

事例研究に基づく大規模な斜面崩壊の発生規模および降雨量の検討

長谷川 淳* 浦越 拓野*
福原 隆彰** 川越 健*

A Study on the Threshold Values of Rainfall and the Collapsed Volume of Deep-seated Landslides Based on the Past Cases

Atsushi HASEGAWA Takuya URAKOSHI
Takaaki FUKUHARA Takeshi KAWAGOE

Deep-seated landslides due to heavy rainfall often damage the infrastructures located far away from the places where the landslides occur. To estimate the influence of the landslides, we have to know about hazardous area of the landslide, landslide volume, reach distance of debris flow, and the threshold values of rainfall. In this study, we investigated the cases of deep-seated landslides having occurred in Japan in order to find out the landslide volume and the threshold values of rainfall that triggered the landslides. As a result, we clarified that landslide volume was highly correlated with landslide area, and most cases of landslides were caused by the rainfall of “over 50mm per hour or over 400mm in total” or “over 500mm in total” .

キーワード：大規模な斜面崩壊，崩壊土砂量，崩壊面積，時雨量，連続雨量

1. はじめに

豪雨による大規模な斜面崩壊（以下、大規模崩壊と称する）については、被害が大きかった事例として、古くは明治十津川大水害（1889年）や有田川水害（1953年）が知られている。これらは未曾有の災害だったこともあり、自治体による災害の状況の記録が残されていたため、これをもとに様々な研究が行われている^{例えば1～5など}。しかし、災害をもたらした雨量の詳細が明らかでないこと、また崩壊規模の記載がまちまちであるなどの問題があり、降雨と崩壊との関係について詳細な検討は行われていない³⁾。その後、2000年代に入り、2004年に三重県で、2005年に宮崎県で、2011年には高知県、奈良県、和歌山県、三重県で大規模崩壊が多数発生したことで再び注目が集まり、各地の大規模崩壊について詳細な調査や検討が行われている^{例えば6～9など}。また国や関係機関では、2008年に独立行政法人土木研究所が「深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）」¹⁰⁾を作成し、国土交通省・土木研究所が2010年以降に「深層崩壊に関する全国マップ（深層崩壊推定頻度マップ）」¹¹⁾と「深層崩壊跡地密度マップ」¹²⁾を公表したほか、2014年には林野庁が「大規模崩壊対策現場対応ハンドブック（案）」¹³⁾、「大

規模崩壊リスク評価マップ作成マニュアル（案）」¹⁴⁾、「大規模崩壊潜在斜面危険度判定マニュアル（案）」¹⁵⁾、をまとめるなど、様々な取り組みが行われている。

大規模崩壊は、崩壊箇所近傍に甚大な被害をおよぼすだけでなく、天然ダムの形成や、多量の崩壊土砂や樹木が河川を流下することにより災害を引き起こすこともあるため、河川横断を伴うことが多い道路や鉄道などの線形構造物は崩壊から離れた箇所にあっても被災あるいは影響を受ける可能性がある。筆者らは、大規模崩壊が発生した場合の鉄道への影響を評価するため、大規模崩壊が発生する可能性がある箇所の抽出手法の構築、崩壊が発生しうる降雨量のしきい値の検討、崩壊規模と崩壊土砂の到達範囲の推定手法の構築を目指し、研究を行っている。このうち本論では、崩壊規模の推定方法と、崩壊が発生しうる降雨量のしきい値について、事例研究により検討した結果について述べる。

2. 大規模崩壊事例の文献調査

日本国内で発生した大規模崩壊の事例について、次に示す雑誌や書籍などから文献や資料を収集した。

- ・土木系学会・協会誌（土木学会誌，土木学会論文集，地盤工学会誌など）
- ・砂防系学会・協会誌（地すべり学会誌，砂防学会誌，

* 防災技術研究部 地質研究室

** 防災技術研究部 気象防災研究室

特集：防災技術

Sabo など)

- ・地球科学系学会・協会誌（日本応用地質学会誌，地形，自然災害学会誌など）
- ・その他（災害調査団報告書，講演資料，行政による公表資料など）

また各崩壊事例について，文献に記載されている範囲で以下に示す崩壊の諸元を整理した。

- ・発生場所
- ・発生日時
- ・発生規模（崩壊地の幅，長さ，深さ，面積，崩壊土砂量）
- ・地質および地質構造
- ・発生時刻と降雨との対応
- ・原因
- ・崩壊の形式
- ・被害状況，防災施設（対策）の有無
- ・溪流災害の発生の有無および発生時刻
- ・溪流災害発生時の河川の状況（濁りの有無や程度，水位など）

本検討では，砂防学会¹⁶⁾や土木研究所¹⁷⁾の定義を参考に，大規模崩壊を，①崩壊土砂量が10,000m³以上，②崩壊の深さが5m以上，③主な誘因が降雨，④地すべり・岩盤崩壊ではない，の4つの条件を満たすものとし，前述の文献調査により193の事例を抽出した。これらの事例のうち，崩壊地の幅が記載されていたのは126事例，崩壊地の長さが記載されていたのは120事例，崩壊地の面積が記載されていたのは136事例，崩壊土砂量が記載されていたのは98事例である。なお，いくつかの事例では文献によって発生規模の記載が異なる場合があったため，その際は崩壊地の幅，長さ，面積，崩壊土砂量のうち最も多い項目が記載されている文献の値を採用した。

3. 崩壊土砂量の推定

2章で抽出した事例のうち崩壊土砂量が記載されていた98事例をもとに，崩壊土砂量の推定方法について検討した。検討にあたっては，地形の特徴から崩壊危険箇所と崩壊土砂量を推定することを念頭に，前述の崩壊の諸元のうち，崩壊地の幅，長さ，面積（以下，崩壊幅，崩壊長さ，崩壊面積と称する）と崩壊土砂量の関連を検討した。なお，検討した98事例のうち，崩壊長さや崩壊土砂量の両方の値があるのは41事例，崩壊幅や崩壊土砂量の両方の値があるのは47事例，崩壊面積や崩壊土砂量の両方の値があるのは72事例である。

検討結果を図1～3に示す。崩壊幅・崩壊長さや崩壊土砂量の関係は類似しており，いずれもばらつきが大きいものの，弱い正の相関が認められる（図1，2）。これに対し，崩壊面積と崩壊土砂量との関係では両対数グラフ上で明瞭な正の相関が認められる（図3）。そこで累

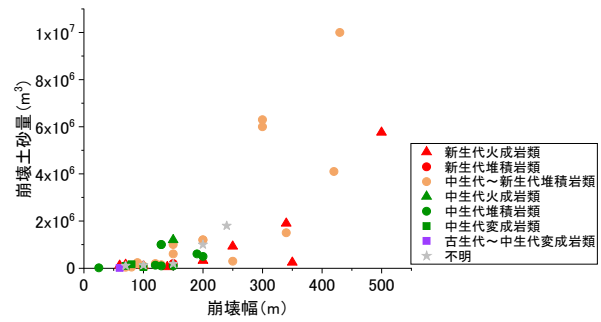


図1 崩壊幅と崩壊土砂量の関係

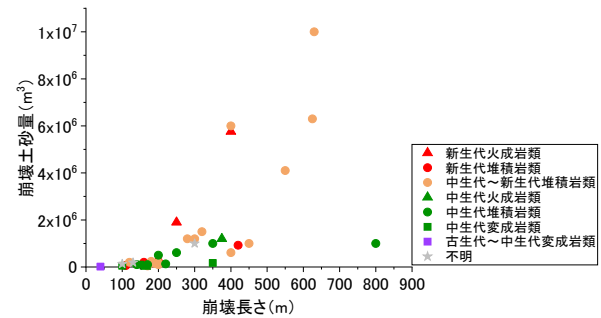


図2 崩壊長さや崩壊土砂量の関係

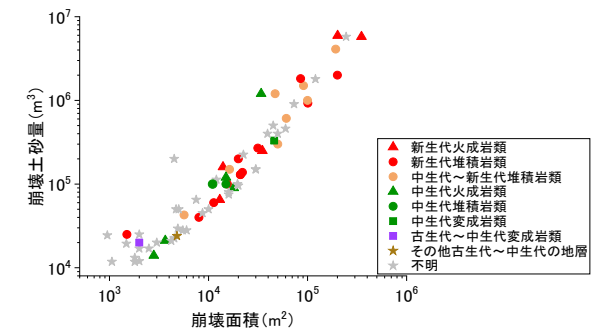


図3 崩壊面積と崩壊土砂量の関係

乗近似を行い，次の回帰式を得た。

$$V = 3.16A^{1.1} \quad (1)$$

V：崩壊土砂量 (m³)，A：崩壊面積 (m²)

このときの相関係数は0.95であり，非常に相関が高い。このことから，大規模崩壊の兆候が地形に現れていて崩壊面積をある程度推定することができれば，その場所で大規模崩壊が発生した場合の崩壊土砂量を予測することが可能であると言える。

一方，地質と崩壊面積や崩壊土砂量との関連については明瞭ではないが，形成年代が古い地層（図3の凡例のうち古生代～中生代および中生代に形成された地層）に比べ，形成年代が新しい地層（図3の凡例のうち中生代～新生代および新生代に形成された地層）の方が，崩壊土砂量が多くなる傾向がみられる（図3）。

4. 降雨しきい値の検討

鉄道における降雨災害対策としては、防護工の設置などによるハード対策のほかに、ソフト対策として雨量に基づく運転規制が行われている¹⁸⁾。運転規制で用いられる雨量指標やその規制値は、当該線区において過去に災害が発生した際の雨量をもとに経験的に決定されている場合が多い。しかし大規模崩壊は発生頻度が低く、鉄道の被災事例も稀なため、雨量の規制値を経験的に定めることができない。そこで、大規模崩壊が発生する可能性がある降雨のしきい値を定めることが可能か検討するため、第2章で収集した大規模崩壊事例のうち、崩壊発生日と崩壊箇所の位置が出典に明示されている94事例を対象に、崩壊発生時の降雨量を気象庁提供の解析雨量をもとに整理した。ここで解析雨量とは、国土交通省水管理・国土保全局、道路局と気象庁が全国に設置している気象レーダーとアメダス等の地上の雨量計を組み合わせ、降水量分布を1kmメッシュ（メッシュサイズは期間によって異なる）で解析したものである¹⁹⁾。解析雨量のデータはアメダスデータ（測定地点の間隔は20km程度）に比べ空間分解能が高く、局地的な豪雨であっても捕捉できる可能性がある。

4.1 検討方法

解析雨量の取得と処理の手順を図4に示す。まず対象とした94事例について、崩壊箇所の緯度経度と崩壊発生日・時刻を整理した。ここで、崩壊発生時刻が既知なのは17事例、発生日のみが既知なのは77事例であった。つぎに、崩壊発生日を含む前後数日間の当該地点の解析雨量を抽出した。解析雨量は前1時間雨量（たとえば、10時の前1時間雨量とは9時から10時の雨量である。以下、時雨量と称する）のデータであり、データ取得時期によってメッシュ間隔やデータの記録頻度などが異なる（表1）。このうち記録頻度については、1時間ごとのデータにあわせるため、2003年以降の記録頻度が30分ごとのデータについては、毎正時の時雨量のみ抽出することとした。そしてこの時雨量をもとに連続雨量を算出した。ここで連続雨量とは降り始めからある時刻までの雨量の累積値である。連続雨量の算出にあたっては、雨量の累積をリセットするための「無降雨の継続時間」を設定するが、この時間は機関や事業者によって異なり、6時間、12時間、24時間などが設定されている。ここでは長期的な降雨の影響も検討するため、無降雨の継続時間を長く設定するのがよいと判断し、「24時間」を採用した。崩壊発生時刻が判明している17事例については、崩壊発生時刻の時雨量と連続雨量を求める際に、崩壊発生時刻は30分単位で切り上げ/切り捨てを行った。つまり、崩壊発生時刻が10時35分の場合は11時00

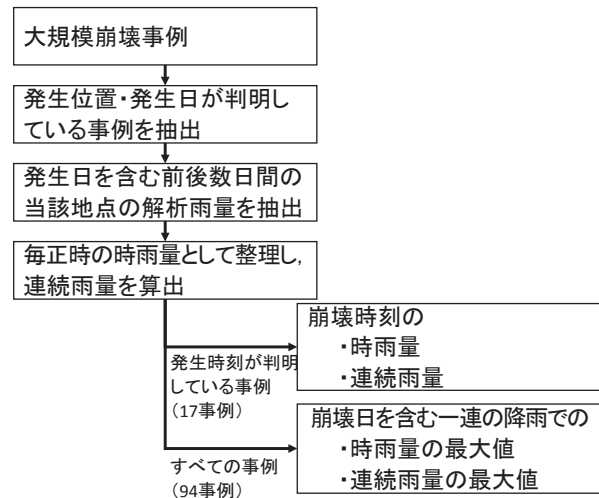


図4 解析雨量の取得と処理の流れ

表1 解析雨量の諸元

解析雨量データの時期	メッシュサイズ (経度方向・緯度方向)	記録頻度	測地系
1988年1月～2001年3月	約5km (0.05度・0.0625度)	1時間ごと	日本測地系
2001年4月～2003年5月	約2.5km (0.025度・0.03125度)	1時間ごと	日本測地系
2003年6月～2005年12月	約2.5km (0.025度・0.03125度)	30分ごと	世界測地系
2006年1月～	約1km (0.0125度・0.0083度)	30分ごと	世界測地系

分の時雨量と連続雨量を、崩壊発生時刻が10時25分の場合は10時00分の時雨量と連続雨量を用いた。またその際、前後の毎正時の時雨量と連続雨量（前出の例の場合、10時00分と11時00分の時雨量と連続雨量）が大きく異なることを確認した。

また対象とした94事例すべてについて、崩壊発生日を含む一連の降雨における時雨量の最大値と連続雨量の最大値を整理した。ここで連続雨量の最大値とは、降り止みまでの連続雨量を指す。これは崩壊発生日のみ判明している事例についても崩壊に至る降雨の状況を把握するための措置であるが、実際の崩壊は時雨量や連続雨量が最大値となる前後でも発生する可能性があるため、データの取扱いに際しては留意する必要がある。

4.2 結果

4.2.1 崩壊発生時刻が判明している事例

崩壊発生時刻が判明している17事例のうち、2事例(事例No.1, 2)は平成9年7月1日から17日にかけての梅雨前線および低気圧による大雨で発生した事例、そのほかの15事例(事例No.3～17)は平成23年8月30日から9月5日にかけての台風12号による大雨で発生した事例である(表2)。4.1節の方法により得られた時雨量と連続雨量の関係についてみると、崩壊が発生するまでの連続雨量は600mmを超えており、非常に多くの降雨があったことがわかる。一方、崩壊直近の時雨量は

表2 崩壊発生時刻が判明している事例

事例 No.	都道府県 および 市町村 ²⁰⁻²³⁾	発生日時 ²⁰⁻²³⁾	緯度 (度)	経度 (度)	崩壊時刻 の時雨量 (mm/h)	崩壊時刻 までの 連続雨量 (mm)
1	鹿児島県 出水市	1997/7/10 0:50	32.132	130.365	0	678.4
2	熊本県 八代市	1997/7/14 8:00	32.395	130.714	31	671.2
3	奈良県 吉野郡 黒滝村	2011/9/3 5:55	34.293	135.905	13	851
4	奈良県 吉野郡 十津川村	2011/9/3 11:00	34.140	135.770	27	847.8
5	奈良県 吉野郡 十津川村	2011/9/3 18:38	34.037	135.802	26	1158.8
6	奈良県 五條市	2011/9/3 19:00	34.136	135.741	20	996.2
7	奈良県 吉野郡 天川村	2011/9/3 22:35	34.225	135.836	3	949.6
8	和歌山県 田辺市	2011/9/4 0:40	33.787	135.445	17	971.2
9	奈良県 吉野郡 十津川村	2011/9/4 3:18	34.121	135.773	2	1054.6
10	奈良県 吉野郡 十津川村	2011/9/4 3:18	34.128	135.781	2	1115.4
11	奈良県 五條市	2011/9/4 7:07	34.155	135.742	0	1062.4
12	奈良県 吉野郡 東吉野村	2011/9/4 7:17	34.353	136.039	5	962
13	奈良県 吉野郡 野迫川村	2011/9/4 10:10	34.145	135.644	0.4	888.2
14	奈良県 吉野郡 天川村	2011/9/4 12:00	34.220	135.835	0	960
15	奈良県 吉野郡 川上村	2011/9/4 17:20	34.339	135.949	0	713
16	三重県 多気郡 大台町	2011/9/4 17:35	34.299	136.253	1	1639.8
17	奈良県 吉野郡 黒滝村	2011/9/5 12:00	34.309	135.879	0	742.4

0～30mmで、このうち3mm以下の事例が10事例あった(表2, 図5)。内田ほか²⁴⁾はアメダスデータを用いて大規模崩壊が発生した箇所の降雨情報について検討した結果、48時間の雨量の累積値が600mmを超えていることを報告しているが、今回の検討結果はその報告と整合していると言える。

また、それぞれの事例について、降雨量の時系列と崩壊発生時刻との関連をみると、時雨量や連続雨量が最大となった時以外でも崩壊が発生する場合があることがわかった(図6, 図7)。

4.2.2 崩壊発生日が判明している事例

崩壊発生日が判明している事例でみると、多くの事例で連続雨量が500mmを超えていること、連続雨量が400～500mmの事例のほとんどは時雨量が50mmを超えていることがわかる(図8)。一方、これらより少ない時雨量・連続雨量で発生している崩壊が2件ある(図8のA, B)。このうち図中Aの事例は九州のシラス台地における崩壊で、崩壊1ヶ月前からの累積1,000mmを

超える先行降雨の影響が指摘されている²⁵⁾。また図中Bの事例では、県の雨量計では最大の時雨量が125mmで連続雨量は655mmまで観測された後に欠測となったとされている²⁶⁾。Bの事例については、取得した解析雨量のメッシュ間隔は2.5kmであり、局地的な雨を観測できなかった可能性がある。

4.3 降雨しきい値の検討

崩壊発生時刻が判明している事例をすべて包含する降雨しきい値は「連続雨量≧約600mm」である。一方、崩壊発生日が判明している事例を考慮すると、概ね過去の事例を包含できるしきい値として

「時雨量≧約50mmかつ連続雨量≧約400mm」

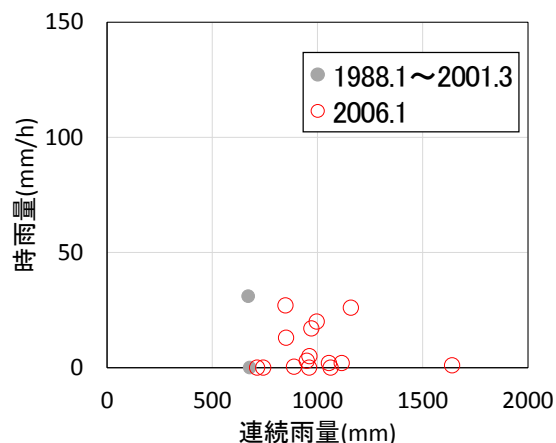


図5 連続雨量 - 時雨量の関係
(崩壊発生時刻が判明している事例)

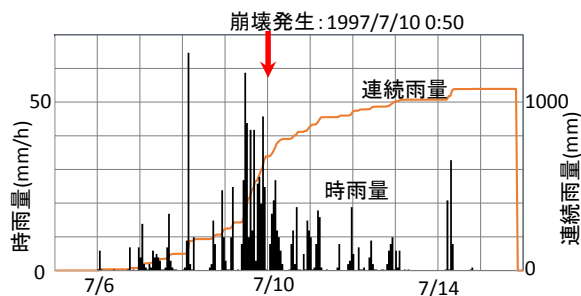


図6 表2の事例 No.1における降雨の状況

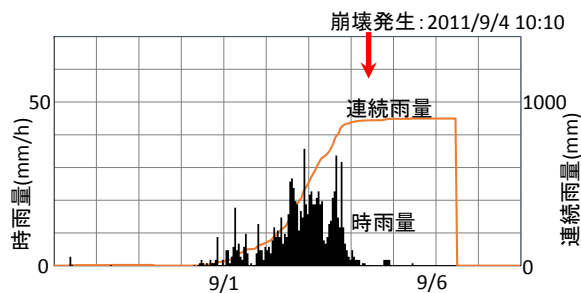


図7 表2の事例 No.13における降雨の状況

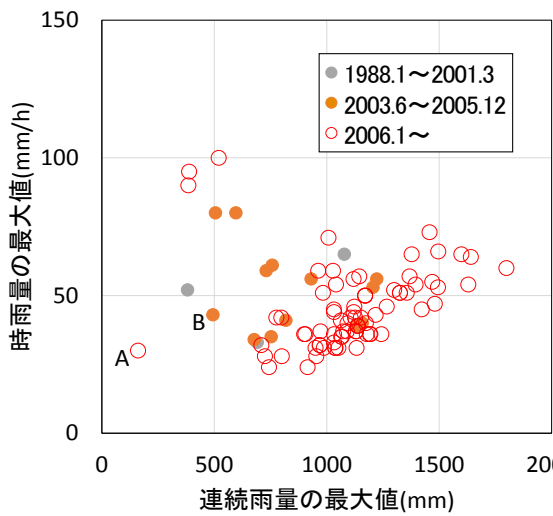


図8 連続雨量 - 時雨量の関係

(崩壊発生日が判明している事例、ただし表2の事例も含む)

または

「連続雨量 \geq 約500mm」

が考えられる。しかし前述のように崩壊発生日が判明している事例の雨量は一連の降雨の最大値であることから、このしきい値よりも少ない降雨で崩壊が発生している可能性がある。また前述のようにこのしきい値よりも少ない降雨で崩壊が発生している事例もあることから(図8のA, B), 前述のしきい値で過去の事例をほぼ包含できるとはいえ、まだ課題が残る。事例に基づく検討には限界があるため、今後は各事例の崩壊メカニズムなども考慮する等により、引き続き検討を進める予定である。

4.4 降雨量と崩壊土砂量の関係

崩壊土砂量を決定する要因としては、素因としての地質や誘因としての降雨などが考えられるが、第3章で記述したとおり、少なくとも大まかな地質区分と崩壊土砂量の間には明瞭な関係がないことがわかっている。そこで、崩壊発生日が判明している94事例のうち崩壊土砂量の記載がある22事例について、降雨量と崩壊土砂量の関係を検討した(図9)。図からは、比較的小規模な崩壊は時雨量50mm以上の降雨で、比較的大規模な崩壊は連続雨量600mm以上の降雨で発生しているように見えるが、いずれもその関係は明瞭ではない。より詳細に分析するためには降雨の状況と崩壊発生時刻が明らかな事例を用いる必要があるが、図9に示した22事例のうち崩壊発生時刻が判明しているのはわずかに4事例であり、現時点ではこれ以上の検討を行うことは難しい。

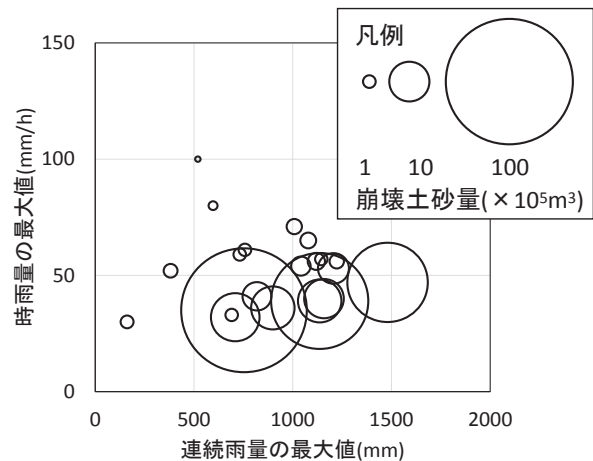


図9 降雨量と崩壊土砂量の関係

5. まとめ

本報告では、事例研究に基づく大規模な斜面崩壊の発生規模と降雨しきい値についての検討結果について記述した。崩壊規模については、あらかじめ崩壊が発生する可能性がある範囲(面積)が推定できれば、崩壊土砂量を推定することが可能である。また崩壊の発生にいたる降雨量については、「時雨量 \geq 約50mmかつ連続雨量 \geq 約400mm」または「連続雨量 \geq 約500mm」をしきい値とできる可能性があるが、今後さらなる検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人:JST)によって実施された。

文献

- 1) 千葉徳爾：明治22年十津川災害における崩壊地の特性について(1), 水利科学, Vol.19, No.2, pp.38-54, 1975
- 2) 千葉徳爾：明治22年十津川災害における崩壊地の特性について(2), 水利科学, Vol.19, No.4, pp.20-38, 1975
- 3) 平野昌繁, 諏訪浩, 石井孝行, 藤田崇, 後町幸雄：1889年8月豪雨による十津川災害の再検討 - とくに大規模崩壊の地質構造規制について -, 京都大学防災研究年報, 第27号B-1, pp.369-386, 1984
- 4) 田畑茂清, 井上公夫, 早川智也, 佐野史織：降雨により群発した天然ダム形成と決壊に関する事例研究 - 十津川災害(1889)と有田川災害(1953) -, 砂防学会誌, Vol.53, No.6, pp.66-76, 2001

特集：防災技術

- 5) 牧原康隆：平成 23 年台風第 12 号と 1889 年（明治 22 年）十津川災害，天気，Vol.59，No.3，pp.151-155，2012
- 6) 横山俊治，村井政徳，中屋志郎，西山賢一，大岡和俊，中野浩：2004 年台風 10 号豪雨で発生した徳島県那賀町阿津江の破碎帯地すべりと山津波，地質学雑誌，Vol.112，補遺，pp.137-151，2006
- 7) 古閑美津久，堀川毅信，宇城輝，谷内正博：2005 年台風 14 号による宮崎県鰐塚山北麓および北郷町広渡川上流の崩壊・土石流，応用地質，Vol.47，No.4，pp.232-241，2006
- 8) 千木良雅弘，松四雄騎，ツォウ・チンイン，平石成美，松澤真，松浦純生：台風 12 号による深層崩壊，京都大学防災研究所年報，第 55 号 A，pp.193-211，2012
- 9) 千木良雅弘：深層崩壊の場所の予測と今後の研究展開について，応用地質，Vol.56，No.5，pp.200-209，2015
- 10) 独立行政法人土木研究所：深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案），土木研究所資料第 4115 号，21p，2008
- 11) 国土交通省，独立行政法人土木研究所：深層崩壊推定頻度マップ，2010
- 12) 国土交通省，独立行政法人土木研究所：深層崩壊跡地密度マップ，2012
- 13) 林野庁：大規模崩壊対策現場対応ハンドブック（案），62p，2014
- 14) 林野庁：大規模崩壊リスク評価マップ作成マニュアル（案），54p，2014
- 15) 林野庁：大規模崩壊潜在斜面危険度判定マニュアル（案），51p，2014
- 16) 公益社団法人砂防学会：深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会 報告・提言，27p，2012
- 17) 国立研究開発法人土木研究所：過去の深層崩壊事例について（～平成 22 年度），2012 https://www.pwri.go.jp/team/volcano/tech_info/study/h23_fy2011/past_dscl-list20120117.pdf（参照日：2018 年 3 月 23 日）
- 18) 日本鉄道施設協会：鉄道施設技術発達史，pp.505-506，1994
- 19) 気象庁 解析雨量の解説 <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kaiseki.html>（参照日：2018 年 3 月 23 日）
- 20) 岩尾雄四郎・玉田文吾・山崎孝成：鹿児島県出水市針原川地域における扇状地災害の発生プロセス，地すべり，Vol.36，No.3，pp.85-90，1999
- 21) 竹下敬司・清水晃：熊本県坂本村，油谷川左岸の深層崩壊（速報），砂防学会誌，Vol.50，No.3，pp.77-80，1997
- 22) 奈良県：平成 23 年紀伊半島大水害 大規模土砂災害に関する調査・研究報告，92p，2015
- 23) 松村和樹・藤田正治・山田孝・権田豊・沼本晋也・堤大三・中谷加奈・今泉文寿・島田徹・海堀正博・鈴木浩二・徳永博・柏原佳明・長野英次・横山修・鈴木拓郎・武澤長純・大野亮一・長山孝彦・池島剛・土屋智：2011 年 9 月台風 12 号による紀伊半島で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.64，No.5，pp.43-53，2012
- 24) 内田太郎・岡本敦：深層崩壊を引き起こした降雨の特徴，土木技術資料，54-11，pp.32-35，2012
- 25) 下川悦郎・小山内信智・武澤永純・地頭蘭隆・寺本行芳・権田豊：2010 年（平成 22 年）7 月鹿児島県南大隅町で発生した連続土石流災害，砂防学会誌，Vol.63，No.3，pp.50-53，2010
- 26) 近藤観慈・林拙郎・沼本晋也：2004（平成 16）年台風 21 号による三重県宮川村の斜面災害，日本地すべり学会誌，Vol.41，No.4，2004