

地震による斜面崩壊の影響範囲の推定に関する研究

STUDY ON ESTIMATION OF AREAS AFFECTED BY SLOPE FAILURES
DUE TO EARTHQUAKE

坂井 佑介¹・内田 太郎¹・高原 晃宙²・秦 雅之³

Yusuke SAKAI, Taro UCHIDA, Teruyoshi TAKAHARA, Masayuki HATA

¹国土技術政策総合研究所土砂災害研究部（〒305-0804 つくば市旭1番地）

²国土交通省水管理・国土保全局砂防部（〒100-8918 千代田区霞が関2-1-3）

³中電技術コンサルタント株式会社（〒734-8510 広島市南区出汐二丁目3番30号）

Key Words: slope failures due to earthquake, estimation of areas affected, areas of slope failures, relative height, length of flow path,

1. はじめに

平成28年熊本地震では、斜面崩壊が多数発生し、土砂災害により甚大な被害が生じたことは記憶に新しい。地震による土砂災害を軽減・防止するためには、同時多発的に発生する斜面崩壊箇所を事前に把握しておくことが重要であり、これまで地震により発生する斜面崩壊箇所の危険度を評価する手法が検討されてきた¹⁾。また、発生危険度だけでなく、崩壊の規模を評価する指標も検討されている²⁾。一方で、被害を軽減・防止するためには、斜面崩壊箇所だけでなく、斜面崩壊により被害が生じる範囲（以下、「影響範囲」という）を推定し、事前の防災対策である避難計画等に活かすことも重要である。

土砂移動の影響範囲に関する研究は、古くから降雨により発生するものを中心に行われている。降雨により発生する土砂移動は、地形的な要因等から土石流、がけ崩れ、地すべりの土砂移動現象毎の発生場を概ね区分することができ、それぞれの土砂移動現象毎に影響範囲の研究がなされ^{例えば3)}、その成果は「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」で指定される土砂災害警戒区域の設定等に反映されている。一方で、地震により発生する土砂移動の影響範囲は水の影響が少ないと

から、降雨により発生する土砂移動と異なる可能性が考えられる。

地震により発生する土砂移動は表層崩壊や岩盤崩落などの崩壊が特に発生頻度が高いとされている⁴⁾。また、地すべりに近い挙動を示すものや土石流のように流動化するものもあるが^{5), 6)}、地震による斜面崩壊が土石流、がけ崩れ、地すべりのどの土砂移動現象に近い挙動を示すかを事前に把握することは困難であると考えられる。このことから、どの土砂移動現象に近い挙動を示すかに関わらず、斜面崩壊の諸元や発生場の地形的な要因から概ねの影響範囲を推定することができないか、と筆者らは考えた。

また、近年の地震による斜面崩壊の影響範囲に関する研究は個々の斜面崩壊事例や個別の地震を対象にしたものが多い^{例えば7)}。しかし、地震による斜面崩壊の影響範囲は地震のタイプや地震動特性、地質、先行降雨条件などの影響を受ける可能性が考えられることから、複数の地震について統一的に影響範囲を検証することが重要であるが、そのような研究事例は少ない。地震の詳細な諸元を事前に想定することが困難であることを考慮すると、事前の防災対策には異なる地震に共通して適用可能な汎用性の高い推定手法が求められると考えられる。

本研究では、地震により発生する斜面崩壊の影響

範囲を推定するにあたり、影響範囲と相関が高いと考えられる崩壊規模と影響範囲に係わる指標との関係性を、事前の防災対策への活用も念頭に整理する。また、検討対象とする地震は、地震のタイプや地震動特性、地質、先行降雨条件が異なる地震を複数選定し、複数の地震の影響範囲を統一的に検証するとともに、土砂移動現象の違いを土砂流下形態として区分して検証することにより、事前の防災対策として複数の地震や土砂移動現象を統一的に取り扱う、より汎用性の高い推定手法の適用可能性を検討した。

2. 調査概要

(1) 檢討對象範圍・調查箇所

検討対象とする地震は、崩壊地ポリゴンが作成されている大規模地震のうち、地震のタイプや地震動特性、地質、先行降雨条件の影響を考慮し、平成16年新潟県中越地震、平成20年岩手・宮城内陸地震、平成28年熊本地震を対象とした。対象地震の諸元を表-1に示す。また、2(2)で示す6項目の計測を行うため、地震後の調査により崩壊地ポリゴンが整理され、かつ地震後のオルソ画像が取得されている範囲を検討対象範囲とした。なお、崩壊地ポリゴンについて、平成16年新潟県中越地震及び平成20年岩手・宮城内陸地震は国土技術政策総合研究所で作成したもの、平成28年熊本地震（平成28年6月豪雨前のデータで崩壊地を判読）は九州地方整備局より提供頂いたものを使用している。地形データ及びオルソ画像のデータは、災害後に各対象箇所で国土交通省が実施した航空写真撮影・レーザー測量業務で取得・計測したデータを用いた。

ここから、各計測項目を調査する崩壊地（以下、「調査箇所」という）を平成 16 年新潟県中越地震、平成 20 年岩手・宮城内陸地震、平成 28 年熊本地震からそれぞれ 100 箇所を選定し、全体で 300 箇所を抽出した。調査箇所の抽出においては、全崩壊地との崩壊面積の頻度分布、地域的な分布が概ね等しくなるよう、全崩壊地からランダム抽出した。調査箇所のランダム抽出には、Microsoft Office Excel2010 の RAND 関数を使用して実施した。なお、被害が大きくなると想定される崩壊土砂が天然ダムを形成している事例については、全崩壊地数に対して非常に数が少なくランダム抽出で対象とならない可能性が考えられたことから、影響範囲の推定手法への影響を考慮し全て調査の対象とした。

次に、調査箇所について、オルソ画像を用いて、崩壊土砂が流下・堆積した範囲を影響範囲として判

読し、ポリゴン化した。なお、オルソ画像で斜面崩壊の影響範囲を判別する際に、斜面崩壊の影響範囲が鮮明でない場合及び複数の崩壊により流出した土砂が1つの堆積範囲に堆積するなどのため対象崩壊地単独の影響範囲が不明確な場合は、近傍で同程度の面積の崩壊地を選定して当該崩壊地と置き換えて調査箇所とした。全崩壊地と抽出した調査箇所の空間分布を図-1に、崩壊面積の頻度分布を図-2に示す。図-2に示すように全崩壊地の崩壊面積の頻度分布と調査箇所の頻度分布で大きな差は見られないことを確認した。

表-1 対象地震の諸元

	H16新潟県中越地震	H20岩手・宮城内陸地震	H20熊本地震
地震発生時刻 ⁽¹⁾	2004/10/23 17:56	2008/03/11 14:43	2016/4/16 12:52
最大震度 ⁽²⁾	7	6強	M7.3
マグニチュード ⁽³⁾	M6.8	M1.2	M7.3
震源深度 ⁽³⁾	13km	6km	12km
最大加速度 ⁽³⁾	1.75gal	4.02gal	1.362gal
断層型 ⁽³⁾	逆断層	逆断層	横ずれ断層
地質 ⁽³⁾	第四紀堆積岩類 第三紀堆積岩類	第四紀堆積岩類 第三紀堆積岩類 火山岩類	第四紀堆積岩類 第三紀堆積岩類 火山岩類
	8mm/1日	0mm/1日	0mm/1日
	77mm/3日	0mm/3日	11mm/3日
先行降雨条件 ⁽⁴⁾	127mm/7日	29mm/7日	11mm/7日
対象範囲面積	40km ²	524km ²	508km ²
対象範囲内の 崩壊地敷(うち天然災害 例数)	139箇所 (27箇所)	295箇所 (6箇所)	1489箇所 (0箇所)

*1 防災科学技術研究所HP (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/search/>) を参照

*2 H16新潟県中越地震及びH20岩手・宮城内陸地震はハスバートルら³⁾、H28熊本地震は地震本部⁴⁾を参照した。
 *3 2011年東日本大震災 (<https://www.jishin.go.jp/jishin/2011eastjapan/>) を参照した。

※3 シームレス地質図(<https://gbank.gsi.jp/seamless/index.html?lang=ja&p=download>)を参考。
※4 検討対象範囲内で、地震発生前7日面積が最大となる気象庁解析面積マッシュの面積を算出。

水を供給する事で、水抜き口付近の土壌が缺水となり水溶性のナトリウムイオンを運び出

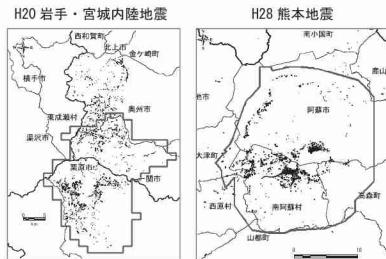


図-1 全崩壊地と調査箇所の空間分布

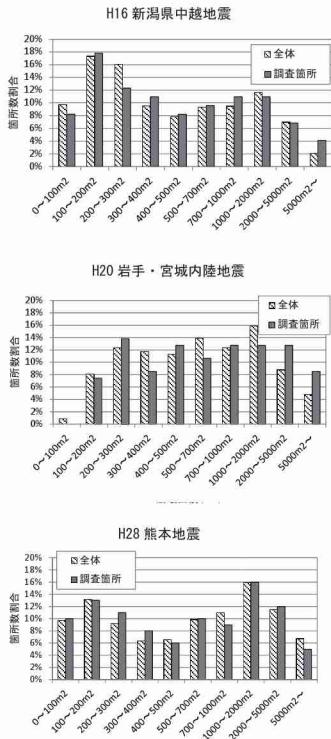


図-2 全崩壊地と調査箇所の崩壊面積の頻度分布

(2) 計測項目・計測方法

各地震の調査箇所について、西口ら¹⁰⁾の手法を参考し、オルソ画像及び地震前の10mDEMを用いて、以下の項目を計測した。

- ① 影響範囲末端から崩壊頂部までの流下経路の長さ
 - ② 影響範囲末端から崩壊頂部までの比高
 - ③ 影響範囲末端から崩壊頂部までの見通し角
 - ④ 影響範囲末端の勾配
 - ⑤ 崩壊面積
 - ⑥ 土砂流下形態（崩壊土砂の流動化の有無）
- ①・②は影響範囲を示す基本的な指標、③は流動性を表す指標、④は流下した崩壊土砂の停止条件に関わる指標として計測している。なお、西口ら¹⁰⁾では、深層崩壊を対象としているため⑥土砂の流下形態を天然ダムの決壍、土石流、崩壊土砂の直撃に

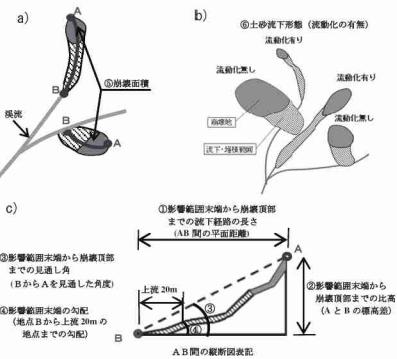


図-3 各計測項目イメージ
a) 平面図, b) 流動化の有無の判定イメージ, c) 縦断図

区分しているが、本研究では崩壊後の流動化の有無で区分している。

土砂流下形態の分類と分類毎の影響範囲のイメージ及び各項目の計測イメージを図-3に示す。①はGISで崩壊頂部から影響範囲末端までの平面距離を流下・堆積範囲の中心に沿って計測し、②はGISで計測した崩壊頂部の標高から影響範囲末端の標高を差し引いて求めた。③は②を①で除して求め、④は影響範囲末端から上流20mの地点の比高を計測して求めた。⑤はGISで崩壊地ポリゴンの面積を算出した。⑥は、流動化の有無を空中写真のみで正確に判定することが困難であるため、崩壊面積と流下・堆積範囲面積の比較及び流下・堆積範囲の渓流沿いの伸長状況から、明らかに流動化した崩壊を流動化有りとして抽出し、他の事例と異なる特徴を有するか検討した。なお、各項目の計測において、影響範囲として判読したポリゴンの縁部で最も標高が低い地点を影響範囲末端として計測した。

(3) 分析方法

分析にあたっては、調査箇所を計測したデータを地震及び土砂流下形態別に以下のとおり整理した。

- a. 崩壊面積と影響範囲末端から崩壊頂部までの流下経路の長さの関係
 - b. 崩壊面積と影響範囲末端から崩壊頂部までの比高的関係
 - c. 崩壊面積と影響範囲末端から崩壊頂部までの見通し角の関係
 - d. 崩壊面積と影響範囲末端の勾配の関係
- 上記项目的整理にあたっては、各階級のデータ数

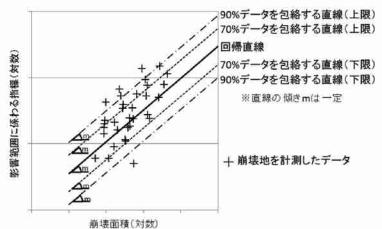


図-4 回帰直線の整理イメージ

が同じになるように崩壊面積を 10 階級に分割し、階級ごとの変動係数(標準偏差/平均値)を算出した。変動係数は、ある階級の崩壊面積における各計測項目の値の散らばり具合を示すものであり、言い換えると、崩壊面積から推定される平均的な影響範囲と実際に崩壊が発生した際の影響範囲との差違を表していると考えられる。なお、変動係数の算出にあたり、10 分割して各階級のデータ数が 5 未満になる場合は、データ数が 5 以上となる分割数を再設定した。

また、各計測項目の回帰直線を記載するとともに、事前の防災対策への活用も念頭に、全データの 70 及び 90% 包絡する直線を回帰直線の切片のみを変更して整理した。回帰直線の整理イメージを図-4 に示す。

3. 分析結果

(1) 地震別の分析結果

2 (3) 分析方法の a, b, c, d について、地震別で整理した結果を図-5 に示す。

a. 流下経路の長さについて、各地震ともに崩壊面積との相関が比較的高く、崩壊面積が大きくなるにつれて流下経路が長くなる傾向が認められた。ただし、平成 28 年熊本地震の結果にはばらつきがあり、決定係数 (R^2) がやや低くなっている。回帰直線の傾きは、各地震とも約 0.51～0.55 と近い値となっていることから、地震のタイプや地震特性、地質、先行降雨条件が異なっていても、崩壊面積に応じた流下経路の長さの増分は概ね一定であることを示している。変動係数については、各地震とも概ね 1.0 未満となっている。これは崩壊毎の流下経路の長さの標準偏差が流下経路の平均的な長さより小さいことを表しており、崩壊面積から推定される平均的な流下経路の長さと実際に崩壊が発生した際の流下経路の長さとの差違は比較的小ないと想定される。

b. 比高については、a の結果と同様の傾向が確認

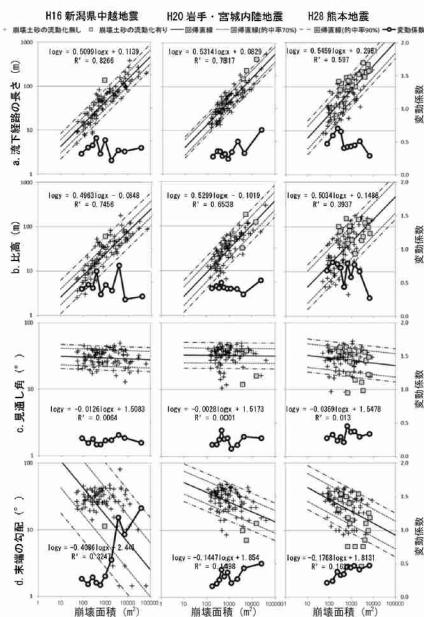


図-5 地震別の崩壊面積と計測項目との関係

できた。ただし、a よりも決定係数がやや低く、変動係数がやや大きい結果となっている。

c. 見通し角について、決定係数が低く、回帰直線の傾きはほぼ横ばいであった。一方で変動係数は 0.5 未満であり、これは崩壊毎の見通し角の標準偏差が平均的な見通し角の半分より小さいことを表している。これらの結果から、影響範囲末端から崩壊頂部までの見通し角について、崩壊面積に関わらず一定の範囲内に収まるものが多くを占めていたと考えられる。

d. 端末の勾配について、決定係数が低く、回帰直線の傾きは約 -0.41～-0.14 となっており、地震別にばらつきがみられた。変動係数についても平成 20 年岩手・宮城内陸地震と平成 28 年熊本地震では 0.5 未満となっているものの、平成 16 年新潟県中越地震で 1.0 以上となる場合があった。

以上の結果から、a, b については崩壊面積に応じた影響範囲との関連、c については影響範囲そのものとの関連があると考えられるが、データのばらつきもあり、影響範囲を正確に推定することは困難である。一方で、90% 包絡線を見ると、特に a. 流下経路の長さについて、上限と下限の間が狭く、残り

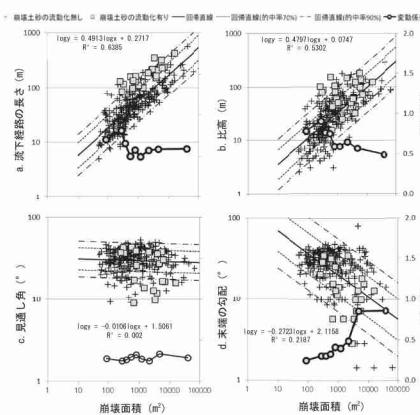


図-6 全地震の崩壊面積と計測項目との関係

10%についても 90%包絡線近傍にあることがわかる。この包絡線の確からしさについては今後より詳細に検討する必要があるが、適切に包絡線を設定することで事前の防災対策として影響範囲を推定する手法に活用できる可能性があると考えられる。

(2)全地震の分析結果

全地震を対象とした分析結果を図-6 に示す。ここでは、3 (1) 地震別の図-5 と比較して検討を進める。

a. 流下経路の長さについて、地震別の結果と同様に崩壊面積が大きくなるにつれて流下経路が長くなる傾向が認められた。決定係数は約 0.64 となっており、地震別の決定係数約 0.60～0.83 内に収まっている。回帰直線の傾きは地震別の結果に近い値である約 0.49 であった。変動係数は地震別の結果よりもやや大きくなっているが、概ね 1.0 未満であった。

b. 比高についても、a の比較結果と同様の傾向が確認できた。

c. 見通し角について、決定係数や回帰直線の傾きは地震別の結果と同様の傾向であった。変動係数は 0.5 未満であり、地震別の結果よりもやや小さくなつた。

d. 末端の勾配については、地震別の結果と同様に決定係数が低い値となつた。回帰直線の傾きは-0.24 となっており、地震別の傾き約-0.41～-0.17 の中間的な値となつていている。この結果は、地震別のばらつきが平均化されたものと考えられる。変動係数についても、地震別のばらつきが平均化された結果として 1.0 未満になつたものと考えられる。

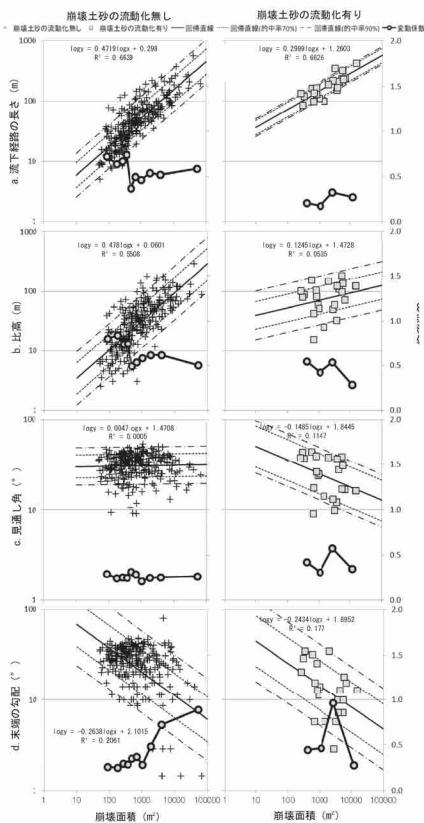


図-7 土砂流下形態別の崩壊面積と影響範囲の計測指標との関係

以上の結果から、全地震の決定係数や回帰直線の傾きが地震別の結果と同様の傾向を示した a, b, c について、図-5 で地震別の回帰直線の傾きが近い値であることも考慮すると、地震のタイプや地震動特性、地質、先行降雨条件が異なっていても、各指標と影響範囲との関係は同様の傾向を示すことから、複数の地震の影響範囲の推定方法を統一的に取り扱うことができる可能性が示唆されたと考えられる。

(3)土砂流下形態別の分析結果

全地震を対象として土砂流下形態別に区分した場合の分析結果を図-7 に示す。

a. 流下経路の長さについて、回帰直線の傾きは流

動化無しで約 0.47 は、流動化有りで約 0.30 となつており、崩壊面積に応じた影響範囲との関係は異なる傾向を示している。b. 比高と c. 見通し角についても流動化の有無で異なる傾向を示している。このことから、流動化の有無により各指標と影響範囲との関係が異なる傾向を示すことが確認された。

一方で、図-6 では a, b, c, d に共通して流動化有りのデータが流動化無しのデータの上下限に概ね収まっている。このことは、流動化無しの影響範囲内に流動化有りの影響範囲が含まれされることを示しており、事前の防災対策を考える上では、土砂流下形態に関わらず推定方法を統一的に取り扱うことができる可能性が示唆されたと考えられる。

4.まとめ

地震により発生する斜面崩壊の影響範囲について、事前の防災対策としてより汎用性の高い推定手法を検討するため、①崩壊規模と影響範囲に係る指標との関係性を整理すること、②複数の地震を統一的に取り扱う推定手法の適用可能性を検討すること、③土砂移動現象を統一的に取り扱う推定手法の適用可能性を検討すること、という 3 つの観点でまとめる。

①に関する知見として、a. 流下経路の長さ及び b. 比高について、崩壊面積との相関が比較的高く、変動係数が 1.0 未満であった。また、c. 見通し角について、変動係数は 0.5 未満であり、崩壊面積に関わらず一定の範囲内に収まるものが多くを占めることができ確認された。このことから a, b については崩壊面積に応じた影響範囲との関連、c については影響範囲そのものとの関連があると考えられる。また、適切に包絡線を設定することで事前の防災対策として影響範囲を推定する手法に活用できる可能性があると考えられる。

②に関する知見として、a. 流下経路の長さ及び b. 比高、c. 見通し角について、地震別の回帰直線の傾きが近い値であること、全地震の決定係数や回帰直線の傾きが地震別の結果と同様の傾向を示すことができ確認された。この結果から、a, b, c について複数の地震の影響範囲の推定方法を統一的に取り扱うことができる可能性が示唆されたと考えられる。

③に関する知見として、流動化有無によって崩壊影響範囲との関係が異なる傾向を示すものの、流動化有りのデータが流動化無しのデータの上下限に概ね収まっていることが確認された。この結果から、事前の防災対策を考える上では、土砂流下形態に関わらず推定方法を統一的に取り扱うことができる可

能性が示唆されたと考えられる。

今後、より汎用性の高い影響範囲の推定手法の確立のためには、本研究で用いた指標と影響範囲との関係を詳細に検討するとともに、これ以外の指標についても検討を進める必要があると考えられる。また、影響範囲との関係が深い崩壊規模の推定手法に関する研究²⁾の進展も望まれる。さらに、影響範囲の推定手法を事前の防災対策に活用するためには、素因（地形条件、地盤条件）や誘因（地震外力）と斜面崩壊発生箇所の複雑な関係を解明し、より的確な斜面崩壊発生の危険度評価手法を確立することも重要であると考えられる。

参考文献

- 内田太郎、片岡正次郎、岩男忠明、松尾修、寺田秀樹、中野泰雄、杉浦信男、小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、国総研資料、第 204 号、2004.
- 武澤 永純、内田 太郎、石塚 忠範、本間 信一、小林 容子、宮島 昌克：起伏量を用いた地震による崩壊危険度と規模の評価、砂防学会誌、pp. 22–29, 2013.
- 池谷浩、水山高久：土石流の流動と堆積に関する研究、土木研究所報告 (157), pp. 88–153, 1982.
- 中村浩之、土屋智、井上公夫、石川芳治：地震砂防, pp. 14–18, 2000.
- 佐々恭二：西宮市仁川で発生した地震時高地すべり、土と基礎、Vol. 1.44, No. 2, pp. 83–85, 1996.
- 奥田節夫、奥西一夫、諫訪浩、横山康二、吉岡龍馬：1984 年御岳山岩屑なだれの流動状況の復元と流動形態に関する考察、京都大学防災研究所年報、No. 28, B-1, pp. 491–504, 1985.
- 柄木均、中島正人、大島靖樹、伊藤守、蛇澤勝三：地震時斜面崩壊による崩土の到達距離に関する影響要因の検討-斜面高さと加速度の影響について、第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 187–192, 2008.
- ハスパートル、石井 靖雄、丸山 清輝、寺田 秀樹、鈴木 智樹、中村 明：最近の逆断層地震により発生した地すべりの分布と規模の特徴、日本地すべり学会誌、Vol. 48, No. 1, pp. 23–38, 2011.
- 地震本部：平成 28 年（2016 年）熊本地震の評価、<https://www.jishin.go.jp/main/oshirase/2016kumamoto.html>, 2016.
- 西口幸希、内田太郎、田中健貴、蒲原潤一、奥山達也、日名純也、松原智生、桜井亘：深層崩壊の発生に伴う土砂移動現象と被害発生位置の実態、砂防学会誌、Vol. 68, No. 6, pp. 31–41, 2016.

(2018.5.18 受付)