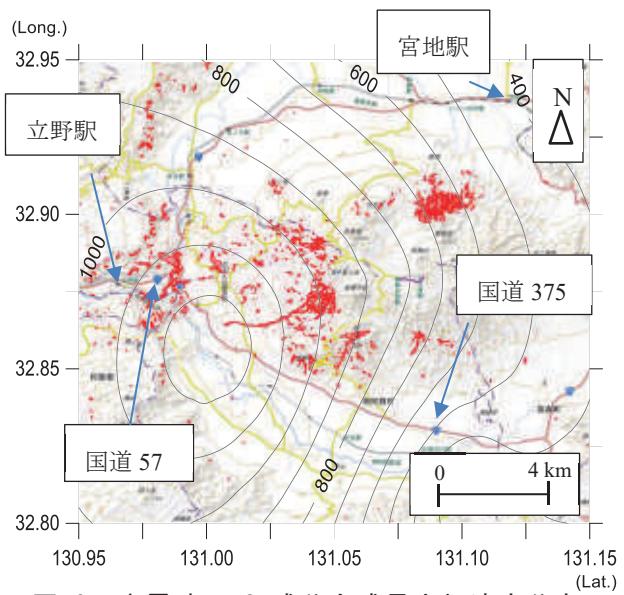


図-2 本震時の 3 成分合成最大加速度分布(gal)と土砂移動現象の発生位置との重ね合わせ図

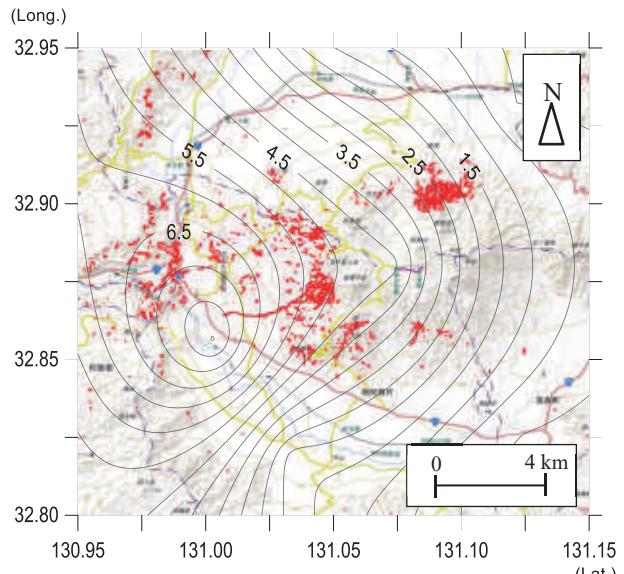


図-4 本震時 400gal 以上の継続時間(秒)分布と土砂移動現象の発生位置との重ね合わせ図

表-1 最大加速度まとめ

	前震	本震
3成分合成	170～300gal	800～1200gal
NS	130～260	800～1050
EW	160～260	600～900
UD	90～130	480～640

表-2 継続時間まとめ

	前震	本震
400gal以上	—	5～7.5秒
200gal以上	0.3～1.2	9～11.5
100gal以上	7.5～11	14～15.5
50gal以上	12～16	16～21
30gal以上	18～21	21～29

たとみなしている。本震時の 200gal, 400gal 以上の継続時間分布と土砂移動発生位置の重ね合わせの一例を図-3, 図-4 で示す。図-3 より 200gal 以上の継続時間が 9 秒を超えるあたりからより多くの土砂移動が発生している。また、図-4 より 400gal 以上の継続時間については、5 秒を境に発生数に大きな違いが見られた。その他の加速度の継続時間も含めて、土砂移動が多く発生した領域で記録された値を表-2 にまとめている。30gal, 50gal, 100gal 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、200gal 以上の継続時間という条件では前震時は長くとも 1 秒程度であり、本震時との差がより顕著に表れている。前震時はほとんど土砂移動現象が発生していないことを考慮すると、200gal 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。なお、中央火口丘北側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。

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・南阿蘇リゾート、山王谷川砂防堰堤付近を中心に調査を行った(図-5)。

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、近くで見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²⁾。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動化が発生した可能性があると考えている。

火の鳥温泉・南阿蘇リゾートでは、主に 3 つの土砂移動現象が発生した図-5 中の火の鳥温泉付近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



図-5 調査地域

(写真-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かった。このことからも写真-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つたのは、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、撮影場所には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。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た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いた。写真-5 は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、この崩壊地の粘土物質も変色していたのだと思われる。なお、火山研究所での白色物質は一部砂質土を含んでいたが、粘土を主成分としており、火の鳥温泉付近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。そのため、



2018/3/15 撮影

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



2017/11/16 撮影

写真-2 火山研究所で見られた白色物質層の液化が疑われる痕跡



2018/3/15 撮影

写真-3 南阿蘇リゾートを襲った地滑りの頭部



2017/11/14 撮影

写真-4 南阿蘇リゾート背面の斜面崩壊土砂中に存在した白色粘土



2018/3/15撮影

写真-5 山王谷川砂防堰堤付近の崩壊地で見られた白色に近い粘土

いずれも一般的な流動化ではなく鋭敏粘土としての振る舞い¹⁶⁾をしたものと思われる。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なっていた可能性が高いと思われる。

4. 土質試験とその結果

土の流動化しやすさを評価する上で、水の滲出性

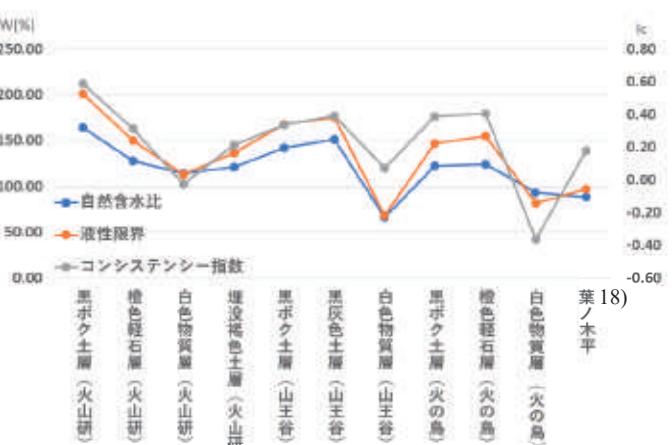


図-6 コンシステンシー試験結果

に注目した解釈もある¹⁷⁾。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されている。本研究では現地調査でサンプリングした試料について、420 μmのふるいで裏ごしを行ったものに対して、コンシステンシー試験を行った。その結果を図-6で示している。図中の左の縦軸は自然含水比と液性限界の含水比を示し、右の縦軸はコンシステンシー指数の値

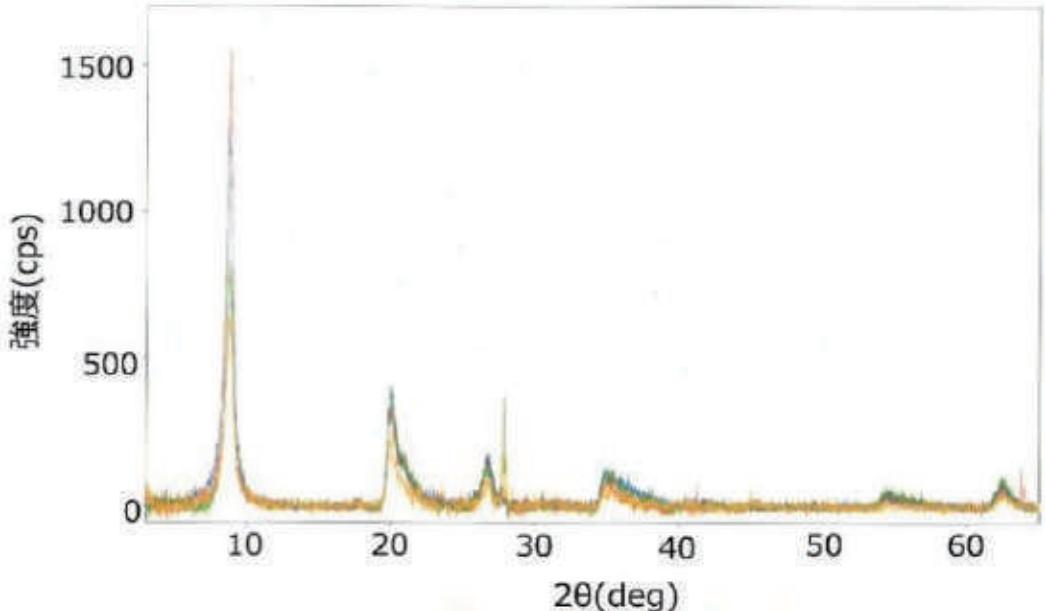


図-7 X線回折結果

を示している。また、物質層名のカッコ内はサンプリング場所を記載している。図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 $I_c = (W_L - W_n) / (W_L - W_p)$ （ただし、 W_L : 液性限界（%）、 W_n : 自然含水比（%）、 W_p : 塑性限界（%）である）を求めてみると、各地で見られた白色物質のコンシステンシー指数 I_c は、自然含水比が液性限界に近いか、それ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-7）。オレンジ色の線は火山センター、緑色は山王谷川、青色と赤色は南阿蘇リゾート付近で採取したサンプルの試験結果を示している。その結果、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であると同定できた。なお、黒ボクや草千里ヶ浜軽石層には同様のピークは確認されなかった。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⁸⁾。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。

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 成分合成だと 800gal 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、30gal, 50gal, 100gal 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、200gal 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、200gal 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。

6. 今後の課題

熊本地震においては、様々なタイプの土砂移動現象が見られたが、タイプごとにそれぞれの現象がどのような条件の時に発生したのかを明らかにするには至っていない。特に、山王谷川で発生したゆっくりとした土砂移動については特異な現象であり、今後、流域の地形や土砂の粘性などに注目し、発生メカニズムを明らかにする必要がある。

また、土質特性についてはコンシスティンシー試験による流動化のしやすさでしか評価していないため、今後は剪断試験等を行うことで、強度や粘着力を求めていくことが必要であると考えている。

さらに、現地調査を行った3地点ではハロイサイトに富む白色物質の層が流動的な現象に影響を与えていたと考えたが、他の場所については分からぬ。そのため、今後は、白色物質の分布範囲を調べることで土砂移動発生個所との関係を明らかにしていきたい。

参考文献

- 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) 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.
- 3) 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.
- 4) 熊本県土木部砂防課 : 平成 28 年熊本地震概要, 2016.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 川邊洋, 林拙郎, 近藤觀慈, 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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
- 13) 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, 2018.05.25
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>, 2018.05.25
- 14) 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/>, 2018.05.25
- 15) 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>, 2018.05.25
- 16) Denys Brunsden • David B.Prior: Slope Instability, p457-460, 1984.
- 17) 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.
- 18) 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 年度研究発表会

(2018. 5. 18 受付)