Abstract

This report presents characteristics of the landslide magnitude and distribution in the southwestern part of Ehime Prefecture, according to field survey and geospatial analysis results on landslides and related sediment disasters caused by the heavy rain event of July 2018. We identified 2,453 landslides (Total area of 810,920 m²) within the study area of about 47 km² using aerial photographs taken just after the rain event. Although there were little differences in rainfall intensity and total rainfall between the north and south side of the geological boundary of the Chichibu and Shimanto Belt, which was located at the center of the study area, landslides concentrated in the Shimanto Belt of the south side. In the Shimanto Belt, landslides were the most frequent in sandstone area. Most of the landslides were less than 100 m² and concentrated on slopes used for orchards. Relatively large-sized landslides with the order of 1,000-10,000 m² simultaneously occurred in the sandstone area. They included deep-seated slides of rock mass detached by joints, which are common features of the sandstone in this region.

Key words: Rainfall-induced landslide, Rainfall distribution, Geological boundary, Land use

I. はじめに

2018年（平成30年）6月28日から7月8日にかけて台風第7号や梅雨前線の影響により、西日本から東海地方を中心に広い範囲で記録的な大雨となった（防災科学技術研究所，2018；気象庁，2018）。この大雨による土砂災害の発生件数は北海道から鹿児島県にかけての1都2府28県で計2,512件（土石流等769件、地すべり55件、かさ崩れ1,688件）にのぼり、最近10年間の年平均土砂災害発生件数（2008〜2017年の統計で年間1,106件）の2倍以上に達した（2018年9月25日時点の集計：国土交通省，2018）。

道府県別の土砂災害発生件数をみると、広島県と愛媛県で特に多く、両県ともに200件以上の土砂災害が報告されている（国土交通省，2018）。広島県では、安芸郡坂町、熊野町、呉市、東広島市など、県南部を中心に広い範囲で多数の斜面崩壊や土石流が発生している（広島大学平成30年7月豪雨災害調査団，2018；広島県土木建築局砂防課，2018；海備ほか，2018）。一方、愛媛県では、西予市や宇和島市
図1 愛媛県南西部における平成30年7月豪雨の雨量分布
Fig. 1 Rainfall distributions of the heavy rain event of July 2018 in the southwestern part of Ehime Prefecture.

を含む県南西部の比較的狭い範囲に集中して多数の斜面崩壊や土石流が発生している（平成30年7月豪雨愛媛大学災害調査団，2018；管原ほか，2019）。

本稿では，愛媛県内でも土砂災害の発生件数が特に多かった県南西部で現地調査を行い，土砂災害の発生状況を把握するとともに，土砂災害の主な原因となった斜面崩壊の規模や，発生箇所の分布と地質・地形・植生分布との関係について分析した結果を報告する。
2. 調査地域
調査地域は愛媛県南西部の西予市宇和町から宇和島市吉田町および三間町にかけての範囲である。西予市と宇和島市の2市では、これまでに計416件の土砂災害が報告されている（2018年10月5日時点の集計：愛媛県災害対策本部、2018）。その大半がこの地域で発生しており、人的被害や住家被害、農林業被害も甚大なものとなっている。本章では、この地域における雨量および土砂災害の概況、地質・地形・植生分布について述べる。

2.1 調査地域における雨量および土砂災害の概況
調査地域を含む内子町、大洲市、西予市、宇和島市、宇賀和都愛南町では、発災から約30日が経過した2018年7月11日に国土地理院が空中写真撮影を行っており、その正射画像と空中写真判読で抽出した崩壊地等の地形変化発生箇所の分布図を公開している（国土地理院、2018）。

図1に国土地理院による空中写真判読結果と気象庁解析雨量データをもとに作成した雨量分布図を重ね合わせたものを示す。1～6時間の最大積算雨量で特に顕著なように、宇和海海上の日産島付近から吉田半島付近を横断して四国山地にかけて、南北両方向に延びる強雨域が形成されていたことがわかる。この強雨域内では1時間最大で50mm以上かつ6時間最大で180mm以上の非常に激しい雨が降った。愛媛県内でも、特に吉田半島の周辺に斜面崩壊や土石流等が集中した原因はこうした雨量分布の特徴に求めることができる。

一方で、強雨域のほぼ中央に位置する調査地域では、西予市と宇和島市間の境界を挟んで宇和島市側に崩壊地域が集中していた。調査地域内の気象庁解析雨量データをもとに作成した西予市と宇和島市（それぞれ後述する秩父帯と四万十帯の領域に対応する）の降雨時刻歴を図2に示す。この図をみると、西予市、宇和島市ともに7月5日3時頃から徐々に雨が強まって7日7時頃にピークを迎えており、7日1～8時頃に1時間10mm以上の雨が約7時間連続して降っている点を含めて、非常によく似たパターンで推移している。また、ピーク雨量を記録した7月7日7時における前1時間雨量と6月28日からの総雨量にも大きな差はない。すなわち、調査地域内には同程度の雨が降ったにもかかわらず、崩壊地の分布には顕著な偏りが生じていたことになる。

図2 調査地域における降雨時刻歴（2018年6月28日～7月8日の気象庁解析雨量データをもとに算出した西予市と宇和島市（平均雨量）

Fig. 2 Rainfall time histories in the study area (averaged rainfalls in Seiyo and Uwajima city calculated using the JMA Rader-AMEDAS rainfall data between June 28 and July 8, 2018).

2.2 調査地域における雨量および土砂災害の概況
図3に20万立方の1日本シームレス地質図V2（産総研地質調査総合センター、2018）をもとに作成した調査地域の地質分布図を示す。調査地域の地質は、中央にある四国山地西縁の主稜線に沿って東西方向に延びる仏像構造線を境として、その北側に分布するジュラ紀付加コンプレックスの秩父帯と、その南側に分布する白亜紀付加コンプレックスの四万十帯に区分される。

この地域の秩父帯は、南部秩父帯の斗賀野層群とその構造的下位にある三宝山層群に属する（松岡、1998）。斗賀野層群がチャート・砂岩を主とするものに対し、三宝山層群は石灰岩・玄武岩・チャート・珪泥岩・チャート角礫岩・泥岩・砂岩で構成される（松岡、1998；宮崎ほか、2016）。

この地域の四万十帯は、四万十帯北帯の佐伯層群（下部四万十層群）に属し、砂岩－頁岩・砂岩頁岩互層で構成される（寺岡・栗本、1989）。他方で、宇和島市周辺の四万十層群はアンモナイトやイノソラムスなどの大型化石を多数含む浅海堆積層であることが古くから知られており、主に深海堆積層のター ビダイクからなる四国地方の他の地域の四万十層群から区別されることが多い（例えば、波田ほか、1991）。宇和島市周辺の四万十層群を対象とした一連の研究で、寺岡・栗本（1986）および寺岡ほか（1986）
は10地塊・19群層からなる詳細な層序区分を行っている。その中で、本稿の調査地域である宇和島市の法花津湾周辺は法花津地塊に区分されており、同地塊を構成する法花津層の特徴として、層厚1〜数mの砂岩と層厚2m以下の砂岩泥岩互層が密かえし重なる層序で、砂岩は割れ目に富んでおり、白色の瀬沢石（ローモンタイト）一方解石一石英脈脈が多々みられる点が挙げられていることをここでは指摘しておきたい。

調査地域における地形は秩父－四万十帯に明瞭に異なり、前述のように、秩父帯と四万十帯の地質境界には四国山地西線の山塊があり、その主稜脈が標高500〜700mほどの高度をもって東西に延びている。この山脈の北面（秩父帯）は、約2km北方で標高200mほどの宇和盆地に接するが、南面（四万十帯）は約2km南方の法花津湾に対して500〜700mほどの高度差をもっており、より急傾斜となっている。南面の山腹斜面には南北方向に深く開析した直線的な谷が密に並んでいる。とりに、北面の山腹斜面には浅い谷が不規則に並ぶ。また、四国山地南面に急斜面が広がるのとは対照的に、法花津湾より南方の吉田半島には標高100〜200mほどの高度の小起伏丘陵が広がる。

2.3 調査地域の植生

図3bは1/25,000地図（環境省、2013）をもとに作成した調査地域の植生区分図を示す。調査地域中央にある四国山地西線の主稜脈を境にして北側では、スギ・ヒノキ植林地が面積の大部分を占めており、その中にアカマツなどの常緑針葉樹林やクヌギ・コナラなどの落葉広葉樹林が点在する。南側では、主稜脈周辺にアカマツ林が広がっているが、それよりさらに南方の山麓や丘陵の大部分がミカンなどの果樹園となっている。

3. 調査方法

3.1 現地調査


現地では、限られた人員と期間で可能な限り災害の全容を把握するため、自動車や徒歩で通行可能な道路沿いに斜面崩壊等の土砂移動現象が発生した箇所を観察するとともに、写真撮影や崩壊斜面の簡易測量を行った。

3.2 崩壊地の空中写真判読

斜面崩壊の規模や分布の特徴を明らかにするため、前述した国土地理院撮影の空中写真を判読し、斜面崩壊とそれに起因した土石流による土砂移動を囲んだボリコンデータを作成した。この
際、透流（河川）沿いに形成されたロープ状の堆積物や流れの集積を手がかりに、土石流の流下・堆積域の終端を特定し、下流側に形成された平坦な堆積面をも含む透流堆積物は土砂移動域から除外した。
こうして得られた土砂移動域をそれぞれひとつの崩壊地とみなし、その面積を計測するとともに、後述する地質・地形・植生区分ごとの崩壊地の分布密度および崩壊面積率を算出した。

3.3 崩壊地の分布に影響を及ぼした地質・地形・植生条件の解析
地質・植生条件の違いによる崩壊地の分布の多寡を明らかにするため、崩壊地のポリゴンデータを前述した地質図および植生図と重ね合わせ、各領域内での崩壊地の分布密度と崩壊面積率を算出した。なお、土砂移動域が複数の領域にまたがる崩壊地があった場合には、頭部滑落面を含む領域で1箇所とカウントして崩壊地密度を算出した上で、土砂移動域を領域界で分割して各領域の崩壊面積率を算出した。
地形条件については、国土技術研究基盤地図情報10mメッシュ数値標高モデルを用いて算出した斜面勾配（°）をもとに、斜面勾配の傾度分布や斜面勾配に応じた崩壊面積率の変化の特性を分析した。

4. 調査結果
4.1 主な土砂災害の発生状況
発災直後の2018年7月中旬から10月下旬にかけた実施した現地調査により、愛媛県南部の大洲市、西予市、宇和島市周辺の地域で土砂災害の発生状況を確認することができた。ここでは、西予市宇和町明間（あかんま）地区、皆田（かいた）地区、下川（ひとうがわ）地区、ならびに宇和島市吉田町白浦（しろうら）地区、白浦地区鵜山、沖村地区の計6箇所（図4のLoc.1～6）における現地調査結果の概要について述べる。
4.1.1 西予市宇和町明間地区
図5a、5b、5cに西予市宇和町明間地区（図4のLoc.1）で発生した斜面崩壊の様子を示す。崩壊地は東川本川の右岸斜面に位置しており、南部秩父帯－斗賀野郡層の砂岩の分布域にあたる。
ここでは、脇川の谷底面より比高約200mの谷壁斜面の中腹部が幅約25m、長さ約40mにわたって崩壊しており（図5a）、崩壊土砂は100m以上下方向の県道29号線や川の谷底面に達していた（図5b）。崩壊地内を観察すると、粘土質の赤色風化土層が1～2m程度の厚さで基盤をなす砂岩層を覆っていることや、滑落面右側で、赤色風化土層の上位にチャート角礫・亜角礫を多く含む崩壊土層が2～4m程度の厚さで堆積していることがわかる（図5c）。このように、崩壊地内の土層の厚みにはばらつきがあるものの、すべり面は共通して基盤岩盤上の赤色風化土層中に形成されたものと推察される。
4.1.2 西予市宇和町皆田地区
図5d、5e、5fに西予市宇和町皆田地区（図4のLoc.2）で発生した斜面崩壊の様子を示す。崩壊地は東川支川緑川流域内（高森山頂より西方に約1kmの標高約480m地点）に位置しており、南部秩父帯－斗賀野層群のチャートの分布域にあたる。
ここでは、源頭部の谷頭凹地斜面が幅約20m、長さ約60mにわたって崩壊していた。崩壊土砂は渓床堆積物を洗掘しながら透流沿いを500m以上流れ下（図5d）、道路等を破壊していた。崩壊地内を観察すると、基盤をなすチャート層の上位にチャート角礫主体の崩壊土層が1～2m程度の厚さで堆積している（図5e）。頭部滑落面では、この堆積物が礫間隙の充填物を欠いた透かし礫層になっていることがわかる（図5f）。崩壊した斜面は、地形的に浸透水が集中しやすい場にあったために礫間隙を充填していた土砂の流失が進み、崩壊発生以前より排水性の高い透かし礫層が形成されていたとみられる。
しかしながら、今回の豪雨時にはその排水容量を超える浸透水の流入があったために、土層内部の間隙水圧が上昇し、基盤岩面を境界にして滑落したものが推察される。
4.1.3 西予市宇和町下川地区
図5g、5hに西予市宇和町下川地区（図4のLoc.3）で発生した斜面崩壊の様子を示す。崩壊地は東川本川左岸側の小流域内（県道31号宇和三間線「歯根塚沿い」標高約420m地点）に位置しており、南部秩父帯－三宝山層群の混在岩の分布域にあたる。
ここでは、源頭部の谷頭斜面が幅約40m、長さ約90mにわたって崩壊しており、県道31号線を断することともに、崩壊土砂が渓流沿いを450m以上流れ下していた。滑落面には基盤の砂岩層とその下位の泥岩層が露出している（図5g）。砂岩層、泥岩層ともに風化と変形が著しいが、特に砂岩層底面（泥岩
層との境界）付近が細かく破砕されている（図5h）。
こうした破砕部分が弱面となって、深さ5〜10 m
程度の比較的規模な岩盤崩壊が発生したものと推
察される。

4.1.4 宇和島市吉田町白浦地区

図6a、6bに宇和島市白浦地区南（図4のLoc.4）で
発生した斜面崩壊の様子を示す。崩壊地は法花津湾
湾岸部の丘陵斜面（県道271号玉津港線（小名隧道）
沿いの標高約110 m地点）に位置しており、四万十
帯北帯－佐伯亜帶の砂岩の分布域にあたる。

ここでは、比高110 m程度の丘陵斜面の中腹部（頂
部緩斜面より下方の谷型斜面）が幅約40 m、長さ約
60 mにわたって崩壊しており（図6c）、崩壊土砂は
150 m以上下方の住家に達していた。頂部滑落崖や
側方崖に平滑な断面が露出する状況は、白浦地区
南の崩壊地ト的によく似る。一方でこの崩壊地の
左側方崖では、砂岩層とその下位の泥岩層の高角傾
斜した構造がみられることから（図6d）、砂岩泥岩
互層の層理面付近がすべり面となって、主に上位の
砂岩層が崩壊したものと推察される。

4.1.6 宇和島市吉田町冲村地区

図6e、6fに宇和島市吉田町沖村地区（図4の
Loc.6）で発生した斜面崩壊の様子を示す。崩壊地は
吉田半島中央部の丘陵斜面（法花津湾より南方に約
3 kmの標高約160 m地点）に位置しており、四万十
帯北帯－佐伯亜帯の砂岩の分布域にあたる。

ここでは、比高90 m程度の丘陵斜面の中腹部が
幅約10 m、長さ約15 mにわたって崩壊していた
（図6c）。崩壊地内では、地表から数十cm程度の深
さまでの土層が平板状に薄く剥ぎれ、モノレール架

図4 斜面崩壊地の分布と現地観察地点の位置図（国土地理院・地理院地図をもとに作成）
Fig. 4 Landslide distribution and localities of field observation sites (drawn based on 1:25,000
scale topographic maps of the Geospatial Information Authority of Japan).
Fig. 5  Field views of the sediment disaster sites in Seiyo city.
図6 宇和島市内の土砂災害発生箇所の様子
Fig. 6 Field views of the sediment disaster sites in Uwajima city.

4.2 崩壊地の規模および分布の特徴
空中写真判読の結果、調査地域の約47 km²の範囲内で計2,453箇所（総面積810,920 m²）の崩壊地が抽出された。このうち201箇所（総面積93,490 m²）が秩父層、2,227箇所（総面積712,590 m²）が四万十層、残りの25箇所（総面積4,840 m²）が後期更新世の段丘堆積物などの第四紀堆積層の分布域で発生していた。
これらの値を崩壊地の分布密度と崩壊面積率に換算すると、秩父帯では約11箇所/km²と約0.5%、四万十帯では約102箇所/km²と約3.2%となり、四万十帯における崩壊地の分布密度と崩壊面積率が秩父帯の約9.5倍と約6.9倍に及んでいた。第四紀堆積層では約7箇所/km²と約0.2%となり、崩壊地の分布は秩父帯よりもさらに狭らであった。そこで以下では、崩壊地の規模および分布の特徴について、秩父－四万十帯間で比較した結果を中心に述べる。

4.2.1 崩壊地の規模

秩父帯で発生した201箇所の崩壊地の面積は5〜9,552 m²の範囲にあり、平均値（土標準偏差）は465±1,351 m²、中央値は87 m²であった。一方で、四万十帯で発生した2,227箇所の崩壊地の面積は3〜13,577 m²の範囲にあり、平均値（土標準偏差）は320±761 m²、中央値は99 m²となった。

両地質帯における崩壊地の面積を比較すると、中央値は近似しており、半数以上が100 m²未満の小規模な崩壊である点は共通するが、四万十帯では、10,000 m²オーダーに及ぶ比較的規模の大きな崩壊も同時に発生しているのが特徴と言える。

4.2.2 崩壊地の分布密度および崩壊面積率

秩父帯および四万十帯を構成する主な岩種ごとに崩壊地の分布密度と崩壊面積率を算出した結果を図7に示す。秩父帯（18.76 km²）は玄武岩・チャート・石灰岩・混在岩・砂岩の5つに区分され、これらのうちの玄武岩と石灰岩の領域は面積割合5%以下（それぞれ0.25 km²と1.09 km²）で崩壊地は石灰岩の領域内で発生した1箇所のみだった。そこでチャート・混在岩・砂岩の3つに絞って比較すると、崩壊地の分布密度と崩壊面積率ともに混在岩の領域で最も高く、次いで砂岩、チャートの順となった。

他方、四万十帯（21.94 km²）は泥岩・砂岩泥岩互層・砂岩の3つに区分された。崩壊地の分布密度と崩壊面積率ともに砂岩の領域で最も高く、次いで砂岩泥岩互層、泥岩の順であった。

四万十帯砂岩泥岩互層および泥岩の領域における崩壊地の分布密度は、四万十帯砂岩の領域の0.3〜0.4倍程度と比較的に低かったが、いずれも秩父帯混在岩の領域を上回っていた。すなわち、岩種によらず四万十帯の方が秩父帯より崩壊地の分布密度が高かったと言える。

次に、主に殖生区分ごとに崩壊地の分布密度と崩壊面積率を算出した結果を図8に示す。殖生図の大区分をみると、調查範囲内の植生は、主にスギ・ヒノキなどの常緑針葉樹の植物地（人工林）、落葉広葉樹（二年生の常緑広葉樹、二年生の常緑広葉樹）が構成されており、これらのうち、落葉広葉樹、常緑広葉樹は、アカマツ林を自然林として一括し、人工林・自然林・果樹園その他の4区分で比較を行った。

秩父帯では、人工林の面積が全体の約63.7%（11.95 km²）を占めて最も多く、次いで自然林の面積が約26.8%（5.02 km²）を占め、みどりの果樹園の面積が約0.5%（0.09 km²）に過ぎなかった。そのため、局部的な分布を強く反映した値はあろうものの、果樹園における崩壊地の分布密度と崩壊面積率はチャートの領域（0.04 km²）で約654箇所/km²と約7.2%、混在岩の領域（0.05 km²）で約600箇所/km²と約8.8%というきわめて高い値をとった。一方で、3つの岩種のいずれの領域にも分布する人工林と自然林についてみると、分布密度や崩壊面積率の差は僅かであり、特定の岩種や植生区分に偏って崩壊が発生する傾向は認められなかった。

四万十帯では、果樹園の面積が全体の約57.2%（12.54 km²）を占めて最も多かった。次いで自然林の面積が約34.1%（7.48 km²）を占め、人工林の面積は約3.1%（0.68 km²）にとどまった。いずれの岩種についても、果樹園における崩壊地の分布密度と崩壊面積率が最も高くなっていた。3つの岩種のいずれの領域にも分布している自然林と果樹園で比較した場合、果樹園における崩壊地の分布密度は自然林の約2.3〜3.1倍に、崩壊面積率は自然林の約1.6〜2.8倍に及んでいた。

4.2.3 崩壊面積率と地質・地形・植生条件との関係

前項において、岩種別の崩壊地の分布密度、崩壊面積率はともに四万十帯砂岩の領域が最も高かったことや、いずれの岩種においても果樹園として土地利用されている斜面で崩壊地の分布密度や崩壊面積率が著しく増加していたことが明らかになった。このうち、岩種別の崩壊の起こりやすさの違いは、風化の特徴が地形に起因するものと考えられるため、斜面勾配を加えて岩種（地質）や植生（土地利用）による崩壊面積率の違いをさらに分析することとした。

秩父帯のチャート・混在岩・砂岩、四万十帯の泥岩・
Fig. 7 Landslide density and area ratio of landslide-affected area for each geological unit.

Fig. 8 Landslide density and area ratio of landslide-affected area for each vegetation unit (Fig. 8a, b: Chichibu Belt, Fig. 8c, d: Shimanto Belt).

Fig. 9 Vegetation cover proportion (Fig. 9a, b: Chichibu Belt, Fig. 9c, d: Shimanto Belt).
だが、砂岩は35〜40°をピークに左側にも急減しておおり、もっとも急勾配に偏った分布となっていた。植生区分ごとの崩壊面積率を比較すると、秩父帯、四万十帯ともに果樹園における崩壊面積率が斜面勾配の分布範囲のほぼ全区間にわたって高い傾向にあった。

斜面勾配の頻度分布の特徴と併せてみると、四万十帯砂岩の領域が最も急勾配になっているが、そのピークとなる35〜40°の区間においても崩壊面積率は果樹園で約5.3%、自然林で約2.1%と、同地質帯の砂岩泥岩互層や泥岩と比べて高い値となっている。したがって、植生(土地利用)や地形(斜面勾配)のほかにも、崩壊を起こしやすい地盤の特徴を有していたのではないかと考えられる。

ただし今回の分析では、土石流化した崩壊土砂の流下・堆積を含めてひとつの崩壊地としたこともあって、崩壊面積率がパーセント的な分布や緩傾斜部(一般的な土石流の流下・堆積区間に対象とする20°未満の区間：国土技術政策総合研究所(2007)を参照)にピークをもつ分布となっていた。今後、崩壊源のみを対象とした分析を行って再検討する必要がある。4.3 今回の現象による斜面崩壊の特徴
4.3.1 秩父帯における斜面崩壊の特徴
調査地域の北側に分布する秩父帯についてみると、崩壊地の分布密度は約11箇所/km²と疎らな状況であり、その半数以上が面積100m²未満的小規模な崩壊地であったことから、土砂災害の発生件数や被害は四万十帯に比べて少なかった。

現地調査では、面積1000m²以上の比較的規模な崩壊地3箇所を踏査した。これらはいずれも異なる岩種の領域で発生した崩壊のため、崩壊予備物質の構成材料や崩壊すべり面を規制する地質構造はそれぞれ異なっていた。斜面を覆っていた崩壊土層が崩壊した2箇所については、下位の風化粘性土層(図5a〜5c、4.1.1項)や基盤岩層(図5e、5f、4.1.2項)が難(不)透水面となることで、崩壊土層底面付近からの地下水位(間隙水圧)上昇を招いたことが崩壊発生の原因であったと考えられる。もう1箇所は、著しく破壊された基盤岩層の崩壊であり(図5g、5h、4.1.3項)、重力変形作用による不安定化が進行していた斜面が今回の豪雨で崩壊に至ったものと考えられる。

この地域の秩父帯は、主に玄武岩・チャート・石灰岩・混在岩・砂岩で構成されていたが、それらの中では混在岩における崩壊地の分布密度や崩壊面積率が相対的に高かった(図7)。ただし、混在岩の岩相や地質構造も狭い範囲内で不均質なことが予想されるため、他の岩種の崩壊を起こしやすい特徴を有しているかについてはさらなる検討を要する。

同地域の植生としては、スギ・ヒノキなどの人工林とアカマツやクヌギ・コトラなどの自然林が多く、これら2つの面積が全体の約90.5%を占めていた。人工林と自然林の分布域に限ってみれば、岩種や植生区分の違いによる崩壊地の分布密度や崩壊面積率の差は僅かだった(図8)。一方で、果樹園の面積割合は約50%と局所的であったが、その分布域の内ではきわめて高い密度で崩壊が発生していた(図8)。

4.3.2 四万十帯における斜面崩壊の特徴
調査地域の南側に分布する四万十帯についてみると、崩壊地の分布密度は約102箇所/km²と非常に密な状況であった。崩壊地の半数以上は面積100m²未満の小規模な崩壊地だったが、その多くがミカンなどの果樹園で発生したため、果樹や作業設備の損傷などの農業被害が多数生じていた。また、箇所数としては全体の10%未満だが、面積1000m²以上の比較的大規模な崩壊が吉田半島周辺の平地に接する小起伏丘陵斜面に多く発生したために、大量の土砂が住宅地に到達し、甚大な被害が生じることとなった。

現地で観察された斜面崩壊の多くは果樹園で発生したごく薄い表土層の崩壊であった(図6e、6f、4.1.6節)。果樹園では、周辺の森林に比べて降雨の樹冠遮断効果や根系による表土層の緊縮効果が小さかったために、このような崩壊が多発したものと考えられること。他方、吉田半島周辺の小起伏丘陵では、すべり面が基盤岩内部に及ぶ深層崩壊が発生していた。これらのうちの2箇所はいずれも、基盤をなす砂岩層が平坦に切られ落ちているのが特徴であり(図6a〜6d、4.1.4節および4.1.5節)、節理面や層面に沿ってすでに分離が進行していた岩盤が今回の豪雨で崩壊に至ったものと考えられる。

吉田半島周辺で発生した4箇所の深層崩壊を詳しく調査した山崎(2019)は、それらの崩壊に共通の特徴として、深層まで風化した砂岩において、斜面を鉱直に近い方向で切断する分離面を境に崩壊が発生していることや、その砂岩には亀裂や白色の鉱物脈が多くみられるこを指摘している。こうした特徴は、
図 9 地質区分ごとの斜面勾配頻度分布と斜面勾配による崩壊面積率の変化（図 9a–c：秩父帯、図 9d–f：四万十帯）

Fig. 9 Frequency distribution of slope gradient for each geological unit and changes in area ratio of landslide-affected area along the slope gradient (Fig. 9a–c: Chichibu Belt, Fig 9d–f: Shimanto Belt).

寺岡・栗本 (1986) および寺岡ほか (1986) が地に分布する砂岩・泥岩層（古生層）の地質的特徴に沿っていたものに対応する。したがって、今回崩壊が発生した箇所の周辺においても、岩盤内部に分離面が形成されて安定化した箇所が存在することが十分に考えられる。そうした深層崩壊の危険性の高い斜面を把握するためにも、今回崩壊が発生した箇所の微地形や岩盤内部の面構造などの特徴をさらに詳しく調査する必要がある。

この地域の四万十帯を構成する砂岩・砂岩泥岩互層・泥岩のいずれの領域でも、秩父帯より高い密度で崩壊が発生していた。それらの中では砂岩における崩壊地の分布密度や崩壊面積率が最も高かった（図 7）。深層崩壊の原因となった岩盤内部での分離面の発達がその理由のひととみられるが、小規模な崩壊の多さを踏まえると、四万十帯砂岩の領域で
は表層崩壊の起こりやすい地盤が形成されていたのではないかと考えられる。岩種ごとの風化特性の違いは今後検討すべき課題である。

同地域にはミカンなどの果樹園が広く展開されており、面積割合で約57.2%を占めていた。その次に面積割合の大きかった自然林（約34.1%）と比較すると、崩壊地の分布密度は約3.3 ～3.1倍、崩壊面積率は約1.6 ～2.8倍に及んでいたことから（図8）、果樹園としての土地利用が四万十川における斜面崩壊の多発につながったとみて間違いいない。

4.3.3 秩父－四万十帯境界における斜面崩壊の規模と分布の特徴

調査地域内で発生した斜面崩壊を秩父帯と四万十帯に分けて比較すると、（1）両地質帯とともに半数以上は面積100 m²未満の崩壊だが、四万十帯では1,000 ～10,000 m²オーダーに及ぶ比較的大きく崩壊も同時に発生していること、（2）四万十帯の中で砂岩の領域で特に多発していること、（3）両地質帯ともに果樹園における崩壊地の分布密度や崩壊面積率が人工林や自然林と比べて著しく高いことなど特徴が認められた。

今回の豪雨により吉田半島周辺で発生した深層崩壊は面積1,000 ～10,000 m²程度の規模であり、これまで深層崩壊として取り扱われてきたものに比べると小規模である（例えば、2011年台風12号通過に伴う大雨により紀伊山地で発生した深層崩壊の規模は約3,700 ～490,000 m²に及び：Tsou et al., 2017）。しかしながら、平地と接する小起伏丘陵斜面に多く発生したために甚大な被害が生じ、こうした砂礫災害のリスクを鑑みると、同じく深層崩壊が起こる可能性のある斜面の把握が急がれる。

調査地域は、主に北側の秩父帯（西予市）が人工林として、南側の四万十帯（足島町）が果樹園として土地利用されていた。こうした土地利用状況の違いが四万十帯における斜面崩壊の多発につながったとみられる。その一方で、秩父帯に局所的に分布した果樹園においてもきわめて高い密度で崩壊が発生していた。したがって、植生（土地利用）改変によって斜面崩壊の発生頻度が増加する可能性があることは両地質帯ともに十分考慮する必要がある。

5. まとめ

2018年（平成30年）6月28日から7月8日にかけた大雨によって、愛媛県南西部で発生した土砂災害の現地調査を行い、その発生状況を把握するとともに、土砂災害の主な原因となった斜面崩壊の規模や、発生箇所の分布と地質・地形・植生分布との関係を分析した。

調査対象とした地域は、宇和海海から四国山地にかけて南西～北東方向に延びる強雨域の中心付近にあり、1時間最大50 mm以上かつ6時間最大180 mm以上の降雨があった。四国山地の主稜線（秩父帯と四万十帯の地質境界）を挟む南北で降雨強度や総雨量にほとんど違いがなかったにもかかわらず、四万十帯に属する四国山地南面や吉田半島周辺の小起伏丘陵に集中して多数の斜面崩壊が発生した。

四万十帯の中では、砂岩の領域で最も多くの崩壊が発生していた。それらの大半は面積100 m²未満の崩壊であり、果樹園として利用されている斜面に集中していた。一方で、面積1,000 ～10,000 m²オーダーに及ぶ比較的規模の大きな崩壊も同時に発生していた。それらはこの地域の四万十帯砂岩に特徴的な節理の発達により、分離の進行した岩盤の深層崩壊であった。

果樹園は、四国山地の主稜線より南側の斜面（四万十帯）に分布しており、北側の斜面（秩父帯）は主に人工林となっていた。こうした土地利用状況の違いが四万十帯における斜面崩壊の多発につながったとみられる。

謝辞

本稿で報告した調査解析の一部は、平成30年度科学研究費特別研究促進費18K19951（平成30年7月豪雨による災害の総合研究）によるものであり、山形大学の八木浩司博士、帝京平成大学の佐藤剛博士、弘前大学の都崎語博士、国際斜面災害研究機構（国際航空株式会社）の馬田清治博士と共同で行いました。本稿で用いた気象庁解析雨量データは国土交通省より提供いただきました。また、防災科学技術研究所水・土砂災害研究部門の前坂剛博士には雨量分布の解析および作図にご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

最後に、この度の豪雨災害で犠牲になった方々に哀悼の意を表するとともに、被災地および被災された方々の一日も早い復興を心より祈念いたします。
参考文献

1) 防災科学技術研究所 (2018)：防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門「平成 30年 7月豪雨における積算雨量の特徴について（西日本）（平成 30年 7月 19日発表）」。
   (http://mizu.bosai.go.jp/key/RainJulyH30Accu, 2019.3.15)

2) 愛媛県災害対策本部(2018)：平成 30 年 7月豪雨による被害状況等について(第 100 報）。
   (http://chime.ne.com/servlet/ servlet.FileDownload?
    file=00P0K000018IkdKUAS, 2019.3.15)

3) 波田重熙・秀敏・石田幼祐・岩崎正夫・鹿島愛彦・小玉一功・斎藤俊夫・梅岡井・越智秀二・佐藤信次・
   須藤和悟・鈴木洋士・高橋治郎・高橋晃・武田賢治・田代明之・鳥海光弘・氏家治・山崎哲司・
   吉倉純（1991）：第 2 章 中・古生界, 日本の地形「四国地方」編集委員会（編）「日本の地形 8 四
   国地方」5-118, 共立出版株式会社。

4) 平成 30 年 7 月豪雨愛媛大学災害調査団（2018）：平成 30 年 7月豪雨による愛媛県の斜面崩壊分布図（第1報）。
   (http://www.ajg.or.jp/disaster/files/201807_report005.pdf, 2019.3.15)

5) 広島大学平成 30 年 7月豪雨災害調査団（2018）：
   平成 30 年 7月豪雨による広島県の斜面崩壊の詳細分布図（第1報）。
   (http://www.ajg.or.jp/disaster/files/201807_report007.pdf, 2019.3.15)

6) 広島県立水木建築局防災課（2018）：平成 30 年 7月豪雨による土砂災害の発生状況（平成 30年 9月
   7 日時点最終報）。
   (https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/
    life/547187_1636191_misc.pdf, 2019.3.15)

7) 海村正博・長谷川祐治・山下祐一・崎田博史・中井真雄・桑田志保・松本晋也・地頭園隆・井
   良満進世・清水孝・今泉文義・中谷加奈・柏原佳明・加藤誠章・島田英司・平川泰之・吉永子
   規・田中善男・林長憲（2018）：平成 30 年 7月豪
   雨により広島県で発生した土砂災害. 砂防学会誌, Vol.71, No.4, 49–60。

8) 環境省 (2013)：環境省生物多様性センター1/25,000 植生図「卯之町」、「宇和島」。
   (http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-043.html, 2019.3.15)

9) 気象庁(2018)：「平成 30 年 7月豪雨」の大雨の特
   徴とその要因について（速報）（平成 30 年 7月 13
   日報道発表資料）。
   (http://www.jma.go.jp/jma/press/1807/13a/
    gou20180713.pdf, 2019.3.15)

10) 国土地理院(2018)：平成 30 年 7月豪雨に関する
    情報
   (http://www.gsi.go.jp/BOUSA/H30.taihuu7gou.
    html, 2019.3.15)

11) 国土交通省(2018)：国土交通省 水管理・国土保
    全局 砂防部「平成 30 年 7月豪雨による土砂災害
    の発生状況（2018 年 9月 25日時点）」。
   (http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/
    H30_07gou_180925.pdf, 2019.3.15)

12) 国土技術政策総合研究所(2007)：土石流・流木
    対策設計技術指針解説。国土技術政策総合研究所
    資料, 第 365 号, 78pp。

13) 松岡篤（1998）：四国西端部秩父帯参の地体構造
    区分, 地質学雑誌, Vol.104, No.9, 565–576。

14) 宮崎一博・篠田浩二・宮下由香里・水野清秀・
    高橋雅紀・野田篤・利光誠一・角井朝志・大
    野哲二・名和一成・宮川歩夢（2016）：20 分の
    1 地質図幅「松山」（第 2 版）, 産総研地質調査総
    合センター。

15) 産総研地質調査総合センター（2018）：20 分の
    1 日本シームレス地質図 V2。
   (https://gbank.gsj.jp/seamless/v2.html, 2019.3.15)

16) 笹原克夫・池田貴良・井戸信雄・若本朝雄・金澤英・
    権田豊・齋藤慎樹・斎藤康裕・田方賢・森田正治・
    宮田秀介・三輪浩・村田郁央・山野井一輝・和
    田孝志（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,
    43–53。

17) 寺岡易司・栗本史雄（1986）：宇和島地域の
    四万十滝自生系層序—巨大化石と散発虫化石の
    層序的分布に関して—, 地質調査所月報, Vol.
    37, No.8, 417–453。

18) 寺岡易司・栗本史雄（1989）：20 分の 1 地質図
    幅「宇和島」, 産総研地質調査総合センター。

19) 寺岡易司・池田幸雄・鹿島愛彦（1986）：宇和島
    地域の地質, 地域地質研究報告 (5 分の 1 地質
    図幅), 91pp, 地質調査所。

要 旨

平成 30 年 7 月豪雨によって愛媛県南部で発生した土砂災害の現地調査を行うとともに、その主な原因となった斜面崩壊の規模と分布の特徴を分析した。豪雨直後に撮影された空中写真を判読した結果、調査地域の約 47 km² の範囲内で計 2,453 箇所（総面積 810,920 m²）の崩壊地が抽出された。調査地域の中央にある秩父帯と四万十帯の地質境界を挟む南北で降雨強度や総雨量にほとんど違いがなかったにもかかわらず、南北の四万十帯に集中して多数の斜面崩壊が発生していた。四万十帯の中では、砂岩の領域で最も多くの崩壊が発生していた。それらの大半は面積 100 m² 未満の崩壊であり、果樹園としての利用されている斜面に集中していた。一方で、面積 1,000 〜 10,000 m² オーダーに及ぶ比較的規模の大きな崩壊も同時に発生していた。それらはこの地域の四万十帯砂岩に特徴的な節理の発達により、分離の進行した岩盤の深層崩壊であった。

キーワード：降雨による斜面崩壊，雨量分布，地質境界，土地利用