

公益財団法人国土地理協会 第 20 回学術研究助成

(地理学および関連する分野の学術的調査・研究)

昭和期からの土地利用変遷を踏まえた
平成 30 年 7 月豪雨による斜面崩壊発生要因の解明：
愛媛県島嶼部を例に

研究代表者

木村 誇

愛媛大学大学院 農学研究科

1. はじめに

1.1 研究の背景

人間の土地利用による景観改変は、平野部のみならず山地においても広く起きており (Lambin et al., 2001), 山地災害の危険性やそれに対する人間社会の脆弱性にも大きな影響を及ぼしている。そうした景観改変の影響の中でも、森林伐採や林種転換(自然植生の構成種から木材生産樹や栽培果樹などへの置換)は、樹木による表土層の崩壊抑止機能を大きく低下させることで、斜面崩壊の発生を左右する要因となりうるものである (Sidle and Ochiai, 2006)。

樹木による表土層の崩壊抑止機能に関するこれまでの研究では、根系が表土層のせん断抵抗力を補強する効果が注目され、根系の強度評価に関する研究が多く行われてきた。その結果、樹種、根の太さ、根の量(密度)によって補強効果に大きな違いが生じることが明らかになり (Wu et al., 1979; 阿部, 1997; 北原, 2010; Abdi et al., 2010; 佐藤ほか, 2013), 種々の崩壊発生予測手法にも根系の補強効果が組み込まれるようになった (執印ほか, 2009; Schwarz et al., 2010, 2016; Arnone et al., 2016)。また、森林分布や土地利用の変化に伴い斜面崩壊の発生にどのような変化が生じたかという実証的研究も世界各地で行われており (Montgomery et al., 2000; Grade, 2003; Alcántara-Ayala et al., 2006; Imaizumi et al., 2008; García-Ruiz et al., 2010; Guns and Vanacker, 2013; Saito et al., 2017), 森林伐採や農地や草地への転換によって森林の面積や蓄積が減少すると斜面崩壊が急増することが多くの地域で示されてきた。そのため、山地における適切な森林管理がますます重要視されるようになってきている。

他方で、近年の山地における景観改変は、伐採や土地造成などのオーバーユース(過剰利用)により森林の面積や蓄積を減少させる方向にだけでなく、離農に伴う管理放棄などのアンダーユース(過少利用)により森林の面積や蓄積を増加させる方向にも起きている。日本国内では、生活様式や燃料需要の変化に伴う日常的な森林利用の減少、農作物や木材の輸入増加や農林業従事者の減少といった経済・産業・社会の動向を受けて林

地や農地の管理放棄が進んでおり、昭和期中期(1960年代)以降、放棄人工林や放棄農地が急速に拡大している(例えば、太田, 2012; 鈴木ほか, 2019)。特に、放棄農地においては、営農中の土地被覆が栽培植物のみであった状態から管理放棄に伴い植生遷移が進行していく中で、樹木による崩壊抑止機能も大きく変化していくことが予想される。しかしその一方で、管理放棄後の植生遷移はそれまでの土地利用形態などの影響を受けて一様には進まないことが指摘されており(例えば、Tokuoka and Hashigoe, 2015, 2022), 管理放棄から何年程度で二次林が成立し、崩壊抑止機能が発揮されるようになるかは明らかではない。また、農地造成時に行われた法面工や排水工の機能劣化について、管理放棄後を含めて長期的に追跡した研究事例は少なく、放棄農地の斜面安定性の評価をさらに難しくしている。加えて、山地に広がる傾斜地農地の多くが小規模な農地区画の単位で粗放的に管理されてきたために、いつ頃に管理放棄された農地がどこにどのくらいの面積で分布しているかという基本的な情報も得られにくい。そのようなことから、実際に放棄農地で斜面崩壊がどのくらい発生しているのかという実態についても具体的な報告事例が認められないのが現状である。

1.2 研究の目的

上述の背景を踏まえて、本研究では、傾斜地農地(段々畑)としての土地利用がさかんな農村地域を対象に、過去数十年間のあいだの複数時期における土地被覆および土地利用の状況を調査し、近年の豪雨による斜面崩壊の発生との関連性を詳しく分析する。これにより、農地造成やその後の管理放棄といった土地利用変遷の実態を把握し、そうした土地利用変遷の違いが崩壊地の分布や規模に影響を及ぼしているか否かを明らかにするのが本研究の目的である。

研究対象として、2018年6月末から7月初めにかけて西日本地方を中心とする広い範囲で降り続いた雨(以下、気象庁の命名に従い「平成30年7月豪雨」と呼ぶ)によって愛媛県島嶼部の大三島(図1)で多発した斜面崩壊に注目する。平成30年7月豪雨により、愛媛県内の沿岸部や島嶼部の農村地域で斜面崩壊が多発したが、これらの地域は共通して柑橘類生産の盛んな地域であり、斜面が広く果樹栽培に利用されている。一方

で、近年は離農に伴う放棄農地の拡がりが見られる地域でもある。斜面崩壊の発生そのものは稀な規模の豪雨によってもたらされたものであるが、土地利用変遷の違いによる崩壊地の分布の偏りを示すことができれば、崩壊発生要因の解明に繋がると考えられる。

本研究の特色は、農村地域における土地利用変遷の実態把握と斜面崩壊地の分布調査を通じて、

放棄農地の崩壊危険性を明らかにしようとする点にある。管理放棄後の農地では、造成時に行われた法面工や排水工の機能が劣化していくことが予想されるが、その一方で、植生遷移によって樹林化が進めば斜面の安定性が向上していく可能性も考えられる。しかしながら、樹林化した放棄農地では現在も維持管理されている農地や古くからある林地と比べて斜面崩壊が起こりやす

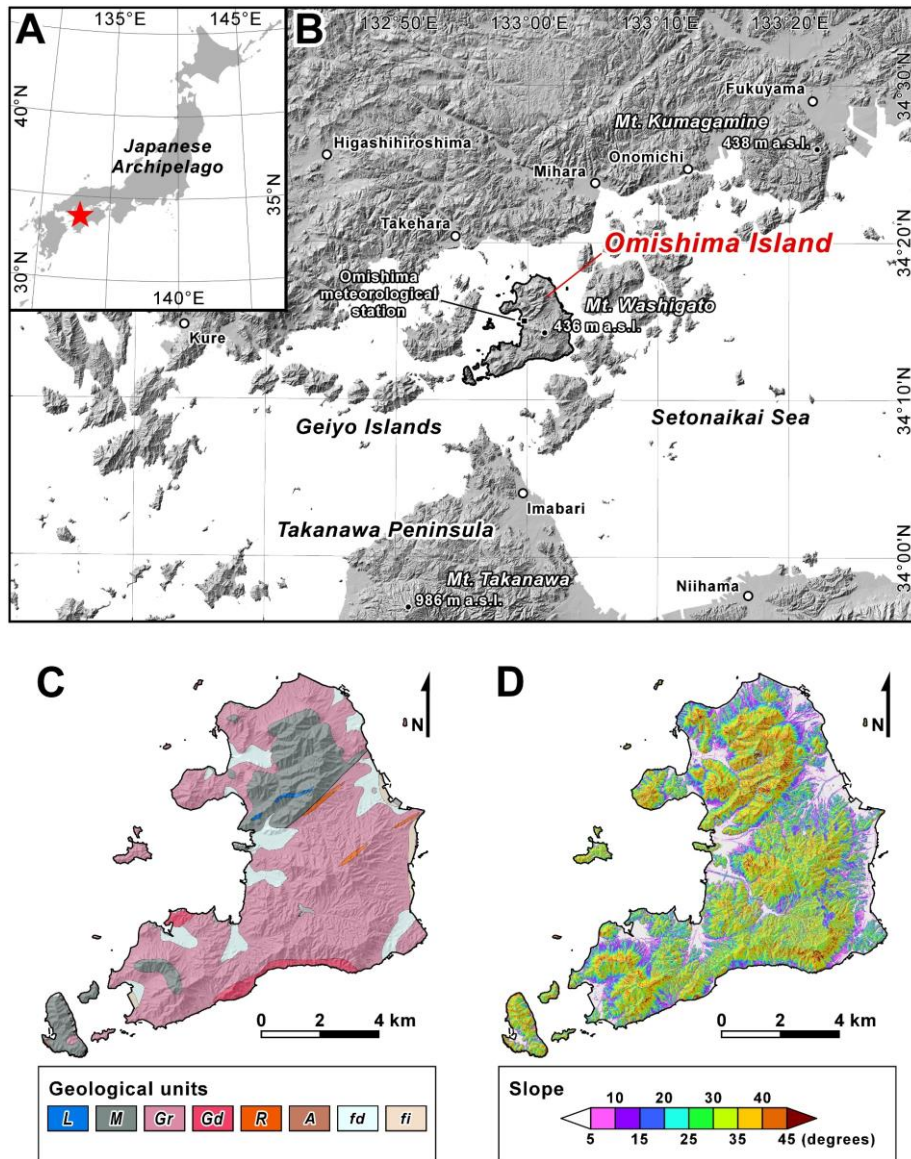


図1 研究対象地域の位置、地質分布および地形

(A) 瀬戸内海西部、芸予諸島の位置図。(B) 芸予諸島・大三島の位置図。瀬戸内海沿岸部の主要都市、主峰、気象庁・大三島観測所の位置を併せて示した。(C) 大三島の地質分布。(D) 大三島の地形(傾斜角の分布)。作図には産総研 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 ならびに国土地理院の 5m メッシュおよび 10m メッシュ数値標高モデルを用いた。C 図にある地質区分の略記は次の通り: *L*, 中期ジュラ紀付加体の石灰岩; *M*, 中期ジュラ紀付加体の混在岩; *Gr*, 後期白亜紀の花崗岩; *Gd*, 後期白亜紀の花崗閃緑岩; *R*, 後期白亜紀のデイサイト・流紋岩; *A*, 新第三紀の玄武岩質安山岩; *fd*, 第四紀(完新世)の河成堆積物; *fi*, 第四紀(完新世)の埋立地。

いか、あるいは崩壊の規模や土砂の流動性などが異なるかを実証的に検証しようとした研究はこれまで行われていない。

2. 研究対象地域

2.1 大三島の地勢

本研究では、愛媛県島嶼部の大三島を研究対象地域に選んだ。大三島は、瀬戸内海西部の芸予諸島を構成する島のひとつであり、愛媛県に属する島の中では最も大きい。人口は約 5,000 人で芸予諸島に約 50 島ある有人島の中では中程度の人口規模である。気候は瀬戸内海式気候区に属しており、その中でも温暖期における降水量が梅雨時と秋雨時を除いて少ないという特徴がある。島西部にある気象庁アメダス大三島観測所 (34° 15.0' N 133° 00.4' E, 標高 9 m; 以下では大三島観測所と表記) での観測記録によると、年間の降水量と平均気温の平年値はそれぞれ 1218.6 mm, 15.4℃となっている (1991~2020 年の統計に基づく: 気象庁, 2023)。

島中央部の鷲ヶ頭山 (標高 436 m) が最高峰であるが、島全体が標高 200~400 m ほどのピークが連なる小起伏山地となっており、大きな集水域をもつ河川もないため平野部は狭い (図 1D)。地質は主に後期白亜紀の花崗岩類 (領家花崗岩類) と変成岩類 (領家変成岩類) からなる (図 1C; 須鎗ほか (編), 1991; 日本地質学会 (編), 2016)。

大三島をはじめとする芸予諸島には中~粗粒の黒雲母花崗岩が分布しており、広島花崗岩に分類される (岡村, 1967; 永井ほか, 1980)。変成岩は主としてジュラ紀の付加体 (丹波帯堆積岩類の砂岩および泥岩) を原岩とするホルンフェルスの小岩体であり、周辺を囲む広島花崗岩のルーフペンダントと考えられている (佐藤ほか, 1979)。

土地被覆および土地利用の特徴としては、樹園地の占める割合の大きさが挙げられる。国土地理院が 1982~1983 年に行った調査をもとに作成した 20 万分の 1 土地利用図 (図 2A) では、島内の広い範囲が農地に分類されているが、その大半が果樹園であることが読みとれる。環境省の現存植生図のうち、1978~1999 年に実施された第 2~5 回調査に基づく 5 万分の 1 植生図 (図 2B) を参照すると、島内の植生は主に、コバノミツバツジ-アカマツ群集、クヌギ-コナラ群集、クロマツ群落などの代償植生と考えられる自然林地、スギ・ヒノキが植林された人工林地、常緑果樹園や水田雑草群落などの農地に分類されている。農地面積は全体で約 32.5 km² にのぼり、その面積のおよそ 84%にあたる約 27.4 km² の範囲が常緑果樹園で占められている。これらの地理空間情報からも、柑橘類の栽培が大三島の主幹産業であり、農地の大半は常緑の柑橘類低木が植えられた樹園地となっていることがわかる。また、平野部が狭く山がちな地形の島にあって、こうした樹園地のほとんどが傾斜地に分布している。

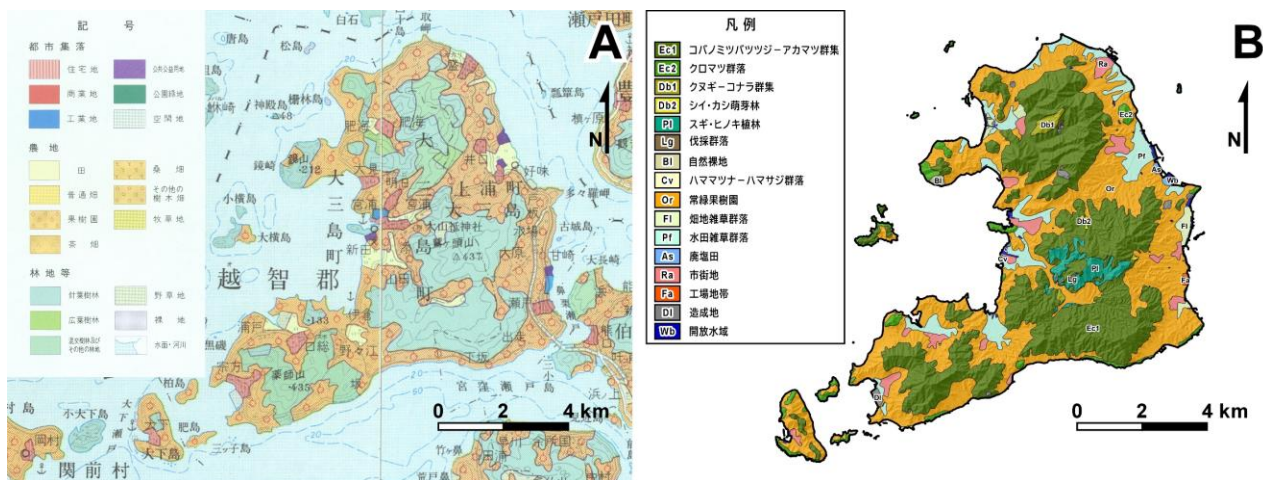


図 2 研究対象地域の土地被覆および土地利用

(A) 国土地理院 20 万分の 1 土地利用図における大三島島内の土地利用区分 (1982~1983 年の調査結果に基づく). (B) 環境省 5 万分の 1 植生図における大三島島内の植生区分 (1978~1999 年に実施された第 2~5 回調査に基づく).

2.2 大三島における産業の動向と土地利用の変化

大三島では、このような傾斜地に農地(段々畑)が広がる景観が古くから維持されてきたようである。柑橘類の樹園地が拡大したのは後述するように昭和期以降のことであるが、近世における山地の環境変化や農村の景観変化の実態を検証した佐野(2021)によれば、芸予諸島の島々では18世紀前半頃より斜面を切り開いた段々畑で甘藷(サツマイモ)が栽培されるようになったとされる。この段々畑には、瀬戸内海の沿岸浅海域で採取されたアマモが、肥料としてだけでなく斜面の侵食による土壌の流失を防ぐための材料として鋤き込まれた(宮本, 1969)。当時、芸予諸島の島民が東方には備中国・水島灘(現在の岡山県倉敷市を流れる高梁川の河口付近)へ、西方には安芸国賀茂郡辺り(現在の広島県東広島市安芸津町の沿岸付近)までアマモ採取に行っていたことが文書史料等に記録されていることから(宮本, 1969; 印南, 2010; 佐野, 2021)、甘藷栽培で拡大した段々畑を維持するために大量の肥料藻を必要としていたことがわかる。以下、愛媛県史(愛媛県史編纂委員会(編), 1986)にある越智諸島(大三島・伯方島・大島・岡村島などの現在の愛媛県に属する島々)の農業に関する記述をもとに、大三島における農業の動向と土地利用の変化を述べる。

越智諸島の農業は伝統的に畑作の占める比率が高く、平地や水資源が乏しいために水田はわずかだった。近世以降、裸麦や甘藷が主たる畑作物だったが、大正時代に葉たばこ栽培が導入されると県内の主産地となるまでに広がった。また、除虫菊やゼラニウムの栽培も一時さかんになったが、温州みかんを中心とする柑橘栽培が普及するとこれらの畑作物は急速に衰退し、昭和35(1960)年頃からは柑橘栽培が主になった。

このことは土地利用にも現れており、昭和58(1983)年における樹園地の比率は当時の大三島上浦町で93%、大三島町で87%を占めている。農業粗生産額の構成もこれに比例しており、上浦町と大三島町では果実が80%以上を占める。

越智諸島の普通畑は、昭和期の中頃からの柑橘栽培の普及とともに樹園地に転換されていった。大三島町では、昭和25(1950)年に538haあった普通畑が昭和30(1955)年には459haに、昭和

35(1960)年には385haにまで減少した。これに対し、1950年には179haだった樹園地は1955年には281haに、1960年には358haにまで増加している。

こうした樹園地面積の急速な拡大の背景には、第二次世界大戦後の食糧事情の好転と昭和30年代のみかんブームがあったとされる。さらに、昭和36(1961)年に果樹農業振興特別措置法が制定され、選択的拡大作目として農業構造改善事業がすすめられたことで、田畑から樹園地への転換や新たな樹園地の造成に拍車がかかった。しかしその後、輸入果物の増大と果物消費の多様化によってみかんの価格は低迷するようになり、生産縮小と農家減少が進んだ結果、傾斜地を中心に管理放棄された樹園地が急速に増加することとなった(椿, 2018)。再び、愛媛県史(愛媛県史編纂委員会(編), 1986)の記述をもとに昭和期後期からの柑橘栽培の動向と土地利用の変化を述べる。

昭和41(1966)年には温州みかんの樹園地が大三島全体で1038haに達した。昭和37(1962)年には第一次農業構造改善事業のパイロット事業地区の指定を受け、農道の開設や共同防除施設の設置などによる生産拡大が図られたほか、水田や廃塩田の樹園地転換も試みられた。また、山地開墾により約200haの樹園地が新たに造成された。昭和56(1981)年には、経営耕地面積1089haのうち、樹園地が948ha(87.0%)を占めるようになり、普通畑が半数以上を占めた昭和20年代の土地利用から大きく変貌した。

しかし、昭和47(1972)年以降のみかん価格低迷の影響は大きく、それ以前より進みつつあった農業従事者の高齢化に伴う離農と重なって、管理放棄された樹園地が急増していくことになる。例えば、大三島町における温州みかんの栽培面積は昭和46(1971)年の769haをピークに減少傾向に転じており、昭和57(1982)年には575haと11年間で194ha減少している。普通温州の栽培面積は昭和43(1968)年から昭和57(1982)年までの14年間で264ha減少している。この栽培面積の減少には、みかんからより収益性の高い中晩柑類(ネーブルオレンジ・八朔・伊予柑・甘夏柑など)への品種転換があったことも関係しているが、樹園地面積の拡大が進められる一方で管理放棄された樹園地も急速に増加していったことがうかがえる。

以上のことから、傾斜地農地が広がる大三島の景観は甘藷栽培が普及した18世紀前半頃から維持されてきたものであるが、その一方で、傾斜地農地の面積、分布、利用方法（栽培品種や管理方法）は時代とともに大きく変遷してきたことがわかる。特に、柑橘類の樹園地が大半を占めるようになった昭和期以降に面積の急増と急減があったことは土地利用変遷と土砂災害の関係を明らかにするうえで注目すべき点と言える。

2.3 大三島における土砂災害の履歴

大三島は瀬戸内海式気候が卓越しており年間を通じて降水量が少ない。そのこともあってか、豪雨に伴う土砂災害の記録は近隣の広島県などと比べると非常に少ない。四国災害アーカイブス (<https://www.shikoku-saigai.com/>, 2023年7月31日閲覧) を参照すると、大三島における豪雨災害の記録で最も古いものとしては宝永4(1707)年の風雨が見つかるが、山崩れなどの土砂災害の発生が明記されているものとしては明治18(1885)年5月の大雨が最初の事例である。その後は数十年おきに暴風雨や洪水氾濫によるものとみられる災害被害の記録が残されているが、土砂災害の発生が確認できる事例は少ない。顕著な土砂災害の発生が確認できたのは、昭和35(1960)年7月の豪雨(上浦町でがけ崩れ)、昭和47(1972)年8月の豪雨(大三島町や上浦町で山崩れ)、昭和51(1976)年9月の台風通過(大三島町で山崩れ)、昭和55(1980)年7月の豪雨(大三島町で26件のがけ崩れ)の4事例であり、それ以降は2018年までの40年近くにわたって大きな被害をもたらす土砂災害が起らなかったようである。

図3に示したのは大三島観測所における1976~2022年の観測記録に基づいて各年の年間降水量と連続雨量の年最大値を算出し、それらの47年間の推移を表したものである。年間降水量は602mm(1994年)から1773mm(1993年)の範囲で推移しており、年々の変動が大きいものの、豪雨による土砂災害が発生した年(1976年, 1980年, 2018年)がとりわけ雨の多い年だったわけではない。連続雨量の年最大値についても、2018年の24時間最大雨量(249.5mm, 7月6日7時から7月7日7時にかけて観測)が他の年に比べて突出して多いことを除けば、土砂災害が発生した年の雨量がとりわけ多かったとは言えな

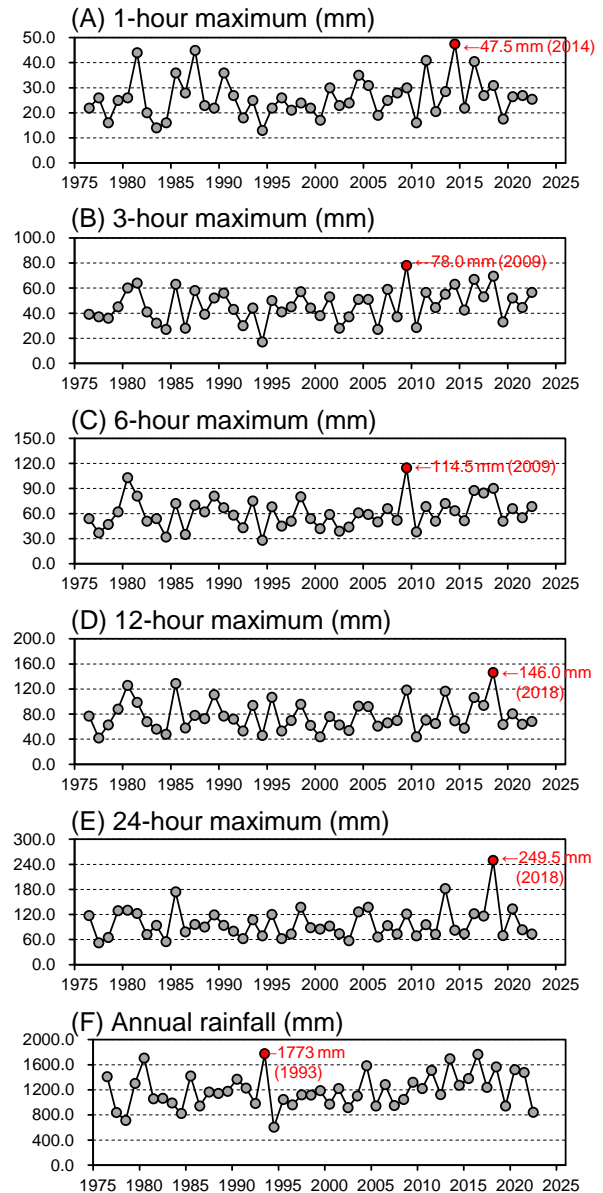


図3 大三島観測所で観測された連続雨量の年最大値の推移(1967~2022年の47年間)

い。そのため、土砂災害の記録のある1976年, 1980年, 2018年以外の年の豪雨によっても山崩れなどが散発的に発生していた可能性はある。

地震についても豪雨と同様で、土砂災害に関する記録は少ない。平成13(2001)年3月24日に発生した瀬戸内海西部(安芸灘), 上蒲刈島の南方を震源とする深さ46kmの地震(2001年芸予地震:M6.7, 最大震度6弱)の際には、大三島町や上浦町で震度5強の揺れを記録したが(内閣府, 2003), 島内では土砂災害や地盤災害による顕著な被害は報告されていない(土木学会芸予地震被害調査団, 2001)。

2001年芸予地震と同じく瀬戸内海の海上周辺に震源をもち、中四国地方に大きな影響を与えた地震(フィリピン海プレートの沈み込み帯北端付近で起こるスラブ内地震)としては、明治38(1905)年6月2日の芸予地震(M7.2)、安政4(1857)年10月12日の伊予大震(M7.1/4±0.5)、安政元(1854)年12月26日の豊予海峡地震(M7.3~7.5)、貞享2(1686)年1月4日の地震(M7.0~7.4)、慶安2(1649)年3月17日の伊予安芸大震(M7.0)があるが(宇佐美ほか, 2013)、いずれの地震についても大三島での土砂災害や地盤災害に関する記録は見つかっていない。

以上のように、大三島における土砂災害の履歴には不明な点が多いものの、多くの被害をもたらすような土砂災害の発生はこれまで稀だったとみられる。特に、1980年以降は2018年までの40年近くにわたって顕著な土砂災害が発生していなかった。

2.4 大三島における山地の荒廃と修復の歴史

一方で、近世以降の大三島では、斜面の侵食と土砂流出が深刻化していた事実があることについてもここで触れておきたい。日本における近世以降の山地荒廃の地理的背景と人為的要因を詳しく調べた千葉(1991)によれば、瀬戸内海周辺の花崗岩が分布する地域は、製塩用の薪が大量に採取されたために山地の荒廃(いわゆるはげ山化)の特に顕著な地域であったとされる。大三島も例外ではなく、はげ山修復のための治山事業(山腹緑化工)やはげ山からの土砂流出により天井川となった河川の浚渫および改修工事が江戸中期ごろより繰り返し行われてきたことがさまざまな史料から確認できる。愛媛県史(愛媛県史編纂委員会(編), 1986)にそれらの内容をまとめた詳しい記述があるので、その一部を要約するかたちで以下に紹介する。

瀬戸内海島嶼部の自然植生は、シイ類、カシ類、ヤブツバキなどの常緑広葉樹が優占する照葉樹林であったと考えられる。大山祇神社所蔵の鎌倉時代の絵図には鬱蒼とした木々が描かれており、当時は常緑広葉樹が繁茂していたものと思われる。しかし、製塩用燃料や薪炭材の採取のために過度の伐採が続いたことで森林が失われていく。元禄元(1688)年、土砂流出防止用松苗植え付けのため、松山藩奉行の林太源兵衛が大三島に来島していることや、元禄15(1702)年に大三島の

百姓衆が松苗植樹の願書を藩主に提出していることを踏まえると、江戸期中期にはすでに山地の荒廃がかなり進行していたものとみられる。

山地の荒廃が最も深刻化したのは林野利用の規制が緩和された明治期以降と考えられる。明治44(1911)年に編纂された宮浦村(現・大三島町)郷土誌には、宮浦本川の土砂の流出がおびただしく、天井川の発達が著しいことが記されている。上浦村(現・上浦町)井口の井口本川においても、土砂流出が急増したのは明治期に入ってからであると古老が伝えている。明治期末期の写真を見ると、宮浦・井口・甘崎・瀬戸地区などでは、山地の中腹から山頂にかけてはほとんどはげ山化しており、樹木は谷筋や山麓付近にしか見られない。当時は、農民が日常燃料として枯れ木や落ち葉、松かさなどを採取していたため、山地には落ち葉もほとんどなく、極度の痩せ地になっていたようである。明治31(1898)年に測図された越智郡(現・今治市)島嶼部の地形図の初版をみると、大三島をはじめとする越智諸島や上島諸島では崩土、流土、ハイマツ地の記号が至るところに見られる。このことから、明治期末期には山地のほとんどがはげ山になっていたことがわかる。

はげ山の形成は過度な森林の伐採によって生じたものであるが、地質と関連した分布の特徴をもつ。大三島においてははげ山の形成が著しく進行したのは鷲ヶ頭山を中心とした島中央部に広がる花崗岩の分布域であり、南西部と北部に広がるホルンフェルスの分布域でははげ山はほとんど形成されなかったようである。

はげ山となった山地からは降雨のたびに多量の土砂が流出し、その土砂が河床に堆積することで天井川が形成されていった。大三島町を流れる宮浦本川・明治川・台本川・野々江本川・明日本川、上浦町を流れる井口本川・井口古戸川などはいずれも天井川になっているが、中でも宮浦本川や井口本川の河床は周辺の平地の地盤高よりも5m以上高くなった。

はげ山が急速に拡大した明治期以降には、天井川の治水対策として川ざらえと呼ばれる浚渫工事や堰止めと呼ばれる堤防決壊防止のための土木工事が盛んに行われた。しかし、保水力のないはげ山で発生する鉄砲水がしばしば天井川を決壊させて甚大な被害をもたらした。特に明治38(1905)年10月の豪雨による水害被害は甚大だ

ったようで、宮浦村では大小河川がことごとく決壊して17棟の家屋が流失または埋没したほか、24町歩（約23.8ha）の田畑が流出した。

この災害を契機に、はげ山の修復が治水対策上喫緊の課題となった。愛媛県当局は明治40（1907）年に大三島のはげ山地帯を土砂打止保安林に指定し、林地利用を制限した。当時、大三島には、宮浦村に281町歩（約278.6ha）、瀬戸崎町に93町歩（約92.2ha）、盛口村に89町歩（約88.2ha）のはげ山があり、ほかにも植生のきわめて貧弱な山林が多数あったとされる。

保安林における植林は明治42（1909）年から行われ始めた。当初は、はげしばり（ハンノキやヤシャブシなど緑化のための導入植物によく用いられる樹木の総称）の植栽が試験的に行われた。その後、明治45（1912）年に宮浦村・盛口村・瀬戸崎村に施業森林組合が結成され、国と県からの補助金を得たことで植林が本格化するようになった。各森林組合による工事の進捗状況を見ると、大正2～10（1913～1921）年の9年間に、宮浦村で48町歩（約47.6ha）の植林を付随した地盤保護工事と8.7町歩（約8.6ha）の植樹が行われているほか、盛口村では68町歩（約67.4ha）の地盤保護工事と11町歩（約10.9ha）の植樹が行われている。また、瀬戸崎村では大正元～10（1912～1921）年の10年間に86町歩（約85.2ha）の地盤保護工事と23町歩（約22.8ha）の植樹が行われた。

このように保安林における植林が進められていった結果、はげ山は徐々に減少していった。保安林では植林後も入林が厳しく制限されており、落葉落枝の採取を含めてすべての伐採行為が禁じられていた。しかし、昭和5（1930）年頃からは伐採許可が下りるようになると、再び住民が薪炭材などを採取するようになった。保安林の伐採は昭和47（1972）年頃まで続いたが、燃料としての木材需要が失われたことで伐採も行われなくなった。現在の保安林は、松くい虫被害（マツ材線虫病）を受けて立ち枯れしたアカマツが目立つようになっており、ツツジ類などが繁茂した低木林になっているところも多く見られる。

2.5 大三島における平成30年7月豪雨による災害発生状況

2018年6月28日から7月8日にかけて、台風第7号の接近や発達した梅雨前線の影響により

九州・中国・四国地方から近畿・東海・中部地方にかけての広い範囲で記録的な大雨が降った（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全国で2,581件にのぼり、ひとつの災害事例としても1年間の土砂災害発生件数としても、集計を開始した1982年以降の最多件数となった（国土交通省，2019）。土砂災害発生件数を都道府県別にみると、広島県（1,242件）に次いで愛媛県（413件）が多く、甚大な被害を被っている。

芸予諸島の大三島、伯方島、大島でも多数の土砂災害が発生した（平成30年7月豪雨愛媛大学災害調査団，2019）。大三島観測所で記録された雨量（図4）をみると、7月5日12時頃に1時間13mmのやや強い雨を記録してからは1時間5～20mm程度の雨が続き、7月6日13時頃には累積雨量が200mmを超えている。その後も雨の勢いは衰えなかったが、7月7日7～8時頃にかけて時間20mmを超える強い雨が2時間以上降り続き、総雨量が400mmを超えてからようやく小康状態となり、7月8日11時頃に降り止んでいる。

災害被害に関する政府や地方自治体の発表資料、報道資料などをまとめた三隅（2019）によると、芸予諸島では以下の時間帯に土砂災害が発生していたことがわかっている。大三島東部の上浦町井口地区では、7月6日18時過ぎに温泉施設背後の斜面が崩れて土砂が流入した。また、大島北部の吉海町泊地区では、7月7日6時40分頃に住宅が土砂に埋まり、吉海支所が消防に通報した。伯方島南部の伯方町有津地区では、7月7日7時頃に住宅に土砂や流木が押し寄せた。以上のような気象状況や災害発生状況を踏まえると、1時間19mmのやや強い雨が降り、累積雨量が240mmを超えた7月6日18時頃から、1時間21.5～31mmの強い雨が降り続いた7月7日7～8時頃にかけての降雨の後半に、斜面崩壊などの大規模な土砂移動現象が相次いで発生し、土砂が平野部にまで達したところで人的被害や建物被害が生じたものと考えられる。

上述の被害のほかにも、農作物、農地、農業用施設（ため池、農業水利施設、農道など）の被害が多数報告されていることから、例えば、愛媛県宇和島市吉田地区の柑橘樹園地域でみられたように（山崎，2018，2019；平成30年7月豪雨愛

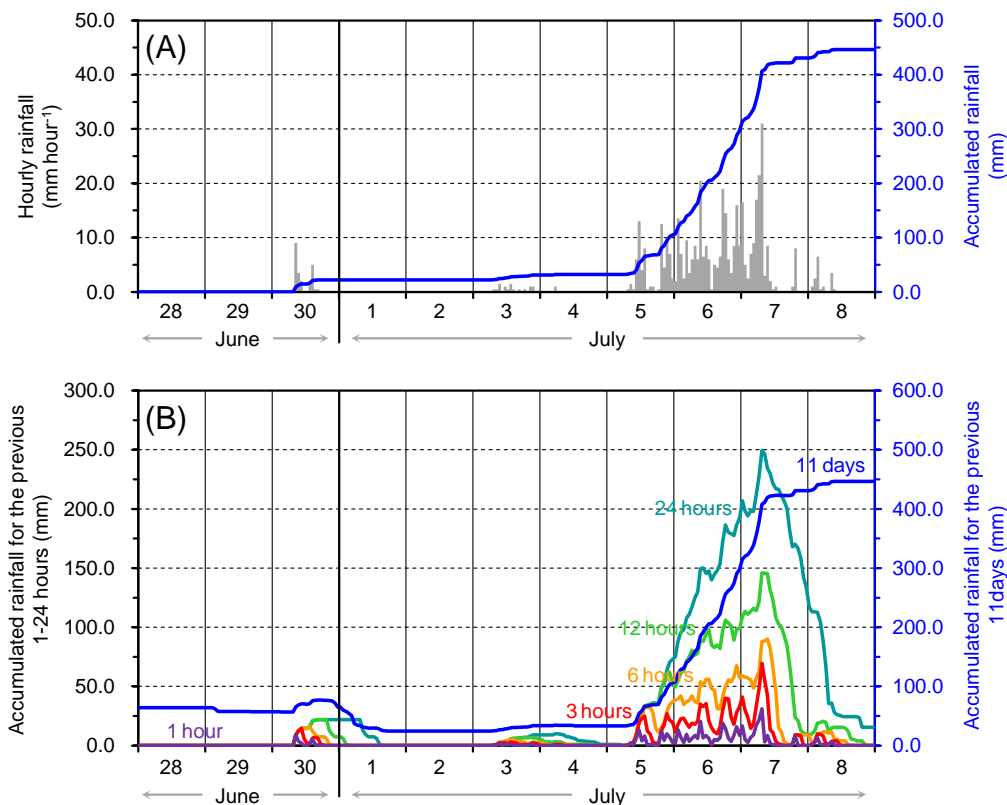


図4 平成30年7月豪雨時に大三島観測所で記録された雨量の推移

(A) 2018年6月28日0時～7月8日24時の11日間(264時間)における1時間雨量および累積雨量の推移, (B) 同期間における1時間・3時間・6時間・12時間・24時間・11日間(264時間)連続雨量の推移。

媛大学災害調査団, 2019; 木村ほか, 2019; Lusiana and Shinohara, 2022), 山地の斜面崩壊などによって発生した土砂が農地に流入したり, 傾斜地に立地する農地が崩壊したりすることも多発していたと考えられる。大三島における農地の土砂災害に関して, 筆者らが豪雨後に行った調査では, 昭和期以降に造成された農地(柑橘樹園地)やその放棄地とみられる盛土斜面で大規模な崩壊が複数起こっていたことが明らかになった(木村・佐藤, 2022; Kimura et al., 2023)。このような災害発生状況を踏まえて, 以下では, 農地造成や管理放棄などを含めた土地利用変遷に注目した調査解析を行う。

3. 研究方法

3.1 研究方針

本研究では, 平成30年7月豪雨により多数の斜面崩壊が発生した愛媛県島嶼部の大三島において, 島内における土地利用変遷の特徴と崩壊地の分布を詳しく調べる。そして, 傾斜地の土地利

用がさかんな地域においてこれまでの土地利用や土地被覆の変化が斜面崩壊の発生にどのようなかたちで, どのくらい影響を及ぼしていたのかを明らかにしようとする。そのため, 以下のような研究方針を立てた。

3.1.1 研究対象期間

土地利用変遷の把握は昭和期中期以降の過去60年程度の期間を対象に調査および解析を行う。研究対象地域の大三島では, 昭和30年代以降に柑橘類の樹園地の拡大とその後の離農に伴う管理放棄を経験しており(2.2節), この期間には傾斜地農地と林地の分布に大きな変化があったことが予想されるためである。また, 昭和30年代以降は国土地理院が定期的な空中写真撮影を行っており, 複数時期の空中写真が得られやすいというのも, この期間を選定した理由のひとつである。

3.1.2 研究手法

本研究は, 主に地理情報システム(GIS)を用いた空間解析と現地調査による検証を軸に進める。斜面崩壊と土地利用変遷の判読には, 地理院

地図などで公開されているオープンデータや先行研究で取得済みの光学衛星画像データなどを用いる。これらのデータとそれぞれの判読結果をGISソフト上で統合して解析を行う。現地調査では、現在の土地被覆状況や土地利用・維持管理などの実態、斜面崩壊発生箇所土地条件を調べる。

3.1.3 調査および解析の流れ

調査および解析は、(1)土地利用変遷の実態把握と類型化、(2)平成30年7月豪雨による斜面崩壊地のマッピング、(3)平成30年7月豪雨の雨量分布の解析、(4)現在の土地被覆状況と斜面崩壊地の特徴に関する現地調査、(5)雨量分布および土地利用変遷と斜面崩壊発生箇所との関係についての空間解析、の順に行う。

まず、既存の土地利用図や空中写真などを利用して大三島における過去60年程度の土地利用変遷を把握し、類型化する。次に、平成30年7月豪雨後に撮影(撮像)された空中写真および光学衛星画像を用いて斜面崩壊地のマッピングを行う。個々の斜面崩壊地について、土砂移動範囲の特徴をもとに土石流化したか否かを判別して流動特性を解析する。雨量については、島内での較差を考慮するために分布型の雨量データを取得し、短期から長期の雨量指標(1時間・3時間・6時間・12時間・24時間連続雨量の期間最大値および11日間(264時間)の降雨期間における総雨量)を算出する。それぞれの雨量指標の大小は推定再現期間によっても評価する。現地調査では、土地利用変遷の異なる複数地点を踏査して、現在の土地被覆状況(優占種、樹木個体のサイズ、密度などの概況)、地形や地盤の改変状況、土地利用や維持管理などの実態を調べ、土地利用変遷の判読および類型化の結果を検証する。また、斜面崩壊発生箇所における地形・地質・地盤・植生などの土地条件の特徴を記録する。

以上の結果をもとに、雨量および土地利用変遷の分布と斜面崩壊の分布を比較し、双方の空間的な対応関係を調べる。得られた解析結果から、昭和期からの土地利用変遷が平成30年7月豪雨による斜面崩壊の発生にどのようなかたちで、どのくらいの影響を及ぼしていたのかを考察する。

3.2 土地被覆区分図の作成に基づく土地利用変遷の把握と類型化

その土地が過去にどのような利用をされており、それに伴い土地の被覆(植生)がどのように

変遷してきたかを明らかにするためには、複数時期の土地被覆区分や土地利用の情報が必要になる。現在、日本国内では、植生などの土地被覆や土地利用に関する地理空間情報として国土地理院の土地利用図や国土交通省の土地利用細分メッシュ、環境省の現存植生図などが整備されている。土地利用図は空中写真判読や資料調査、現地調査に基づいて土地利用状況を都市集落、農地、林地等の18区分に分割したもので、全国版としては1982～1983年の調査に基づく縮尺1:200,000の図幅が作成されている。土地利用細分メッシュは、衛星画像を用いて土地利用状況を田、農用地、森林、荒地、建物用地などの10数種に分類し、100mメッシュ単位のデータとして整備したもので、これまでに1976年、1987年、1991年、1997年、2006年、2009年、2014年、2016年、2021年のデータが作成されている。現存植生図は、空中写真および衛星画像の判読と現地調査に基づいて植物社会学的な手法で土地被覆状況を分類したものである。現在のところ、1978～1999年に実施された第2～5回調査に基づく縮尺1:50,000の図幅と1999～2012年に実施された第6・7回調査に基づく縮尺1:25,000の図幅がシェープファイル形式のベクタデータとして公開されている。ただし、第6・7回調査結果は今回対象とする瀬戸内海島嶼部などの一部地域が未完成の状態である。

以上のように、複数時期に作成されたデータが利用可能であるが、土地被覆・利用状況の分類基準は作成機関や作成年ごとに異なっており、単純な比較のみでは土地被覆や土地利用に変化があったか否かの判断がつかない。また、いずれも小縮尺や中縮尺の図幅であるため、例えば、数アール～数十アール(10^{-4} ～ 10^{-3} km²)程度の小規模な農地区画が多い傾斜地において土地利用変遷を把握するには十分な解像度とは言えない。そこで本研究では、上述した既存の土地被覆・利用情報を参考に、複数時期の空中写真の実体視判読を行うことで、より詳細な土地利用変遷の時系列データを構築することとした。

実体視判読に用いたのは、表1に示す6時期の空中写真および光学衛星画像である。このうち、1962年5月31日、1975年2月13日、1981年10月20日、2016年4月30日撮影の空中写真は国土地理院が公開しているものであり、地図・空

表 1 土地被覆区分および斜面崩壊の判読に使用した画像

Year	Date	Type *	Scale **	Acquired by
1962	31 May	MAP	1:10,000	Geospatial Information Authority of Japan
1975	13 Feb.	CAP	1:8,000	Geospatial Information Authority of Japan
1981	20 Oct.	CAP	1:10,000	Geospatial Information Authority of Japan
2016	30 Apr.	CAP	1:10,000	Geospatial Information Authority of Japan
2018	16 Jul.	OSI	(1.50-m res.)	Airbus Defence and Space
2018	23 Sep. / 2 Nov.	CAPT	(0.25-m res.)	Forest Agency of Japan

* Abbreviations: MAP, monochrome air-photo; CAP, colored air-photo; OSI, optical satellite imagery; CAPT, colored air-photo with very-fine topographic map.

** Values in parentheses indicate resolutions of the digitalized optical images.

中写真閲覧サービスより撮影写真の 400dpi 画像がダウンロードでき、また、GIS ソフト上ではオルソモザイク画像をマップタイルレイヤとして表示することができる。2018 年 7 月 16 日の画像は SPOT-6 によって撮像された光学衛星画像（解像度 1.5m のパンクロマティックセンサーイメージと解像度 6m のマルチスペクトル 4 バンドセンサーイメージの 2 種）のパンシャープン処理で得られた解像度 1.5m のトゥルーカラー画像である。2018 年 9 月 23 日および 11 月 2 日撮影の空中写真は林野庁が豪雨後の航空レーザ測量（林野庁，2019）実施時に撮影したものであり、解像度 0.25m の高精細画像である。

各時期の土地被覆は大三島の植生および土地利用の特徴を考慮して、林地・低木地・農地・開発地の 4 つに区分することとした（図 5）。林地（forest）は高木が密生している領域で、大部分が樹冠に覆われていて地表面は見えないところが多い。大三島にはスダジイやヤブニッケイが優占する常緑広葉樹林、クヌギやコナラが優占する落葉広葉樹林、アカマツやクロマツが優占する常緑針葉樹林などのほか、一部にはスギやヒノキが植林された常緑針葉樹人工林が広がっているが、今回の判読では構成樹種の違いは区別せずすべて林地に区分した。低木地（shrub）は樹木が疎らにしか認められない領域で、植栽後間もない若木やツツジ類などの低木の樹冠が疎らに見られるほかは、ササ類、シダ類、草本類などの下層植生に覆われた地表面や裸地化した地表面が広く見られる。農地（farmland）は区画化された圃場面が見られる領域で、主に柑橘類の樹園地からなる。空中写真を観察すると、柑橘類の樹園地では圃場面に樹冠の小さな低木が一定間隔で並ぶ

様子が視認できるため識別は容易である。開発地（developed land）は植生に覆われていない領域（無植生地）を統合した区分で、主に住宅地や商工業用地、採石地などからなる。このほか、解析対象範囲からは除外したが、ダム湛水域やため池、河川流路などの水域（water body）が存在していた。

各時期の土地被覆区分図を比較してそれぞれの場所での時系列変化を調べたところ、林地や低木地といった（半）自然的環境から農地や開発地といった人工的環境に転換されるケースと、その逆に植林や緑化工事あるいは管理放棄などに伴う植生侵入によって人工的環境農地から（半）自然的環境に遷移していくケースが認められた。他方で、土地被覆区分に変化が見られないケースも認められた。そこで、1962 年から 2018 年にかけての土地利用変遷を次の 8 パターンに類型化し、それぞれのパターンに該当する領域の分布を把握することとした。解析期間のいずれかの時期に土地被覆区分が変化していた場合、その領域の最終的な（2018 年時点での）土地被覆区分をもとに、(1) 林地への遷移（succession to forest）、(2) 低木地への遷移（succession to shrub）、(3) 農地への転換（conversion to farmland）、(4) 開発地への転換（conversion to developed land）、のいずれかに分類した。また、解析期間を通じて土地被覆区分が変化しなかった場合には、その領域の土地被覆区分をもとに、(5) 林地の維持（remaining forest）、(6) 低木地の維持（remaining shrub）、(7) 農地の維持（remaining farmland）、(8) 開発地の維持（remaining developed land）、のいずれかに分類した。図 6 に典型的な土地利用変遷のパターンを例示する。

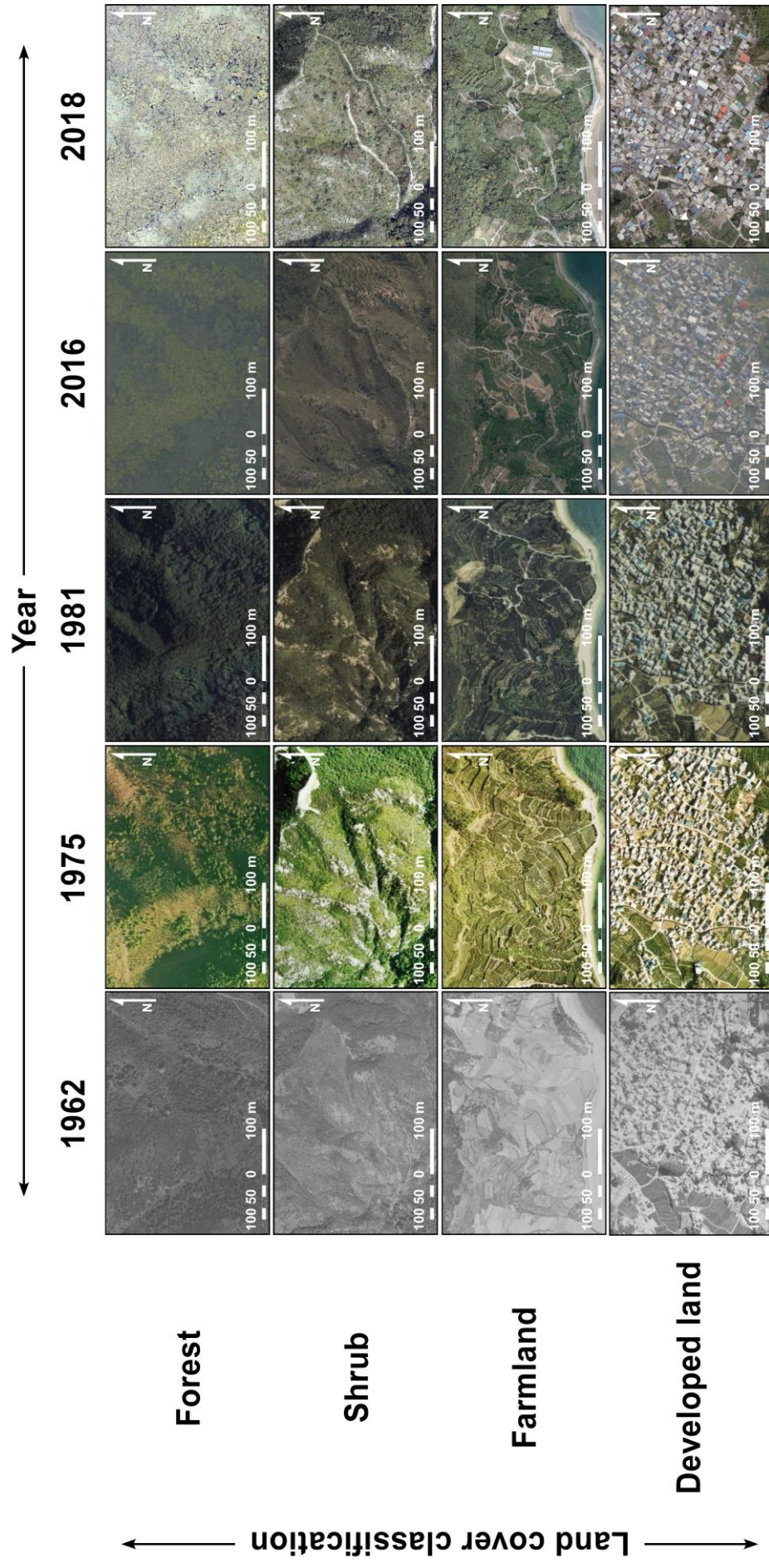


図5 判読および解析に用いた各時期の空中写真と土地被覆区分の例

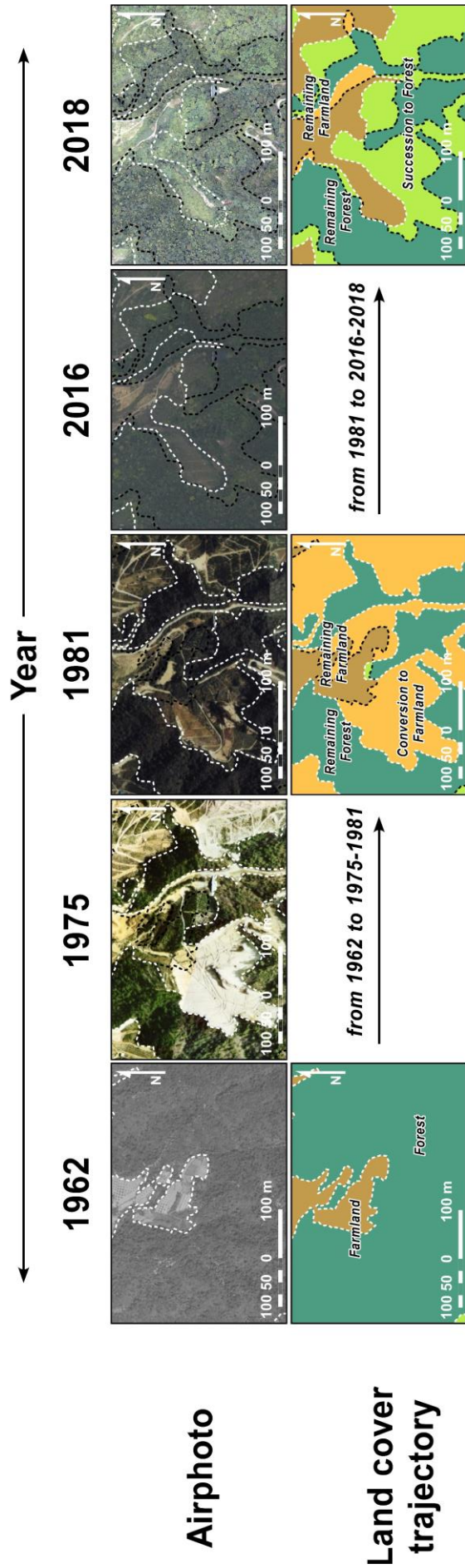


図6 典型的な土地利用変遷のパターンの例

(1962年時点で林地だった領域が1975-1981年の段階で農地(傾斜地樹園地)に転換されている。その後、新たに造成された傾斜地農地の一部では、2016-2018年までに樹林化が進んでおり、すでに管理放棄されたものと見られる。)

土地被覆区分の判読結果については、数値植生高モデルにおける植生高の分布との比較を行うとともに、現地調査による現在の植生および土地利用状況の把握を行った。これにより、判読と現地の状況が相互に矛盾しないかを確認し、誤判読や誤分類が見つかった場合には元の土地被覆区分図を修正した。使用した数値植生高モデルは、上述の林野庁が豪雨後（2018年9～11月）に実施した航空レーザ測量データから構築したもので、解像度は0.5mである（図7）。現地調査は2022年2月～2023年7月の期間に行った。

3.3 平成30年7月豪雨による斜面崩壊発生箇所と土砂到達範囲の把握

取得した画像のうち、平成30年7月豪雨後に撮影または撮像された2つの画像（2018年7月16日撮像のSPOT-6光学衛星画像および2018年9月23日、11月2日撮影の空中写真画像）を用いて豪雨によって新たに発生した斜面崩壊地の発生位置と土砂移動範囲を判読した。判読においては、オルソ化された画像を国土地理院の地理院地図（1:25,000地形図）、5mメッシュ数値標高モデル、林野庁が豪雨後に実施した航空レーザ測量データに基づく0.5mメッシュ数値標高モデル（林野庁、2019）などの地形図と畳重し、斜面崩壊の発生域や崩壊による生産土砂の移送・堆積域

が豪雨前後の地形と矛盾しないように確認しながら土砂移動範囲のポリゴンデータを作成した。手順としては、まず、土砂移動範囲の全体の輪郭を判読、抽出し、次に、斜面上の遷急線や斜面と谷底面の境界となる遷緩線などの微地形の分布、画像上で視認できる崩土の堆積状況などから土砂移動範囲を斜面崩壊の発生域と移送・堆積域に分割したポリゴンを新たに作成した。最後に、ArcGIS (ver. 10.8.2) のジオメトリ演算ツールを用いて各ポリゴンの水平投影面積を算出した。

3.4 平成30年7月豪雨の雨量分布と斜面崩壊発生箇所との関係についての空間解析

豪雨による斜面崩壊地の分布（局所的な集中、崩壊地の多寡）には、斜面崩壊の素因となる土地条件の空間的な広がりや誘因となる降雨の量や強度の分布が関わってくるものと考えられるが（Sidle and Ochiai, 2006）、その両者の影響を考慮して斜面崩壊地の分布特性を明らかにしている研究は少ない。例えば、本研究と研究対象地域と同じく柑橘樹園地としての土地利用が多い愛媛県宇和島市の吉田半島とその周辺地域における斜面崩壊地の分布特性を調べた Lusiana and Shinohara (2022) は、崩壊地の空間分布を説明する複数の統計モデルを構築して、地質・地形・土地利用といった素因の分布だけでなく雨量

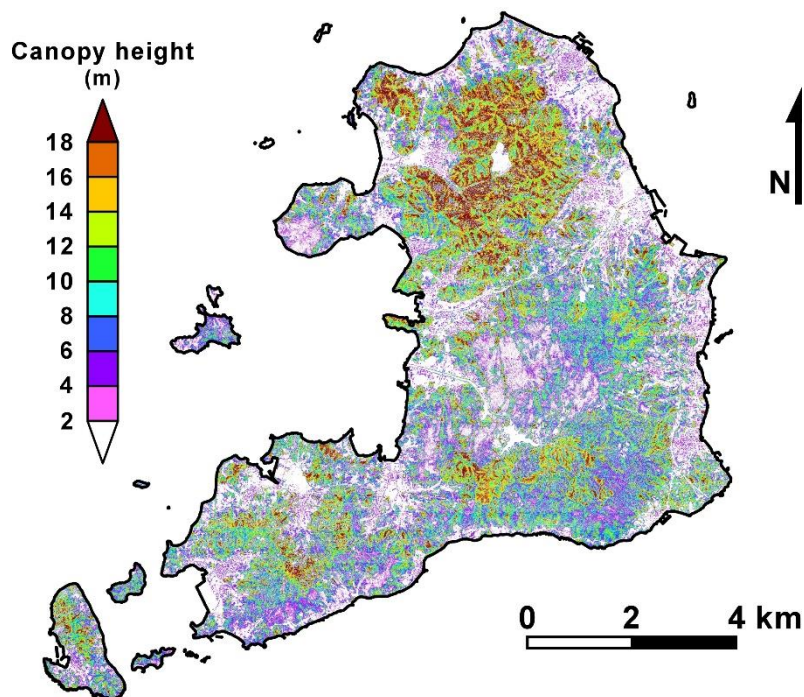


図7 航空レーザ測量データから推定した大三島島内における植生高の分布

分布を説明変数に加えたモデルで予測精度が向上することを示し、土地利用の影響が大きい地域においても雨量の空間的差異が斜面崩壊の発生を左右することを明らかにしている。こうした研究事例からも、素因と誘因の両者の影響を考慮した空間分布解析が必要不可欠と考えられる。そこで本研究では、Lusiana and Shinohara (2022)の研究アプローチに則って分布型の雨量データを用いた解析を行うこととした。

研究対象地域を含めた日本列島のほぼ全域をカバーする分布型の雨量データとしては、国土交通省が運用する XRAIN や気象庁の解析雨量がある。これら2つを比較すると、XRAIN が水平格子解像度約 250 m、更新頻度 1 分の降水強度分布データであるのに対し、解析雨量は水平格子解像度約 1 km の前 1 時間積算降水量が 30 分ごとに整備されているものであり、空間分解能も時間分解能も XRAIN の方が優れている。ただし、気象レーダーの観測値から推定した雨量強度をキャリブレーションなしで即時配信する XRAIN のデータは、レーダー設置地点の遠方や山地などの遮蔽域の背後で過小評価になることが指摘されている（前坂，2019）。そのため、地上における正味の雨量強度や一定期間での累積雨量を算出する場合には、多数の雨量計による観測記録を用いてキャリブレーションを行った解析雨量の方がより確からしい結果になると考えられる。したがって本研究では、雨量の観測値としての確からしさを優先して解析雨量を使用することとした。

まず、2018 年 6 月 28 日 0 時より 7 月 8 日 0 時までの期間の正時の気象庁解析雨量データ（毎時 00 分における前 1 時間積算雨量）計 264 セットを取得し、1 km² メッシュ単位での雨量の時系列データを作成したうえで、それぞれのメッシュにおける 1 時間雨量、3 時間雨量、6 時間雨量、12 時間雨量、24 時間雨量の期間最大値および期間総雨量を求めた。この結果のうち、大三島を包括する領域として 174 メッシュを抽出した。次に、雨量の値の分布から期間最大値および総雨量のそれぞれを 2.5~25 mm 幅の 5~6 階級に区分し、大三島の陸地のポリゴンと重ねることで雨量の階級ごとの分布域を特定し、それぞれの水平投影面積を算出した。

以上のような手順で得られた雨量の空間分布データと斜面崩壊地のポリゴンデータを用いて、

雨量の階級ごとに斜面崩壊地の発生密度、発生域の面積割合、発生域の面積規模の統計量（平均値、標準偏差、中央値、最小値、最大値）を求めた。また、移送・堆積域の分布と形状から土石流化したものを特定して到達距離と等価摩擦係数を測定し、雨量の階級ごとに土石流の発生比（斜面崩壊のなかで土石流化したものの割合、%）、発生密度、到達距離および等価摩擦係数の統計量を求めた。

3.5 土地利用変遷と斜面崩壊発生箇所との関係についての空間解析

土地利用変遷と斜面崩壊発生箇所との関係については、3.2 節で述べた方法によって得られた土地被覆および土地利用の空間分布データと斜面崩壊地のポリゴンデータを用いて、類型化した土地利用変遷の区分ごとに斜面崩壊地の発生密度、発生域の面積割合、発生域の面積規模の統計量（平均値、標準偏差、中央値、最小値、最大値）を求めた。また、土石流についても、土地利用変遷の区分ごとに土石流の発生比（斜面崩壊のなかで土石流化したものの割合、%）、発生密度、到達距離および等価摩擦係数の統計量を求めた。

4. 結果と考察

4.1 昭和期から平成期にかけての土地被覆および土地利用の変化

1962~2018 年までの約 57 年間に撮影された 5 時期の空中写真画像をもとに 1962 年、1981 年、2018 年の 3 時期における縮尺 1:10,000 の詳細な土地被覆図を作成した。1975 年と 2016 年に撮影された空中写真画像についても当初は個別に判読を行ったが、その後の撮影までの期間がそれぞれ約 6 年（1981 年）、約 2 年（2018 年）と短く、広範囲に及ぶ土地被覆（土地利用）の変化は確認できなかったため、1975 年と 1981 年の画像の判読結果を 1981 年時点での土地被覆図に集約し、2016 年と 2018 年の画像の判読結果を 2018 年時点での土地被覆図に集約するようにした。2018 年の画像は豪雨による斜面崩壊の発生後の画像であるため、崩壊が発生した斜面については、2016 年時点での土地被覆を反映するようにした。

図 8 に示す 3 時期（1962 年、1981 年、2018 年）の土地被覆図を作成した結果、いずれの時期も島内の大部分の土地が森林か農地となっていたが、

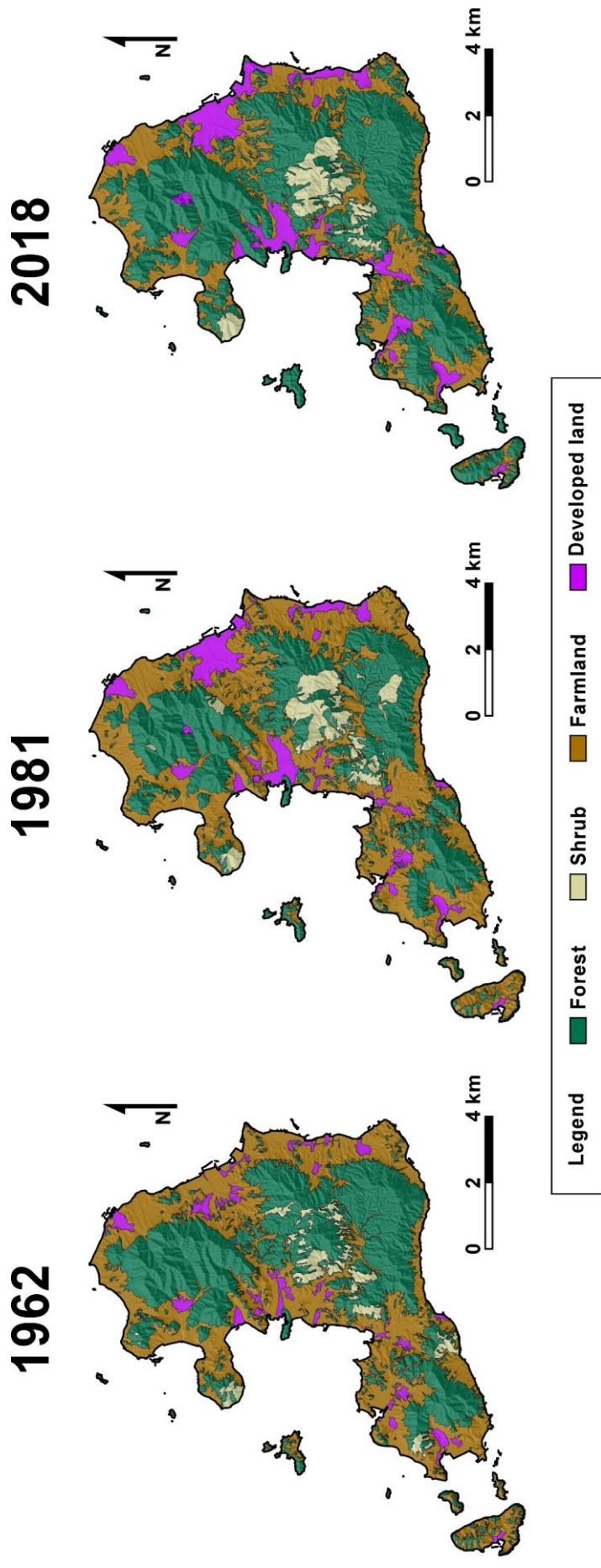


図 8 1962 年, 1981 年, 2018 年の 3 時期における大三島の土地被覆図

の20～40年ほどの期間に大きく変化していたことがわかった。

図9Aに示す土地被覆区分ごとの面積の推移をみると、林地の面積は1962年から1981年にかけて約4.3 km²減少(31.0 km² → 26.7 km²)したのち、1981年から2018年にかけては約10.0 km²増加(26.7 km² → 36.7 km²)していた。一方で、主に柑橘樹園地からなる農地の面積は1962年から1981年にかけて約0.7 km²増加(30.6 km² → 31.3 km²)したのち、1981年から2018年にかけては約10.5 km²減少(31.3 km² → 20.8 km²)していた。1962年以降に林地の面積が急減したことで1981年には農地の面積が最も大きくなったが、1981年以降は林地面積の急増と農地面積の急減が起きたことで、再び林地の面積が最も大きくなっていった。その他の土地被覆区分についてみると、低木地の面積は1962年から1981年にかけて約1.1 km²増加(2.9 km² → 4.0 km²)したのち、1981年から2018年にかけては約0.5 km²減少(4.0 km² → 3.5 km²)していた。また、開発地の面積は1962年から1981年にかけて約2.5 km²増加(2.9 km² → 5.4 km²)し、1981年から2018年にかけては約1.0 km²増加(5.4 km² → 6.4 km²)していた。このように低木地や開発地の面積にも顕著な変化が生じていたが、いずれももともとの面積比率が小さいために島全体の土地被覆を大きく変えるようなものではなかった。

土地被覆区分の時系列変化に注目して、土地利用変遷のパターンを次の8つに類型化した：(1)林地への遷移、(2)低木地への遷移、(3)農地への転換、(4)開発地への転換、(5)林地の維持、(6)低木地の維持、(7)農地の維持、(8)開発地の維持。2018年時点における土地利用変遷の分布図を図10に示す。

(1)～(8)の土地利用変遷のパターンごとに各時期の面積を集計した結果を図9Bに示す。また、どの土地被覆区分からどの土地被覆区分へと変化したかがわかるように図11のようなダイアグラムを作成した。解析期間全体(1962～2018年の約57年間)を通してみると、1962年以前より林地の状態が維持されていたところが面積で約23.6 km²と最も広い範囲を占めていた。これに次いで面積が大きかったのは農地の状態が維持されていたところで約18.4 km²あった。低木地

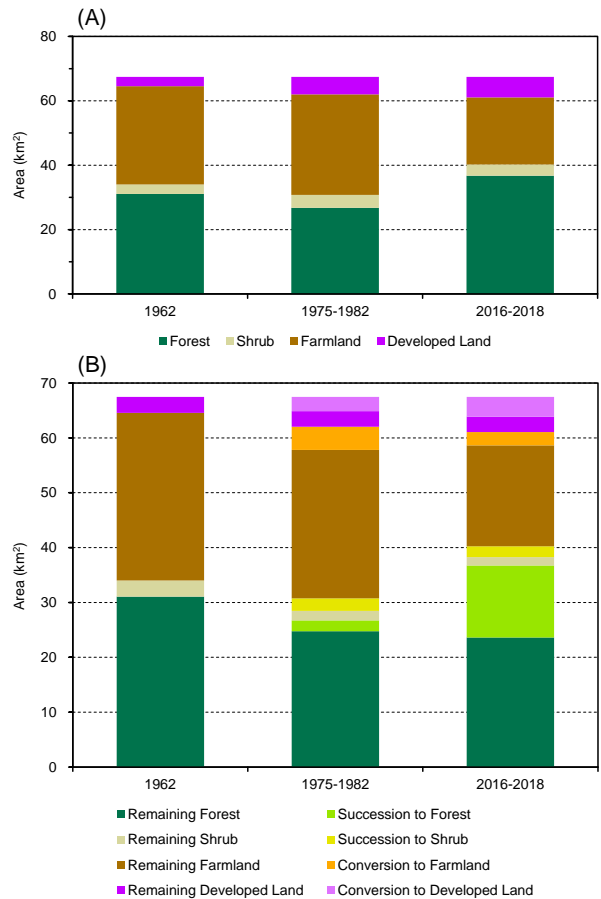


図9 土地被覆および土地利用変遷の区分ごとにみた面積の推移

(A) 1962, 1975-1981, 2016-2018年時点における各土地被覆区分の面積. (B) 1962～2018年の約57年間における土地利用変遷の区分ごとの面積の推移.

や開発地の状態で維持されていたところはそれぞれ約1.5 km²と約2.8 km²で林地や農地に比べて小さかった。

一方で、1962～1981年、1981～2018年の期間のいずれかで土地被覆区分が変化したところも多く、林地への遷移が合計で約13.1 km²、低木地への遷移が合計で約1.9 km²、農地への転換が合計で約2.4 km²、開発地への転換が合計で約3.6 km²あった。林地への遷移の多くが農地で起こっており(約11.1 km²)、特に1981年以降の約38年間に集中して起こっていた(約11.7 km²)。低木地への遷移はほとんどが林地で起こっており(約1.9 km²)、期間による違いはほとんどなかった。農地への転換はほとんどが林地で起こっており(約2.3 km²)、特に1962～1981年の約19年間に集中して起こっていた(約1.6 km²)。開

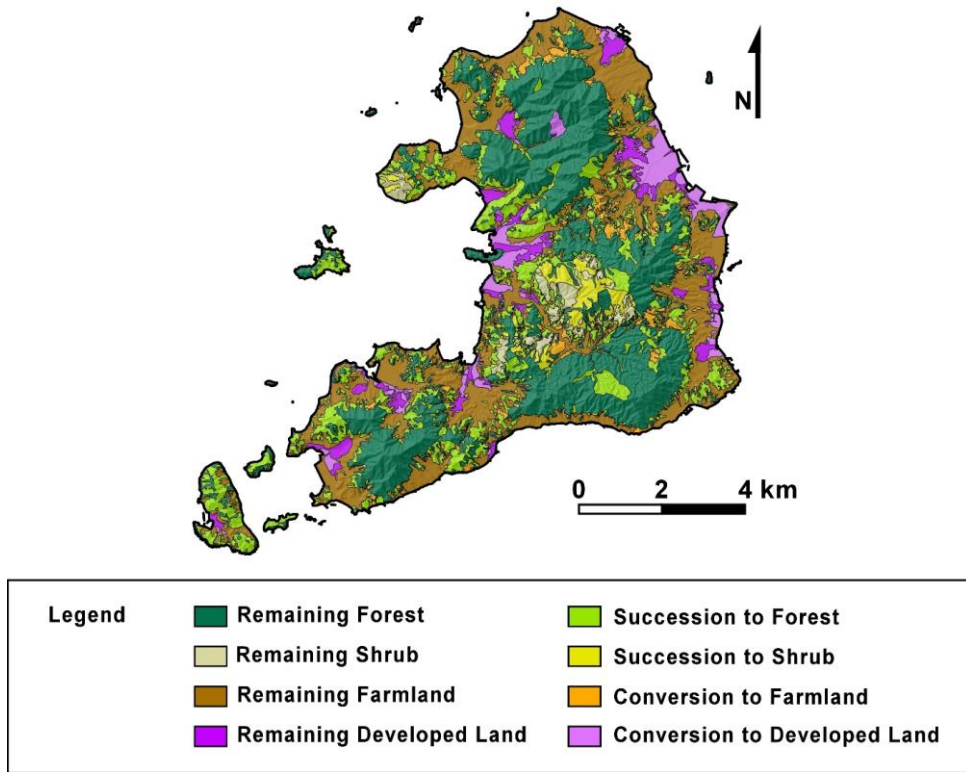


図 10 大三島島内における土地利用変遷区分の分布

Land cover class	(Semi)Natural environment		Anthropogenic environment	
	Forest	Shrub	Farmland	Developed Land
Remaining Forest (23.6)	←			
Succession to Forest (13.1) - from Shrub (2.0); from Farmland (11.1); from Developed land (<0.5) - after 1962 (1.4); after 1975-1981 (11.7)	←	←	←	←
Remaining Shrub (1.5)		←		
Succession to Shrub (1.9) - Forest Degradation (1.9); Shrub Colonization in Farmland (<0.5) - after 1962 (1.1); after 1975-1981 (0.8)	→	←	→	
Remaining Farmland (18.4)			→	
Conversion to Farmland (2.4) - Deforestation (2.3); from Shrub and Developed land (<0.5) - after 1962 (1.6); after 1975-1981 (0.8)	→	→	→	→
Remaining Developed Land (2.8)				→
Conversion to Developed Land (3.6) - Deforestation (<0.5); from Farmland (3.4) - after 1962 (2.6); after 1975-1981 (1.0)	→	→	→	→

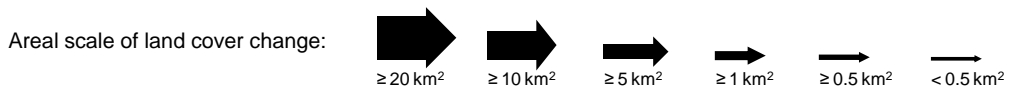


図 11 土地利用変遷のパターンと面積推移のダイアグラム

発地への転換はほとんどが農地で起こっており（約 3.4 km²）、特に 1962～1981 年の約 19 年間に集中して起こっていた（約 2.6 km²）。

以上の結果から、大三島における昭和期から平成期にかけての土地被覆および土地利用の変化には次のような特徴があることが明らかになった。大三島では、1962～2018 年までの約 57 年間一貫して林地と農地が高い面積割合を占める状態（それぞれが面積割合で約 31～54%を占め、両者を合わせた面積は島の面積の約 85～91%に及ぶ）が維持されてきた。しかしながら、1962～1981 年にかけては主に農地転換が進行したことで林地の面積は大きく減少した。1981～2018 年にかけては農地の管理放棄に伴う林地への遷移が進行したことで農地の面積が大きく減少するとともに林地の面積は増加しており、1962 年時点よりも林地の面積が大きくなっていった。こうした土地利用変遷の特徴は大三島における産業の動向と土地利用の変化（2.2 節）とも整合する。すなわち、大三島では、1960 年代から 1980 年代初めにかけて果樹農業振興を図るために傾斜地への樹園地の造成が進んだことで林地が大きく減少することとなったが、1970 年代頃よりすでに進みつつあった離農に伴う樹園地の管理放棄の影響で、1980 年代以降は農地の減少と林地の増加が急速に進んだと考えられる。

4.2 大三島における平成 30 年 7 月豪雨時の降雨の特徴

次に、多数の斜面崩壊を引き起こす誘因となった降雨の特徴を述べる。大三島観測所では、2018 年 6 月 28 日から 7 月 8 日にかけての 11 日間（264 時間）に 1 時間最大雨量で 31 mm、3 時間最大雨量で 69.5 mm、6 時間最大雨量で 90 mm、12 時間最大雨量で 146 mm、24 時間最大雨量で 249.5 mm を記録した（図 4）。また、総雨量としては 446.5 mm を記録していた（図 4）。

そこで、大三島観測所における 1976～2022 年の 47 年間の観測記録（図 3）に基づいて降雨の再現期間（リターンピリオド）を推定した結果を述べる。本研究では、1976 年 1 月 1 日以降の 1 時間あたりの雨量観測記録より各年最大の連続雨量（1 時間・3 時間・6 時間・12 時間・24 時間・264 時間）を抽出したデータセットを作成し、連続確率分布モデルに一般化極値分布を用いてフィッティング（一般化極値分布の確率密度関数に

おける 3 つのパラメータの最尤推定）することで年単位の再現期間を推定した。解析にはオープンソース・フリーソフトウェア R の解析パッケージである ExtRemes (Coles, 2001; Gilleland and Katz, 2014) を用いた。得られた結果を表 2, 3 に示す。

それぞれのモデルより、大三島観測所で平成 30 年 7 月豪雨時に記録された連続雨量の再現期間は、1 時間雨量で約 4.3 年、3 時間雨量で約 25.8 年、6 時間雨量で約 15.4 年、12 時間雨量で約 49.8 年、24 時間雨量で約 88.3 年と見積もられた。また、期間中の総雨量を 11 日間（264 時間）連続雨量とみなすと、その再現期間は約 24.1 年と見積もられた。

以上の推定結果から、平成 30 年 7 月豪雨時の大三島における雨量の特徴として、1～6 時間程度の短い時間に降った雨の強さは過去 47 年間の観測期間のあいだにも複数回観測されたレベルのものであったが、12 時間雨量および 24 時間雨量はいずれも観測史上最大であり、比較的長い時間に稀な量の雨が降ったということが明らかになった。

4.3 大三島における平成 30 年 7 月豪雨時の雨量分布と豪雨による斜面崩壊の特徴

ここからは、大三島の島内における雨量と斜面崩壊の空間分布特性をみていきたい。図 12 には平成 30 年 7 月豪雨による斜面崩壊地の分布を、図 13 には連続雨量の最大値の分布を気象庁解析雨量データの 1 km²メッシュ区画ごとに算出した結果をそれぞれ示した。島を包括する領域の 174 メッシュ区画における雨量をそれぞれ算出したところ、連続雨量の期間最大値は、1 時間雨量で 29～44 mm（平均±標準偏差：36.1±2.7 mm）、3 時間雨量で 60～80 mm（平均±標準偏差：70.3±4.4 mm）、6 時間雨量で 89～108 mm（平均±標準偏差：98.0±4.57 mm）、12 時間雨量で 147～198 mm（平均±標準偏差：172.0±12.2 mm）、24 時間雨量で 231～304 mm（平均±標準偏差：270.5±15.9 mm）の範囲にあった。また、総雨量は 415～552 mm（平均±標準偏差：479.0±28.8 mm）の範囲にあった。

豪雨後に撮像（撮影）された衛星画像と空中写真画像（表 1）の目視判読からは島全体で 512 箇所の新規崩壊地が特定できた（図 12）。新規崩壊地の箇所数、規模、発生密度および面積割合、土

表 2 大三島観測所における連続雨量の各年最大値を一般化極値分布にフィッティングした結果

Rainfall	Model parameter *			Goodness-of-fit **		
	location, μ	scale, σ	shape, ζ	NLL	AIC	BIC
1-hour max.	22.53 ± 1.06	6.41 ± 0.77	-0.01 ± 0.11	161.21	328.41	333.96
3-hour max.	41.46 ± 2.05	12.70 ± 1.45	-0.25 ± 0.09	186.89	379.79	385.34
6-hour max.	52.77 ± 2.51	15.39 ± 1.78	-0.08 ± 0.10	200.43	406.86	412.41
12-hour max.	65.46 ± 3.10	18.24 ± 2.35	0.06 ± 0.14	212.54	431.08	436.63
24-hour max.	80.01 ± 3.82	22.46 ± 3.11	0.22 ± 0.14	226.21	458.42	463.97
264-hour max.	184.36 ± 12.99	76.51 ± 9.89	0.05 ± 0.14	279.46	564.92	570.47

* Estimated three parameters in the generalized extreme value distribution model are shown with standard error estimates.

** Abbreviations: NLL, Negative Log-Likelihood value; AIC, Akaike's Information Criterion; BIC, Bayesian Information Criterion.

表 3 大三島観測所での観測記録に基づいて連続雨量の期間最大値の再現期間を推定した結果

Rainfall	Return level *			Observatory **	Radar/raingauge-analyzed precipitation data **	
	2-yr	20-yr	100-yr		Lowest	Highest
1-hour max.	24.9	41.2	51.0	31.0 mm (4.3 yr)	29.0 mm (3.3 yr)	44.0 mm (31.6 yr)
3-hour max.	45.9	68.0	76.0	69.5 mm (25.8 yr)	60.0 mm (6.7 yr)	80.0 mm (315.8 yr)
6-hour max.	58.3	93.3	111.7	90.0 mm (15.4 yr)	89.0 mm (14.2 yr)	108.0 mm (71.1 yr)
12-hour max.	72.2	125.0	162.7	146.0 mm (49.8 yr)	147.0 mm (52.0 yr)	198.0 mm (399.2 yr)
24-hour max.	88.6	173.6	257.0	249.5 mm (88.3 yr)	231.0 mm (64.0 yr)	304.0 mm (203.9 yr)
264-hour max.	212.7	429.5	580.4	446.5 mm (24.1 yr)	415.0 mm (17.1 yr)	552.0 mm (74.5 yr)

* Estimated rainfall levels (mm) for 2-year, 20-year, and 100-year return periods.

** Rainfall amounts measured at the Omishima observatory and estimated from radar/raingauge-analyzed precipitation data are shown with their return periods.

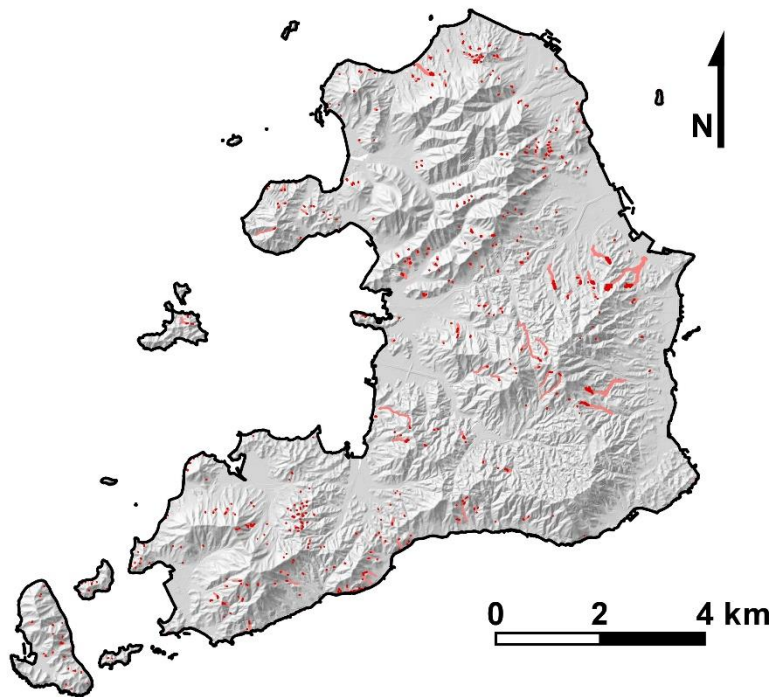
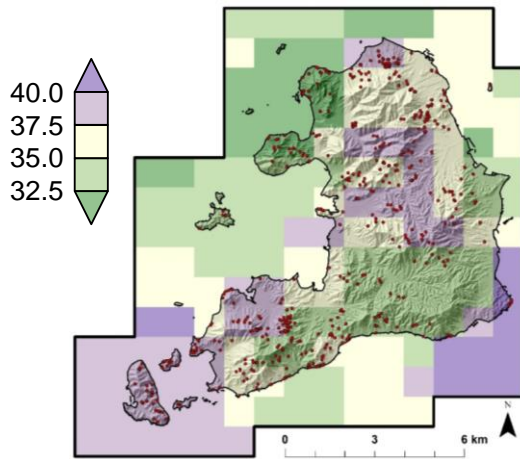


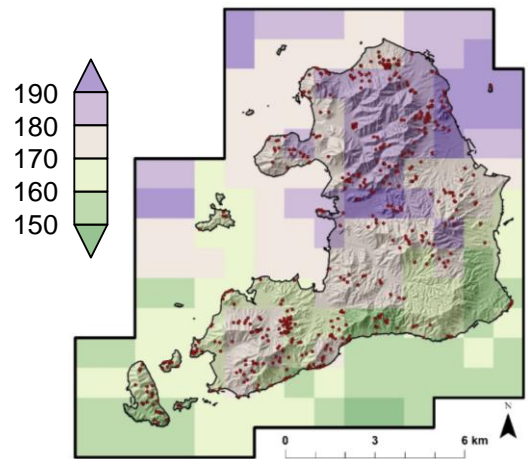
図 12 平成 30 年 7 月豪雨により大三島島内で発生した斜面崩壊の分布

赤色の領域は斜面崩壊の発生域を、ピンク色の領域は土砂の移送・堆積域をそれぞれ示している。

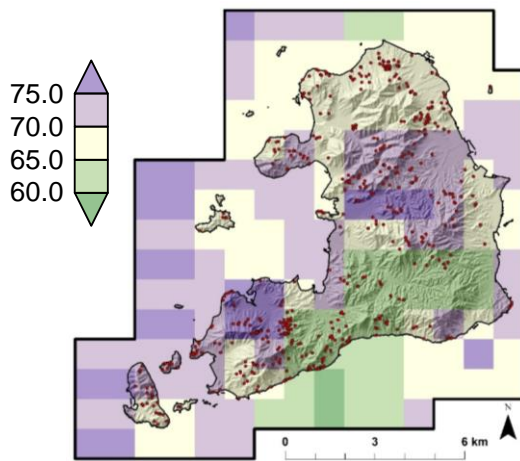
(A) 1-hour maximum (mm)



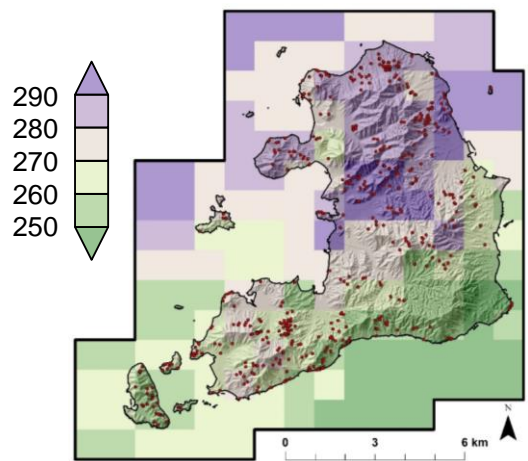
(D) 12-hour maximum (mm)



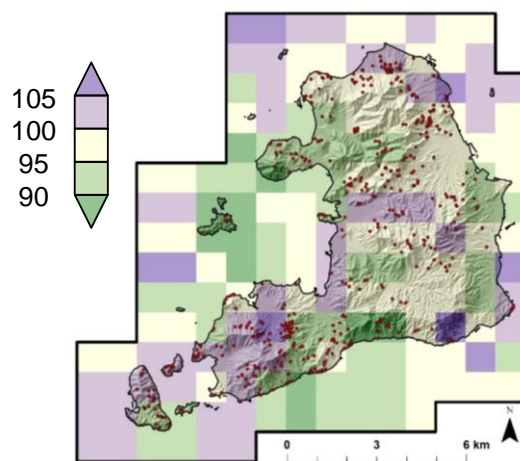
(B) 3-hour maximum (mm)



(E) 24-hour maximum (mm)



(C) 6-hour maximum (mm)



(F) Total rainfall (mm)

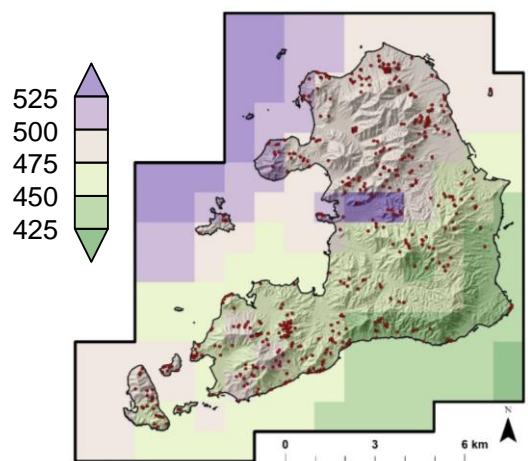


図 13 平成 30 年 7 月豪雨時における連続雨量の最大値の分布

気象庁・解析雨量データ（2018/06/28 0:00～2018/07/08 24:00 の正時のデータ）から推定した各 1km²メッシュの期間最大値を表す。各図の赤丸は斜面崩壊の崩壊源位置を示している。

砂の流動特性(土石流化した崩壊地の割合および到達距離)について集計した結果を表4に示す。崩壊地の規模は発生域の面積で6~9,279 m²の範囲(平均±標準偏差:267±718 m²,中央値:121 m²)に及んでおり、総面積は0.137 km²となった。これらの結果より、平成30年7月豪雨による斜面崩壊の発生密度は島全体で7.59箇所/km²,面積割合は0.2024%と見積もられる。

斜面崩壊の発生域と移送・堆積域の分布とその形状から、移送・堆積域が斜面下方の渓床部や平野部に達しており長距離移動しているものを斜面崩壊に起因する土石流とみなすと、該当するものが124箇所見つけた。豪雨時に発生した斜面崩壊の約24%が土石流化していたことになる。土石流の到達距離(L, m)は21~1216 mの範囲にあつて平均±標準偏差では162±206 mとなった。流動区間の標高差(H, m)から等価摩擦係数(H/L, m m⁻¹)を算出すると0.107~0.785 m m⁻¹の範囲にあつて平均±標準偏差では0.375±0.152 m m⁻¹となった。

つづいて、連続雨量の期間最大値の分布を各階級(雨量の範囲に合わせて2.5~25 mm区画の5~6階級に区分したもの)の面積割合で表した結

果を図14A-Fに、各階級の領域における斜面崩壊の発生密度および面積割合を図14G-Lにそれぞれ示す。いずれの連続雨量との関係をもみても、雨量の大きい領域で斜面崩壊の発生密度や面積割合が大きくなる傾向は認められなかった。ただし、降雨の稀さの観点からみると、雨量の大小と斜面崩壊の多寡が対応しなかった要因はそれぞれの連続雨量で異なっていたのではないかと考えられる。以下にその理由を述べる。

1 時間雨量の最大値では島内の大部分が32.5~40.0 mmの範囲にあるが、これを大三島観測所における観測雨量の極値分布モデルに当てはめておおよそその再現期間を見積ると約5.3~16.7年となり、どちらの量にしても稀な雨ではなかった。これとは逆に、12時間雨量の最大値として島内の大部分を占めた150 mm超、24時間雨量の最大値として島内の大部分を占めた250 mm超の雨というのは、再現期間としてはそれぞれ59.0年と89.0年を上回るレベルのものであり、島全域で稀な量の雨が降ったことがわかる。その結果、島全域で斜面崩壊の発生条件を満たす(降雨閾値を超える)こととなり、島内での雨量の較差の範囲では斜面崩壊の多寡に

表4 斜面崩壊地の箇所数、規模、発生密度、面積割合ならびに土石流の特徴

Landslides induced by the July 2018 storm event	Landslide population *	TN (slides)	512
		TA (km ²)	0.137
		LD (km ²)	7.588
		AP (%)	0.202
Landslide size characteristics **		Mean (m ²)	267±718
		Median (m ²)	121
		Range (m ²)	6, 9279
Debris flows induced by the July 2018 storm event	Debris flow population ***	TN (flows)	124
		RD (%)	24.219
		DD (km ²)	1.838
		TA (km ²)	0.280
Runout characteristics ****		Mean (m)	161±206
		Range (m)	21, 1216
		$\overline{H/L}$ (m m ⁻¹)	0.375±0.152

* Abbreviations for landslide population: TN, Total Number of landslides; TA, Total Area of landslide scars; LD, Landslide Density; AR, Area Proportion of landslide scars.

** Landslide size characteristics are represented by the Mean, Median, and Range of landslide scar area (m²).

*** Abbreviations for debris flow population: TN, Total Number of debris flows; RD, Ratio of Debris flows to the rainfall-induced landslides; DD, Density of Debris flows; TA, Total Area affected by debris flows (landslide initiation and debris flow transfer-deposition zones).

**** Debris flow runout characteristics are represented by the Mean and Range of debris flow runout distance (m) and the average value of the H/L ratio ($\overline{H/L}$, m m⁻¹) with its standard deviation. The H/L ratio was calculated by dividing the elevation difference (H, m) from the source to the end of the debris flow by the runout distance (L, m).

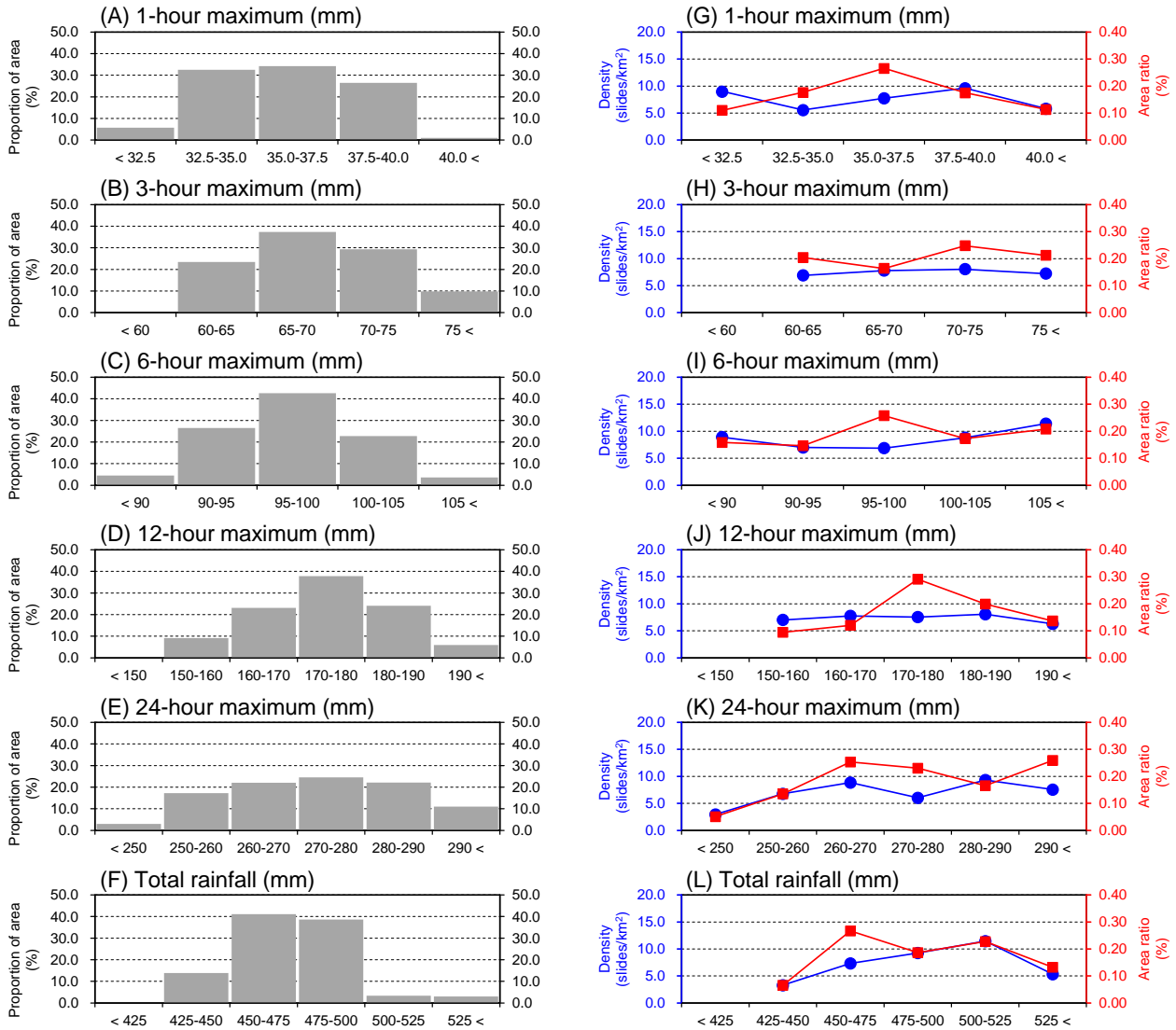


図 14 連続雨量の期間最大値と斜面崩壊の発生密度および面積割合との関係

(A-F) 大三島全域に占める連続雨量期間最大値（1時間・3時間・6時間・12時間・24時間連続雨量および総雨量）の各階級の面積割合、(G-L) 雨量の各階級の領域における斜面崩壊の発生密度（slides/km²）および面積割合（%）。

違いが認められなかった可能性がある。

一方で、3時間雨量、6時間雨量、総雨量に注目してみると、島内に占める面積割合が小さかった階級を除いて考えても、それぞれ 60.0～80.0 mm、90.0～105.0 mm、425.0～500.0 mm の範囲にあって、再現期間としては約 6.7～78.1 年、約 15.4～54.2 年、約 19.0～43.0 年に及んでいることになる。このように、島内で再現期間に大きな開きのある連続雨量に対しても、斜面崩壊の発生密度や面積割合が大きくなる傾向は認められなかった。

同様に、土石流の多寡や流動性の高さについても、連続雨量とのあいだに明瞭な関係は認めら

れなかった。連続雨量の期間最大値と土石流の発生比および発生密度の関係を図 15A-F に、連続雨量の期間最大値と到達距離および等価摩擦係数の関係を図 15G-L にそれぞれ示す。連続雨量の各階級における土石流の発生比、発生密度、到達距離、等価摩擦係数のそれぞれの値については表 5 にまとめている。これらの結果の中で 24 時間雨量と総雨量に対しては、雨量の大きい領域で発生密度が高くなる傾向があったものの、発生比、到達距離、等価摩擦係数についてはいずれの連続雨量との関係をもみても雨量の大小には対応していなかった。

以上の結果を総合すると、12 時間雨量や 24 時

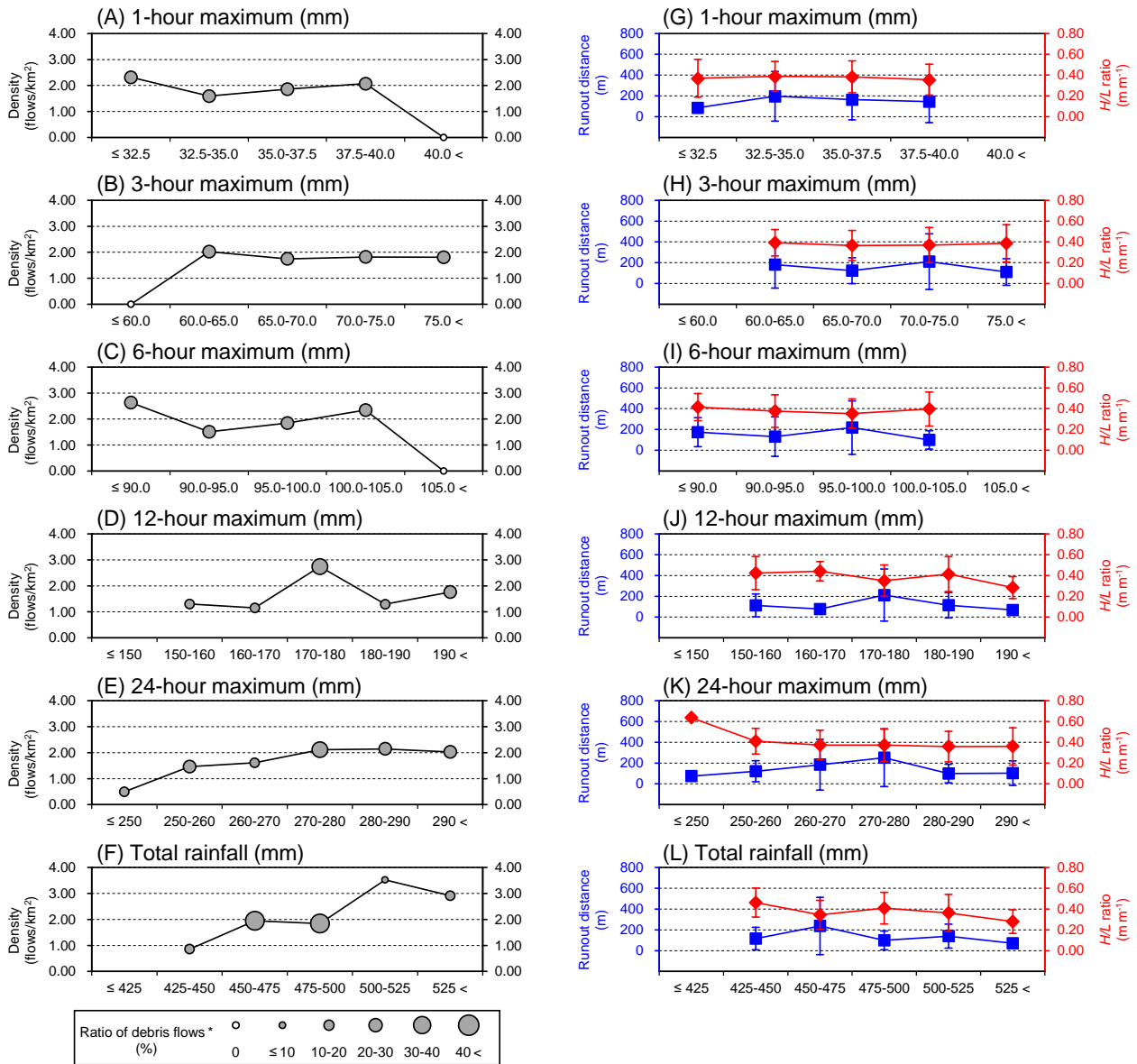


図 15 連続雨量の期間最大値と土石流の発生比，発生密度，到達距離，等価摩擦係数との関係
 (A-F) 雨量の各階級の領域における土石流の発生比 (%) および発生密度 (flows/km²)，(G-L) 雨量の各階級の領域における土石流の到達距離 (m)，等価摩擦係数 (m/m) の平均および標準偏差。

間雨量が再現周期で 50 年を超えるレベルに達した降雨期間の末期 (2018 年 7 月 7 日早朝の時間帯: 図 4) には、島全域で斜面崩壊の発生条件を満たす (降雨閾値を超える) 状態になっていたため、それよりも短い期間における連続雨量の較差に関わらず、斜面崩壊の素因となる土地条件をもつ場所で崩壊が発生したことが示唆される。土石流の発生比，到達距離，等価摩擦係数についても連続雨量の較差による違いは明らかでないため、むしろ、個々の斜面における水文環境や地盤条件，土石流の移送・堆積域にお

ける地形条件といった素因の影響が大きかったと考えられる。

4.4 昭和期以降の土地利用変遷と豪雨による斜面崩壊との関係

最後に、大三島の島内における昭和期以降の土地利用変遷と斜面崩壊の空間分布特性をみていきたい。1962 年以降の土地利用変遷の区分ごとに斜面崩壊地の箇所数，発生密度，面積合計，面積割合ならびに規模の特徴をまとめた結果を表 6 に示す。現在の土地被覆区分でみると，斜面崩壊は林地 (forest)，低木地 (shrub)，農地

表 5 連続雨量最大値の階級ごとにみた土石流の発生比，発生密度，到達域の特徴

Rainfall			Debris flows induced by the July 2018 storm event						
Maximum	Class (mm)	Area (km ²)	Debris flow population **				Runout characteristics ***		
			TN (flows)	RD (%)	DD (km ⁻²)	TA (km ²)	Mean (m)	Range (m)	$\overline{H/L}$ (m m ⁻¹)
1-hour max.	≤32.5	3.88	9	25.714	2.318	0.004	85±49	31, 171	0.369±0.181
	32.5-35.0	21.97	35	28.689	1.593	0.101	196±239	24, 952	0.387±0.145
	35.0-37.5	23.08	43	24.022	1.863	0.121	164±194	21, 1216	0.383±0.153
	37.5-40.0	17.85	37	21.512	2.073	0.054	145±202	35, 1009	0.356±0.148
	40.0<	0.69	0	0	0	0	--	--	--
3-hour max.	≤60.0	<0.01*	0	0	0	0	--	--	--
	60.0-65.0	15.80	32	29.630	2.025	0.081	180±225	24, 952	0.391±0.128
	65.0-70.0	25.22	44	22.449	1.744	0.065	123±125	31, 766	0.364±0.145
	70.0-75.0	19.80	36	22.642	1.818	0.114	210±267	21, 1216	0.369±0.169
	75.0<	6.64	12	25.000	1.806	0.020	110±128	47, 529	0.386±0.179
6-hour max.	≤90.0	3.04	8	29.630	2.634	0.012	173±139	41, 411	0.416±0.130
	90.0-95.0	17.87	27	21.600	1.511	0.038	131±191	24, 814	0.376±0.157
	95.0-100.0	28.76	53	26.904	1.843	0.195	217±257	21, 1216	0.353±0.140
	100.0-105.0	15.35	36	26.667	2.345	0.035	99±89	35, 529	0.397±0.164
	105.0<	2.46	0	0	0	0	--	--	--
12-hour max.	≤150.0	0.00	--	--	--	--	--	--	--
	150.0-160.0	6.14	8	18.605	1.304	0.006	112±110	41, 394	0.423±0.159
	160.0-170.0	15.61	18	14.876	1.153	0.011	78±44	24, 187	0.441±0.093
	170.0-180.0	25.52	70	36.458	2.743	0.217	212±250	31, 1216	0.350±0.151
	180.0-190.0	16.23	21	16.031	1.294	0.042	114±122	21, 529	0.414±0.169
	190.0<	3.98	7	28.000	1.760	0.004	69±24	47, 117	0.284±0.106
24-hour max.	≤250.0	2.03	1	16.667	0.493	0.001	74	--	0.636
	250.0-260.0	11.65	17	21.519	1.459	0.015	121±101	40, 394	0.410±0.123
	260.0-270.0	14.91	24	18.182	1.610	0.078	184±244	24, 952	0.374±0.142
	270.0-280.0	16.56	35	35.000	2.113	0.128	251±277	34, 1216	0.372±0.156
	280.0-290.0	14.92	32	23.022	2.145	0.032	99±90	31, 411	0.359±0.147
	290.0<	7.40	15	26.786	2.026	0.026	103±118	21, 529	0.361±0.179
Total rain	≤425.0	0.00	--	--	--	--	--	--	--
	425.0-450.0	9.38	8	10.127	0.853	0.006	116±108	41, 394	0.462±0.139
	450.0-475.0	27.72	54	40.909	1.948	0.201	237±275	24, 1216	0.345±0.140
	475.0-500.0	26.04	48	48.000	1.843	0.060	99±91	21, 529	0.408±0.152
	500.0-525.0	2.27	8	5.755	3.522	0.009	140±115	31, 411	0.363±0.179
	525.0<	2.06	6	10.714	2.913	0.004	71±25	47, 117	0.280±0.114
Study area		67.48	124	24.219	1.838	0.280	162±206	21, 1216	0.375±0.152

* Area of the 3-hour maximum rainfall of ≤60.0 mm was smaller than 0.01 km² (0.004 km²).

** Abbreviations: TN, Total Number of debris flows; RD, Ratio of Debris flows to the rainfall-induced landslides; DD, Density of Debris flows; TA, Total Area affected by debris flows (landslide initiation and debris flow transfer-deposition zones).

*** Debris flow runout characteristics are represented by the Mean and Range of debris flow runout distance (m) and the average value of the H/L ratio ($\overline{H/L}$, m m⁻¹) with its standard deviation. The H/L ratio was calculated by dividing the elevation difference (H , m) from the source to the end of the debris flow by the runout distance (L , m).

(farmland) のいずれかで発生しており，開発地 (developed land) では発生していなかった。発生密度と面積割合の値はいずれも農地で 9.596 箇所/km² および 0.259% と最も高く，次いで林地 (7.868 箇所/km² および 0.208%)，低木地 (6.574 箇所/km² および 0.176%) の順であった。現在の

表 6 土地利用変遷の区分ごとにみた斜面崩壊地の発生密度, 面積割合, 規模の特徴

Land cover			Landslides induced by the July 2018 storm event						
Classification	Trajectory *	Area	Landslide population **				Landslide size characteristics ***		
(4 classes)	(8 patterns)	(km ²)	TN (slides)	TA (km ²)	LD (km ⁻²)	AP (%)	Mean (m ²)	Median (m ²)	Range (m ²)
Forest		36.73	289	0.077	7.868	0.208	265±748	125	13, 9279
	RFOR	23.61	168	0.033	7.116	0.138	194±211	138	13, 1811
	SFOR	13.12	121	0.044	9.220	0.335	363±1121	115	17, 9279
Shrub		3.50	23	0.006	6.574	0.176	267±240	203	13, 1009
	RSHR	1.54	7	0.001	4.561	0.080	175±57	164	85, 290
	SSHR	1.96	16	0.005	8.147	0.251	308±275	232	13, 1009
Farmland		20.84	200	0.054	9.596	0.259	270±711	112	6, 6034
	RFAR	18.41	130	0.016	7.060	0.088	125±126	85	6, 825
	CFAR	2.43	70	0.038	28.827	1.551	538±1142	151	16, 6034
Developed land		6.40	0	0	0	0	--	--	--
	RDVL	2.81	0	0	0	0	--	--	--
	CDVL	3.59	0	0	0	0	--	--	--
Study area		67.48	512	0.137	7.588	0.202	267±718	121	6, 9279

* The following eight trajectory patterns were identified in the land cover changes between 1962 and 2018: RFOR, Remaining Forest; SFOR, Succession to Forest; RSHR, Remaining Shrub; SSHR, Succession to Shrub; RFAR, Remaining Farmland; CFAR, Conversion to Farmland; RDVL, Remaining Developed land; CDVL, Conversion to Developed land.

** Abbreviations: TN, Total Number of landslides; TA, Total Area of landslide scars; LD, Landslide Density; AR, Area Proportion of landslide scars.

*** Landslide size characteristics are represented by the Mean, Median, and Range of landslide scar area (m²).

農地 20.84 km²のうち, 1962 年以降に農地へ転換された領域 (conversion to farmland) は 2.43 km² にすぎなかったが, 斜面崩壊の発生密度は 28.827 箇所/km², 面積割合は 1.551% ときわめて高い値をとった。これに次いで斜面崩壊が集中していたのは 1962 年以降に林地へ遷移した領域 (succession to forest: 林地 36.73 km²のうち 13.12 km²) だったが, 斜面崩壊の発生密度は 9.220 箇所/km² と農地に転換された領域の 3 分の 1 程度だった。同様に, 斜面崩壊の面積割合は 0.335% で, 農地に転換された領域の 5 分の 1 程度だった。

崩壊の規模についてみても, 1962 年以降に農地に転換された領域と森林に遷移した領域で大きな値をとっていた。崩壊発生域の面積の平均値±標準偏差は農地に転換された領域で 538±1142 m², 森林に遷移した領域で 363±1121 m² となっていた。その他の土地利用変遷の区分における崩壊発生域の面積をみると, 1962 年以前より農地が維持されてきた領域は平均値±標準偏差で 125±126 m², 森林が維持されてきた領域は平均値±標準偏差で 194±211 m² であったことから, 土地被覆や土地利用に変化がなかった領域と

比べると平均で 1.9~4.3 倍程度の崩壊規模の違いがあったと言える。

つづいて, 土地利用変遷の区分ごとに土石流の発生比, 発生密度, 到達域の特徴をまとめた結果を表 7 に示す。現在の土地被覆区分で見ると, 土石流の発生比と発生密度はいずれも低木地で 52.174% および 3.430 箇所/km² と最も高く, 次いで林地 (28.374% および 2.232 箇所/km²), 農地 (15.000% および 1.439 箇所/km²) の順であった。一方で, 土地利用変遷の区分ごとに土石流の発生比と発生密度を比較すると, 低木地と林地では変遷の違いによる差は小さかったのに対し, 農地では, 1962 年以降に農地へ転換された領域の方が 1962 年以前より農地が維持されてきた領域よりも土石流の発生比や発生密度が顕著に高くなっていた (発生比: 8.462% → 27.143%, 発生密度: 0.597 箇所/km² → 7.824 箇所/km²)。土石流の到達域については, 特に林地と農地で土地利用変遷の区分による違いが顕著であり, いずれも 1962 年以降に土地被覆・利用が変化した領域 (森林に遷移した領域および農地に転換された領域) において土石流の到達距離が長くなり, 等価摩擦係数が小さくなる (流動性が高くなる) 傾

表 7 土地利用変遷の区分ごとにみた土石流の発生比，発生密度，到達域の特徴

Land cover			Debris flows induced by the July 2018 storm event						
Classification (4 classes)	Trajectory * (8 patterns)	Area (km ²)	Debris flow population **				Runout characteristics ***		
			TN (flows)	RD (%)	DD (km ²)	TA (km ²)	Mean (m)	Range (m ²)	$\overline{H/L}$ (m m ⁻¹)
Forest		36.73	82	28.374	2.232	0.161	148±207	21, 1216	0.413±0.156
	RFOR	23.61	51	30.357	2.160	0.045	109±123	21, 814	0.463±0.158
	SFOR	13.12	31	25.620	2.362	0.116	212±285	40, 1216	0.330±0.112
Shrub		3.50	12	52.174	3.430	0.023	241±177	45, 683	0.379±0.092
	RSHR	1.54	4	57.143	2.606	0.006	226±146	48, 411	0.394±0.073
	SSHR	1.96	8	50.000	4.073	0.017	248±191	45, 683	0.372±0.100
Farmland		20.84	30	15.000	1.439	0.096	168±207	40, 952	0.270±0.103
	RFAR	18.41	11	8.462	0.597	0.006	82±45	44, 203	0.295±0.121
	CFAR	2.43	19	27.143	7.824	0.090	217±245	40, 952	0.256±0.089
Developed land		6.40	0	0	0	0	--	--	--
	RDVL	2.81	0	0	0	0	--	--	--
	CDVL	3.59	0	0	0	0	--	--	--
Study area		67.48	124	24.219	1.838	0.280	161±206	21, 1216	0.375±0.152

* The following eight trajectory patterns were identified in the land cover changes between 1962 and 2018: RFOR, Remaining Forest; SFOR, Succession to Forest; RSHR, Remaining Shrub; SSHR, Succession to Shrub; RFAR, Remaining Farmland; CFAR, Conversion to Farmland; RDVL, Remaining Developed land; CDVL, Conversion to Developed land.

** Abbreviations: TN, Total Number of debris flows; RD, Ratio of Debris flows to the rainfall-induced landslides; DD, Density of Debris flows; TA, Total Area affected by debris flows (landslide initiation and debris flow transfer-deposition zones).

*** Debris flow runout characteristics are represented by the Mean and Range of debris flow runout distance (m) and the average value of the H/L ratio ($\overline{H/L}$, m m⁻¹) with its standard deviation. The H/L ratio was calculated by dividing the elevation difference (H , m) from the source to the end of the debris flow by the runout distance (L , m).

向を示した（林地において，到達距離 L : 109±123 m → 212±285 m，平均等価摩擦係数 $\overline{H/L}$: 0.463±0.158 m m⁻¹ → 0.330±0.112 m m⁻¹，農地において，到達距離 L : 82±45 m → 217±245 m，平均等価摩擦係数 $\overline{H/L}$: 0.295±0.121 m m⁻¹ → 0.256±0.089 m m⁻¹）。

上述の結果のうち，土石流の等価摩擦係数が小さくなる要因としては，土石流の到達距離 L が長くなることのほかに，斜面崩壊や土石流が傾斜の緩やかな斜面で発生することで，土砂の到達範囲における標高差 H が小さくなることが考えられる。そこで，それぞれの土地利用変遷の区分がどのような地形条件の場に分布しており，その中でも斜面崩壊が発生した場所はどのような地形条件を有していたかを解析した。解析結果を図 16 に示す。図には，標高および斜面の傾斜角の頻度分布（確率密度分布）のほかに，斜面の水文環境の指標となる平面曲率および断面曲率の頻度分布を示している。まず，土地利用変遷の区分ごとの標高および傾斜角の分布をみると（図 16A-D），1962 年以前より維持されてきた林地が中・高標高域（≥100 m）の急傾斜地（≥30°）に偏在して

いるのに比べ，1962 年以降に林地へ遷移した領域は低標高域（<100 m）の緩傾斜地（<30°）に多く分布していることがわかる。一方で，1962 年以前より維持されてきた農地の大部分は低標高域の緩傾斜地にあるのに比べ，1962 年以降に農地へ転換された領域は中・高標高域の急傾斜地にも多く分布している。前述の土地利用変遷の解析では，1960 年代から 1980 年代初めにかけて樹園地の造成による農地面積の拡大があった後に 1980 年代以降に樹園地の管理放棄に伴う林地面積の再拡大があったことが示されたが（4.1 節），そうした土地利用変遷は主に 0~200 m 程度の標高域に広がる 5~45° 程度の斜面で生じていたと考えられる。このような標高および傾斜角の分布の違いに対して，平面曲率や断面曲率の分布はいずれの土地利用変遷の区分においても 0 付近（等斉直線斜面）に集中しており，斜面型による土地利用変遷の違いは認められなかった。

この結果を踏まえて，発生箇所数の多い林地および農地の斜面崩壊地の地形条件を比較すると（図 16E-H），標高および傾斜角の分布は各区分の領域の分布を反映していた。すなわち，1962 年

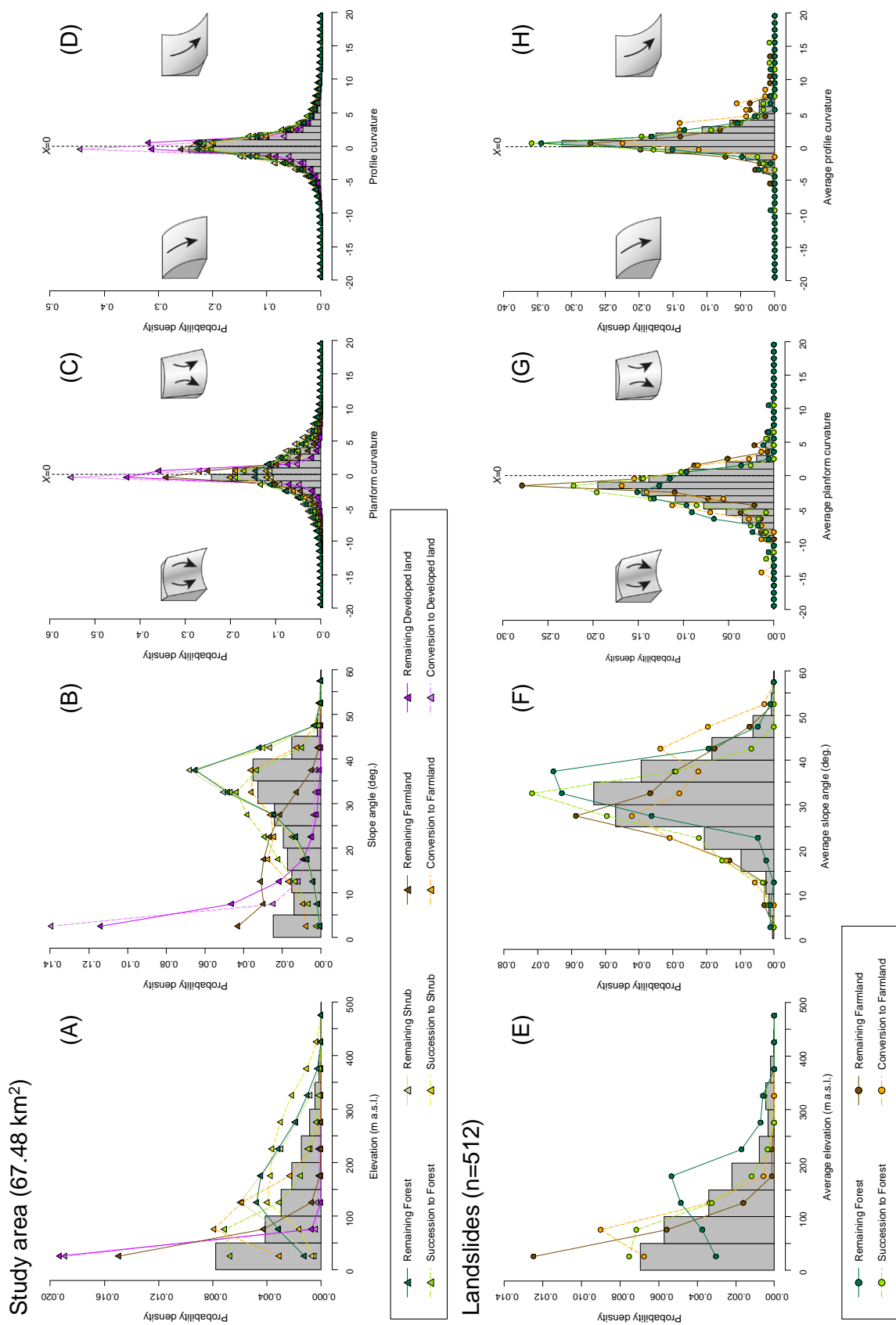


図 16 19 土地利用変遷の区分ごと、斜面崩壊ごとの標高、傾斜角、平面曲率および断面曲率の確率密度分布

以降に林地へ遷移するか農地へ転換された領域内での崩壊は1962年以前より維持されてきた農地よりも標高が高く傾斜の急な斜面に偏って発生していた。また、1962年以前より維持されてきた林地に比べると、標高が低く傾斜の緩やかな斜面でも多くの崩壊が発生していた。

前述した土石流の等価摩擦係数(表7)について考えると、特に1962年以降に農地へ転換された領域内での斜面崩壊は、1962年以前より維持されてきた農地に比べて土石流化しやすく土砂の流動性も高かったと言える。

1962~2018年の約57年間の期間における主な土地利用変遷の中で、1962年以降に農地へ転換された領域は林地に比べると緩傾斜の斜面に多かったにもかかわらず、斜面崩壊が高密度に発生しており、崩壊の規模が大きく土砂の流動性も高いという特徴をもっていた。1962~1981年までの約19年に行われた農地転換は、中・高標高域にあった林地を開墾して新たに造成したものが多かった(図6, 11, 15)。こうして造成された農地の地盤は古くから維持されてきた農地に比べて不安定なものが多かったと考えられる。そのため、造成後に管理放棄されて1981年以降の約38年間に林地へ遷移していた領域は古くから維持されてきた林地に比べると未だに不安定で、斜面崩壊の発生密度や崩壊の規模が高くなったとみられる。すなわち、管理放棄から30年以上が経過して林地化が進んだ放棄農地であっても、農地地盤としてのもともとの安定性が低ければ斜面崩壊の危険性が高い状態で残される可能性がある。

5. まとめと今後の課題

本研究では、平成30年7月豪雨で斜面崩壊が多発した愛媛県島嶼部の大三島を対象に、昭和期以降の土地利用変遷と斜面崩壊地の分布を詳しく調査することで、これまでの土地利用や土地被覆の変化が豪雨による斜面崩壊の発生にどのようなかたちで、どのくらい影響を及ぼしていたのかを明らかにした。得られた結果は以下のように要約される。

1. 大三島では、1962~1981年の約19年間に林地から農地への転換が広範囲で起こったが、1981~2018年の約38年間には農地の管理

放棄に伴い農地から林地への遷移が進行していた。農地の総面積約20.8 km²のうち、1962~1981年の期間に造成されて現存する農地は約1.6 km²であった。一方で、林地の総面積約36.7 km²のうち、1962年以降に農地から遷移した林地は約11.1 km²に及んでいた。

2. 平成30年7月豪雨時に大三島の地上観測点で記録された連続雨量の再現期間は、1時間雨量で約4.3年、3時間雨量で約25.8年、6時間雨量で約15.4年と見積もられたのに対し、12時間雨量では約49.8年、24時間雨量では約88.3年と見積もられ、12~24時間という比較的長い時間において稀な量の雨が降ったことが明らかになった。
3. 大三島島内における雨量には、1時間雨量で29~44 mm、3時間雨量で60~80 mm、6時間雨量で89~108 mm、12時間雨量で147~198 mm、24時間雨量で231~304 mmの開きがあったが、斜面崩壊の発生密度や崩壊の規模、土石流の発生密度や流動性の高さのいずれについても、島内での雨量の較差との関係は認められなかった。
4. 斜面崩壊の発生密度と崩壊の規模は、1962年以降に農地に転換された領域(2.43 km²)で最も大きく、1962年以降に林地に遷移した領域(13.12 km²)が次に大きかった。農地に転換された領域の大部分が林地を開墾して新たに造成した傾斜地農地であったこと、林地に遷移した領域の大部分が管理放棄された傾斜地農地であったことを踏まえると、1960~1970年代頃に造成された農地に集中して大規模な斜面崩壊が発生していたと言える。
5. 1981年以降に農地から林地へ遷移した領域(約11.7 km²)は、1962年以前より維持されてきた林地に比べて斜面崩壊の発生密度やや高く、崩壊の規模や土砂の流動性は顕著に高かった。管理放棄から30年以上が経過して林地化が進んだ放棄農地であっても、不安定な造成が行われていれば斜面崩壊の危険性が高い状態で残される可能性がある。
6. 今後は、1960~1970年代頃に造成された農地斜面が特に不安定であった原因(例えば、地形や地盤構造などの大幅な改変を伴わな

い伝統的な農地造成と大規模な地形改変などを伴う農地造成の違い)を明らかにするとともに、そうした過去の土地造成、土地利用が及ぼす影響がどの程度の期間にわたって残るのかを、管理放棄後の植生遷移過程、地表の被覆、根系の発達、表土層の物理的性質の変化(孔隙や土粒子構造の発達、透水性の変化)などの生物プロセスとの相互作用系の観点から明らかにしていく必要がある。

謝辞

本研究は公益社団法人国土地理協会 2020 年度(第 20 回)学術助成の支援を受けて実施しました。また、日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号 21H01584, 22K14920)の成果の一部を用いました。研究で使用した航空レーザ測量データは林野庁治山課より提供いただきました。現地調査の実施にあたっては、佐藤剛教授(東京都市大学)、若井明彦教授(群馬大学)、尾崎昂嗣博士(株式会社 R&U リソリューションズ)、Nguyen Van Thang 博士(Thuyloi University)ならびに愛媛大学農学部森林環境制御研究室の学生の皆さまに多くのご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

Abdi, E., Majnounian, B., Genet, M., Rahimi, H. (2010) Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability; a case study: Hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran. *Ecological Engineering*, Vol.36, No.10, pp.1409-1416.

阿部和時(1997)樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究. 森林総合研究所研究報告, No. 373, pp.105-181.

Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., Parrot, J.F. (2006) Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *Catena*, Vol.65, No.2, pp.152-165.

Arnone, E., Caracciolo, D., Noto, L.V., Preti, F., Bras, R.L. (2016) Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides. *Water Resources Research*, Vol.52, No.11, pp.8590-8612.

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 日初版)」。http://mizu.bosai.go.jp/key/RainJulyH30Accu (2023 年 6 月 27 日閲覧)。

千葉徳爾(1991)増補改訂 はげ山の研究. そしえて, 東京, 349 pp.

Coles, S. (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer-Verlag, London, United Kingdom, 208 pp.

土木学会芸予地震被害調査団(2001)2001 年 3 月 24 日芸予地震被害調査報告. <https://www.jsce.or.jp/report/13/01/report.pdf> (2023 年 7 月 31 日閲覧)。

愛媛県史編纂委員会(編)(1986)愛媛県史. 愛媛県生涯学習センターデータベース「えひめの記憶」。 <https://www.imanabi.jp/system/regionals/regionals/index/ecode:2> (2023 年 7 月 31 日閲覧)。

García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Alatorre, L.C., Puigdefábregas, J. (2010) Land cover changes and shallow landsliding in the flysch sector of the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, Vol.124, No.3-4, pp.250-259.

Gilleland, E., Katz, R.W. (2014) extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R. *Journal of Statistical Software*.

Grade, T. (2003) Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena*, Vol.51, No.3-4, pp.297-314.

Guns, M., Vanacker, V. (2013) Forest cover change trajectories and their impact on landslide occurrence in the tropical Andes. *Environmental earth sciences*, Vol.70, pp.2941-2952.

平成 30 年 7 月豪雨愛媛大学災害調査団(2019)平成 30 年 7 月豪雨愛媛大学災害調査団報告書. 愛媛大学, 松山, 379 pp.

Imaizumi, F., Sidle, R.C., Kamei, R. (2008) Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.33, No.6, pp.827-840.

印南敏秀(2010)里海の生活誌—文化資源としての藻と松. みずのわ出版, 周防大島町, 389 pp.

木村諒・若月強・山田隆二・井口隆(2019)平成 30 年 7 月豪雨により愛媛県南西部で発生した斜面崩壊の規模と分布の特徴. 防災科学技術研究所主要災害調査, Vol.53, pp.67-82.

木村諒・佐藤剛(2022)平成 30 年 7 月豪雨により芸予諸島大三島で発生した造成農地斜面の崩壊とその要因. 日本地球惑星科学連合 2022 年大会講演要旨, HDS09-06.

Kimura, T., Sato, G., Ozaki, T., Thang, N.V., Wakai, A. (2023) Landslide susceptibility in a highly-cultivated hilly region: Artificial slope

- construction in 1963-1979 and the subsequent 2018 landslide event in Omishima, western Japan. In: Hazarika, H., Haigh, S.K., Chaudhary, B., Murai, M., Manandhar, S. (Eds.), *Natural Geo-Disasters and Resiliency: Select Proceedings of CREST 2023*, Springer book series Lecture Notes in Civil Engineering, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore, in press.
- 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> (2023 年 6 月 27 日閲覧).
- 気象庁 (2023) 大三島(愛媛県)観測所における 1991-2020 年の 30 年間の観測値に基づく年・月ごとの平年値. https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_amd_ym.php?prec_no=73&block_no=0732&year=&month=&day=&view=h0 (2023 年 7 月 31 日閲覧).
- 北原曜 (2010) 森林根系の崩壊防止機能. *水利科学*, Vol. 373, pp. 11-37.
- 国土交通省 (2019) 国土交通省砂防部「平成三十年の土砂災害」. <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/h30doshasai.pdf> (2023 年 6 月 27 日閲覧).
- Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H.J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., Geoge, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., Skånes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Veldkamp, T.A., Vogel, C., Xu, J. (2001) The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental change*, Vol.11, No.4, pp. 261-269.
- Lusiana, N., Shinohara, Y. (2022) The role of citrus groves in rainfall-triggered landslide hazards in Uwajima, Japan. *Water*, Vol.14, Issue 13, 2113, DOI: 10.3390/w14132113
- 前坂剛 (2019) 平成 30 年 7 月豪雨における国土交通省 XRAIN による積算雨量. *防災科学技術研究所主要災害調査*, Vol. 53, pp. 49-58.
- 三隅良平 (2019) 平成 30 年 7 月豪雨における被害の概要. *防災科学技術研究所主要災害調査*, Vol. 53, pp. 1-32.
- 宮本常一 (1969) 宮本常一著作集第 4 巻 日本の離島 第 1 集. 未来社, 東京, 350 pp.
- Montgomery, D.R., Schmidt, K.M., Greenberg, H.M., Dietrich, W.E. (2000) Forest clearing and regional landsliding. *Geology*, Vol.28, No.4, pp.311-314.
- 永井浩三・堀越和衛・佐藤信次・宮久三千年・鹿島愛彦・高橋治郎・土井清磨・平岡俊光(1980) 20 万分の 1 愛媛県地質図(第 3 版). 愛媛地学会, トモエヤ文具書店地理部.
- 日本地質学会(編)(2016) 日本地方地質誌 7 四国地方. 朝倉書店, 東京, 679 pp.
- 岡村義彦(1967) 瀬戸内海西部の領家花こう岩類. 柴田秀賢教授退官記念論文集, pp.53-62.
- 太田猛彦(2012) 森林飽和一国土の変貌を考える. NHK 出版, 東京, 254 pp.
- 林野庁(2019) 平成 30 年度森林域における航空レーザ計測業務(その 2) 報告書. 平成 30 年度森林域における航空レーザ計測業務(その 2) 株式会社パスコ・国際航業株式会社・中日本航空株式会社共同事業体, 75 pp.
- Saito, H., Murakami, W., Daimaru, H., Oguchi, T. (2017) Effect of forest clear-cutting on landslide occurrences: Analysis of rainfall thresholds at Mt. Ichifusa, Japan. *Geomorphology*, Vol.276, pp.1-7.
- 佐野静代(2021) 外来植物が変えた江戸時代一里湖・里海の資源と都市消費. 吉川弘文館, 228 pp.
- 佐藤信次・高橋治郎・宮久三千年・土井清磨・皆川鉄雄・鹿島愛彦・松岡健司・野戸繁利・平岡俊光(1979) 5 万分の 1 土地分類基本調査, 表層地質図「土生・三津」. 愛媛県, pp.15-27.
- 佐藤創・大谷健一・神原孝義・鳥田 宏行(2013) 原位置一面せん断試験による樹木根系の崩壊抵抗力と引き抜き抵抗力の比較. *砂防学会誌*, Vol. 66, No. 4, pp.15-20.
- Schwarz, M., Cohen, D., Or, D. (2010) Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4).
- Schwarz, M., Phillips, C., Marden, M., McIvor, I.R., Douglas, G.B., Watson, A. (2016) Modelling of root reinforcement and erosion control by 'Veronese' poplar on pastoral hill country in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Vol. 46, pp.1-17.
- 執印康裕・鶴見和樹・松英恵吾・有賀一広・田坂聡明(2009) 分布型表層崩壊モデルによる樹木根系の崩壊防止機能の定量的評価について. *日本緑化工学会誌*, Vol. 35, No. 1, pp. 9-14.
- Sidle, R.C., Ochiai, H. (2006) *Landslides: Processes, Prediction, and Land Use*. Water Resources Monograph 18, American Geophysical Union, Washington, DC, 312 pp.
- 須鎗和巳・岩崎正夫・鈴木堯士(編)(1991) 日本の地質 8 四国地方. 共立出版, 東京, 266 pp.

- 鈴木牧・齋藤暖生・西廣淳・宮下直(2019)人と生態系のダイナミクス2—森林の歴史と未来. 朝倉書店, 東京, 178 pp. 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子(2013)日本被害地震総覧—599-2012. 東京大学出版会, 東京, 694 pp.
- Tokuoka, Y., Hashigoe, K. (2015) Effects of stone-walled terracing and historical forest disturbances on revegetation processes after the abandonment of mountain slope uses on the Yura Peninsula, southwestern Japan. *Journal of forest research*, Vol.20, No.1, pp.24-34.
- Tokuoka, Y., Hashigoe, K. (2022) Diversity and distribution of climbing plants under different anthropogenic disturbance regimes in a forest-orchard mosaic landscape in southwestern Japan. *Folia Geobotanica*, Vol.57, No.1, pp.37-47.
- Wu, T.H., McKinnell III, W.P., Swanston, D.N. (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, No.1, pp.19-33.
- 山崎新太郎(2018)平成30年7月豪雨災害における愛媛県今治市伯方・大島地域および宇和島市吉田地域における斜面災害の調査速報. https://landslide.dpri.kyoto-u.ac.jp/report/2018/20180729_shikoku.pdf (2023年6月27日閲覧).
- 山崎新太郎(2019)愛媛県宇和島市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書, pp.61-66.