

## 付加体中の低角逆断層沿いに発生した豪雨に伴う深層崩壊について

### Rain-induced Rock Avalanches with Sliding Surfaces along a Low-angle Thrust-fault in Accretionary Complex

荒井紀之<sup>(1)</sup>・千木良雅弘

Noriyuki ARAI<sup>(1)</sup> and Masahiro CHIGIRA

(1) 京都大学大学院理学研究科

(1) Graduate School of Science, Kyoto University

#### Synopsis

2011 Typhoon Talas induced a large numbers of rain-induced rock avalanches in the Kii Peninsula, where is underlain by Jurassic-lower Miocene accretion complexes. We performed geological investigation in the Akatani area, where two huge rock avalanches with volumes of 2 million and 8 million m<sup>3</sup> occurred, and we found that these two rock avalanches had their sliding surfaces along a large-scale low-angle thrust fault extending more than 5 km. This fault had been exposed at riversides by long-term river incision and overlying dip slopes had started to deform and finally failed catastrophically, being triggered by the heavy rainstorm. This finding suggests that locating a large-scale low-angle thrust fault is essentially important to predict potential sites of rock avalanche as well as finding a gravitational slope deformation using high-resolution DEMs.

**キーワード:** 深層崩壊, 付加体, 低角逆断層, 降雨

**Keywords:** rock avalanche, accretionary prism, low-angle thrust- fault, rain

#### 1. はじめに

近年, 世界各地で地球温暖化に関係すると考えられる異常気象が発生している. 台風の巨大化により, これまでの観測記録を塗り替える豪雨が多発するようになった. それとともに, 2006年にフィリピンレイテ島で発生した山体崩壊(Evans et al., 2007; Guthrie et al., 2009), 台湾では2009年に台風モラコットの豪雨による小林村の斜面崩壊(Tou et al., 2011), 2011年に日本では台風12号による紀伊山地豪雨による多数の斜面崩壊(Chigira et al., 2013)など, 豪雨に伴う大規模な深層崩壊が多発している. 平野ら(1984) は, 1889年の十津川災害についてレビューを行い, 多くの崩壊が流れ盤で発生したことを指摘した. さらに, 村田・千木良(2000)は, 崩壊面の傾斜は層理面よりも緩

勾配であることを指摘している. 木村(1998, 2000)は, 日本の付加コンプレックス中のアウトオブシーケンズスラスト(OST)をレビューし斜面崩壊現象に対する重要性を指摘している. しかし, 深層崩壊とOSTとの具体的な関係は不明であった. そこで, 筆者らは2011年の紀伊山地豪雨災害において深層崩壊が多発した熊野川上流域において, 綿密な地質調査を行い, 深層崩壊の素因としての地質構造の検討を行った. その結果, 深層崩壊の根本的な素因は大規模な衝上断層にあるらしいことがわかってきた. 深層崩壊の発生危険箇所は, 事前に重力による変形を受けた斜面であることが明らかになってきている(Chigira, 2009; Chigira et al., 2013), さらに, 深層崩壊の発生が地質的に規制されていることが明らかになれば, 地質構造から深層崩壊発生場所を絞り込む

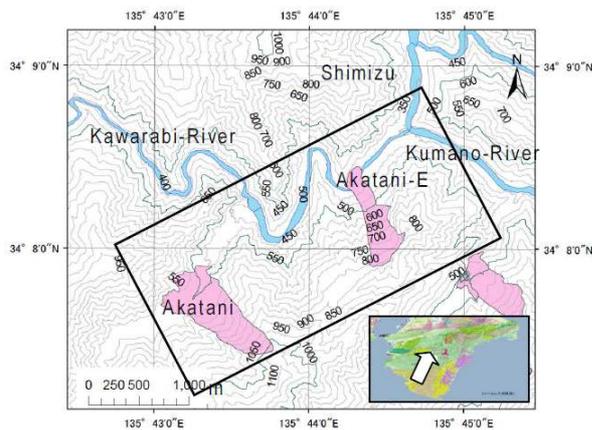


Fig.1 Locality map of the study area. The rectangle refers to the location of studied area.

ことが可能になる。その結果、住民の避難やライフラインの計画、維持管理を行う上で極めて重要な情報を提供することができる。

Fig.1に調査位置を示す。熊野川が南東方向に流下し、その支流の川原樋川が穿入蛇行しながら東へ流下し熊野川に合流している。調査地域内の尾根部の標高は800m~1000mで、川原樋川の河床部標高は約400mであり、400mから600mの比高が存在する。このエリアでは、2011年の豪雨災害において、赤谷と赤谷東の深層崩壊が発生した。Fig.2とFig.3にそれぞれの崩壊地画像、Table1に崩壊地の基礎データを示す。

## 2. 調査方法

調査対象域では、従来もある程度地質調査が行われ、地質図が作成されている範囲もあるが、それらは地質構造発達史を明らかにすることを目的としているため、河川沿いの調査を主体としており、河川間の山稜高標高部での断層トレースの信頼性はあまり高くない。そのため、これらの地質図から深層崩



Fig.2 Akatani-E landslide

Table 1 Akatani-E and Akatani landslides Chigira et al., (2013)

	Akatani-E	Akatani
Landslide area(m <sup>2</sup> )	221,400	423,700
Volume(m <sup>3</sup> )	2.1×10 <sup>6</sup>	8.2×10 <sup>6</sup>
Slope angle(°)	29	34
Slope height(m)	450	610
Average depth(m)	11	28
Landslide dam	breached	present
Geology	Broken formations and mixed rocks	Broken formations and mixed rocks

壊発生斜面の地質構造を読み取ることは困難である。また、従来の地質調査では、地層のずれに注目が集まり、斜面の安定性に密接に関係する断層破砕帯の規模や性状についての考慮に乏しい場合が多かった。

地質調査にあたっては、特に幅の広い破砕帯を持つ低角断層に注目して、その分布、規模、性状を主要河川および山地斜面内の溪流部や尾根部についても追跡・調査した。また、地層の広域的な伸びの方向に交差するルートを連続露頭でカバーし、断層の通過位置を可能な限り制限した。調査にあたっては、解像度1-mのDEMデータより作製した1:5000の地形図をベースマップとして使用し、連続露頭観察では1:1000スケールでスケッチを行った。

## 3. 調査結果

Fig.4に、調査の結果得られた赤谷と赤谷東深層崩壊地周辺の地質図を示す。調査地周辺には、緑色岩やチャート等の異地性岩体を含む泥岩ないし細粒砂岩基質からなる混在岩と、異地性岩体を含まず、砂岩ブロックのみを含む黒色泥岩基質からなる混在岩、砂岩・泥岩の破断層、整然層が分布している。これらの地層は、四万十帯北帯の美山層群に属している



Fig.3 Akatani landslide

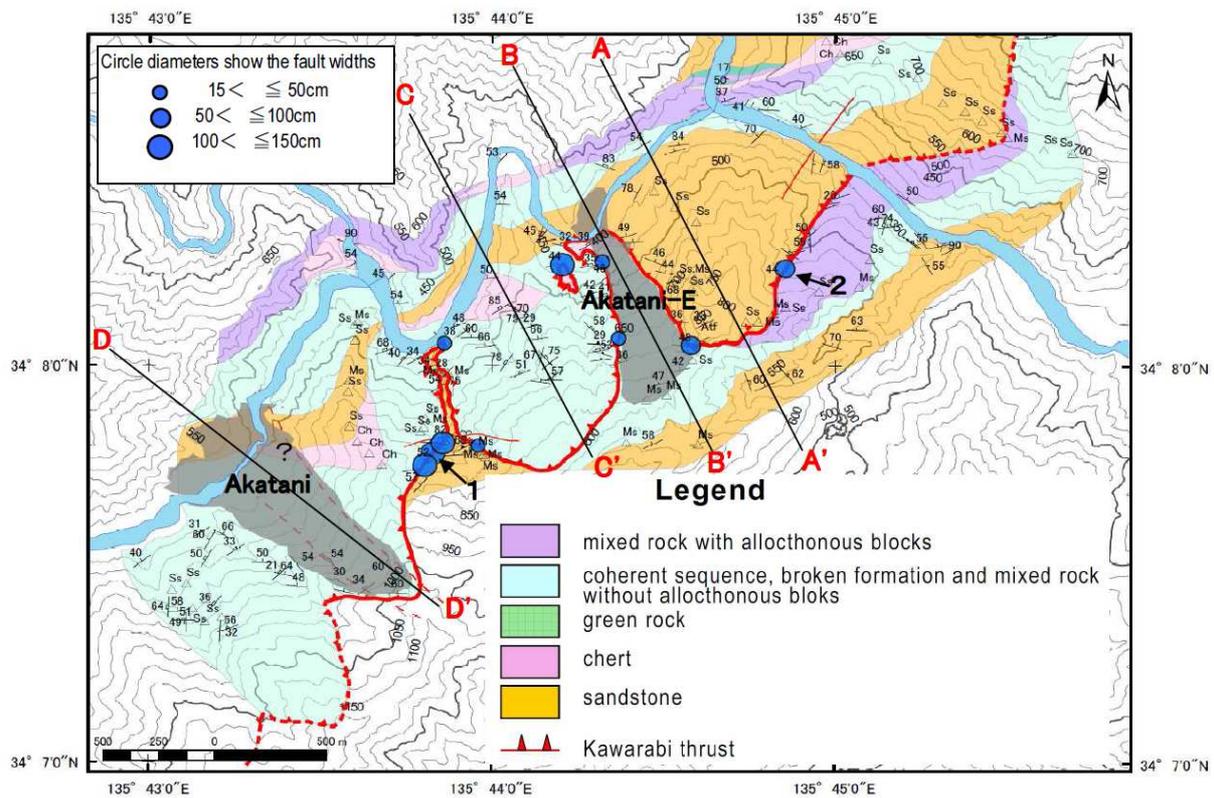


Fig.4 Geologic map of the study area. Arrows with number 1 and 2 show the position of Fig.6 and Fig.7.

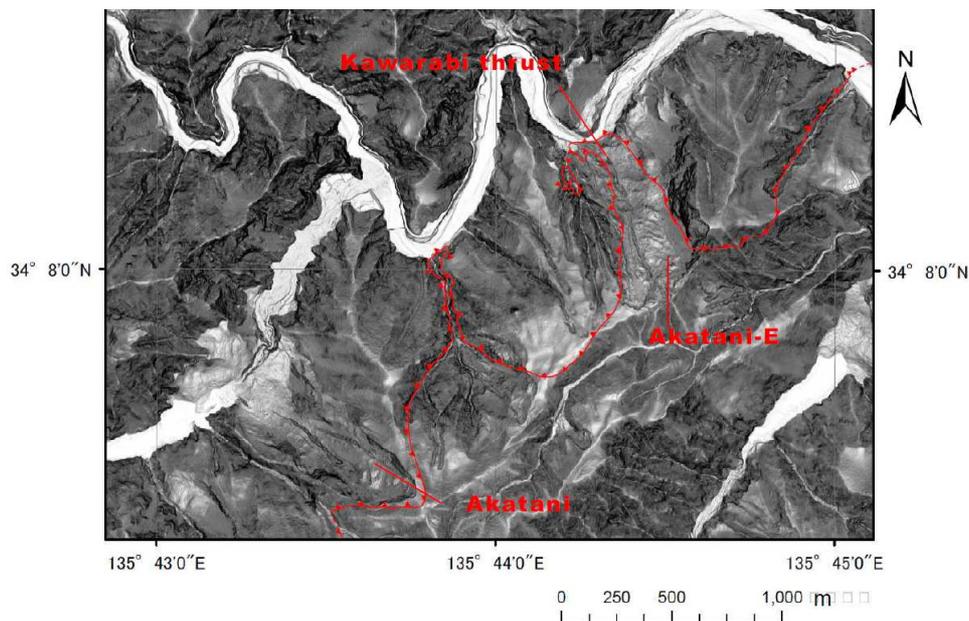


Fig.5 A slope map made from the 1-m DEMs obtained by airborne laser scanner surveys made in 7 and 23 September, 2011 after the 2011 Kii disaster by Nara Prefecture and the Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

(紀州四万十帯研グループ, 1986; Kumon et al., 1988). これらの地層は、整然としたものは少なく、小断層で途切れたり、レンズ状や膨縮した層状を呈する。

特に注目すべき結果として、調査領域内において、部分的に1m以上の脆性破砕帯を伴う低角断層が赤谷

東と赤谷の崩壊地背面を横断していることを発見した。この低角断層は、場所により走向・傾斜にばらつきがあるが、全体として北西から北北西に29° ~ 40° 傾斜し、水平方向に少なくとも5km以上にわたり連続している。この断層を川原樋衝上断層と名付けることにする。Fig.5中に、各露頭で確認した川原樋



Fig.6 Kawarabi thrust (Arrow 1 in Fig.4). Looking to the northwest. The scale bar is 70cm long.



Fig.7 Kawarabi thrust (Arrow 2 in Fig.4). Looking to the southwest. The scale bar is 100cm long.

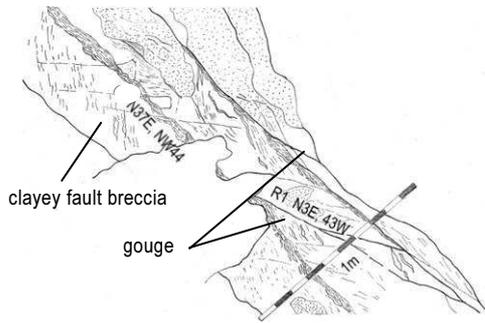
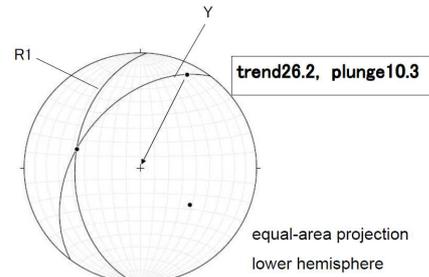


Fig.8 Sketch of Kawarabi thrust at Arrow 2 in Fig.4 and stereographic projection of the plane structures of the fault. The arrow indicates the slip vector.



衝上断層の幅を円の大きさで表示した。各露頭の断層幅は、ガウジと粘土質断層角礫の合計幅とし、各露頭での最小値と最大値の平均値をプロットした。Fig. 6とFig. 7に、Fig. 5中に矢印1と矢印2で示した位置の川原樋衝上断層の露頭写真を示す。川原樋衝上断層は、脆性破碎帯をともなった低角衝状断層であり、5km以上にわたり延長が確認できることから、付加体中の大規模なアウトオブシーケンススラストであると思われる(木村, 1998; 2000)。

Fig. 6の断層沿いには厚さ5cm以上の黒色ガウジが厚さ1.5mの断層破碎帯の両側に存在し、内部は粘土

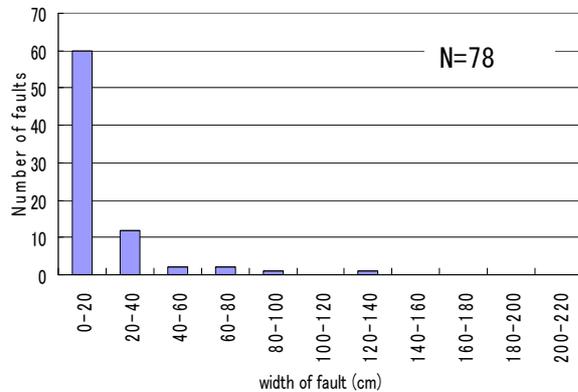


Fig.9 Histogram of the fault widths

質の角礫からなる。この低角断層沿いでは、断層上盤側から恒常的な湧水が認められ、酸化鉄の沈殿により茶褐色を呈している部分がある。Fig. 7の露頭では、幅70cmの破碎幅を有し、粘土質角礫帯中に、幅3~5cmの黒色ガウジが数条主剪断面に沿って分布している。Fig. 8に、Fig. 7の露頭スケッチを示す。主剪断面Yとリーデル剪断面R1より剪断方向を求めたところ、スリップベクトルの方位はN26E、プランジ10°で、上盤側がSSW方向に衝上する値が得られた(Kano et al., 1991; Onishi and Kimura, 1995)。この剪断センスは、Fig. 6の場所だけでなく他の場所においても、ばらつきはあるものの同一傾向の値が得られている。

川原樋衝上断層以外に、調査地域内にはNW-SEまたはNE-SW走向のより小規模な低角断層および高角断層が分布している。これらの断層幅のヒストグラムをFig. 9に示す。断層幅は、ガウジと断層角礫の合計幅であり、一箇所の断層露頭について最小幅と最大幅の平均値を示した。カウントした断層の総数は78である。ただし、川原樋衝上断層は含まれていない。このグラフのデータと比べると、深層崩壊の背面に分布する川原樋衝上断層は、最大幅1.5m、平均でも50cm以上の幅を持ち、この地域の付加体中に存在する断層の中で、特異な存在であることがわかる。

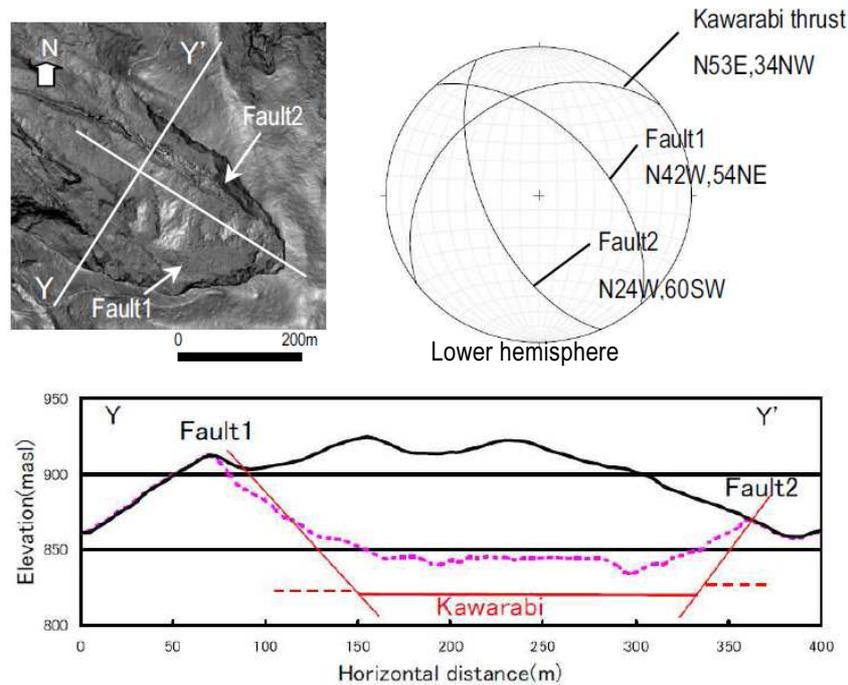


Fig.10 The relationship between the Akatani landslide and the Kawarabe thrust. Modified from Chigira et al., (2013).

この断層を追跡すると、その延長は赤谷東と赤谷の深層崩壊の主崩壊面にほぼ一致することが確認できた。Fig. 2とFig. 3中に川原樋衝上断層を矢印で示した。2011年の崩壊直後には、赤谷東の崩壊地には鏡肌の発達した湾曲した平滑面が露出した。これらの面は、地質調査の結果、川原樋衝上断層に一致することが確認できた。赤谷東の崩壊では、崩壊堆積物に大量の黒色粘土が含まれていることが認められているが、これらは、この川原樋衝上断層の破碎帯起源であると判断される。

赤谷では、深層崩壊直後は、斜面上に残存した崩壊堆積物のためにその存在は直接確認できなかったが、その後、崩壊地内の土砂が流出し、川原樋衝上断層に相当する主崩壊面が一部露出するようになった。赤谷の深層崩壊は、Chigira et al. (2013)により、NW-SE方向の高角断層とE-W方向で北傾斜の小断層にはさまれたくさび状の岩体がすべったと推定されたが、Fig. 10に示すように、崩土の下にすべった岩体の底面をなす大規模な低角逆断層があることがわかった。

付録資料として、連続露頭スケッチを載せた。スケッチの下部には、断層の走向傾斜、断層幅を示してある。熊野川沿いのAからD測線では、川原樋衝上断層のような大規模な低角断層は存在しない。川原樋川沿いのE測線では、断層幅80cmの断層が1箇所存在するが、NE-SW走向の高角断層である。また、連続露頭観察より、調査地域の岩相の変化を連続して観

察することができ、川原樋衝上断層の通過ルートを規制するとともに異地性岩塊を含む混在岩ユニットの区分に役立った。

#### 4. 考察

川原樋衝上断層の山地斜面内の分布は、深層崩壊の発生や、それに先立つ重力斜面変形について重要な示唆を与える。Fig.5は、1mのDEMデータより作製した傾斜図上に川原樋衝上断層のトレースをプロットしたものである。Fig.11は、Fig.4中に示したライン沿いの地質断面図である。B-B'断面は赤谷東崩壊地、D-D'断面が赤谷崩壊地に対応している。前述したように、両崩壊地の主崩壊面は川原樋衝上断層に一致している。さらに、深層崩壊の発生した断面では、川原樋川河床が川原樋衝上断層に達しているか、非常に近い距離にある。2011年に初めて崩壊を起こした赤谷では、崩壊前の断面と川原樋衝上断層との関係を見ると、斜面上部が凸型の斜面形状をなし、斜面下部には小崩壊地が存在し、非常に不安定な形状を呈することがわかる。Fig.10に示したように、赤谷では崩壊面の両サイドに高角のNW-SE方向の断層が存在し、さらに崩壊しやすい斜面条件を備えていたことになる。この凸型斜面は、尾根上部に分布する古地形面が2時期の侵食前線の波及により斜面下部が削られて形成されたものかもしれない(平石・千木良, 2011)。千木良らに指摘されているように(Chigira

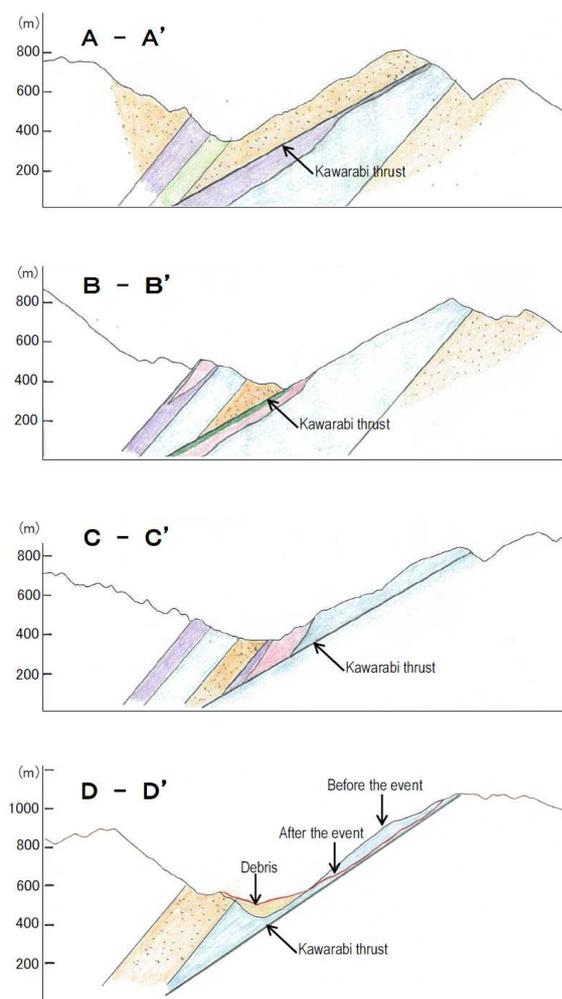


Fig.11 Geologic cross Sections. Legend is the same with that of Fig.4.

et al., 2013), 赤谷では崩壊発生前に斜面上部に重力変形による小崖が形成されていた。この小崖地形は、下刻作用によって斜面下部の河床が川原樋衝上断層に近づくにつれて、斜面が不安定化し重力変形が進行した結果生じたものと考えられる。

深層崩壊の発生していないA-A'断面やC-C'断面をみると、川原樋川の河床レベルは、川原樋衝上断層に達していない。A-A'断面では、川原樋衝上断層の上盤側に砂岩を主体とした岩盤が分布し、川原樋川の下部にも連続していると推定される。砂岩ブロックは、泥岩が主体の岩盤にくらべて剛性が大きく、コンピテント層として挙動していることが予想され、斜面安定にも寄与していると考えられる。以上の考察から、付加体中の深層崩壊を規定している主因の一つは、川原樋衝上断層にあると考えられる。この断層は、厚い粘土質の破砕帯を伴い、その傾斜角が $30^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ であることから、連続性のよい弱面を構成するとともに、水理地質学的に不透水層となり、豪雨時に地下水流を遮水し、高間隙水圧を発生させ

る原因になっている可能性が高い。したがって、付加体中で豪雨に伴って発生する大規模な深層崩壊の発生場所を予測するためには、LiDARデータによる重力変形斜面を抽出するとともに、主要河川沿いだけではなく山地斜面内の大規模低角逆断層と、これを切断するNW-SE方向の高角断層の分布とその性状を調査することが重要であると考えられる。

## 5. まとめ

2011年に深層崩壊の多発した熊野川上流の赤谷地域において、山地斜面内の詳細な地質調査を行い、赤谷東と赤谷の深層崩壊は、付加体中の大規模な低角逆断層(川原樋衝上断層)を主すべり面として発生したことがわかった。河川の下刻作用が進行し、斜面下部においてこの低角逆断層を切断する状況になると斜面が不安定化して重力変形が進行し、豪雨に伴う間隙水圧上昇がトリガーとなって深層崩壊に至る過程が示唆される。また、斜面中の砂岩やチャートブロック等のコンピテント層の分布や、低角逆断層を高角に切断する断層の存在も、斜面の安定性を評価する上で重要であることがわかった。

上記の知見は、紀伊山地のみならず、西南日本外帯の付加体に共通する可能性が高い。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、奈良県および国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所には、調査地の高解像度DEMデータを提供して頂くとともに、工事エリアへの立入りを許可していただいた。京都大学防災研究所の松四雄騎准教授には現地調査や研究所内で議論していただき有益なコメントを頂いた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 木村克己(1998)：付加体のout-of-sequence thrust, 地質学論集, Vol.50, pp.131-146.
- 木村克己(2000)：四万十帯の付加体地質-奈良県南部を例にして-, 十津川災害111周年記念集会-斜面災害発生場所の予測に向けて-, pp.5-11.
- 紀州四万十帯団研グループ(1986)：紀伊半島西部中津村周辺の日高川層群美山累層-紀伊半島四万十帯の研究(その11), 地球科学, Vol.40, pp.274-293.
- 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, 56B, pp.731-740.
- 平野昌繁・諏訪浩・石井孝行・藤田崇・後町幸雄 (1984) : 1889年8月豪雨による十津川災害の再検討-とくに大規模崩壊の地質構造規制について, 京都大学防災研究所年報, 27B-1, pp.369-386.
- 村田明広・千木良雅弘 (2000) : 紀伊四万十帯で発生した十津川災害における大規模崩壊の地質特性, 構造地質, Vol. 44, pp. 59-62.
- 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.
- 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.
- Evans, S. G. (2007): The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines: a catastrophic landslide in tropical mountain terrain, *Natural hazards and earth system sciences*, Vol.7, pp.89-101.
- Guthrie, R.H., Evans, S.G., Catane, S.G., Zarco, M.A. and Saturay Jr., R. (2009): The 17 February 2006 rock slide-debris avalanche at Guinsaugon Philippines: a synthesis, *Bulletin of engineering geology and the environment*, Vol.68, pp.201-213.
- Kano, K., Nakaji, M. and Takeuchi, S. (1991): Asymmetrical melange fabrics as possible indicators of the convergent direction of plates: a case study from the Shimanto Belt of the Akaishi Mountains, central Japan, *Tectonophysics*, Vol.185, pp.375-388.
- Kumon, F., Suzuki, H., Nakazawa, K., Tokuoka, T., Harata, T., Kimura, K., Nakaya, S., Ishigami, T. and Nakamura, K. (1988): Shimanto belt in the Kii peninsula, southwest Japan, *Modern geology*, Vol.12, pp.71-96.
- Onishi, C. T. and Kimura, G. (1995): Change in fabric of melange in the Shimanto Belt, Japan: Change in relative convergence?, *Tectonics*, Vol.14, No.5, pp.1273-1289.
- Tsou, C. Y., Z. Y. Feng, Z. Y. and Chigira, M. (2011): Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan, *Geomorphology*, Vol.127, pp.166-178.

(論文受理日 : 2015年6月11日)