

2004 年台風 10 号豪雨により徳島県で発生した斜面崩壊に 影響する雨量・地形・地質特性

西山賢一 *・外山 真 **・岡田憲治 ***

*徳島大学大学院ソシオ・アート・アンド・サイエンス研究部, 〒770-8502 徳島市南常三島町 1-1,
** 鉄道建設・運輸施設整備支援機構, *** 気象庁予報部
責任著者: 西山賢一 (nisiyama@ias.tokushima-u.ac.jp)

Meteorological, geomorphological and geological features of slope failures caused by heavy rainfall associated with Typhoon 0410, Tokushima, Japan.

Ken-ichi NISHIYAMA *, Makoto TOYAMA ** and Kenji OKADA ***

* Laboratory of Geology, Institute of Socio-Arts and Sciences, University of Tokushima,
1-1 Minamijosanjima, Tokushima 770-8502, Japan,

** Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency, *** Japan Meteorological Agency
Correspondence: Ken-ichi NISHIYAMA (nisiyama@ias.tokushima-u.ac.jp)

Abstract

Many slope failures and debris flows triggered by heavy rainfall associated with Typhoon 0410 (Namtheun) occurred in Nakagawa area, Tokushima, Japan on July 31st to August 1st, 2004. Extraordinary intense heavy rainfall was recorded in this area. Many slope failures and some landslides occurred at steep mountain slopes, which consist of accretionary complex. Distribution and density of slope failures are closely related to amount of total rainfall and soil water index, topographical features such as density of valley head and relative relief, and geological features such as crack density of rock masses.

Keywords: Typhoon 0410, slope failure, soil water index, heavy rainfall

はじめに

2004 年に四国に上陸した台風 10 号 (アジア名: Namtheun) に伴い, 徳島県南部的那賀川上流域では, 総雨量が最大で 2,000mm に達する記録的な豪雨が降り, 土砂の流下距離が 1km 以上に達する大規模な斜面崩壊・地すべりが複数発生した (西山ほか, 2005; 櫻井ほか, 2006). そのうち, 阿津江地区で発生した地すべりに関する詳細な検討はすでになされているが, 広域にわたる崩壊分布と雨量・地形・地質に関する検討は行われていない (橋本ほか, 2006; 中屋ほか, 2006; 横山ほか, 2006). そこで今回, 2005 年に撮影された那賀川上流域の広範囲 (約 25km×15km) の空

中写真判読を行い, 2004 年豪雨による斜面崩壊分布図を作成するとともに, 雨量と土壌雨量指数, 地形的特徴を表す一次谷の個数・起伏量, ならびに地質分布の各要因と崩壊分布との関係について検討を行ったので報告する.

調査地域と研究方法

調査地域は徳島県的那賀川上流域であり, 豪雨災害の翌年 (2005 年) に撮影された 1/3 万空中写真を用いて斜面崩壊の判読を行い, 崩壊分布図を作成した. この範囲内に設置されている雨量計 40 基 (AMeDAS 雨量計 6 基に加え, 徳島県の雨量計 32 基, 四国電力株式会社の雨量計 2 基) の雨量データを解析した. さらに, 気象庁による土

壤雨量指数のメッシュマップ（緯度1°×経度1°を緯度方向に20等分，経度方向に16等分したもので，徳島付近ではメッシュの面積は約31.2km²）ごとの土壤雨量指数の最大値を求めた。このメッシュの南北の列を1～5，東西の列をA～Eとし，計25メッシュに区分した（図1）。このうち，A1，B1，C1は空中写真が入手できず，判読の対象外とした。

斜面崩壊に影響する地形的特徴として，起伏量と谷頭数に着目した。いずれも1/5万地形図を用い，上記のメッシュごとに起伏量を求めるとともに，水系図を作成し，1次谷の谷頭数をメッシュごとに求めた。また，斜面崩壊に影響する地質的特徴として，既存の1/20万「四国地方土木地質図」（四国地方土木地質図編纂委員会，1998）を用い，崩壊分布図と重ね合わせた。

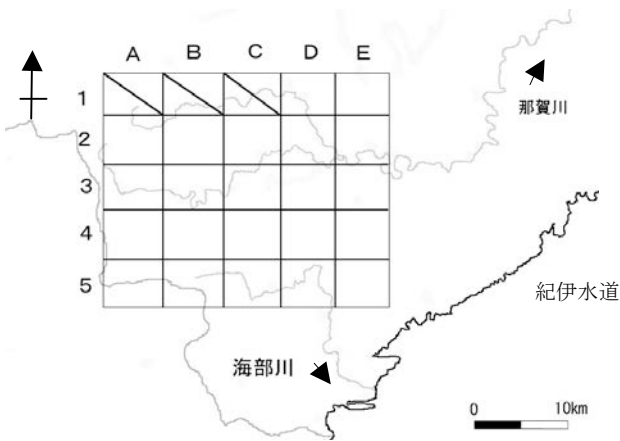


図1 研究対象地域

雨量データの解析

2004年豪雨で最大の雨量を記録した海川雨量計のハイトグラフを図2に示す。海川では，7/31は575mm/日で，翌8/1は15時までに122mm/hを記録し，17時，19時でも100mm/hを超えた。8/1の1,317mm/日は，それまでの日本記録（那賀町日早，1976年台風17号による1,107mm/日）を200mm以上も更新した。

台風が通過した7/31の日雨量コンターマップを図3に示す。最大値を記録した殿河内を中心に，強雨域が北東部に広がっているほか，海川を含む中心部，ならびに南西部の魚梁瀬を中心とした強雨域が存在する。すなわち，対象範囲内の比較的

広い範囲に強雨域が広がっている。

日雨量が日本記録を更新した8/1の日雨量コンターマップを図4に示す。図3と異なり，日本記録を更新した海川を中心に，強雨域はほぼ南北の帯状の領域に広がっている。

7/30～8/5にかけての総雨量コンターマップを図5に示す。総雨量は，日雨量の日本記録を更新した海川を中心に，ほぼ南北に強雨域が広がっており，図4と類似している。

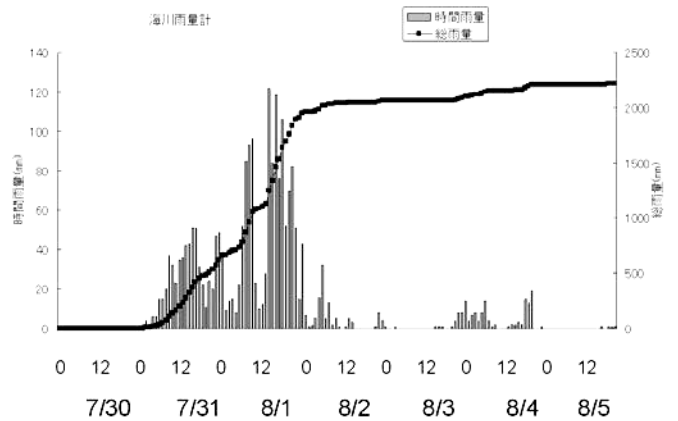


図2 海川雨量計のハイトグラフ

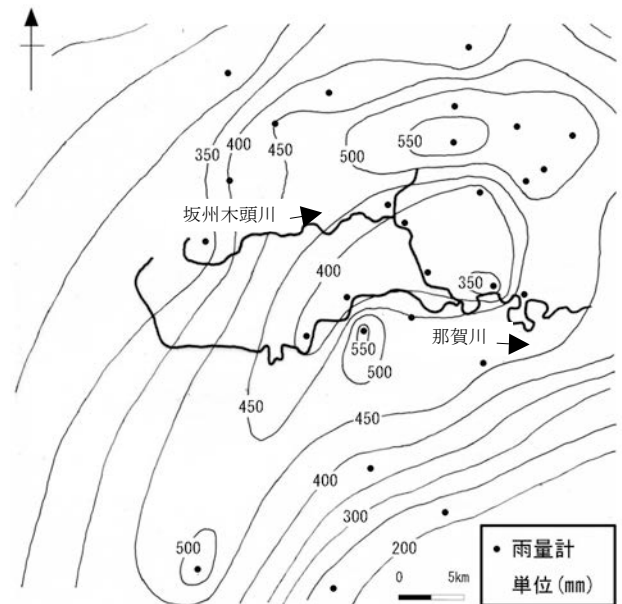


図3 7/31の日雨量コンターマップ

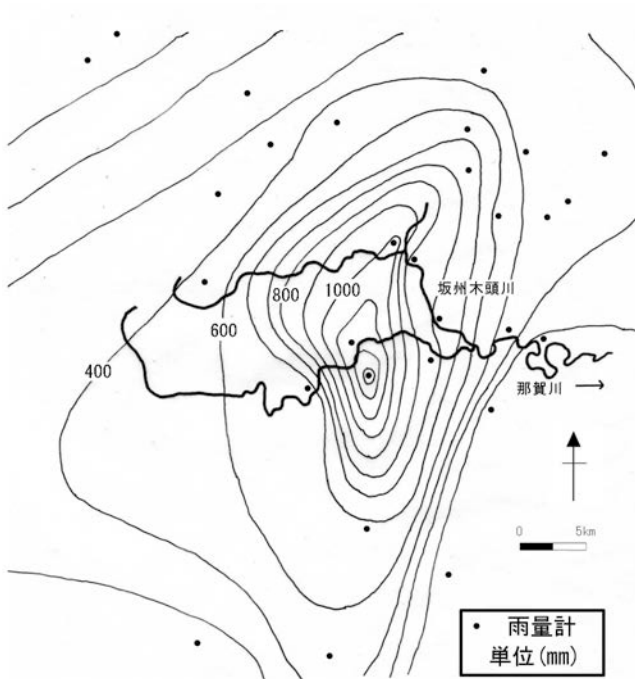


図4 8/1の日雨量コンターマップ

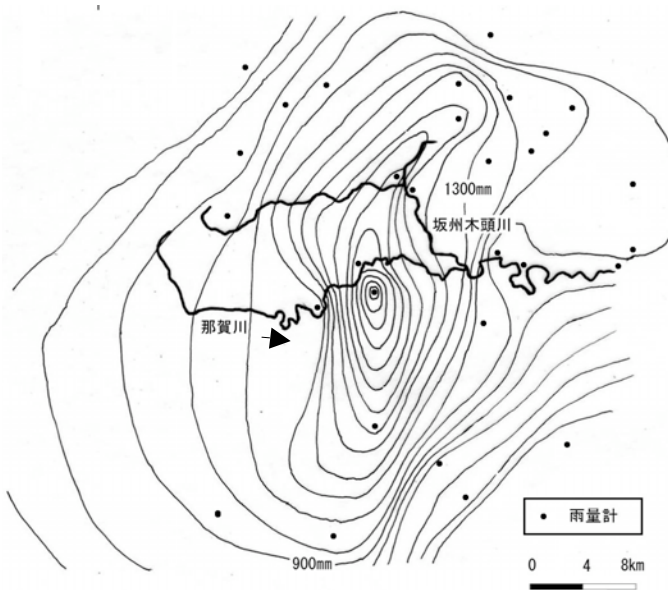


図5 7/30~8/5までの総雨量コンターマップ

土壌雨量指数の解析

土壌雨量指数は、全国を数 km の格子 (2004 年は約 5km 四方) ごとに区切り、解析雨量を降雨の入力値とし、土層から岩盤にかけての浸透と流出を、3 段のタンクモデルで表現したものであり、

雨量計の実測値から求めることもできる (岡田, 2000)。

海川雨量計の実測値から求めた土壌雨量指数の時間変化 (7/31 の 0 時~8/3 の 24 時) を図 6 に示す。海川では、8/1 午後の豪雨で値が増加し、20 時に 600 を超えて最高値となった。第 2 タンクの値は、それからやや遅れて最高値となった。

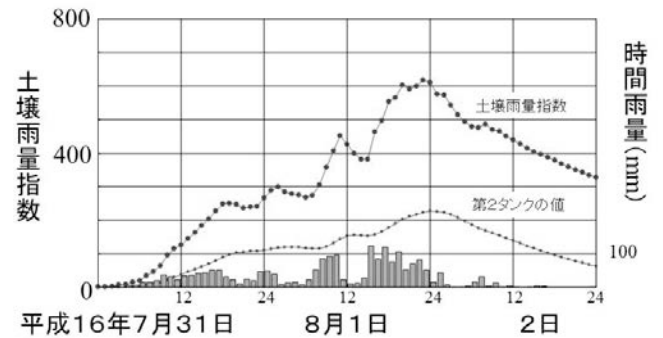


図6 海川雨量計の雨量に基づく土壌雨量指数

メッシュごとに求められた解析雨量に基づく 4 日間の土壌雨量指数の最大値を比較した (図 7)。E1 の 560 が最大で、D4 の 510、C5 の 490 がそれに次いで高い。一方、A3、A4、A5 が 300 未満と低い。全メッシュの半分にあたる 11 メッシュで、土壌雨量指数の最大値が 400 を超えた。また、過去 10 年間の履歴 1 位を更新したメッシュは 15 メッシュである (A2、B2、B3、C2、C3、C4、C5、D 列の全部、E1、E2、E4)。

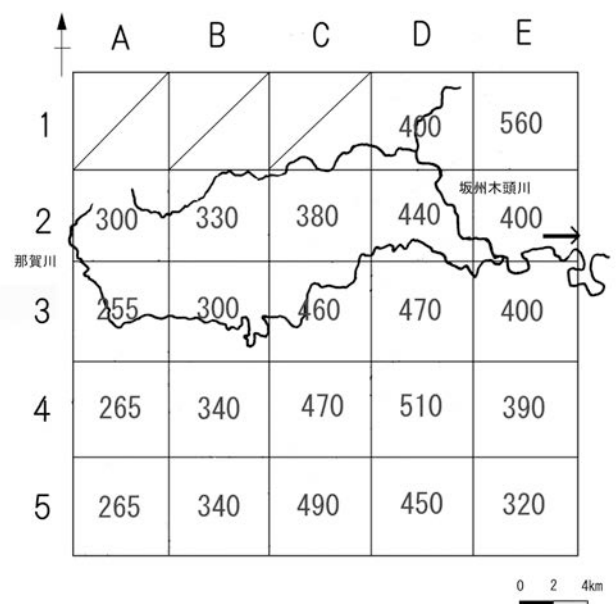


図7 メッシュごとの土壌雨量指数の最大値

調査地域の地形・地質概要

調査地域は、剣山（1,955m）を主峰とする四国山地の南東部にあたり、高知県境を源流とする那賀川と、剣山の主稜線の南側を源流とする坂州木頭川が流下している。那賀川の本流は大局的に縦谷であり、一部では顕著な生育蛇行が認められる。坂州木頭川も、沢谷から上流は縦谷であるが、沢谷から那賀川本流との合流点までは、ほぼ東西に延びる地質帯ならびに稜線を横断して南へ流下する横谷をなす。また、この横谷区間で坂州木頭川に合流する支川は、上流部の河川勾配が比較的小さく、坂州木頭川の合流点付近で河川勾配が急になる不調和合流となり、沢谷にある「轟の滝」などの滝を伴う。

那賀川の本流沿いには河岸段丘が断片的ながら分布し、最大で10段に細分されるとともに、テフラを用いた段丘の編年がなされている（植木, 2008）。また、那賀川上流域には、多数の地すべり地形が分布する（寺戸, 1986; 北村・西山, 2007）。このうち、那賀町中内に分布する中内地すべりは、地すべり移動体が K-Ah (7.3 cal. ka BP) に覆われ、AT (29 cal. ka BP) が欠如することから、地すべりの発生年代が推定された（植木, 2005）。テフラを用いた山地斜面の長期的な安定性を検討した例として、2004年豪雨で大規模な斜面崩壊が発生した那賀町大用知地区の旧崩壊堆積物中から AT が見いだされている（西山・田村, 2011）。

山地の稜線には、しばしば線状凹地が認められる（寺戸, 1986 など）。那賀川の南にある源蔵ノ窪が典型的である。この種の凹地は、長期的な山体の重力変形の地形的現れとみなされている（千木良, 1998）。

調査地域周辺の地質分布は、東西に走向をもつ帯状構造をなし、仏像構造線を介して北の秩父累帯と南の四万十帯に分けられ、秩父累帯はさらに秩父帯、黒瀬川帯、三宝山帯に細分されている（四国地方土木地質図編纂委員会, 1998）。黒瀬川帯の一部を構成する白亜系の陸棚堆積岩類および随伴する火成岩類（花崗岩・蛇紋岩）を除くと、基本的に付加体堆積岩類（砂岩・泥岩・メランジュ・チャート・石灰岩など）と緑色岩（玄武岩質溶岩・火砕岩）からなる。走向は概ね東西をなし、北傾斜または南傾斜する。断層が多く分布し、小岩体はレンズ状をなすことが多く、地質構造は複雑である（村田, 2003）。黒瀬川帯の一部および

秩父帯には、千枚岩・片状砂岩・準片岩などの弱変成岩が伴われる。

斜面崩壊の分布

斜面崩壊の判読結果を図8に示す。各崩壊について、滑落崖から崩壊土砂の末端までの水平距離を25m単位で流下距離（m）として計測した。総崩壊数は825個で、流下距離が500mを超える崩壊は15個である。崩壊分布図より、(1) 那賀川より南側で崩壊が群発し、南東側へ行くほど少ない、(2) 那賀川本流に直接流下した崩壊はほとんどない、(3) 流下距離が500mを超える崩壊は、坂州木頭川と、那賀川中流の支川（海川谷川など）沿いで多発している、といった特徴が読み取れる。

メッシュごとの崩壊個数は、C4が94個と最多で、B5、A5、A4が80個以上と多い。逆に、E2が3個と最小で、E5、D5、E4は10個未満と少ない。流下距離が500mを超えるものは、D2の6個が最多で、D1・D3がそれぞれ3個、A1・C1・D1がそれぞれ1個となった。すべてのメッシュの平均崩壊個数は37.5個、1km²あたりの崩壊個数に換算すると1.2個となる。

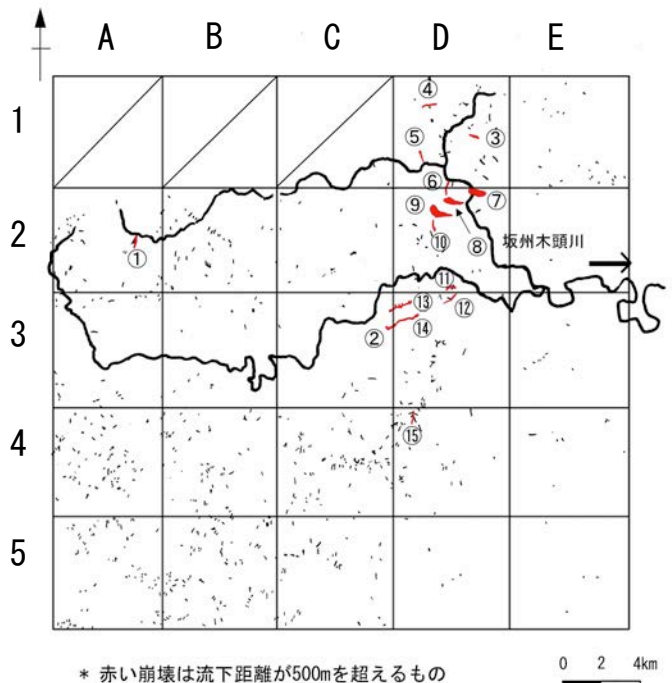


図8 斜面崩壊の判読結果。番号がある崩壊は流下距離が500mを超えたもの。

表1 流下距離が500m以上の崩壊の一覧（番号は図8参照）

番号	500mを超える崩壊名	メッシュ名	流動距離(m)	比高(m)	斜距離(m)	みかけの摩擦角(°)
①	槍戸川	A2	575	310	653	28.3
②	海川西	C3	575	290	644	26.8
③	西三子山	D1	975	410	1058	22.8
④	釜ヶ谷川	D1	1025	400	1100	21.3
⑤	しがきの丸	D1	800	450	918	29.4
⑥	三田	D2	775	430	886	29.0
⑦	阿津江	D2	1000	340	1056	18.8
⑧	加州	D2	1100	520	1217	25.3
⑨	大用知	D2	1375	500	1463	20.0
⑩	井堀	D2	700	180	723	14.4
⑪	姥々谷北	D2	550	250	604	24.4
⑫	姥々谷南	D3	925	460	1033	26.4
⑬	海川1号	D3	900	440	1002	26.1
⑭	海川2号	D3	1400	550	1504	21.4
⑮	海川谷	D4	1025	300	1068	16.3

地形解析

起伏量と谷頭数

起伏量が最大となったのはA2の1,280mで、1と2の列はいずれも1,000m以上ある。逆に、E5の483mが最小で、D5、E3が650m未満と小さい。すなわち、調査地域は北西部ほど起伏量が大きく、南東部では起伏量が小さい。

谷頭数が最多となったのはE5の1,071個で、次いでE4、E3が1,000個以上と多い。一方、C3が619個で最小となり、B3、C5も650個未満となる。すなわち、調査地域は南東部ほど谷頭数が多く、それ以外は全般に少ない。

流下距離が500mを超える斜面崩壊の地形解析

流下距離が500mを超える崩壊は15個発生した。1/5万地形図を用いて、それぞれの崩壊の流下距離(m)、比高(m)、みかけの摩擦角(°)、斜距離(m)を測定した(表1)。流下距離が最長となったのは海川2号の1,400mである。流下距離が1,000mを超える崩壊は6個あり、全てD列で発生した。比高が最大となったのは海川2号の550mで、次いで加州と大用知が500m以上ある。斜距離が最長となったのは海川2号の1,504mで、大用知と加州が1,200m以上となった。斜距離が1,000mを超えた崩壊は9個あり、すべてD列で発生した。みかけの摩擦角が最小となったのは井

堀の14.4°で、最大はしがきの丸の29.4°であり、すべての崩壊で見かけの摩擦角が30°未満となった。

斜面崩壊分布と雨量・地形・地質条件の重ね合わせ

崩壊分布と総雨量・土壌雨量指数

崩壊分布図と総雨量コンターを重ね合わせると、流下距離が500mを超える崩壊は、ほぼ総雨量1,400mm以上の領域で発生した(図9)。また、南西部(総雨量900mm~1,200mm)で崩壊が群発したが、流下距離が500mを超える崩壊は発生しなかった。一方、南東部では全般に崩壊が少ない。

崩壊分布図と土壌雨量指数のメッシュを重ね合わせると、流下距離が500mを超える崩壊は、土壌雨量指数の最大値が300~510のメッシュで発生し、A1を除くと、強雨域北東部の土壌雨量指数400~510のメッシュで多発した(図10)。土壌雨量指数が過去10年間の履歴1位を更新したのは、A2、B2、B3、C2、C3、C4、C5、D列の全部、E1、E2、E4の15メッシュであり、今回、流動距離が500mを超える崩壊が発生したのは、そのうちの6メッシュ(表1参照)である。

南西部では土壌雨量指数は265~470で、かつ、崩壊数が最多となったC4を除くと、過去10年間の履歴1位を更新していない。土壌雨量指数が最

高値の 560 を記録した E1 の崩壊数は 28 個で、次に高い 510 を記録した D4 で 31 個、490 を記録した C5 で 42 個となった。一方、土壌雨量指数が 2 番目に低い 265 の A4 では 86 個、A5 では 88 個と多く、崩壊個数と土壌雨量指数とに単純な相関は見られない。

崩壊分布と起伏量・谷頭数

崩壊分布図と起伏量データを重ね合わせると、流下距離が 500m を超える崩壊は、起伏量が 760m を超えるメッシュで発生し、特に多発した D2 の起伏量は 1,052m である (図 11)。南西部の崩壊多発域では、起伏量は 800m 以上ある。一方、崩壊数が最小の E2 では 1,004m で、崩壊数が一桁の E5, D5, E4 では 700m 以下である。起伏量が最大の 1,280m となる A2 の崩壊数は 50 個、流下距離が 500m を超える崩壊が 1 個である。1,200m を超える C2 で 16 個、1,100m を超える D1 で 42 個、流下距離が 500m を超える崩壊が 3 個となった。一方、起伏量が 500m 未満の E5 の崩壊数は 4 個となった。

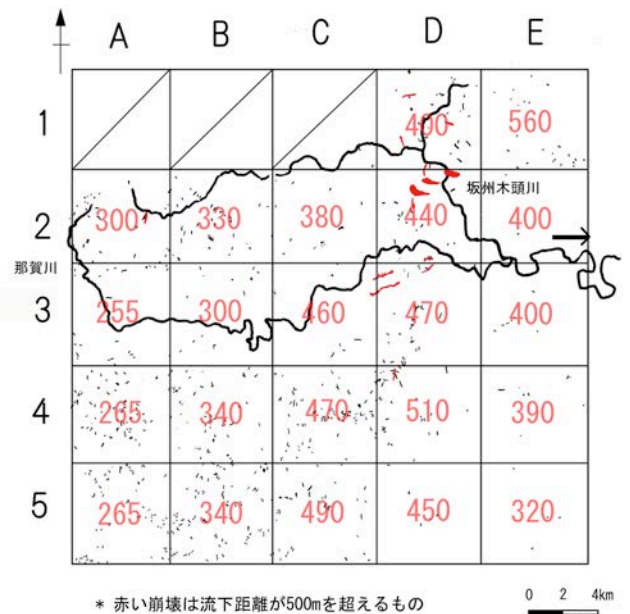


図 10 崩壊分布図と土壌雨量指数 (最大値) の重ね合わせ

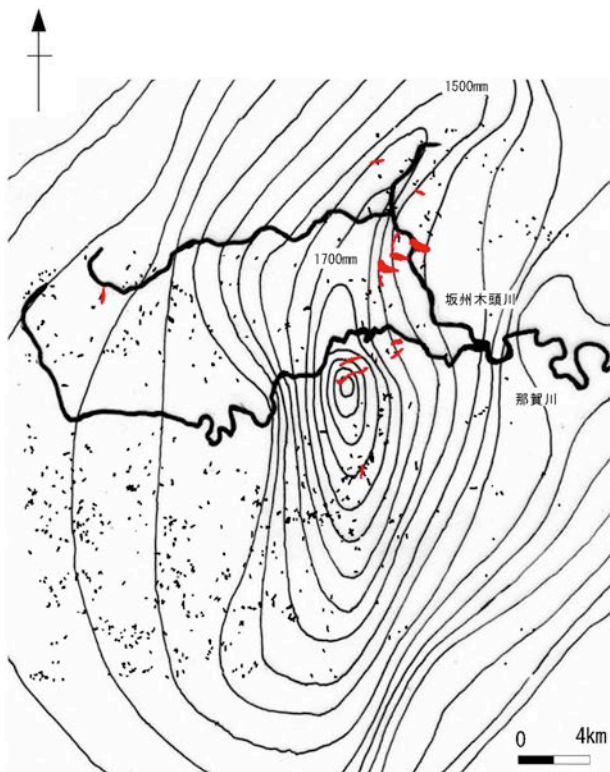


図 9 崩壊分布図と総雨量コンターの重ね合わせ

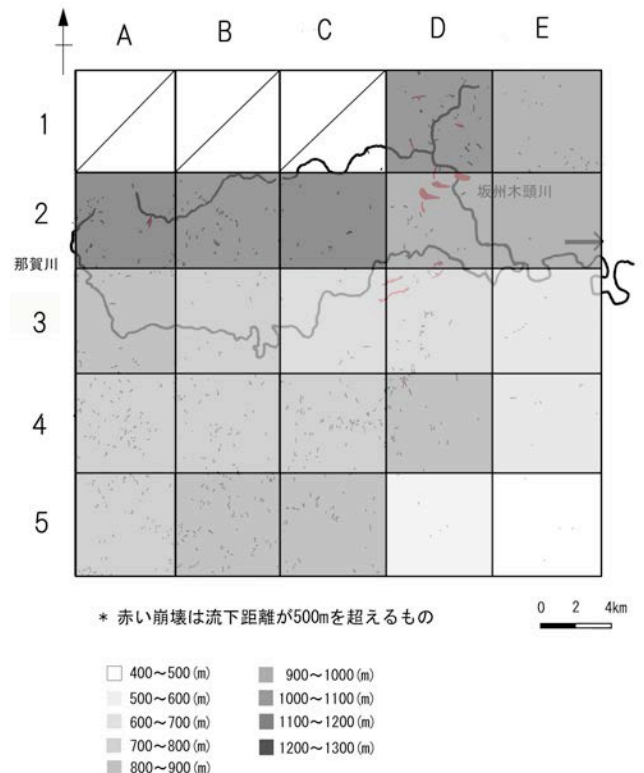


図 11 崩壊分布図と起伏量の重ね合わせ

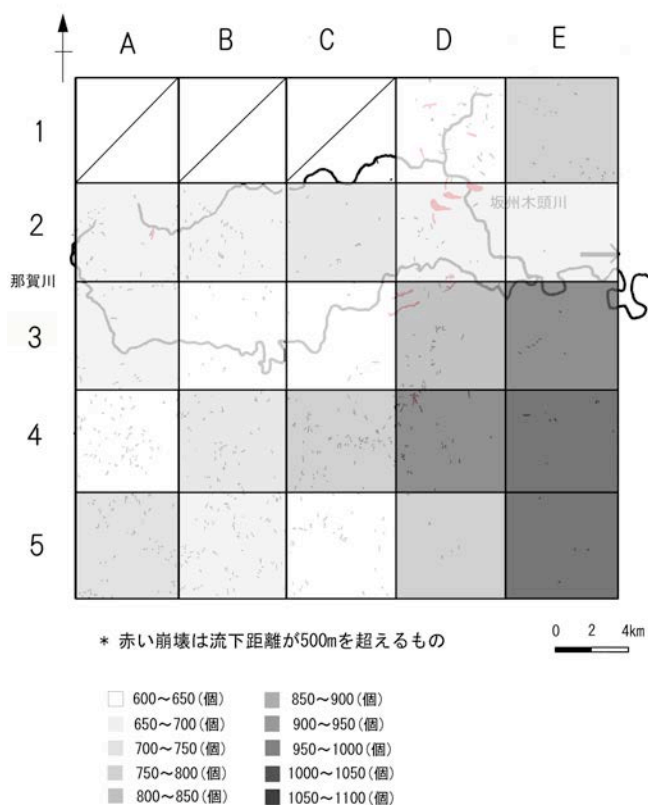


図 12 崩壊分布図と谷頭数の重ね合わせ

崩壊分布図と谷頭数データを重ね合わせると、流下距離が 500m を超える崩壊は、谷頭数が 600～1,000 個程度のメッシュで発生した (図 12)。崩壊が群発した南西部では谷頭数が 600～750 個程度であった。一方、崩壊数が最小の E2 は 698 個であるが、崩壊数が一桁となった E5 と E4 は 1,000 以上と比較的多い。谷頭数が 1,000 個を超える E5, E4 では 10 個未満と少なく、D4 でも 31 個となった。

崩壊分布と地質分布との関係

崩壊分布図と既存の地質図 (四国地方土木地質図) を重ね合わせると、崩壊個数は、秩父帯で 70 個、黒瀬川帯で 114 個、三宝山帯で 73 個、四万十帯で 568 個となり、特に四万十帯での崩壊数が多く、全体の約 70% を占める (図 13)。しかし、崩壊が群発したのは四万十帯の西部で、東部や那賀川沿いでは少ない。

流下距離が 500m を超える崩壊は、秩父帯 2 個、黒瀬川帯 7 個、三宝山帯 5 個、四万十帯 1 個となり、黒瀬川帯・三宝山帯で多発した。黒瀬川帯では、緑色岩 3 ヶ所、千枚岩 2 ヶ所、砂岩泥岩互層

1 ヶ所、砂岩 1 ヶ所で、三宝山帯は、泥質基質のメランジュ 3 ヶ所、砂岩泥岩互層 2 ヶ所である。

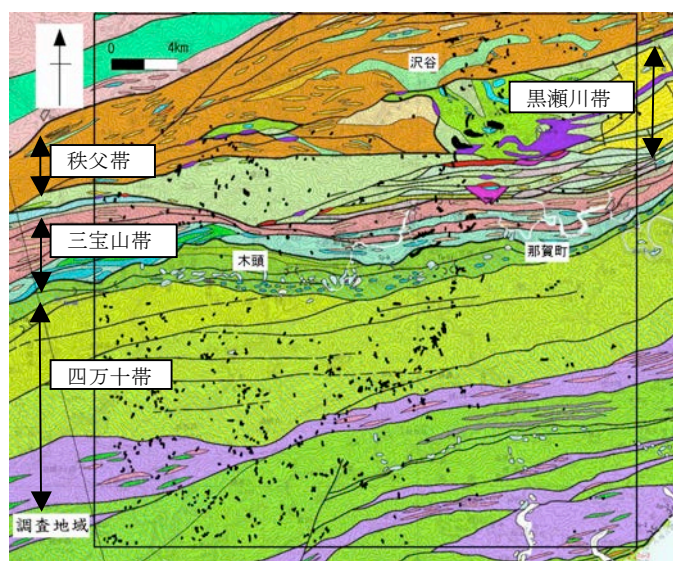


図 13 崩壊分布図と地質分布の重ね合わせ。地質図は四国地方土木地質図編纂委員会 (1998) による。

考察

総雨量・土壌雨量指数と崩壊

2004 年台風 10 号による総雨量は、日雨量の日本新記録を更新した海川の 2,216mm が最高であり、高知県西部に大きな被害をもたらした 1963 年台風 9 号 (剣山の総雨量 1015mm)、徳島県内で土砂災害が多発した 1975 年台風 6 号 (剣山の総雨量 820mm)、を大きく超え、1976 年台風 17 号 (那賀町日早の総雨量 2,690mm、寺戸、1980) に匹敵する値となった。

流下距離が 500m を超える崩壊は、総雨量が 1,400mm を超える領域で多発しており、一方、小崩壊は南西部の 1,100mm 前後の領域で多発した。ただし、雨量計から面的な雨量分布を推定する場合、その有効範囲は平野より山地のほうが若干狭くなるため、雨量計の数が少ない南西部では、強雨を十分に把握できなかった可能性も考えられる (村上ほか, 2008)。一方、崩壊の発生密度は、最大時間雨量と連続雨量の関数として表されるが、両者の関係は地域 (地質) ごとに異なると指摘されている (芦田ほか, 1986)。今回の場合、小崩壊の群発域が四万十帯に限られることから、四万十帯の風化帯の特性が関与する可能性も考

えられる。

時間雨量と崩壊の関係については、台風 10 号で 100mm/h を超えたのは、海川雨量計で計 3 時間と小見野々雨量計で 1 時間のみであり、流下距離 500m 以上の大規模な崩壊が散発した坂州木頭川流域の雨量計では観測されていない。小崩壊が群発した南西部でも同様である。

7 日間における土壌雨量指数の最高値は、E1 の 560 である。海川雨量計では土壌雨量指数が 600 を超えているが、海川雨量計を含むメッシュの最大値は 470 と低い。従って、局所的には、メッシュの値より高い土壌雨量指数を示す領域があることになる。また、南西部の土壌雨量指数が 340 以下の 4 メッシュ (A4, A5, B4, B5) は、過去 10 年間の履歴 1 位を更新していないにも関わらず、小規模な崩壊が群発した。

流下距離が 500m を超える崩壊は、土壌雨量指数 300~510 のメッシュで発生した。流下距離が 500m を超える崩壊が 3 個以上発生したメッシュの土壌雨量指数は 400~470 となる。また、土壌雨量指数が過去 10 年間の履歴 1 位を更新した 15 メッシュのうち、流下距離 500m 以上の崩壊が発生したのは 6 メッシュである。

那賀川流域では、2011 年台風 12 号による豪雨により、那賀町竹ヶ谷で斜面崩壊が発生した (西山ほか, 2012)。この崩壊は、黒瀬川帯に属する下部白亜系の浅海性堆積岩類 (鳥巢層群の栗坂層) で発生した。滑落崖は支流源流部の 0 次谷にあり、崩壊深さは 10m 強と深い。那賀川流域における顕著な崩壊の発生はこの 1 箇所のみである。

住民への聞き取り結果から、崩壊発生時刻は 9/3 の午前 3 時頃と推定される。崩壊地点を含むメッシュの解析雨量は、9/1 の午前 0 時~崩壊発生 (9/4 の午前 3 時まで) までの累積雨量は 692mm、前 24 時間雨量は 657mm に達していた。9/3 の土壌雨量指数の最大値は 360 である。この値は、2004 年台風 10 号豪雨、2005 年台風 17 号豪雨による記録を、9/3 の午前 0 時には超えており、実際に斜面崩壊が発生したのは、その約 3 時間後である。以上から、2012 年台風 12 号の雨量データに基づけば、那賀川流域では、累積雨量が 600mm、土壌雨量指数が 350 を越えると、斜面崩壊の発生が始まるといえる。

起伏量・谷頭数と崩壊

起伏量と崩壊個数とを検討した結果、崩壊の少ない南東部では起伏量が 700m 以下のメッシュが多く、崩壊が群発した南西部では起伏量が 800m 以上である。また、流下距離が 500m を超える崩壊は、起伏量が 700m 以上のメッシュで発生した。

寺戸 (1986) は、四国東部の大規模崩壊密度は、経緯度角 2 分ごとのメッシュにおける起伏量が 700m までは起伏量とともに増加し、それ以降は横ばいとなることと、起伏量が 600~900m の領域で崩壊の約 6 割が発生したと報告している。今回と比較すると、メッシュの大きさと崩壊の規模が異なるものの、ほぼ類似した結果といえる。

次に、谷頭数が多いメッシュは南東部に多い一方、起伏量は小さく、谷頭数と起伏量の関係は負の相関がみられる。一般に、谷頭斜面は降雨によって崩壊が発生しやすいと考えられるものの、今回の検討では、谷頭数と崩壊個数の相関は明確ではない。この理由として、谷頭数の多い南東部が、雨量の極値から離れていたことが要因のひとつと考えられる。しかし、流下距離が 500m を超える規模の大きな崩壊が発生した坂州木頭川流域は全般に谷頭数が小さいことから、谷頭数が小さい領域ほど、大規模な崩壊が散発的に発生した傾向が指摘できる。このことは、付加体からなる山地のうち、起伏量が大きい一方で谷頭数が小さい山地斜面では、小崩壊はごく少なく、大規模な崩壊が散発的に発生しやすいことを示唆する。同様の見解は、紀伊半島・四国・九州の事例を元に長谷川 (2012) によっても指摘されており、今後、より詳細な検討が必要である。

地質分布と崩壊

2004 年豪雨において、流動距離が 500m を超える大規模な崩壊は、秩父帯の斜面で多く発生し、特に黒瀬川帯の緑色岩分布域に多いことが改めて確認された。この理由として、黒瀬川帯の緑色岩のもつ構造的特徴が関与すると考えられる。例えば、緑色岩が分布する大用知地区では、自破碎して角礫状を呈する枕状溶岩の崩壊および塊状溶岩のくさび崩壊が発生した (西山ほか, 2005)。阿津江地区の崩壊斜面には、無数の微小断層群が網目状に発達し、個々の断層面が非常に磨かれた鏡肌を呈する緑色岩が分布する (横山ほか, 2006)。このような亀裂質の緑色岩が大規模な崩壊発生の地質的素因と考えられる。このほか、黒瀬川帯

に含まれる千枚岩・片状砂岩の分布域（加州地区など）では、岩盤クリープにより脆弱化した風化部が崩壊した（西山ほか，2005）。

2004 年豪雨により，三宝山帯では，海川 1 号では砂岩泥岩互層，海川 2 号では石灰岩とチャートが，それぞれ関与する崩壊が発生した（西山ほか，2005）。海川 2 号の崩壊土砂は，一時的に海川谷川をせき止め，対岸斜面に径 5m を超えるチャートの巨礫が達している。

秩父累帯で発生した過去の災害事例は，以下のように複数知られている。1701 年の豪雨で発生した徳島県上勝町山犬岳の崩壊（寺戸，1975），1892 年に那賀川本流の河道閉塞と地すべりダムの決壊を生じた高磯山の大規模崩壊（寺戸，1970；井上ほか，2005），高知県繁藤で 1972 年に発生した大規模崩壊（中川・奥西，1977；奥西・中川，1977），1976 年台風豪雨による那賀川・穴吹川流域の大規模崩壊（寺戸，1977；1980），などである。山犬岳の崩壊地では，滑落崖下方の緩斜面に，最大径 20m に達する巨大な緑色岩ブロックが散在しており，2004 年に緑色岩斜面で発生した大用知・阿津江に比べ，非常に大規模である。繁藤の場合，斜面上部にチャートがキャップロック状に分布し，斜面と斜交する断層破碎帯による地下水浸透の遮断が崩壊発生に影響した可能性が指摘されている。2004 年台風 21 号豪雨により三重県宮川村の秩父累帯で発生した大規模な岩盤崩壊の地質的素因として，厚いチャートや石灰質角礫岩などがキャップロック構造をなす斜面で複数発生したことが指摘されている（永田ほか，2010）。以上のように，付加体堆積岩のうち，特に緑色岩・石灰岩・チャートからなる斜面では，大規模な崩壊が発生しやすい地質条件をもつといえる。また，これらの岩塊は，しばしば径 5m 以上に達し，崩壊土砂に巻き込まれた場合の破壊力を大きく増す効果を持つ。

砂岩泥岩互層からなる海川 1 号の崩壊に関して，災害前の空中写真および地形図の判読では，谷口にあたる海川谷川との合流点付近に沖積錐が形成されており，小見野々ダム建設後に沖積錐を形成した土砂流出が生じたと推定される。また，現地調査ならびに 2005 年撮影の空中写真によれば，崩壊地付近は広い範囲に幼齢林が広がっており，これが沖積錐の形成と 2004 年の崩壊発生に影響した可能性が考えられる。これに関して，1975 年台風 6 号による剣山周辺での斜面崩壊と

植生との関係に関する検討では，単位面積あたりの崩壊個数は，壮齢林に比べ，中齢林で 4 倍，幼齢林で 13 倍に達した（寺戸，1976）。今回は植生と崩壊密度との詳しい検討を行っておらず，今後の課題である。

黒瀬川帯にはしばしば蛇紋岩が分布するものの，蛇紋岩を発生源とした崩壊は，那賀町白石地区などわずかであった。その原因は明確ではないが，蛇紋岩体が河谷沿いの低地部（例：大用知谷川沿い）に断片的に分布し（村田，2003），山腹での分布が比較的少ないことを反映すると考えられる。

今回の豪雨で，四万十帯では突出した雨量ではなく，流下距離が 500m を超える崩壊がほとんど発生していないにもかかわらず，小崩壊が群発した。四万十帯では，過去に加奈木崩れなど大規模崩壊が発生しているが，その密度は低い（寺戸，1986）。四万十帯で群発した小崩壊の特徴と原因については，四万十帯の表層風化帯の物性に基づく詳細な検討が必要である。

斜面崩壊の規模と頻度の分布特性において，ベキ乗則またはフラクタル性が認められるとの指摘がなされている（平野・大森，1989；佐々木ほか，1991）。しかし，斜面崩壊の規模と頻度が，なぜベキ乗則またはフラクタル性を有するのかは明確ではない。この問題を検討する上で，今回の対象地域における崩壊分布の特異性，すなわち，黒瀬川帯における大規模な崩壊の散発的な発生と，四万十帯における小崩壊の群発との比較を行うことは興味深いといえよう。

崩壊の発生条件

これまでに検討した崩壊の発生条件をまとめると，総雨量が 900mm 以上，日雨量が 350mm 以上，土壤雨量指数の最大値が 250 以上，起伏量が 700m 以上，という値を挙げることができる。土砂の流下距離が 500m 以上の規模が大きな崩壊は，総雨量が 1,500mm を越える領域に多く，小規模な崩壊は，総雨量が 1,000mm 未満の領域でも群発したことが指摘できる。

2004 年の台風 21 号豪雨による三重県宮川村における三波川帯・秩父累帯での崩壊分布の検討（相澤ほか，2010）によれば，秩父帯では，1km²あたり崩壊個数は 0.73 個で，受け盤斜面で多い。宮川村での累積雨量は約 1,200mm に達したが，崩壊の発生は，累積雨量よりも 1 時間雨量に影響

され、最大1時間雨量が120~110mmとなった地区で多く発生した。今回の検討結果と比較すると、徳島での崩壊個数は1km²あたり1.2個と、宮川村の例より大きい。これは、台風10号の総雨量のほうが台風21号より多いことと、小崩壊が群発した四万十帯が含まれるためと考えられる。

1970年台風5号による500mm以上の豪雨で崩壊が多発した高知県内の秩父帯に属する付加体堆積岩類からなる斜面での検討(柏谷ほか, 1976)では、日雨量が一定のときは、崩壊数は地形の勾配に比例すること、地形勾配が比較的一様であれば、崩壊個数は日雨量から崩壊発生に関与しない雨量値を減じたものに比例すること、が指摘されている。また、近接する2地域で谷頭数の密度と崩壊数との関係を検討したところ、正の相関が認められる場合と認められない場合とに分かれた。今回の検討では、谷頭数と崩壊密度の相関は明確ではなく、むしろ起伏量が大きい一方で谷頭数が小さい山地斜面では、大規模な崩壊が散発的に発生しやすい傾向が指摘できる。

四国の小雨地域である香川県西部に総雨量250mm程度の豪雨をもたらした2004年豪雨による和泉層群で発生した斜面崩壊は、台風21号による累積雨量249mm、最大1時間雨量65mm、最大土壌雨量指数188となる豪雨で群発した(西山ほか, 2010)。この豪雨による崩壊個数は1km²あたり最大で100個を超え、今回求めた1km²あたり平均1.2個に比べて大幅に大きい。この原因として、瀬戸内側は一般に年降水量1,500mm以下であり、3,000mm以上の徳島県南部とでは、崩壊を起こしうる斜面に残存する表層風化帯の厚さが大きく異なるため、降雨に対する斜面の抵抗力が異なると考えられる。

流下距離が500mを超える崩壊の発生条件

流下距離が500mを超える崩壊の発生条件を検討した(図14)。図中の波線は、崩壊発生の下限を示す傾向線である。土壌雨量指数と起伏量の間関係をみると、豪雨により土壌雨量指数が増加し、300程度に達すると、起伏量が1,200m程度の急峻な山地斜面で崩壊の発生が出始め、豪雨が継続して土壌雨量指数が500程度に増加すると、起伏量が600m程度の山地斜面でも崩壊の発生事例が増える。すなわち、土壌雨量指数の増加とともに、起伏量がより小さい山地でも崩壊の発生可能性が高まる。

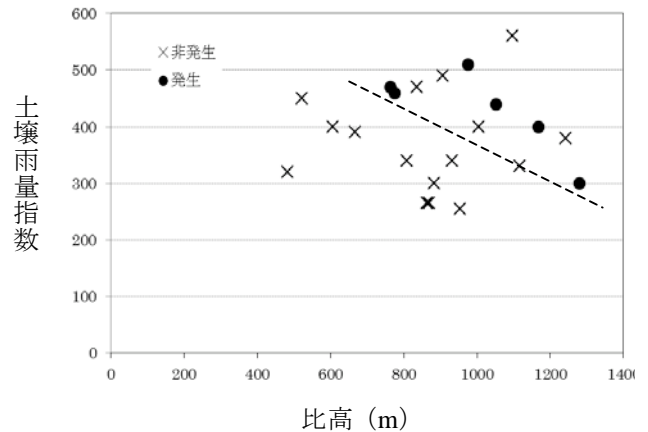


図14 流下距離500mを超える崩壊の発生条件

深層崩壊の発生予測に向けた研究

1997年に鹿児島県出水市の針原川(鮮新世の火山岩類)で発生した大規模な斜面崩壊以来、崩壊深さが数十mにも達する深層崩壊に関する検討が進められている。深層崩壊は、一般に豪雨のピークよりも遅れて発生することが知られており(八反地, 2003)、斜面表層から岩盤までを対象とした降雨の浸透・貯留・流出特性の把握と検討が進められている。これに関して、那賀川上流域を対象とした豪雨時における森林斜面の雨水貯留量を検討した結果、大規模な崩壊が多発した坂州木頭川沿いと、記録的雨量のわりに崩壊数が少なかった海川周辺では、タンクモデルの貯留量がやや異なり、坂州木頭川沿いでは地下水貯留高が大きいことが指摘されている(田村ほか, 2010)。また、1976年豪雨と2004年豪雨との比較によれば、1976年に深層崩壊が発生した新九郎山の溪流では、地下水タンクの貯留高が卓越するのに対し、2004年の大用知の溪流では、表層タンクの貯留高が卓越するという結果になった(田村ほか, 2012)。このことは、ペルム紀の付加コンプレックスで発生した新九郎山と、ペルム紀の玄武岩質緑色岩で発生した大用知との水文地質的な差異を反映すると考えられる。

火山岩地域を対象とした深層崩壊の発生危険性の高い斜面を抽出する試みでは、斜面勾配などの地形的特徴に加え、溪流の縦断方向において、渓流水の流量、EC(電気伝導度)、溶存SiO₂濃度などが急変する箇所がある場合、潜在的な危険斜面と指摘されている(地頭園ほか, 2006)。付加体堆積岩の場合、しばしば地質図に表現されていない小規模なレンズ状の石灰岩を挟在すること

が多く、このことを考慮した水文データの取得と解釈が必要となろう。

地質的にみた深層崩壊の発生条件について、三重県宮川上流域で 2004 年に発生した事例に基づく検討がなされている（永田ほか，2010）。三波川帯・秩父累帯ともに、岩盤の劣化部分で深層崩壊が発生した特徴を持つ一方で、劣化の様相は両者で異なっており、三波川帯では既存の地すべりや岩盤クリープで脆弱化した部分が崩壊したのに対し、秩父累帯では劣化した岩盤がゆるみ岩盤として残存し、キャップロック構造や流れ盤となる部分で初生的な崩壊が発生したとされている。両者の差をもたらした物性条件として、岩盤の平均延性度の違いが挙げられている。地質帯ごとの岩盤物性に基づく斜面の変形・崩壊過程に関して、今後、より詳細な検討が必要になると考えられる。

地形的にみた深層崩壊の発生条件について、ある程度の広がりをもつ山地の河谷地形に着目した方法（平石・千木良，2011）と、山地斜面に現れた微地形の抽出に基づく方法（Chigira, 2009；横山ほか，2011；千木良ほか，2012；笹原ほか，2012）とがある。前者は、山地を広域的に見た際に危険斜面を抽出する上で有効であり、後者は、具体的な危険斜面を絞り込む上で有効である。特に、航空レーザー測量による山地斜面の微地形判読技術の進展は、深層崩壊の予測のために重要なツールといえる。今回の対象地域においても、阿津江地区の背後斜面（稜線）に見られる凹地について、山体変形との関連が指摘されている（横山ほか，2006）。今後は、より広域を対象とした微地形判読を進める必要がある。

深層崩壊が発生する頻度に関する検討が、最近、いくつか行われている（清水・畑中，2010；Akther et al., 2011；西山ほか，2011，2012；五味ほか，2012）。これらの研究では、斜面に残存するテフラの同定や、斜面堆積物中から見出された材・炭質物の ^{14}C 年代測定、さらには河谷の側壁に残存する崩壊起源の段丘堆積物のテフラによる編年結果に基づいた議論が進められている。これらの研究の対象地域は、2005 年台風 14 号豪雨で多数の崩壊が群発した宮崎県鰐塚山地であり、複数のテフラが分布するため、編年学的な検討が進めやすい。その結果、数 100 年～1,000 年のオーダーで、繰り返し大規模な崩壊が発生してきたと推定されている。深層崩壊は概して低頻度の現象であることから、その発生頻度の見積もりは、長期的

に見た斜面の安定性評価を検討する上で基礎資料となる。今回対象とした大用知地区では、AT を挟在する角礫層が見出されており、同規模の大規模な崩壊の発生間隔が、万年オーダーになる可能性も指摘されている（西山・田村，2011）。今後、他地域でも同様の編年学的な検討を進めていく必要がある。

まとめ

徳島県南部の那賀川上流域に記録的豪雨をもたらした 2004 年台風 10 号を例に、雨量と地形・地質の解析に基づく斜面崩壊発生条件の検討を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

2004 年台風 10 号に伴い、那賀町海川では、8/1 に日本新記録となる 1,317mm/日 を記録した。この豪雨により、那賀川上流域では多数の斜面崩壊が発生した。2005 年に撮影された那賀川上流域の広範囲（約 25km×15km）の空中写真判読を行った結果、総崩壊数は 825 個に達し、流下距離が 500m を超える崩壊は 15 個で、那賀川より南側で群発し、南東側ほど少ない。土砂の流下距離が 500m 以上の規模が大きな崩壊は、総雨量が 1,500mm を越える領域に多く、小規模な崩壊は総雨量が 1,000mm 未満の領域で群発した。

流下距離 500m を越える規模の大きな斜面崩壊が多いのは、黒瀬川帯に含まれる亀裂質の緑色岩類が分布する地域で、谷頭数がやや少なく、起伏量がやや大きい。一方、小規模な斜面崩壊が群発したのは、西部の四万十帯の付加体堆積岩が分布する地域で、谷頭数がやや少ない。約 5km メッシュで求められた土壌雨量指数と崩壊個数の関係から、土砂の流下距離が 500m を越える崩壊は、土壌雨量指数に基づく斜面崩壊の発生・非発生の境界線を求めることができた。

謝辞 徳島県県土整備部砂防課ならびに四国電力株式会社からは、2004 年の雨量データを提供していただいた。徳島大学の村田明広教授には、原稿の査読をしていただき、多くの貴重なご意見を頂いた。徳島大学の田村隆雄准教授には、那賀川流域の降雨と浸透・流出特性に関してご教示いただいた。以上の方々および機関に、記してお礼申し上げます。

文 献

- 相澤泰造・酒井俊典・林 拙郎, 2010, 2004 年台風 21 号による三重県宮川村の土砂災害. 日本地すべり学会誌, **47-1**, 26-33.
- Akther, H., Shimokawa, E., Teramoto, Y. and Jitouzono, T., 2011, Geomorphological features and prediction of potential sites for deep-seated landslides on Wanitsuka Mountain, Miyazaki Prefecture, Japan. *Jour. Japan Society of Erosion Control Engineering*, **63-5**, 14-21.
- 芦田和男・江頭進治・青井博志, 1986, 豪雨時の山腹崩壊に関する資料解析的研究. 京都大学防災研究所年報, **29B-2**, 309-327.
- 千木良雅弘, 1998, 災害地質学入門. 近未来社, 206p.
- Chigira, M., 2009, September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan. *Engineering Geology*, **108**, 1-15.
- 千木良雅弘・ツォウ・チンイン・松四雄騎・平石成美・松澤 真, 2012, 台風 12 号による深層崩壊発生場. 京都大学防災研究所研究集会「深層崩壊の実態, 予測, 対応」, 24-34.
- 五味高志・平岡真合乃・横山 修・山越隆雄・石塚忠範・内田太郎・南光一樹, 2012, 深層崩壊の発生頻度の推定方法検討. 京都大学防災研究所研究集会「深層崩壊の実態, 予測, 対応」, 69-76.
- 長谷川修一, 2012, 変動帯の応用地質学—日本とヒマラヤ—. 日本応用地質学会中国四国支部平成 24 年度講演会資料.
- 橋本英俊・佐藤威臣・山田正雄・小島 健・久積崇広, 2006, 阿津江地すべりの地すべり機構. 日本地すべり学会誌, **42-6**, 37-42.
- 八反地 剛, 2003, 降雨を起因とする深層崩壊の特徴—崩壊土量と遅れ時間の関係—. 砂防学会誌, **55-6**, 74-77.
- 平石成美・千木良雅弘, 2011, 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, **32**, 389-409.
- 平野昌繁・大森博雄, 1989, 土砂移動現象における規模・頻度分布特性とその地形学的意義. 地形, **10**, 95-111.
- 井上公夫・森 俊勇・伊藤達平・我部山佳久, 2005, 1892 年に四国東部で発生した高磯山と保瀬の天然ダムの決壊と災害. 砂防学会誌, **58-4**, 3-12.
- 地頭園 隆・下川悦郎・寺本行芳, 2006, 深層崩壊発生場予測法の提案—鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして—. 砂防学会誌, **59-2**, 5-12.
- 柏谷健二・平野昌繁・横山康二・奥田節夫, 1976, 山腹崩壊と地形特性に関して—昭和 50 年 5 号台風による高知県下の山腹崩壊を対象として—. 京都大学防災研究所年報, **19 B**, 1-13.
- 北村真一・西山賢一, 2007, 徳島県那賀川上流域に分布する地すべりの地形的特徴. 徳島大学総合科学部自然科学研究, **21**, 77-88.
- 村上隆博・菊池稔宏・嶋 大尚・清水基成, 2008, 雨量計の有効範囲に関する一考察. 砂防学会誌, **61-2**, 16-22.
- 村田明広, 2003, 徳島県木沢地域の黒瀬川帯北緑部の地質構造. 徳島大学総合科学部自然科学研究, **17**, 7-17.
- 永田秀尚・柏木健司・飯沼達夫・萩原陽一郎, 2010, 2004 年台風 21 号豪雨により三重県宮川村で発生した岩盤崩壊の地質素因. 日本地すべり学会誌, **47-1**, 22-30.
- 中川 鮮・奥西一夫, 1977, 高知県繁藤地区の大規模崩壊について (その 1) —崩壊地の地盤構造の特徴—. 京都大学防災研究所年報, **20B-1**, 209-222.
- 中屋志郎・横山俊治・佐々浩司・村井政徳, 2006, 樹木に残された流下痕跡による阿津江土石流の流下方向の推定. 日本地すべり学会誌, **42-6**, 43-49.
- 西山賢一・廣田 甫・竹中優太・岡田憲治, 2010, 2004 年台風 21 号豪雨により香川県西讃地域で発生した斜面崩壊の地質・地形的特徴. 徳島大学総合科学部自然科学研究, **24**, 75-85.
- 西山賢一・石田啓祐・村田明広・岡田憲治, 2005, 2004 年台風 10 号に伴う豪雨により徳島県那賀川流域で発生した斜面崩壊の地質・地形的特徴. 徳島大学総合科学部自然科学研究, **19**, 49-61.
- 西山賢一・蔣 景彩・岡田憲治, 2012, 2011 年台風 12 号・15 号豪雨により徳島県で発生した斜面崩壊. 土木学会四国支部平成 24 年自然災害フォーラム論文集, 75-82.
- 西山賢一・北村真一・長岡信治・鈴木惠三・高谷精二, 2011, 2005 年台風 14 号豪雨で発生した宮崎県榎之河内地すべりの活動履歴. 日本地すべり学会誌, **48**, 39-44.
- 西山賢一・長岡信治・鈴木惠三・高谷精二, 2012, テフクロクロノロジーに基づく宮崎県鰐塚山地

- における深層崩壊の発生頻度. 京都大学防災研究所研究集会「深層崩壊の実態, 予測, 対応」77-82.
- 西山賢一・田村俊之, 2011, 四国山地から見いだされたテフラに基づく山地斜面の長期安定性. 徳島大学総合科学部自然科学研究, 25, 21-27.
- 岡田憲治, 2000, 土砂災害の軽減に向けた「土壌雨量指数」の開発. 消防科学と情報, 60, 6p.
- 奥西一夫・中川 鮮, 1977, 高知県繁藤地区の大規模崩壊について(その2) -崩壊に対する地下水の効果-. 京都大学防災研究所年報, 20B-1, 223-236.
- 櫻井正明・前川峰志・内藤洋司・佐保昇児, 2006, 2004年集中豪雨により四国山地に発生した崩壊地の特徴. 日本地すべり学会誌, 42-6, 19-30.
- 笹原克夫・桜井 亘・加藤仁志・島田 徹・小野尚哉, 2012, LiDARによる深層崩壊発生斜面の地形学的検討. 京都大学防災研究所研究集会「深層崩壊の実態, 予測, 対応」, 1-10.
- 佐々木靖人・阿部雅彦・平野 勇, 1991, 斜面崩壊の規模と発生数に関するフラクタル. 応用地質, 32, 99-109.
- 四国地方土木地質図編纂委員会, 1998, 四国地方土木地質図および解説書. 国土開発技術センター, 859p.
- 清水 収・畑中健志, 2010, 深層崩壊発生危険地におけるテフロクロロジーによる斜面変動履歴の解明. 砂防学会誌, 63-2, 12-19.
- 田村隆雄・能田慎也・武藤裕則, 2012, 分布型流出モデルを用いた那賀川上流における森林斜面の貯水高と斜面崩壊に関する考察. 水工学論文集, 56, 419-424.
- 田村隆雄・岡部健士・江尻雄三郎・新名祐輔・小河健一郎, 2010, 大規模斜面崩壊が発生した豪雨時における森林斜面の貯水高に関する考察. 水工学論文集, 54, 511-516.
- 寺戸恒夫, 1970, 徳島県高磯山崩壊と貯水池防災. 地理科学, 14, 22-28.
- 寺戸恒夫, 1975, 四国東部における大規模崩壊. 阿南工業高等専門学校研究紀要, 11, 91-100.
- 寺戸恒夫, 1976, 山地災害における崩壊と植生との関係. 阿南工業高等専門学校研究紀要, 13, 29-38.
- 寺戸恒夫, 1977, 大規模崩壊による山地地形の変化. 地理科学, 28, 17-27.
- 寺戸恒夫, 1980, 応用地形学の立場から見た大規模崩壊. 阿南工業高等専門学校研究紀要, 16, 63-73.
- 寺戸恒夫, 1986, 四国島における大規模崩壊地形の分布と地域特性. 地質学論集, 28, 221-232.
- 植木岳雪, 2005, テフロクロロジーによる徳島県西部, 中内地すべりの発生時期の推定. 日本地すべり学会誌, 42-3, 19-23.
- 植木岳雪, 2008, 徳島県西部, 那賀川上流部における河成段丘の編年. 地理学評論, 81, 25-40.
- 横山 修・内田太郎・田村圭司・鈴木隆司・井上亨郁, 2011, 宮崎県鰐塚山地における深層崩壊と微地形・地質的特徴の関係. 砂防学会誌, 63-3, 3-13.
- 横山俊治・村井政徳・中屋志郎・西山賢一・大岡和俊・中野浩, 2006, 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, 112(補遺), 137-151.

論文受付 2012年9月11日

論文受理 2012年9月28日

