

2011年紀伊半島大水害で発生した宇宮原深層崩壊の 地質・地形学的背景について

Geological and Geomorphological Background of the Uguhara Landslide in the 2011 Kii Disaster

荒井紀之

Noriyuki ARAI

Synopsis

Typhoon Talas induced the deep-seated catastrophic landslides (DCL) in the Kii Mountains between 2 and 5 September 2011. The Uguhara landslide is one of the DCLs that occurred on the W-facing slope called Nigoridani with a first-order Kumano River. This area is underlain by the Cretaceous accretionary complex, consisting of mixed rock and broken formation. This landslide debris that rushed into the swollen Kumano River caused a hydraulic bore to propagate upstream and destroyed a hydropower station and a house 1 km upstream. This study investigated the geological and geomorphological causes of the Uguhara landslide by detailed geological mapping and GIS analysis using 1m DEMs before and after the landslide. As a result, the landslide had sliding surfaces with wedge-shaped discontinuities that consisted of NW-dipping faults with incohesive fault rocks and cataclasite, SW-dipping faults. Newly formed scarps observed above the main scarps suggest the occurrence of landslides by heavy rain or earthquakes in the near future.

キーワード: 深層崩壊, 重力斜面変形, 豪雨, 付加体, 断層

Keywords: deep-seated catastrophic landslide, gravitational slope deformation, heavy rainfall, accretionary complex, fault

1. はじめに

および変成岩体である。

1.1 西南日本外帯における深層崩壊の発生状況

西南日本外帯では梅雨前線や台風に伴う豪雨や南海トラフ沿いの巨大地震等を誘因として多数の深層崩壊が発生してきた。その事例として2004年九州耳川上流域の豪雨災害 (Chigira, 2009), 2004年紀伊半島宮川上流域の豪雨災害 (Kojima et al., 2015), 2011年紀伊山地の豪雨災害 (Chigira et al., 2013), 2018年愛媛県宇和島の豪雨災害 (笹原ら, 2019), 1707年宝永地震にともなう大谷崩れ (土屋, 2000), 加奈木崩れ (千木良, 2000), 1854年安政南海地震等による大間崩壊 (国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所, 2004) 等がある。西南日本外帯を構成する主要な地質体は、四万十帯、秩父帯、三波川帯等の付加体

1.2 2011年の紀伊半島大水害概要

2011年台風12号の豪雨により紀伊山地では斜面崩壊や土石流により甚大な被害が発生した。熊野酸性岩類が分布する紀伊山地南部で表層崩壊や土石流が多発したのにくらべ、付加体からなる紀伊山地中央部では深層崩壊が群発した (紀州四万十団体研究グループ, 2012a; Chigira et al., 2013)。本論文で扱う宇宮原の崩壊も、この時発生した深層崩壊の一つである。2011年台風12号は、紀伊半島において記録的な量の降雨をもたらした。8月30日から9月5日の累計降水量は紀伊山地の広い範囲で1,000mmを超え、奈良県上北山村において2,439mmに達した (竹林ほか., 2011)。この豪雨に伴い紀伊山地では崩壊体積10,000m³を超える大規模崩壊が70箇所以上で発生し

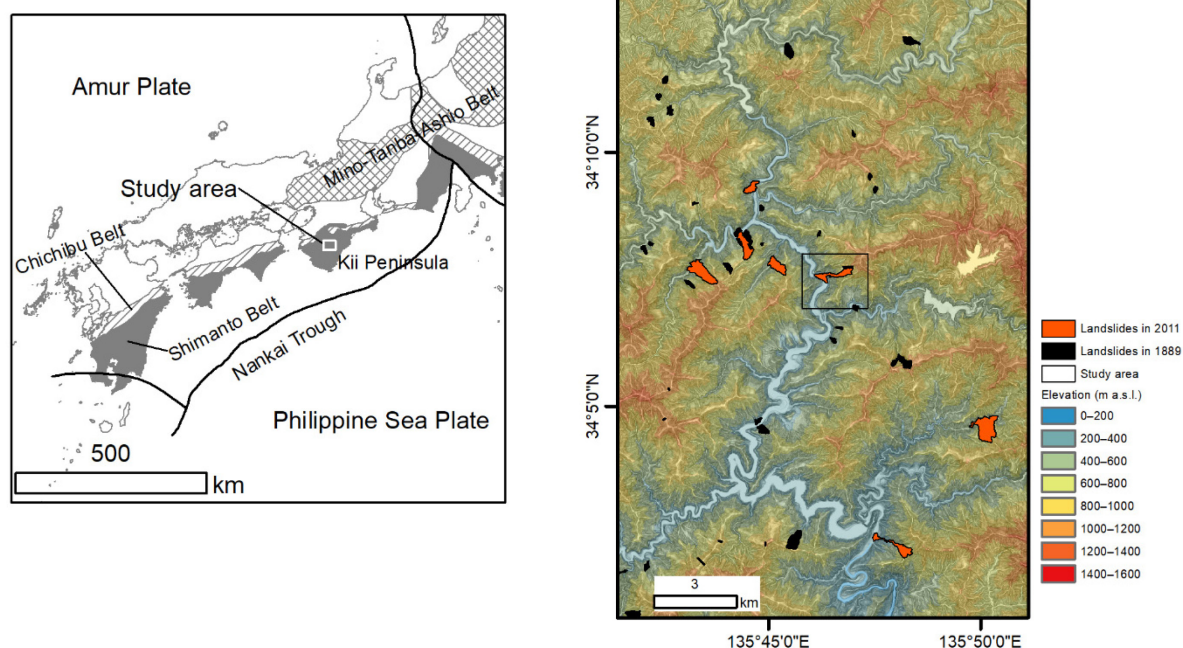


Fig. 1 Location map of the study area. The black rectangle outline in the right figure shows the study

た (Chigira et al., 2013) . また、この豪雨によって13箇所以上で天然ダムが形成された (井上・土支田, 2012) . 地質は秩父帯や四万十帯からなる付加体が広く分布し、大峰山脈周辺では花崗岩がこれらに貫入し周辺はホルンフェルス化している。崩壊は、ホルンフェルス化した部分を除く付加体分布域に分布している。

Chigira et al. (2013) は、これらの深層崩壊の内、大規模な14箇所について地質調査を行うとともに、崩壊発生前後の1mDEMデータを用いて地形解析を行い、崩壊の地形・地質要因を分析した。その結果、崩壊部の地質構造は14箇所中10箇所はくさび状分離面に沿う岩盤すべりであった。また、崩壊前に崩壊斜面上部に眉状の小崖が形成されていたことを、崩壊前に1mDEMが得られている10箇所中全てにおいて確認した。これらの小崖は、重力斜面変形により崩壊前に斜面がわずかに変形していたことに対応する。

熊野川上流域には少なくとも上位と下位の2段の遷急線が存在し、上位遷急線の上には古地形面に相当する緩斜面が存在する (平石・千木良, 2011; 平石ら, 2013; Tsou et al., 2017) . この典型例は高野山や大台河原である。下位の遷急線下部は急斜面を形成し、河川侵食作用が活発な領域に対応している。これらの地形は、河川侵食作用により遷急線が上流域に波及しつつあり、山地を削剝する漸移過程にあるとみなされる (平石・千木良, 2011; 平石ら, 2013; Tsou et al., 2017) .

Arai and Chigira (2018)は、1889年の十津川災害や2011年紀伊山地豪雨災害で深層崩壊が多発した熊野川支流の河原樋川下流域の詳細な地質調査を行い、2か所の深層崩壊 (赤谷と赤谷東) は、厚い粘土質破碎帯を伴う北西傾斜の衝上断層 (河原樋衝上断層) と北西-南東走向の高角断層の交差部で発生していることを発見した。Arai and Chigira (2019)は、熊野川上流の約12km区間において断層調査を行い、1mを超える破碎帯を伴う衝上断層が数km間隔で分布すること、深層崩壊とそれに先立つ重力斜面変形は、これらの衝上断層と、それを含む山体の河川による侵食過程に支配されていることを示唆した。

1.3 2011年宇宮原の深層崩壊及びそれ以前の崩壊

Fig.1に、研究域の位置図を、Fig.2に宇宮原深層崩壊の鳥観図を示す。宇宮原の崩壊は、崩壊により発生した地震波の解析により発生日時、継続時間等がYamada et al (2012) により報告されている。これによると崩壊発生日時は2011/9/4 2:13:42(JST)、崩壊継続時間は40sであった。この崩壊では増水した熊野川に崩壊土砂が突入した際、段波が発生し上流に波及して約1km上流に位置する関西電力株式会社長殿発電所を破壊した (伊藤ら, 2014) .

1889年 (明治22年) 8月の十津川災害においても台風の豪雨に伴い、深層崩壊が群発した (宇智吉野郡、

1981復刻) .この時発生した崩壊地は、明治44年測図1/50,000旧版地形図の崩壊地とほぼ対応していることが指摘されている(千葉, 1975; 平野ほか, 1987) .この地形図に、本論で対象としている崩壊の近傍に崩壊地が図示されている. また、吉野郡水災誌研究会(2020)中に、「濁谷山が縦180間横120間崩潰して十津川に堕ちるや川水を激動して対岸の字岩原に狂波が怒漲して来た為に人家及び住民を掠め去った。」の記述がある. 以上のことから、約130年前にもほぼ同一斜面で豪雨に伴い崩壊が発生していたと推定される.

1.4 研究目的

本研究では、宇宮原の崩壊を対象として、この場所で崩壊が繰り返し発生している地質・地形学的背景を明らかにするとともに、今後の崩壊発生の可能性や、崩壊箇所、崩壊様式を予測し減災に寄与することを目的とする.

2. 方法

2.1 地質調査

露頭観察では、整然相、破断相、混在相(木村ら, 1989; Raymond, 1984)に分類し、砂岩や泥岩の構成比率、層理、劈開の方向・発達程度を記載した. 地層の観察では上下判定を行い褶曲構造の把握に努めた. 断層の観察では、走向傾斜・性状を記載し、破碎帯を伴う断層とカタクレサイトからなる断層を区別した. これらのデータから縮尺1/5,000の地質図を作成し、崩壊発生場所の地質特性を分析した.

2.2 地形調査・解析

地形と崩壊形態の調査は、1mグリッドおよび10mグリッドDEMのGIS解析と現地調査により行った. 1mDEMは、国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所より提供を受けた. 航空レーダ測量の実施時期は、崩壊発生前の2009年、崩壊発生後の2012年6月23日から8月18日である. 10mDEMは、国土地理院の基盤地図情報を利用した. 地形解析は、ArcGIS Desktop Ver 10.8.2 (ESRI社)とQGIS Ver3.22.6を用いて行った. GIS解析では、傾斜量図より、重力斜面変形により形成されたと推定される微地形(谷向き小崖、山向き小崖、線状凹地等)、崩壊地形を抽出した. その後、これらの微地形の代表的なものを現地調査により確認した. また、10mDEMを用いて水系網解析、流域解析、河床縦断面作成、ヒブソメトリック分析を行った.

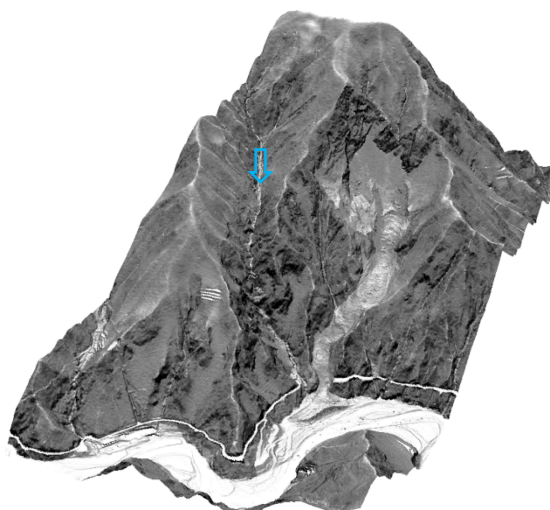


Fig. 2 Bird's-eye view of the Uguhara landslide. View to the east.

2.3 断層破碎物質のX線分析

崩壊地周辺の断層を対象として、断層破碎物質のX線分析(x-ray diffraction analysis)を行った. 用いた機器はリガクMiniFlex60で、XRDの測定条件は、対陰極Cu, β zフィルターNi, 使用固有X線 $K\alpha$, 管電圧40kV, 管電流15mA, 操作範囲 $2\theta = 2^\circ \sim 70^\circ$, 操作速度10deg/minである. まず、粉末試料の分析を行った後、水ひ法により $2\mu\text{m}$ 以下の粒子を抽出し、遠心分離機で沈殿させた後、定方位試料を作成し分析した. さらに、エチレングリコール処理と塩酸処理を必要に応じて行った.

3. 結果

3.1 崩壊形態

(1) 2011年崩壊

2011年の崩壊前後の1mDEMから作成した傾斜量図をFig.3に、標高の差分をとり崩壊による侵食域と堆積域をおおまかに区分したものをFig.4に示す. 主に崩壊した部分は標高750mから950mの斜面で、最大崩壊深さは61mである. また、主要な堆積域は標高570m以下の斜面と熊野川の河床の一部であり、最大堆積深度は38mである. 崩壊発生前の地形(Fig.3(a))から判読すると、2011年の崩壊部は、より古期の崩壊崖に囲まれた最上部の未崩壊斜面の一部をなしていたと推定される.

2018年に崩壊周辺部の樹木を調べた結果、左岸側の標高670m付近の立木にFig.5(a,b)に示すような削痕や倒木が認められた. また、崩壊堆積物が突入した熊野川の対岸斜面は、植林した樹木がなぎ倒されて裸地状を呈している(Fig.5(c)).

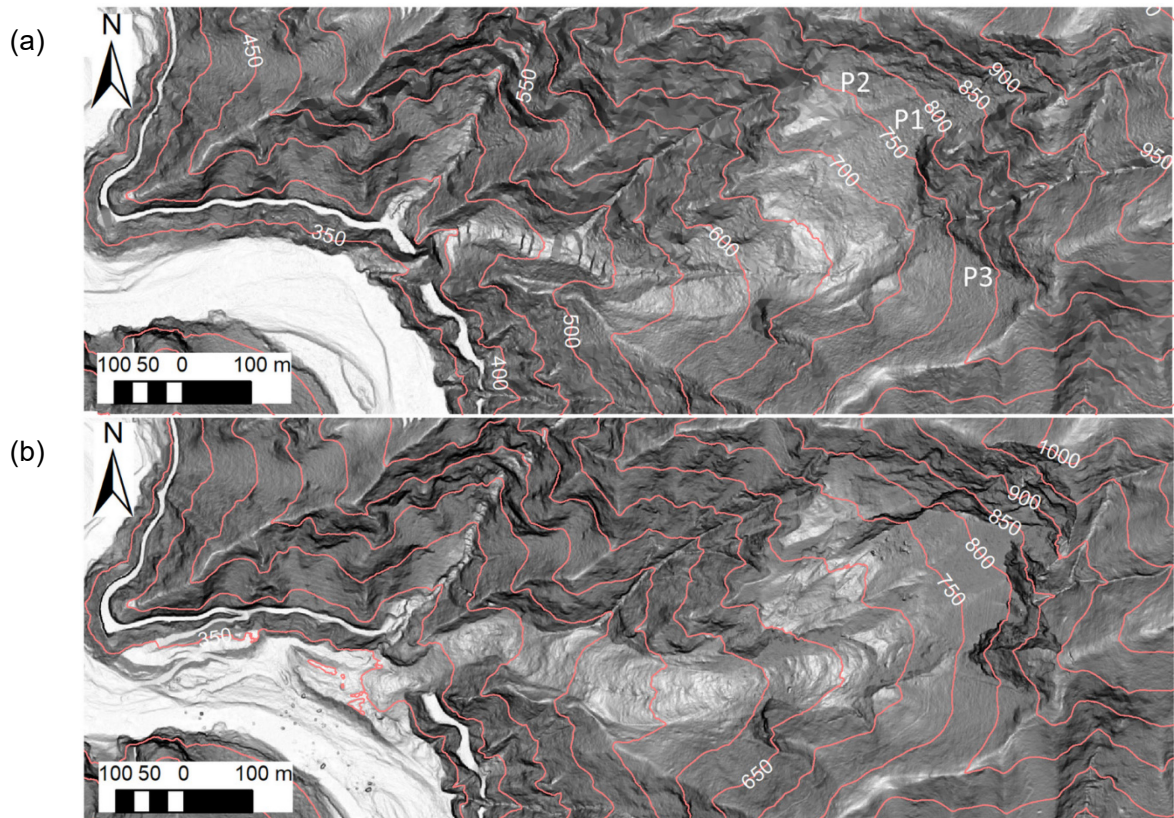


Fig. 3 Slope image before and after the Uguhara landslide in 2011. (a) Before. (b) After.

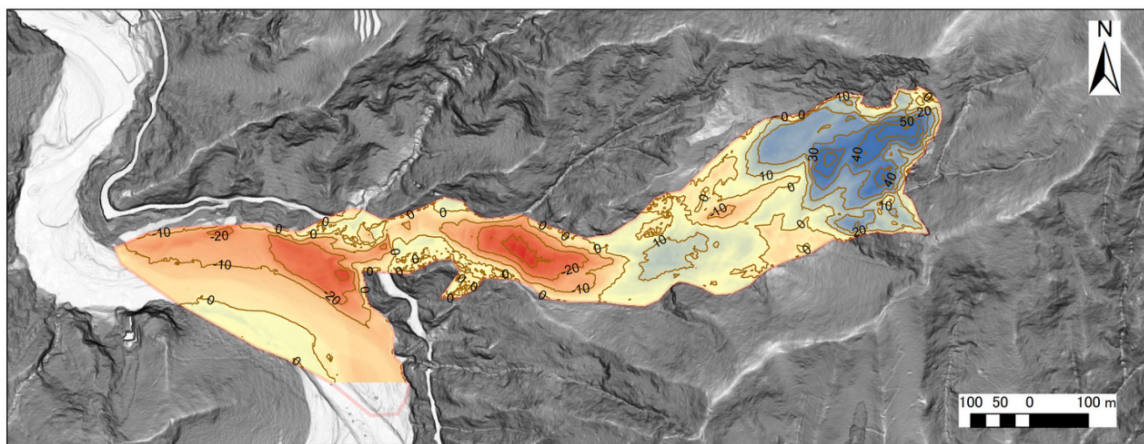


Fig. 4 Elevation change before and after the Uguhara landslide in 2011. The blue areas indicate erosion, and red areas indicate deposition. The elevation changes were calculated using DEMs.

国道168号の熊野川に架かる小休場橋の橋脚には Fig.6(a)に示すように削痕や物が衝突したような窪みが残っていた。また、崩壊発生側の高欄の一部に破損箇所が複数認められた (Fig.6(b))。崩壊発生直後に調査を行った研究者の証言によると、高欄の金属製のフェンスに石が突き刺さっていたとのことである。

(2) 明治十津川災害の崩壊とより古い崩壊

前述したように明治十津川災害においても隣接し

た斜面で崩壊が発生したことがうかがえる。2009年の1mDEMより作成した傾斜量図 (Fig.3(a)) をみると、P1地点において西南西方向の崩壊谷がありその下部に崩壊堆積物が南西方向に流下した跡が認められる。この北側のP2地点では東西方向の尾根に平行な滑落崖跡とその南側に南西方向に傾斜する緩斜面が位置している。これらが明治期の崩壊箇所と推定される。また、南側のP3地点には別の崩壊崖が存在しその下部の崩壊堆積物は明治期の崩壊堆積物により侵食さ



Fig. 5 Photographs of trees damaged by blasts and surges of the 2011 Uguhara landslide. (a,b) Trees damaged by blasts. (c) Washed area by surges on the other side of the Kumano River.

れている。したがって明治期以前にも隣接した場所で崩壊が発生した可能性が大きい。

3.2 地質

(1) 岩相および地質構造

本研究により得られた宇宮原崩壊地を含む周辺の地質図をFig.7に、地質断面図をFig.8に示す。B-B'地質断面図に示すように、本研究域では、砂岩優勢で異地性ブロックを含まない破断相と、泥岩優勢な基質中にチャートブロックを含む混在相からなる岩相が、北北西に傾斜した複数の断層に境されて覆瓦構造をなしている。宇宮原の崩壊は、泥岩優勢な混在相および破断相からなる岩相部で発生している。紀州四万十帯団体研究グループ (2012b) によると、研究域は美山コンプレックスの護摩壇山ユニット

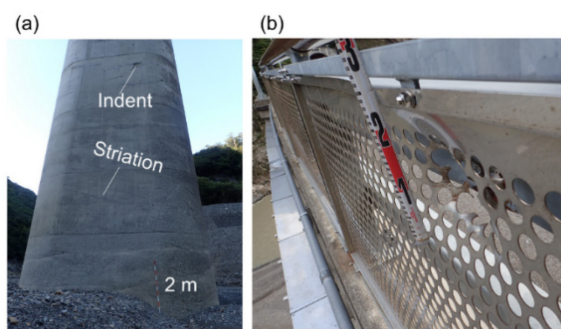


Fig. 6 Photographs of the bridge damaged by surges of the 2011 Uguhara landslide. (a) A scratched pier. (b) Damaged fences.

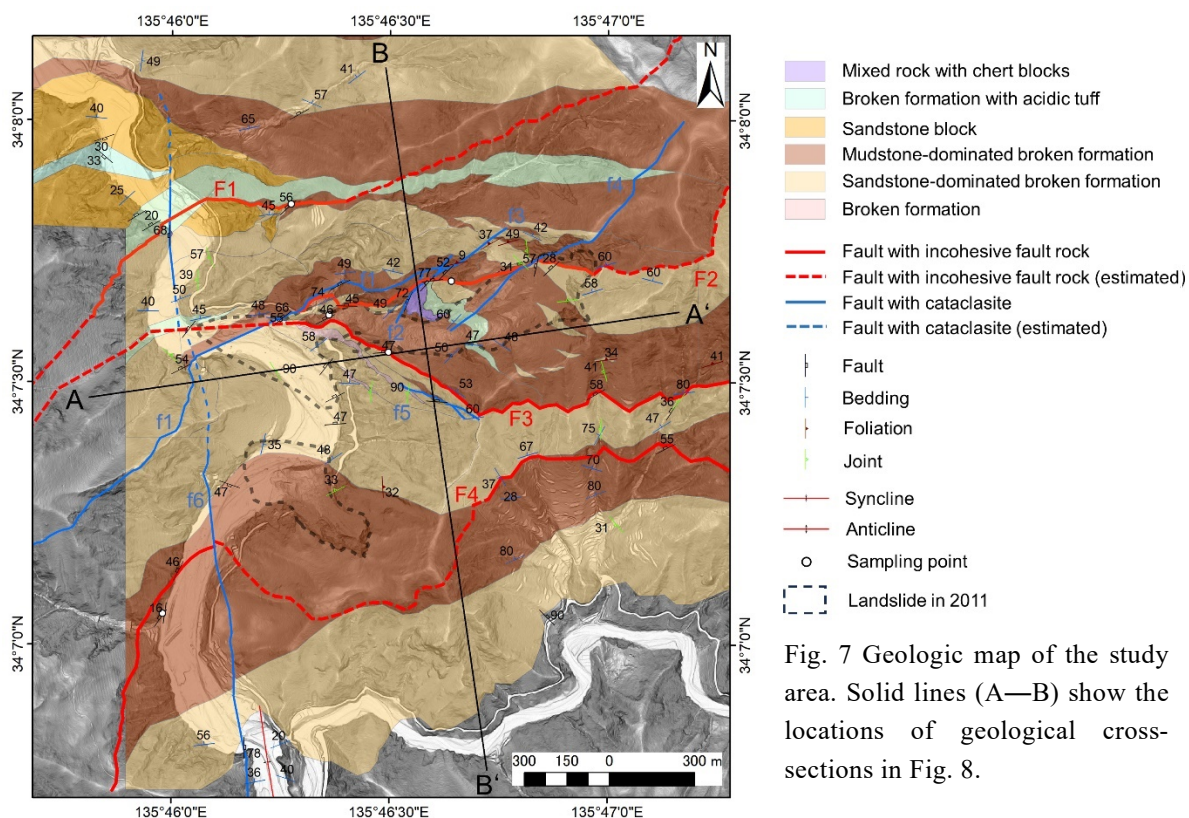


Fig. 7 Geologic map of the study area. Solid lines (A—B) show the locations of geological cross-sections in Fig. 8.

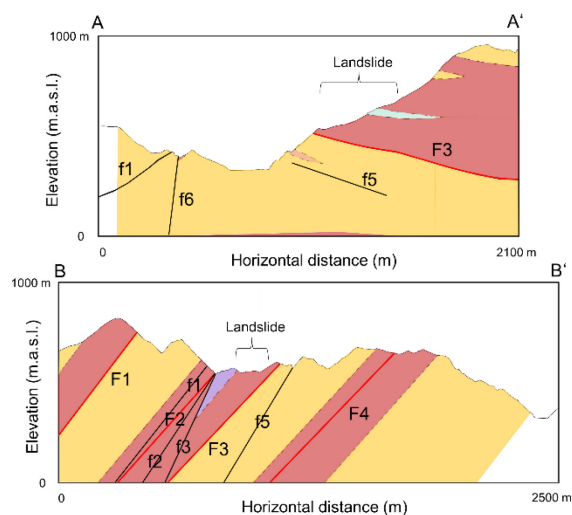


Fig. 8 Geological cross-sections along the lines shown in Figure 7. The legend is the same as in Fig. 7.

ト(M2)のサブユニットであるM2aユニットからなり、緑色岩類とチャートブロックを含み泥質岩基質が優勢な混在岩からなるとしている。宇宮原崩壊地の北側に、赤色や淡緑色の層状チャートブロックを含み泥岩基質優勢な混在岩がレンズ状岩体として含まれていた。この岩体を取り囲むように、泥岩基質優勢で砂岩と酸性凝灰岩を含む破断相が分布している。

(2) 断層

研究域内の主要な断層として、非固結断層岩を伴う断層(F1—F4)とカタクレサイトからなる断層(f1—f6)が分布している。Table 1に、これらの断層の平

Table 1 List of main faults in the study area.

	Strike	Dip	Maximum thickness(cm)	Note
F1	N60° E	36° NW	110	fault group, black gouge
F2	N63° E	41° NW	50	black gouge?
F3	N75° E	53° NW	200	black gouge
F4	N42° E	51° NW	85	fault group, black gouge
f1	N63° E	59° NW	40	cataclasite
f2	N23° E	72° NW	90	cataclasite
f3	N45° E	65° NW	80	cataclasite
f4	N13° E	57° W	20	cataclasite
f5	N89° E	63° N	30	cataclasite
f6	N3° W	85° E	10	cataclasite

均的な走向傾斜、最大厚さ、断層岩の種類を、Fig.9に露頭写真を示す。非固結断層の走向傾斜は北西に36° から53° 傾斜し、個々の断層の最大幅は50cmから2mである。F1とF4は連続露頭観察から、同方向の複数の断層からなる断層集中帯をなしているとみなされる。固結断層は北から西北西に57° から72° 傾斜し、f6のみ東に85° 傾斜している。断層幅は10cmから90cmである。F3断層は、Fig.10aに示すように、複合面構造から断層全体としては逆断層タイプのせん断変形を示すが、その一部に垂角から垂円礫を含む黒色粘土帯が含まれ、この部分では正断層タイプの複合面構造が認められる(Fig.10(b),(c))。以上の観察結果よりF3断層は、逆断層として形成され、その後、隆起と剝作用により山地斜面に露出するに至り、この際、重力斜面変形により地すべり性のせん断変形が断層内の一部で生じたものと推定される。崩壊発生部は、破碎帯を伴う断層と、カタクレサイトからなる断層が交差した領域に位置している。

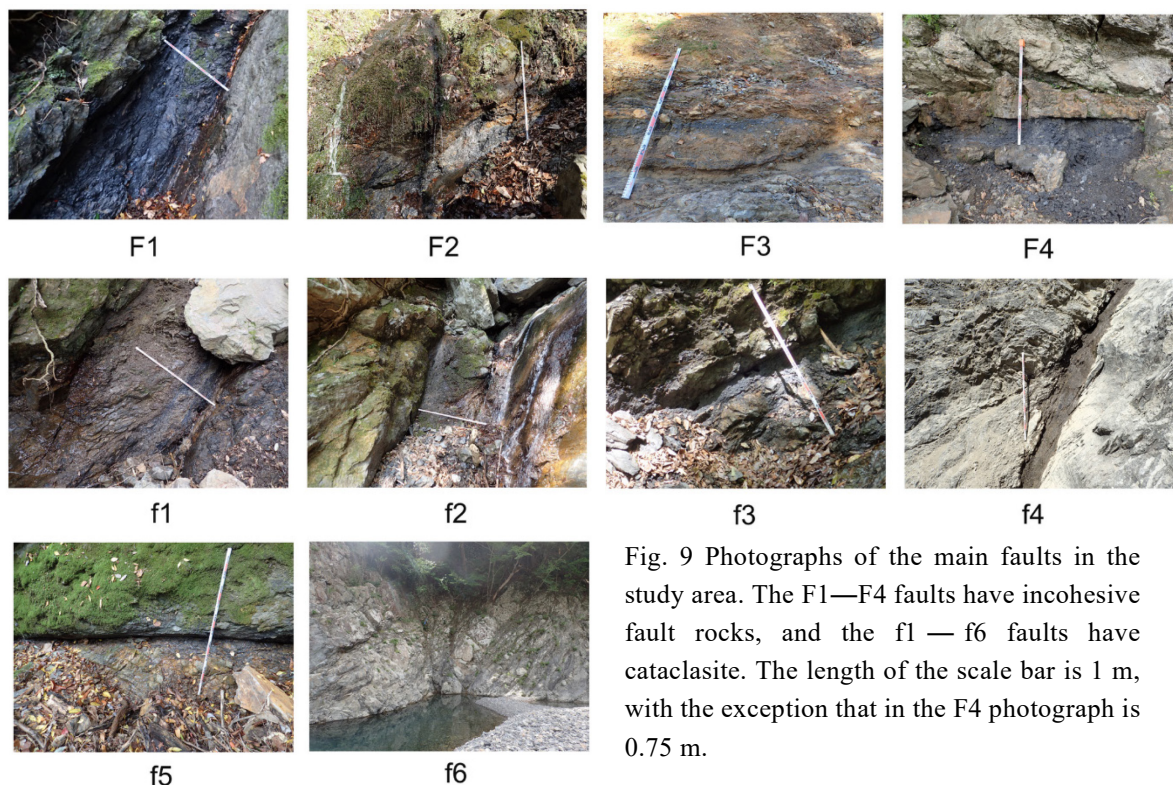


Fig. 9 Photographs of the main faults in the study area. The F1—F4 faults have incohesive fault rocks, and the f1 — f6 faults have cataclasite. The length of the scale bar is 1 m, with the exception that in the F4 photograph is 0.75 m.

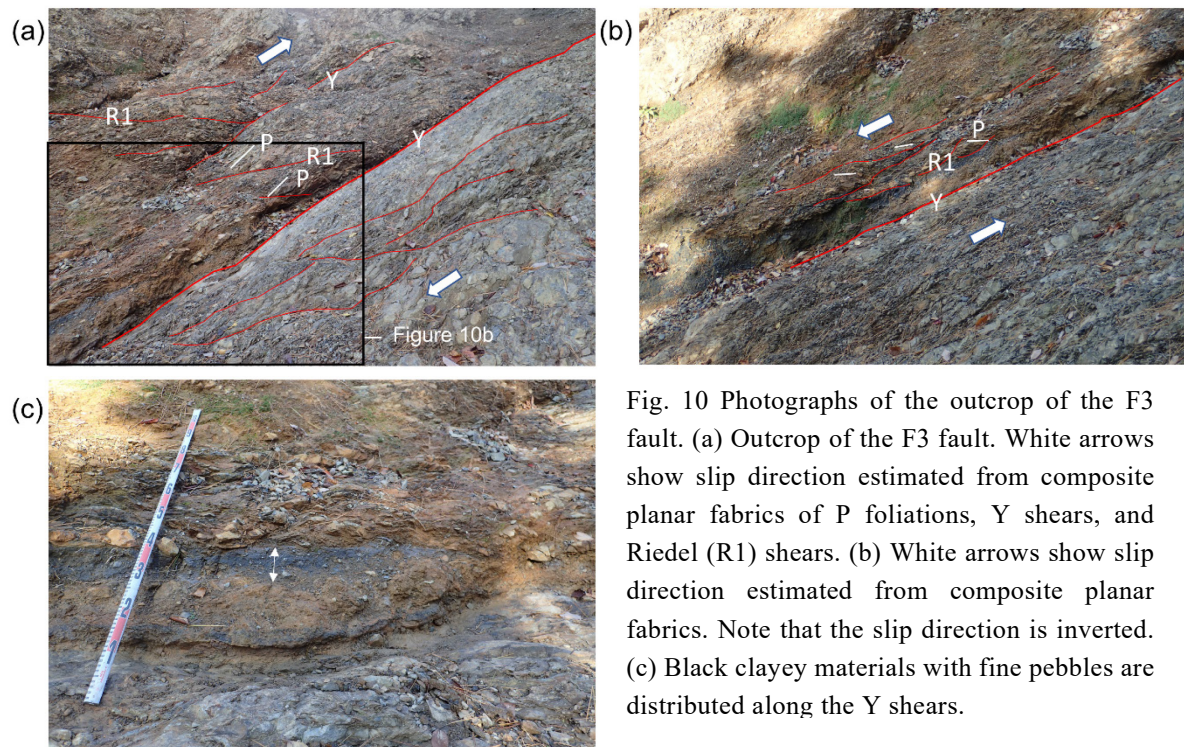


Fig. 10 Photographs of the outcrop of the F3 fault. (a) Outcrop of the F3 fault. White arrows show slip direction estimated from composite planar fabrics of P foliations, Y shears, and Riedel (R1) shears. (b) White arrows show slip direction estimated from composite planar fabrics. Note that the slip direction is inverted. (c) Black clayey materials with fine pebbles are distributed along the Y shears.

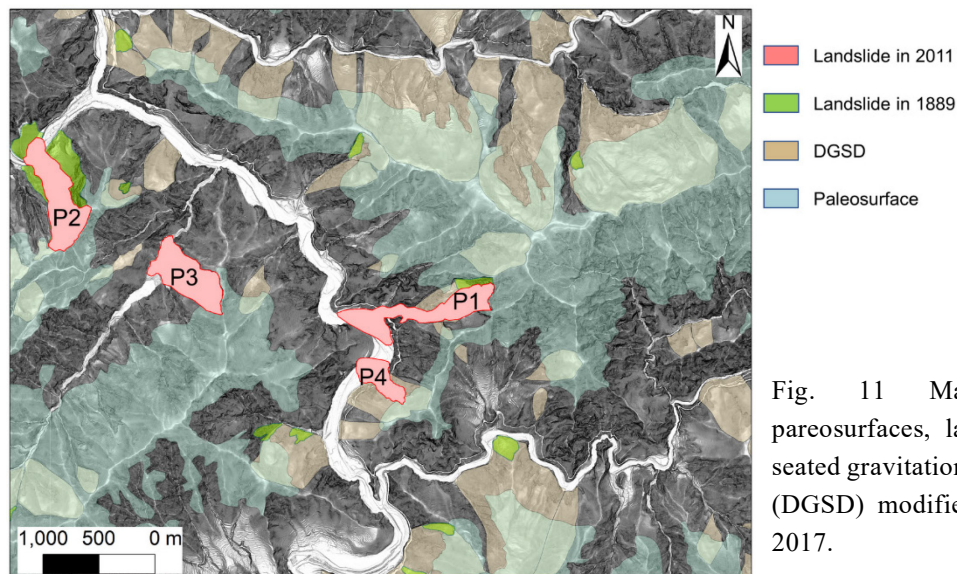


Fig. 11 Map showing the paleosurfaces, landslides, and deep-seated gravitational slope deformation (DGSD) modified from Tsou et al., 2017.

3.3 地形

(1) 古地形面と崩壊、重力変形斜面の分布

Fig.11に、Tsouら（2017）の古地形面を一部修正したものに、1889年と2011年の崩壊および重力変形斜面を重ねた分布図を示す。宇宮原の1889年と2011年の崩壊（P1）は、Tsouら（2017）に指摘されているように、古地形面の周辺部で最上位の遷急線L1を跨ぐように発生している。その他の崩壊について、P2は赤谷東、P3は長殿、P4は宇宮原南である。赤谷東は、河原樋衝上断層沿いに発生した深層崩壊で宇宮原と同様に1889年と2011年にほぼ同一箇所が発生してい

る（Arai and Chigira, 2018）。宇宮原南は、周辺の地質調査結果より、泥岩基質優勢な混在岩および破断層中の衝上断層集中帯（F4）において発生した崩壊である（荒井ら, 2020）。

(2) 周辺流域の河床縦断

Fig.12に宇宮原の崩壊が発生した濁谷と熊野川上流域の主な支流の河床縦断図を示す。濁谷の平均河床勾配は 27.5° と急傾斜である。2011年の災害で野尻の深層崩壊が発生した小原谷も濁谷と同様に河床勾配が大きい。濁谷や小原谷のように、本流に流入する1次谷で、かつ谷上部に古地形面に相当する緩

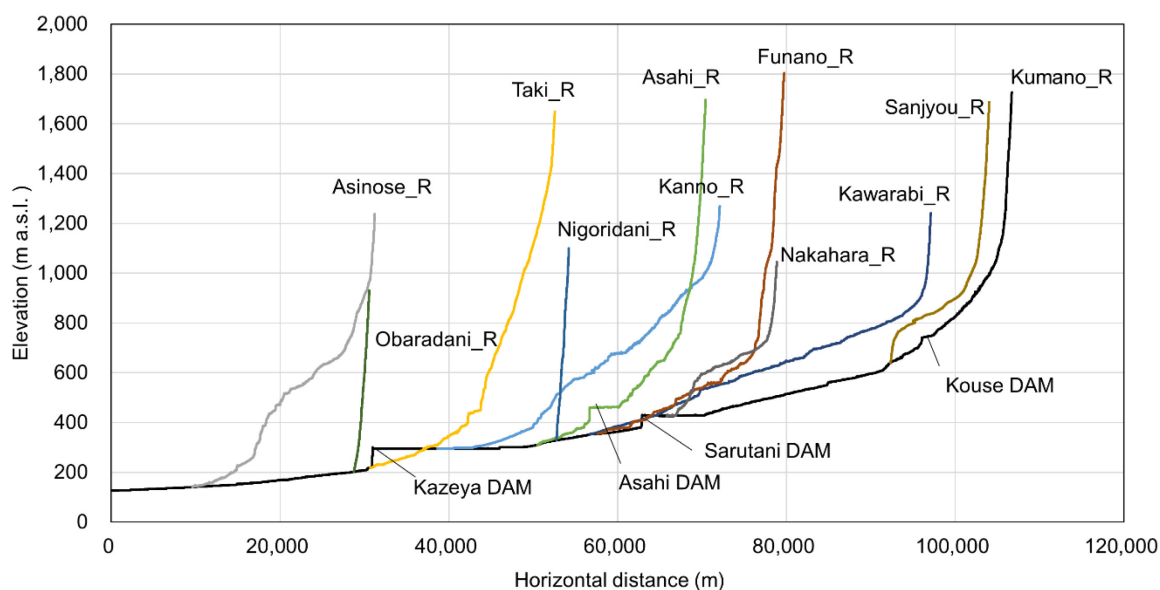


Fig. 12 Longitudinal profiles of the Kumano River and its tributaries above the Totsukawa hot spring.

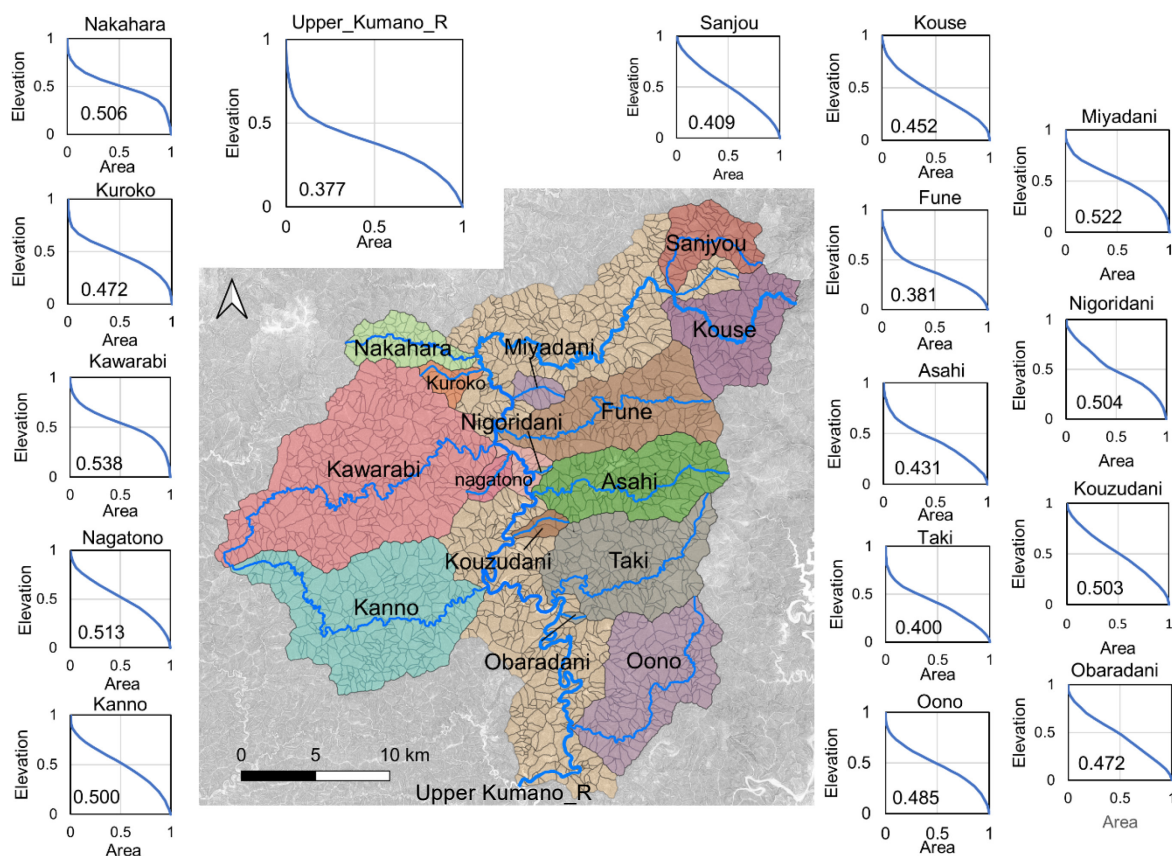


Fig. 13 Dimensionless hypsometric curves of the upper Kumano River basin and its tributary basins. A numerical value in these graphs shows the integral of the curves.

斜面が位置している場合、谷上部で深層崩壊や土石流が発生すると、比高の大きな斜面を短区間で土砂が流下することになり、下流域や対岸に被害をもたらす素因となっている。

(3) 周辺流域のヒプソメトリック曲線

Fig.13に熊野川上流域の正規化したヒプソメトリック曲線を示す。各グラフ内に示した数値は、ヒプソメトリック曲線を積分した値である。ヒプソメ

リック曲線の形状と、積分値から流域の侵食進行度を評価でき、この値が小さいほど平衡河川に近づいていると考えられる。熊野川上流域の積分値は0.377に対して濁谷の積分値は0.504と大きな値をとり、侵食進行段階にあるとみなされる。

3.4 崩壊背後斜面の亀裂

今後の拡大崩壊発生の可能性について調査するために現地踏査およびドローンによる撮影を行った。調査の結果、2011年の崩壊崖の背後に複数の開口割れ目、段差地形、線状凹地を確認した。これらの傾斜量図をFig.14に、露頭画像をFig.15に示す。Fig.16に示す崩壊崖のドローン画像より、岩盤中には複数のせん断面が発達し、開口亀裂が各所に認められ、岩盤全体が破碎状を呈している。以上のことからFig.14中に破線で囲った部分は、豪雨や地震動により今後崩壊する可能性が大きいと予想される。この場合の崩壊体積は約23万 m^3 である。

3.5 破碎帯の含有鉱物

Table 1に示した断層の内、非固結断層岩を伴う

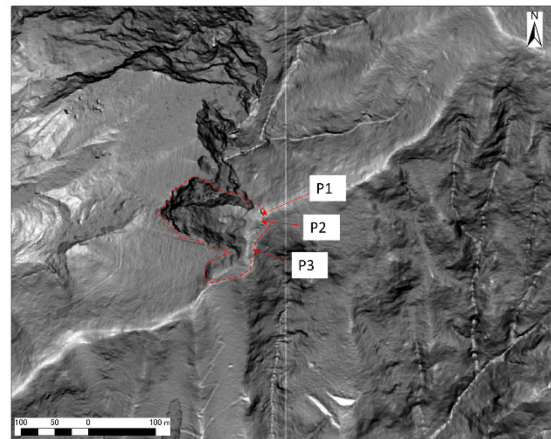


Fig. 14 Slope map above the head cliff of the Uguhara landslide. The red dashed line shows the potential failure risk area.

断層F1からF4を対象としてガウジのX線分析を行った。分析結果をTable 2に示す。分析試料の採取位置はFig. 7中に示してある。F3については、その分岐断層F3' の分析結果を含めた。



Fig. 15 Photographs of scarps formed above the Uguhara landslide. (P1) View to the north. (P2) View to the north. (P3) View to the south.

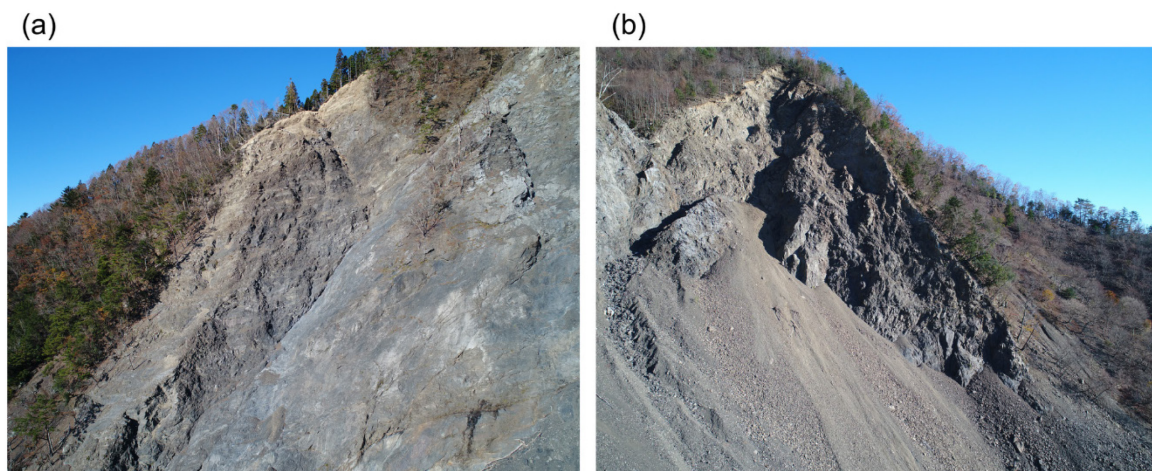


Fig. 16 Photographs of the head cliff taken by drone. (a) View to the north. (b) View to the southeast.

Table 2 List of minerals in gouge of F1—F4 faults detected by X-ray diffraction analysis in the study area.

	Smectite	Kaolinite	C/S mixed-layer	I/S mixed layer	Chrolite	Illite	Quartz	Plagioclase	Siderite
F1			+		+	++	++	+	+
F2	+	+	+			++	++	+	
F3					+	++	++	+	
F3'	+	+		+		+	++	+	
F4		++	++			++	++	+	+

分析の結果、これらのガウジ中には石英、イライト、斜長石が共通して含まれる他、F1中には、緑泥石とスメクタイトの1:1規則混合層鉱物（コレンサイト）、緑泥石、菱鉄鉱、F2中にはスメクタイト、カオリナイト、コレンサイト、F3中には緑泥石、F3'中にはスメクタイト、カオリナイト、イライトとスメクタイトの1:1規則混合層鉱物（レクトライト）、F4中にはカオリナイト、コレンサイト、菱鉄鉱が検出された。

以上のように、非固結断層岩を伴う断層中には、スメクタイト、緑泥石、カオリナイト、イライトおよびこれらの混合層粘土鉱物が含まれていた。これらの層状珪酸塩は、ピークせん断強度や残留せん断強度が小さいことが知られている（矢田部ら, 1991; 釜井ら, 1993; 宜保ら, 2003）。ガウジの粒度分布や、粘土鉱物の含有量に関するデータは取得していないが、これらの粘土鉱物が断層のせん断強度に影響を与えている可能性がある。

4. 議論

4.1 付加体における重力斜面変形、深層崩壊の発生パターン

重力斜面変形や深層崩壊は、最上位の遷急線とその上位の山頂緩斜面との境界にまたがって分布することが多いことが羽田野 (1968), 平石・千木良 (2011), Tsouら (2017), 荒井 (2022) により指摘されている。

著者らは熊野川上流域の地質構造、特に付加体中の断層と深層崩壊、重力変形斜面の分布を研究し、それらの発生に三つのパターンがあることを示した (Arai and Chigira, 2019)。その一つは、非固結の粘土質破砕帯を伴う衝上断層が斜面に対して流れ盤をなし、断層の傾斜角が斜面の傾斜角とほぼ平行かやや緩傾斜な場合に豪雨時に深層崩壊が発生するパターン（赤谷タイプ）、非固結の粘土質破砕帯を伴う衝上断層が斜面に対してやや急傾斜をなし、泥質岩が優勢な場合、谷向き小崖や線状凹地が斜面上部に形成され、重力斜面変形が進行するが深層崩壊の発生に至らないパターン（中原川タイプ）、非固結の粘土質破砕帯を伴う衝上断層が局所的な褶曲作用により変形し向斜構造をなす場合、向斜軸がブランチした方向に重力斜面変形や一部崩壊が発生するパターン（飛養曾タイプ）である。

宇宮原の崩壊の特徴は、熊野川のような本流に流入する、河床勾配が大きな1次谷の上部で発生した崩壊ということである。河床勾配が大きくなるのは、斜面上部に遷急線が分布する比高が大きな斜面を短区間で流下するからである。これを宇宮原タイプの崩壊と呼ぶことにする。

地質学的特徴としては、複数の断層の密集ゾーンに位置することで、これらの断層は北から北西傾斜で、非固結の粘土質破砕帯を伴うものとカタクレーサイトを伴う断層からなる。非固結断層の傾斜角は



Fig. 17 Photographs of the shear plane. (a) Shear plane. (b) Slickenlines observed on the shear plane. (c) Y—P structure observed along the shear plane.

36° から53° と低角であり、カタクレーサイトを伴う断層の傾斜角は57° から72° と高角である (Table 1) .

これらの断層に加えて、崩壊部の北側には Fig.17(a)に示すような南西に31° から43° 傾斜したシャープなせん断面が複数存在し、その面上には Fig.17(b)に示すような南南西方向の条線が認められた。これらのせん断面の端部を観察した結果、Fig.17(c)に示すようにY—P構造が認められ、上盤が北東方向へ衝上する複合面構造を持つ。したがって、これらの南西傾斜のシャープなせん断面は、北から北西傾斜で上盤が南方へ衝上する衝上断層のバックスラストとして形成された断層の可能性が大きい。

これらの断層系をステレオネットに投影 (下半球, 等角投影) したものがFig.18である。図中には、斜面の平均的な方位と傾斜角を持つ大円が黒い実線で、摩擦角25° の Φ 円が一点鎖線で描いてある。青い領域は、くさび破壊が発生する領域を示したもので、斜面の傾斜角を α 、地質分離面の交線の傾斜角を β 、すべり摩擦角を ϕ とおくと、 $\alpha > \beta > \phi$ を満たす領域である (多田, 1990 ; 1993) 。実際の岩盤は剛体とは異なり風化等の影響によりくさび破壊する領域が広がることを考慮すると、宇宮原の崩壊斜面では、複数の断層やせん断面の組み合わせにより西から南西傾斜の不安定なくさび体が形成され、豪雨による断層沿いの間隙水圧上昇が誘因となって崩壊が発生したと推測される。

崩壊箇所が標高700m以上の高所に位置し、熊野川の河床との比高が約370mと大きい。また、過去の崩壊堆積物が下流に堆積し、崩壊堆積物が流下する際の動的摩擦係数が初生的な崩壊に比べて小さいことが予想される。このような比高が大きく溪床勾配が大きく動的摩擦係数が小さい斜面で深層崩壊が発生した場合、崩壊堆積物は高速で斜面を流下し、その直進する方向にブラストを発生して周囲の樹木を倒壊したり、増水してダムアップした河川に突入すると段波が発生すると推測される。

濁谷のような1次谷は流域面積がFig.13に示すように狭小であり、流域に降った降雨のみで深層崩壊につながる間隙水圧上昇を引き起こしたのか疑問が残る。Fig.2中に青矢印で示した溪流では、常時流水が認められ、宇宮原崩壊地の東部に位置する山稜からの浸透水が供給されている可能性がある。粘土質破碎帯を伴うF1からF4の断層は、断層横断方向には地下水流を遮水し、断層と平行方向には周囲の岩盤よりも透水性が大きいことが予想される。カタクレーサイトを伴うf1からf6の断層も、周囲の岩盤にくらべて透水性を有し“水みち”となっていることが予想される。今後、崩壊地周辺部の水文観測や電気探

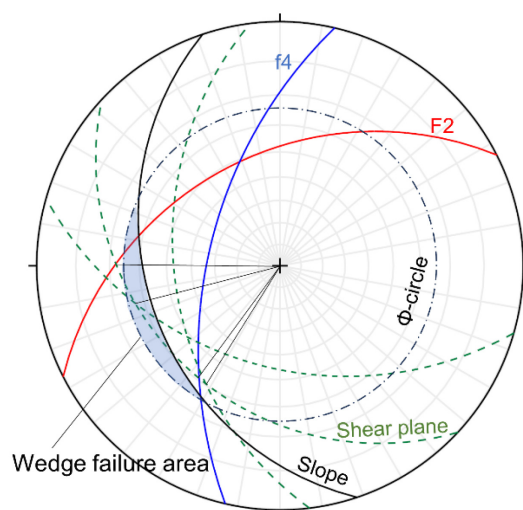


Fig.18 Stereographic projection showing the great circles of faults and shear planes. The solid black line is the great circle of the slope, the red line is the F2 fault, the blue line is the f4 fault, and the green dashed lines are shear planes. The dashed-dotted line is the friction angle (Φ) circle. The blue shaded area shows the potential wedge failure area. Lower-hemispheric equal-angle projections.

査等を行い、水利地質構造を明らかにすることが重要と考える。

前述したように、2011年の崩壊部の背後斜面には不安定斜面が存在し、豪雨や地震に伴い約23万 m^3 以上の崩壊が発生する可能性がある。幸い林野庁の事業で、令和5年4月時点で下流部に治山堰堤が構築されているため被害が軽減できると期待される。

5. 結論

2011年の台風12号による豪雨により紀伊山地熊野川上流域で発生した宇宮原深層崩壊の地質、地形学的要因を調査した結果、以下の結果が得られた。

- ・崩壊は、四万十帯北帯美山コンプレックの混在相、破断相からなる地質体において、北から北西傾斜の破碎帯を伴う複数の衝上断層、北か北西傾斜のカタクレーサイトを伴う断層、南西傾斜のせん断面 (おそらくバックスラスト) の組み合わせからなるくさび破壊として発生した。

- ・崩壊箇所は、熊野川右岸の小溪流上流に位置し、熊野川の河床との比高が約370mあり、平均河床勾配が27.5° と大きく、溪床上には過去の崩壊堆積物が残存するため崩壊堆積物が高速で流下する条件が備わっていた。

- ・2011年の崩壊部の斜面上部には、複数の小崖が

存在し、次の崩壊ブロック（崩壊体積約23万m³）を形成しつつある。

謝 辞

千木良雅弘博士、木村克己博士には現場で議論していただいた。国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所から崩壊発生前後の1mDEMを提供していただいた。林野庁近畿中国森林管理局十津川森林事務所から、ボーリング柱状図を提供していただいた。地形解析において国土地理院の基盤地図情報（10mDEM）を利用した。更谷元氏には、山林への立入りを許可していただいた。本論文中的ステレオネット図はRichard W. Allmendinger 博士のStereonet ver.10.1.6により作図しました。これらの方々に謝意を表します。

参考文献

- 荒井紀之・千木良雅弘・土井一生（2020）：重力変形斜面の降雨・地震時挙動の観測，京都大学防災研究所研究講演発表会予稿集，P06.
- 荒井紀之（2022）昭和28年有田川水害で発生した深層崩壊の地質地形学的素因について，京都大学防災研究所年報，Vol.65(B)，pp.114-125.
- 伊藤英恵・竹林洋史・梶原哲郎・藤田正治・富田裕裕（2014）：山地蛇行河川における崩土の河川突入による段波の伝播特性，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.70，No.4，pp.I_1033-I_1038.
- 井上公夫・土志田正二（2012）：紀伊半島の1889年と2011年の災害分布の比較，砂防学会誌，Vol.65，No.3，pp.42-46.
- 釜井俊孝・宮田雄一郎（1993）：地すべり粘性土の一面せん断試験における破壊の伝播過程，地すべり，Vol.29(4)，pp.9-17.
- 紀州四万十帯団体研究グループ（2012a）：平成23年台風第12号災害における紀伊半島の斜面災害と地形・地質（概要），地学団体研究会専報，Vol.59，pp.263-271.
- 紀州四万十帯団体研究グループ（2012b）：美山付加コンプレックスの再定義ーチュローニアン〜下部マーストリヒチアンの付加体ー，地学団体研究会専報，Vol.59，pp.35-41.
- 宜保清一・中村真也・佐々木慶三（2003）：地すべり土のリングせん断挙動に及ぼす鉱物組成の影響，日本地すべり学会誌，Vol.40(4)，pp.259-265.
- 木村克己・牧本博・吉岡敏和（1989）綾部地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）。
- 国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所（2004）：四国山地の土砂災害，国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所，68p.
- 笹原克夫・池田貴洋・岩井優弥・角田皓史・金澤瑛ら（2019）：平成30年7月豪雨によって四国地方で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.71，No.5，pp.43-53.
- 竹林洋史・藤田正治・宮田秀介（2011）：2011年9月紀伊半島豪雨災害調査速報，自然災害科学，Vol.30，No.3，pp.369-379.
- 多田元彦（1990）：岩盤斜面の崩壊危険度のステレオネットを用いた簡易判別法について，応用地質，Vol.31(1)，pp.19-28.
- 多田元彦（1993）：くさび型岩盤斜面崩壊の簡易安定解析法とその適用例，応用地質，Vol.34(1)，pp.25-33.
- 千木良雅弘（2000）：加奈木崩れ，地震砂防，古今書院，pp.38-41.
- 千葉徳爾（1975）：明治22年十津川災害における崩壊の特性について（Ⅱ），水理科学，Vol.19(4)，pp.2038.
- 土屋智（2000）：大谷崩れ，地震砂防，古今書院，pp.28-32.
- 羽田野誠一（1968）：地すべり性大規模崩壊と地形条件ー和歌山県有田川上流の事例ー，第5回災害科学シンポジウム，pp.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，Vol.32，No.4，pp.389-409.
- 平石成美・千木良雅弘・松四雄騎（2013）：紀伊山地北部天川地域に分布する遷急線，京都大学防災研究所年報，Vol.56B，pp.731-740.
- 平野昌繁・諏訪浩・石井孝行・藤田崇・奥田節夫（1987）：吉野郡水災誌小字地名にもとづく1889(明治22)年十津川災害崩壊地の比定（その1：西十津川），京都大学防災研究所年報，Vol.30(B1)，pp.391-408.
- 矢田部龍一・八木則男・榎明潔（1991）：破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性，土木学会論文集，436，pp.93-101.
- 宇智吉野郡（1981復刻）：明治二十二年吉野郡水災誌，巻1ー11，十津川村（奈良県）。
- 吉野郡水災誌研究会（2020）：現代語訳 吉野郡水災誌 十津川村編，永井書林。
- Arai, N. and Chigira, M. (2019): Distribution of gravitational slope deformation and deep-seated landslides controlled by thrust faults in the Shimanto accretionary complex, Engineering Geology, Vol.260, 105236.
- Arai, N. and Chigira, M. (2018): Rain - induced deep - seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan, Island Arc, e12245.
- Chigira, M. (2009): September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-

- seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan, *Engineering Geology*, Vol.108, pp.1-15.
- Chigira, M., Tsou, C-Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and Matsuzawa, M. (2013): Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, *Geomorphology*, Vol.201, pp.479-493.
- Jaboyedoff, M., Couture, R., and Locat, P. (2009): — Toward a progressive failure — , *Geomorphology*, Vol.103, No.1, pp.5-16.
- Kojima, S., Nagata, H., Yamashiroya, S., Iwamoto, N., and Ohtani, T. (2015): Large deep-seated landslides controlled by geologic structures: Prehistoric and modern examples in a Jurassic subduction–accretion complex on the Kii Peninsula, central Japan, *Engineering Geology*, Vol.186, pp.44-56.
- Raymond, L. A. (1984): Classification of melanges. *Geological Society of America Special Papers*, Vol. 198, pp.7–20.
- Tsou, C-Y., Chigira, M., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and Arai, N. (2017): Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan, *Landslides*, Vol.14, No.6, pp.1901-1914.
- Yamada, M., Matsushi, Y., Chigira, M. and Mori, J. (2012): Seismic recordings of landslides caused by Typhoon Talas (2011), Japan, *Geophysical Research Letters*, Vol.39, No.13.
- (論文受理日：2023年8月31日)