

## 6. 台風12号による土砂災害の評価及び対応

### 6.1 空中写真等判読による崩壊土砂量の推定

崩壊地分布の把握、崩壊土砂量を指標とした災害規模の推定を行うため、災害直後から航空写真、衛星写真からの崩壊地判読を実施した。

判読エリアおよび崩壊地分布を図-6.1.1に、崩壊土砂量等の算出結果を表-6.1.1に示す。判読を実施したエリア内において、崩壊箇所数は約3,000（うち、崩壊土砂量が10万m<sup>3</sup>以上は52箇所）、崩壊土砂量は約9千万m<sup>3</sup>と判明した。なお、写真未判読エリアのうち、総降水量1,000mm以上を記録した範囲を含めると、崩壊土砂量は約1億m<sup>3</sup>と推定される。

崩壊土砂量の算出に際し、土砂災害防止法に基づく緊急調査対象5箇所については、現地計測等によって得られた崩壊土砂量を用いた。それ以外については、表層崩壊・深層崩壊・土石流等、崩壊の形態・規模が多様であるため、崩壊形態によらず崩壊面積から崩壊土砂量を導き出すグゼッティらの経験式<sup>1)</sup>（式-6.1.1）により算出した。

$$V = 0.074 A^{1.45} \quad \text{(式-6.1.1)}$$

ここで、 $V$ は崩壊土砂量[m<sup>3</sup>]、 $A$ は崩壊面積[m<sup>2</sup>]である。

以下に台風12号による崩壊土砂量の詳細等算定方法を示す。

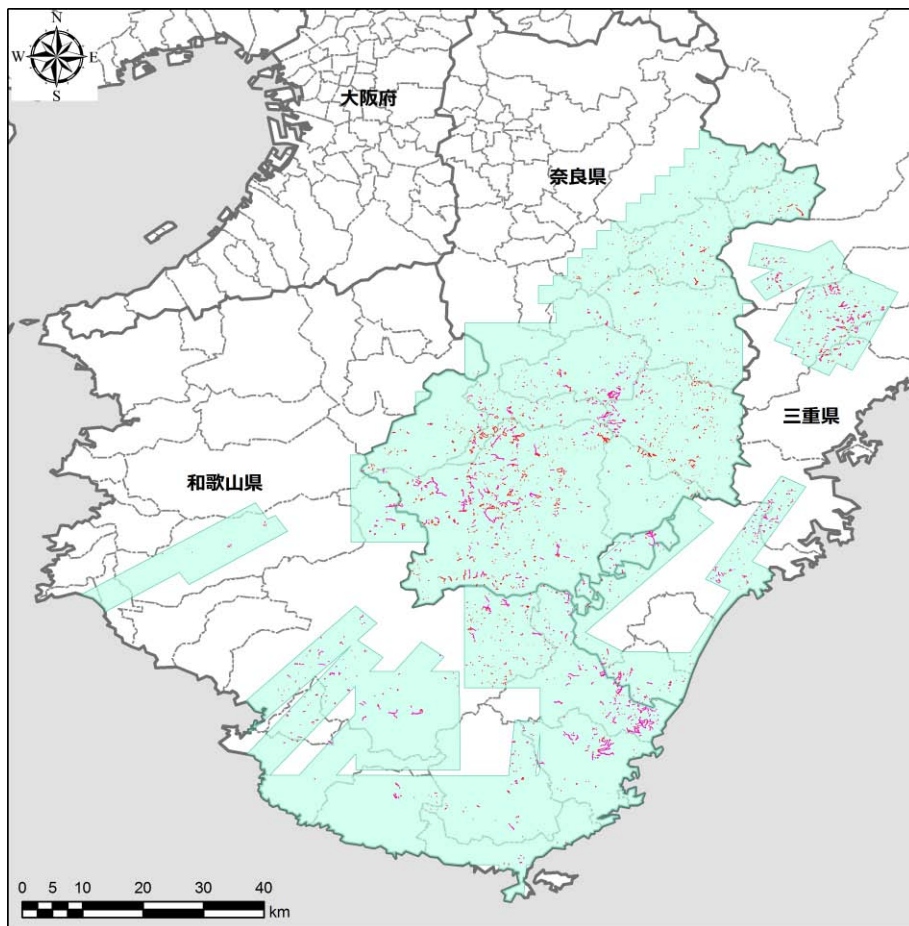


図-6.1.1 写真判読エリアおよび崩壊地分布

表-6.1.1 崩壊土砂量算出結果のとりまとめ  
(写真判読エリア内)

判読崩壊（発生域）箇所数（N）	3,053 箇所
崩壊（発生域）面積（A）	約1千万m <sup>2</sup>
崩壊土砂量（V） （うち緊急調査箇所(5箇所)）	約1億m <sup>3</sup> 約4,676万m <sup>3</sup>
空中写真撮影範囲面積（A <sub>T</sub> ）	約4,800km <sup>2</sup>
崩壊面積率（A/A <sub>T</sub> ×100）	約0.2%

(1) 空中写真の判読エリア内の判読データ

近畿地方整備局により土砂災害防止法に基づく緊急調査が実施された 5 箇所の大規模崩壊地の崩壊土砂量は、表-6.1.2 に示すとおりである。また、判読したエリアの判読データから算出した判読崩壊箇所数、崩壊面積、崩壊土砂量、崩壊面積率等の詳細は、表-6.1.3 のとおりである。

表-6.1.2 緊急調査箇所 崩壊土砂量			表-6.1.3 判読エリアの判読データ	
十津川村 長殿	約 634 万 m <sup>3</sup>		判読崩壊（発生域）箇所数 (N)	3,053 箇所
十津川村 栗平	約 2,513 万 m <sup>3</sup>		崩壊（発生域）面積 (A)	8,826,329m <sup>2</sup>
野迫川村 北股	約 120 万 m <sup>3</sup>		判読崩壊土砂量 (V) (うち緊急調査箇所)	89,099,483m <sup>3</sup> 4,676 万 m <sup>3</sup>
大塔町 赤谷	約 935 万 m <sup>3</sup>		空中写真撮影範囲面積 (A <sub>T</sub> )	4,799,034,618m <sup>2</sup>
田辺市 熊野	約 474 万 m <sup>3</sup>		崩壊面積率 (A/A <sub>T</sub> ×100)	0.184%
計	約 4,676 万 m <sup>3</sup>			

(2) 空中写真の未判読エリアの崩壊面積の推定

未判読エリアである「空中写真が無い地域」の崩壊面積の算出方法を以下に示す。

気象庁が公表した「解析雨量による総降水量分布図（推定）」<sup>2)</sup>（図-6.1.2）から、空中写真が有り判読したエリアでは平均 1,000mm～1,500mm 程度の総降水量が降ったと考えられる。

そして、未判読エリアである「空中写真が無い地域」においても、総降水量が判読エリアと同等の 1,500mm 以上から 1,000mm 以上と推定される地域では、判読エリアと同様に崩壊が発生した地域が存在すると推定される。

そこで、未判読エリアでは、「判読エリアの崩壊面積率 0.184%」を用いてから崩壊発生面積を推定することとした。

総降水量の分布は、図-6.1.2 から、

- ・総降水量 1,500mm 以上（図-6.1.3 の赤色の線の枠内）
- ・総降水量 1,000mm 以上（図-6.1.3 の黄色の線の枠内）

の地域を抽出した。なお、総降水量 1,000mm 未満の地域においても崩壊地発生の可能性はあるが、崩壊面積の算定には見込んでいない。

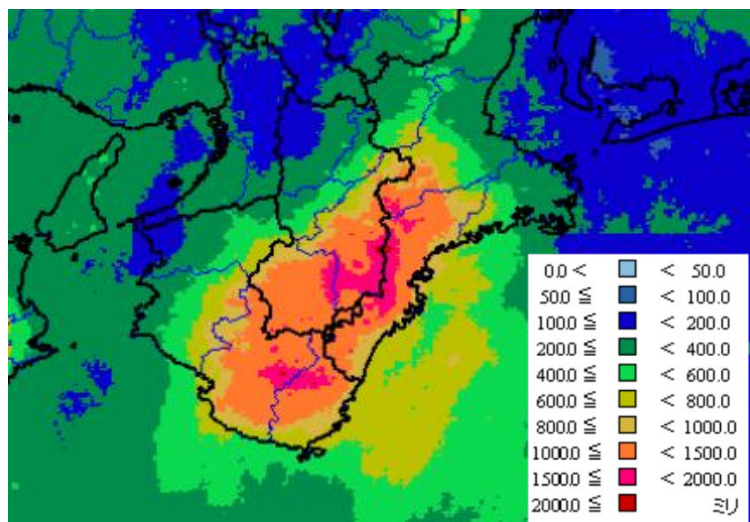


図-6.1.2 解析雨量による総降水量分布図（推定）<sup>2)</sup>  
8月30日17時～9月6日24時

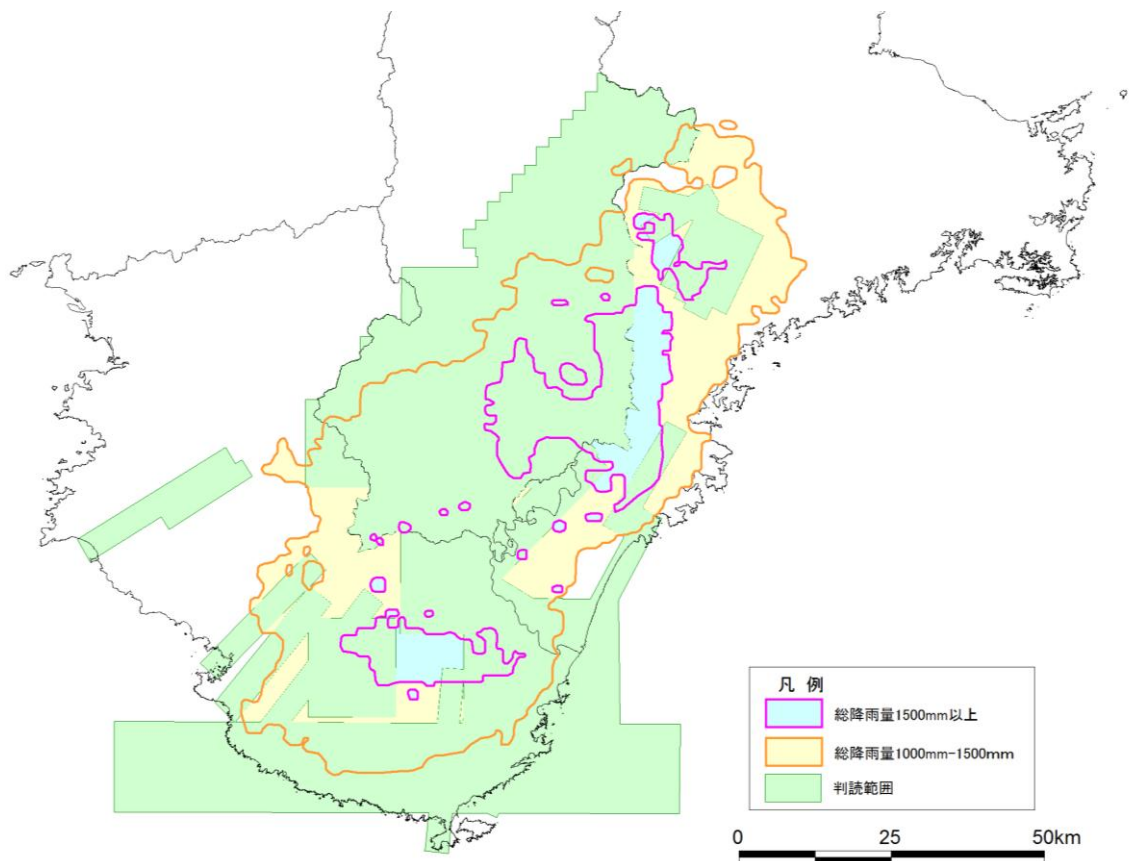


図-6.1.3 総降水量 1,000mm 以上・1,500mm 以上のエリア

表-6.1.4 未判読エリアの崩壊面積の推定結果

	雨量 1,500mm 以上の地域 (図-6.1.3 の水色部分)	雨量 1,000mm 以上の地域 (図-6.1.3 の黄色部分)
空中写真が無い地域の面積 ( $A_T$ )	302,881,235m <sup>2</sup>	1,384,776,425m <sup>2</sup>
推定崩壊面積 (A)	557,301m <sup>2</sup>	2,547,989m <sup>2</sup>
使用した「判読の崩壊面積率」 ( $A/A_T \times 100$ )	0.184%	

(3) 空中写真の未判読エリアの崩壊土砂量の推定

未判読エリアである「空中写真が無い地域」の崩壊面積の推定結果から、未判読エリアの崩壊土砂量を推定した。

崩壊土砂量の算定において、判読エリアと未判読エリアの「緊急調査箇所を除く平均崩壊深」は、概ね同様であると想定して崩壊土砂量を算定した。

まず、「緊急調査箇所を除く判読崩壊土砂量」と「緊急調査箇所を除く判読崩壊面積」から、判読した崩壊地の平均崩壊深を 5.5m と算定した。そして、表-6.1.4 で推定した推定崩壊面積に平均崩壊深 5.5m を乗じて推定崩壊土砂量を算定した。(表-6.1.5)

その崩壊土砂量の推定結果を表-6.1.6 に示す。ここで、図-6.1.3 に示す総降水量 1,500mm 以上の未判読エリア面積から算定した推定崩壊土砂量が、最も狭いエリアで過小に算定した推定値である。そして、総降水量 1,000mm 以上の未判読エリア面積から算定した推定崩壊土砂量が、より多い推定土砂量である。なお、総降水量 1,000mm 未満の地域においても崩壊地発生の可能性があるが、土砂量の算定には見込んでいない。

表-6.1.5 未判読エリアの崩壊土砂量の算定方法

写真判読による全崩壊土砂量:	89,099,483 (m <sup>3</sup> )	写真判読による全崩壊面積:	8,826,329 (m <sup>2</sup> )
緊急調査 5 箇所崩壊土砂量:	46,760,000 (m <sup>3</sup> )	緊急調査 5 箇所崩壊面積:	1,134,040 (m <sup>2</sup> )
緊急調査箇所を除く判読崩壊土砂量:	42,339,483 (m <sup>3</sup> )	緊急調査箇所を除く判読崩壊面積:	7,692,289 (m <sup>2</sup> )

$$\begin{aligned} \text{判読崩壊地の平均崩壊深(m)} &= \text{緊急調査箇所を除く判読崩壊土砂量(m}^3\text{)} \div \text{緊急調査箇所を除く判読崩壊面積(m}^2\text{)} \\ &= 42,339,483 \div 7,692,289 \\ &= 5.5 \text{ (m)} \end{aligned}$$

【雨量 1,500mm 以上の未判読エリア】

$$\begin{aligned} \text{推定崩壊土砂量(m}^3\text{)} &= \text{推定崩壊面積(m}^2\text{)} \times \text{判読崩壊地の平均崩壊深(m)} \\ &= 557,301 \times 5.5 \\ &= \underline{\underline{3,065,156 \text{ (m}^3\text{)}}} \end{aligned}$$

【雨量 1,000mm 以上の未判読エリア】

$$\begin{aligned} \text{推定崩壊土砂量(m}^3\text{)} &= \text{推定崩壊面積(m}^2\text{)} \times \text{判読崩壊地の平均崩壊深(m)} \\ &= 2,547,989 \times 5.5 \\ &= \underline{\underline{14,013,940 \text{ (m}^3\text{)}}} \end{aligned}$$

表-6.1.6 未判読エリアの推定崩壊土砂量

	雨量 1,500mm 以上の地域	雨量 1,000mm 以上の地域
推定崩壊土砂量 (V)	3,065,156m <sup>3</sup>	14,013,940m <sup>3</sup>

(4) 崩壊発生面積・崩壊土砂量の推定結果のまとめ

以上により算定した、判読エリア及び未判読エリア全体の崩壊発生面積、崩壊土砂量の推定結果を表-6.1.7に示す。

表-6.1.7 崩壊発生面積・崩壊土砂量の推定結果のまとめ

判読崩壊(発生域)箇所数(N)	3,053 箇所	
崩壊(発生域)面積(A)	938 万 m <sup>2</sup>	~ 1,140 万 m <sup>2</sup>
◎内訳		
・判読エリアの崩壊面積	8,826,329 m <sup>2</sup>	同左( 882.6 万 m <sup>2</sup> )
・未判読、推定エリアの崩壊面積	557,301 m <sup>2</sup>	~ 2,547,989 m <sup>2</sup>
	(総雨量 1,500mm 以上の地域で算定)	( 同 1,000mm 以上)
崩壊土砂量(V)	9,216 万 m <sup>3</sup>	~ 1 億 0,311 万 m <sup>3</sup>
◎内訳		
・判読エリアの崩壊土砂量 (Guzzetti の式)	42,339,483 m <sup>3</sup>	同左( 4,234 万 m <sup>3</sup> )
・緊急調査5箇所の崩壊土砂量	4,676 万 m <sup>3</sup>	同左( 4,676 万 m <sup>3</sup> )
・未判読、推定エリアの崩壊土砂量	3,065,156 m <sup>3</sup>	~ 14,013,940 m <sup>3</sup>
	(総雨量 1,500mm 以上の地域で算定)	( 同 1,000mm 以上)
空中写真撮影範囲面積(A <sub>T</sub> )	4,799,034,618m <sup>2</sup>	
崩壊面積率(A/A <sub>T</sub> × 100)	0.184%	

表-6.1.7に示す推定結果から、最終的に台風12号による崩壊発生面積、崩壊土砂量は、表-6.1.1のとおりである。

参考文献

- 1) Fausto Guzzetti, Francesca Ardizzone, Mauro Cardinali, Mauro Rossi, Daniela Valigi: Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy, Earth and Planetary Science Letters, Vol.279, Issues 3-4, 2009, pp.222-229
- 2) 気象庁：台風第12号による大雨（平成23年9月7日速報），気象庁HP

## 6.2 崩壊土砂量等に関する分析及び考察

### (1) 崩壊面積と崩壊深の頻度分布

図-6.2.1に判読した崩壊地面積の頻度分布を示す。 $10^{2.5} \sim 10^3 \text{ m}^2$ の崩壊地が最も多く、次いで、 $10^3 \sim 10^{3.5} \text{ m}^2$ の崩壊地が多い。また、既往の多くの災害と同じく、両対数グラフ上で崩壊面積と発生頻度は概ね直線関係が見られた。

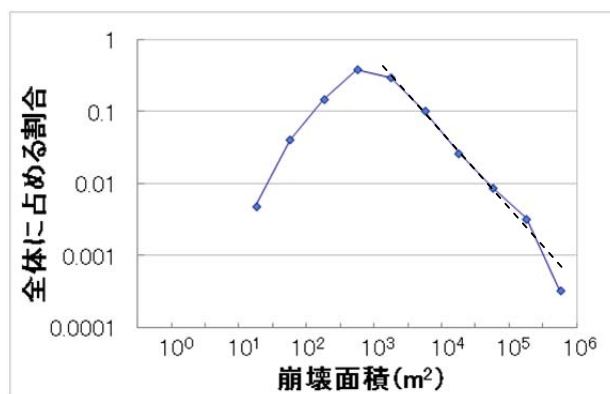


図-6.2.1 判読した崩壊面積の頻度分布

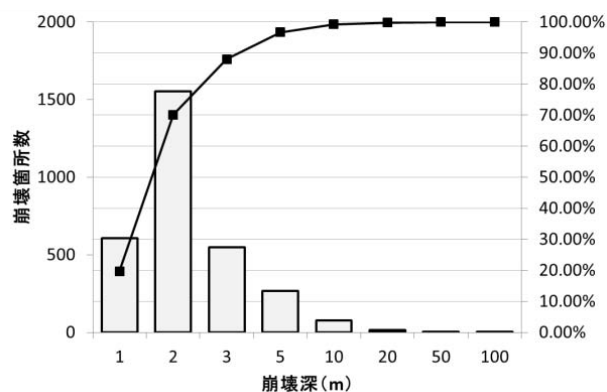


図-6.2.2 崩壊深の頻度分布

また、図-6.2.2に崩壊土砂量を崩壊面積で除した崩壊深の頻度分布を示す。崩壊深は2m以下が約7割、3m以下が約9割を占めている。

図-6.2.1、図-6.2.2から、判読実施エリア内では、大規模な深層崩壊のみならず、広域において多数の小規模崩壊が発生したことがわかる。



## (2) 崩壊土砂量から見た災害規模

過去の大規模な土砂災害事例と崩壊土砂量を指標に災害規模を比較した。表-6.2.1 は過去の大規模災害の崩壊土砂量を整理した一覧である。約1億 m<sup>3</sup>以上の崩壊土砂量が1つのイベントで発生したのは、近年では、平成16年新潟県中越地震(約1億 m<sup>3</sup>)、および平成20年岩手・宮城内陸地震(約1.3億 m<sup>3</sup>)によるものがあり、今回の事例はこれに匹敵する災害であると言える。また、豪雨を起因とした土砂災害では、明治22年十津川災害(約2億 m<sup>3</sup>)、明治44年稗田山大崩壊(約1.5億 m<sup>3</sup>)と約100年以上前に遡る。災害の記録が比較的残っていると考えられる第二次大戦後で見ると、伊那谷三十六災害(約7,300万 m<sup>3</sup>)を上回る戦後最大の災害であると言える。

表-6.2.1 過去の大規模災害の崩壊土砂量

No.	災害発生年月 (西暦)	災害発生年月 (和暦)	災害名	主な被災県	災害原因	崩壊土砂量	出典
1	1889.8	明治22年8月	十津川災害	奈良県	豪雨	約2億m <sup>3</sup>	参考文献 1)
2	1895.8	明治28年8月	ナンノ谷崩壊	岐阜県	豪雨	約150万m <sup>3</sup>	越美山系砂防事務所調べ
3	1911.8	明治44年8月	稗田山大崩壊	長野県	豪雨	約1億5000万m <sup>3</sup>	参考文献 2)
4	1938.7	昭和13年7月	阪神大水害	兵庫県	豪雨	約500万m <sup>3</sup>	六甲砂防事務所ホームページ
5	1953.7	昭和28年7月	有田川災害	和歌山県	豪雨	約2,000万m <sup>3</sup>	参考文献 3)
6	1959.8	昭和34年8月	富士川昭和34年災害	山梨県	台風	約4,500万m <sup>3</sup>	富士川砂防事務所調べ
7	1961.7	昭和36年7月	伊那谷三十六災害	長野県	豪雨	約7,300万m <sup>3</sup>	天竜川上流河川事務所調べ
8	1965.9	昭和40年9月	奥越豪雨	岐阜県、福井県	豪雨	約4,800万m <sup>3</sup>	越美山系砂防事務所調べ
9	1967.7	昭和42年7月	羽越災害	新潟県、山形県	豪雨	約850万m <sup>3</sup>	飯豊山系砂防事務所調べ
10	1975.8	昭和50年8月	仁淀川災害	高知県	豪雨	約2,700万m <sup>3</sup>	参考文献 4)
11	1982.8	昭和57年8月	富士川昭和57年災害	山梨県	台風	約3,000万m <sup>3</sup>	富士川砂防事務所調べ
12	1984.9	昭和59年9月	長野県西部地震(御岳崩れ)	長野県	地震	約3,400万m <sup>3</sup>	多治見砂防国道事務所調べ
13	1995.1	平成7年1月	兵庫県南部地震	兵庫県	地震	約37万m <sup>3</sup>	参考文献 5)
14	1995.7	平成7年7月	7.11姫川水害	長野県、新潟県	豪雨	約1,000万m <sup>3</sup>	参考文献 6)
15	2004.1	平成16年10月	平成16年新潟県中越地震	新潟県	地震	約1億m <sup>3</sup>	国土交通省記者発表資料
16	2005.9	平成17年9月	台風14号(鶴塚山)	宮崎県	台風	約680万m <sup>3</sup>	宮崎県ホームページ
17	2008.6	平成20年6月	平成20年岩手・宮城内陸地震	岩手県、宮城県	地震	約1億3000万m <sup>3</sup>	参考文献 7)
18	2009.7	平成21年7月	平成21年7月中国・九州北部豪雨 山口県防府市周辺	山口県	豪雨	約235万m <sup>3</sup>	中国地方整備局ホームページ
19	2011.9	平成23年9月	台風12号(紀伊半島分)	奈良県、和歌山県、 三重県	台風	約1億m <sup>3</sup>	国土交通省記者発表資料

## 参考文献

- 1) 田畑茂清、水山高久、井上公夫：天然ダムと災害、2002
- 2) 土木研究所：歴史的な大規模崩壊の実態、土木研究所資料、No.4169、2010
- 3) (社) 全国治水砂防協会：日本砂防史、1981
- 4) 柿徳市：砂防計画論、1983
- 5) (一財) 砂防・地すべり技術センター：土砂災害の実態、2011
- 6) 柘木敏仁、水山高久、佐藤一幸、村上正人：土砂生産のタイミングを考慮した土砂生産・流出に関する研究、砂防学会誌、Vol.59、No.5、2007
- 7) 宮城県：平成20年岩手・宮城内陸地震に係る土砂災害対策技術検討委員会検討結果、2008

### 6.3 台風12号の災害対応に関する被災自治体からのヒアリング調査

今回の災害で多くの被害が出た奈良県五條市、十津川村、和歌山県田辺市、新宮市、那智勝浦町の災害対応担当者等を対象に、内閣府、消防庁、国土交通省、気象庁は共同で現地ヒアリングを実施した。その結果分かったことを以下述べる。

まず、過去に災害経験のある川沿い、谷沿い等の住民は、経験に基づき円滑な自主避難を行なうことが出来た事例が多かった。行政も防災無線等を活用し早めの自主避難の呼びかけを行うことで、住民の避難を後押しした。また、防災無線を催事情報の放送等にも活用し、日頃から「聞こえ」を確認していたり、集落の総代や消防団との顔の見える関係を築いていた地域では自主避難が上手く機能した。先人の教えを守り、斜面、湧水の異常を察知し自主避難し奏功した例もある。

一方、今回過去の経験を超える記録的豪雨であったため、安全と思われていた場所でも災害が発生したが、行政、住民の双方に経験以上の災害がどういったものかイメージ出来ず、円滑な避難に結びつかなかった例も見られた。水位の上昇といった危機が迫っていることが分かりやすい洪水と違って、前兆の分かりにくい土砂災害の危機を住民がイメージしづらかったものと考えられる。実際、通常の土砂災害危険箇所とは異なる箇所で大規模な深層崩壊が発生するなど、どこでどのような災害が起こるのか予測しづらい状況にあったとの声も聞かれた。また、避難するにしても山間部では、そもそも安全な避難場所を確保するのが困難であるとともに、豪雨の中、しかも夜間に避難を行うことに危険を感じたという意見もあった。停電、土砂災害により通信手段が途絶するとともに道路も寸断され、避難したくても出来なかった例も見られた。土砂災害警戒情報については、避難勧告を発令する上で役立ったとする意見がある一方、単位メッシュが広過ぎるため、それを基に避難勧告を行うことは困難であったとの意見も出た。緊急時の専門家の肉声によるサポートや首長等への事前の講習会の実施等を求める声も聞かれた。

次に、今回の台風12号災害について、和歌山県内の被害のあった25市町村を対象に国総研で実施したアンケート結果について紹介する。

土砂災害警戒情報発表を受けての対応について聞いたところ、市町村長への報告、住民への周知を同情報発表とほぼ同時に実施した市町村が16市町村と大半であった。しかし、避難勧告、避難指示の発令については、同情報発表後ある程度時間が経ってから発令した市町村がほとんどであった。これは、土砂災害警戒情報が注意喚起のきっかけではあっても、避難勧告等への直接的なきっかけにはなっていないことを示している。

また、5kmメッシュごとの土砂災害警戒情報判定図など、土砂災害警戒情報を補足する情報(図-6.3.1)の認知、活用状況について、和歌山県内全ての30市町村に聞いたところ、22市町村から回答があった(回収率73%)。ほとんどの市町村が補足情報の存在を知っていると回答したが、一部に認知していないところもあった。補足情報を知ったきっかけとしては、6割が



図-6.3.1 土砂災害警戒情報の補足情報<sup>1)</sup>



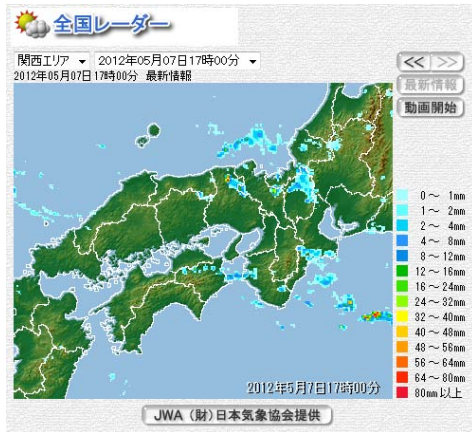


図-6.3.2 レーダー解析雨量図<sup>1)</sup>

「県からの通知」、2割が「ホームページで見た」と回答したが、ほかにも研修や前任者からの引き継ぎ等が挙げられた。今回の台風12号時には、19市町村が補足情報を見たと回答したが、一部に、存在を知らなかった、もしくは必要性がなくて見なかったとの回答もあった。補足情報の操作性については、実際に各市町村の該当サイトを開いてもらいその感想を聞いたが、ほとんどの市町村が簡単に表示することが出来たと回答した。さらにそのサイト内で見られる雨量情報の必要精度については、現在の雨量計地点の雨量で十分、1kmメッシュ程度の雨量データが必要、土砂災害危険箇所等ピンポイントでの雨量データが必要、と意見が分かれた。また、過去の降雨データも見たいとの声もあった。

レーダー解析雨量による雨域の移動アニメーション(図-6.3.2)については、現状で十分との意見が7割と大勢を占めたが、もう少し長い時間必要だとの意見も3割程度あった。長い時間必要とする回答の中では6時間前～6時間後までを希望する意見が多かった。土砂災害警戒判定図(図-6.3.3)については、全ての市町村で表示することが出来たが、スネークラインとCL(図-6.3.4)を用いた判定図の見方について、6割以上の担当者が知っていたものの、知らなかった担当者も3割以上いた。5kmメッシュ単位での表示については、3割近くが現状で十分とする一方、5割が1kmメッシュ程度を希望し、2割が土砂災害危険箇所等でのピンポイントでの表示が必要だとした。また、その中には、現状で十分とは言えないが細かくしても対応できないとの意見も見られた。土砂災害警戒情報の今後の活用については、全ての市町村が避難勧告等を検討する際に参考にしたいと回答した。

以上の調査の結果、山間部での住民避難には依然として多くの課題があることが確認された。特に、行政側が住民避難を検討する上での技術的支援として、土砂災害警戒情報及び補足情報の精度向上や緊急時の専門家によるバックアップ体制の強化が求められている。同時に、市町村担当者に情報の趣旨、精度やサイトの操作方法を周知する機会を増やしていくことで市町村側にも土砂災害警戒情報の活用を促していく必要があることが分かった。

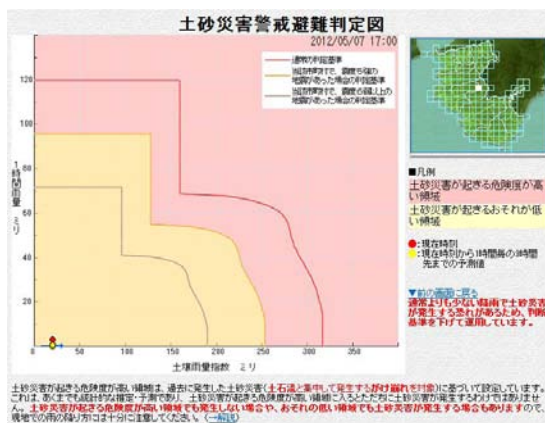


図-6.3.3 土砂災害警戒避難判定図<sup>1)</sup>

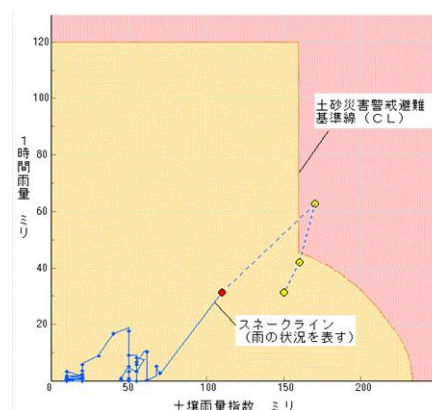


図-6.3.4 スネークラインとCLの概要<sup>1)</sup>

## 参考文献

- 1) 和歌山県砂防課 HP (<http://kasensabo01.pref.wakayama.lg.jp/new/>)

## 6.4 雨量が斜面崩壊の頻度・規模に及ぼす影響

### 6.4.1 調査の背景・経緯

斜面崩壊の頻度（密度）および規模と雨量の関係を明らかにすることは、土砂災害対策を考える上で、最も基本となる情報の1つである。これまでも、斜面崩壊の規模や頻度は、空中写真の判読により、崩壊の面積を求め、崩壊面積と頻度の関係を明らかにする手法が広く用いられてきた。その結果、雨量と斜面崩壊の頻度の関係については、多くのデータがとられてきており、一般的に雨量が増大するに従い、急激に崩壊の頻度が増加することが示されてきた<sup>1)</sup>。また、崩壊規模と頻度の関係についても多くの研究が行われ、規模が大きくなるに従い、頻度は小さくなり、斜面崩壊の面積と頻度の関係は、両対数グラフ上で直線関係を有することが数多く報告されてきた<sup>2)</sup>。さらに、斜面崩壊をコントロールする雨量に関する指標（例えば、短時間降雨強度、積算降雨量、実効雨量、降雨の履歴順位）に関する研究が進められてきている<sup>3)</sup>。しかし、斜面崩壊の頻度や規模について、複数の雨量に関する指標を用いて検討した例はきわめて限定的である。

2011年の台風12号は、非常に大量な降雨を紀伊半島中心にもたらし甚大な被害を引き起こした。この降雨により、広域で多数の斜面崩壊が生じた。これにより、通常の大規模な降雨では得難い、様々な降雨条件下における斜面崩壊の頻度および規模のデータ取得が可能となると考えられる。そこで、本研究では、2011年台風12号による紀伊半島における斜面崩壊状況に関するデータを取得した上で、

(1) 雨量が斜面崩壊の頻度に及ぼす影響

(2) 雨量が斜面崩壊の規模に及ぼす影響

を検討することを目的とした。

### 6.4.2 方法

(1) 崩壊地の判読と崩壊土砂量の推定

2011年台風12号後に撮影された図-6.4.1に示す範囲の空中写真、衛星画像を用いて、崩壊地の判読を行った。判読した範囲の面積は約4,800km<sup>2</sup>である。崩壊地の判読にあたっては、崩壊主部と流下域、堆積域を区分して判読を行った。その上で、崩壊主部について、ポリゴンデータを作成した。作成したポリゴンデータを用いて崩壊面積をGIS上で算出した。

その上で、国土交通省による緊急調査が実施された5箇所については、現地調査に基づく崩壊土砂量を用いた。5箇所以外の崩壊地については、式-6.4.1に示すGuzzetti et al. (2009)<sup>4)</sup>による崩壊面積と崩壊土砂量の関係を用いて、崩壊地ごとの崩壊土砂量を算出した。

$$V_L = 0.074 A_L^{1.45} \quad (\text{式-6.4.1})$$

ここで、 $V_L$ は崩壊土砂量[m<sup>3</sup>]、 $A_L$ は崩壊面積[m<sup>2</sup>]である。なお、Guzzetti et al. (2009)は、世界各地の崩壊土砂量が数m<sup>3</sup>から数10億m<sup>3</sup>までの677事例の崩壊面積と崩壊土砂量を基に崩壊面積と崩壊土砂量の関係に関する経験式を求めた。

(2) 降雨データの整理

降雨は気象庁による1kmメッシュの解析雨量を用いた。用いた期間は、2011年の8月30日0:00から9月7日23:00までである。メッシュごとに、期間内の連続最大1時間、6時間、24時間、48時間雨量を算出した。

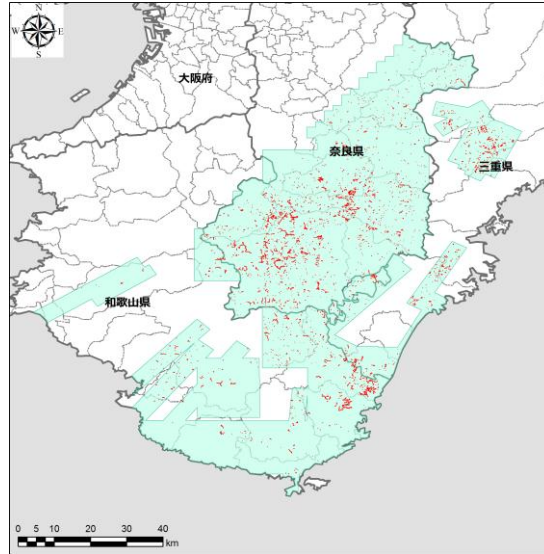


図-6.4.1 写真判読エリア及び崩壊地分布

### (3) 地形解析

地形解析には、国土地理院の 10m の数値地形情報を用いて、10m グリッドの斜面勾配、標高、斜面方位を算出した。その上で、各崩壊地ポリゴンの中心を含むグリッドの斜面勾配、標高、斜面方位を、その崩壊地の斜面勾配、標高、斜面方位とした。

## 6.4.3 結果

### (1) 雨量の分布と崩壊地の分布

図-6.4.2 に、最大 48 時間雨量の分布状況と崩壊土砂量 10 万  $m^3$  以上の崩壊地の位置を示した。なお、内田ら (2012)<sup>5)</sup> は、深層崩壊の発生の有無を表現する降雨指標として、48 時間雨量が適当であることを示した。48 時間雨量が概ね 1200mm を超える地域として、奈良・三重県境付近の南北方向 (以下、「高雨量域①」と呼ぶ)、その西側の奈良県南東部の南北方向 (高雨量域②)、和歌山・奈良県境付近の東西方向 (高雨量域③)、さらに高雨量域③の南の和歌山県南東部の東西方向に概ね 1200mm を超える地域 (高雨量域④) の地域が存在し、特に、高雨量域①、④が大きかった (図-6.4.2)。

これに対して崩壊地は、検討対象地域のほぼ全域に広がっており、必ずしも、降雨と明瞭な対応が見られない (図-6.4.1)。特に、図-6.4.1、6.4.2 に示したように、土砂量 10 万  $m^3$  以上の規模大きい崩壊は、高雨量域①の南半分や②ではほとんど見られない。また、高雨量域③、④でも必ずしも密度は高くない。一方、高雨量域①の北端付近 (三重県旧宮川村周辺) は崩壊密度が大きかった。さらに、高雨量域②より西側で、高雨量域③の北側にあたる奈良県十津川村周辺では、48 時間雨量は高雨量域に比べて多くなかったが土砂量 10 万  $m^3$  以上の崩壊密度が高かった。以上のように、高雨量域と斜面崩壊の密度の高い地域は必ずしも一致しなかった。

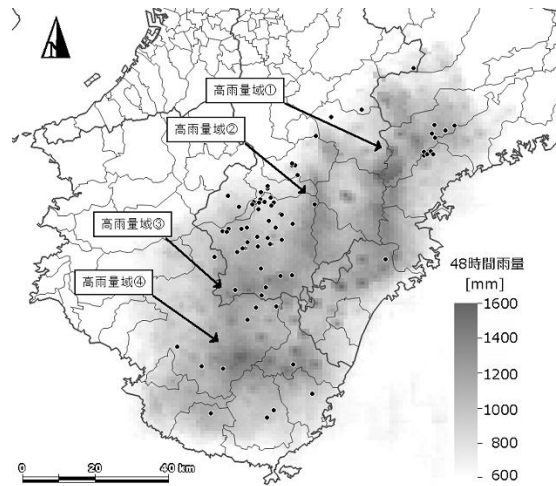


図-6.4.2 最大48時間雨量の分布 図中の黒丸が崩壊土砂量10万m<sup>3</sup>以上の崩壊

(2) 雨量と崩壊の密度

図-6.4.3 に最大1, 6, 24, 48時間雨量と相対的な斜面崩壊密度の関係を示した。ここでいう相対的な崩壊密度とは、ある雨量(r)の領域に属する崩壊地の数(n(r))を雨量rの領域の面積(a(r))で除した崩壊密度(n(r)/a(r))を全調査対象領域の崩壊地数を(N)を全調査対象面積(A(=4,800km<sup>2</sup>))で除した平均密度(N/A)で除した値(n(r)A/Na(r))とした。本研究では、崩壊を崩壊土砂量により4段階に分類し、相対的な崩壊密度を算出した。すなわち、相対的な崩壊密度が1を上回る場合、当該雨量の領域で、当該規模の崩壊密度が調査領域の平均密度より大きいことを示している。また、図-6.4.3には、領域の出現頻度(a(r)/A)を灰色のハッチングで示し、当該雨量域の面積が全調査領域の面積の1%以下の場合、相対的な崩壊密度の算出結果の信頼性が低いと考え、図上にデータを示さなかった。さらに、雨量と相対的な崩壊密度の関係の相関係数を算出し、図-6.4.4に示した。雨量と相対的な崩壊密度の関係は十分にわかっていないが、ここでは、雨量と相対的な崩壊密度に直線関係があると仮定し、相関係数を算出した。

図-6.4.3aに示したように、最大1時間雨量と相対的な崩壊密度は崩壊規模によらず明瞭な関係はみられなかった。相関係数もすべての土砂量で0.4以下と低く、土砂量1000m<sup>3</sup>以下のケースと10万m<sup>3</sup>以上のケースではわずかながら負の相関を示した(図-6.4.4)。

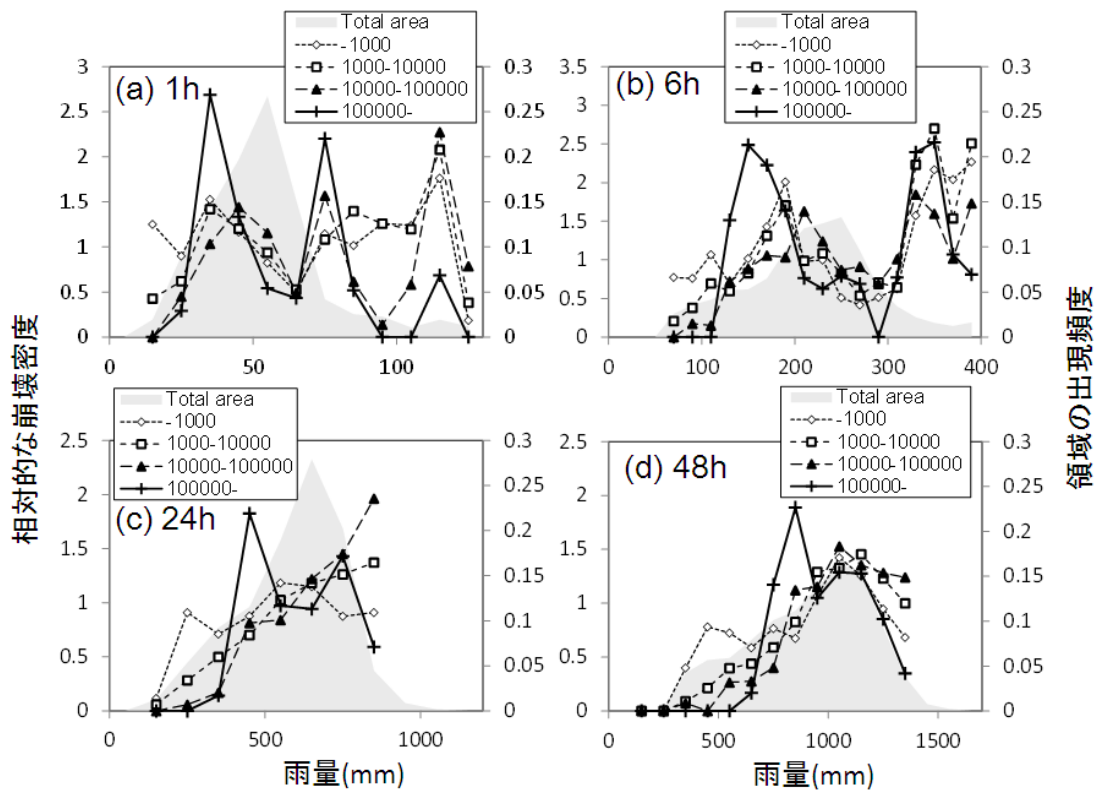


図-6.4.3 最大1, 6, 24, 48時間雨量と斜面崩壊の相対的な崩壊密度の関係, 凡例の数字は崩壊土砂量 (m<sup>3</sup>)

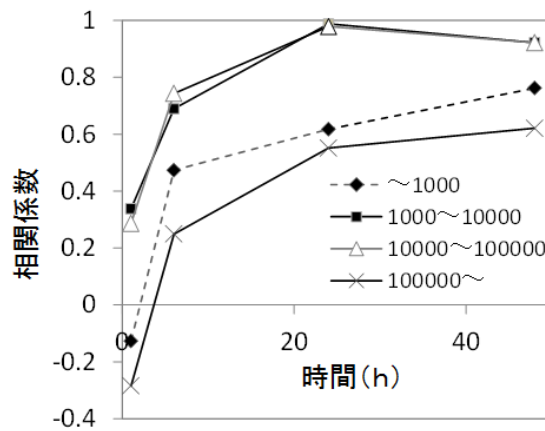


図-6.4.4 最大1, 6, 24, 48時間雨量と斜面崩壊密度の相関係数と雨量の算出時間と崩壊土砂量の関係. 凡例の数字は崩壊土砂量 (m<sup>3</sup>)

次に、最大6時間雨量を対象とした場合、1時間雨量同様、崩壊土砂量1000 m<sup>3</sup>以下のケースと10万 m<sup>3</sup>以上のケースでは明瞭な関係がみられず(図-6.4.3b)、相関係数も小さかった(図-6.4.4)。一方、崩壊土砂量が1000~1万、1万~10万 m<sup>3</sup>のケースでは、雨量の増大にともない、崩壊密度が増加する傾向がみられ、相関係数は0.7程度と比較的大きかった(図-6.4.4)。

また、24時間雨量を対象としたとき、崩壊土砂量が1000~1万、1万~10万 m<sup>3</sup>の場合は、雨量の増大にともない崩壊密度が増加する明瞭な傾向が確認された(図-6.4.3c)。また、崩壊土砂量



が 1000 m<sup>3</sup> 以下、10 万 m<sup>3</sup> 以上のケースについても、概ね、雨量に増加にともない崩壊密度は増加し、相関係数は 0.5~0.6 であった。ただし、これらのケースでは、24 時間雨量が 500mm を超える範囲だけを見た場合、明瞭な相関が見られなかった。また、24 時間雨量が 300mm 以下では、崩壊土砂量が 1 万~10 万 m<sup>3</sup> の崩壊密度はきわめて低く、10 万 m<sup>3</sup> 以上の崩壊は 1 つも発生していなかった。これに対し土砂量 1 万 m<sup>3</sup> 以下の崩壊は 24 時間雨量が 300mm 以下であっても多発しており、特に、1000 m<sup>3</sup> 以下の崩壊の相対的な密度は 1 以上であった。

48 時間雨量を対象とした場合、崩壊土砂量によらず、雨量の増加にともない崩壊密度が増加した(図-6.4.3d)。雨量と崩壊密度の相関係数はいずれの崩壊規模に関しても 0.6 以上であった(図-6.4.4)。ただし、48 時間雨量が 1000mm を超えるようになると、雨量の増加にともなう崩壊密度の増加傾向は小さくなった。また、崩壊土砂量が大きくなるに従い、崩壊密度が 0 付近から急激に立ち上がる値は大きくなった。すなわち、崩壊土砂量 1000 m<sup>3</sup> 以下では雨量が 300mm、1000~1 万 m<sup>3</sup> では 400mm、1 万~10 万 m<sup>3</sup> では 500mm、10 万 m<sup>3</sup> 以上では 600mm より小さい場合、密度は雨量に関係なく概ね 0 であった。この結果は、48 時間雨量が 600mm 以上の場合に複数の深層崩壊が起きたとする内田ら(2012)<sup>5)</sup>の結果と矛盾しない。

### (3) 雨量と崩壊土砂量、出現頻度との関係

図-6.4.5 には 最大 1、6、24、48 時間雨量と崩壊土砂量と出現頻度の関係を示した。図に示したように、崩壊土砂量の最頻値より、崩壊土砂量の大きい範囲では、崩壊土砂量と出現頻度の関係は両対数グラフ上で概ね傾きが負の直線関係にあった。これまで、崩壊土砂量の最頻値より小さい範囲では、崩壊土砂量-出現頻度関係に崩壊判読の精度が影響していることなどが指摘されてきており<sup>2)</sup>、本研究でも、以下の検討では、最頻値より大きい範囲の崩壊土砂量-出現頻度関係について検討することとした。

最大 1 時間雨量でデータを分類した場合(図-6.4.5a)、1 時間雨量の増加により、崩壊土砂量-出現頻度関係が図上の上側に位置する(規模の大きい崩壊の頻度が大きくなる)ような傾向はみられなかった。6 時間雨量でデータを分類した場合でも、崩壊土砂量-出現頻度関係と雨量に明らかな関係が見られなかった(図-6.4.5b)。

一方、24 時間雨量でデータを分類した場合、差は小さいものの、24 時間雨量が最も小さい 500mm 以下のデータで、崩壊規模が大きいときの出現頻度が最も小さかった。次いで、雨量が 500~600mm の場合の出現頻度が小さかった(図-6.4.5c)。さらに、雨量が 600~700mm のときの崩壊土砂量-出現頻度関係は 500~600mm の関係のやや上側に位置し、雨量 700~800mm、800mm 以上の関係が図上で最も上側に位置したが、2 つの関係に明確な差がみられなかった。

さらに、48 時間雨量でデータを分類した場合、雨量が 600mm 以下の場合の規模の大きい崩壊の出現頻度が最も小さく、次いで、600~800mm の規模の大きい崩壊の出現頻度が小さかった。48 時間雨量が 800mm 以上の 3 つの崩壊土砂量-出現頻度関係は、600~800mm より規模の大きい出現頻度は高かったものの、3 つの関係の間には明瞭な差はみられなかった。

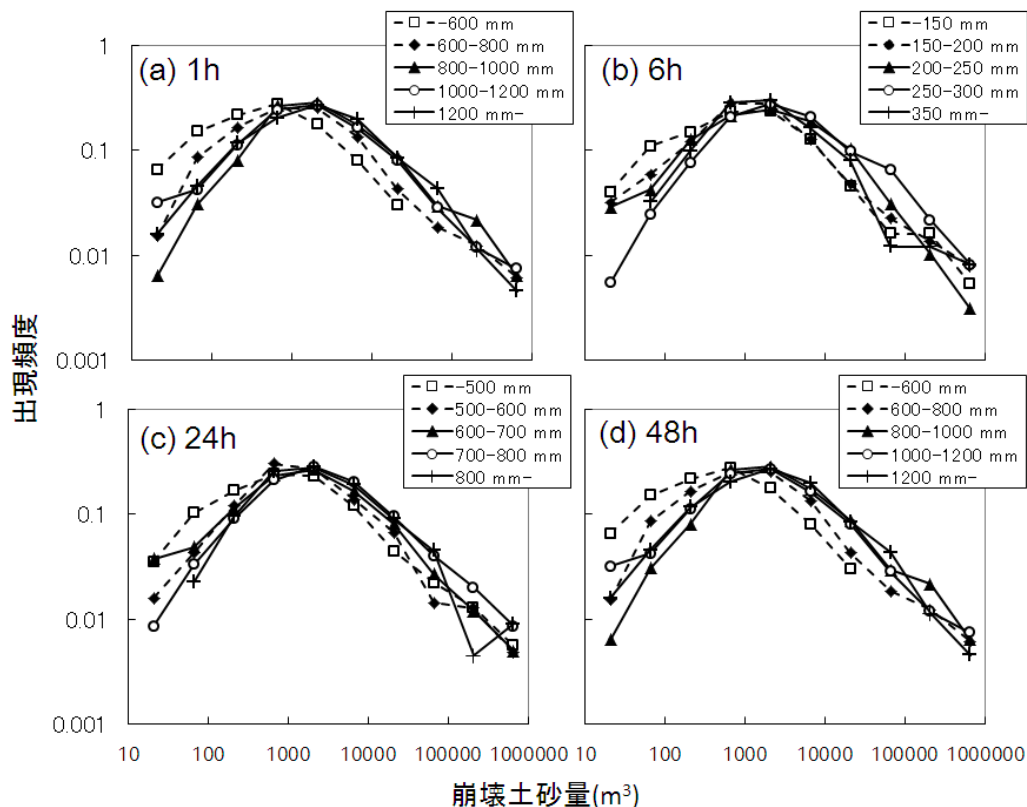


図-6.4.5 最大1, 6, 24, 48時間雨量と崩壊土砂量と出現頻度の関係

#### 6.4.4 考察と結論

##### (1) 雨量が崩壊密度・規模に及ぼす影響

以上の結果、雨量が崩壊密度・規模に及ぼす影響は図-6.4.6のように整理できる。すなわち、短時間の雨量は、崩壊密度や規模に及ぼす影響は小さかった(図-6.4.3~6.4.5)。一方、長時間の雨量(本研究の対象現象の場合は24時間以上)の場合、雨量は崩壊密度・規模に影響を及ぼすようになる。しかし、雨量と崩壊密度の相関係数は小さく(図-6.4.4)、規模の大きい崩壊に対する雨量の影響は相対的には小さい。また、長期間の雨量が大きくなればなるほど、密度・規模が大きくなり、密度・規模ともに頭打ちにある傾向が見られた(図-6.4.3、6.4.5)。

また、最大48時間雨量が最も規模の崩壊密度と相関が高い結果は、内田ら<sup>5)</sup>の深層崩壊の発生の有無を表現する降雨指標として、48時間雨量が適当であるとした結果と矛盾しない。

##### (2) 崩壊密度と規模に及ぼす素因の影響

ここでは、崩壊規模、密度に及ぼす素因の影響について考察する。本研究では崩壊に影響を及ぼす素因として、斜面勾配、標高、斜面方位について検討した。斜面勾配は一般的に最も斜面崩壊に影響の大きい地形条件の1つで、近年、深層崩壊であっても、勾配が急になるほど発生頻度が高まることが示されている<sup>6)</sup>。また、平石ら(2011)<sup>7)</sup>は、十津川流域にはほぼ同標高に遷急線が存在し、この遷急線に沿って大規模な崩壊が生じていることを示した。そこで、本研究でもこの結果を参照に標高を崩壊に影響しうる素因とした。また、堆積岩地域においては、斜面崩壊の発生が地盤構造(受け盤、流れ盤など)の影響を強く受けると考えられるため、斜面方位が斜面崩壊発生をコントロールする素因となると考えられてきた。

斜面勾配と崩壊密度の関係には、崩壊土砂量10万 $m^3$ 以下の3つの関係は明瞭な正の相関が見られた(図-6.4.7a)。一方、崩壊土砂量10万 $m^3$ 以上の場合、斜面勾配と崩壊密度の間には明瞭な相関関係が見られなかった。一方、斜面勾配 $25^\circ$ 以下の崩壊土砂量-出現頻度関係はやや下側

に位置したが、他の3つの崩壊土砂量-出現頻度関係には斜面勾配による明瞭な差は見られなかった(図-6.4.8a)。

標高と崩壊密度の関係には、崩壊土砂量10万m<sup>3</sup>以下の3つの関係は明瞭な傾向は見られなかった(図-6.4.7b)。一方、崩壊土砂量10万m<sup>3</sup>以上の場合、標高が500~700mのときに、崩壊密度が概ね2以上と特異的に高くなった。また、土砂量10万m<sup>3</sup>以下の範囲では崩壊土砂量-出現頻度関係は標高による明瞭な差は見られなかった(図-6.4.8b)。一方、土砂量10万m<sup>3</sup>以上の範囲では、標高による明瞭な差が生じ、標高500~750mの関係が明瞭に最も出現頻度が高かった。

斜面方位と崩壊密度の関係では、崩壊土砂量1万m<sup>3</sup>以下の2つの関係は、北から東回りの方位角(以下、単に方位と呼ぶ)が45°~180°のとき、相対的な密度が1を上回り、1万~10万m<sup>3</sup>の場合は方位が0~135°密度が1を上回った(図-6.4.7c)。一方、崩壊土砂量10万m<sup>3</sup>以上の場合、10万m<sup>3</sup>以下の3つの場合と反対な270~360°で密度が1を上回った。さらに、方位が270~360°の大規模な崩壊の出現頻度が、他の3つの方位角に比べて明瞭に大きかった(図-6.4.8c)。

以上の結果より、崩壊土砂量10万m<sup>3</sup>以上の斜面崩壊は標高、斜面方位の影響を強く受けており、長期的な地形発達過程や地質構造の影響を強く受けている可能性が高い。台風12号による高雨量域は、大峰山脈や大台ヶ原の山頂付近の高標高域と重なっている(図-6.4.2)。すなわち、必ずしも雨量の増大に従い、土砂量10万m<sup>3</sup>以上の崩壊密度が増大しなかった理由の1つは、素因(標高)として、土砂量10万m<sup>3</sup>以上の斜面崩壊がおきやすい場所で雨量が大きくなかった可能性が考えられる。さらに、土砂量10万m<sup>3</sup>以上の崩壊は、地質構造の影響も強く受けていることも考えられ、地質構造が崩壊の頻度・規模を制約していた結果、雨量が大きい範囲で、雨量が斜面崩壊の頻度・規模に影響しなくなる可能性が指摘できる。また、同様に、規模の小さい崩壊においても、素因の制約が、雨量と崩壊頻度・規模に影響を及ぼしている可能性が考えられる。以上、図-6.4.6にまとめたように、台風12号による斜面崩壊状況から、

- ・非常に雨量が大きくなると斜面崩壊の頻度・規模に及ぼす雨量の影響が小さくなること
- ・雨量が影響しなくなる要因として、素因による頻度・規模の制約が考えられることが分かった。

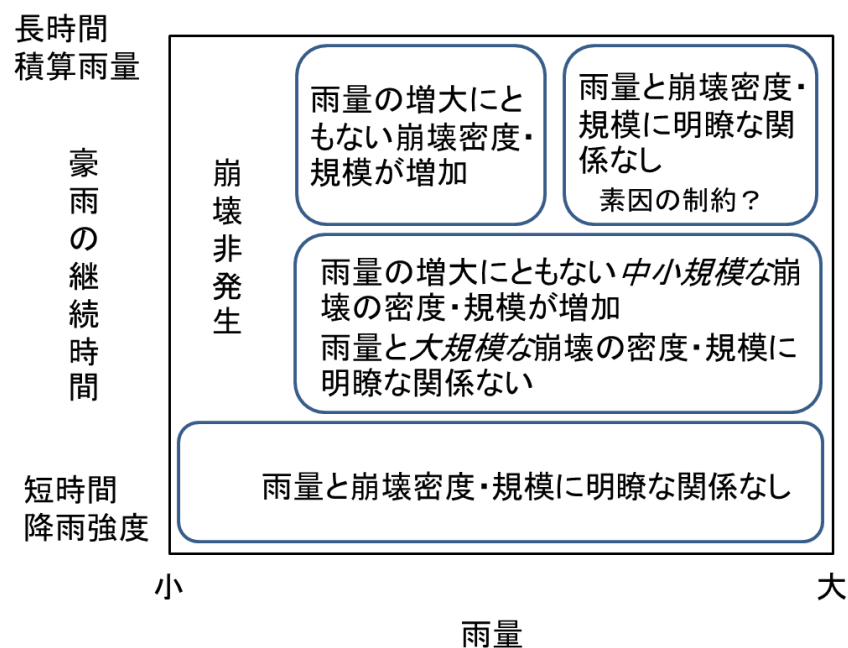


図-6.4.6 雨量が崩壊密度・規模に及ぼす影響

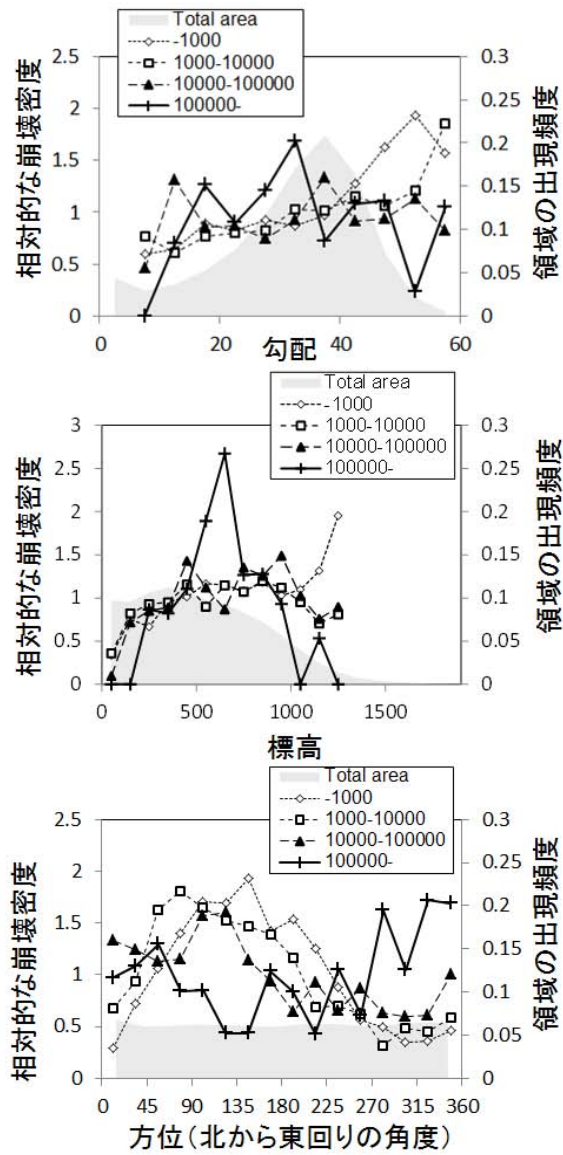


図-6.4.7 斜面勾配、標高、斜面方位と相対的な崩壊密度の関係。凡例の数字は崩壊土砂量 (m<sup>3</sup>)

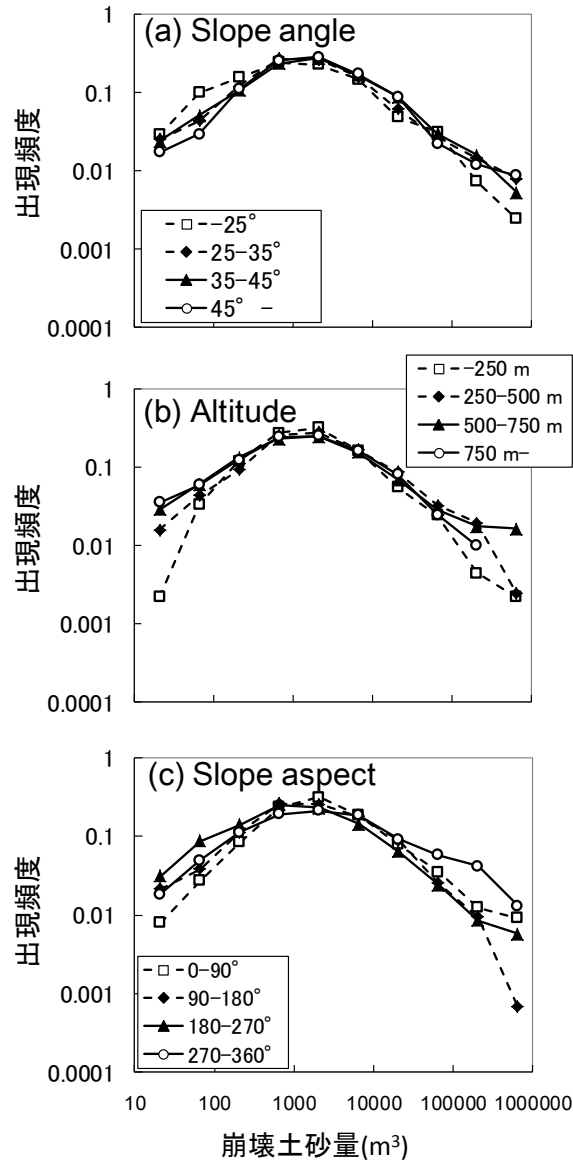


図-6.4.8 斜面勾配、標高、斜面方位と崩壊土砂量と出現頻度の関係

参考文献

- 1) 例えば、Murakami, Y., Shimizu, O., Sato, H., and Yamada, T. : Sediment-related disaster caused by Typhoon 0310 Etau in Hidaka Region of Hokkaido, Japan, Int. J. Erosion Cont. Eng., Vol.1, pp.30-37, 2008
- 2) 例えば、Stark, C. P. and Hovius, N. : The characterization of landslide size distributions Geophys. Res. Lett., Vol.28, No.6, pp.1091-1094, 2001
- 3) 例えば、野呂智之、倉本和正、小山内信智：土砂災害発生危険基準線に対する客観的な設定手法の有効性, 土木技術資料, Vol.47 No.4 pp.26-31, 2005
- 4) Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., Rossi M. and Valigi D. : Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 279, pp.222-229, 2009



- 5) 内田太郎, 岡本 敦, 佐藤 匠, 水野正樹, 倉本和正 : 深層崩壊発生降雨の特徴、京都大学防災研究所「深層崩壊の実態, 予測, 対応」講演要旨集、pp. 64-68, 2012
- 6) Uchida, T., Yokoyama, O., Suzuki, R., Tamura, K., Ishizuka, T. : A new method for assessing deep catastrophic landslide susceptibility, Int. J. Erosion Cont. Eng., Vol. 4, pp. 32-42, 2011
- 7) 平石成美, 千木良雅弘 : 紀伊山地中央部における谷中谷の形成と山体重力変形の発生, 地形 Vol32, No.4, pp. 389-409, 2011