

四万十付加体における重力斜面変形と深層崩壊に対する 衝上断層の役割 —紀伊山地熊野川上流域を例として—

荒井 紀之（京都大学防災研究所）

Noriyuki Arai

1. はじめに

近年，豪雨に伴い世界各地で大規模な崩壊が発生している．例えば，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 年の台風モラコットの豪雨による小林村の斜面崩壊（Tsou et al., 2011）等がある．

日本の西南日本外帯には，四万十帯や秩父帯といった付加体が広く分布している．これらの地域では，台風に伴う降雨や海溝型の巨大地震に伴い，大規模な崩壊が数 10 年から数 100 年間隔の頻度で発生している．発生頻度が表層崩壊にくらべて少なく，崩壊の深さが数 10 m～数 100 m^{注1}に及ぶために，斜面内部の情報を得るのも容易ではない．このため，その具体的な発生メカニズムが観測データに基づいて議論されることは少ない．また，発生場所を予測する手法として，発生実績，微地形，地形量から予測する方法が提案されており（土木研究所, 2008）一定の成果を挙げているが，さらなる進展が望まれる．

付加体地域の地質構造は，地下深部で変成したり，断層運動に伴って変形することがあるので，岩石が異方性を持ち剥離性のある不連続面が形成されていることがある．また，地域の地質不均質性が大きく，地質体同士の間には断層が存在していることも多い．また，衝上断層として幅のある破碎帯が頻繁に認められることもあり，それらは山地の地形形成や水理プロセスに影響を与えていると考えられるが研究例に乏しい．本研究では，降雨に伴い，紀伊山地中央部の四万十帯で発生する深層崩壊およびその発生に密接な関係を持つと考えられている重力斜面変形を対象として，地質学的・地形学的にその素因を分析した．

本論文での深層崩壊の定義は，「体積が概ね 10^5 m^3 以上で，斜面表層の風化物や崩積土だけでなく，その下の岩盤をも含む移動速度の大きい脆性破壊的な斜面変動で，地質構造に素因を持つもの」とする．日本国内においては，おもに西南日本外帯において降雨による深層崩壊が発生している．例えば 1889 年十津川災害（宇智吉野郡役所, 1891; 平野ほか, 1984, 1987），2005 年台風 14 号による九州耳川災害（Chigira, 2009），2011 年台風 12 号（Talas）による紀伊山地災害に伴うもの（Chigira et al., 2013）等である．以上は降雨が誘因となって発生した深層崩壊の事例であるが，崩壊地周辺の地質構造や

地下水の状況を論じた研究事例は少ない．本論文では，重力変形斜面を「谷向き小崖，山向き小崖，線状凹地，多重山稜，バルジング等の微地形で特徴づけられ，明瞭で連続的な境界で囲まれておらず，移動速度が遅いもの（計測器を用いなければほとんど検出されない程度）」とする．

なお，本論文は著者の京都大学大学院理学研究科の博士後期課程学位論文（荒井, 2018）の一部をまとめたものである．

2. 付加体の基本構造と斜面

付加体の基本的な構造は，陸側に傾斜したスラストシートの覆瓦構造からなり，内陸側の構造的上位のスラストシートほど形成時期が古い．付加体中には，付加・埋没・上昇過程で形成された様々な規模の衝上断層が含まれ，付加体形成後のテクトニクスにより形成されたより新規の断層，褶曲構造も一部に認められる．混在岩中の砂岩岩塊やチャート岩塊が非常に硬質なのに対して，鱗片状劈開が発達した基質部は劈開に沿って剥離しやすく，強度異方性が大きい．このように付加体には強度と変形性のコントラストが大きい物質が不規則に分布している．日本の付加体研究は，1980年代以降，放散虫による年代決定手法の普及に伴い急速に進展した．世界の付加体の中で，四万十帯や丹波・美濃帯のように地質構造が詳細に研究されている例はあまり存在しない．しかし，重力斜面変形や深層崩壊の発生場として付加体をとらえた場合，従来の地質学で扱ってきた対象のスケールが問題になるとともに，従来の地質学ではあまり対象とされていない，断層の性状・物性，山地内の地下水流に関する情報が必要になってきた．特に山地斜面内の地層境界や断層トレースの精度は，斜面変動現象を扱う場合にはあまり高いとは言えない．この原因の一つは，不十分な露出である．2011年の豪雨による出水は，熊野川等の主要河川沿いに極めて良好な連続露頭を出現させ，詳細に地質構造を解析する貴重な機会をもたらした．

3. 調査地域

本研究の調査地域として，深層崩壊が多発してきた西南日本外帯の四万十帯に位置する紀伊山地を対象とした．中でも，1889年十津川台風と2011年台風12号（Typhoon Talas）によって深層崩壊が多発した熊野川上流域を選定した（図-1）．調査地に分布する地層は，四万十帯北帯の美山層（紀州四万十帯団体研究グループ，1986; Kumon et al., 1988），花園層（栗本ほか，2015; 栗本，1982）に属している．熊野川上流域の隣接する3地域（赤谷，中原・黒河，飛養曽），さらに，それらを包含する広域（熊野川沿いの中原～河津）について調査を行った．

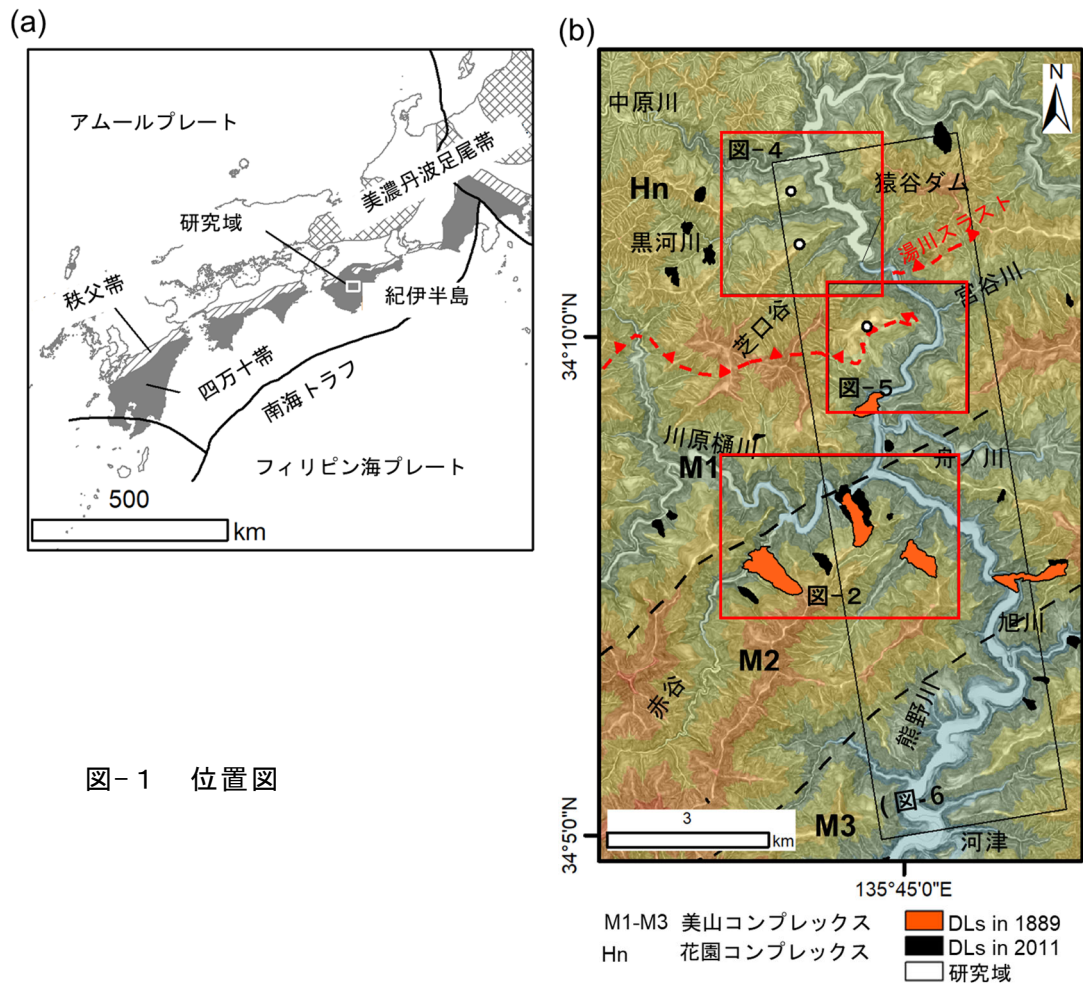


図-1 位置図

赤谷地域は、美山層の M1, M2 ユニットが分布する．岩相は、緑色岩・チャート等の異地性岩塊と砂岩岩塊を含む混在岩，異地性岩塊を含まず砂岩岩塊のみを含む破断層，整然層からなる．2011 年の紀伊山地豪雨災害時に、赤谷と赤谷東の深層崩壊が発生した (Chigira et al., 2013)．赤谷東では 1889 年の明治十津川災害においてもほぼ同じ場所で深層崩壊が発生している (宇智吉野郡役所, 1891; 平野ほか, 1984, 1987)．主な河川として熊野川支流の川原樋川と赤谷川がある．川原樋川と赤谷川の右岸側に重力変形斜面や深層崩壊が集中して発生しているのに対して、左岸側斜面ではあまり認められない．紀伊山系砂防事務所により、赤谷崩壊地周辺では、2011 年の崩壊後に多数のボーリング調査が実施された．

中原・黒河地域には花園層の Hn5 ユニットが分布する．岩相は、泥岩・頁岩優勢層中に砂岩，酸性凝灰岩を含む破断層からなる．大局的な地質構造は、中原川の右岸側から黒河川右岸にかけては $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 北北西方向に傾斜した同斜構造をなす．中原川と黒河川の下流右岸側には、重力斜面変形が発達し、古い深層崩壊地も一部に認められる．主な河川系として、熊野川 (天の川)、中原川、黒河川がある．

飛養曾地域は花園層の Hn5 ユニットと美山層の M1 ユニットからなり、両者は湯川ス

ラストで接している（栗本ほか, 2015）．当地域内の花園層は、層状チャート・緑色岩・石灰岩等の異地性岩塊や砂岩岩塊を含む混在岩と泥岩基質中に砂岩岩塊や酸性凝灰岩を含む破断層からなる．当地域内の美山層は泥岩基質中に砂岩岩塊を含む破断層からなる．熊野川の右岸側には南東傾斜の面積約 1.4 km² の広大な重力変形斜面が認められ、斜面上部に線状凹地や小崖が発達している．周囲に比べて水系密度が小さく、中央部が削られて馬蹄形の斜面形状を呈する．

熊野川沿い（中原～河津）地域は、付加体中の幅の広い破砕帯を伴う断層分布を実証的に調べるために、熊野川沿いに約 12.9 km 区間を対象として設定した．地質は、北部が花園層の Hn5 ユニットであり、中部と南部が美山層の M1, M2, M3 ユニットが分布している．当研究域内の M3 ユニットは、異地性岩塊を含まず砂岩岩塊のみを含む破断層、整然層からなる．

4. 調査方法

地質調査においては、地質分布とともに、非固結の脆性破砕帯を伴う衝上断層を山地斜面に追跡し、地形調査においては、2011 年の崩壊発生前後に紀伊山系砂防事務所と奈良県により実施された航空レーザー計測から得られた 1 m メッシュの数値地形モデル（Digital Terrain Model, DTM）を使用した．これらを利用して地理情報システムによる解析を行い、重力変形斜面の抽出や、小崖、線状凹地等の微地形、崩壊箇所の詳細地形分析を行った．断層ガウジの鉱物組成や工学的な性質を明らかにするために、断層露頭から不攪乱試料を採取し、X 線分析、一面剪断試験、室内透水試験および粒度試験を行った．

5. 結果

5.1 赤谷地域まとめ

調査の結果得られた地質図と地質断面図を図-2 に示す．

2 箇所の大規模な深層崩壊（体積 8.2×10⁶ m³ の赤谷と体積 2.1×10⁶ m³ の赤谷東（Chigira et al., 2013））は、周辺の沢と山稜を綿密に地質マッピングした結果、同一の衝上断層を主すべり面としていることが明らかになった．この断層は従来報告されていないもので、本論中では川原樋衝上断層と呼ぶことにする．横山ほか. (2013)は、赤谷の崩壊のすべり面は M2 ユニット内部のサブユニット境界をなす断層であると報告したが、そのトレースは示していない．

川原樋衝上断層は最大幅 6 m の破砕帯を持つ衝上断層で、横方向にも 8 km 以上追跡される．その傾斜角と方位は、29° ～52° で北西から北北西である．この破砕帯は、非破

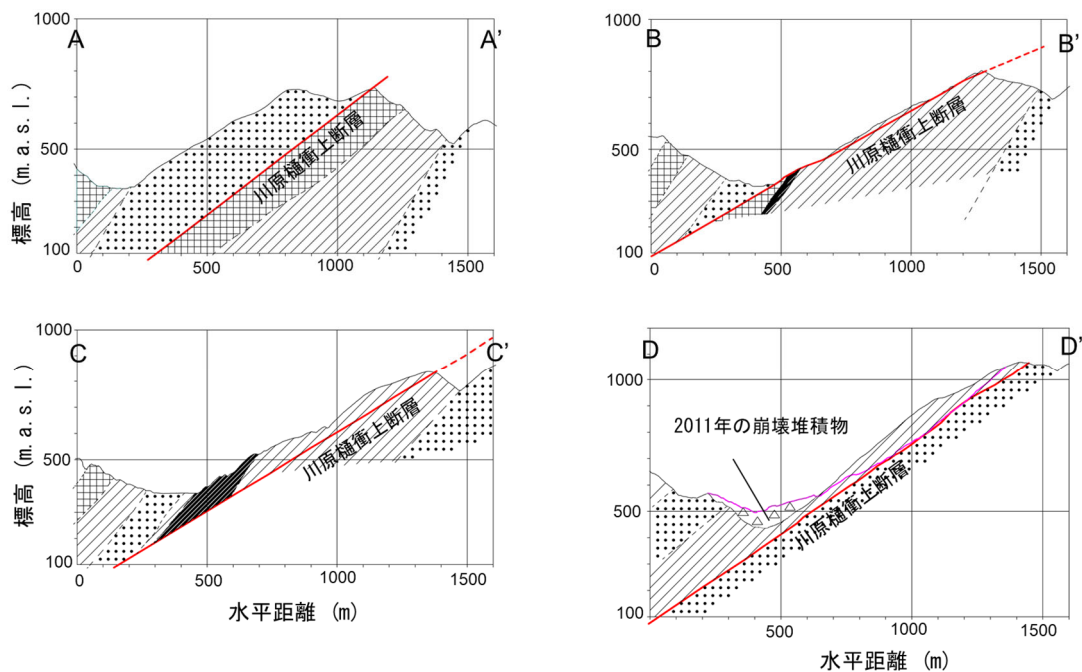
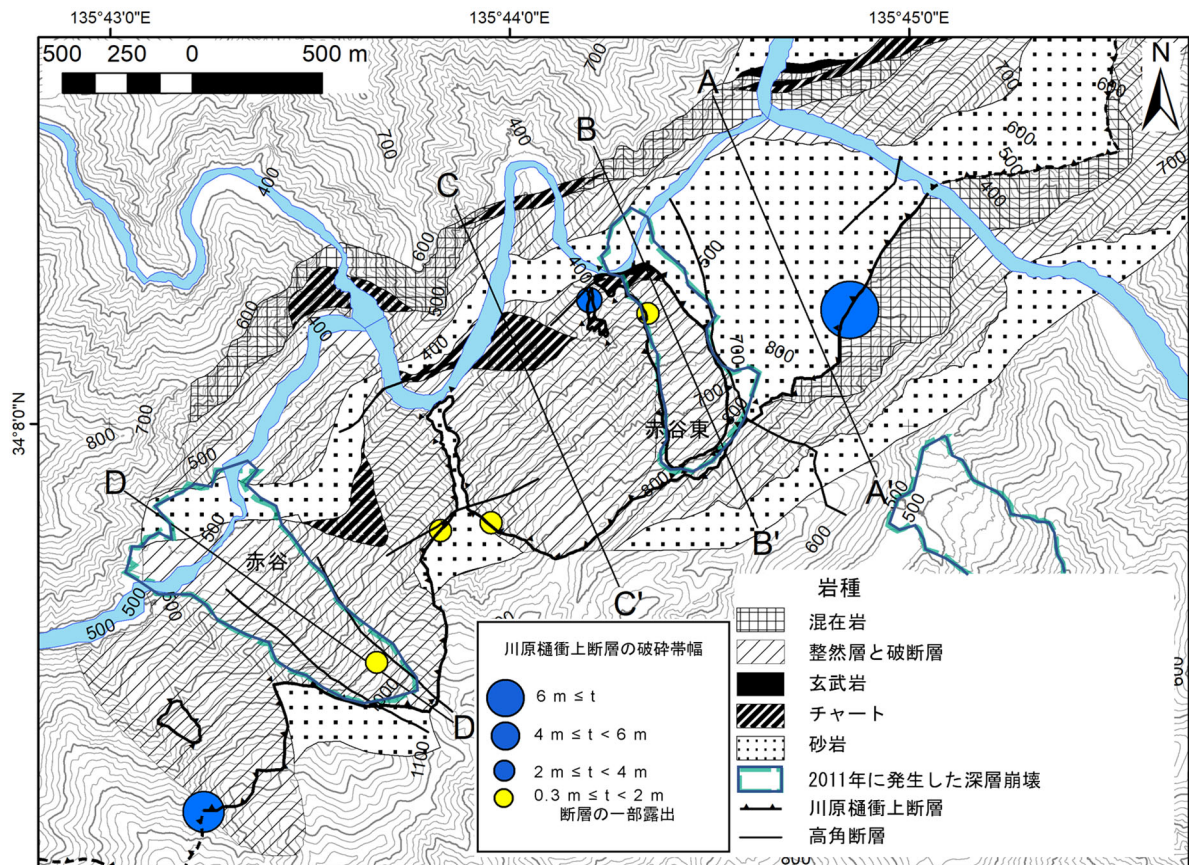


図-2 赤谷エリアの地質図と地質断面図

Arai and Chigira(2019)より引用，一部改変．

砕のレンズ状ブロックと，ブロック間を埋める膨縮に富む黑色ガウジまたは粘土質の

断層角礫からなり，しばしば Y, P, R1 の複合面構造 (Logan et al., 1979; Rutter et al., 1986) が認められる．図-3 に，赤谷東崩壊地の東方に露出する断層露頭の画像を示す．

赤谷の崩壊は，底面が川原樋衝上断層で，両側部は斜面傾斜方向を走向方向とする高角断層で限られていた．赤谷東の 1889 年の崩壊は，底面は同じ衝上断層，片側が高角断層で限られたくさび型であった．衝上断層とともに，このような高角断層の存在が崩壊に先立つ重力変形と崩壊を生じやすくさせたものと推定される．

2 つの崩壊地では，発生に先立って重力斜面変形が生じていたことが地形的に明らかになっており，これは，河川侵食によって川原樋衝上断層が河川沿いにほぼ露出した状態またはある一定の浅い深度に達したため，川原樋衝上断層の上盤が重力によって変形したものと推定される．

5.2 中原・黒河地域まとめ

ダム湖岸や河川沿いを綿密に調査した結果，最大幅 2 m の非固結脆性破碎帯を伴う低角断層が 2 条存在し，これらのトレースは中原川や黒河川の右岸側尾根線とほぼ平行に伸び，断層は右岸側斜面の背面を通ることを発見した (図-4)．黒河川右岸下流に

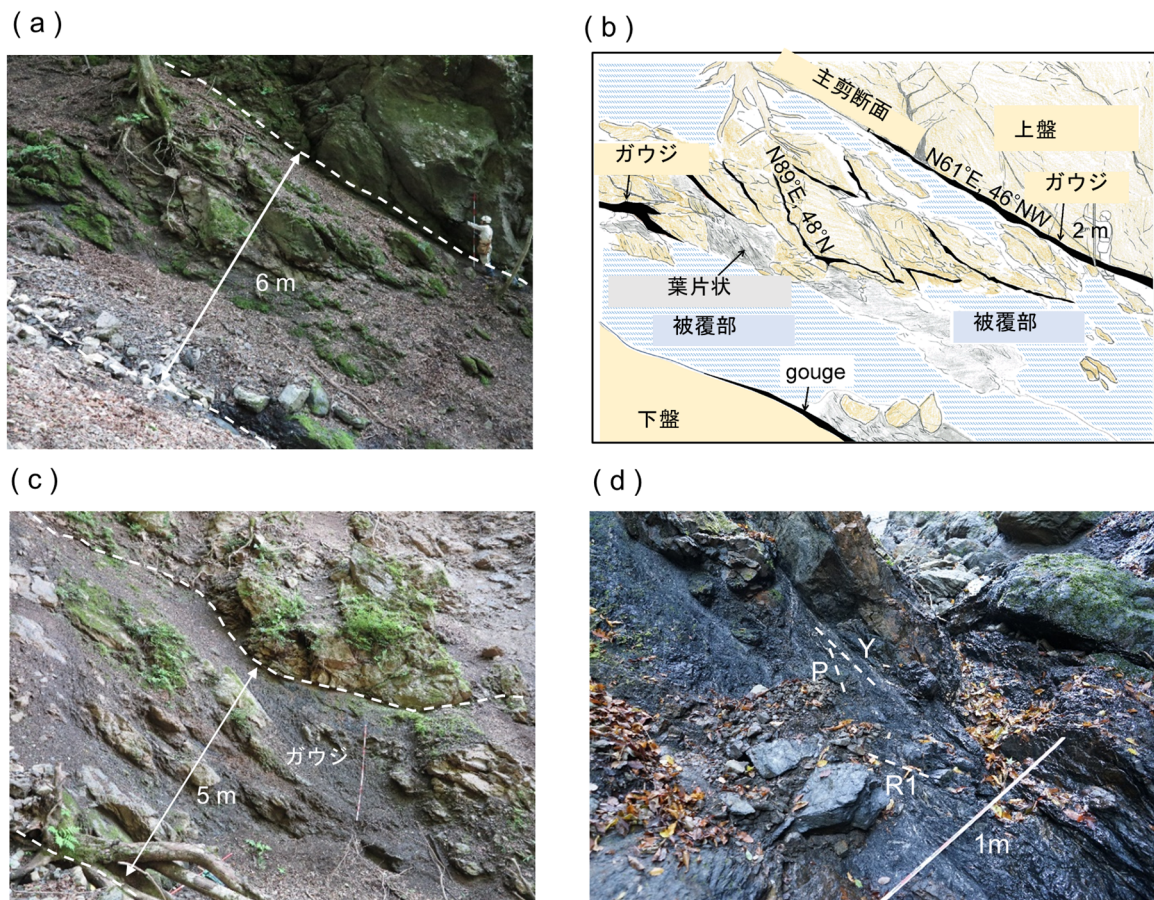


図-3 川原樋衝上断層の断層露頭

Arai and Chigira(2018)より引用，一部改変．

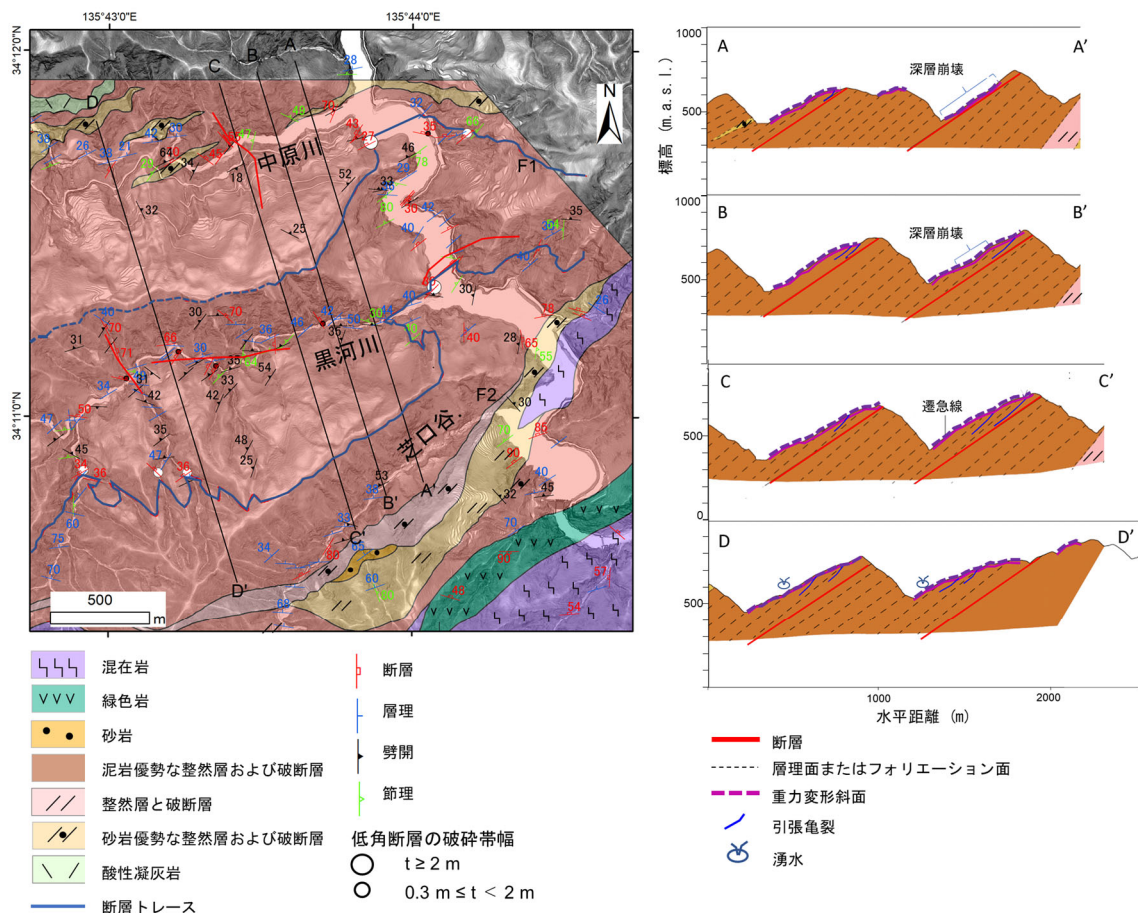


図-4 中原・黒河エリアの地質図と地質断面図

Arai and Chigira(2019)より引用，一部改変．

は，古い深層崩壊跡が認められる．ここでは，近傍の断層調査から斜面とほぼ平行に深度 10 m～20 m 付近に低角断層が存在すると推定され，この深層崩壊はこの低角断層に規制されて発生した可能性が高い．

5.3 飛養曽地域まとめ

図-5 に，当地域の地質図と地質断面図を示す．

飛養曽の重力変形斜面は，斜面上部に線状凹地が複数存在し，東西に延びる尾根沿いには，弓状の小崖が複数形成され，また南南東に伸びる尾根沿いにも複数列の小崖が分布し，全体として北西の山頂を頂点とした馬蹄形状を呈する．また，斜面中央には南東に伸びる緩斜面が存在し，その北側は比較的新し崩壊地形を呈する．飛養曽の南東傾斜の重力変形斜面は，北西-南東方向で南東方向にプランジした向斜軸を持つ褶曲軸により，衝上断層や破断層が変形して，全体として南東傾斜の流れ盤構造を形成し，これらに沿って重力変形が生じているものと推定される．

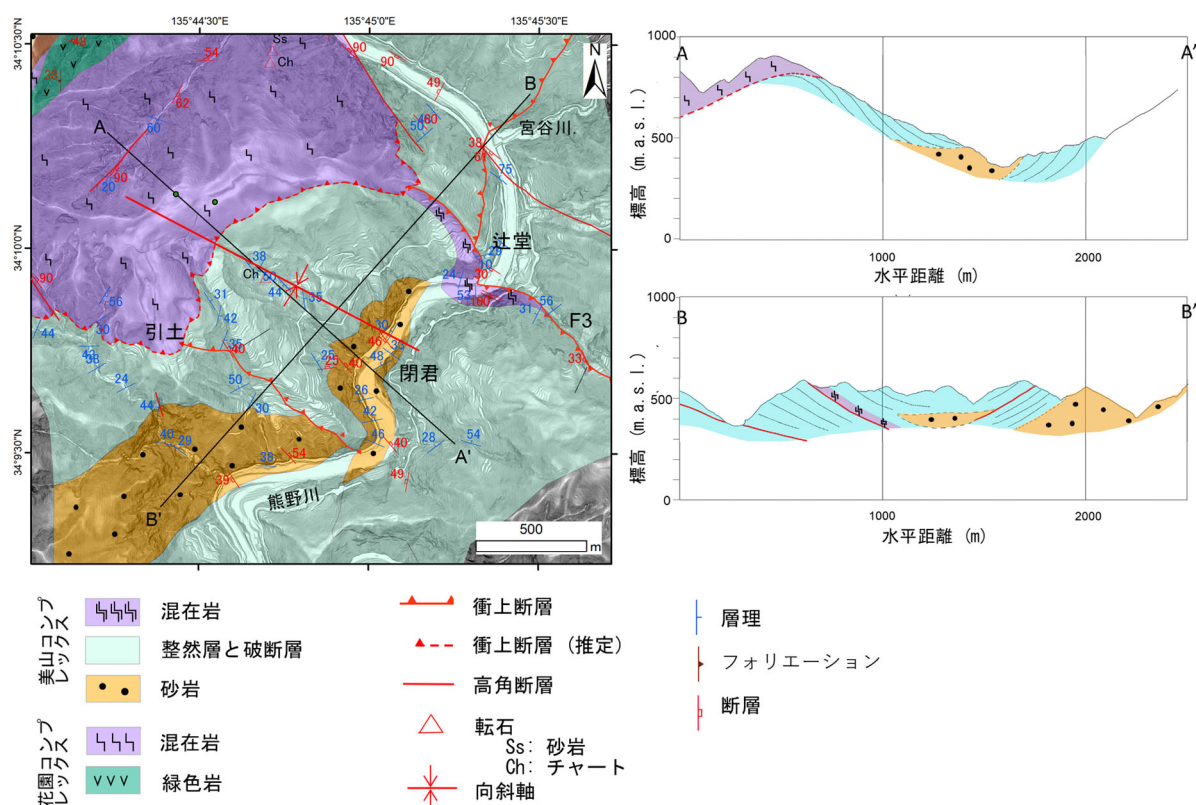


図-5 飛養曾地域の地質図と地質断面図
Arai and Chigira(2019)より引用，一部改変．

5.4 熊野川沿いの中原～河津地域まとめ

最大幅 0.8 m 以上の非固結脆性破砕帯を伴う衝上断層は，川原樋衝上断層を含め 8 枚 (F1～F8) 存在し，その間隔は 0.8 km～2.9 km (平均 1.8 km) であることを見出した (図-6)．研究対象エリアを含む約 120 km² の重力変形斜面の分布を 1 m DEM により調べた結果，重力変形斜面には幾つかの集中帯が認められた．例えば，中原川と黒河川の下流右岸斜面，舟の川の左岸斜面，川原樋川下流と赤谷川の右岸斜面，熊野川沿いの谷瀬から河津にかけての東北東-西南西方向のゾーンである．これらの傾斜方位をみると，北から北西向きのものが全体の約 40%を占め，飛養曾地域のように一部に南東傾斜のものも認められた．重力変形斜面や深層崩壊の分布と，主要な非固結脆性破砕帯を伴う衝上断層との関係について着目すると，深層崩壊や重力斜面変形の多くは，衝上断層の上盤に位置していた．

5.5 断層ガウジの鉱物組成，力学的，水理学的性質

研究域内の主要な非固結脆性破砕帯を伴う衝上断層 (F1～F8) のガウジを対象として X 線分析を行った．川原樋衝上断層 (F4) では，母岩中には，石英，斜長石，イラ

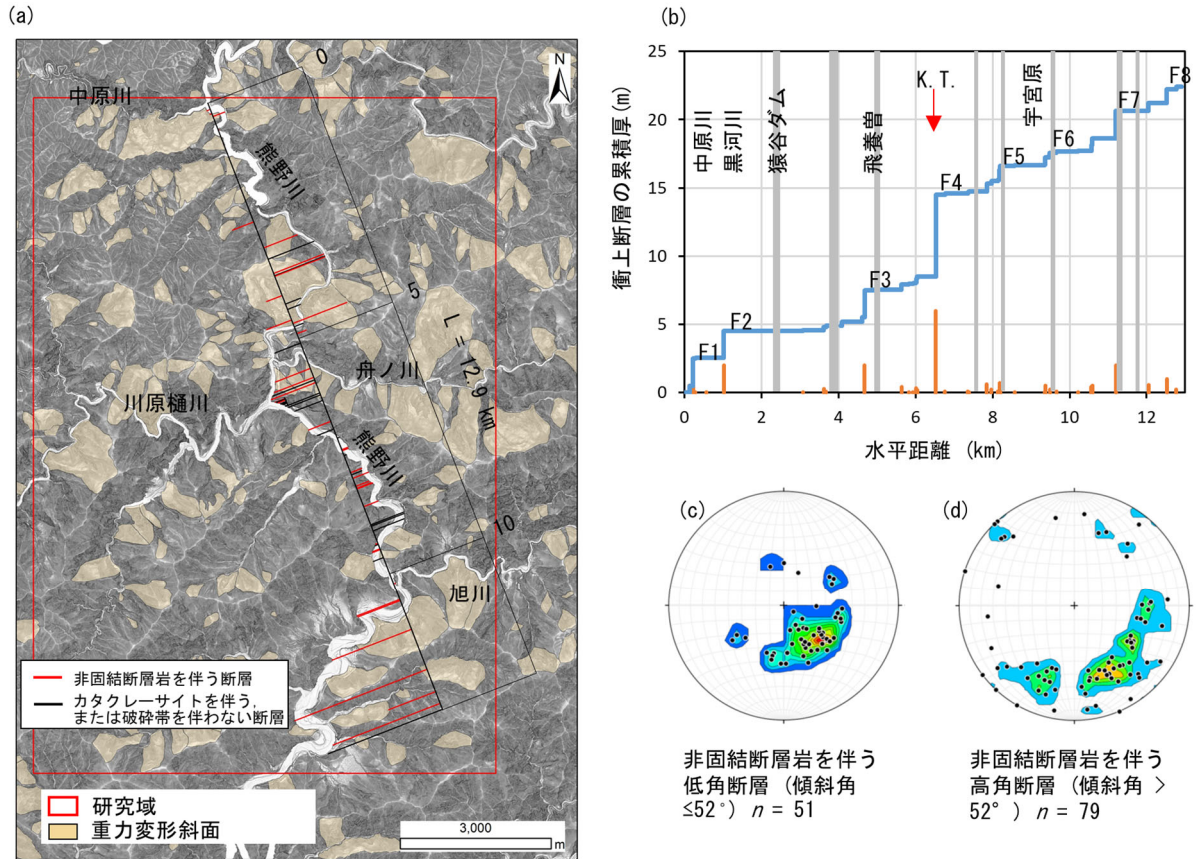


図-6 熊野川上流域の主要な非固結脆性破砕帯を伴う衝上断層の分布と重力斜面変形、崩壊地の分布図 Arai and Chigira(2019)を一部改変。(b)中の K.T. は川原樋衝上断層 (c) と (d) は、下半球、等面積投影

イト、緑泥石が含まれ、断層ガウジ中には、これらの他にスメクタイトと少量のカオリナイトが生じていることがわかった。残りの主要な衝上断層のガウジに含まれる粘土鉱物として、少量のスメクタイトが F2, F3, F4 に検出された。カオリナイトは、量比は異なるが全ての断層で検出された。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) が F6, F8 に検出された。

川原樋衝上断層(F4)のガウジの圧密排水条件の一面剪断試験により、ピーク時の内部摩擦角と粘着力として、それぞれ 36.3° 、 4.6 kPa の値を得た。剪断試験後に、試験に使用した供試体の粒度試験を行った結果、平均粒径が 0.46 mm であり、粘土 ($< 0.005 \text{ mm}$)、シルト ($0.005 \text{ mm} \leq < 0.075 \text{ mm}$)、砂 ($0.075 \text{ mm} \leq < 2.0 \text{ mm}$)、礫 ($\geq 2.0 \text{ mm}$) の比率は、それぞれ 11.6, 19.8, 37.7, 30.9 Wt%であった。

透水試験の結果、断層ガウジの透水係数として $4.9 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 、 $5.9 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 、 $2.2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (相乗平均 $8.6 \times 10^{-9} \text{ m/s}$) の値が得られた。

6. 議論

6.1 深層崩壊と重力斜面変形の発生に対する地質構造的条件と河川侵食との関係

非固結の脆性破砕帯を持つ主要な衝上断層は、局所的な褶曲部を除き、北から北西に傾斜し、付加体の帯状方向とほぼ平行に配列していた。したがって、これらの衝上断層は北から北西向き斜面において流れ盤をなすことになる。

赤谷地域において、川原樋衝上断層の等深度図と構造等高線図を GIS により作成して、衝上断層と地形との関係を分析した。その結果、川原樋衝上断層が河川沿いで浅い位置にある場所で、1889 年と 2011 年の台風による豪雨時に深層崩壊が発生していた。これらの位置は、川原樋川や赤谷川が南側に曲流する攻撃斜面にあたり、北西傾斜の川原樋衝上断層に向かって河川侵食が進んだ結果、川原樋衝上断層がより浅い深度に位置していた。このような場所で選択的に河床から山稜に至るまでの大規模な重力斜面変形が発生し、さらには深層崩壊が発生したことになる。

中原・黒河地域についても上記赤谷地域と同様の分析を行い、低角断層が斜面とほぼ平行で数 10 m 以浅の浅い深度を通過する場合に深層崩壊が発生し、低角断層が斜面勾配よりもやや急傾斜で尾根の背面を通る場合に、斜面上部に大規模な小崖が形成される傾向が認められた。

一方、飛養曾地域の事例のように、南東方向にプランジした向斜軸を持つ褶曲により、衝上断層が変形して衝上断層に挟まれた領域が不安定化し、南東傾斜の大規模な重力変形斜面が形成されたと推定される場合もあった。このように、付加体の衝上断層の一般的傾斜方向と異なる方向の重力変形斜面の形成原因は、付加体内の局所的な褶曲構造によって衝上断層が変形したことに求められる場合がある。

6.2 衝上断層と高角断層の組合せによるくさび破壊

幾何学的に、深層崩壊の発生場を考えた場合、一枚の弱面のみでは、崩壊に至るまでに新たに側部に剪断面を形成するか、溪流等により周囲から切断される必要がある。このため、複数の弱面を伴うくさび破壊の方が、発生確率が大きくなると考えられる。破壊がくさび形態をとる場合には、くさび体の運動可能方向は複数の分離面の交線方向に制約を受ける。

既存の研究ではあまり注目されていないが、紀伊山地から四国の四万十帯の従来の地質図には、広い範囲で、北西-南東、および北東-南西方向の高角断層が衝上断層を切断するように図示されており、付加作用の後に、広域的な応力場を反映してこのような断層が形成されたことが示唆される。つまり、衝上断層に加えて、これらの高角断層によって重力斜面変形と大規模崩壊の構造的準備がなされていることがわかる。そして、これは島弧の付加体に共通である可能性もある。

6.3 粘土質破砕帯を伴う衝上断層を含む斜面の豪雨時地盤水理挙動

斜面と平行に、非固結の粘土質脆性破砕帯を伴う衝上断層が存在する場合、斜面表層から浸透してきた地下水の移動は破砕帯によって妨げられ、水圧が上昇する。また、斜面背面から供給された地下水により、衝上断層の下盤中の水位が上昇するが、衝上断層により河川への浸出が妨げられる結果、断層面の下側にも水圧が作用し、断層面の上下面に作用する水圧により斜面が不安定化すると推測される。非固結の粘土質脆性破砕帯を持つ衝上断層は、力学的な弱面としても機能し、急激な全体破壊に寄与したと考えられる。

6.4 四万十付加体における山地斜面の発達過程と重力斜面変形の進行、深層崩壊の発生

図-7に、粘土質の非固結脆性破砕帯を伴う衝上断層が流れ盤をなす斜面の、河川侵食に伴う重力斜面変形と深層崩壊の発生過程モデル図を示す。

調査地で明らかになった大規模崩壊の地質構造的素因と河川侵食作用要因、そして、それに起因する地形変化と大規模崩壊の発生過程について歴史を追って考えてみる。付加体中には、その形成時に多数の衝上断層が形成される。特に、規模の大きな非固結脆性破砕帯を伴う衝上断層は、厚い粘土質破砕帯を伴い、地下水の遮水効果を持つとともに、力学的にも弱面となる性質を持つ。さらに、付加体形成後のテクトニック場の変化に伴って、衝上断層に斜交する高角断層が形成される場合が一般的である。

次に、付加体が隆起し、古地形面が広い範囲で形成される。四万十付加体分布地域においては、北から北西側に傾斜した衝上断層で分断された覆瓦構造が基本構造であり、北西向き斜面が流れ盤を構成している。そして、次第に河川の下刻が進行し、山稜に至るような大規模な重力斜面変形が進行するようになる。本研究地域の場合には、中原・黒河地域や赤谷地域において衝上断層が斜面とほぼ平行方向か逆目状に存在し、断層沿いの局所的な剪断破壊から斜面上部に引張破壊が進展して小崖が形成されたものと考えられる。さらに、赤谷地域の赤谷や赤谷東の崩壊で明らかになったように、衝上断層を切り、斜面傾斜方向の走向を持つ高角断層が重力変形斜面の側部を限る場合には、重力変形や急激な崩壊が発生し易い条件を備えていると言える。

重力変形の進行した斜面においては、開口割れ目が発達する結果、岩盤の透水性が増し、雨水は岩盤中に浸透しやすくなるが、一方では、衝上断層が遮水層となり、豪雨時の崩壊発生の原因となると推定される。

6.5 研究成果の一般性と今後の課題

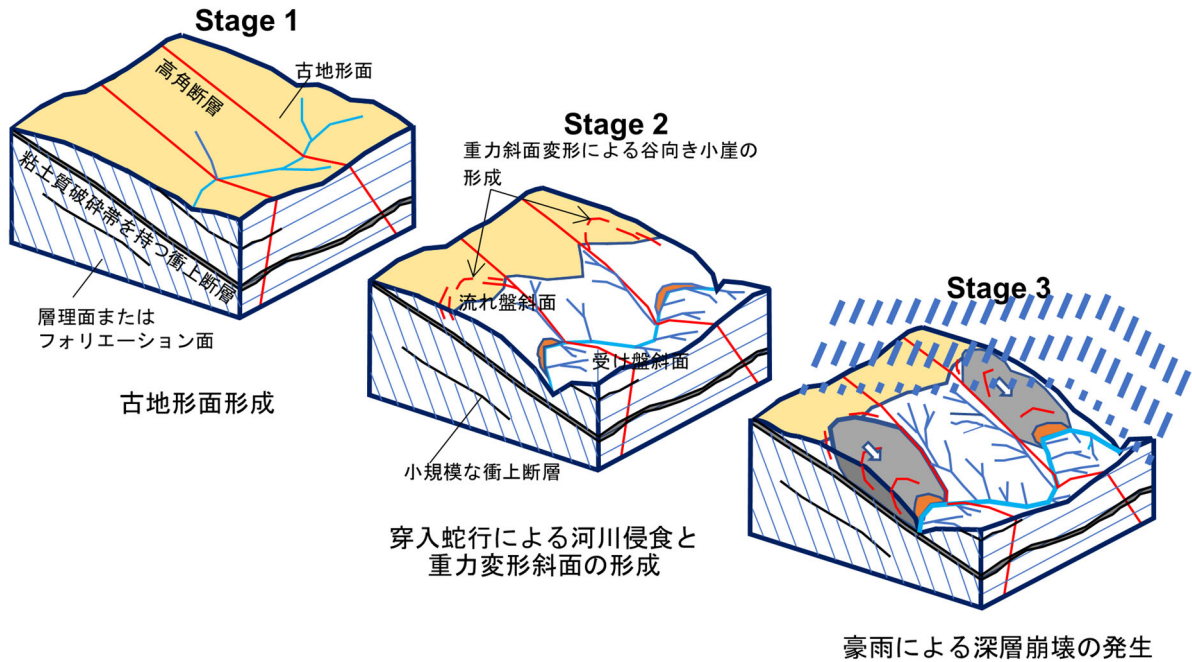


図-7 非固結脆性破砕帯を伴う衝上断層が流れ盤をなす斜面の、河川侵食に伴う重力斜面変形と深層崩壊の発生過程モデル図

今回得られた成果は、付加体中の衝上断層の傾斜角が比較的低角をなす場合に成り立つと考えられる。本研究の研究域である紀伊山地中央部に加えて九州山地東部の四万十帯でも低角の衝上断層が発達していることが知られている(斎藤ほか, 1996)。一方, Yokoyama(2020)は, 安部川と大井川上流域の四万十帯を調査し, 高角の断層破砕帯を持つ層状岩の曲げトッピングによる山向き小崖の形成機構や崩壊発生について研究を行った。木村(2019)は, 紀伊半島と赤石山地の四万十付加体を比較し, 衝上断層が低角をなす場合と高角をなす場合の崩壊発生機構の違いの重要性を指摘している。

今後の課題として以下の事項がある。

- ・非固結断層岩を伴う衝上断層の分布実態と成因の解明, 衝上断層の走向が斜面の等高線方向に対して大きく斜交する場合や高角をなす場合, 衝上断層が存在しない斜面において重力斜面変形や深層崩壊が発生する可能性やメカニズムについては今後の課題である。
- ・四万十付加体内には褶曲構造や付加体形成後のテクトニクスの影響により局所的な屈曲構造が含まれるため, 一般方向から外れる深層崩壊や重力斜面変形が共通して生じている可能性があり, 今後研究事例を増やす必要がある。
- ・山地斜面は, 河川の下刻とそれに対応した重力斜面変形, さらに崩壊によって変化していくが, その速度論的な関連性について明らかにする必要がある。斜面の重力変形速度については, 近年, 斜面災害に関連して高精度のデータが取得されているも

の、論文として公表されたものがほとんどないため、今後体系的に分析する必要がある。

7. 結論

本研究では、紀伊半島中央部に分布する四万十付加体で豪雨により発生する深層崩壊および重力斜面変形の地質構造・地形を調査した。その結果、付加作用の後著しい変形を受けずに隆起した付加体が、隆起と侵食の激しい地域においてどのような地形発達をたどるか、初めて典型的な事例として明らかにすることができた。

研究域の四万十付加体中には、1 m を超えるような厚さの非固結の脆性破碎帯を伴う衝上断層が、数 km の間隔で分布しており、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侵食過程に支配されていることが初めてわかった。これらの衝上断層には、北東-南西から東-西の走向を有し、 30° ~ 50° 北西に傾斜しているものが多い。したがって、北西から北向きの斜面において、斜面と衝上断層の傾斜角が近くなり、流れ盤を構成する。このような弱面を含む地質体を、河川が穿入蛇行しながら侵食し、衝上断層が斜面脚部において浅い深度に到達すると、断層の上盤が不安定化し、斜面上部に重力斜面変形による小崖が形成される。さらに河川侵食が進行し、衝上断層が斜面脚部において限界深度に到達し、ある一定規模以上の降雨がもたらされると、間隙水圧の上昇が誘因となって深層崩壊が発生する。この限界深度は、岩盤の性質や構造、断層上盤を構成する岩盤の剛性や斜面の比高等により変わると推定される。このような衝上断層に加えて、これを斜面傾斜方向に切断する高角断層や節理により、不安定なくさび体が形成される。これにより、衝上断層の上盤に周囲と切り離された領域が形成され、重力斜面変形や深層崩壊が発生しやすい場となる。非固結の脆性破碎帯を伴う衝上断層は、粘土質の破碎物質を有し、連続的な力学的弱層かつ遮水層となる。その結果、このような衝上断層は、豪雨時に間隙水圧の急上昇をもたらす急激な崩壊発生の原因となる。そして、これが付加体で豪雨に伴い発生する深層崩壊の主要因であると推定される。また、頻度は少ないが、局所的な向斜構造により付加体中の帯状構造や衝上断層が変形した場所においては、一般的な方向からはずれた重力斜面変形や深層崩壊が発生すると推定される。

四万十帯では、北から北西向きに傾斜し数 km 以上側方に連続する衝上断層や、北西-南東走向の高角断層が多数存在することが知られており、衝上断層単体や、衝上断層と高角断層、節理等の地質不連続面とからなるくさび体が流れ盤をなす場所では、上記のような重力斜面変形と降雨による深層崩壊の発生は、一般的なものであると考えられる。

謝辞

奈良県および国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所には、調査地の高解像度 DEM データおよびボーリング調査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きました。国土防災技術株式会社の小川内良人氏、川島正照氏、澤徹氏には、赤谷の現場調査やコア観察に際して便宜を図っていただきました。本論文中的ステレオネット図は Richard W. Allmendinger 氏の Stereonet8 により作図しました。上記の方々に謝意を表します。

引用文献

- 荒井紀之(2018): 四万十付加体における重力斜面変形と深層崩壊に対する衝上断層の役割, 京都大学大学院理学研究科平成 30 年度博士後期課程学位論文.
- 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, doi:10.1111/iar.12245
- 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 , doi:10.1016/j.enggeo.2019.105236
- 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. doi:10.1016/j.enggeo.2009.03.005
- Chigira, M., Tsou, C.-Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N., & Matsuzawa, M. (2013) Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas. Geomorphology, 201, 479–493. doi:10.1016/j.geomorph.2013.07.020
- (独) 土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム(2008) 深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル, 土木研究資料, No.4115.
- Evans, S. G., Guthrie, R. H., Roberts, N. J., & Bishop, N. F. (2007) The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines: a catastrophic landslide in tropical mountain terrain. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7 (1), 89–101. doi:10.5194/nhess-7-89-2007
- Guthrie, R. H., Evans, S. G., Catane, S. G., Zarco, M. A. H., & Saturay Jr., R. M. (2009) The 17 February 2006 rock slide-debris avalanche at Guinsaigon Philippines: a synthesis. Bulletin of engineering geology and the environment, 68 (2), 201–213. doi:10.1007/s10064-009-0205-2

- 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, 369-386.
- 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, 30B-1, 391-408.
- 木村克己 (2019) 大規模斜面崩壊に認められる四万十付加体の地質構造制約, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会要旨, D26.
- 紀州四万十帯団体研究グループ. (1986) 紀伊半島西部中津村周辺の日高川層群美山累層-紀伊半島四万十累帯の研究(その 11). 地球科学, 40, 274-293.
- Kumon, F., Suzuki, H., Nakazawa, K., Tokuoka, T., Harata, T., Kimura, K., . . . Nakamura, K. (1988) Shimanto belt in the Kii peninsula, southwest Japan. *Modern geology*, 12, 71.
- 栗本史雄. (1982) 和歌山県高野山南西方のいわゆる秩父系:上部白亜系花園層. 地質学雑誌, 88 (11), 901-914_901. doi:10.5575/geosoc.88.901
- 栗本史雄, 木村克己・竹内誠. (2015) 紀伊半島北西部, 高野山地域の上部白亜系花園層の地質と放散虫化石. 地質調査所報告, 66, 41-79.
- Logan, J. M., Friedman, M., Higgs, N. G., Dengo, C., & Shimamoto, T. (1979) Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault zones. *Proc. 8th Conf. on Analysis of Actual Fault Zones in Bedrock*, Texas A&M University, College Station, Texas/USA, 305-343.
- 齋藤眞, 木村克己, 内藤一樹, 酒井彰. (1996) 椎葉村地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅).
- Tsou, C.-Y., Feng, Z.-Y., & Chigira, M. (2011) Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan. *Geomorphology*, 127 (3-4), 166-178. doi:10.1016/j.geomorph.2010.12.013
- 宇智吉野郡. (1981 復刻) 明治二十二年吉野郡水災誌, 巻 1-11, 十津川村 (奈良県).
- Rutter, E., Maddock, R., Hall, S., & White, S. (1986) Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *Pure and Applied Geophysics*, 124 (1-2), 3-30.
- 横山俊治, 井口隆, 永田秀尚, 加藤弘徳・木村克己. (2013) 2011 年台風 12 号で発生した奈良県赤谷深層崩壊の地質構造規制. 日本地すべり学会要旨.
- Yokoyama, O. (2020) Evolution of uphill-facing scarps by flexural toppling of slate with high-angle faults, *Geomorphology*, Vol.352, doi:10.1016/j.geomorph.2019.106977

注 1：古い崩壊については，崩壊前の地形が不明なため正確な崩壊深さが算出できないが，現存する崩壊崖の最大比高がほぼ最大崩壊深さに対応するとみなす．

四万十付加体における重力斜面変形と深層崩壊に対する衝上断層の役割
-紀伊山地熊野川上流域を例として-

The role of thrust faults in gravitational slope deformation and deep-seated catastrophic
landslides in the Shimanto accretionary complex
- a case study in the upper reaches of the Kumano River in the Kii Mountains -

和 文 要 旨

本研究の目的は，豪雨に伴って四万十帯で発生する深層崩壊とその発生に密接な関係のある重力斜面変形を対象として，山地斜面内の地質構造を精緻に明らかにすることにより，それらの地質学的な素因とメカニズムを究明することである．研究域として，1889 年と 2011 年に台風の豪雨により深層崩壊が多数発生した紀伊半島中央部を選定した．研究の結果，調査地域には 1 m を超えるような厚さの非固結の脆性破砕帯を伴う北西傾斜の衝上断層が数 km の間隔で形成されており，これらの断層と河川侵食が重力斜面変形と深層崩壊の重要な素因となっていることがわかった．

キーワード：衝上断層、深層崩壊、重力斜面変形、四万十付加体

一次元表面波探査を用いたモルタル吹付背面の地山強度測定

美馬 健二、川浪 聖志（有限会社太田ジオリサーチ）

Kenji MIMA, Seishi KAWANAMI (Ohta Geo Research Co., Ltd.)

1. はじめに

佐々木ら¹⁾も指摘しているとおり、モルタル吹付は、風化防止を目的に岩盤斜面に適用する工法であるが、地山の風化が進行するにつれて、今後経年とともにモルタル吹付斜面の崩落が増加する可能性がある。道路の維持管理上、事前に崩落懸念箇所を把握しておくことは重要である。

そこで、モルタル吹付の崩落メカニズムを明らかにするため、地山がどれほどの強度まで風化（低下）すると崩落に至るのかを調査することとした。調査には、一次元表面波探査を用い、崩落斜面の S 波速度を測定したので結果を報告する。

2. 一次元表面波探査の概要

モルタル吹付崩落斜面のすぐ横で、図-1、図-2 のように地震計 4 個を一行に配置し、軽量のハンマー 1 回の打撃により、一次元表面波探査を行った。測定器に記録された表面波の波形を解析し、S 波速度構造図を作成することで、地山の強度を評価した。

3. 一次元表面波探査結果

一次元表面波探査による S 波速度構造図を図-3 に示す。その結果、深度 0.8m 付近が最低の S 波速度 $V_s=309\text{m/s}$ （換算 N 値 40 相当）となった。 $V_s=300\text{m/s}$ 程度（土砂相当）で崩壊する可能性があることが分かった。

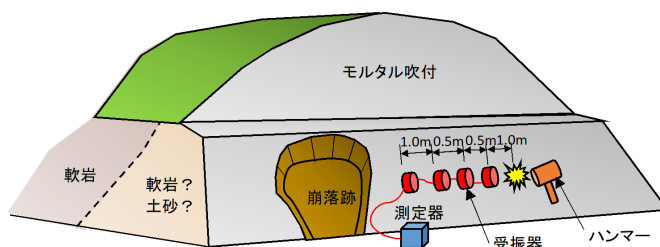


図-1 一次元表面波探査の測定模式図



図-2 一次元表面波探査状況

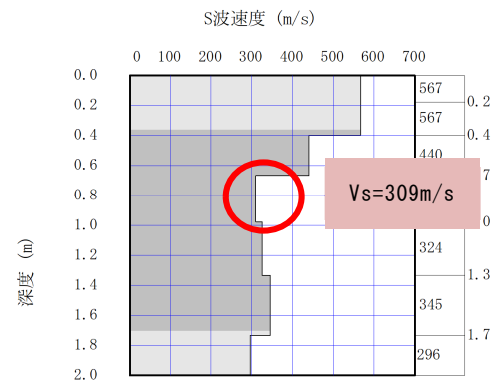


図-3 一次元表面波探査結果

1) 佐々木ら（2015）：道路のり面斜面对策におけるアセットマネジメント手法に関する研究（1），土木研究所平成 27 年度プロジェクト研究・重点研究報告書，pp.1.

一次元表面波探査を用いたモルタル吹付背面の地山強度測定



太田ジオリサーチ 美馬 健二、川浪 聖志

1

発表概要

1. 研究背景

- ・近年、モルタル吹付斜面が崩れている。
- ・モルタル背面の地山強度はどうなっているのか？

2. モルタル吹付の目的と効果

- ・モルタル吹付は岩盤の風化抑制が目的である。
- ・モルタル吹付をしてもいずれは岩盤は風化する。

3. モルタル吹付斜面の崩壊メカニズム

4. 一次元表面波探査による地山強度測定

- ・膨大な数のモルタル吹付斜面をいかに迅速に地山の強度を測定するか。
- ・一次元表面波探査を紹介。

5. モルタル吹付斜面のすぐ横で、一次元表面波探査を実施した結果

- ・モルタル吹付斜面は、S波速度(地山強度)がいくらになると崩壊するのか。

2

1. 研究背景

昭和40年＝1965年
施工後約50年を超える

モルタル吹付は、「昭和40～50年代に多数施工された。近年、その後の地山の風化等の経年劣化により、場所によっては吹付工の背面が著しく土砂化・空洞化し、それらが要因で吹付工が部分崩落する等の問題も多数生じており、維持管理が課題となっている」

※佐々木ら(2015): 道路のり面斜面对策におけるアセットマネジメント手法に関する研究(1), 土木研究所平成27年度プロジェクト研究・重点研究報告書, pp.1. 引用

- ①近年、モルタル吹付斜面の部分崩落が多数生じている。
- ②その原因は、地山の風化等の経年劣化である。

今後、モルタル吹付斜面の崩落が懸念される。



したがって

地山の強度を調査すべきであると考えた。



モルタル吹付の崩壊状況

3

2. モルタル吹付の目的と効果



地形に凹凸があっても施工が簡単

モルタル吹付施工状況
(高速道路技術センター: 現場のチェックポイント, 平成11年3月より引用)



モルタル吹付斜面の崩壊

斜面やのり面に湧水が少なく、当面崩壊の危険性は少ないが、亀裂が多く風化しやすい岩、風化してはげ落ちるおそれのある岩等の風化を抑制する目的で用いる

平成29年12月版
日本道路協会: 落石対策便覧P127

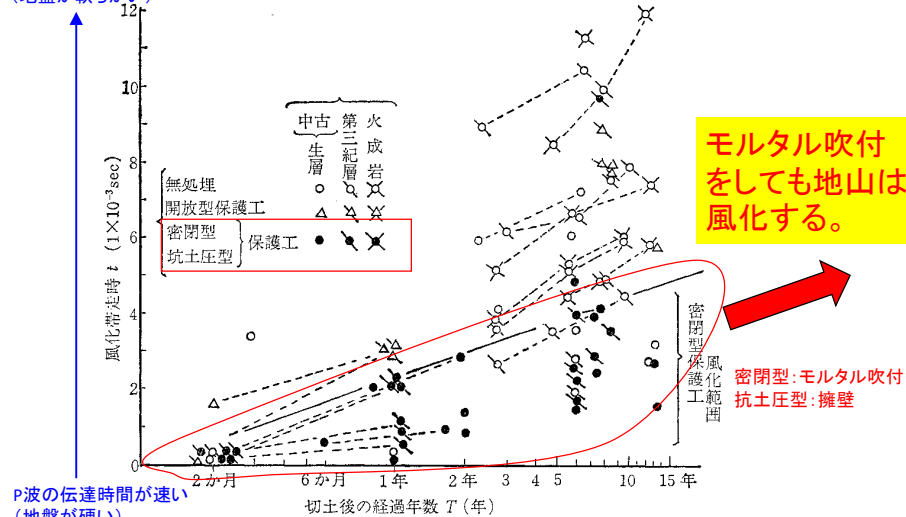
モルタル吹付をしたら、岩盤は永久に風化しないという意味なのか？

⇒いいえ。次ページの文献参照

4

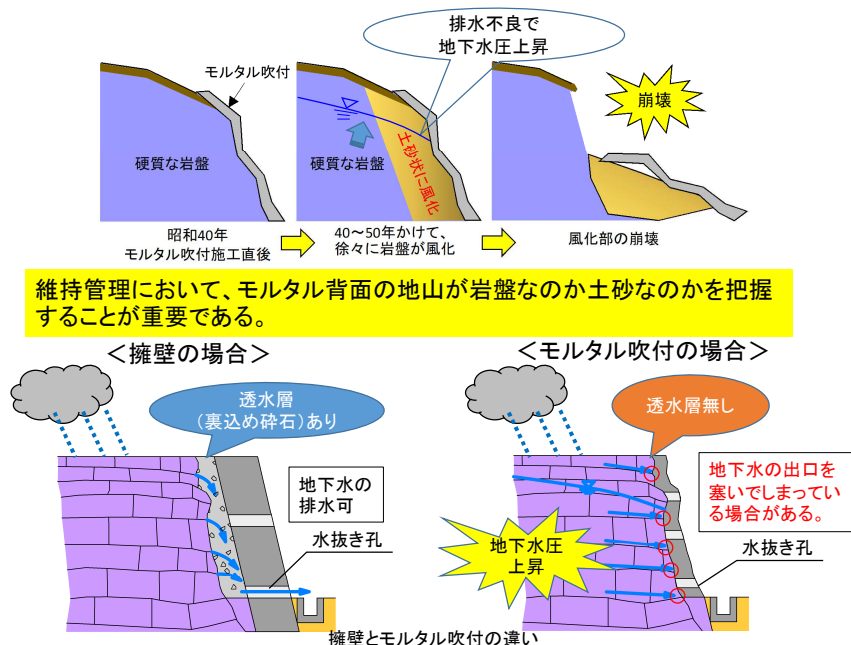
2. モルタル吹付の目的と効果

P波の伝達時間が遅い
(地盤が軟らかい)



5

3. モルタル吹付斜面の崩壊メカニズム(推定)



6

4. 一次元表面波探査による地山強度測定

モルタル吹付の数は膨大である。

ボーリング等の破壊を伴う方法で地山の風化度を調査していたのでは、時間がかかって対策が進まない。



解決策として、

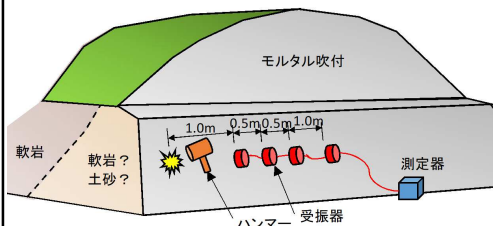
迅速に調査することが必要であり、非破壊探査である
一次元表面波探査を紹介する。

一次元表面波探査のメリット

- ①非破壊探査である。
- ②深度2m程度の地山のS波速度(換算N値)が測定可能である。
- ③迅速な調査手法である。測定時間は、10分～数十分。
- ④探査機材は、10kg程度(分解可)であり、人力運搬可。

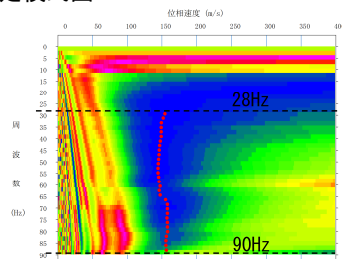
7

一次元表面波探査の方法

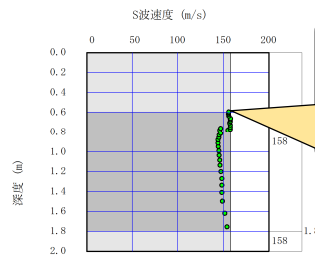


モルタル吹付斜面における一次元表面波探査の測定模式図

1. 受振器4個を0.5～1.0mの間隔で一直線に配置する。
2. 受信器の端部で、ハンマーを用いて1回起振する。
3. 測定器により表面波が受信器を通過する時間を測定し、周波数ごとの表面波の位相速度を解析する。
4. 3分の1波長則より、S波速度構造図を作成する。
5. S波速度(または換算N値)より岩質を判定する。



表面波の位相速度解析図
(縦軸:周波数, 横軸:表面波の位相速度)



S波速度構造図
(縦軸:深度, 横軸:S波速度)

$V_s=158\text{m/s}$
↓
換算N値5相当
↓
土砂と判定

換算式
 $V_s \approx 97.0N^{0.314}$

8

5. モルタル吹付斜面のすぐ横で、一次元表面波探査を実施した結果



崩壊部

斜面勾配: 1:0.5 (63.4°)
地質: 溶結凝灰岩・凝灰岩など
(地質図による)

現在のモルタル吹付斜面の状況

では、地山は、S波速度がいくらになったら崩壊するのか？



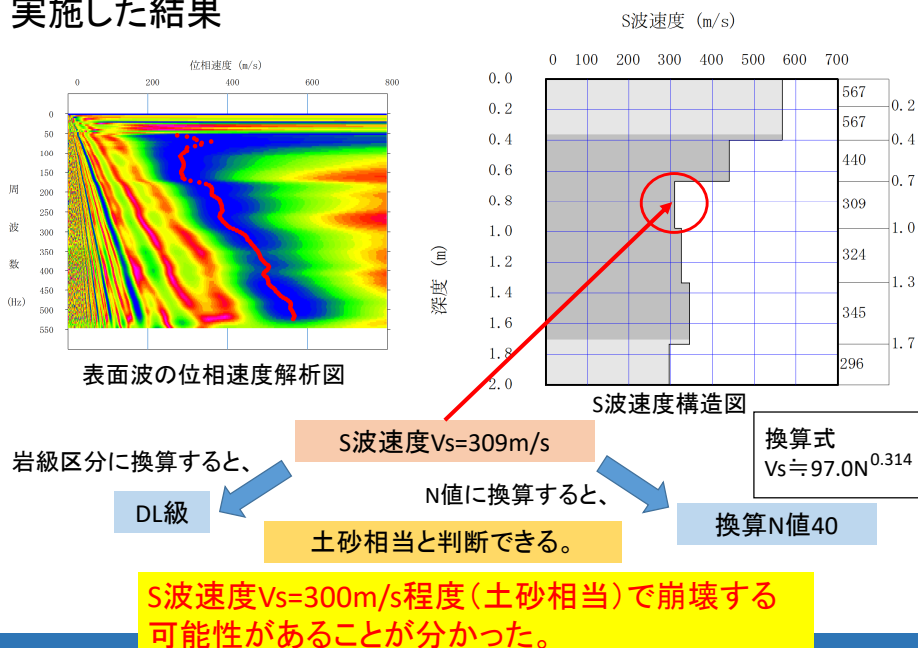
崩壊したモルタル吹付斜面のすぐ横で、一次元表面波探査を実施した。



一次元表面波探査実施状況

9

5. モルタル吹付斜面のすぐ横で、一次元表面波探査を実施した結果



10

5. モルタル吹付斜面のすぐ横で、一次元表面波探査を実施した結果



なぜ選択的に崩壊したのか？



よく観察すると、

崩壊箇所は特に湧水跡が多い。



①S波速度 $V_s=300\text{m/s}$ 程度でかつ、
②湧水跡が多い箇所は相対的に崩壊しやすい可能性がある。

11

5. モルタル吹付斜面のすぐ横で、一次元表面波探査を実施した結果

風化が速い岩(土木学会:岩盤斜面の調査と対策, P27, 1999引用)

崩壊性要因を持つ地質	代表地質等
風化が速い岩	泥岩、凝灰岩、頁岩、粘板岩、蛇紋岩、片岩類等
割れ目の多い岩	片岩類、頁岩、蛇紋岩、花崗岩、安山岩、チャート等
割れ目が流れ盤となる岩	層理、節理が斜面の傾斜方向と一致している片岩類、粘板岩等
構造的弱線をもつ地質	断層破砕帯、旧地すべり地、崩壊跡地等

対策の優先順位は、地質を考慮して検討する方法もある(参考)。

12

まとめ

- ・近年、地山の風化等でモルタル吹付斜面が崩れている。
- ・岩盤の風化を抑制するモルタル吹付をしても、いずれは岩盤は土砂に風化する。
- ・地山の強度測定は、一次元表面波探査が有効である。
- ・実際に崩壊したモルタル吹付斜面のすぐ横で調査したところ、①地山はS波速度 $V_s=300\text{m/s}$ 程度(土砂相当)でかつ、②湧水跡が多い箇所では相対的に崩壊しやすい可能性があることがわかった。

編集後記

2019年の年末に発生した新型コロナウイルス感染症による社会的混乱状態は、ついに3年目となってしまいました。現時点では全く収束の見込み無く、すでにコロナ対策(マスク・消毒)は日常となっています。2020年の学会などは中止も多くありましたが、2021年はオンラインシステムの利用という形に世界中で移行し、それもあってか多くの方が気軽に参加できるようになりました。2021年12月3日に徳島県三好市有瀬地区で開催された関西支部の現地討論会は幸運なことに感染状況が落ち着いていたので現地で開催できましたが、翌日の4日の話題提供はオンラインで行いました。これには現地検討会の1.5倍の61名が参加しました。そして、大変盛況におわりました。また、2021年12月13日にオンラインで開催された地すべり学会研究調査部の2021年地すべり・土石流災害調査報告会は250名近い参加登録があり、これもまた大変盛況に終わりました。オンサイトからオンライン会議に世界がシフトし、多くの方と情報共有できたこと、コロナ禍がもたらした大きな進歩だったように思います。また、2021年9月に北海道支部で開催された研究発表会のオンライン巡検は、映像のみならず、UAV 画像、DEM による3D モデルなどを駆使し、ある意味現地訪問よりも濃い密度の巡検のようにも思いました。残念ながらコロナ禍で多くの方が亡くなり、さらに、多くの社会問題が噴出している現実ではありますが、前向きに捉えることが許されるならば、この2年はコロナ禍がもたらした未来への加速だったように思います。

(令和4 (2022)年 1 月 山崎 新太郎)

(公社)日本地すべり学会関西支部協賛会員名簿

2022 年 1 月 1 日現在 24 社

(五十音・口数順)

(会 社 名)	(電話番号)	(口数)
有限会社 太田ジオリサーチ	078-907-3120.....	3
中央復建コンサルタンツ株式会社	06-6160-1121.....	3
日本工営株式会社 大阪支店	06-7177-9500	3
アジア航測株式会社 西日本インフラマネジメント部.....	06-4801-2250.....	2
株式会社 荒谷建設コンサルタント 品質企画部	082-292-5481.....	2
株式会社 エイト日本技術開発	086-252-8917.....	2
株式会社 エス・ビー・シー.....	0883-52-1621.....	2
応用地質株式会社 四国事務所.....	089-925-9516.....	2
川崎地質株式会社 西日本支社	06-7175-7700.....	2
国土防災技術株式会社 大阪支店	06-6155-4839.....	2
国土防災技術株式会社 高知支店	088-846-0545.....	2
株式会社 コスモ建設コンサルタント	0853-72-1171.....	2
株式会社 四国トライ	088-883-5908.....	2
島建コンサルタント株式会社	0853-53-3251.....	2
株式会社 相愛	088-846-6700.....	2
株式会社 ダイヤコンサルタント 関西支社.....	06-6339-9141.....	2
株式会社 地研	088-822-1535.....	2
株式会社 地圏総合コンサルタント 四国支店.....	0897-33-3123.....	2
中央開発株式会社 関西支社	06-6386-3691.....	2
株式会社 東建ジオテック	089-945-3328.....	2
株式会社 ナイバ	087-862-5121.....	2
日本工営株式会社 四国支店	087-811-2660.....	2
明治コンサルタント株式会社 大阪支店.....	06-7178-1659.....	2
株式会社 四電技術コンサルタント	087-845-8881.....	2