

2011年台風12号による深層崩壊

千木良雅弘・松四雄騎・ツォウ チンイン・
平石成美⁽¹⁾・松澤真⁽²⁾・松浦純生

(1) 財団法人深田地質研究所

(2) パシフィックコンサルタンツ

要 旨

台風12号は、2011年9月2日から5日にかけて西日本を横断し、特に紀伊山地に2000mmを超える降雨をもたらし、主に四万十帯で50以上の深層崩壊を発生した。発生したものの内大規模な14の深層崩壊について、発生前後の1m-DTM解析および空中写真観察、さらに地質調査を行った結果、いずれも発生前に将来冠頂となる位置に重力変形による小崖または線状凹地を伴っていたことがわかった。これらの小崖は、比高2mから50mで、空中写真では極めて注意深く観察して見出されるものが多い。斜面傾斜方向断面で考えると、その水平長と崩壊斜面水平長との比は5~21%であり、これは発生前の斜面変形程度が小さかったことを示している。これらの斜面変形の多くは、楔形不連続面に沿うすべりによるものである。発生時の特定された19の深層崩壊は、レーダーアメダス解析雨量によれば、3日間での累積雨量が約700mmを超えるあたりから発生した。

キーワード: 台風12号, 深層崩壊, 航空レーザー計測, 小崖, 重力斜面変形

1. はじめに

2009年に台湾で発生した小林村の深層崩壊以来、深層崩壊が強く注目されている。小林村の崩壊は、台風モラコットによる豪雨によって発生したもので、一つの崩壊がたった92秒間に村を全滅し、400人以上の人命を奪った(Tsou et al., 2011)。このように深層崩壊は極めて短時間に、かつ大規模に発生するものであるため、災害軽減のためには、その発生場所を予測することが極めて重要である。我が国では、2001年の土砂災害防止法施行以来、各自治体で土砂災害危険個所の調査・指定が行われてきているが、この対象は土石流、崖崩れ、地すべりであり、足の長い深層崩壊は対象とされていない。そのため、少なくとも発生場所を予測する技術を確立することは急務である。従来の研究で、重力による斜面の変形が深層崩壊に移り変わるとの研究があるが(Chigira et al, 2003 ; Crosta, et al., 2006), 未だに深層崩壊の発生場所予測手法は確立されていない。これは、主に、その発生が稀であることと、発生前の地形的特徴のデータが乏しいことによる。

2011年台風12号は、9月2日から5日にかけて、四国

と中国地方を横断した。そして、台風の進行方向右側にあたる紀伊山地では大量の降雨が生じ、多数の深層崩壊が発生し、天然ダムが形成され、それらの内5か所では残存した天然ダムの決壊が強く懸念された。この台風の結果、奈良県と和歌山県では、土砂災害による死者47名、洪水による死者12名、その他の死者22名を含めて、合計81名の犠牲者が生じた。土砂災害による死者は、土砂の直撃を受けたものと、増水した川への土砂の突入による“津波”によるものとがあった。

ここでは、深層崩壊に焦点を絞り、発生前の地形および地質構造を明らかにし、また、発生に至った降雨量についてまとめる。そのために、1) 国土交通省、奈良県、和歌山県等が取得した航空レーザー計測(LiDAR)データおよび国土地理院撮影の空中写真を用いた地形解析と崩壊地の判読、2) ヘリコプターによる空中からの観察、3) 主要な深層崩壊地についての現地調査、4) レーダーアメダス解析雨量の分析を行った。

2. 地形・地質の概要

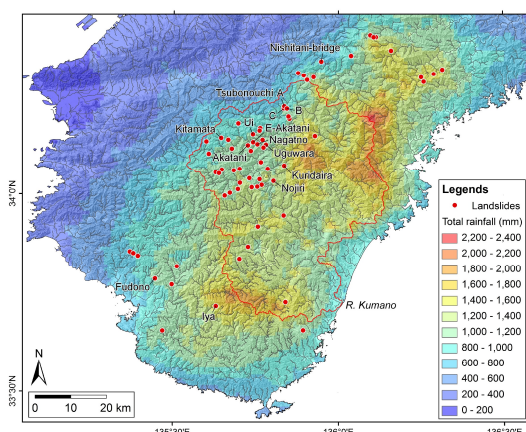


Fig. 1 Distribution of deep-seated landslides and cumulative rainfall from 31 August to 5 September, 2011.

紀伊山地は標高1915mの八経ヶ岳を最高峰とする山地で、そこに分布する山稜頂部は比較的標高がそろっている。紀伊山地の中央部には熊野川と北山川が北から南に向けて流れている (Fig.1)。紀伊山地の大部分はこれらの水系の流域となっており、北部を西流する紀ノ川水系の流域は狭く、その流域と熊野川流域および北山川流域との流域界は北部に偏っている。平石・千木良 (2011) は、熊野川上流の十津川支流の中原川で地形解析を行い、高標高部に古地形面が広く分布し、それを河川が下刻し、谷中谷が形成され、この下刻に伴って足元をすくわれた斜面、特に流れ盤斜面で重力による斜面変形と崩壊が発生していることを報告した。そして、この古地形面が広く広がり、このような地形プロセスが紀伊山地一帯にあるであろうことを指摘した。

紀伊山地の主体は東西に延びる中央構造線よりも南側の西南日本外帯に位置し、最北部に三波川帯と秩父帯が分布し、その南側の広い範囲は四万十帯となっている。今回の災害発生の主要部は四万十帯に位置し、北部の一部の崩壊は秩父帯に位置している。四万十帯は御坊―萩構造線を境に、白亜系の付加コンプレックスからなる北帯 (日高川帯) と古第三系の付加コンプレックスとに分けられる。白亜系と古第三系とは、紀伊半島中央部東寄り で南北に長い中新世の大峰花崗岩に貫かれ、その周囲はホルンフェルス化している (志井田他, 1989)。大局的な地形をみると、この花崗岩とホルンフェルスの分布域が紀伊山地で最も高い地域となっている。また、白亜系部分に比べて古第三系部分で山陵の標高は低下している。古第三系分布域の南西側と南東側とは、それぞれ中新世の田辺層群と熊野層群とが分布している (田辺団研グループ, 1984; 棚井・水野, 1954)。

3. 深層崩壊の発生と降雨

8月30日17時からの総降水量は、紀伊半島の広い範囲で1000mmを超え、奈良県北山村では降り始めの8月30日から9月5日までの総雨量が2439mmを記録した (竹林他, 2011)。AMeDASによる過去30年間の観測によれば、紀伊半島の年平均降水量は北西部で約1300 mm、南東部の多雨地域で3000 mmを超える。台風12号による崩壊発生の特徴は、表層崩壊が少なく、深層崩壊が散点的に発生したことである。このことは、ヘリコプターによる空からの観察でも明らかであり、また、2005年の台風14号による九州山地での崩壊発生状況と同様であった (Chigira, 2009)。その発生は、メディアの報道や聞き取り調査など様々な資料をもとにすると、9月3日午後6時頃の野尻の崩壊に始まり、4日の夕刻にかけて発生した (付録 Table A-1, 2)。深層崩壊は50か所以上で発生し (Fig. 1)、それらの内、5か所 (赤谷、長殿、北股、熊野、栗平) では天然ダムが形成・残存し、その決壊が強く懸念され、改定土砂災害防止法に基づいて、国土交通省による緊急調査が実施された。また、十津川村野尻では崩壊土砂が増水した十津川に突入し、河川水の流路を対岸に押し付け、そこにあった家屋が流失し、8名が犠牲となった。十津川村宇宮原では、やはり崩壊土砂が増水した十津川に突入し、おそらく河川を一時的にせき止め、結果的に上流に向かう“津波”を引き起こし、それが突入箇所から1km上流にある長殿発電所を破壊した。五條市宇井地区では、対岸の崩壊土砂に襲われ、11名が犠牲となった。

台風による累積雨量は、紀伊山地の東側と南側で多かったが (Fig. 1)、深層崩壊の発生はむしろ、紀伊山地の中央部で、累積降雨量は相対的には少ない範囲であった。これは、単に累積降雨量が深層崩壊の発生場所を決めたのではなく、地域の“雨慣れ”も反映していることを示唆している。

我々は、地震波形解析 (Yamada et al., in press) および聞き取り調査や報道資料などにより、19の崩壊について、それらの発生時を特定した。それらについて、1 kmメッシュのレーダーアメダス解析雨量の正時値を用いた共一次内挿法によって、深層崩壊発生地点にもたらされた降水の経時変化を復元したものがFig. 2である。これによれば、深層崩壊の発生が降雨終了間際から終了後10時間以内に発生したこと、また累積雨量が700mm以上に達したあたりから生じたことが明確になった。これだけ多くの深層崩壊について、発生までの累積雨量が正確に求められたのは初めてである。

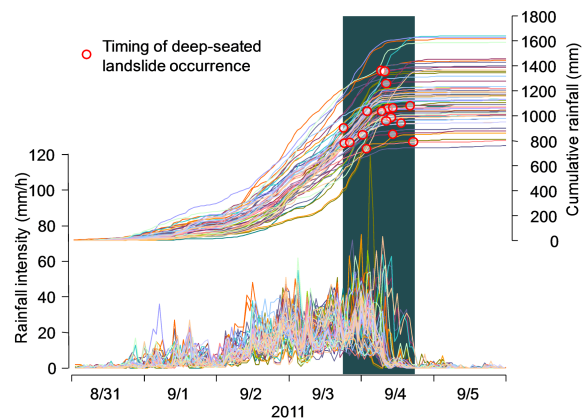


Fig. 2 Hourly rainfall intensity and cumulative rainfall and the occurrence of deep-seated catastrophic landslides. Dots on the cumulative rainfall lines indicate the occurrence of the landslides.

4. 深層崩壊の規模

深層崩壊は、**Fig.1**に示したように50か所以上で発生したが、地形と地質の調査対象としたのは、それらの内大規模な深層崩壊14か所である。これら14の崩壊の内9か所については近畿地方整備局あるいは奈良県によって崩壊発生前後の1mメッシュDEM (Digital Elevation Model, 数値地形モデル) データが取得されており、また、1か所（西谷橋）については崩壊発生前のみ1mメッシュの詳細DEMデータが近畿地方整備局によって取得されていた (**Table 1**)。

これらのDEMデータを用いて地形解析を行った。さらに、詳細DEMデータがない個所については、国土地理院が1976年に撮影したカラー空中写真を用いて崩壊発生前の地形を観察した。

崩壊地の面積を1mメッシュのDEM または国土地理院発行の10mメッシュのDEMを用いて計測した。その結果、最大規模のものは、548500m²の栗平の崩壊、次いで赤谷の崩壊423700m²、これらのうち最も小規模のものは坪内Aの崩壊で、面積35800m²であった (**Table 1**)。従来、大規模崩壊は規模が大きいはど発生頻度が少なくなることが知られており (羽田野, 1968 ; 平野・大森, 1989) , 規模と発生頻度の図に台風12号による深層崩壊をプロットしたのが**Fig. 3**である。この図から、今回の崩壊は平野・大森 (1989) が指摘した明治22年の十津川災害の際に発生した崩壊と同様の領域にプロットされることがわかる。このことは、崩壊発生域の地質が類似していること、また、両者ともに降雨によって発生したことを反映していると考えられる。

発生前後のDEMから崩壊源の範囲を読み取ると、最大のものはやはり栗平の崩壊で、373,600m²であった。各崩壊地について断面図を複数作成し、堆積物に覆われた崩壊分離面を推定して崩壊体積を算出した結果が**Table 1**に示してあるが、それによれば、最大の崩壊は栗平の崩壊 (約1400万m³) , 次が赤谷の崩壊 (約800万m³) であった。栗平の崩壊体積は、2009

Table 1 A list of landslides induced by typhoon 1112

Landslide		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		Akatani	Akatani-E	Ui (Ooto-Shimizu)	Nagatono	Taubonouchi			Kitamata	Ugahara	Nishitani-bridge	Iya	Nojiri	Kuridaira	Fudono
Scale	Landslide area (m ²)	423,700	221,400	132,300	220,700	35,800	41,000	112,900	89,900	246,800	104,300	336,900	266,100	548,500	51,700
	Source area (m ²)	297,900	191,200	50,500	297,900	23,900	35,000	76,000	46,500	122,600	62,500	173,700	134,300	373,600	20,100
	Average depth (m) (Half of maximum depth)	35	25	25	30	12	10	15	15	15	Unknown	35	13	40	10
	Volume (m ³ , from profiles)	8,200,000	2,100,000	930,000	4,100,000	240,000	340,000	1,200,000	880,000	1,600,000		5,200,000	1,800,000	14,000,000	240,000
Landform before the events	Landslide dam	Remained	Breached	Breached	Remained	Breached	Breached	Breached	Remained	Breached	No	Remained	Breached	Remained	No
		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes (obscure)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	Arcuate scarplet angle (Horizontal length, d)	35° (35m) 36° (7m)	33° (8m) 36° (14 m) 39° (7 m) Data not enough	43° (57m)	45° (12m) 45° (17m) 39° (20m) 38° (54m)	41° (25 m)	39° (62 m) 38° (2 m)	39° (45 m)	33° (13 m)	No	34° (31 m)	Present but without detailed DEM	Present but without detailed DEM	Present but without detailed DEM	Present but without detailed DEM
	Linear depression	No	No	No	No	No	No	No	Yes (32 m wide)	No	No	No	No	No	No
	Horizontal slope length (L)	902 m	990m	360m	600 m	195 m	306 m	255m	312 m	606 m	481m	—	—	—	—
	Σ d/L (%)	5	—	16	17	13	21	18	14	—	6	—	—	—	—
	Slope angle (line connecting the crown with the foot)	34	33	36	34	32	31	30	32	34	31	27	28	31	32
	Previous failure at lower part	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Δ (Steep slope)	Yes	Δ (Steep slope)	No
	Within a large gravitationally deformed slope	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes	No	No	No
	Apparent friction angle (°)	23	23	19	25	23	28	20	20	20	24	19	19	24	17
	Equivalent coefficient of friction	0.42	0.42	0.34	0.47	0.42	0.53	0.36	0.36	0.36	0.45	0.34	0.34	0.45	0.31
Geology	Formation	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Takahara Fm in the Chichibu Belt	Muro Fm.	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Hidakagawa Fm in the Shimanto Belt	Otonashi-gawa Fm.
	Lithology	Chaotic rock	Chaotic rock	Chaotic rock	?	Chaotic rock	Chaotic rock and red shale	Chaotic rock	Chaotic rock	Chaotic rock (and debris)	Chaotic rock	Ss, Ss-Ms altn.	Chaotic rock	Chaotic rock	Chaotic rock, Ss-Ms altn.
	Wedge	Yes	Probable	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Probable	Probable	Yes
	Buckling	Yes (small)	?	No	?	No	No	No	No	No	No	Yes	?	Yes?	No
High-resolution DEM	Flexural toppling	No	No	No	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No	No	No
	1m—DEM before the events	KKR*	KKR*	KKR*	KKR*	KKR*	KKR*	KKR*	KKR*	KKR*	KKR*	No	No	No	No
		FY2009	FY2009	FY2009	FY2009	FY2009	FY2009	FY2009	FY2009	FY2009	FY2005	—	—	—	—
	1m—DEM after the events	Nara Pref. (Gojo office)	KKR*	Nara Pref. (Gojo office)	Nara Pref. (Gojo office)	Nara Pref. (Gojo office)	Nara Pref. (Gojo office)	Nara Pref. (Gojo office)	KKR*	Nara Pref. (Gojo office)	No	KKR*	Nara Pref. (Gojo office)	KKR*	No
		7 Sept. 2011	23 Sept. 2011	7 Sept. 2011	7 Sept. 2011	7 Sept. 2011	7 Sept. 2011	7 Sept. 2011	23 Sept. 2011	7 Sept. 2011	—	7 Sept. 2011	7 Sept. 2011	23 Sept. 2011	—
		* KKR: Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism													

年台湾小林村の崩壊（2,500万 m^3 、Tsou et al., 2011）の半分強、2005年の台風14号による耳川流域の最大の崩壊（330万 m^3 、Chigira, 2009）の5倍程度であった。

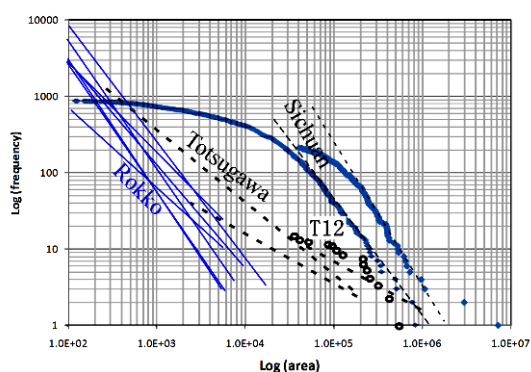


Fig. 3 Cumulative landslide frequency and the landslide size. Data of Totsugawa and Rokko is from Hirano and Ohmori (1989), Sichuan from Tsou et al. (2011). Open circles with T12 indicates the landslides by typhoon 1112 (Talas).

5. 崩壊発生前の微地形

崩壊発生前後の詳細DEMデータが取得されている9つの崩壊について、傾斜図を作成して、崩壊発生前の地形と崩壊の輪郭とを詳細に比較すると、いずれの深層崩壊もその頭部となる部分に小崖あるいは線状凹地を伴っており、それらが崩壊の輪郭にほぼ沿っていることが明らかとなった（Figs. 4, 5, 6）。これらの小崖や線状凹地は斜面が発生前に重力的な変形を受けていたことを示している。宇宮原の崩壊では、当初小崖は認められないように思われたが、それは崩壊発生前のデータ密度が粗かったためであり、おそらく小崖があったものと考えられる。これらの中には赤谷や赤谷東、熊野、坪内Cのように空中写真で比較的容易に重力変形地形として認識できるものもあるが、その他のものは空中写真ではよほど注意深くしてようやく認識できる程度のものである。ただし、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図「和歌山・田辺」（清水他，2005）には、熊野、坪内Cとともに宇井や坪内A, Bの重力変形も地すべり地形として図示されている。

上記の小崖は、比高2mから50m、傾斜33°から45°であった。斜面の重力による変形は物質の斜面下方への移動によるとすると、斜面の上部に地形的に変形が表れることは自然なことである。ただし、Table 1に示すように、多くの崩壊で、事前に斜面下部に崩壊がすでに発生していたことが地形的に認められ、これらの斜面では斜面の変形が進んでいたのと同時に、斜面下方から不安定化も進んでいたと理解され

る。

崩壊発生前後の地形を比較し、崩壊に先だった変形量と斜面全体の大きさとの比、つまり“ヒズミ”を求めた。小崖の傾斜方向の水平長さと崩壊した斜面の水平長さとの比をとると、5～21%であった（Fig. 7）。ここで、小崖が複数ある場合には、それらの長さの和をとっている。また、北股の場合には、線状凹地の幅を小崖の水平長さに算入した。崩壊した斜面の傾斜（崩壊後の冠頂と脚部を結んだ線の傾斜）は、27度から34度であった（Table 1）。

Chigira(2009)は、2005年の台風14号による九州耳川の5つの深層崩壊を調査し、事前の空中写真判読から、これらの崩壊が重力斜面変形のあった斜面に起こったことを明らかにし、それらのヒズミが1から16%にあったと見積もり、この程度のヒズミが降雨による深層崩壊発生の限界ヒズミであると考えた。しかしながら、この結果は空中写真判読結果を基礎にしておき、定量的な信頼性は弱かった。つまり、今回の台風12号による深層崩壊群が、発生前の地形に表れたヒズミが明確に捉えられた初めてのものである。ここで得られたヒズミの5から21%は、台風14号による深層崩壊の場合と同等の値である。

森脇（2001）は、土質実験および地表面移動量実測値をもとに、崩壊発生の限界ヒズミが0.6%から2%の間にあり、2%を超えた場合には、斜面はすでに崩壊して安定化していると考えた。しかしながら、その野外観測データは、目に見える移動が開始してからのデータであり、それ以前のヒズミは必ずしも明らかになっていなかった。今回の台風で発生した深層崩壊では、斜面は崩壊以前に極めて緩慢に長期的に変形しており、それが斜面上部の小崖に表れていた。このように長期的かつ大規模な変形の場合には、限界ヒズミも大きくなるように考えられる。森脇（2001）は、地すべり地形分布図「八幡平」から読み取ったヒズミは7%から81%の間にあり、いずれの地すべりも安全側にあると考えた。そして、これが空中写真判読の限界であり、もっと小さなヒズミの状態にある斜面が危険であると考えた。今後、限界ヒズミに対する時間やスケールの影響について明らかにする必要がある。

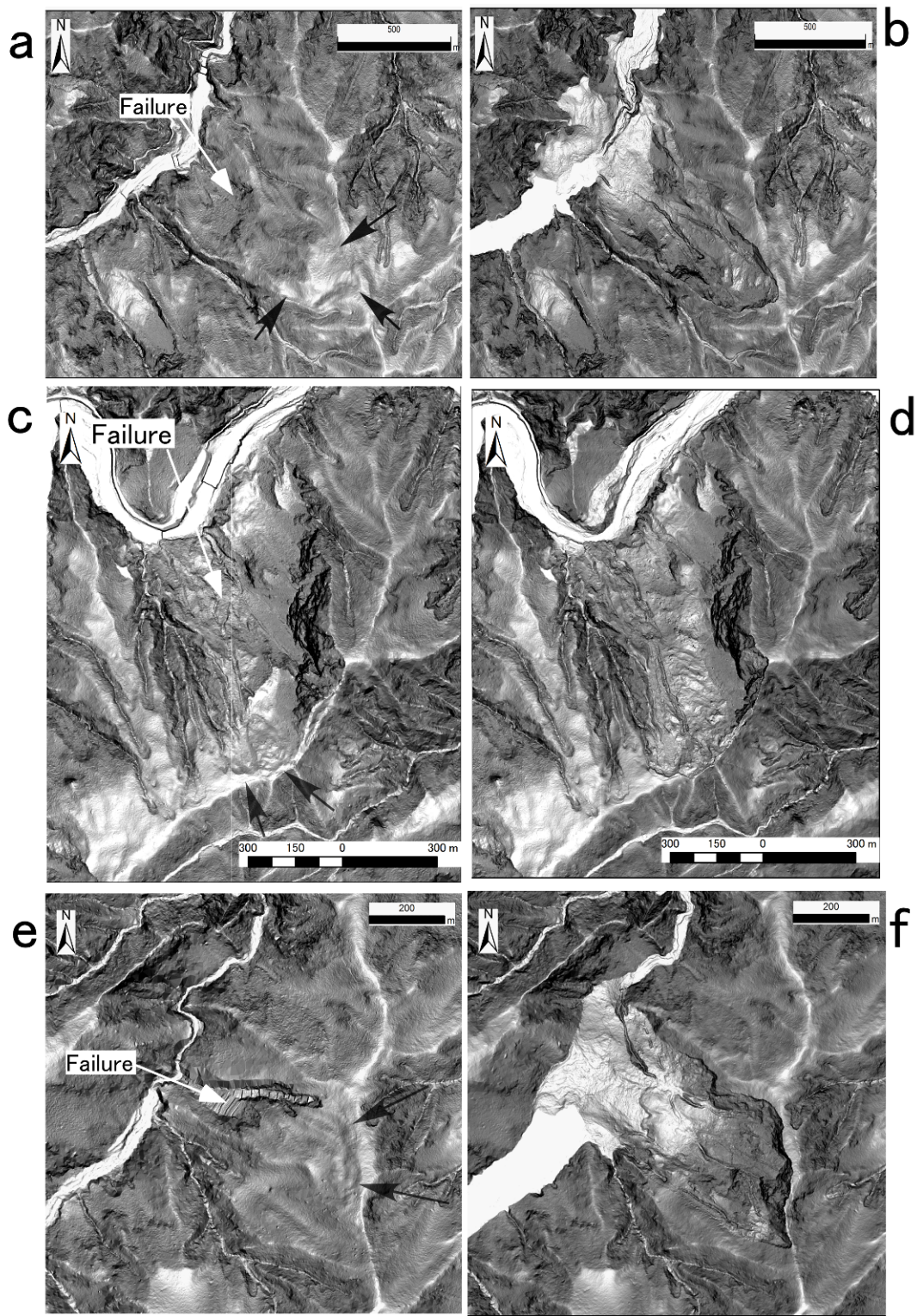


Fig. 4 Slope images of the landslides Akatani (a, b), Akatani-E (c, d), and Nagatono (e, f). Left figures are before the events and right are after. Darker is steeper and arrows indicate scarplets before the landslide..

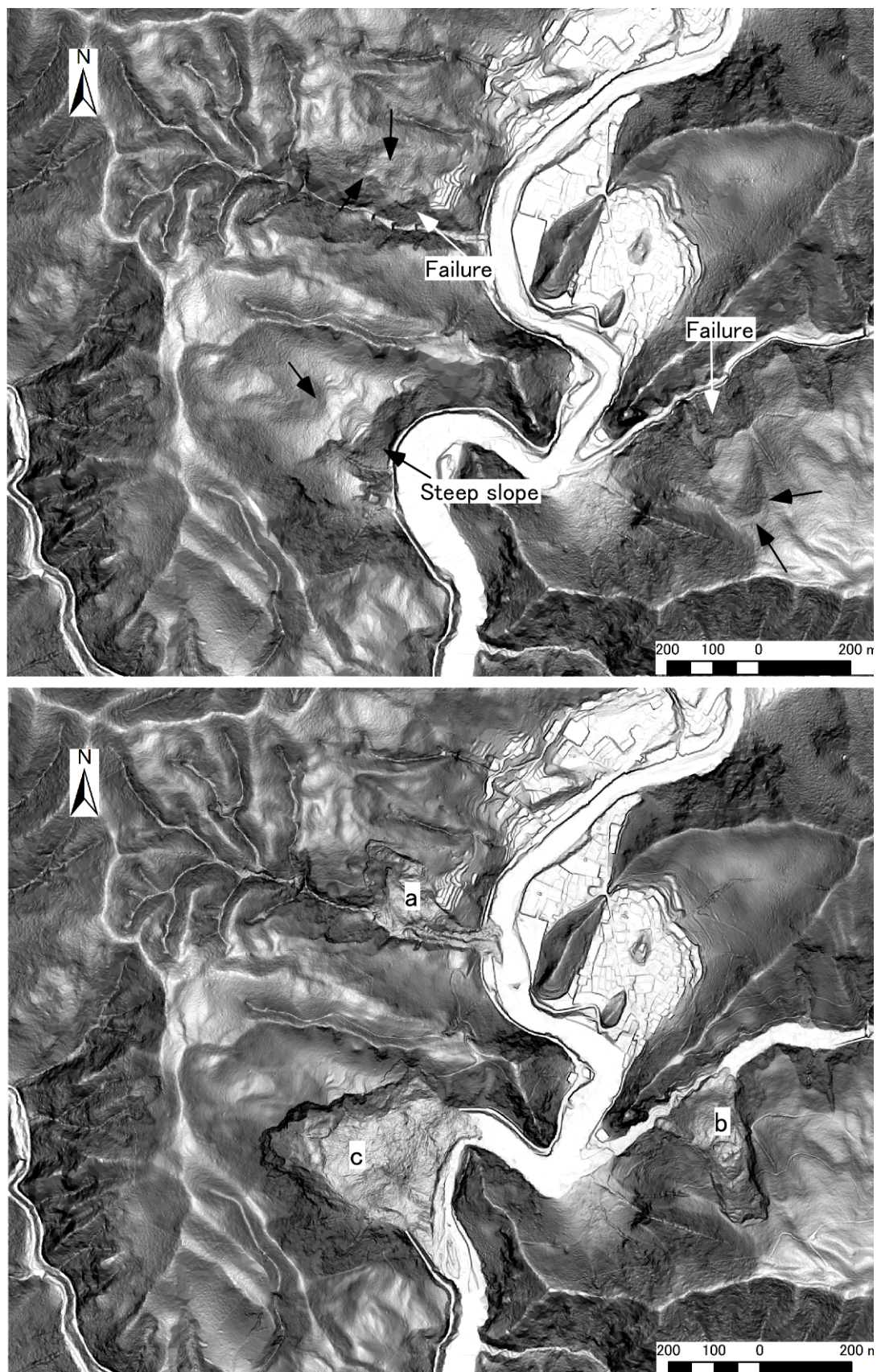


Fig. 5 Slope images before (upper) and after (lower) the Tsubonouchi landslides A, B, and C. Arrows indicate scarplets before the landslide.

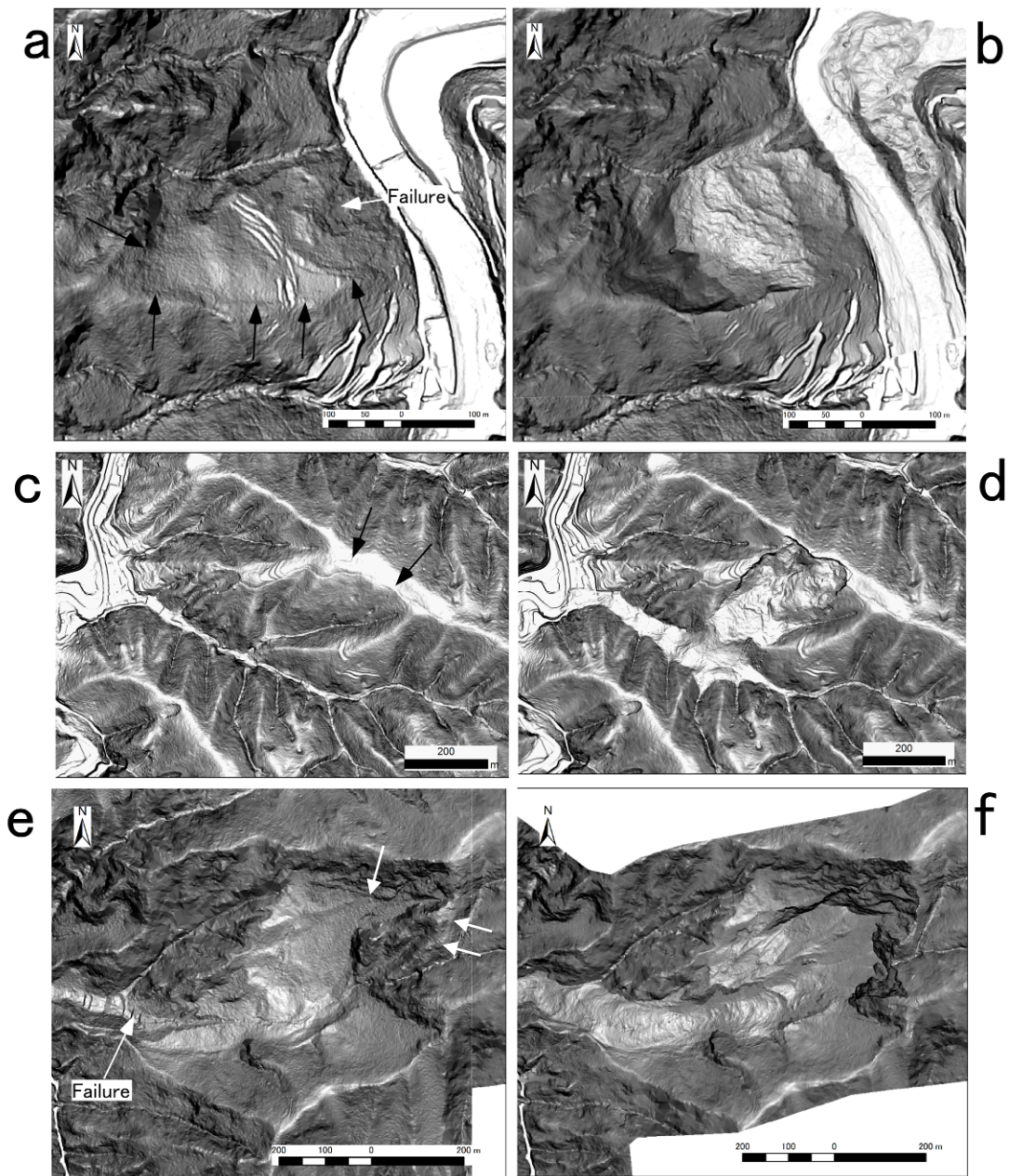


Fig. 6 Slope images of the landslides of Shimizu (a, b), Kitamata (c, d), and Uguhara (e, f). Arrows indicate scarplets (a, c) and a linear depression (b) before the landslide.

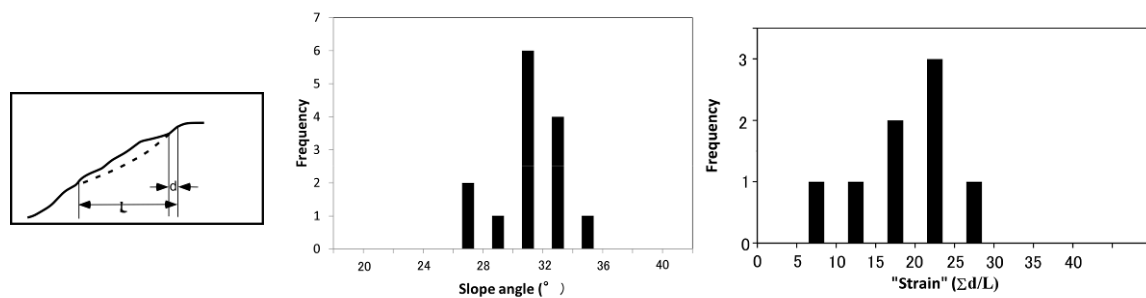


Fig. 7 "Strains" and slope angles measured from the 1-m DEM of landslides induced by typhoon Talas.

6. 地質構造

前述したように、いずれの崩壊も重力変形斜面に発生したものであり、これらの重力変形は、現地調査によれば、次の3タイプに分けられる。それらは、くさび状分離面に沿うすべり、曲げトッピング、流れ盤の地層の座屈である。

1) くさび状分離面に沿うすべり

このタイプの重力斜面変形は最も多くの崩壊に見られたものであり、顕著に認められたのは、赤谷の崩壊である。赤谷の崩壊の地質図と断面図とをFig. 8に示す。Fig. 8に示したように、崩壊前後の地形と崩壊後に露出した地質から、赤谷の崩壊の最上部の小崖は、断層沿いおよび面構造沿いのずれとして生じていたことがわかる。

赤谷、長殿、清水、坪内Bの崩壊について、層理面、面構造、および断層の構造と斜面の傾斜方向をステレオネットに投影したものをFig. 9に示す。その他の11の崩壊でもおそらく同様の地質構造であったと推定される。赤谷の崩壊の場合には、崩壊の両側を限る面が明瞭かつ大規模であり、また、長殿の崩壊でも同様であったが、他の崩壊の場合、くさび状をなす不連続面が複数存在し、複数の楔を形成していたと考えられる。

2) 曲げトッピング

このタイプの重力斜面変形は、北股の崩壊で推定されたものである。北股の崩壊では、崩壊斜面上縁に沿って線状凹地が形成されており、崩壊によって、その線状凹地の下方延長に等高線方向の走向で斜面下方に急傾斜する複数の断層が表れた。崩壊の北西縁（右側方崖）では、地層は斜面上方に傾斜していること、また、断層はほぼ層理面に沿っていたことから、崩壊地の斜面構成層は、崩壊前に斜面下方に倒れるように曲げトッピングを生じており、その斜面上縁に引っ張り応力下での線状凹地が形成されていたことが推定される（Fig. 10）。曲げトッピングは大規模な崩壊に至らない場合もあるが、北股では斜面上方の断層があったために、それがすべり面となり、急激な崩壊が発生したのと考えられる。

3) 流れ盤の地層の座屈

このタイプの重力斜面変形は、大規模なものは熊野（いや）で認められた。熊野の崩壊では、崩壊した地層は砂岩および泥岩主体の泥岩砂岩互層からなり、崩壊斜面下部の右側方でこの互層の逆転構造が認められた（Fig. 11）。逆転した地層には開口割れ

目は発達していなかったため、重力変形の前にすでに造構運動に伴った褶曲があった可能性もあるが、それが重力によってさらに進行していたと考えられる。熊野の崩壊は、発生前に斜面下部に緩傾斜斜面が広がっており、この緩斜面が地層の座屈によって生じたものと推定される。赤谷の崩壊でも、崩壊発生後に露出した岩盤表面（崩壊前の深さ約40m）で地層の座屈が認められたが、これは地層の小規模な湾曲であり、熊野や台湾の小林村（Tsou et al., 2011）で見られたような地層の横倒し褶曲にまでいたるようなものではなかった。

7. おわりに

2011年の台風12号によって紀伊山地に発生した深層崩壊の発生場を崩壊前後の1mメッシュのDEMから作成した傾斜図と地形断面図を中心として解析した。その結果、ほとんどの崩壊は発生前に斜面上部に小崖を有し、1か所では線状凹地を伴っていたことがわかった。これらの小崖と線状凹地は斜面の重力変形によって形成されたものであり、崩壊の前に斜面がわずかに変形していたことを示している。小崖のスケールは斜面全体のスケールに比べて小さく、傾斜方向断面で、水平方向長さの比は5~21%であった。この程度のヒズミが豪雨による深層崩壊発生前の限界ヒズミであると考えられる。これらの小崖等は、空中写真では極めて注意深く観察して発見できる程度のものも多く、それらを客観的に抽出するには詳細DEMが有効である。つまり、今後の深層崩壊発生個所の予測には、航空レーザー計測による詳細DEMを用いる必要がある。

崩壊後に露出した地質の調査によれば、上記の小崖や線状凹地を形成した重力斜面変形の構造には次の3タイプがあった。楔形の不連続面に沿うすべり、曲げトッピング、座屈である。これらの内、楔形の不連続面に沿うすべりが最も多かった。

地震記録や証言記録をもとにして発生時間を特定できた19の崩壊についてレーダーアメダス解析雨量を分析した結果、これらの崩壊は3日間での降雨が約700mmに達したあたりから発生したことがわかった。深層崩壊発生に至る降雨は地域ごとに異なると考えられるが、紀伊山地、さらには、そこ同様の地質・地形条件を持つ西南日本外帯の四万十帯では、この程度の降雨が深層崩壊発生の目安になる可能性がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，国土交通省近畿地方整備局および奈良県には貴重な航空レーザー計測による1mメッシュのDEM(数値地形モデル)データを提供いただいた。また，現地調査にあたっては，五条市，

十津川村，田辺市の関係各位に便宜を図っていただいた。京都大学防災研究所の山田真澄氏には，地震計記録による崩壊発生場所特定などに協力いただいた。ここに謝意を表する。

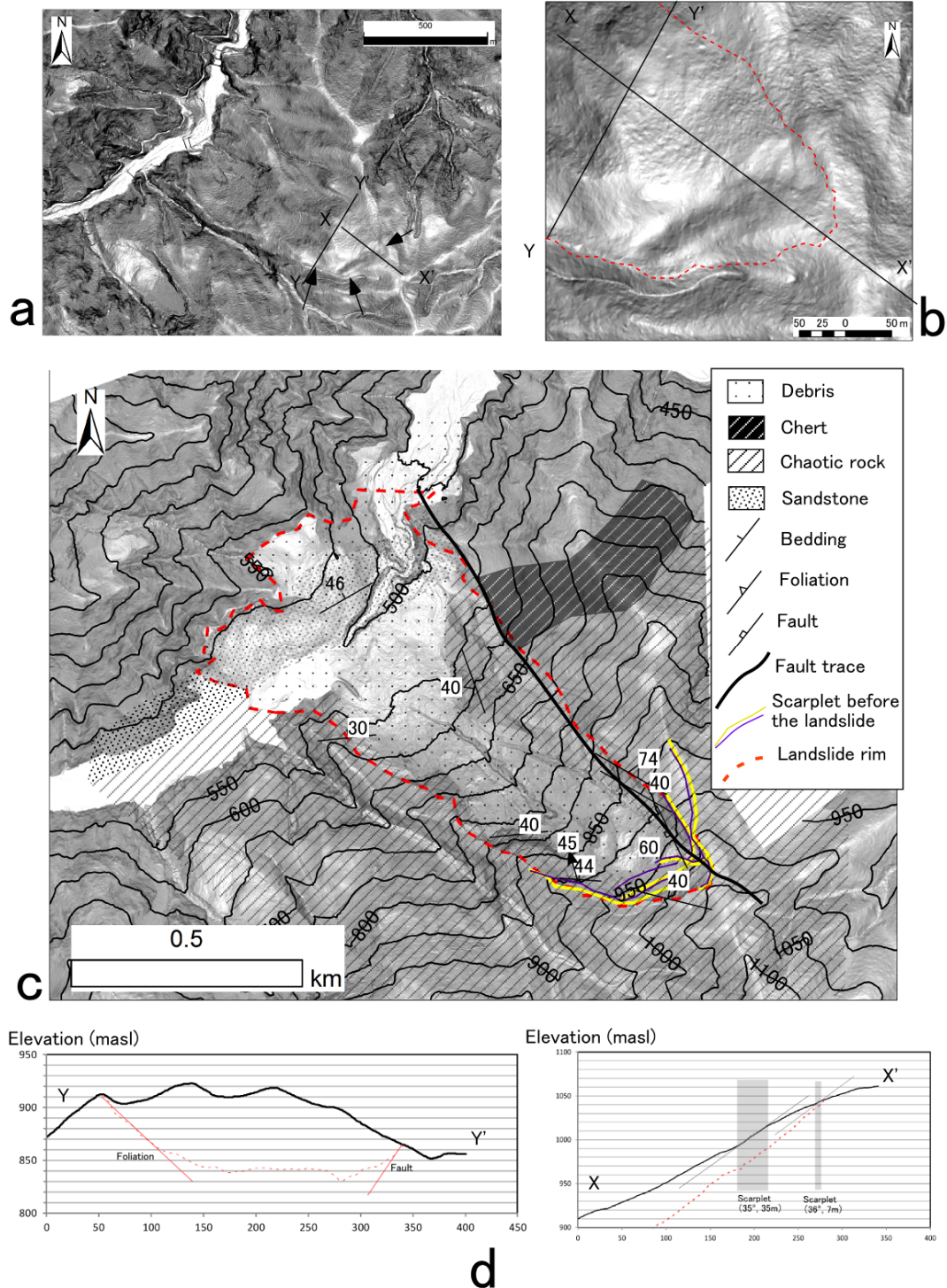


Fig. 8 Geomorphic features and geology of the Akatani landslide. A: Slope image before the landslide (darker is steeper and arrows indicate scarplets). B: Close up of the landslide crown before the landslide (dotted line delineate the landslide). C: geologic map. D: Geologic cross section (lines are shown in a).

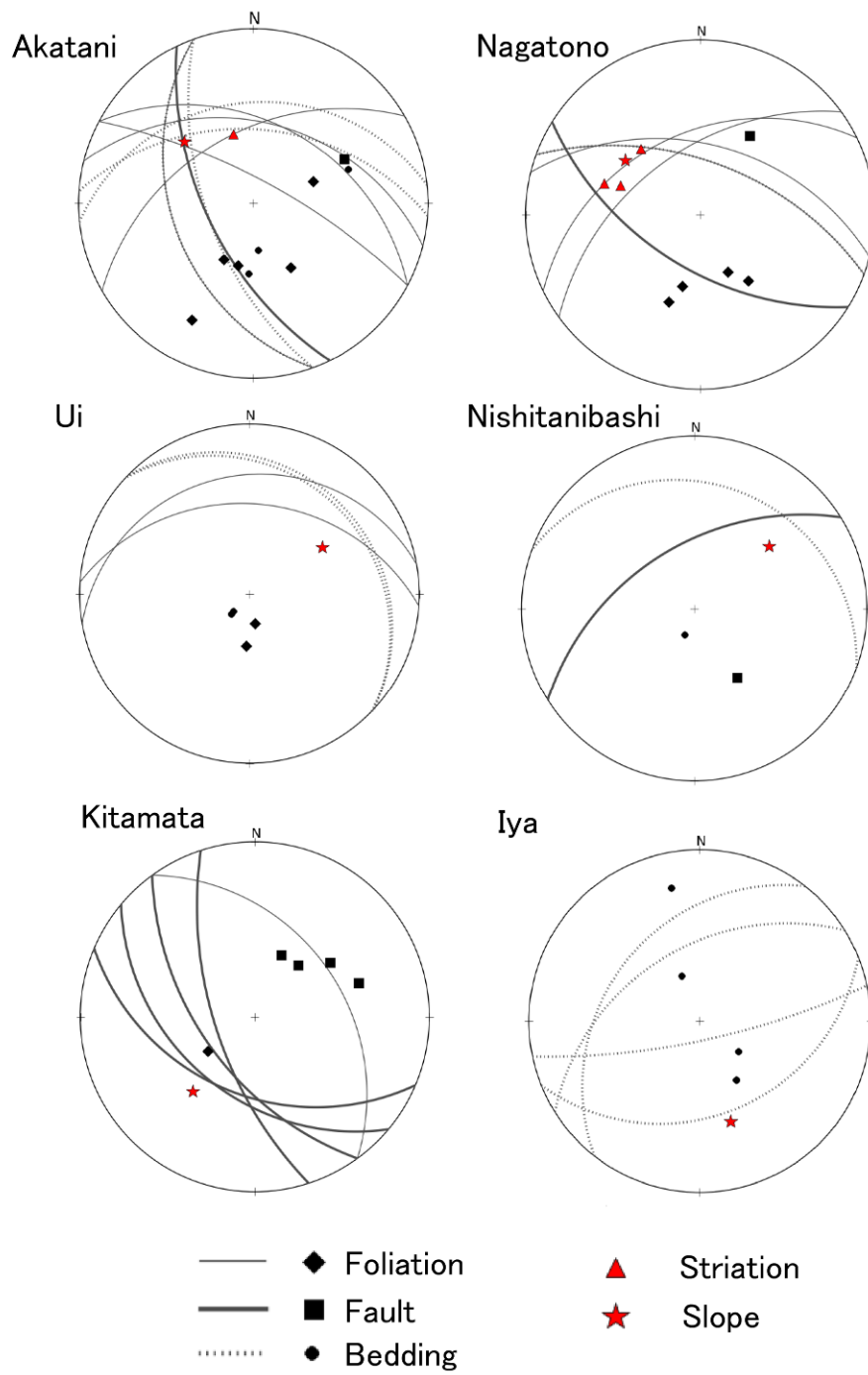


Fig. 9 Stereonet projections of discontinuities, slopes, and striations on slip surfaces. Equal angle projection in the lower hemisphere.

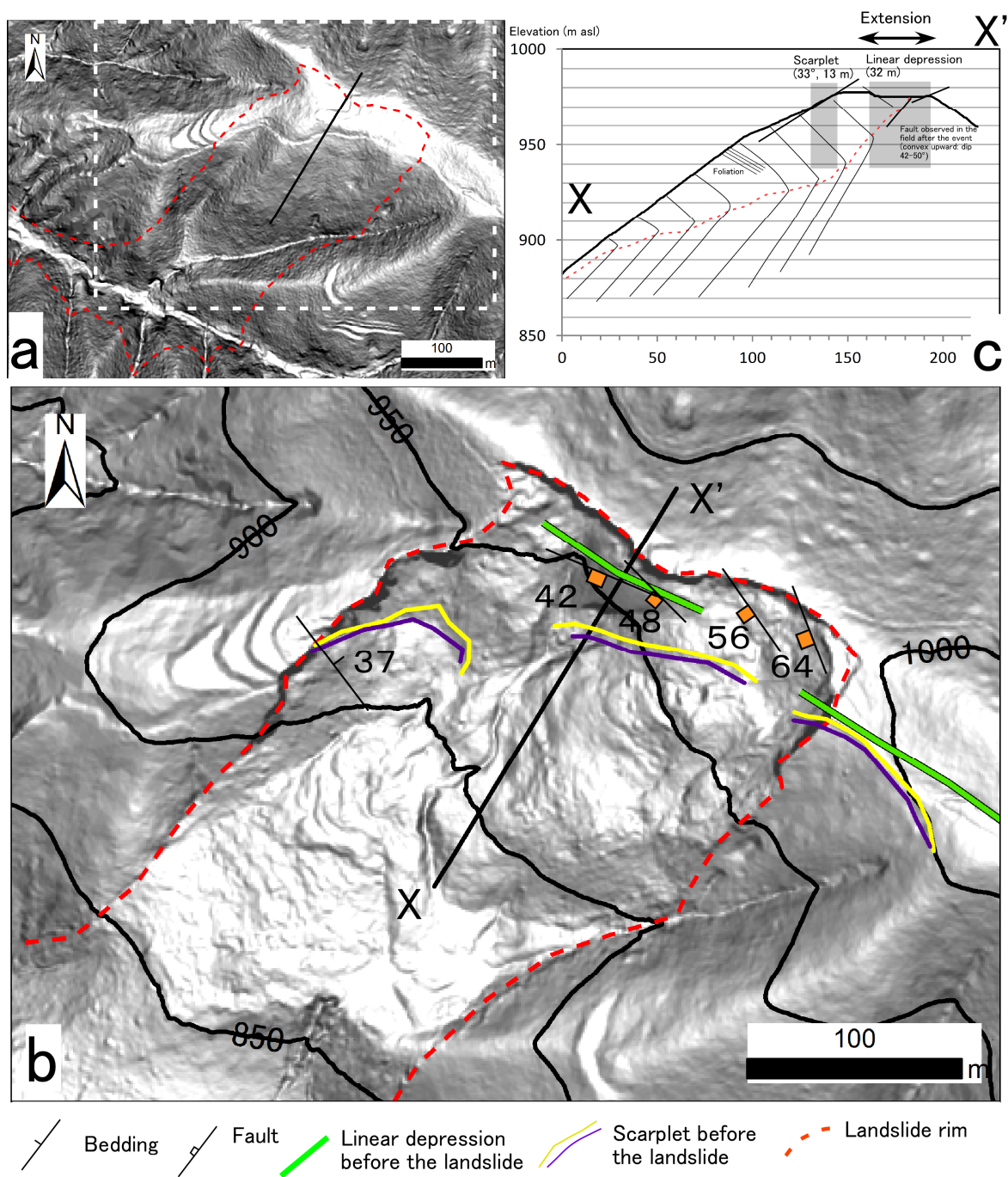


Fig. 10 The Kitamata landslide. A: slope image before the event. B: slope image and geologic features exposed after the landslide. Topographic features are before the landslide are also shown. C: Geologic cross section.

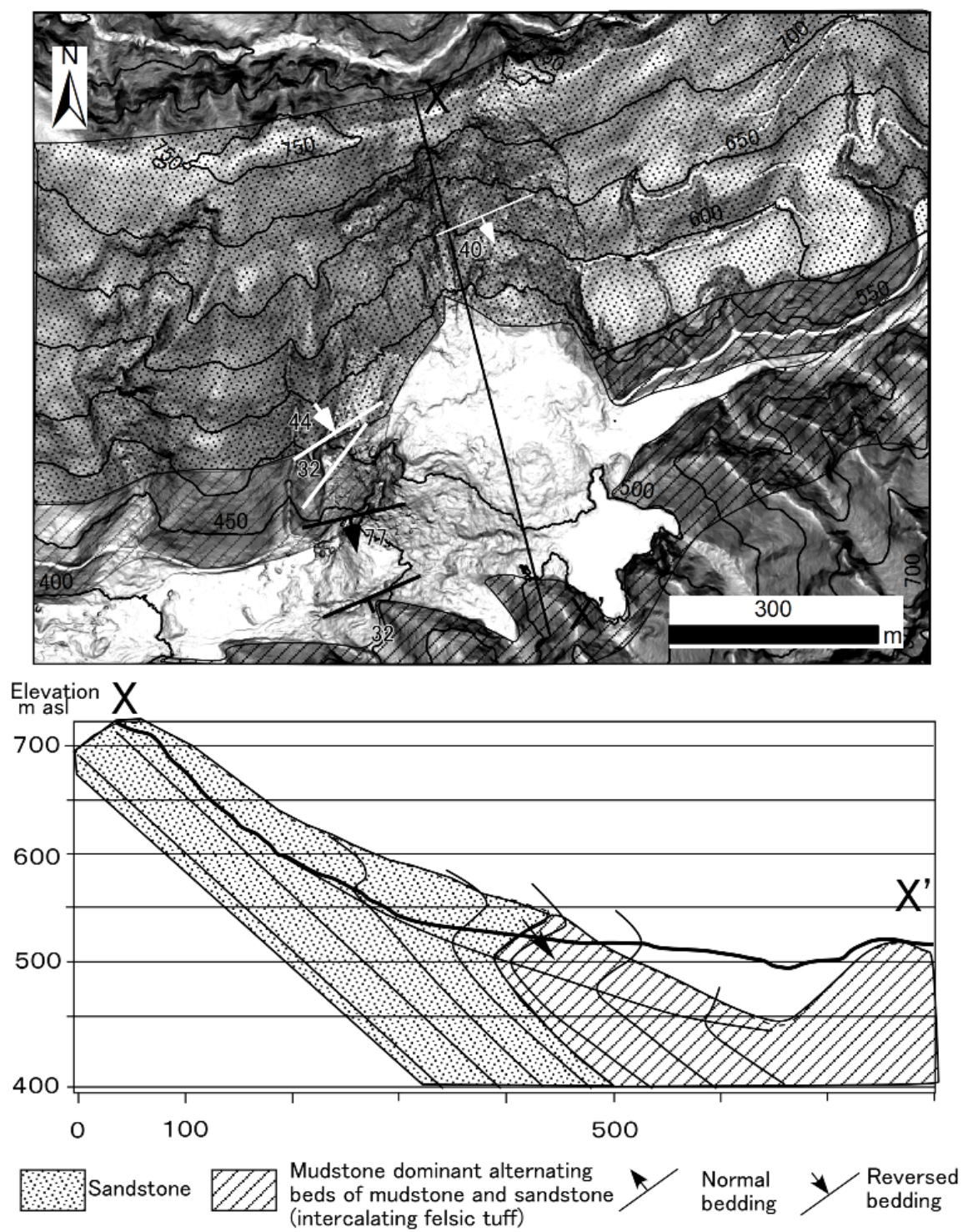
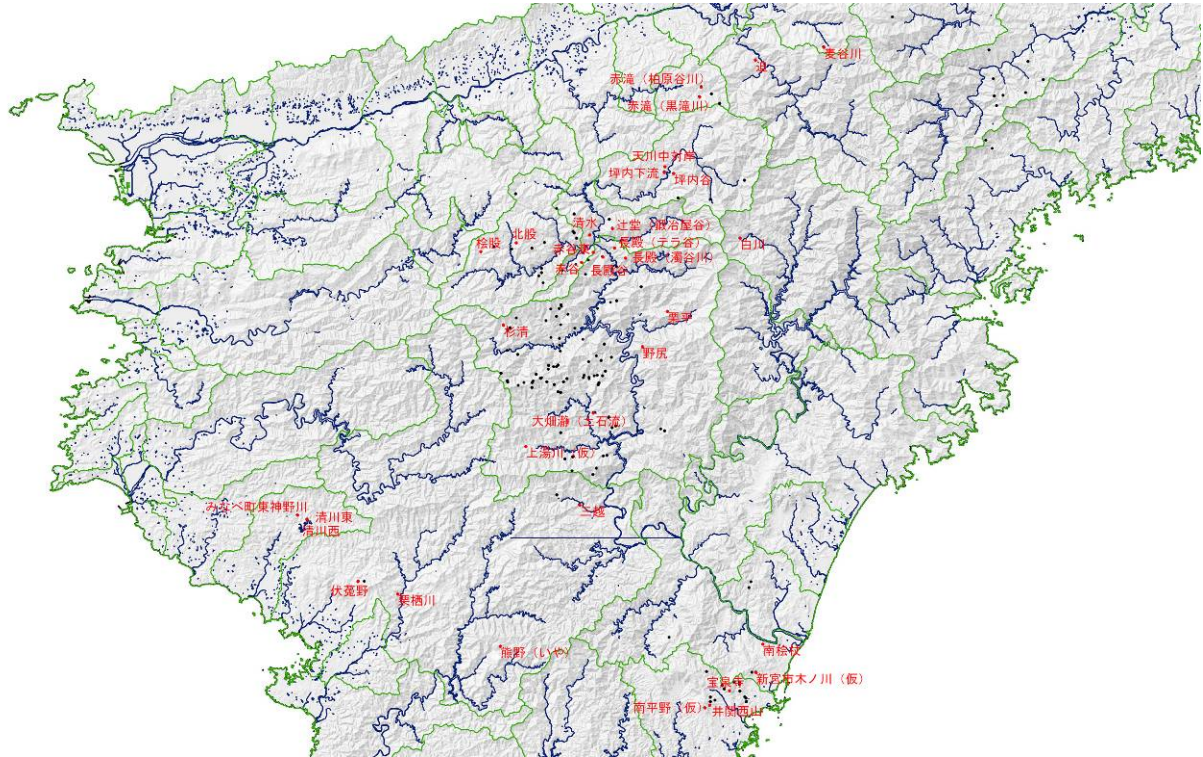


Fig. 11 Geologic map and cross section of the Iya landslide.

付録



付図－1 台風12号による災害発生箇所（付表－1，2に対応）

付表―1 災害時系列

No.	崩壊の名前	人的被害(名)	県	住所	発生日時	天然ダム	発生日時ソース
1	上湯川	1	n	十津川村上湯川	9/3 9:58頃		・11/2 奈良県防災統括室報道資料「台風12号及び15号に関する被害状況等について(第97報)」
2	野尻	8	n	十津川村野尻	9/3 18時半頃	一部閉塞	・9/8産経「不明の兄どこに…心傷める妹 奈良・十津川」
3	赤谷東		n	五條市大塔町清水	9/3 18:46	一時閉塞か	・Yamada et al., in press
4	天川右岸(小)	1	n	天川村坪内	9/3 20時頃	一部閉塞	・9/28平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害合同調査団調査速報(奈良県班, 9月23～25日)
5	井関西山	4	w	那智勝浦町井関	9/3 夜		・9/26産経「長男を亡くした老母 土石流の夜, 「引っ張ってでも連れ戻せば良かった」」
6	伏菟野	5	w	田辺市伏菟野	9/4 0:40頃		・9/4毎日「台風12号: 和歌山・田辺の山崩れ…1遺体を発見」
7	清川西	1	w	みなべ町清川	9/4 2時頃		・9/5紀伊民報「各地で崩土や土石流、家全壊し1人死亡 みなべ町清川」
8	清川東		w	みなべ町清川	9/4 2時-3時		・9/21紀伊民報「法手見トンネル、土砂の撤去開始 みなべ町清川・国道424号」
9	宇宮原(濁谷川)	3	n	十津川村宇宮原	9/4 2:13	一部閉塞	・Yamada et al., in press
10	木ノ川	1	w	新宮市木ノ川	9/4 未明		・9/23紀南「新宮市木ノ川で行方不明の白川さん「少しでも早く発見したい」 自衛隊、警察、消防が合同捜索」
11	紀宝町浅里	1	m	紀宝町浅里	9/4 未明		・9/12中日「紀宝町の孤立が解消、捜索本格化」
12	南桧杖	4	w	新宮市南桧杖	9/4 3:10頃		・10/13MBS放送「台風被災地 “山津波”の猛威と周期」
13	辻堂(鍛冶屋谷)		n	五條市大塔町辻堂	9/4 2時半-早朝	一部閉塞	・9/5毎日「台風12号: 土砂災害相次ぐ 県内3人死亡、救出難航 行方不明者も多数 / 奈良」 9/7産経【台風12号】傾斜地の危機意識 住民救う 奈良・大塔町辻堂地区
14	熊野	3	w	田辺市熊野	9/4 6:54	緊急調査対象	・Yamada et al., in press ・9/5紀伊民報「各地で崩土や土石流、家全壊し1人死亡 みなべ町清川」
15	宇井(清水)	11	n	五條市大塔町清水	9/4 7:06	一部閉塞	・Yamada et al., in press ・9/6毎日「台風12号: 「一緒にいれば」出勤直後、家流れ妻不明」
16	栗平		n	十津川村小森	9/4 8:06	緊急調査対象	・Yamada et al., in press
17	坪内谷		n	天川村坪内	9/4 8時頃	一部閉塞	・9/28平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害合同調査団調査速報(奈良県班, 9月23～25日)
18	三越		w	田辺市本宮町三越	9/4 8:30頃	一部閉塞	・和歌山県調べ(土木研究所小山内氏講演資料「台風12号による土砂災害とその対応について」)
20	桧股		n	野迫川村北股	9/4 9:45	閉塞後決壊	・野迫川村役場へ聞き取り(松四氏)
21	長殿谷		n	十津川村長殿	9/4 10:45	緊急調査対象	・Yamada et al., in press
22	北股		n	野迫川村北股	9/4 10:10	緊急調査対象	・野迫川村役場へ聞き取り(松四氏)
23	天川右岸(大)		n	天川村坪内	9/4 13時頃	一部閉塞	・9/28平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害合同調査団調査速報(奈良県班, 9月23～25日)
24	赤谷		n	五條市大塔町清水	9/4 16:22	緊急調査対象	・9/12防災科学技術研究所プレス発表資料「台風12号の土砂災害域からの地震波を観測」 ・Yamada et al., in press
25	迫		n	川上村迫	9/4 17:25		・Yamada et al., in press ・9/5asahi「山が 川が 住宅襲う／台風12号」

※天然ダムの状況については以下を参照。

・「台風12号の豪雨に伴う河道閉塞箇所数について」 国土交通省(9月13日)

http://www.kkr.mlit.go.jp/scripts/cms/plan/info/2/data/pdf/info_16/20110929_08.pdf

・「台風12号による河道閉塞等の状況」 奈良県土木部 (9月15日)

<http://www.pref.nara.jp/secure/2805/00kadouheisokujoukyou.pdf>

・「河道閉塞形成箇所の調査結果(詳細情報)」 奈良県土木部(9月15日) http://www.pref.nara.jp/dd_aspx_menuid-25587.htm

・「平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害合同調査団 調査速報(奈良県班, 9月23～25日)」(9月28日)

<http://www.jiban.or.jp/file/nara0928.pdf>

以下は、発生日時の情報なし。

	南平野	1	w	那智勝浦町南平野			
	麦谷川		n	東吉野村麦谷		一部閉塞	
	大畑瀬(土石流)		n	十津川村重里		一部閉塞	
	みなべ町東神野川		w	みなべ町島之瀬大久保谷		一部閉塞	
	栗栖川		w	田辺市中辺路町栗栖川		一部閉塞	
	白川		n	上北山村白川		閉塞, 越流中(9/13)	
	杉清		n	十津川村杉清(小井谷)		閉塞, 越流中(9/13)	

付表－2 災害時系列（情報あり）

日時			斜面崩壊等		人的被害	
日付	時刻	発生日時ソース	和歌山県・三重県	奈良県	和歌山県・三重県	奈良県
2011/9/3	9:55ごろ	・9/3毎日「台風12号：動き遅く被害拡大 12万人に避難勧告」			【その他：1名】新宮市熊野川町篠尾（ささひ）。台風対策の水道管工事を実施していた男性（62歳）が足をすべらせ川に転落、行方不明に（9/3NHK）。→9/10下流で遺体発見（11/6産）	
	9:58ごろ	・11/2奈良県防災統括室報道資料「台風12号及び15号に関する被害状況等について」（第97報）」		十津川村上湯川で土砂崩れ。		【土砂：1名】十津川村上湯川、斜面に建つ民家の裏の畑が崩壊。住民の男性（73歳）が民家ごと土砂に巻き込まれた。午前11時すぎに発見されるも死亡を確認（9/3NHK、9/7奈良県）
	18:30ごろ	・9/8産経「不明の兄どこに…心傷める妹 奈良・十津川」		十津川村野尻で山の斜面が崩れ、川に土砂が流入。		【土砂洪水：8名（6名）】十津川村野尻、山の斜面が崩れ、川に土砂が流入。溢れた水が木造2階建ての住宅2棟を押し流し、住民8名と訪問中の親戚3名の計11名が「押し出された。4人が救助されたが、うち女性（36歳）は搬送先の病院で死亡。7人が行方不明に（9/4NHK、9/7奈良県）。→9/7午前、十津川村小原の河川敷で男性（57歳）の遺体を発見（9/8奈良、9/12奈良県）。男性（33歳）、男性（4歳）、女性（1歳）、男性（33歳）、男性（11歳）、女性（70歳）はいまだ行方不明
	18:46	・Yamada et al., in press		大塔町清水の赤谷で斜面が崩壊（赤谷東）。		
	20:00ごろ	・9/28平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害合同調査団調査速報（奈良県班、9月23～25日）		天川村坪内の天川中学校対岸の斜面が崩壊（天川右岸（小））。		
	22:30ごろ？	・9/16産経「3人犠牲…急なダム放流2、6倍が原因だ 住民不信、データ公開要求」			【洪水：2名】日高川町小釜本、日高川沿いの工場で従業員の男性2名（65歳、52歳）が台風に備えて作業車を移動していたところ、増水した川に流されたとみられる（9/16産経）。→9/4日夕方、工場近くと約1 ^{km} 離れた日高川で近所の人や自衛隊員らが2人の遺体を発見（9/6日高）。	
	22:50ごろ	・9/5朝日「山が川が 住宅襲う／台風12号」				【土砂洪水：1名】天川村坪内、20時ごろの崩壊（天川右岸（小））により天ノ川の流路が変わっていたところに河川が増水し、住宅2棟（鉄筋モルタル2階建ての教職員住宅と隣接する木造2階建ての村営住宅）が流された。中にいた中学校講師の女性（39歳）が行方不明に（9/5Asahi）。→9/14猿谷ダムにて遺体発見（9/20奈良県）
	夜	・9/26産経「長男を亡くした老母 土石流の後、「引っこ帰っても連れ戻せば良かった」」	那智勝浦町井関西山で山崩れ。		【土砂：4名（1名）】那智勝浦町井関西山地区、山崩れにより4名が行方不明に（9/5和歌山県）。後に男性2名の死亡を確認（9/12、9/15和歌山県）。うち1名是那智川河口付近で9/4に発見された男性（54歳）（9/15テレビ和歌山）。さらに女性1名の遺体を浜の宮で発見（9/29和歌山県）。女性1名はいまだ行方不明	
2011/9/4	00:40ごろ	・9/4毎日「台風12号：和歌山・田辺の山崩れ…1遺体を発見」	田辺市伏菟野で斜面が崩壊。		【土砂：5名】田辺市伏菟野、山の斜面が崩壊し、複数の民家が土砂に巻き込まれ6名が行方不明に。その後、女性1名（14歳）が救助。4日昼に女性（69歳）の遺体を発見（9/5紀伊）。→6日午後、女性（38歳）の遺体を発見（9/7産経）。10日、女性（88歳）、男性（17歳）、男性（16歳）の遺体を発見（9/10Asahi）。	
	1:00ごろ	・9/6日高「台風12号 日高地方で死者4人、行方不明1人」			【洪水：1名】日高川町川原河、避難所に向かっていった乗用車が冠水した道路に侵入して立ち往生。女性1名（70代）は自力で脱出。男性1名（80歳）は逃げ出せず、車が水没して死亡（9/4産経）。	
	1:30ごろ	・10/12紀南「洪水、土砂崩れの複合型災害 台風12号 紀伊半島豪雨を検証」	那智勝浦町井関にて那智川水位低下、崩壊土砂による堰き止めか。			
	2:00ごろ	・9/5紀伊「各地で崩土や土石流、家全壊し1人死亡 みなべ町清川」	みなべ町清川で土砂崩れ。		【土砂：1名】みなべ町清川、住宅の裏山で土砂崩れが起き1棟が倒壊。6時間後に中から男性（28歳）が運び出されたが死亡を確認（9/5東	
	2:00～3:00	・9/21紀伊「法手異トネル、土砂の撤去開始 みなべ町清川・国道424号」	みなべ町清川で崩壊、2:00ごろの崩壊の隣。			
	2:00ごろ	・9/7Taaron artsのブログ http://blog.murabio.jp/art9/date/2011-09-07.html				

	2:13ごろ	・Yamada et al., in press		十津川村宇宮原で斜面崩壊。	【土砂洪水:3名】十津川村宇宮原、山の斜面が崩壊し土砂が十津川に突入、上流の十津川村長殿へ高波が押し上ったことにより家屋が流され、住民2名と近所から避難していた1名が行方不明に(9/4NHK、12/4読売)。→9/5、長殿の河川敷で男性(82)が心肺停止状態でみつかり午後死亡を確認(9/5朝日)。9/26風屋ダムで女性(79)の遺体を発見(9/26産経関西)。10/19風屋ダムで女性(90)の遺体を発見(10/26産経)。
	2:00すぎ?	・9/4読売「結納の日、町長の娘「流された」…連絡の要不明」	那智勝浦町市野々で土石流。		【土砂:5名】那智勝浦町市野々、土石流により一家5名が流され行方不明に(9/5和歌山県、9/9産経)。→9/8下流で男性(7歳)の遺体を発見(9/9産経)。9/12男性(45歳)、女性(46歳、14歳、13歳)の遺体を身元確認(9/12和歌山放送)。
	未明	・9/23紀南「新宮市木ノ川で行方不明の白川さん「少しでも早く発見したい」自衛隊、警察、消防が合同捜索」	新宮市木ノ川上流部で土砂崩れ。		【土砂:1名】新宮市木ノ川、木ノ川上流で土砂崩れ。民家が土砂に巻き込まれ1人暮らしの男性(52)が行方不明に(9/5消防庁、9/23紀南)。→9/22木ノ川の河原で遺体を発見(9/25産経)。
		・9/12中日「紀宝町の孤立が解消、捜索本格化」	紀宝町浅里で土石流。		【土砂:1名(1名)】紀宝町浅里、4日未明、大和田川で土石流が発生。民家6件が流され男性(87)が行方不明に(9/7消防庁、9/12中日)。いまだ行方不明。
		・10/12紀南「洪水、土砂前線の複合型災害 台風12号 紀伊半島豪雨を検証」	那智勝浦町で土石流と那智川の氾濫。		【洪水:1名】那智勝浦町井関、氾濫水が民家を押し流し、男性(15歳)が行方不明に(9/7産経)→9/9遺体を発見(9/11asahi)。
	3日夜~4日未明	・12/5産経「被災地の音長に聞く(3)「1人でも多くの人に来てほしい」和歌山県那智勝浦町 寺本真一町			【洪水:1名】那智勝浦町井関、氾濫水が民家を押し流し、女性(66)が行方不明に(9/8産経)→9/6遺体の身元を確認(9/8産経)。
	未明?	・9/10産経「去るか残るか住民苦悩 水没の和歌山・熊野川町」 ・9/13紀伊「至る所にごみの山、甚大な被害にあせんルボ・新宮市熊野川町」 ・11/2毎日「記者の目・紀伊半島豪雨と災害弱者＝岸本桂司(和歌山交番)」 ・産経ニュースwest「(中)紀伊半島豪雨 高齢化、支援者が不足」	熊野川町で河川氾濫		【洪水1名】新宮市熊野川町西敷屋、9/3夜、自宅に水が入ったため量を挙げていると知人に電話で伝えた後、連絡が途絶えた男性(85)を、9/4朝、自宅2階で溺死の遺体で発見。(11/2毎日)
					【洪水:1名】新宮市熊野川町西敷屋、男性(81)が自宅で浸水により溺死(9/12和歌山放送局、12/7産経ニュースwest)。
					【洪水1名】新宮市熊野川町日足、水が押し寄せたとみられる自宅で男性(72)の遺体を9/5朝発見。(9/5スポニチ)。
					【洪水:1名】新宮市熊野川町日足、女性(75歳)の遺体を自宅で発見。浸水から逃げ遅れたもよう(9/5和歌山県、9/10産経、9/12和歌山放送局)。
					【洪水:1名】新宮市熊野川町日足、女性(86歳)の遺体を自宅で発見。浸水から逃げ遅れたもよう(9/5和歌山県、9/12和歌山放送局、1/28紀伊)。
		・9/4産経ニュース「氾濫30人超が孤立 三重・紀宝町、自衛隊要請」	紀宝町で相野谷川が氾濫。同町の畠田、高岡、大里の3地区で民家が浸		【洪水1名】紀宝町大里、9/4夕方、水が引いた住宅から男性(87)の遺体を発見(9/5News24)。
					【その他:10名】那智勝浦町(主に井関)、9/4以降、10名の遺体を発見(9/5～和歌山県)。男性5名(69歳、87歳、78歳、63歳、56歳)、女性5名(64歳、80歳、3名は年齢不詳)。
	3:10ごろ	・10/13MBS「台風被災地「山津波」の猛威と周知」	新宮市南松枝で土砂崩れ。		【土砂:4名】新宮市南松枝、熊野川の増水を受け農機具小屋に避難していたところ、裏山が崩れ4名が小屋ごと土砂に埋まった。その後、男性2名(68歳、64歳)、女性2名(89歳、65歳)の遺体を発見(9/5時事)。
	2:30-早朝	・9/7産経「台風12号」傾斜地の危機意識 住民救う奈良・大塔町辻堂地区」 ・9/5毎日「台風12号「土砂災害相次ぐ 県内3人死亡、救出難航 行方不明者も多数」／奈良」		大塔町辻堂で土石流。	
	4:30ごろ	・9/5tya「台風12号、21人死亡・61人不明」			【洪水:1名】那智勝浦町湯川、軽自動車を運転中に濁流にのまれたらしく、男性(54歳)が車ごとゆかし湯湖に転落。9/4正午に水没車両から遺体を発見(9/4毎日)。

	未明～明け方	・9/6毎日新聞「台風12号、御浜町ルン平 堤防決壊 89歳死亡「突然洪水、逃げる間なく」ノ三重」 ・2/22紀南高校コミュニティ通信No.111紀南の風			【洪水:1名】御浜町阿田和、尾呂志川の堤防が決壊。住宅に流れ込んだ土砂混じりの濁流に巻き込まれたらしい女性(89)の遺体を9/4日朝、自宅前で発見(9/4産経ニュース)。	
	3日夜～4日明け方?				【洪水:1名(1名)】新宮市相賀、大前商店が流され女性1名が行方不明に(9/7和歌山放送)。いままだ行方不明	
	3日夜～4日明け方?				【その他:2名】新宮市相賀、様続きの住宅に住んでいた男性(79歳)と女性(81歳)の遺体の身元を確認(9/6和歌山放送)。	
	3日夜～4日明け方?		那智勝浦町南平野で土砂崩れ。		【土砂:1名】那智勝浦町南平野、土砂崩れによる家屋損壊で男性(68歳)が死亡(9/5和歌山県、9/5時事)。	
	3日夜～4日明け方?				【その他:1名】那智勝浦町井関、自動車で移動していたところ田圃に車両が横転。車中で男性(65歳)が死亡(1/3朝日)。	
	5:40ごろ	・9/4NHK「増水的那智川鉄橋が崩落」				
	6:54ごろ	・9/5紀伊「各地で崩土や土石流、家全壊し1人死亡みなべ町清川」 ・Yamada et al. in press	田辺市熊野で崩壊、土石流。		【土砂:3名(1名)】田辺市熊野、山の斜面が崩れ、土砂が土石流となって流れ下り、3名が住宅ごと巻き込まれ行方不明に。→9/6女性(90歳)の遺体を発見、9/8女性(71歳)の遺体を発見(9/14産経)。男性(50歳)はいまだ行方不明	
	7:06ごろ	・9/6毎日「台風12号:「一緒にいれば」出勤直後、家流れ妻不明」 ・Yamada et al. in press		五條市大塔町清水で土砂崩れ。		【土砂:11名(4名)】五條市大塔町清水、山の斜面が崩壊、土砂が河川の水とともに対岸に押し寄せた。川の様子を見に行った女性(67歳)が土砂にのまれ、救出されるも午後後に死亡を確認(9/5Sasahi9/4読売)。住宅が流され7世帯10人が行方不明に(9/5NHK)。9/7に宇井で女性(68歳)の遺体を発見(9/11奈良)。9/10に十津川村川津の河川敷で女性(76歳)の遺体を発見(9/15yahoo)。9/25に宇井で女性(78歳)の遺体を発見(9/27産経)。9/24に宇井で女性(72歳)の遺体を発見(10/1産経関西)。10/18に風屋ダムで女性(70歳)の遺体を発見(10/18産経)。10/26に宇井で男性(39歳)の遺体を発見(10/27産経)。男性3名(80歳、73歳、78歳)、女性1名(37歳)はいまだ行方不明。
	8:00ごろ	・9/28平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害合同調査団調査速報(奈良県班、9月23～25日)。		天川村坪内谷で崩壊発生。		
	8:06	・Yamada et al. in press		十津川村小森で斜面崩壊(栗平)。		
	8:30ごろ	・9/6紀伊民報「崩落が壊滅 本宮町奥番地区」 ・和歌山県調べ(土木研究所小山内氏講演資料「台風12号による土砂災害とその対応について」)			【その他:1名】本宮町三越、奥番集落の高台から道路に転落したとみられる住民の女性(86歳)の遺体を発見。転落は土砂崩れの前(10/9産経)。	
	8:30ごろ	・和歌山県調べ(土木研究所小山内氏講演資料「台風12号による土砂災害とその対応について」)	本宮町三越奥番で崩壊。			
	9:00ごろ	・9/4毎日「水力発電所2カ所が停止 大雨で川が増水し水没 関電」				
	9:45ごろ	・野迫川村役場へ聞き取り。		野迫川村松股で崩壊。		
	10:10ごろ	・野迫川村役場へ聞き取り。		野迫川村北股で崩壊。		
	10:45	・Yamada et al. in press		長殿谷で崩壊。		
	13:00ごろ	・9/28平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害合同調査団調査速報(奈良県班、9月23～25日)。		天川村坪内で天ノ川右岸が崩壊(天川右岸(大))。		
	14:00ごろ	・9/6産経関西「台風12号」十津川の土砂崩れで倉水火薬と雷管流出」				
	16:22	・9/12防災科研プレス発表資料「台風12号の土砂災害域からの地震波を観測」 ・Yamada et al. in press		大塔町清水で崩壊(赤谷)。		
	17:25	・9/5asahi「山が川が住宅後ろ」台風12号」 ・Yamada et al. in press		川上村迫で崩壊。		
2011/9/3 ～ 2011/9/4					【洪水:1名(1名)】日高川町田尻、日高川沿いの別荘を訪れていた男性(69歳)が濁流にのまれたらしく行方不明に(9/6日高)。いままだ行方不明	
					【その他:1名(1名)】有田市新堂、男性が行方不明に(9/5和歌山県)。いままだ行方不明	
2011/9/5					【その他:1名】那智勝浦町、3日那智川の氾濫で取り残されたところを翌4日に県警へリで救助された女性(90代)が5日に心不全で死亡。災害関連死(10/20和歌山県)。	
2011/9/6					【その他:1名】那智勝浦町、3日、那智川の氾濫で取り残されたところを、翌4日に県警へリで救助された男性(90代)が6日に心不全で死亡。災害関連死(10/20和歌山県)。	
2011/9/3 ～ 2011/9/18					【その他:1名】古座川町、女性(80代)が被災後、十分に以前のような介護が受けられない等のため体力が衰え、死に至った。災害関連死(3/1和歌山県)。	
2011/9/3 ～ 2011/9/18					【その他:1名】古座川町、男性(70代)が被災後、ガス・ボイラーなどが使用できず水風呂での入浴生活を送り肺炎に、入院したが病状が悪化、死亡に至った。災害関連死(3/1和歌山県)。	
#####					【その他:1名】那智勝浦町、男性(76歳)が被災後、自宅全壊のため近所の家で避難生活を送り復旧活動にあたっていたが、心筋梗塞で死亡。災害関連死(3/13朝日)。	
人的被害の主要因と人数						
土砂		49				
洪水		16				
その他		22				
合計		87				
		※主要因が不明のケースおよび土砂にも洪水にも起因しないケース。				

引用文献

- 奥田節夫 (1984)歴史的記録からみた大崩壊の土石体堆積状態の特性. 京都大学防災研年報 27B: 352-368.
- 志井田功・諏訪兼位・梅田甲子郎・星野光雄 (1989) 5万分の1地質図幅「山上ヶ岳」. 地質調査総合センター.
- 清水文健・井口隆・大八木規夫 (2005) 地すべり地形分布図 第23集「和歌山・田辺」. 防災科学技術研究所.
- 竹林洋史・藤田正治・宮田秀介・堤大三(2011) 2011年9月紀伊半島豪雨災害調査速報. 自然災害科学 99, 30, 369-379.
- 棚井敏雄・水野篤行 (1954) 紀伊半島東南, 熊野炭田付近の地質構造について—紀伊半島南部の地史学的研究, その1—, 地質学雑誌, 60, 28-39.
- 羽田野誠一 (1968) 地すべり大規模崩壊と地形条件—和歌山県有田川上流の例—第5回災害科学総合シンポジウム, 24-25.
- 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 10-2: 95-111.
- 森脇寛 (2001)地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価. 地すべり, 38, 115-122.
- Chigira, M. (2009) "September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan." Engineering Geology 108(1-2): 1-15.
- Chigira, M., Wang, W.-N., Furuya, T., Kamai, T. (2003) Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan. Engineering Geology 68, 259-273.
- Chigira, M., X. Y. Wu, et al. (2010) Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Geomorphology 118(3-4): 225-238.
- Crosta, G.B., Chen, H., Frattini, P. (2006) Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasure efficiency for large debris avalanches. Engineering Geology 83, 236-253.
- Hsü, K.J. (1975) Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. Geological Society of America Bulletin 86, 129-140.
- Tsou, C. Y., Z. Y. Feng, et al. (2011) Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shialin, Taiwan. Geomorphology 127(3-4): 166-178.
- Yamada, M., Matsushi, Y., Chigira, M. and Mori, J., (in press) Seismic recordings of landslides caused by Typhoon Talas (2011), Japan. Geophysical Research Letters.

論文受理日 (2012年7月12日)

Deep-seated Catastrophic Landslides Induced by Typhoon 1112 (Talas)

Masahiro CHIGIRA*, Yuki MATSUSHI*, Ching-Ying TSOU, Narumi HIRAIISHI**, Makoto MATSUZAWA *** and Sumio MATSUURA*

* Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

** Fukada Geological Institute

*** Pacific Consultants Co. Ltd.

Synopsis

Typhoon 1112 crossed the Japanese Islands from 2 to 5 September in 2011, brought more than 2000 mm rainfall, and induced more than 50 deep-seated catastrophic landslides of Jurassic to Palaeogene sedimentary rocks. We studied fourteen landslides by using 1m-DEMs or aerial photographs and field survey to clarify that all of these occurred on slopes with scarplets or a linear depression along their future crowns. These scarplets and a linear depression were 2 m to 50 m high, and are scarcely observable on the aerial

photographs without particular attention. Horizontal length ratio between the scarplets and slopes along slope lines were 5 to 21 %, suggesting that “strains” before the failure were relatively small. Gravitational deformations were mainly due to sliding along wedge-shaped discontinuities. Nineteen landslides that have been specified for their occurrence time, were preceded by rainfalls exceeding 700 mm on the basis of amount of precipitation analyzed by radar-AMeDAS.

Keywords: Typhoon 1112, Deep-seated catastrophic landslide, Lidar, scarplet, gravitational slope deformation