

深層崩壊を対象とした降雨の超過確率年 による発生限界雨量基準

CRITICAL RAINFALL FOR DEEP-SEATED LANDSLIDES USING PROBABLE RAINFALL

竹本 大昭¹・北本 楽²・小杉 恵²・海原 莊一³・木下 篤彦⁴・中谷 洋明⁵

Hiroaki TAKEMOTO, Gaku KITAMOTO, Megumi KOSUGI, Soichi KAIHARA,

Atsuhiko KINOSHITA and Hiroaki NAKAYA

¹(株)エイト日本技術開発 (〒164-8601 東京都中野区本町 5 丁目 33-11)

²国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 (〒637-0002 奈良県五條市三在町 1681)

³(株)エイト日本技術開発 (〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町 3 丁目 1-21)

⁴国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター
(〒649-5332 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々 3027-6)

⁵国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

Key Words: *early warning, critical rainfall, probable rainfall, deep-seated landslide*

1. はじめに

土砂災害警戒情報¹⁾で対象とする土石流や集中して発生するがけ崩れは、土砂災害警戒区域等の溪流や斜面の近隣で被害が発生するが、深層崩壊の場合は、河道閉塞の形成と越流決壊に伴い、その下流で洪水氾濫が生じ、被害が広域に及ぶ可能性がある等、警戒避難の面で課題がある。深層崩壊の警戒避難に関連し、発生しやすい場所に関しては、深層崩壊頻度マップ²⁾や深層崩壊に対する溪流(小流域)レベル調査³⁾が公表されている。一方、表層崩壊等と比べて発生降雨条件も大きく異なる深層崩壊に対して、警戒避難体制の整備を進めるためには、深層崩壊が発生する降雨条件(以下、発生限界雨量基準と表記)の把握が重要となる。

近年、深層崩壊の発生予測に関する様々な研究が進められている。内田ら⁴⁾は、2011年までに発生した降雨起因の深層崩壊データ⁵⁾と各深層崩壊に最も近いアメダスの雨量を用いて、深層崩壊発生降雨と雨量値との関係进行分析し、48時間雨量600mmを境界として複数同時期に発生した深層崩壊(以下、「複

数発生」と表記、複数発生以外の深層崩壊を「単発生」と表記)が増加することを示している。

筆者らは深層崩壊の発生限界雨量基準を検討する上で、年間降雨量が2,000mmを超えるような多雨地域とそれよりも雨量の少ない地域等、降雨特性の違い等によって、発生限界雨量基準は異なる可能性があると考えており、その分析にあたっては、深層崩壊が発生する可能性が高い地域に限定した上で降雨特性の異なる地域毎に雨量値と深層崩壊の関係を分析することが重要と考えている。

また、深層崩壊の発生限界雨量基準の設定にあたり、各地域で深層崩壊発生データ自体が少ない上、深層崩壊に影響したと考えられる発生降雨量が、非発生降雨量と比べて極端に大きいことから、発生限界雨量基準を設定しにくいといった課題がある。

このため、現在の少ない深層崩壊データ数のもと、発生限界雨量基準を検討するには、既往検討⁴⁾のように全国的な深層崩壊の発生データを使用する必要があると考える。加えて、発生限界雨量基準の社会実装を行うには、基準を超過した降雨数に対する非発生降雨数(空振り)が少ないことも重要であるた



図-1 検討フロー

め、その視点での評価と、超過確率年のように降雨特性の違いを考慮できる統一的な降雨指標による評価が重要と考えている。

降雨の超過確率の考えを深層崩壊に適用した研究としては、坂井ら⁶⁾が土砂災害分類毎の降雨確率の違いについて、崩壊規模を詳細に把握可能であった5地域を対象に分析しており、72時間雨量の超過確率年が20年確率を超える降雨で土砂災害に深層崩壊が含まれる可能性が非常に高くなるとしている。

以上を背景として本研究では、図-1に示す検討フローに基づき、深層崩壊の発生限界雨量基準となる雨量値の大小関係が、地域特性によって異なる可能性を考慮し、検討対象を深層崩壊の実績を有する深層崩壊小流域マップ⁷⁾等の地域に限定するとともに、降雨特性の異なる地域に区分した上で解析を行った。

また、本研究では全国を対象とした解析が可能となるように深層崩壊データは、可能な限り既往の深層崩壊に関する災害調査資料等を収集整理するとともに、広域で雨量の平面分布が把握できる解析雨量を使用した。これらのデータを基に深層崩壊の発生限界雨量基準については、雨量値に加え、坂井らの検討⁶⁾と同様に超過確率年での評価を検討した。また、発生限界雨量基準を検討する際の着眼点として、先ず内田ら⁴⁾の検討を参考に複数・単発発生境界を検証し、次に非発生降雨数が低減する境界、崩壊規模が大となる境界等、多様な視点で各境界の超過確率年を分析した。最後にこれらの分析結果を踏まえ、既往検討⁴⁾の検証も含め、深層崩壊の発生限界雨量基準について考察し、今後の課題を整理した。

2. 検討対象地域及び使用したデータ

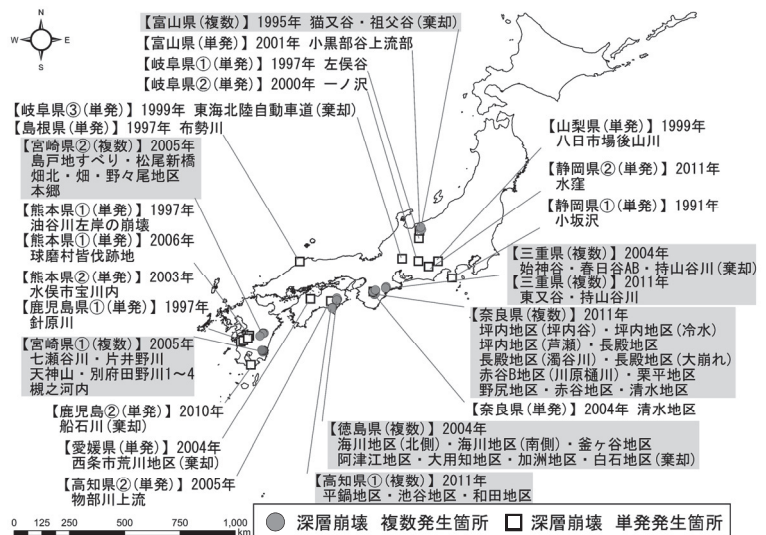


図-2 検討対象地域、深層崩壊発生位置 (59データ)

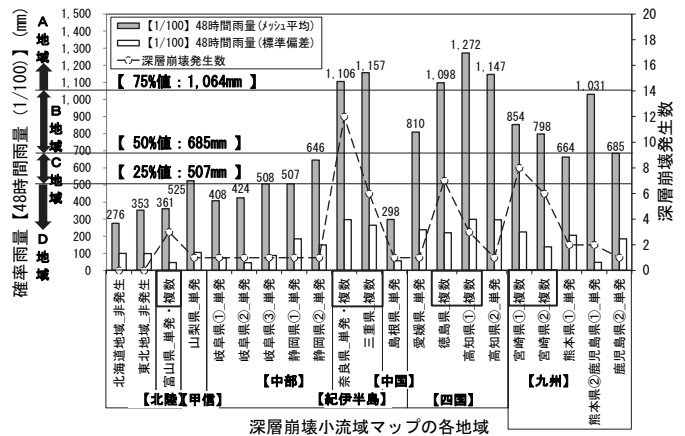


図-3 48時間雨量(1/100年)の雨量値による降雨特性区分

(1) 検討対象地域

図-2に深層崩壊発生の発生実績を有する20地域(深層崩壊小流域マップ⁷⁾等)と本研究で対象とした深層崩壊の複数発生及び単発発生箇所の計53件と検討過程で棄却した6件の位置を示した。解析単位は各地域内の1kmメッシュとした。図-3には、各地域の48時間雨量(1/100)の雨量値(確率評価方法は後述)を棒グラフで示し、折れ線グラフで深層崩壊発生数を示した。各地域の降雨特性は48時間雨量(1/100)を四分位法によりA~Dの4つに区分して表現した。例えば、図-3の「奈良県_単発_複数」では深層崩壊の複数、単発発生数が計12件あり、48時間雨量(1/100)は1,106mm(≥1,064mm)であるため、A地域に該当する。なお、東北、北海道地域は降雨起因の深層崩壊非発生地域として参考までに示した。

- ・A地域 (75%値以上) : 1,064mm 以上
- ・B地域 (50%値~75%値) : 685mm~1,064mm
- ・C地域 (25%値~50%値) : 507mm~685mm
- ・D地域 (25%値未満) : 0mm~507mm

表-1 使用した深層崩壊データ一覧表

NO	地域	降雨特性区分	深層崩壊発生箇所	深層崩壊区分	災害発生日時				崩壊規模 (千m ³)	
					年	月	日	時		
1	富山県	D	猫又谷	複数	1995	7	12	不明	250	
2		C	小黒部谷上流部	単発	2001	7	2	不明	230	
3	山梨県	D	八日市場後山川	単発	1999	6	30	不明	84	
4	岐阜県①	D	左俣谷上岩小屋沢	単発	1997	7	10	不明	300	
5	岐阜県②	C	一ノ沢の崩壊	単発	2000	9	11	不明	1,200	
6	静岡県①	D	小坂沢	単発	1991	9	10	16	120	
7	静岡県②	C	水窪	単発	2011	9	4	18	1,500	
8	奈良県	A	清水地区	単発	2004	8	2	24	200	
9		A	野尻地区	複数	2011	9	3	19	2,510	
10		A	栗平地区	複数	2011	9	4	8	25,130	
11		A	長殿地区(大崩れ)	複数	2011	9	4	3	490	
12		A	赤谷地区	複数	2011	9	4	17	9,350	
13		A	長殿地区(濁谷川)	複数	2011	9	4	2	2,710	
14		A	長殿地区	複数	2011	9	4	11	6,340	
15		A	赤谷B地区(川原樋川)	複数	2011	9	3	19	6,060	
16		A	清水地区	複数	2011	9	4	7	1,620	
17		A	坪内地区(坪内谷)	複数	2011	9	4	10	400	
18		A	坪内地区(冷水)	複数	2011	9	4	12	1,440	
19		A	坪内地区(芦瀬)	複数	2011	9	3	23	390	
20		三重県	A	春日谷B	複数	2004	9	29	11	330
21			A	春日谷A	複数	2004	9	29	11	100
22	A		始神谷	複数	2004	9	29	11	100	
23	A		持山谷川	複数	2011	9	4	18	700	
24	A		東又谷	複数	2011	9	4	15	7,000	
25	島根県	D	布勢川の崩壊	単発	1997	7	12	7	100	
26	徳島県	A	阿津江地区	複数	2004	8	2	2	1,000	
27		A	大用知地区	複数	2004	8	1	21	1,000	
28		A	加洲地区	複数	2004	8	1	21	400	
29		A	釜ヶ谷地区	複数	2004	8	1	不明	130	
30		A	海川地区(北側)	複数	2004	8	1	不明	160	
31		A	海川地区(南側)	複数	2004	8	1	不明	108	
32		高知県①	A	物部川上流別府中	単発	2005	9	7	不明	680
33	高知県②	A	平鍋地区	複数	2011	7	19	19	1,400	
34		A	池谷(小島)地区	複数	2011	7	19	19	300	
35		A	和田地区	複数	2011	7	19	19	100	
36	宮崎県①	B	槻之河内	複数	2005	9	6	不明	1,400	
37		B	天神山	複数	2005	9	6	不明	6,000	
38		B	片井野川	複数	2005	9	6	不明	1,200	
39		B	別府田野川1	複数	2005	9	6	不明	1,680	
40		B	別府田野川2	複数	2005	9	6	不明	1,680	
41		B	別府田野川3	複数	2005	9	6	不明	1,680	
42		B	別府田野川4	複数	2005	9	6	不明	1,680	
43		B	七瀬谷川	複数	2005	9	6	不明	520	
44		宮崎県②	B	野々尾地区	複数	2005	9	6	22	3,300
45			B	島戸地すべり	複数	2005	9	6	22	360
46	B		松尾新橋	複数	2005	9	6	不明	1,280	
47	B		畑北	複数	2005	9	6	不明	1,130	
48	B		畑	複数	2005	9	6	8	250	
49	B		本郷	複数	2005	9	6	不明	6,300	
50	熊本県①		C	油谷川左岸の崩壊	単発	1997	7	14	不明	100
51		C	球磨村皆伐跡地	単発	2006	7	22	不明	70	
52	熊本県②	B	水俣市宝川内	単発	2003	7	20	5	96	
53	鹿児島県①	B	針原川	単発	1997	7	10	1	200	

(2) 使用データ及び検討方法

a) 降雨データと降雨指標

検討にあっては、1991年～2021年間の解析雨量を使用した。対象とした降雨指標は1時間、24時間、48時間、72時間雨量の4指標とした。

各深層崩壊の発生降雨については、無降雨期間24時間で区切られる一連降雨の中で、発生時刻を含む発生時刻以前の最大値を使用した。時刻が不明な場合は、発生日の中での最大値を使用した。非発生降雨については一連降雨中の最大値で評価した。

b) 使用した深層崩壊データ

深層崩壊データについては、降雨が誘因となって発生した事例に関する既往資料⁹⁾での災害に2011年台風第12号等の災害を追加した上で解析雨量データが存在する1991～2021年の59件(図-2)のうち、発生降雨量が地上雨量計(発生箇所から10km圏内のアメダス、国交省テレメータ)と解析雨量で2倍以上異なるもの、崩壊規模が不明なもの等の6件を棄却した計53件(表-1)を使用した。また、各深層崩壊の崩壊土砂量については、既往資料⁹⁾に示された文献での崩壊深・幅・延長より簡易に推定した。

表-1のNo.27大用知地区(2004年)の崩壊は、8月1日未明から8月1日21時頃にかけて徐々に崩壊が拡大した事例⁸⁾であるが、一連降雨中に崩壊が拡大した事例については、各崩壊の発生タイミングと土砂量に関する詳細なデータがないため、1回の崩壊として取り扱った。なお、紀伊半島の熊野川流域で複数発生した事例のうち、No.15赤谷B地区(川原樋川)は、検討期間内に十津川大水害(1889年)での崩壊が拡大崩壊した事例であるが、100年以上経過していることも考慮し、参考までに対象とした。

c) 確率評価手法

確率評価手法としては、データの変動や偏りの影響を受けにくいL-moments法⁹⁾を適用した。なお、確率分布モデルの設定期間については、本来、対象とした深層崩壊データが存在する期間以前も含めて可能な限り長い期間であることが望ましいと考える。

解析雨量は、2003年以降に時間間隔の変更(1時間→30分間)、2006年以降に格子サイズの変更(2.5km→1km)及びレーダー雨量値を校正できる地上雨量計が増えたため、2002年以前、2003～2005年、2006年以降で精度が大きく異なる。また、2003～2005年は、耳川・鰐塚山周辺(2005年)、那賀川流域(2004年)等の多くの複数発生の災害が発生している。このため、確率分布モデル自体の設定期間については2003～2021年の19年間とした。

3. 深層崩壊と降雨量及び超過確率の関係分析

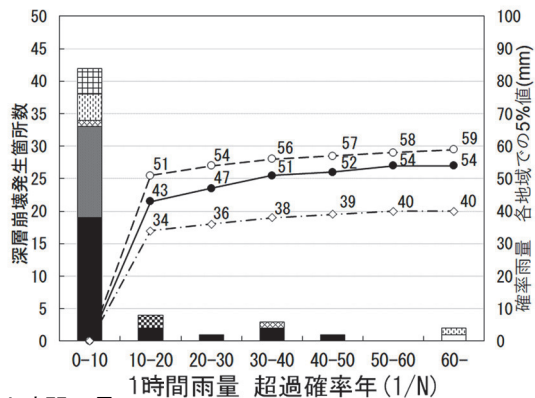
(1) 深層崩壊複数発生、単発発生の確率境界

図-4の(a)～(d)には、横軸に1時間、24時間、48時間、72時間雨量の超過確率年、縦軸(左)に深層崩壊の単発発生数、複数発生数を棒グラフ(各凡例はA～D地域に対応)で示し、縦軸(右)に確率雨量値を折れ線グラフでA～D地域毎に示した。なお、確率雨量値は、各地域で存在する1kmメッシュ内の下位5%値(95%カバー)とした。

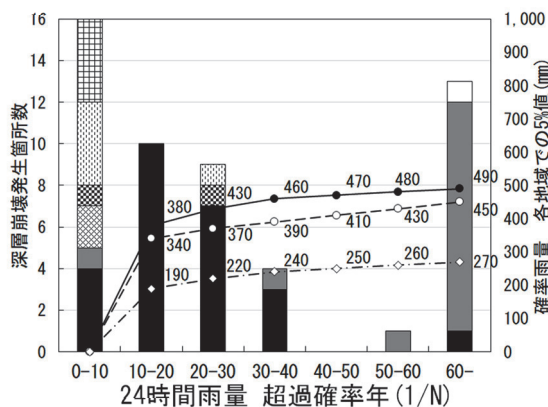
図-4より、既往検討⁹⁾と同様に(a)1時間雨量や(b)24時間雨量と比べて、(c)48時間雨量や(d)72時間雨量では、複数発生と単発発生の境界が明瞭に示される結果となった。また、本検討によって48時間、72時間雨量ともに超過確率年1/30年を境界として、



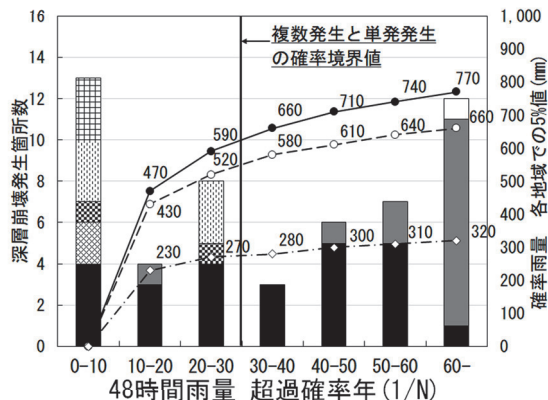
(a) 1時間雨量



(b) 24時間雨量



(c) 48時間雨量



(d) 72時間雨量

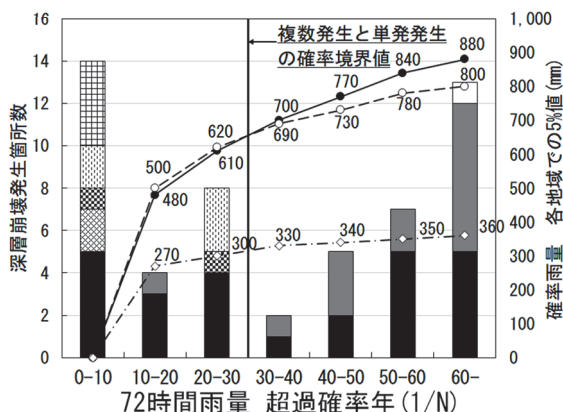


図-4 各降雨指標での複数発生と単発生の境界値

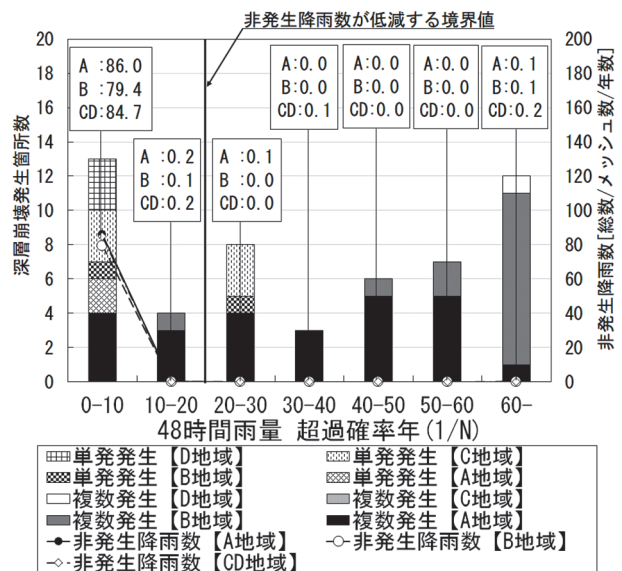


図-5 48時間雨量 非発生降雨数が低減する境界値

複数発生数が右肩上がり増加する傾向を示した。

図-4(c)の48時間雨量において、超過確率年 1/30～1/40年に対応する確率雨量値は、例えば、紀伊半島(2011年)等のA地域で660mm、耳川・鰐塚山周辺(2005年)等のB地域では580mmとなっている。上記より、既往検討⁴⁾での600mmに相当する地域はB地域となるが、本検討では、降雨特性の異なる地域間で境界となる雨量値が異なる結果となった。

なお、降雨量の少ない地域となるC、D地域での1/30～1/40年確率雨量は600mmよりも小さいが、この地域では深層崩壊のデータ数が少ないため、現データのみで境界値を明瞭に示すことは難しく、今後のデータの蓄積が必要と考えている。

(2) 非発生降雨数に着目した確率境界

図-5に1991年～2021年(31年)の非発生降雨数(1kmメッシュ/1年当り)を図-4(c)の棒グラフに重ねて示した。図-5右側軸の折れ線グラフより、超過確率年 1/10～1/20年にて、非発生降雨数が大きく低減し、1/20年よりも低確率では非発生降雨数が、ほぼ横ばいとなっている。このことから、1/20年を境界値として深層崩壊の発生限界雨量基準を設定しても空振り頻度の問題は少ないことが明らかとなった。

(3) 崩壊土砂量に着目した確率境界

図-6は、図-4(c)の深層崩壊発生箇所数を崩壊土砂量(各超過確率カテゴリに該当する深層崩壊の平均崩壊土砂量)に変更して整理した。図-6より、耳川・鰐塚山周辺や紀伊半島での赤谷・長殿・栗平等の大規模な深層崩壊数は、1/40年を境界として増加する傾向を示す結果となった。

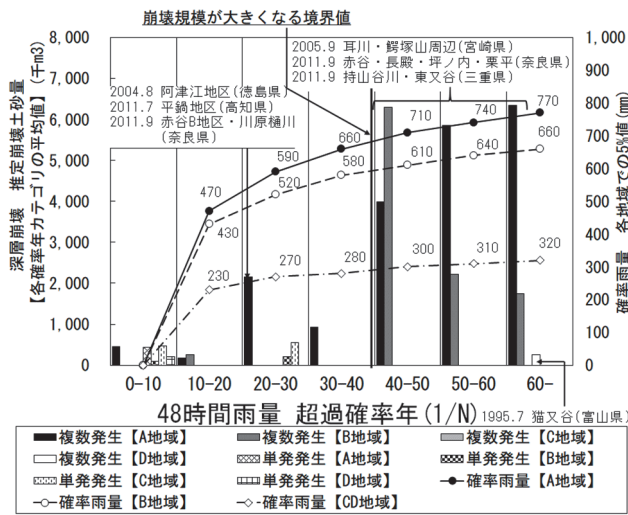


図-6 48時間雨量 崩壊土砂量に着目した境界値

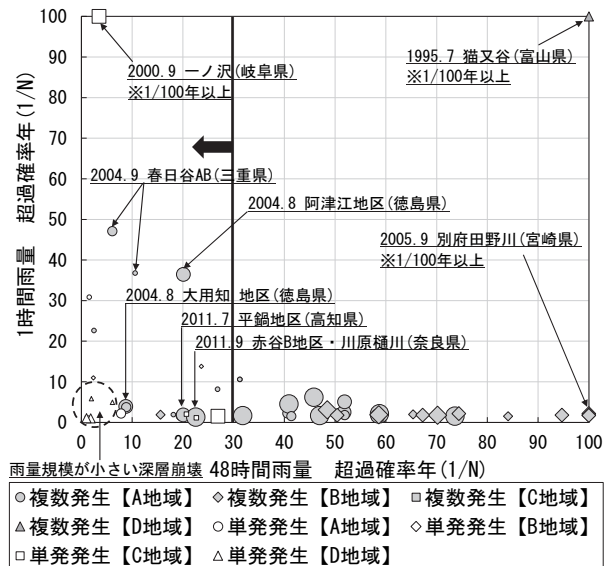


図-7 1時間雨量と48時間雨量の超過確率年の分布図

4. 深層崩壊発生限界雨量基準の考察と課題

以上の分析結果より、深層崩壊の発生限界雨量基準としては、各地域にて個別で検証する必要があるものの、概ね48時間雨量 1/20年～1/40年が目安になるものとする。ただし、深層崩壊の発生限界雨量基準として超過確率 1/20年等は一般的な感覚でいえば高確率（超過確率年が低い）であるイメージがある。このため、上記超過確率年の妥当性を以下に示す視点から考察し、今後の課題として整理した。

(1) 短期降雨が卓越した深層崩壊

48時間雨量が高確率となった深層崩壊の中には、1時間雨量等の短期降雨指標が卓越して、崩壊に至った可能性が考えられる。そこで、図-7に1時間雨量の超過確率年を縦軸に48時間雨量の超過確率年を横軸として、深層崩壊発生降雨の分布を整理した。なお、図-7に示した各深層崩壊の凡例については、崩壊土砂量を四分位法で4つに区分し、各々の凡例の大きさで土砂量の違いを表現した（極小：200千m³未満、小：200～680千m³、中：680～1,680千m³、極大：1,680千m³以上）。

図-7より、48時間雨量の超過確率年が1/30年よりも高確率で発生した深層崩壊の中には、一の沢（岐阜県2000年発生）、春日谷B（三重県2004年発生）のように、1時間雨量の超過確率が低確率の事例も確認された。これらの災害については、48時間雨量等の長期降雨指標のみで発生予測を行うことは難しいが、土砂災害警戒情報¹⁾等との併用等を検討することで警戒・監視を行うことも可能と考えられる。

また、図-7では1時間雨量も48時間雨量も高確率で深層崩壊が発生した事例も存在する（図-7破線

の囲み）。これらの災害は降雨のみで説明が困難な事例と考えられる。本検討では、深層崩壊小流域マップ内に限定して解析したが、上記事例は、詳細な素因の違い等で発生した可能性があるため、今後は素因の違いにも着目し、分析する必要があると考える。

(2) 確率評価期間と雨慣れ等

本研究で使用した深層崩壊データは、2011年までのデータである。その中で確率分布モデルの設定は、前述のとおり、深層崩壊発生後の期間の降雨も含めて解析した。このため、深層崩壊発生後の降雨の影響により高確率化している可能性がある。そこで、図-7において、48時間雨量の超過確率年が1/30年よりも高確率の事例のうち、崩壊土砂量が比較的大きい阿津江地区（徳島県2004年発生）、大用知地区（徳島県2004年発生）、平鍋地区（高知県2011年発生）、赤谷B地区・川原樋川（奈良県2011年発生）について、深層崩壊発生前後の48時間雨量の年最大値を表-2に整理した。

表-2より、阿津江地区、大用知地区、平鍋地区では、深層崩壊発生後から2021年までの間に発生降雨相当の降雨が確認される。特に大用知地区では深層崩壊発生年から7年後の2011年、平鍋地区では発生年から3年後の2014年において、発生降雨を超える雨量値が確認されている。このことから、今後は雨なれ等による高確率化の課題も踏まえて、深層崩壊の発生限界雨量基準を検討する必要があると考える。また、本研究では、確率分布モデルの設定に際して、2003年以前の最大雨量値を反映できていない。このため、超過確率自体の信頼性向上を図る方法についても、今後、検討する必要があると考える。

表-2 深層崩壊発生年及び崩壊発生前後の48時間雨量 年間最大値

県	地区	各年の48時間雨量 最大値 (mm)																				全体
		2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	最大値	
奈良	赤谷B地区	260	186	166	107	209	98	190	112	790	160	335	456	460	121	364	372	391	182	229	790	
徳島	阿津江地区	365	1,058	446	278	395	216	650	294	935	419	359	837	536	185	329	392	462	224	219	1,058	
徳島	大用知地区	335	915	399	270	425	203	646	299	939	410	371	833	533	181	351	307	436	250	224	939	
高知	平鍋地区	427	479	487	234	384	331	277	360	1,075	304	355	1,099	574	252	316	430	910	487	350	1,099	

※黒色ハッチ：深層崩壊発生年，灰色ハッチ：深層崩壊発生降雨以上の降雨，アンダーライン：その他比較的雨量値の大きい降雨

なお、赤谷 B 地区・川原樋川の崩壊は、約 120 年前の崩壊箇所が 2011 年に拡大崩壊した事例となる。検討期間内では、拡大崩壊した年の雨量値が最大雨量値となるが、他の紀伊半島の崩壊事例と比べて高確率となっている。この原因の 1 つとして、拡大崩壊が新規崩壊に比べて少雨で発生する可能性が考えられる。今後、データを蓄積し、拡大崩壊の発生限界雨量基準について検討することも必要と考える。

5. おわりに

本研究では、深層崩壊の発生予測への利用を目的として、発生限界雨量基準を超過確率年で評価した。検討の結果、非発生降雨数が低減する視点では 1/20 年、複数発生が増加する視点では 1/30 年、崩壊土砂量等、崩壊規模が増加する視点では 1/40 年であることが示された。ただし、これらの境界値は、あくまで現時点で入手可能な雨量データによる超過確率であり、今後の降雨の蓄積とともに更新すべきと考える。加えて、上記境界値は、深層崩壊の発生確率（生起確率）ではないことに留意が必要である。

2011 年の紀伊半島大水害にて熊野川流域の赤谷地区、長殿地区、栗平地区等では、深層崩壊が発生した。同流域内では、約 120 年前の十津川大水害（1889 年）において、深層崩壊が複数発生している。上記を踏まえると、熊野川流域において、記録のある期間での生起確率は 1/120 となる。また、本研究で使用した深層崩壊小流域マップ³⁾では、4 段階のレベルに区分されているが、表-1 より、今回使用したデータでの各地域の発生回数（1991 年以前の深層崩壊は含まれてない）は、一連降雨単位で集計すると、多い地域で 2 回程度であるため、評価単位毎、レベル毎の生起確率は、さらに低いものとする。

このため、本研究成果は、必ずしも深層崩壊の発生確率とは整合しない課題はあるが、例えば、土砂災害警戒情報が発表された後、さらに深層崩壊等の大規模な災害に対する警戒体制への移行を判断する際に、本研究での雨量に基づく超過確率年等の指標は判断材料の 1 つになり得るものと考えている。今後は、深層崩壊の生起確率の把握と発生限界雨量基

準との乖離状況、基準の精度等についても、詳細に検証する予定である。

謝辞：本稿で使用した解析雨量については気象庁保有のデータを使用した。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局砂防部：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)，p.9，2005.
- 2) 独立行政法人土木研究所：深層崩壊推定頻度マップ，<https://www.mlit.go.jp/common/001197941.pdf>，2010.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部，独立行政法人土木研究所：深層崩壊に関する溪流（小流域）レベルの調査について，<https://www.mlit.go.jp/common/000223653.pdf>，2012.
- 4) 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，p.32-35，2012.
- 5) 独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），土木研究所ホームページ，技術情報研究報告，https://www.pwri.go.jp/team/volcano/tech_info/study/h23_fy2011/past_dscl-list20120117.pdf，2011.
- 6) 坂井佑介，内田太郎，林幸一郎，北原哲郎，永井愛：崩壊規模と降雨条件の関係分析による深層崩壊発生要因の考察，第 68 回 2019 年度砂防学会研究発表会概要集，p.219-220，2011.
- 7) 国土交通省河川局砂防部：深層崩壊調査(溪流レベル評価)の概要，国土交通省ホームページ，https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/deep_landslide.html，2012.
- 8) 日浦啓全，海堀正博，末峯章，里深好文，堤大三：2004 年台風 10 号豪雨による徳島県木沢村と上那賀町における土砂災害緊急調査報告(速報)，砂防学会誌，Vol. 57，No.4，p.39-47，2004.
- 9) Hosking, J. R. M. : L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, Journal of the Royal Statistical Society, B, Vol.52, pp.105-124, 1990.

(2022. 5. 30 受付)