

多数の短期・長期降雨指標を用いた平成28年熊本 地震後の土砂移動現象発生時の降雨規模評価

EVALUATION OF RAINFALL SCALE TRIGGERING SEDIMENT MOVEMENTS AFTER THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE USING MULTIPLE SHORT- AND LONG-TERM RAINFALL INDICES

松永 一慶¹・桂 真也²
Ikkei MATSUNAGA, Shin'ya KATSURA

¹北海道大学大学院農学院 (〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目) E-mail: ikkei404@eis.hokudai.ac.jp

²北海道大学大学院農学研究院 (〒060-8589 北海道札幌市北区北9条西9丁目)

Key Words: the 2016 Kumamoto earthquake, critical rainfall for warning and evacuation, rainfall after an earthquake, reduction ratio

1. はじめに

大規模な地震が発生すると、地震前よりも小規模な降雨で斜面崩壊や土石流等の土砂移動現象が発生することが知られている^{1,2)}。大規模地震後にこうした土砂移動現象を発生させた降雨の規模を評価することは、地震後の警戒避難基準を検討する上で非常に重要である。そこで、平成7年(1995年)兵庫県南部地震後の神戸市灘区鶴甲地区に着目した研究¹⁾や、平成28年(2016年)熊本地震後の南阿蘇村立野・新所地区に着目した解析²⁾等がこれまで行われてきた。しかしこれらの既往研究は、限られた範囲を対象とした局所的な分析にとどまっている。一方、より広域を対象に、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の土砂災害警戒情報の発表手順に基づく分析³⁾も行われているが、ここで用いられる時間雨量と土壌雨量指数は、ある広がりを持つ地域を対象として土砂災害の発生平均的な傾向を捉えるために定められた目安の指標であるため、これらの指標のみで検討を行うのは不十分である。今後も頻発が予想される大規模地震に対し、地震後降雨による土砂移動現象に対する適切な警戒避難基準を検討するためには、広域かつ多数の降雨指標(降雨規模の定量的な評価手法)を用いた分析が必要と考える。

以上を背景に、渡邊ら⁴⁾は、熊本県阿蘇地域における多数の解析雨量メッシュを対象に、熊本地震前後で降雨

による土砂移動現象発生時の時間雨量、実効雨量など多数の降雨指標値を比較し、地震後は地震前よりも降雨指標値が小さい降雨イベントで土砂移動現象が発生したことを示した。しかし、渡邊ら⁴⁾は降雨指標ごとの分析にとどまっている。土砂災害警戒情報が時間雨量と土壌雨量指数の組み合わせを用いて発表されていることから分かるように、土砂移動現象は短期間の降雨と長期間の降雨の両方の影響を受けて発生するものであり、短期・長期降雨指標の組み合わせに基づいて地震後の土砂移動現象発生時の降雨規模を評価するのが望ましいといえる。

そこで本研究では、熊本地震の影響を受けた阿蘇地域の複数の解析雨量メッシュを対象として、地震前後の降雨による土砂移動現象の発生状況を整理した。そして、土砂災害警戒情報の発表手順に倣って、解析雨量から求められる多数の短期・長期降雨指標の組み合わせごとに、地震前の発表基準線(CL)をメッシュごとに設定した。そのうえで、地震後の土砂移動現象発生時のスネークラインがCLを超過するようにCLを引き下げた場合の引き下げ率により、地震後の土砂移動現象発生時の降雨規模を評価した。

2. 研究方法

(1) 対象範囲, 対象イベントの整理

研究対象地は熊本地震により強い揺れに見舞われた熊

本県阿蘇地域である。熊本地震は、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、最大震度7（熊本県益城町）の前震、16日にM=7.3、最大震度7（熊本県益城町、西原村）の本震が発生した⁹⁾。分析に用いる解析雨量のデータが存在する昭和63年（1988年）4月1日～平成30年（2018年）12月31日に阿蘇地域で発生した降雨による土砂移動現象を、多数の文献資料をもとに整理した。そのうえで、土砂災害警戒情報が対象とする現象が「土石流」および「集中的に発生するがけ崩れ」である⁹⁾ことを考慮し、解析雨量5kmメッシュ内で1つ以上の土石流または30箇所以上のがけ崩れ・斜面崩壊が熊本地震前後で発生したメッシュを抽出した。以上より、**図-1**に示す4つのメッシュA～Dを本研究の対象範囲とした。また、4月16日の本震の際にはメッシュA～Dでは震度6弱～6強が観測されている⁹⁾。これらのメッシュで土砂移動現象を発生させた降雨イベントは、地震前は平成24年7月九州北部豪雨（以下、H24.7）、地震後は地震から5日後の平成28年4月の降雨（以下、H28.4）と同年6月の降雨（以下、H28.6）である。以下、本研究で対象とする土砂移動現象を発生させた降雨イベントを「対象イベント」と呼ぶ。各メッシュ・各対象イベントにおける土砂移動現象の分布を**図-2**に示す。メッシュA、C、DではH24.7、H28.4、H28.6の全てが対象イベントである一方、メッシュBではH24.7、H28.6が対象イベントであるが、H28.4は土砂移動現象の発生が確認できなかったため、対象イベントから除いた。全メッシュの最大時間雨量は、H24.7で83.8～105.7mm、H28.4で18.4～23.3mm、H28.6で49.3～105.7mmであった。

次に、各メッシュ各対象イベントの土砂移動現象の発生時刻を文献調査により整理した¹²⁾ところ、H24.7のメッシュAなど5つのメッシュ・対象イベントで発生時刻が判明した（**表-2**）。残る6つは発生時刻が不明であるが、判明した5つについて精査したところ、いずれも時間雨量のピークから2時間後までの時間帯に発生時刻が含まれていたことから、発生時刻が不明なメッシュ・対象イベントについては、**表-3**のように時間雨量のピークから2時間後までを発生時刻とした。また、判明している5つについても、**表-2**に示した発生時刻は、対象イベントによるごく一部の土石流・崩壊について判明したものであり、他の土石流・崩壊も含め全てが同時に発生していたとは考えにくいとため、発生時刻が判明している5つメッシュ・対象イベントにおいても、時間雨量のピークから2時間後までの時間帯を発生時刻とした（**表-3**）。

(2) 解析雨量を用いた各種降雨指標の算出

本研究では、降雨指標として時間雨量、土壌雨量指数、実効雨量を用いた。時間雨量は毎時00分を起点として1時間以内に降った雨量である。土壌雨量指数（以下、SWIとする）は降水が土壌に浸透・貯留・流出する様子を、孔の開いた3段のタンクを用いてモデル化したタンクデ

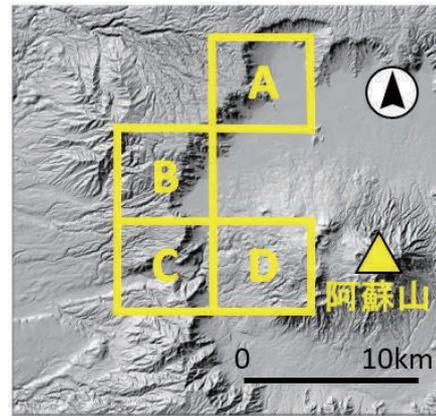


図-1 本研究の対象範囲

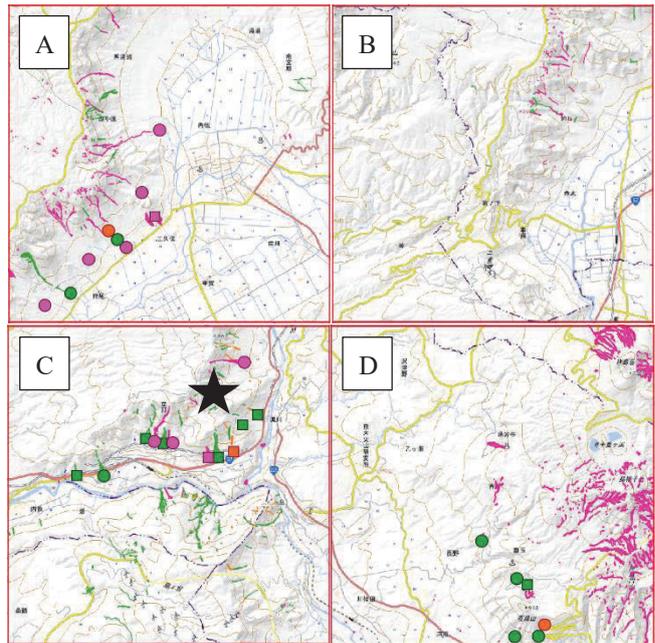


図-2 各メッシュの土砂移動現象分布図。★は図-5の写真撮影地点を示している。凡例は表-1参照。

表-1 図-2の凡例（メッシュDのH28.4、H28.6は空中写真未判読）

	土砂災害分布 ^{7,8,9,10)}		土砂移動現象の空中写真判読 ^{4,11)}
	土石流	がけ崩れ	
H24.7			
H28.4			
H28.6			

表-2 文献調査により整理した各対象イベントの発生時刻

	H24.7	H28.4	H28.6
A	7/12 6:00 頃 ^{13),14)}	4/21 12:00~13:00 ⁷⁾	不明
B	不明	/	
C	7/12 6:00 頃 ^{13),15),16)}	不明	6/21 2:00 頃 ⁹⁾
D	不明	不明	6/21 2:00 頃 ⁹⁾

表-3 本研究で設定した各対象イベントの発生時刻

	H24.7	H28.4	H28.6
A	7/12 6:00~8:00	4/21 11:00~13:00	6/23 0:00~2:00
B	7/12 6:00~8:00		6/21 0:00~2:00
C	7/12 5:00~7:00	4/21 11:00~13:00	6/21 0:00~2:00
D	7/12 5:00~7:00	4/21 13:00~15:00	6/21 0:00~2:00

ルをもとに、各タンクの貯留高の和で定義した指数値であり、土砂災害警戒情報等で用いられているのと同様の方法で計算した。実効雨量は過去に降った雨量の影響を時間と共に減少させて計算した雨量であり、本研究では半減期を1.5h,3h,6h,24h,48h,72h,120hの7種類設定した。以降、実効雨量を表記する場合は半減期のみ（たとえば半減期24hの実効雨量なら24h）とする。これらの降雨指標を解析雨量データを用いてメッシュごとに31年間分算出した。

(3) 発表基準線 (CL) の作成

土砂災害警戒情報に倣って発表基準線 (CL) を設定するにあたっては、縦軸を短時間の降雨の評価に適している短期降雨指標、横軸を長期間の降雨の評価に適している長期降雨指標に設定する必要があるため、本研究では時間雨量と1.5h~6hを短期降雨指標とし、SWIと24h~120hを長期降雨指標とした。これより、短期と長期の降雨指標の組み合わせを全部で20通り設定することができる。これらすべての組み合わせに対し、地震前のCLをメッシュごとに設定した。設定は「連携案」⁶⁾に準じて以下のように行った。

まず、長期降雨指標 (横軸) の下限値を設定する。下

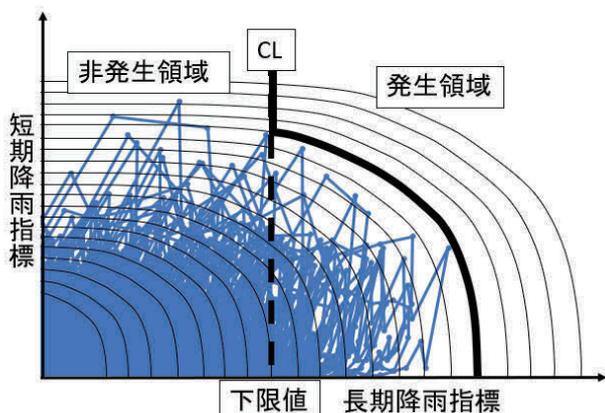


図-3 CL作成の概念図。青色の折線は地震前までの対象イベント以外のスネークラインを示している。

表-4 長期降雨指標ごとの下限値 (mm)

SWI	24h	48h	72h	120h
200	200	250	300	350

限値とは、土砂災害が発生する可能性の低い夕立のような降雨時のスネークラインがCLを超過するのを防ぐために設けるもので、下限値以下は土砂災害非発生領域とする (図-3)。本研究での下限値は、地震前まで (昭和63年4月1日1:00 ~ 平成28年4月13日23:00) の対象イベント以外のスネークラインを見ながら、長期降雨指標ごとに全メッシュ共通で表-4のように設定した。

次に、ある降雨指標の組み合わせに対し、地震前までの短期・長期降雨指標のデータをRBFNプログラム (CL検討支援ツール) に入力することで、図-3のような20本の曲線 (等RBFN線) を描くことができる。図-3のように地震前までの対象イベント以外のスネークラインとこれら20本の曲線を重ねた際に、下限値を超える対象イベント以外のスネークラインが全て超過しない曲線のうち、最も原点に近いもの (図-3の太線) をCLの曲線部として採用する。

最後に、この曲線と下限値の直線を合わせることで、土砂災害の発生・非発生領域の境界線となるCLとする。

なお、本研究における地震前の対象イベントはH24.7のみであったが、平成2年7月2日に熊本県一の宮町で土砂災害が発生した¹⁷⁾際の一連の降雨 (以下、H2.7とする) についても、いずれのメッシュ、指標の組み合わせにおいてもH24.7と同程度にスネークラインが大きく跳ね上がる結果となり、H24.7とあわせたこの2つの降雨イベントのスネークラインが他の全ての降雨イベントと比べて際立っていた。H2.7による対象メッシュ内での土砂移動現象の発生は確認できなかったが、スネークラインから土砂移動現象発生に足る降雨だったと判断し、地震前のCLの設定にはH2.7も対象イベントとして取り扱った。こうして設定したCLのうち、時間雨量とSWIの組み合わせについて、熊本県が現在運用している土砂災害警戒情報で用いているCL (熊本県のwebサイトで公開) と比較したところ、ほぼ一致していたため、本研究におけるCLの設定手法は妥当と判断した。

(4) CLの引き下げ率に着目した地震後の土砂移動現象発生時の降雨規模の評価

土砂災害警戒情報では、大規模な地震が発生した場合、横軸の土壌雨量指数を震度5強で地震前の2割、震度6弱以上で3割引き下げる運用が行われている。本研究では、それに倣って0.5割刻みで横軸方向に引き下げ、地震後の対象イベント発生時刻のスネークラインがCLを超過する最小の割合を「引き下げ率」として短期・長期の降雨指標の全組み合わせ、全メッシュに対して地震後の対象イベントごとに設定し、引き下げ率により地震後の土砂移動現象発生時の降雨規模を評価した。以下、こうして引き下げを行ったCLを「地震後CL」とする。

3. 結果

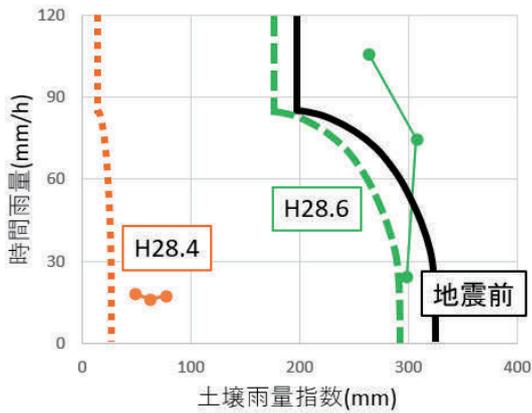


図-4 メッシュ C の現行の組み合わせ（時間雨量と土壌雨量指数）における地震後 CL、および発生時のスネークライン。H28.4 に対しては橙色、H28.6 に対しては緑色で示しており、黒の曲線は地震前の CL である。

メッシュ C の現行の組み合わせ（時間雨量と土壌雨量指数）における地震後 CL を図-4 に示す。この図より引き下げ率は H28.4 に対しては 9 割であり、現行の基準（震度 6 弱以上で 3 割）でも捕捉し切れないほどの極めて小規模な降雨であったことが分かる。一方 H28.6 に対しては 1 割であり、H28.4 よりは大規模な降雨であったことが分かる。

短期・長期降雨指標の各組み合わせにおける引き下げ率をメッシュごとに表-5~8 にまとめた。メッシュ C における H28.4 の引き下げ率（表-7-a, b）は、いずれの降雨指標の組み合わせにおいても 9~9.5 割という結果となり、どのような降雨指標の組み合わせで見ても極めて小規模な降雨で土砂移動現象が発生していたと言える。一方、H28.6 に対しての引き下げ率は組み合わせにより 0~5.5 割とばらつきがみられたが、いずれの組み合わせにおいても H28.4 の引き下げ率を下回る結果となった。これらの結果はメッシュ A, D でも同様であり、また、メッシュ B においても H28.6 の引き下げ率は他のメッシュと同様のばらつき具合であった。

4. 考察

(1) 地震 5 日後に小規模な降雨 (H28.4) で土砂移動現象が発生した理由

本研究の結果から、熊本地震発生 5 日後に地震前と比べて引き下げ率 6.5~9.5 割と極めて小規模な降雨 (H28.4) で土砂移動現象が発生していたことが示された。大規模地震後は地震前よりも小規模な降雨 (引き下げ率 2~5 割) で土砂移動現象が発生することは熊本地震以前から報告されている¹³⁾が、H28.4 はそれ以上に小規模な降雨であったことが分かった。その理由として以下の 2 点が考えられる。

1 点目は地震により生じた亀裂の影響である。本研究

表-5-a, b メッシュ A の H28.4 と H28.6 に対する引き下げ率 (割)

a : H28.4	SWI	24h	48h	72h	120h
時間雨量	8	9	9	9	9
1.5h	8.5	9.5	9	9.5	9
3h	8.5	9	9.5	9.5	9
6h	8.5	9	9.5	9.5	9
b, H28.6	SWI	24h	48h	72h	120h
時間雨量	2.5	2.5	3	3.5	4
1.5h	2.5	4.5	3.5	3.5	4
3h	3	3	3.5	3.5	4.5
6h	3	3.5	3.5	3.5	4

表-6 メッシュ B の H28.6 に対する引き下げ率 (割)

H28.6	SWI	24h	48h	72h	120h
時間雨量	4	4.5	5.5	6	6.5
1.5h	3.5	4.5	5.5	6	6.5
3h	4	4.5	5.5	6	6.5
6h	4.5	4.5	5.5	5.5	6.5

表-7-a, b メッシュ C の H28.4 と H28.6 に対する引き下げ率 (割)

a : H28.4	SWI	24h	48h	72h	120h
時間雨量	9	9.5	9.5	9.5	9.5
1.5h	9	9.5	9.5	9.5	9.5
3h	9	9.5	9.5	9.5	9.5
6h	9	9.5	9.5	9.5	9.5
b : H28.6	SWI	24h	48h	72h	120h
時間雨量	1	1.5	3	3.5	4.5
1.5h	0	0	1	0	0
3h	1.5	2.5	3.5	4	4
6h	2.5	4	4.5	4.5	5.5

表-8-a, b メッシュ D の H28.4 と H28.6 に対する引き下げ率 (割)

a : H28.4	SWI	24h	48h	72h	120h
時間雨量	7.5	8	8.5	8.5	8.5
1.5h	6.5	8	8.5	8.5	8.5
3h	7.5	8.5	8.5	8.5	8.5
6h	7.5	8.5	8.5	8.5	8.5
b : H28.6	SWI	24h	48h	72h	120h
時間雨量	0	0	0.5	2	3
1.5h	0	0	0	0.5	2.5
3h	0	0	1	1.5	2
6h	1.5	2	3	3.5	4

で対象とした範囲では、熊本地震の影響で斜面崩壊や地すべりの周辺の斜面において火山灰性表層土中に亀裂が発生していたことが報告されている^{7,8)}。平松ら^{18,19)}は、モデル斜面による検討から、亀裂が存在する斜面の下流部では、降雨により地下水深が著しく上昇し、亀裂を設

けなかった場合と比較して斜面の安全率の低下度合いが大きくなることを確認した。本研究で対象とした阿蘇地域では、熊本地震により亀裂が無数に生じていたことが報告されており^{7,8)}、筆者らの地震直後の現地調査でもそれを確認している(図-5)。川尻らは、亀裂を有する模型盛土への散水実験^{20,21)}から、大きな加震によって亀裂が多く発生したケース、および人工亀裂の本数を多く設定したケースほど、散水時の模型盛土内水位の上昇が顕著であることを示した。以上から、熊本地震により生じた無数の亀裂により、H28.4のような小規模な降雨でも地下水水位が著しく上昇し、崩壊に至ったことが考えられる。2点目は地震動による土質強度の低下である。鳥居ら²²⁾は一面せん断試験および繰返し三軸圧縮試験を行い、地震動により土粒子間の骨格構造が破壊されて粘着力が低下し、土壌のせん断強度が低下することを示した。降雨による飽和度上昇に伴う見かけの粘着力も低下することを示しているが、ここに先述の亀裂の発生が加わった場合、飽和度上昇速度がさらに上がり、土壌のせん断強度低下を助長すると考えられる。また、阿蘇地域でH28.4により崩壊が発生した斜面の構成材料の一つに、黒ボク・ロームなどの火山灰性堆積物があったことが報告されている^{7,8)}が、久保田ら²³⁾は、阿蘇カルデラ壁に分布している黒ボク土は、他の非火山性土壌と比較して地震動による内部摩擦角と粘着力の低下が顕著であり、斜面安全率も大きく低下することを示している。また稲垣・平松²⁴⁾も、北海道胆振東部地方に分布する火山性土壌の粘着力が地震動により81%も低下することを一面せん断試験により示した。以上から、阿蘇地域に広く分布する火山性土壌の土質強度が地震動により著しく低下したことにより、H28.4のような極めて小規模な降雨でも崩壊に至ったことが考えられる。

(2) 土砂移動現象を発生させる降雨規模が地震後2か月間で増大した理由

H28.4からH28.6までの約2か月の間に、土砂移動現象を発生させる降雨規模はいずれのメッシュ、指標の組み合わせにおいても大きくなっていった。このような結果となった理由として、以下の2点が挙げられる。1点目は、降雨による亀裂の癒着である。川尻ら²⁰⁾は、亀裂を有する模型盛土への繰返し散水試験を行い、亀裂の癒着により雨水が浸透しにくくなり、盛土水位の上昇速度が減少することを確認した。阿蘇地域ではH28.4からH28.6の間にも対象イベントではない降雨イベントが複数回発生している。これにより、熊本地震により生じた亀裂が癒着するなど斜面の浸透特性が変化し、土壌の水位上昇速度が減少していたことが推測される。2点目は、地震により低下した土質強度の回復である。中村ら²⁵⁾は、地震動を与えたことにより低下した試験用供試体の土質強度が、時間経過とともに回復傾向を示し、斜面安全率は2~3か月で完全回復することを示した。これより、熊



図-5 熊本地震により発生した無数の亀裂(平成28年4月23日筆者撮影)。撮影地点は図-2, Cに示している。

本地震から約2か月の間に、土壌の土質強度がある程度回復していたことが推測される。

5. まとめ

本研究では、熊本地震の影響を受けた阿蘇地域の複数の解析雨量メッシュを対象に、多数の短期・長期降雨指標の組み合わせごとに地震後のCLの引き下げ率を整理することで、地震後に土砂移動現象を発生させた降雨イベントの規模を評価した。以下に得られた結論を述べる。

1) 阿蘇地域では、どのような指標の組み合わせで見ても、地震発生直後(地震から5日後)には引き下げ率6.5~9.5割の極めて小規模な降雨で土砂移動現象が発生していた。これは、地震による無数の亀裂の発生および研究対象地域に分布する火山性土壌の土質強度の顕著な低下に起因すると考えられた。

2) 地震から2か月後に土砂移動現象を発生させた降雨の規模は、地震直後と比べて大きくなっていった。これは、度重なる降雨イベントによる亀裂の癒着や、地震により低下した土質強度が2か月の間で回復傾向にあったことが原因と考えられた。

今後は、地震直後に極めて小規模な降雨で土砂移動現象が発生する地域の抽出方法や、亀裂や土質強度の低下の影響が持続・低減していく期間について、熊本地震以外の事例も踏まえながらさらに検討を加える必要がある。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所からRBFNプログラムの貸与や土砂災害報告・解析雨量の提供を受けた。本研究は国土交通省河川砂防技術研究開発公募およびJSPS科研費18H03819の助成を受け実施した。

参考文献

- 1) 富田陽子, 桜井亘, 中庸充: 六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の拡大について, 砂防学会誌,

- Vol.48, No.6, pp.15-21, 1996.
- 2) 高田望, 友村光秀, 坂井大作, 渡邊涼一, 小杉賢一朗:平成 28 年(2016 年)熊本地震後に発生した熊本県南阿蘇村の崩壊の誘因となった大雨イベントの解析, 砂防学会誌, Vol.70, No.3, pp.33-40, 2017.
 - 3) 野村康裕, 岡本敦:地震時の斜面崩壊危険度評価と警戒避難降雨基準の検討, 土木技術の総合情報誌, Vol.55, No.4, pp.22-25, 2013.
 - 4) 渡邊輝嗣, 桂真也, 林真一郎, 梅谷涼太, 齋藤はるか, 野呂智之, 村田郁央:平成 28 年熊本地震前後における土砂移動現象発生時の各種降雨指標の分析, 第 9 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.151-156, 2019.
 - 5) 気象庁 HP 各種データ・資料 平成 28 年(2016 年)熊本地震,
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2016_04_14_kumamoto/index.html (2020.2.24 閲覧)
 - 6) 国土交通省河川局砂防部 気象庁予報部 国土交通省国土技術政策総合研究所:国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案), 2005.
 - 7) 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, 相楽涉, 地頭蘭隆, 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: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.
 - 8) 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, 地頭蘭隆, 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: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.
 - 9) 国土技術政策総合研究所・土木研究所:平成 28 年(2016 年)熊本地震土木施設被害調査報告 7. 土砂災害, 国総研資料, No.967, pp.151-191, 2017.
 - 10) 地盤工学会:熊本地震による斜面災害と二次災害に備えて, 2017.
https://janet-dr.com/060_event/170415sympo/1_3_3_jgs.pdf
(2020.2.11 閲覧)
 - 11) 防災科学技術研究所:平成 28 年熊本地震に関する情報, (2016.6.27 更新)
<https://www.bosai.go.jp/mizu/dosha.html>
(2017.11.10 閲覧)
 - 12) 林真一郎, 桂真也, 齋藤はるか, 梅谷涼太, 渡邊輝嗣, 野呂智之, 野村康裕, 村田郁央:土砂移動現象発生時刻の調査を踏まえた熊本地震前後の土砂移動現象発生時の各種降雨指標値に関する分析, 第 68 回 2019 年度砂防学会研究発表会概要集, R4-019, pp.223-224, 2019.
 - 13) 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: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, pp.50-61, 2012.
 - 14) 熊本日日新聞「総合」2012 年 7 月 23 日付朝刊, (7).
 - 15) 熊本日日新聞 2012 年 7 月 12 日付夕刊, (3).
 - 16) 熊本日日新聞「社会」2012 年 7 月 13 日付朝刊, (29).
 - 17) 石川芳治, 志田武司:平成 2 年 7 月 2 日熊本県一の宮町で発生した泥流・流木災害について, 砂防学会誌, Vol.43, No.2, pp.63-66, 1990.
 - 18) 平松晋也, 水山高久, 石川芳治:地震により発生した亀裂が斜面の安定性に及ぼす影響について, 砂防学会誌, Vol.48, No.2, pp.27-30, 1995.
 - 19) 平松晋也, 水山高久, 石川芳治, 小山内信智:地震により斜面上に形成された亀裂が土砂生産危険度に及ぼす影響, 日本地すべり学会誌, Vol.36, No.2, pp.3-12, 1999.
 - 20) 川尻峻三, 布川修, 伊藤賀章, 西田幹嗣, 松丸貴樹, 川口貴之, 太田直之, 杉山友康:実験的検討による地震後の降雨による盛土崩壊メカニズムについて, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.153-168, 2014.
 - 21) 川尻峻三, 布川修, 太田直之:亀裂が散水時に模型盛土内の水分挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.71, No.3, pp.204-217, 2015.
 - 22) 鳥居宣之, 沖村孝, 加藤正司:地震後の降雨による斜面崩壊発生機構に関する実験的検討, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.140-149, 2007.
 - 23) 久保田哲也, 篠原慶規, 中村豪, 井上陽太:地震動に伴う土質強度の変化と斜面安全率, 第 63 回平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集, R4-05, A48-49, 2014.
 - 24) 稲垣翔, 平松晋也:大規模地震が火山地域の斜面安定性に及ぼす影響, 第 68 回 2019 年度砂防学会研究発表会概要集, R4-008, pp.201-202, 2019.
 - 25) 中村祐輔, 平松晋也, 福山泰治郎:地震発生後の時間経過にともなう土質強度の変化に関する実験的研究, R5-19, pp.B-202-203, 2015
(2020.7.1 受付)