

らんど すらいど

38

(公社) 日本地すべり学会関西支部

2022

四国・大歩危地域の地形・地質・斜面災害
— 地球科学研究の最前線と地すべりの研究 —
Earth Science and Landslides in Oboke Area, Shikoku

山崎 新太郎 (京都大学防災研究所・徳島地すべり観測所)

Shintaro Yamasaki (Tokushima Landslide Observatory, DPRI Kyoto University)

1. はじめに

2021年12月3日と4日に亘って日本地すべり学会関西支部の現地検討会が徳島県三好市西祖谷山村有瀬で開催された。この記事は、その際に有瀬を含む大歩危地域を紹介するための資料として参加者に配布したものに、さらに加筆したものである。ただし、本文は読み物として書いたもので、主に地史、変成作用に関する内容は筆者の専門分野では無いため、日本語で書かれた総説やインターネットでアクセス可能な巡検案内書、一般向け書籍を中心に記述している。従って、それらに関しては著者自身はその科学的妥当性を正確に評価できているとは言い難いので、予め申し上げておく。詳細は文献を各自確認して頂きたい。

本稿で詳述する大歩危地域は四国最大の流域面積である吉野川の中流域にあたり、観光名所でもある。地域の特徴として極めて比高が大きい急斜面に複数の集落が立地するという独特の景観がある。また国道32号、JR土讃線という四国を横断する重要交通路、さらに四国人口のおよそ半分がその水資源の恩恵を受けている吉野川が地域を縦断し、大歩危地域は四国の社会インフラの「頸部」とも言える。そして急峻な地形、脆い地質、膨大な降水により斜面災害が多発し、今なおその対策が続いている。一方で、大歩危地域では日本列島の形成に迫る地質学的研究や地殻深部のプロセスに関わる重要な研究が行われてきた場所でもあり、地すべりの研究においても重要な研究が行われてきた。関係する膨大な研究の集積は、地質学・地形学的にも重要な公園にふさわしく2022年現在、日本ジオパークネットワークへの加入を目指している。拙文を通して大歩危地域の地形・地質そして、景観の成り立ちに関して理解を深めて頂ければ幸いである。

なお本稿は、2から5章にかけて複数のトピックを紹介する。まず、2章では大歩危地域が大比高となる理由を四国山地の形成過程に関する最新の研究と共に紹介する。特に近年、中央構造線活断層系(注1)や、それを北端とする前弧スリバーとしての外帯(注2)の地形発達に関して興味深い解釈が提案されている。3章では大歩危地域に露出する三波川帯(注3)とその変成岩、そしてその研究が、地殻深部のプロセスを解明し、日本列島の地質の解明に大きな役割を果たしていることを紹介する。4章では大歩危地域の斜面災害について有瀬を含む結晶片岩地域を中心に地すべりと地質の関係

に関するこれまでの研究を紹介する。そして、最後 5 章では大歩危地域の景観要素である地すべり地に立地した傾斜地集落について触れる。

2. 四国山地の成り立ちと大歩危地域の大比高地形

四国山地という山域の名称に範囲の定義は無いと思われるが、四国の外帯すなわち中央構造線以南に位置し、東西に標高 1000~2000 m 弱の急峻な山々を連ねる山域を示していると思われる。大歩危地域は四国山地の中央部にあたる。四国山地は現在でも隆起が継続していると考えられており、その隆起速度は大森博雄¹によって推定されている。大森は観測値を加えたモデル計算により、隆起と削剥が同時に行われる山地では 100 万年程度隆起が継続した場合、初期高度が不明であっても平均高度は一定となると考えた。そして、一定空間の平均高度から四国山地の隆起速度を求めた。それによると隆起量は剣山地域（年間 2.5 mm）で最大となり、次いで石鎚山（年間 2.0 mm）周辺となるとした。そして、概ね四国カルスト周辺ー石鎚山ー大歩危ー剣山ー魚梁瀬周辺のように北に凸となる弧状の隆起が発生しているとした。これは 120 年間の水準測量の傾向とは異なっており、また周期的に発生する南海トラフ地震とは無関係の長期傾向であると思われる。

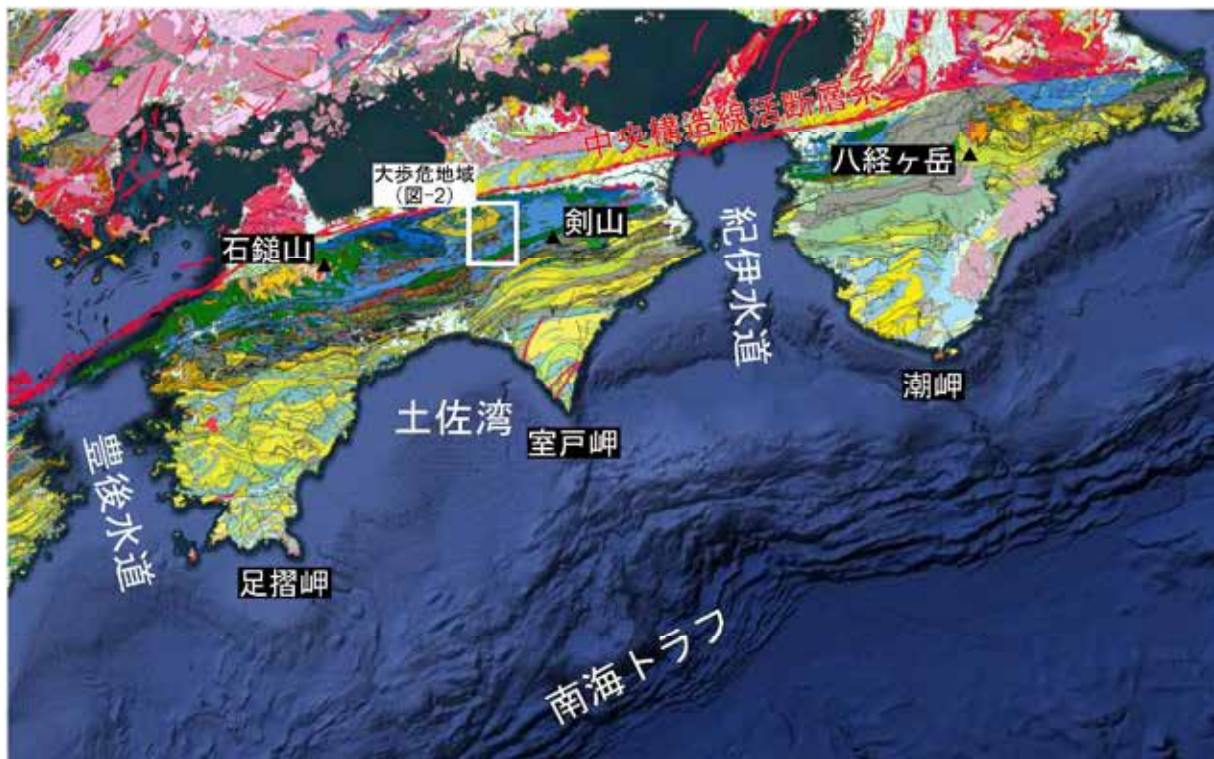
一方で地形に注目すると四国山地はその基盤地質を反映した組織地形を呈している。部分的には傾向が異なる場合もあるが、四国山地では概ね西南西から東北東に延びる山脈の尾根が南北に複数連なっており、同じく帯状・レンズ状に配列する地質帯（体）の長軸も同方向である。これらは南海トラフの方向とも一致する（図-1）。このような地質・地形は、プレートの沈み込みによって形成された付加体と付加作用が四国の地質・地形を形成してきたことと整合する（注4）。さらに、プレートにより運ばれた付加体が次々と衝突することで内陸側の地殻が肥厚することも四国山地の隆起を促していると考えられる。

四国山地は 100 万~300 万年前ごろまでは現在のような急峻な山地では無く、かなり低かったと考えられている（例えば、植木・満塩²）。西南日本の山地の多くは、概ね同時期に隆起が開始されたと考えられており、この理由を太平洋プレートによる顕著な東北日本弧の東西圧縮の開始、フィリピン海プレートの北西への沈み込みが開始に求める考えがある（高橋³）。そして、フィリピン海プレートの北西への沈み込みは、中央構造線活断層系を北端とし、南海トラフを南端とする地殻の一部（前弧スリバー）を西へ（豊後水道方向へ）駆動させ（佃⁴）た。その影響は現在も続いていると考えられており、中央構造線活断層系の右横ずれの変位として認識される。さらに、池田倫治らが示した考え⁵では、この前弧スリバーは西進するだけでなく、北西への圧縮を受けて反時計回りに回転しており、回転に伴う北方向への衝突で中央構造線活断層系の北側に讃岐山地が形成され、愛媛県四国中央市付近以西では中央構造線活断層系の北側に

伸長による地溝が形成されたとの説を公表している。この中央構造線活断層系と前弧スリバーに関しては、他にも堤之恭は著書⁶の中で、前弧スリバーの西端を豊後水道とする考えを公表しているが、四国山地の大部分は中央構造線活断層系を北端とする前弧スリバーの上に形成された山地という点では一致している。

前述の堤は四国山地に関しても前弧スリバーの動きと関係した山地形成メカニズムを提案している。堤は前述の著書の中で四国・紀伊半島を含む前弧スリバーが現在の観測で得られた変位量を基準とすると年間約 1.9 cm のペースで西進し、豊後水道に向かって衝突すると 300 万年間で約 57 km の東西短縮が発生することになる。この東西短縮に伴った前弧スリバーの「波打ち」が南北に隆起軸を持つ石鎚山－足摺岬、剣山－室戸岬、紀伊半島を生み、さらに、土佐湾と紀伊水道という沈降域を生んだとした。付加作用による地殻の成長のみならず、地殻自体の変形が四国山地を隆起させているということである。測地学的研究によってこのアイディアはさらなる裏付けが必要であるかもしれないが、四国山地の誕生やその周辺の地形形成を説明する研究は、現在最前線にあり南海トラフ地震の活動との関係も含めて興味深いところと言えよう。

それでは急峻で深い谷を特徴とする大歩危周辺の地形はどのように形成されたのであろうか。この大きな比高の理由の一つは、大歩危地域の吉野川は侵食力の大きな河川であり、なおかつ四国山地隆起以前から流路が固定されていた河川（先行河川）であ



図－1 四国・紀伊半島の地質図，活断層分布（赤線）と南海トラフ
 （産総研・地質図 Navi に加筆）

るためと思われる。大歩危地域では、河川の下刻速度が山地の隆起速度を上回っている状態が継続しており、河川の位置と標高がほぼ保たれるために、周辺のみが隆起していった。そのため大比高地が誕生した。吉野川本流や、支流の祖谷川は蛇行を残しているが、これは隆起以前からの流路の形状とも考えることができる。このような山間地の蛇行を穿入（せんにゅう）蛇行と呼ぶ。また、大歩危や祖谷溪では十分侵食力が大きいですが、それより上流になるほど流量が小さくなり下刻力が低下するために、谷底と周辺山地との比高は小さくなっている。大歩危地域が大比高となる理由としてもう一つは地質的な理由も考えられる。特に砂質片岩を横断する河岸は急傾斜で露岩している場合も多く、大歩危峡谷として知られ景勝地となっている（図-2）。同じく景勝地として知られる祖谷溪や、祖谷川支流松尾川上流の竜ヶ岳にも急峻な露岩が認められる。砂質片岩は三波川帯に広く分布する泥質片岩に比べて侵食抵抗性が大きいと考えられ、全体的に地すべり地形の分布は少ない。大歩危峡谷付近には褶曲した地質構造を持つ砂質片岩が広く分布するが、この抵抗性が最大となる背斜状褶曲の軸部付近には付近最高点の国見山や中津山がある。また大歩危峡谷の南方では地層の傾斜が緩い場合が多く、斜面や山の標高に応じて異なる地質が露出することになる。珪質片岩や砂質片岩の部分は泥質片岩や塩基性片岩に比べれば侵食抵抗性が大きいために尾根やピークを形作っている。これも大比高の地形が形成される理由と思われる。

3. 大歩危地域の変成岩と日本列島の大構造

大歩危地域に分布する変成岩は三波川帯に属するものである。この変成岩を形成した作用は広域変成作用と呼ばれ、海洋プレートの沈み込みと共に深部まで運搬された岩石がその圧力・温度条件の下、再結晶し片状構造を持つようになったものである。結晶片岩は片状構造が十分発達し、片理と呼ばれる剥離性の構造を持つ岩石の総称である（注5）。

四国の三波川帯は世界でも最も研究された変成帯と呼ばれており、低変成度から高変成度までの岩石が分布することから多くの研究がある。一方でその厚みは四国において、わずか5 km程度であるとも言われている（岡本ほか⁷⁾。ここでは、2018年に刊行された20万分の1地質図「高知」（第2版⁸⁾の記述に基づいて、最新の三波川帯の区分や解明されている変成過程を紹介する。それらによれば、三波川帯は構造的に上位から大きく別子エクロジイト相ユニット、白滝ユニット、大歩危—中七番ユニット、御荷鉾ユニットからなり、このうち最も変成度が高いのは別子エクロジイト相ユニットで、推定される変成圧力は1.5～2.5 GPaと考えられている。これは、岩石の密度を3 g/cm³とした場合、地下約50～80 kmに相当する圧力を受けていることになる。この別子エクロジイト相ユニットは、その名にもあるように、新居浜市別子付近を

中心に分布し塩基性岩が地下の高圧で変成したエクロジャイトが産出する。このエク



図-2 大歩危地域の地質と地すべり地形分布（産総研・地質図 Navi を利用し 20 万分の 1 地質図「高知」（第 2 版）に防災科学技術研究所の地すべり分布図を重ね合わせたもの）。主な地質凡例は黄系色：砂質片岩，水色：泥質片岩，ピンク色：珪質片岩，緑系色：塩基性片岩および玄武岩。また本文に出ている崩壊地・地名を加筆してい

ロジャイトは局所的な分布でもあり、かつては三波川帯に広く影響を及ぼした変成作用とは無関係のテクトニックブロックとも考えられてきた。しかし、現在では本ユニット内の泥質片岩もエクロジャイト相に到達していたと考えられており、プレートテクトニクスによる海底表層部の物質がかなり深部まで運ばれていることが明らかになっている。次の深さにある白滝ユニットの変成圧力は0.5~1.2 GPa（地下17~40 km相当）と考えられている。この白滝ユニットは三波川変成コンプレックスで最も広く分布し、大歩危地域では後述の大歩危ユニットの砂質片岩を囲むように分布する。そして、大歩危一中七番ユニットは0.4~0.45 GPa（地下13~15 km相当）の変成圧力を受けていると考えられている。大歩危一中七番ユニットは、大歩危地域と新居浜市南部の一部、高知県大川村の一部に白滝ユニットの構造的な下位に地窓（注6）として分布する。御荷鉾ユニットは三波川帯南縁に特徴的に分布するが、その変成度は概ねさらに小さい。以上のように三波川変成コンプレックス内では「構造的な上下関係と、変成された深度が逆転している」という構造を持っている。この理由は、大規模な横臥褶曲の存在やナップ（注6）の積み重ねに求める考えがあるようである⁷⁾。

三波川帯を構成する変成岩の組成・組織には、付加、変成、上昇時の様々な変形の痕跡が残されていることも明らかになっている⁸⁾。特に広く分布する泥質片岩は剥離性の面構造である片理をもっているが、これらを延性変形させる段階的な重複変形が知られている。代表的なものを紹介すると、ウォリス・サイモンらの高知県大豊町・汗見川周辺の研究を基礎に古い方から順にDr, Ds, Dt, Duと名付けられている変形段階である。最初のDr期には最初の片理面が形成された。ただし、これが認められるのは一部に留まる。そして、それに重複するDs変形は、平滑な片理面（主片理と呼ばれる）と東西方向の伸長線構造により特徴づけられ、変成作用のピークから続く後退変成期にかけての変形とされており、上昇時のものと考えられている。この変形は三波川帯の広域に及んでいる。そして、Dt期、Du期の変形は変成作用終了後の変形で、変成作用を伴わない延性変形段階とされる。このうち、最後のDu期の変形は主片理を曲げる鉛直褶曲を伴う延性変形であり、白滝ユニットの泥質片岩に非常に薄く剥がれる性質をもたらしている（図-3）。これは、四国中央部で「清水構造帯」と呼ばれてきた断層運動に伴うせん断帯で発達するものと同様であると考えられている⁹⁾。清水構造帯は20万分の1地質図幅「高知」（第2版）⁷⁾では白滝ユニットと御荷鉾ユニットを区分している断層（清水構造線）から約3 km以内の幅で白滝ユニット南縁部内に分布するように描かれている。しかし、大歩危峡谷南方地域では同図幅には図示されていない。一方で、5万分の1地質図幅「川口」¹⁰⁾では前述の清水構造線よりも北に約3 km離れた場所に幅約1 kmのレンズ状領域として描かれている。清水構造帯の岩石は微褶曲・軸面劈開の発達も著しく、多数の小断層も形成されており、斜面災害との関連も指摘されている（鈴木¹¹⁾）。

大歩危地域の研究で四国の大構造の解明が進んでいる。それは前述の三波川帯の構造的下位にある大歩危ユニットが四国南方に分布する四万十帯と同一の起源であるという事実が複数の証拠によってほぼ確定され、四国のみならず日本列島の大構造の解釈にも影響を与えているからである。かつて三波川帯は、石灰質片岩中にある化石の年代から三畳紀、そして、付加体の累重関係から後期ジュラ紀～前期白亜紀と考えられていた⁽¹²⁾。しかし、大歩危地域の徳島県天然記念物に指定されている礫質片岩を調査したところ、それが四万十帯日和佐層（白亜紀後期）の礫岩と共通していることが指摘された（君波和雄氏らの 1999 年の研究による）。その後、変成岩の元となった堆積物の直接の年代を示す火成作用による碎屑性ジルコンの U-Pd 年代から、前述の白滝ユニットに相当する三波川帯三縄層の碎屑性ジルコンの多くは 1900–1800 Ma の年代を示すのに対し、大歩危ユニットに相当する小歩危層・川口層の碎屑性ジルコンは 90–80 Ma 付近の年代であったことが判明した（青木一勝らの 2007 年の研究による）。これらの事実から三波川帯に広く分布する古い三縄層＝白滝ユニットの中に新しい年代の四万十帯北帯（白亜紀後期）が大歩危地域では露出していることが確定的となった。そして、この事実から三波川帯やその南方の秩父帯の地下には広く、それらより新しい付加体である四万十帯が存在しているという大構造が考えられるようになった。その後、



図-3 泥質片岩の露頭でのみかけの違い。(左) Du 変形の発達しない泥質片岩（三好市東祖谷高野）と（右）Du 変形と認識される鉛直褶曲が発達し剥離性が著しい泥質片岩（三好市東祖谷大西）、ハンマーの長さは 30 cm.

白滝ユニットも相当部分の堆積年代が四万十帯相当と考えられており、三波川帯の範囲は大幅に見直されつつある⁽¹³⁾。日本列島の大構造を見直すきっかけがこの大歩危地域の研究から得られたのである。

4. 結晶片岩地域の斜面災害

大歩危地域では地すべり・深層崩壊のいずれも多発してきた歴史がある。現在の JR 土讃線のうち大歩危地域を通過する三縄駅～豊永駅間は 1935 年に開通した。以後、この路線は度重なる災害により大きな路線変更・改修を余儀なくされてきている⁽¹⁴⁾。1945 年 9～10 月にかけて 3 回連続して襲来した台風と 1946 年 12 月 21 日の昭和南海地震によって現在の三好市山城町の川口駅～小歩危駅間で地すべりが活発化し、5 年間に亘って路線の損壊と修復が繰り返された。その事態の結果、路線変更の判断がなされ山城谷トンネル (2180 m) の建設によって地すべり地帯を避けることとなった。1962 年 2 月 13～20 日に断続的に発生した高知県大豊町旧国鉄土佐岩原～豊永間の深層崩壊 (崩壊体積 6 万 m³) では 2 名の人命が奪われ、41 日間不通となった。これらの災害が契機となり、旧日本国有鉄道に土讃線防災対策委員会が設けられ、小島丈児ら 4 名の地質学者によって路線沿いの綿密な地質調査が行われた⁽¹⁵⁾。この時に作成された資料は路線沿いに多色刷りの精密な地質図と詳しい斜面危険度分布図が付録する非常に貴重なものである。調査の結果、地すべりが頻発する泥質片岩地帯は大歩危トンネル (4179 m) などの長大トンネルの建設によって徹底的に斜面を避ける路線変更が行われた。おそらく、鉄道はわずかなレールの歪みが事故に直結するために、恒久対策としてこの選択がされたと思われる。一方で、大歩危峡谷沿いなどの砂質片岩地帯 (図-2) では、徐動性の地すべりよりも落石に警戒すべきであるために、長距離に亘って覆道が建設されており、電線を利用した落石警報器も設置された⁽¹³⁾。

大歩危地域の結晶片岩地域では、泥質片岩に地すべりが発生することが多い。この大歩危地域を含む 5 万分の 1 地質図「川口」図幅 (10 の範囲を対象として、藤田崇⁽¹⁶⁾ は 1970 年代に地すべりと地質の関係を明らかにしている。それによれば地すべりは泥質片岩が多く、次いで砂質片岩、塩基性片岩であり珪質片岩ではほとんど発生していない。なお、愛媛県大洲地域の三波川帯では泥質片岩よりも塩基性片岩に地すべりが明らかに多く発生しているとの見解 (坂野ほか⁽¹⁷⁾) もあり、場所によっては塩基性片岩の方が地すべりを発生させやすいこともあるかもしれない。さらに、藤田⁽¹⁸⁾ は結晶片岩の層面片理面 (三波川帯では堆積時に形成された層理面と変成作用による片理面の姿勢が一致している場合が多いためこのように表現される) と斜面傾斜との関係を調査し、流れ盤地域で地すべりの個数、面積ともに多く、受け盤地域では少ないことを明らかにした。これは、千木良雅弘⁽¹⁹⁾ も関東山地三波川帯において同様の傾向を確認している。また、以上の事実から泥質片岩の地すべりの発生場は地質構造の影響が強い

ことが明確になった。前述の千木良⁽¹⁹⁾は地すべりの形成を層状岩の剥離を伴う重力性の変形「岩盤クリープ」によるものと説明している。なお、藤田⁽¹⁶⁾は川口地域の傾斜頻度を調査し、結晶片岩は種類を問わず地すべりの分布は斜面の傾斜角が25~30度付近に集中し、それよりも緩くても急でも地すべりの分布は減少すると述べている。この25~30度付近の傾斜が結晶片岩地すべりの安息角であると考えられる。

結晶片岩の地すべりに関して、そのせん断変形が集中するすべり面(層)物質の研究についてもここでは触れておきたい。昭和50年(1975)度から3年間、旧科学技術庁の特別研究促進調整費において「結晶片岩地帯地すべり発生機構に関する総合研究」⁽²⁰⁾がなされた、この中では旧三加茂町(現在の東みよし町)の泥質片岩・塩基性片岩の双方が受け盤斜面に分布する木藤地すべりを主な試験地として、集中的な研究が行われた。同報告書の中で、地すべりのすべり層の物質として「銀灰色(明緑灰色)の粘土」を報告しており、その粘土鉱物組成は緑泥石および緑泥石/バーミキュライト混合層鉱物であった。この起源は緑泥石の圧砕・粘土化としており単純な地すべりのせん断による破碎物質であることを指摘している(同報告書⁽²⁰⁾、木野ほか工業技術院地質調査所グループの調査)。さらに、同報告書では泥質片岩や緑色片岩の風化系列として、Al-バーミキュライトを経てカオリナイトになることを述べている(具体的には、金原・藤井⁽²¹⁾に報告がある)。安藤・大久保⁽²²⁾は徳島県西部の結晶片岩の地すべり粘土を複数調査し、多くが原岩の物理的分解物である絹雲母(細粒の白雲母)、緑泥石、陽起石(現在ではアクチノ閃石と呼ぶことが多い)であり、モンモリロナイト(スメクタイト)は希であるとした。宮原ほか⁽²³⁾は、三波川帯の泥質片岩では同じくスメクタイトは希で、カオリン鉱物や緑泥石/バーミキュライト混合層鉱物も産出するが、それぞれ曹長石や緑泥石の風化物であるとした。高谷精二⁽²⁴⁾もモンモリロナイト(スメクタイト)の検出を報告しているが、断層・地層の境界など局所的な条件で形成されることを述べている。つまり低摩擦粘土鉱物であるスメクタイトは新第三紀層の泥岩などと異なり岩石全体に含まれている訳ではない。山崎・千木良⁽²⁵⁾は泥質片岩地すべりのすべり層の鉱物組成は、化学風化を受けている場所では石墨が消失し、緑泥石・黄鉄鉱が溶解してAl-バーミキュライトと針鉄鉱(ゲーサイト)が形成されていたと報告した。一方で、すべり層は化学風化の後に形成されたのでは無く、先に母岩の破碎物があって、化学風化はそれを追いかけて地表からの浸透水による酸化で発生していることを示した。以上に述べてきた限り、泥質片岩の地すべりでは風化の進展が直接地すべりの発生場・発生層準を決定しているのではないと思われる。断層などがすべり層に転化している可能性もあるが、それでは多くの地すべりが層面片理面に沿う流れ盤で形成されている理由にはならない。

それでは泥質片岩の地すべりはどのような場所に発生するのであろうか。これに関して三好市西祖谷山村の善徳地すべりなどで実施した筆者自身の研究(Yamasaki et al.

(26) を紹介したい。泥質片岩の組織に含まれる鉱物の中で最も強度が低いのは石墨（グラファイト）である。石墨は最大でも重量比で 0.5%程度含まれているに過ぎないが、組織中に薄く分布し、ほとんど強度を持っていない。実は泥質片岩が黒色片岩とも呼ばれるようにこの「黒色」の多少を決定しているのは石墨の量比である。そして、ミリメートルからセンチメートルの幅の領域における泥質片岩の硬さもまた石墨の分布密度が決定している。加えて、泥質片岩における石墨は海洋堆積物中の有機物が起源である。そして、前述したように三波川帯では層理面と片理面は一致しており、有機物に富む層はそのまま片理面と平行に保存されている。従って、石墨に富むマクロな層が、斜面や山体を横断し、河川の下刻が進んで下方の切断が起きれば、そのせん断強度の小ささ故に、地すべりが発生すると考えられる。泥質片岩の地すべり移動体には新鮮な岩石がそのまま移動する岩盤すべりとなっている状況が観察されるが、これもまた岩盤中に弱面が間欠的に存在しているためであり、それは石墨の濃集の多少による。泥質片岩は微褶曲もあり、地すべりのすべり面は凹凸が多いので、移動体が凹凸を乗り越えると移動体は伸展し、地すべり全体は岩層状の地すべりに移行する。さらに、脆弱層である石墨の存在状態から複数のすべり面が同時にせん断される状況もあるために、この作用もまた移動体の破壊を拡大させると思われる。

本章では、地質学的背景から考えられる泥質片岩で発生する深層崩壊についてのトピックも一つ述べておきたい。それは第 3 章で述べた清水構造帯と呼ばれる褶曲変形－強剥離帯と崩壊の関係である。1965 年 9 月 10 日に発生した徳島県三好市東祖谷山村大西の崩壊⁽²⁷⁾（図－2、崩壊体積 12 万 m³）や古くから地震・大雨で崩壊を繰り返していることが知られている高知県大豊町岩原のトウジ山の大崩壊地⁽²⁷⁾（図－2）など実際に清水構造帯の周辺では複数の深層崩壊が発生しているようにも思える。また、徳島県西部の地すべりを複数調査した安藤・大久保⁽²¹⁾ は、泥質片岩に発生している微褶曲構造が認められる場所では剥離構造が発達していることを述べており、地すべりとの関係も指摘している。褶曲変形－強剥離帯は清水構造帯として認識できるように帯状に分布しているか、または三波川帯に局所的に存在している可能性もある。吉野川上流部や支流の地蔵寺川など清水構造線・帯に沿って谷が形成されている場所もある⁽⁹⁾ が、大歩危・祖谷地域では比高が大きく隆起が著しい。隆起作用が相対的に大きな侵食量をはるかに上回っているのであろうか？それであれば、高頻度で斜面災害のような侵食イベントが起きていると考えられる。筆者はこの大歩危南方の微褶曲発達地域で地すべり・崩壊と地質構造の関係について研究を進めている。なお、四国外帯には明らかに侵食量が隆起量に対して大きいと思われる帯状の低起伏地形領域が他にも存在している（例えば仏像構造線南の四万十帯北縁地域、著者の指摘⁽²⁸⁾もある）。外帯の堆積岩・変成岩において風化花崗岩地域のような斜面災害の頻発域が存在することは明確には確認されていないと思われるが、今後の豪雨災害を考える上でも地質学的脆弱地

域の性質を検討するべきである。

5. 地すべり地を利用した集落と農業

地すべりは災害の一因でもあるが大歩危を含む祖谷地域は地すべり地形上のやや緩くなった土地を住居や畑作地として利用してきた。このような集落を傾斜地集落と呼び、大歩危地域のみならず四国山地に特有の景観である。有瀬集落（図-4）はその中でも高低差が最大規模であり、集落内耕作地の下端は標高約 200 m、最も高い神社（八幡神社）が標高約 800 m に位置し、600 m もの高低差がある。この有瀬を始め大歩危・祖谷地域の多くの傾斜地集落には古くからの言い伝え、社寺仏閣、代々受け継がれる旧家が存在し、少なくとも 4 百年以上もの歴史があるとされている（1985 年刊行の西祖谷山村誌の記述による）。

人々が傾斜地集落に居住する理由としては、多くの生活に関係する資源を山から得ていたことのみならず、川沿いに比べて洪水の影響を受けないことや、亀裂の多い地すべり地では斜面中腹で湧水が期待でき、良質の地下水を得やすいことがあると思われる。しかし、急傾斜であるために土壌の流失も発生しやすい。また、水稻耕作も難しい。そのため祖谷地方を含む徳島県西部では土壌流出を防ぐ独自の農業技術と傾斜地・乾燥に向けた作物（ソバ・茶・豆類）の栽培が発達した。ただし、国内では珍しい生活

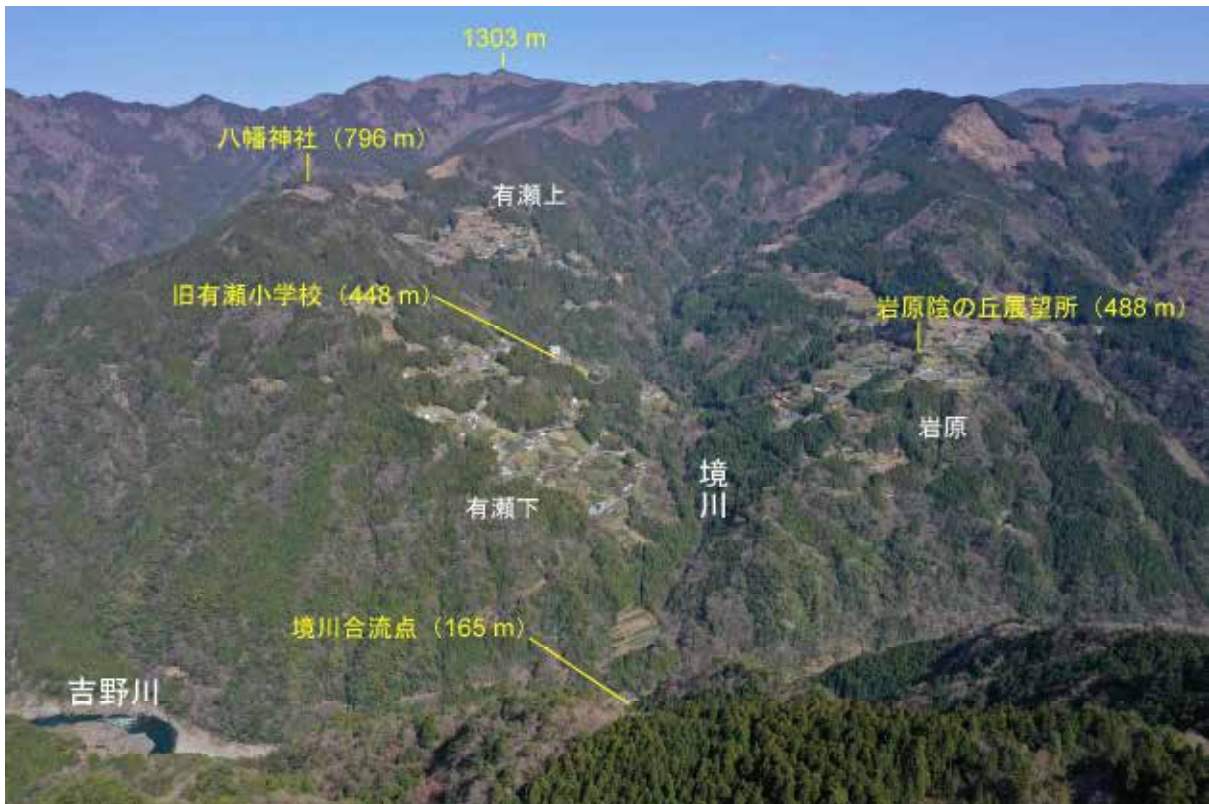


図-4 徳島県三好市西祖谷山村有瀬と高知県大豊町岩原の傾斜地集落。

スタイルであるが、実はヒマラヤ地方にも同様の傾斜地集落があり類似の農業が行われていることは興味深い点である。同じく興味深いのは地すべり地上の土地利用であるにも関わらず、泥質片岩地帯と御荷鉢ユニットに多い塩基性片岩・玄武岩地帯では土地の利用方法が異なることである（小出⁽²⁹⁾）。泥質片岩地域では、粗粒で粘着力の小さな風化残土のために透水性が大きく、水稻よりも乾燥地で栽培可能な植物や多年生植物の生育に向いている。祖谷地方の傾斜地集落でソバや茶の生産がさかんである理由にはこのような背景もある。一方で御荷鉢ユニットの塩基性片岩・玄武岩地帯では水田耕作も行われている。これは、泥質片岩起源のものに比べると風化残土が粘着質であり保水力が大きいためである（中島⁽³⁰⁾の中で紹介されている古谷尊彦による1997年の研究）。

6. おわりに

大歩危地域はその独特で美しい景観ゆえに、観光資源として四国地域では重要であるが、地球科学的にも、経済社会的な重要性としても、災害の発生地としても、そして文化的にも興味深い地域である。また、本文では述べなかったが、大歩危地域には溪谷全域の水没を伴うダム開発計画がかつてあり、それが大歩危一帯の地質学的貴重性を理解した地元住民に守られた結果、撤回され、後に国指定天然記念物に指定されたという経緯がある（殿谷・山崎⁽³¹⁾）。そういった意味でも大歩危地域は他に見本となる自然保護、ジオコンサベーション（地質・地形保全）の先進的地域であり、地域を包括する三好市は国内ジオパークの加盟を目指している。なお、本原稿は徳島地すべり観測所に所属する荒井紀之氏に粗稿を読んで頂き助言を頂いた。感謝申し上げます。

注釈

注 1

中央構造線活断層系とは、地質境界として存在していた断層（中央構造線）付近に、2, 3 百万年前以降に新たに生じた複数の活断層の集合体である。地質境界としての中央構造線と活断層としての中央構造線活断層系は概ね沿っているが必ずしも一致せず、地質境界としての中央構造線は関東から四国西端まで存在するが、同活断層系は紀伊半島から四国西端までのみ存在する。

注 2

地質境界としての中央構造線を境として太平洋側を外帯、日本海側を内帯と呼び、三波川帯、秩父帯、四万十帯は外帯に含まれる。日本地質学の父とされるエドモンド・ナウマンが命名して以降、古くから使われている地質学用語である。

注 3

三波川帯は九州東部から関東山地まで約 800 km にわたって分布する変成岩の連なり（変成帯）であり，群馬県藤岡市の三波川（さんばがわ）に分布していた変成岩に由来する．なお三波川帯の一部に含まれることもある御荷鉾（みかぶ）帯も同地の御荷鉾山に由来する．

注 4

四国の陸上部に露出する地質帯（体）の配列は現在のフィリピン海プレートが沈み込む南海トラフとほぼ平行であるが，フィリピン海プレートがもたらした物質が三波川帯・秩父帯・陸上部の四万十帯を形成したのではなく，これらは日本海拡大以前の日本列島付近に平行に存在していた過去のプレートの沈み込み帯によって付加された物質が起源であると考えられている．

注 5

結晶片岩の名称は，色，原岩，構成鉱物により様々な名称が与えられており，混乱があるようにも思われる．色に注目する場合は，黒色片岩，緑色片岩などの呼称があるが，黒色片岩は泥質片岩とほぼ同じであるものの，色は必ずしも黒系色とは限らない（泥質片岩には石墨を含まず，少量の緑泥石により緑色に見えるものもある）．また鉱物として最も多いのは雲母類であるために，雲母片岩と呼ばれる場合もあるが，岩石の色をもたらしている少量の石墨に注目して石墨片岩と呼ぶ場合もある．緑色片岩も同様の状況があるので要注意である．一方で「白色片岩」は特定の環境で形成された特定の鉱物を含む片岩を指すので，単純に石英や白雲母に富むような白い色の片岩には使用できない．なお，この白色片岩は国内での報告は無いと思われる．また「青色片岩」も同じく特定の鉱物を含む片岩に用いられている．

注 6

「地窓」とはフェンスター（独語で窓の意味）とも呼ばれ，低角の断層（衝上断層，押しかぶせ断層）を形成しながら乗上げた（押しかぶせた）岩体の一部が侵食され，断層の下位の岩石が露出するようになったものを指す．「ナップ」は衝上断層や横臥褶曲（ほぼ水平にまで横倒しになった褶曲）によって乗上げた比較的規模の大きな岩体である．文章ではイメージしにくいので，詳しくは構造地質学に関する教科書（例えば狩野・村田⁽³²⁾）にあるイラストを参考にして頂きたい．

参考文献

- 1) 大森博雄：大学テキスト—変動地形学，米倉伸之・岡田篤正・森山昭雄（編），古今書院，2001.
- 2) 植木岳雪・満塩大洗：阿讃山地の隆起過程：鮮新統三豊層群を指標にして．地質学雑誌，104，p. 247-267，1998.
- 3) 高橋雅紀：フィリピン海プレートが支配する日本列島のテクトニクス，地学雑誌，115，p. 116-123，2006.
- 4) 佃栄吉：西南日本弧のアクティブテクトニクス—前弧スリバーの西進運動にともなう変形像．地質学論集，40，p. 235-250，1992.
- 5) 池田倫治・後藤秀昭・堤浩之：四国西部の中央構造線断層帯の地形と地質，地質学雑誌，123，p. 445-470，2017.
- 6) 堤之恭：新版・絵でわかる日本列島の誕生，講談社，2021.
- 7) 岡本和明・青木一勝・丸山 茂徳：四国中央部三波川変成帯のテクトニクス，地質学雑誌（補遺），115，p. S37-S49，2009.
- 8) 原英俊・青矢睦月・野田篤・田辺晋・山崎徹・大野哲二・駒澤正夫：20 万分の 1 地質図幅「高知」（第 2 版），産業技術総合研究所・地質調査総合センター，2018.
- 9) 青矢睦月・横山俊治：日比原地域の地質，地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅），産業技術総合研究所・地質調査総合センター，2009.
- 10) 小島丈児・光野千春：5 万分の 1 地質図幅「川口」，地質調査所，1966.
- 11) 鈴木堯士：四国はどのようにしてできたか—地質学的・地球物理学的考察，南の風社，1998.
- 12) 日本地質学会（編）：日本地方地質誌—四国地方，朝倉書店，2016.
- 13) 大藤茂，下條将徳，青木一勝，中間隆晃，丸山茂徳，柳井修一：砂質片岩中のジルコンの年代分布に基づく三波川帯再区分の試み，地学雑誌，119，p. 333-346. 2010.
- 14) 四国鉄道 75 年史編さん委員会（編）：四国鉄道 75 年史，日本国有鉄道四国支社，1965.
- 15) 土讃線防災対策委員会：地質専門委員会報告書，日本国有鉄道，1964.
- 16) 藤田崇：地すべり—山地災害の地質学，共立出版，1990.
- 17) 坂野靖行・水野清秀・宮崎一博：大洲地域の地質，地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅），産業技術総合研究所・地質調査総合センター，2010.
- 18) 藤田崇，平野昌繁，波田重熙：徳島県川井近傍の地すべりの地質構造規制，地すべり，13，p. 25-36，1976.
- 19) 千木良雅弘：結晶片岩の岩盤クリープ（その 1）—関東山地三波川帯の地質構造と地すべり地形との関連，応用地質，25，p. 182-194，1984.

- 20) 科学技術庁研究調整局：結晶片岩地帯地すべり発生機構に関する総合研究報告書，科学技術庁，1978.
- 21) 金原啓司・藤井紀元，徳島県木藤一宗森地すべり地における結晶片岩類の風化（その1）—地製結晶片岩類の風化，粘土科学，20，p. 120-128，1980.
- 22) 安藤 武・大久保太治：徳島県西部結晶片岩地域の地すべり，地質調査所月報，21，p. 395-436，1970.
- 23) 宮原正明・宇野洋平・末峰宏一・地下まゆみ・北川隆司・矢田部龍一：四国中央部の三波川，御荷鉢及び秩父帯に産する粘土鉱物について—善徳，怒田，八畝，蔭，西の谷地すべり及び桧山トンネルより得られたボーリングコアの分析結果，日本地すべり学会誌，42，p.53-60，2005.
- 24) 高谷精二：結晶片岩地域における地すべりと粘土鉱物（1）—徳島県・穴吹町首野地すべり，井川町倉石地すべり—，新砂防，109，p. 28-34，1978.
- 25) 山崎新太郎・千木良雅弘：泥質片岩の風化メカニズム，および，風化と地すべりとの関係について—四国三波川帯の不攪乱ボーリングコアを用いた解析，地質学雑誌，114，p. 109-126，2008.
- 26) Yamasaki, S., Chigira M., Petley D. N.: The role of graphite layers in gravitational deformation of pelitic schist, *Engineering Geology*, 208, p. 29-38, 2016.
- 27) 四国山地砂防事務所：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，2004.
- 28) 山崎新太郎：愛媛県宇和島周辺における岩盤崩壊の発生場，京都大学防災研究所・平成30年7月豪雨災害調査報告，京都大学防災研究所，2018.
- 29) 小出 博：日本の国土 ，東京大学出版会，1973.
- 30) 中島峰広：日本の棚田—保全への取組み，古今書院，1999.
- 31) 殿谷梓・山崎新太郎：徳島県，大歩危・小歩危峡谷の開発と保護—三好ジオパーク構想地域の背景，地形，43，p.35-49，2022.
- 32) 狩野謙一・村田明広：構造地質学，朝倉書店，1998.

「崩壊した丸亀城石垣とサヌカイト山の地すべり地形」勉強会
(第一回若手技術者支援企画) 開催報告

Report on the first field excursion trip for young geological engineers in
Marugame Castle and Kanayama-Sanukite Mountain landslide, Kagawa

山崎 新太郎 (京都大学防災研究所・徳島地すべり観測所)

Shintaro Yamasaki (Tokushima Landslide Observatory, DPRI Kyoto University)

地すべり学会関西支部では，若手技術者支援企画として，2022年11月3日に「崩壊した丸亀城石垣とサヌカイト山の地すべり地形」勉強会を実施した．参加者は9名，うち，本学学生が2名，若手技術者が5名，一般学会員1名であった．世話人は本文の著者である山崎と，事務担当として徳島地すべり観測所の森長公仁氏がサポートした．以下，訪問先について簡単にレポートする．

1. 丸亀城と亀山の巡検

香川県第二の都市，丸亀市のシンボルである丸亀城の石垣は天然の山である標高66mの亀山の頂部を花崗岩の石垣で覆い築城されている（写真-1）．多段の全ての石垣



写真-1:
大手門西側からの丸亀城

を合わせた石垣の高さは日本一とされ，慶長2年（1597年）に築城が開始された．これまでも石垣は傷み修復が繰り返されてきたが，2018年に南西部分が崩壊した．現在，令和6年3月の復旧を目指し，5年間かけた工事が実施されている（丸亀市・丸亀城HP）．今回の勉強会では，そのPRセンターを訪れ，崩壊の様子と修復工事を見学すること，そして，亀山と後に訪れる坂出市・金山（かなやま）に代表される火山岩で覆

われる香川県の山々の斜面災害を学習することがねらいであった（図－1）。



図－1：
丸亀城－亀山での巡
検案内地

丸亀城の石垣の上からは讃岐平野と山々を一望することができる（写真－2）。讃岐平野は香川県の大部分を占める平野であるが，その平野の上に標高約 600 m より低い多数の独立峰が散在し，独特の景観を形成している。これらの独立峰は差別侵食によって形成された卓状台地「メサ」，孤立丘「ビュート」と考えられているものや，または侵食された火山の火道が露出した「火山岩頸（Volcanic Plug）」と考えられているものがある。メサ，ビュート，火山岩頸のいずれも花崗岩の基盤を覆うか，貫くかした安山岩が関係して形成されており，安山岩の直下または近傍に凝灰岩が産することも多い。このうち，亀山は丸亀市のボーリング調査で判明しているその地質構造から火山岩頸と考えられており，西側のかぶと岩（写真－3）と呼ばれる場所には柱状節理が発達する安山岩を観察することができる。



写真－2：
丸亀城三の丸からの坂
出方面の眺望。円錐形
の山は讃岐富士として
知られる飯野山。台形
の山は青の山，奥に常
山，金山，城山など，
山頂が火山岩に覆わ
れた山々が観察でき
る。



写真－３：
柱状節理の発達する
火山岩からなる、かぶ
と岩。



写真－４：
2022年11月時点での
石垣復旧工事の状況。

石垣の崩壊に関しては、崩壊場所に隣接するPR館で多数の資料を閲覧できるほか、詳しい情報が公開されているのでそちらを拝見して頂ければと思うが、崩壊のメカニズムに関しては現在も不明な点が多く結論には至っていないようである。2022年11月現在、石垣の材料である花崗岩類は解体され崩壊地の前面のグラウンドや丸亀市の各地で保管され、組み直され復旧される予定である（写真－４）。

2. 金山とその周辺の巡検

次に訪れた坂出市の金山は香川大学の長谷川修一先生の公開されている資料（下記文献欄参照）に詳しく、それによれば花崗岩、凝灰岩、そしてその上位に火山岩のサヌカイトがほぼ水平に分布する。つまり、大規模な深層崩壊や地すべりが発生しやすいキャップロック型の地質構造を成している。そして金山の東側に長さが1.5km、幅が



写真－５：
坂出市東部の白峰山からの金山（写真中央）。金山の東側は２段の地形となって標高を減じている。侵食されているが明瞭で巨大な地すべり地形である。



図－２：
金山周辺の案内地

1 km に及ぶ大規模な地すべりが認められる（写真－５，図－２）。今回の巡検では，山頂北東側の登山道から山頂にアプローチしたが，この登山道は地形と地質の関係を学ぶことにも最適である。登山道からはほぼ１時間で山頂に達する（図－２）。

登山道からしばらくは数十センチ大のサヌカイトが中腹部まで散在するがそのサヌカイトの表面は風化して黄褐粘土が付着している。これらはサヌカイト層よりも下方にあるため，落石が風化したものと考えられる。一方で，頂上直下には，おそらく工事等によって掘削されたサヌカイトの岩片が登山道に撒かれている場所が一部あり，その上を歩くと心地よい金属音が鳴る（写真－６）。この登山道は，登山者を楽しませ，非常に面白い。

登山道上で露頭や地質境界を観察することはできないが，詳しい地形の説明をする



写真－6：
金山山頂直下のサヌカイトの鳴り響く登山道。

と、標高 170 m より上が急斜面となり，また高密度 DEM を元にした地形表現図を観察すると谷の頂部は 170 m～200 m 付近に水平に並んでいるように思える．おそらくはこの標高付近がサヌカイトと下層の凝灰岩または花崗岩の境界と考えられ，他の火山岩キャップロック地域と同じく，高透水性火山岩層の地下水の出口（湧水）が地層境界に形成されているものと推定される．実際に巡検時にはパイピングと思われる微地形を観察できた．そして，金山の頂部付近は中腹部以下に認められた転石は少なくなる．この頂部は原位置で風化した厚い風化殻に覆われていると思われ，風化殻はボーキサイトとしてアルミニウムの鉱床を形成し戦中には採取されたとのことである．

登山道から離れ，地すべり地形のある金山の東麓にはため池もあるが，湧水が作った池もあり，かつてその水を利用してところてんが作られた．八十場（やそば）のところてんとして坂出の名物の一つである（写真－7）．この湧水もキャップロックの地質構造と無関係で無いと思われる．湧水に悩んできた同地で，地質境界から浸出した恒常的な地下水の供給が水を多量に使う食品の生産を促したのかもしれない．また，金山周辺の神社，民家の石垣にもサヌカイトがふんだん利用されており，石材としてもサヌカイトの有効な利用がされていることも興味深い（写真－8）．

サヌカイトおよびその岩石類（斜長石斑晶を欠く無斑晶質の古銅輝石安山岩（サヌキトイド））は中期中新世（約 1300 万年前～1500 万年前ごろ）に現在の瀬戸内海周辺で発生していた瀬戸内火山帯で噴出したとされている．愛知県の鳳来寺山，大阪府の二上山，愛媛県石鎚山などにも同時期の火山岩があり，それらの同時期の地質を瀬戸内火山岩類とするようである．サヌカイトはその名の通り讃岐の国にちなむもので，高い金属音を放つことから，石の楽器として著名である（写真－9）．しかし，金属音を放つものは実は少なく，特に坂出市・金山（かなやま）産ものが美しい金属音を放つ



写真－7：
サヌカイトの石垣



写真－8：
八十場名物ところてん「清水屋」と湧水池（左）.

ことで最も有名である。サヌカイトは地質学会が選定した香川県の石である他、高松空港や坂出市内の文化施設や公共施設にもあり、その石と音色は地元で愛されている。

丸亀城のある亀山と金山，両方合わせて1日で回ることができ，多くの地質現象を楽しみながら学習できる。会員の皆様にもぜひ訪れて頂きたい。

文献：

石垣の名城「丸亀城」ホームページ（丸亀市） <https://www.marugame-castle.jp/>

長谷川修一・鶴田聖子（2013）讃岐ジオサイト探訪 香川大学生涯学習研究センター研究報告 別冊，香川大学



写真－ 9 :
清水屋にあるサヌカ
イト石琴



解散場所である JR 八十場駅で参加者全員の集合写真

地震計による斜面崩壊の検知事例
— 令和 2 年豪雨時の長野県喬木村の場合 —
An example for seismic detection of landslides
— in case for Takagi village, Nagano prefecture in 2020 —

土井 一生（京大防災研）

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

斜面崩壊の早期検知は、天然ダムの決壊による土石流など斜面災害の二次災害の防止や巻き込まれた人々の早期救出にとって重要である。広域における斜面崩壊発生の認識方法としてヘリコプターによる空中からの目視がおこなわれるが、特に悪天候時や夜間は運用が難しく、また、検索エリアを絞ることができれば効率的な認識につながる。近年、地震計による斜面崩壊によって励起された地震動の検知事例が報告され^{1)~4)}、早期検知に資することが期待される。しかしながら、既存のネットワークによって検知されうる斜面崩壊の規模や形態、膨大な連続地震波形記録の中からリアルタイムに斜面崩壊による地震波形を認識する方法が明らかにされておらず、自動検知は実現されていない。地すべりや土石流などの形態、あるいは、地質の違いによって放射される地震波の強さや周波数特性が変わるのか、について明らかにすることがこうした問題の解決へのステップとなるが、そのためには事例の蓄積が必須である。そこで、本研究では、令和 2 年豪雨に伴って長野県喬木村で発生した斜面崩壊を例として、放射された地震動の特徴を整理した。

2. 令和 2 年豪雨時の長野県喬木村における斜面崩壊

長野県南部に位置する喬木村（図-1）においては、2020（令和 2）年 6 月下旬から 7 月中旬にかけて梅雨前線の影響により雨が断続的に降り続き、直近（距離 9 km）のアメダス飯田観測点における 6 月 28 日から 7 月 11 日までの総降水量は 515 mm に達した（図-2）。特に、7 月 11 日 17 時 40 分から 4 時間強にわたって最大 1 時間降水量 38.5 mm の降水が記録された（連続降水量 74.5 mm）。そのような状況下、喬木村加々須地区において 11 日深夜から 12 日未明に大規模な斜面崩壊が発生した。災害の発生について村に連絡があったのは 11 日 23 時 10 分ごろ⁵⁾であるが、資料によっては発災時刻が 11 日 23 時 20 分ごろ⁶⁾ または 12 日 1 時 30 分ごろ⁷⁾ と推定されている。この斜面崩壊による人的な被害は免れたものの、斜面下を走る県道が封鎖され、33 世帯 56 人の孤立集落が生じた⁷⁾。



図-1: 斜面崩壊発生場所 (破線).

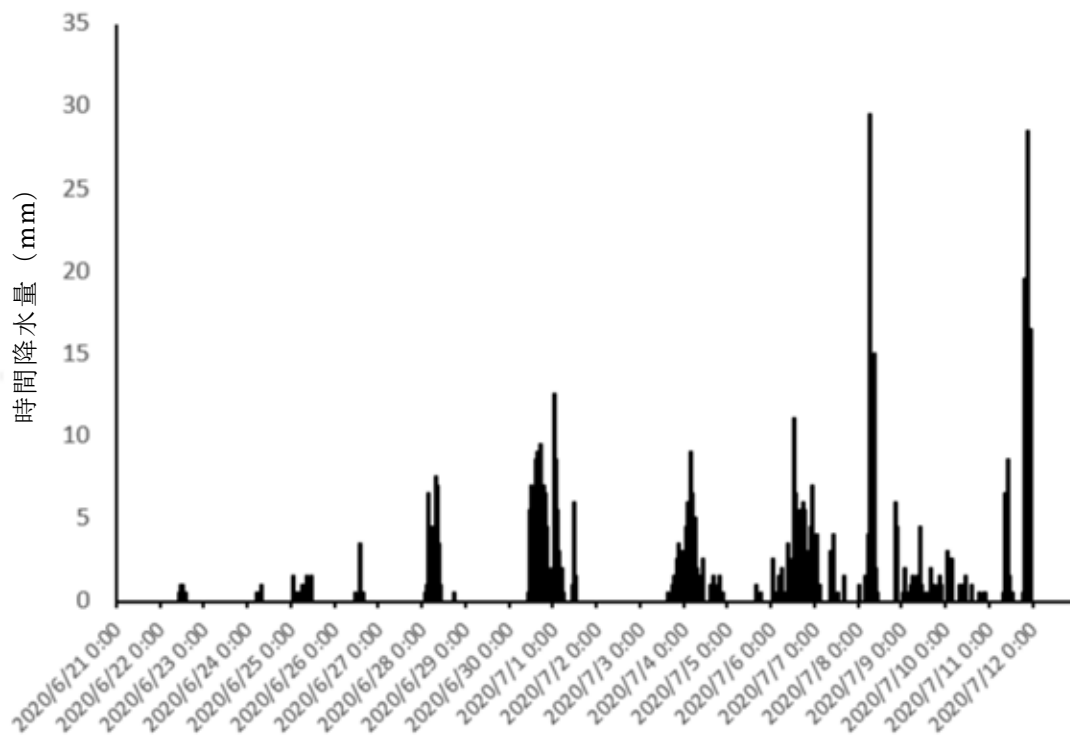


図-2: アメダス飯田観測点における6月21日から7月12日までの時間降水量.

崩壊斜面の地質は、中生代後期白亜紀の花崗岩とされ（シームレス地質図）、ところどころに泥質片麻岩が挟まる。Google Earth 等で崩壊発生前の空中写真を見ると、移動体のブロック化が見受けられる。崩壊直後にはパイピングが見られた⁷⁾ことから、このような素因を持つ斜面に大量の地下水が供給されたことによって、不安定化が促進したために崩壊が発生したことが示唆される。

崩壊体積を把握するために、崩壊斜面の測量をおこなった。ただし、測量日は法面対策工事（排土および吹き付け）完成後の2022年12月13日であり、推定される崩壊体積はあくまで目安である。測量はレーザーテクノロジー社製レーザー距離計TruPulse360により対岸からおこなった。図-3に結果を示す。崩壊の範囲は幅40-60m、長さ約80mにおよんだ。斜面中央部においてすべり面の傾斜が一旦緩く、末端は急傾斜を示した。崩壊深は最も大きなところで約10mほどであった。これらより崩壊体積は7,000-15,000 m³と見積もられた。

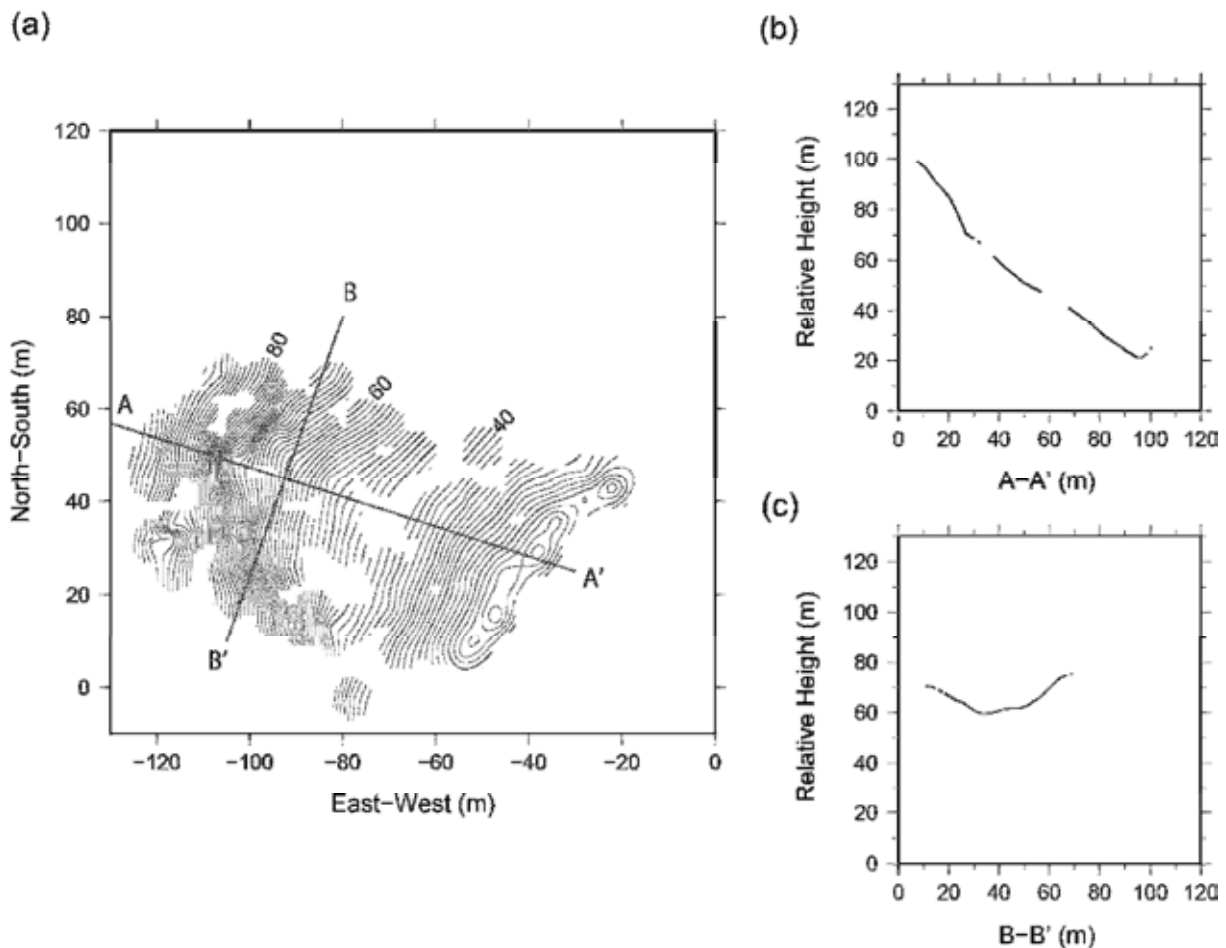


図-3: 測量の結果。対岸の測量基準点からの相対標高で示す。灰色の領域における標高値は測定値の空間補間の際に外挿された値であり、実際の地形とは異なる。

3. 地震波形記録の概要

防災科学技術研究所高感度地震観測網 (Hi-net⁸⁾) や気象庁によって高感度速度計が日本全国に 20–30 km 間隔で設置され、連続地震波形記録が取得されている。本研究では図-4 に示す崩壊斜面周辺の 6 点の記録を解析に用いた。

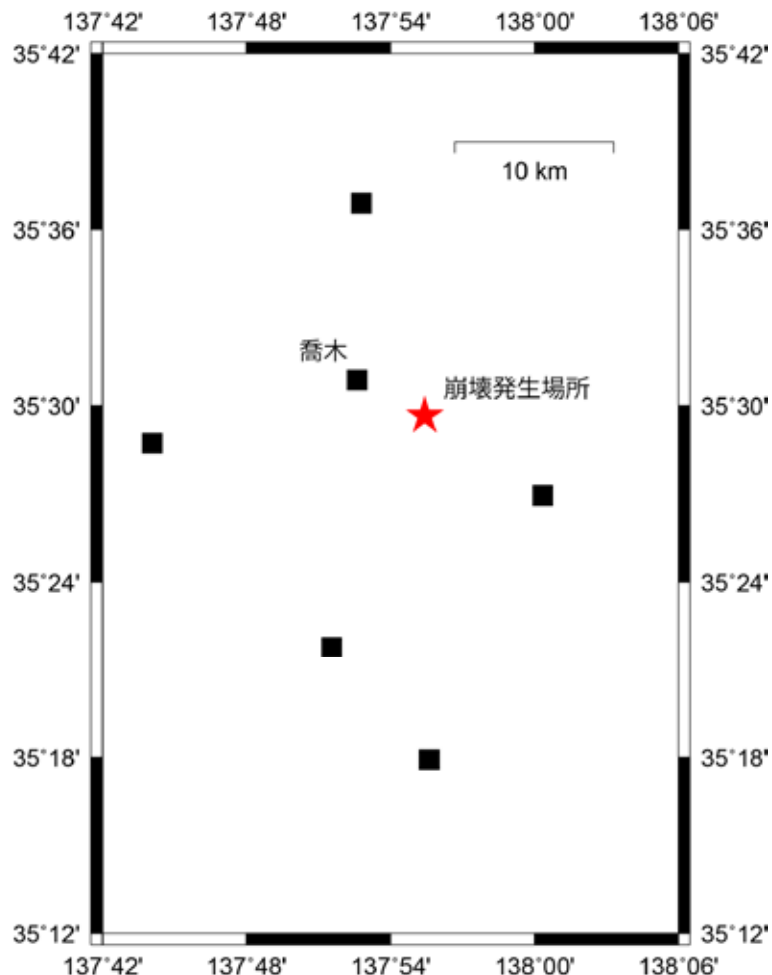


図-4: 崩壊発生場所 (赤星) と用いた地震観測点の位置 (黒四角)

図-5 に崩壊斜面に最も近い喬木観測点 (水平距離 4 km) における、斜面崩壊が発生したとされる 7 月 11 日 23 時から 7 月 12 日 2 時までの連続地震波形記録を示す。継続時間が数秒程度の震動は何度か見られるものの、継続時間が数十秒に至る震動は 7 月 11 日 23 時 34 分ごろと 7 月 12 日 1 時 15 分ごろの 2 回のみ記録されている。このうち、7 月 11 日 23 時 34 分ごろの震動には明瞭な P 波、S 波の立ち上がりが認められるため、自然地震によるものと考えられる (実際、気象庁一元化カタログには 7 月 11 日 23 時 33 分 59.2 秒に飛騨山脈においてマグニチュード 1.7 の地震が記録されている)。

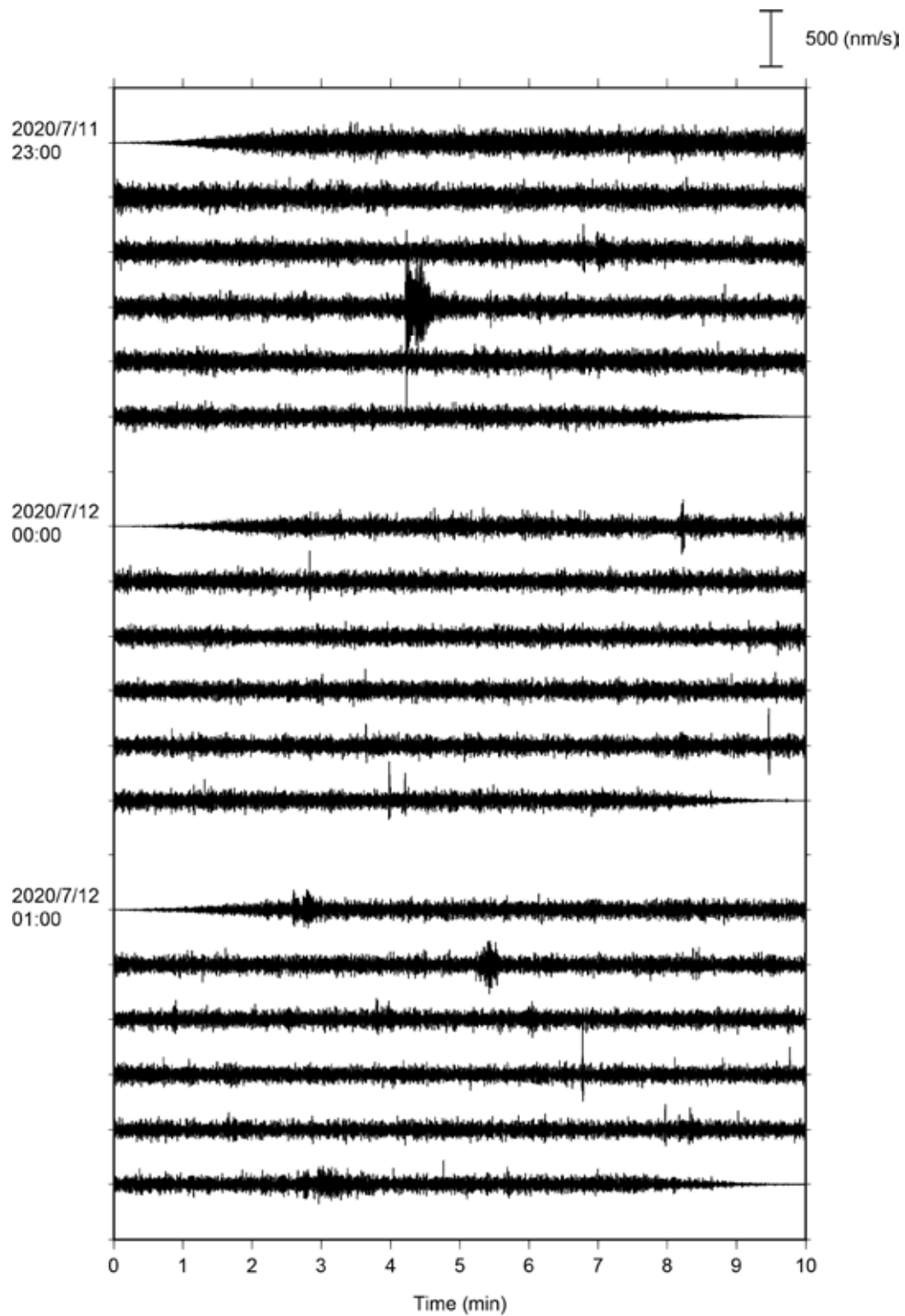


図-5: 喬木観測点における2020年7月11日23時から7月12日2時までの連続地震波形記録(上下動)。0.5-20 Hzのバンドパスフィルターを施した。1時間波形記録にコサインテーパーをかけたため、毎正時の前後で振幅が小さくなっている。

一方、7月12日1時15分ごろの震動は、その立ち上がりは不明瞭であり、相当する自然地震が気象庁一元化カタログには掲載されていない。そこで、この震動の周波数特性を明らかにするため、ランニングスペクトルを計算した。その結果を図-6に示す。1時15分ごろの震動は、1-3 Hzに卓越周波数を持ち、継続時間が20-30秒程度であることがわかる。続いて、この震動と喬木村の斜面崩壊との関連を調べるため、周辺の観測点の地震波形記録を崩壊斜面から観測点までの距離に従って並べた図を図-7に示す。なお、波形には震動の卓越周波数である1-3 Hzのバンドパスフィルターを施した。その結果、崩壊斜面から10 km以内に位置する2観測点において、1時15分ごろにほぼ同時に同様の震動が記録されているのに対し、10 kmを超える観測点においては、同時刻に日常ノイズ以外の何らかの震動を確認することができないことがわかった。

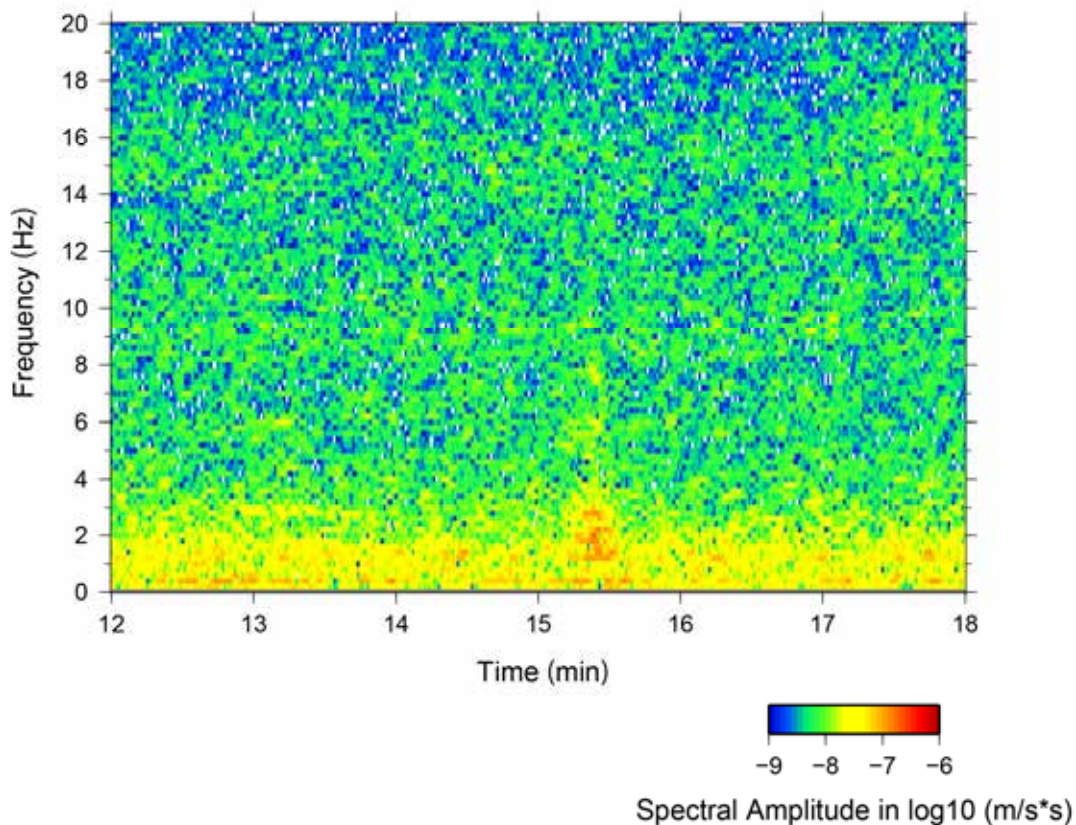


図-6: 喬木観測点における2020年7月12日1時12分から1時18分までのランニングスペクトル(上下動)。

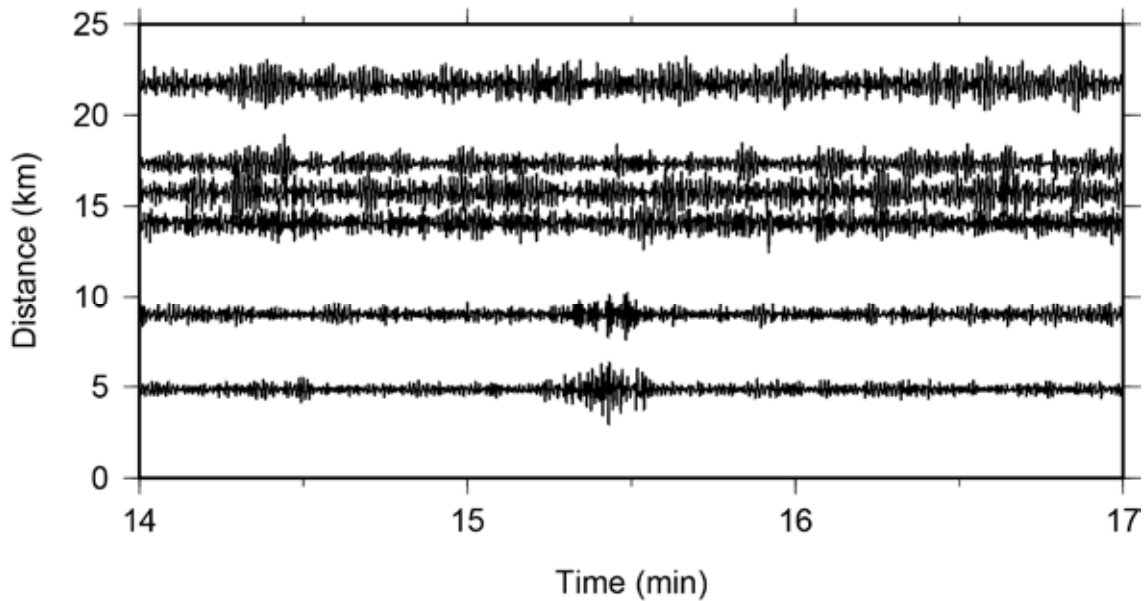


図-7: 崩壊発生場所からの距離に従って並べた 2020 年 7 月 12 日 1 時 14 分から 1 時 17 分までの地震波形記録 (上下動, 1-3 Hz のバンドパスフィルターを適用). 各波形は最大振幅で振幅を規格化している.

4. 議論・まとめ

前章において述べた 7 月 12 日 1 時 15 分ごろの震動が持つ波形の特徴や卓越周波数, 継続時間は, 既往研究^{1)~4)}によって報告されている斜面崩壊による地震動の特徴と類似した. また, 斜面崩壊発生場所に近い地震観測点においてはノイズレベルを超える振幅で震動が検知された一方, 比較的離れた地震観測点においてはノイズレベルを超える震動は確認できなかった. 一般に地震動の大きさは震源から離れるにしたがって幾何減衰および非弾性減衰のために振幅が減衰することを考慮すると, 検出された 7 月 12 日 1 時 15 分ごろの震動の震源を崩壊発生場所付近と考えることも矛盾しない. これらのことから, この波形記録は喬木村の斜面崩壊による地震動である可能性が示唆される. 崩壊体積が 10,000 m³ 程度でも, 観測点の条件を整えば, 現在の定常地震観測網でも斜面崩壊によって励起された地震動が検知されうることを示している.

ただし, 検出された震動が斜面崩壊によるものだとしても, 比較的地震観測点が密に分布する地域であるにもかかわらず, 震動を認識できる観測点は少なく, 励起された地震動の大きさは小さいと見積もられる. 実際に, 既往研究⁹⁾においては, 崩壊規模がほぼ同じかやや小さな斜面崩壊に対して, より遠く離れた観測点において崩壊によって励起されたと推定される地震動が認識されている. 伝播経路上の減衰構造の違い, 観測点のサイト増幅特性やノイズレベルの違いなどを考慮する必要はあるが, 斜

面崩壊の形態や地質によって励起される地震動の大きさに違いがある可能性が指摘される。リアルタイムモニタリングの実現には、さらなる事例収集を継続し、その多様性について議論することが必須である。

謝辞

防災科学技術研究所高感度地震観測網，および，気象庁の地震波形記録を使用させていただきました。気象庁アメダス観測点の気象データ，および，気象庁一元化震源カタログ，国土地理院の地理院地図，産業総合技術研究所の20万分の1日本シームレス地質図を参照させていただきました。図表の作成には General Mapping Tool¹⁰⁾ を使用させていただきました。なお，本研究は JSPS 科研費 JP 21K18792 の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) Suwa, H., Mizuno, T., and Ishii, T. 2010. Prediction of a landslide and analysis of slide motion with reference to the 2004 Ohto slide in Nara, Japan. *Geomorphology*, Vol. 124, pp. 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.003>.
- 2) Yamada, M., Matsushi, Y., Chigira, M., and Mori, J. 2012. Seismic recordings of landslides caused by Typhoon Talas (2011), Japan. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 39, L13301. <https://doi.org/10.1029/2012GL052174>.
- 3) Doi, I. and Maeda T. 2020. Landslide characteristics revealed by high-frequency seismic waves from the 2017 landslide in central Japan. *Seismo. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1785/0220200032>.
- 4) 土井一生・前田拓人・釜井俊孝・王功輝. 2020. 地震波形記録による斜面崩壊の発生場所と発生形態の推定 —2017年九州北部豪雨災害・日田市小野地区の斜面崩壊を例として—, *応用地質*, 61, 5, 245-254.
- 5) 朝日新聞. 2020. 長野県南部で土砂崩れ 1人骨折, 64人集落孤立, <https://www.asahi.com/articles/ASN7D5HP5N7DUOOB119.html>. (2023年1月30日閲覧)
- 6) 長野県. 2020. 令和2年7月豪雨に関する被害について, (「宮下一郎ブログ」内 <http://m-ichiro-blog.net/wp-content/uploads/2020/07/higai-minami-shinshu.pdf>) (2023年1月30日閲覧)
- 7) 国土技術政策総合研究所・土木研究所. 2021. 令和2年(2020年)7月豪雨 道路災害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料第1151号(土木研究所資料第4411号).
- 8) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2019. NIED Hi-net,

<https://doi.org/10.17598/NIED.0003>.

- 9) 土井一生・前田拓人・加藤愛太郎・武田哲也・村尾英彦. 2021. 短周期地震波を用いて定常地震観測網はどこまで小さな斜面崩壊を検知できるか?. 2021 年度日本地震学会秋季大会予稿集. S02-03.
- 10) Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. and Wobbe, F. 2013. Generic Mapping Tools: Improved Version Released, Eos Trans. AGU, Vol. 94, No. 45, pp. 409.

編集後記

2023年1月、私の所属の学生見学で大阪府柏原市の亀の瀬地すべりを訪問しました。ご存じの方も多いと思いますが、亀の瀬地すべりは事業規模の大きさなどから国内で最も有名な地すべり地の一つです。以前から亀の瀬地すべりを管轄する大和川河川事務所では事前申し込みによる見学ツアーを実施していましたが、ここ最近、見学者が急増し一般の観光バスツアーのコースにも見学ツアーが組み入れられているほどの人気だそうです。これには2021年に文化庁が指定する日本遺産として「龍田古道・亀の瀬」が選ばれたという出来事が関係しています。日本遺産のテーマは「もう、すべらせない!!～龍田古道の心臓部「亀の瀬」を越えてゆけ」。テーマにあるように龍田古道に散らばる歴史遺産のみならず、地すべりとの闘いの歴史が大きく評価され選定に至ったとのこと。それには排水トンネルの施工中に一度地すべりで埋もれた旧大阪鉄道隧道が、80年ぶりに奇跡的に発見されたという幸運もありますが、もちろんこれまでの関係者の努力もあったのでしょう。現地の資料室と見学ツアーの充実ぶりには驚かされます。この日本遺産指定は最も成功した例かもしれませんが、近年盛り上がっている各地のジオパークでも地すべり地が地質遺産・学習の場として指定されている例があります。実物を見学できる場所で、地すべりの実態と対策を知っていただく機会があるのは技術者、研究者のみならず社会を構成する全ての方にとって重要なことと思います。

(令和5(2023)年2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

2023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	06-4801-2259	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

四国・大歩危地域の地形・地質・斜面災害 —地球科学研究の最前線と地すべりの研究—	1
	山崎新太郎（京都大学防災研究所）
「崩壊した丸亀城石垣とサヌカイト山の地すべり地形」勉強会 （第一回若手技術者支援企画）開催報告	17
	山崎新太郎（京都大学防災研究所）
地震計による斜面崩壊の検知事例 —令和2年豪雨時の長野県喬木村の場合—	25
	土井一生（京都大学防災研究所）
編集後記	35
	山崎新太郎（京都大学防災研究所）

編集委員 山崎新太郎

らんどすらいど No.38 (2022)

2023年2月6日 印刷

2023年2月13日 発行

発行者 (公社) 日本地すべり学会 関西支部

住所 〒611-0011 宇治市五ヶ庄

電話 (0774) 38-4112