

# 大規模な斜面崩壊の崩壊土砂量の推定と 降雨しきい値に関する事例研究

## A STUDY ON THE THRESHOLD VALUES OF RAINFALL AND THE COLLAPSED VOLUME OF DEEP-SEATED LANDSLIDES BASED ON THE PAST CASES

長谷川 淳<sup>1</sup>・浦越 拓野<sup>2</sup>・福原 隆彰<sup>3</sup>・川越 健<sup>4</sup>

Atsushi HASEGAWA, Takuya URAKOSHI, Takaaki FUKUHARA and Takeshi KAWAGOE

<sup>1</sup>公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番地38)

E-mail: hasegawa.atsushi.61@rtri.or.jp

<sup>2</sup>公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番地38)

E-mail: urakoshi.takuya.38@rtri.or.jp

<sup>3</sup>公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番地38)

E-mail: fukuhara.takaaki.90@rtri.or.jp

<sup>4</sup>公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番地38)

E-mail: kawagoe.takeshi.43@rtri.or.jp

**Key Words:** deep-seated landslide, collapsed volume, collapsed area, rainfall

### 1. はじめに

豪雨による大規模な斜面崩壊(本論では、2章で記述する条件に該当する斜面崩壊を「大規模な斜面崩壊」として定義し、いわゆる「深層崩壊」事例もこれに含む)の事例としては、古くは1889年の明治十津川大水害や1953年の有田川水害が知られており、自治体による災害の記録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、崩壊規模の記載がまちまちであることや、崩壊の原因となった降雨の詳細が明らかでないことなどから、降雨と崩壊規模の関係について詳細な検討は行われていない<sup>3)</sup>。2000年代になると九州地方や近畿地方などで局地的な豪雨による大規模な斜面崩壊が多発し、各地で詳細な調査や検討が行われるようになった(例えば6-9など)ほか、国や関係機関が各種マニュアルなどをまとめるなど<sup>10-15)</sup>、様々な取り組みが行われている。

一方、降雨量の観測については、1988年から気象

レーダーとアメダスなどの地上の雨量計を組み合わせ、降水量分布をメッシュで解析した「解析雨量」が導入された。2006年以降はメッシュ区切りが1km四方となり、約17kmメッシュで配置されているアメダス雨量計のみでは把握できない局地的な豪雨を解析雨量で把握できる可能性がある。

大規模な斜面崩壊は、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、多量の崩壊土砂など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場所にあっても被災あるいは影響を受ける可能性がある。そこで筆者らは、大規模な斜面崩壊が発生した場合の鉄道への影響を評価するため、①大規模な斜面崩壊が発生する可能性がある箇所の抽出手法の構築、②大規模な斜面崩壊が発生しうる降雨量のしきい値の検討、③崩壊土砂量と崩壊土砂の到達範囲の推定手法の構築を目指し、検討を行っている。

本論では、このうち、過去の事例に基づく崩壊規模の推定手法と、大規模な斜面崩壊の発生の誘因となった降雨のしきい値について解析雨量を用いて検討した結果について記述する。

## 2. 大規模な斜面崩壊の事例調査

日本国内で発生した大規模な斜面崩壊の事例について、土木系や地球科学系の学会誌・協会誌、その他災害調査報告などの公表資料から、文献や資料を収集した。また各崩壊事例について、文献に記載されている範囲で、大規模な斜面崩壊の発生場所、日時と、崩壊地の幅・長さ・深さ・面積、崩壊土砂量（以下、崩壊の諸元と称する）を整理した。

また本検討では、砂防学会<sup>16)</sup>や土木研究所<sup>17)</sup>の定義を参考に、①崩壊土砂量が10,000m<sup>3</sup>以上、②崩壊地の深さが5m以上、③崩壊の主な誘因が降雨、④地すべりや岩盤崩壊ではない、の4つの条件を満たすものを大規模な斜面崩壊と定義し、前述の文献調査により193事例を抽出した。なお、いくつかの事例では複数の文献において崩壊の諸元の値が異なる場合があったため、その際は崩壊の諸元のうち最も多くの項目の値が記載されている文献の値を採用した（例えば崩壊の幅・長さ・面積が記載されている文献と崩壊の幅・長さ・面積・崩壊土砂量が記載されている文献の2種類があれば、後者を採用）。

## 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）と崩壊土砂量との関係について検討した（図-1～図-3）。崩壊幅・崩壊長さとも崩壊土砂量との関係は、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、図-2）。一方、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たため、累乗近似により以下の回帰式を得た。ここで決定係数 $R^2$ は0.90である（図-3）。

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

$V$ : 崩壊土砂量,  $A$ : 崩壊面積

これは、崩壊面積と崩壊土砂量との関係がべき乗則： $V \propto A^\delta$ として評価されるとする既往研究（例えば<sup>18)</sup>）と同様な結果である。*A. Klar et al.* (2011)<sup>18)</sup>では、*Guzzetti et al.* (2009)<sup>19)</sup>をはじめとする同種の研究をとりまとめ、 $\delta = 1.4 \pm 0.2$ を示しているが、本

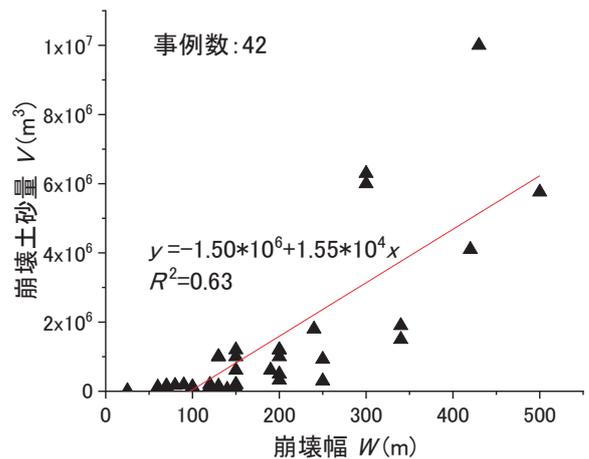


図-1 崩壊幅と崩壊土砂量の関係

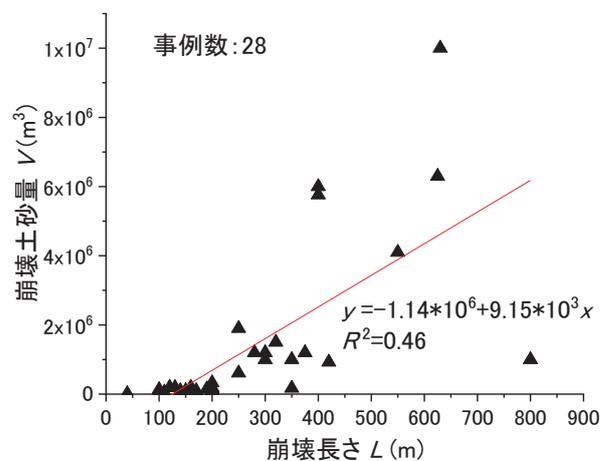


図-2 崩壊長さとも崩壊土砂量との関係

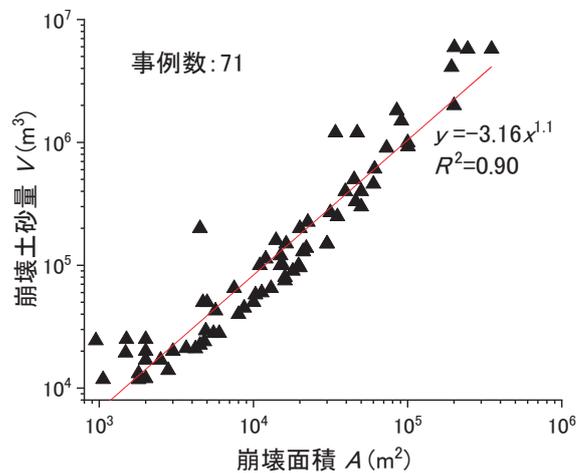


図-3 崩壊面積とも崩壊土砂量との関係

研究で得られた $\delta$ はこれらよりやや小さい値である。

また地質と崩壊土砂量との関係は明瞭ではないものの、秩父帯、三波川帯、三郡変成岩類、飛騨帯、丹波帯などの形成時代が古い地質に比べ、形成時代が比較的新しい四万十帯や第四系～古第三系の堆積岩類の方が、崩壊土砂量が多くなる傾向がみられる（図-4）。

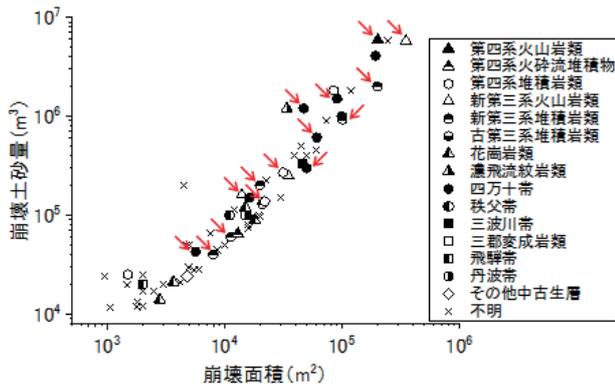


図-4 地質区分ごとの崩壊面積と崩壊土砂量の関係

(図中の矢印で示す凡例が四万十帯や第四系～古第三系の堆積岩類の崩壊事例)

#### 4. 降雨のしきい値の検討

大規模な斜面崩壊の発生と降雨量に関する既往研究には、アメダスデータを用いた例<sup>20)</sup>や、2011年の紀伊半島の事例について解析雨量による検討を行った例<sup>21)</sup>などがあり、累積の降雨量で600～700mm以上の降雨で大規模な斜面崩壊が発生していることが報告されている。本検討では、第2章で抽出した事例のうち、崩壊発生日と崩壊箇所の位置が文献に明示されている94事例を対象とし、崩壊発生日の降雨量を気象庁の解析雨量をもとに整理した。

##### (1) 検討方法

対象とした94事例のうち、崩壊発生日時刻が既知の事例は17、崩壊発生日のみ既知の事例は77であった。これらの事例について、崩壊発生日を含む前後数日間の崩壊位置を含むメッシュの解析雨量を抽出した。解析雨量はデータの取得時期によって記録頻度が異なり、2003年5月以前が1時間ごと、2003年6月以降が30分ごととなっている(表-1)。そこで本検討では1時間ごとのデータに合わせることで、2003年6月以降の30分ごとのデータについては、毎正時の前1時間雨量(例えば、9時の前1時間雨量とは8時から9時の雨量を指す。以下、時雨量と称する)を抽出することとした。そしてこの時雨量をもとに、雨量の累積値(以下、連続雨量と称する)を算出した。ここで連続雨量とは、雨の降り始めからある時刻までの雨量の累積値であり、雨量の累積をリセットするための「無降雨の継続時間」は「24時間」とした。

また、崩壊発生日時刻が判明している17事例については、崩壊発生日時刻の時雨量と連続雨量を求める際に、崩壊発生日時刻を30分単位で切り上げ/切り捨てとした。つまり、崩壊発生日時刻が9時35分の場合は

表-1 解析雨量の記録頻度

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

表-2 崩壊時刻が既知の17事例

事例 No.	都道府県 および 市町村 <sup>22-25)</sup>	発生日時 <sup>22-25)</sup>	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

10時00分の時雨量と連続雨量を、崩壊発生日時刻が9時25分の場合は、9時00分の時雨量と連続雨量を用いた。この際、前後の毎正時の時雨量と連続雨量(前出の例の場合は9時00分と10時00分の雨量)が大きく異なることを確認している。

対象とした事例のうち77事例は崩壊発生日のみ既知であったため、崩壊発生日時刻が明らかな17事例も含めた全94事例について、崩壊日を含む一連の降雨における時雨量と連続雨量の最大値を整理した。

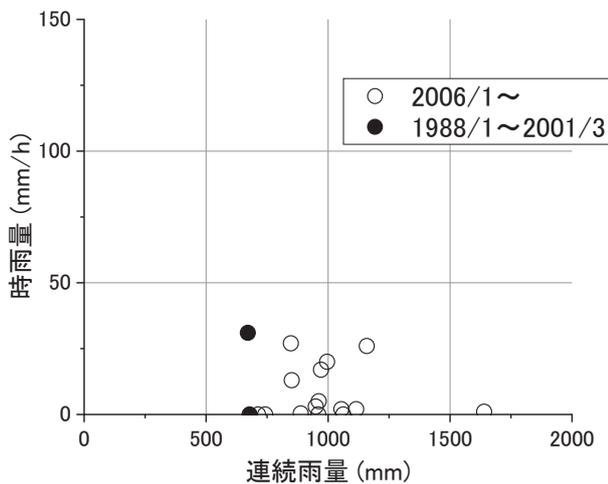


図-5 崩壊時刻が既知の事例における連続雨量と時雨量の関係

ここで、連続雨量の最大値とは、降り止みまでの連続雨量のことであり、実際の崩壊は連続雨量が最大となる前に発生することもあるため、データの解釈にあたっては留意する必要がある。

## (2) 連続雨量と時雨量の関係

### a) 崩壊発生時刻が既知の事例

崩壊発生時刻が既知の17事例のうち、15事例(事例No. 3~17)は2011年の台風12号による紀伊半島での事例で、他の2事例は、平成9年7月の梅雨前線、低気圧による大雨で発生した事例である(表-2)。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を超えていることがわかる。これは、アメダスデータを用いて大規模な斜面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600mmを超えているとした内田ほか<sup>20)</sup>の報告と整合していると言える。一方、崩壊発生直前の時雨量は0~30mmであり、このうち3mm以下の事例が10事例あった(表-2、図-5)。これらのことは、大規模な斜面崩壊の発生には、短時間の強い雨よりも累積で多量の雨の方が影響する可能性があることを示唆する。

### b) 崩壊発生日が既知の事例

崩壊発生日が既知の事例で見ると、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-6)。一方、これらより少ない降雨で発生している事例が2件ある(図-6のA, B)。Aの事例はシラス台地における崩壊で、崩壊の1ヶ月前からの累積で1,000mmを超える先行降雨の影響が指摘されている<sup>26)</sup>。またBの事例では、県の雨量計では時雨量の最大値が125mm、連続雨量は655mm

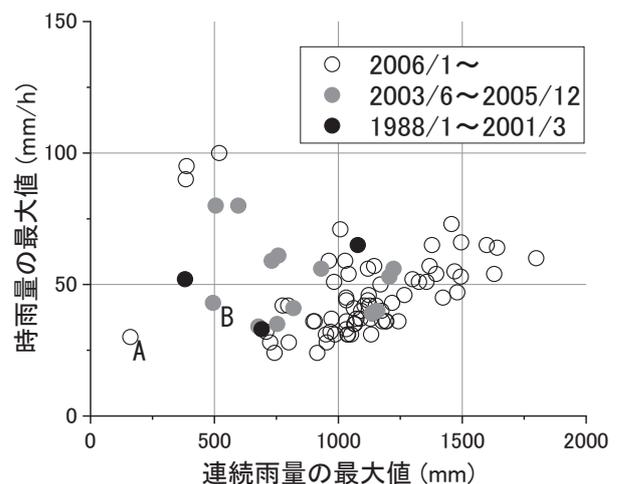


図-6 崩壊日が既知の事例における連続雨量と時雨量の関係

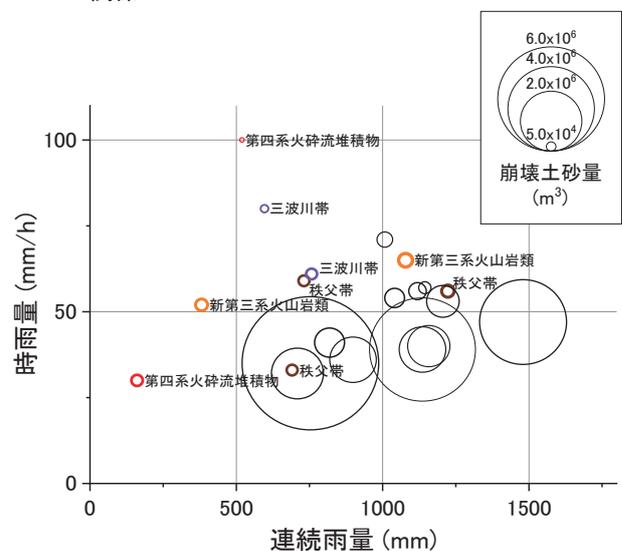


図-7 降雨量、崩壊土砂量、地質区分の関係

(バブルチャート記号の右側に地質区分を記載、地質区分が記載されていないバブルチャート記号はいずれも四万十帯の事例)

まで観測された後に欠測となったとされている<sup>27)</sup>。Bの事例については、崩壊発生日が1997年で、解析雨量のメッシュ間隔が2.5kmであることから、当該降雨はごく局所的に降っており、その雨を観測できなかった可能性がある。

## (3) 降雨のしきい値

過去の崩壊事例をカバーする降雨量のしきい値としては、崩壊時刻が既知の事例については

「連続雨量 $\geq$ 600mm」

が、崩壊日のみが既知の事例については、

「時雨量 $\geq$ 50mmかつ連続雨量 $\geq$ 400mm」

または

「連続雨量 $\geq$ 500mm」

が考えられる。前述のように、後者についてはこれらの降雨量よりも少ない降雨で崩壊が発生している場合があるため課題が残るが、大規模な斜面崩壊が発生しうる降雨量の一つの指標となる可能性があると言えよう。

#### (4) 地質区分ごとの降雨量と崩壊土砂量の関係

対象とした 94 事例のうち崩壊土砂量の記載があった 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-7)。図からは、堆積岩類(秩父帯, 四万十帯)に比べ、火成岩類・変成岩類(第四系火山岩類, 新第三系火山岩類, 三波川帯)は比較的崩壊規模が小さく、また時雨量の最大値が大きい降雨で崩壊する傾向がみられる。また四万十帯での崩壊では、時雨量 50mm を境として、時雨量が多い降雨の場合に崩壊規模が比較的小さくなる傾向がある。このように地質と崩壊規模と時雨量の間には何らかの関係がある可能性がある。より詳細に検討するためには、崩壊時刻が判明した事例に限定して解析する必要があるが、図-7 に示した 22 事例のうち崩壊時刻が既知なのはわずかに 4 事例であり、現状でこれ以上の検討は難しい。

## 5. 結論

本論では、大規模な斜面崩壊の崩壊土砂量の推定と降雨しきい値について、事例研究を行った結果について記述した。その結果、崩壊土砂量は崩壊面積と高い相関関係にあること、過去の大規模な斜面崩壊は「時雨量 $\geq$ 約 50mm かつ連続雨量 $\geq$ 約 400mm」または「連続雨量 $\geq$ 500mm」という降雨条件で包含されることがわかった。

**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。

#### 参考文献

- 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の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
- 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砕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](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) A.Klar, E.Aharonov, B.Kalderon-Asael, and O.Katz：Analytical and observational relations between landslide volume and surface area, *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, F02001, 2011
- 19) Guzzetti, F., F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Rossi, and D. Valigi (2009) : Landslide volumes and landslide mobilization

rates in Umbria, central Italy, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 279, pp.222-229, 2009

20) 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

21) 千木良雅弘: 深層崩壊, p.72, 近未来社, 2013

22) 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

23) 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

24) 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

25) 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

26) 下川悦郎, 小山内信智, 武澤永純, 地頭菌隆, 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

27) 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

(2018.5.18 受付)