

平成26年 8 月豪雨による広島市 土石流災害の被害の特徴

内山 庄一郎¹・須貝 俊彦²

Damage characteristics of debris flow disasters caused by heavy rain in Hiroshima City in August 2014

Shoichiro UCHIYAMA¹ and Toshihiko SUGAI²

Abstract

The debris flow disasters in Hiroshima City on 20 August 2014 were surveyed via Unmanned Aerial Vehicle photography (UAV) and Structure from Motion photogrammetry (SfM) to measure sediment deposition volume and to reveal the characteristics of damage to buildings and of geology. The average flow path in areas of human casualties was smaller than that in areas of building damage. Most casualties were concentrated within an average of 132 m from the fan apex of each debris flow. The average flow path in areas of building damage was much longer on granite area than on hornfels area. On hornfels area, buildings stopped debris flow, but on granite area, fine particles continued downstream through gaps in buildings. These results show that the reach of debris flow in this event was the same as or less than the topographical development range of the alluvial cone.

キーワード：土石流，平成 26 年 8 月豪雨，土砂堆積量，被害分布，UAV-SfM

Key words: debris flow, heavy rain event in August 2014, volume of sediment deposition, distribution of damage, UAV-SfM

1. 背景と目的

1.1 背景

(1) 土砂災害対策の変遷と課題

戦後の土砂災害対策は、砂防三法¹⁻³⁾および防災基本計画⁴⁾に基づき、防災施設整備、いわゆる

ハード対策を中心として進められてきた。同時に、宅地開発等に伴い危険箇所は年々増加している。こうした危険箇所とその対策の進捗に関して、最新の資料が公開されていないため少し古い情報ではあるが⁵⁾、例えば、土砂災害危険箇所の一種であ

¹ 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 マルチハザード
リスク評価研究部門
Multi-hazard Risk Assessment Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster
Resilience

² 東京大学
The University of Tokyo

り、個所内に5戸以上の家屋がある急傾斜地崩壊危険箇所Ⅰは、1982（昭和58）年からの21年間で約4万箇所増加し、総数は11万箇所を超えた。さらに、これら危険箇所に対するハード対策の整備済み個所の増加割合から、整備完了には100年以上を要することになる⁵⁾。こうした危険箇所の増加とその対策状況は、現在も同様の傾向にあるものと考えられる。さらに、人的被害を伴う土砂災害は、ほぼ毎年発生している⁶⁾。

このような背景において、ソフト対策の推進、すなわち土砂災害が発生するおそれがある土地の区域を明らかにし、警戒避難体制の整備を図ることを目的として、2000（平成12）年に「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律（以降、土砂災害防止法⁷⁾）」が公布された。この法律により、土砂災害警戒区域等に指定された区域では、住民への危険の周知と警戒避

難体制の整備等が行われる。しかし、2014（平成26）年8月の豪雨により発生した広島市の土石流災害では、74名の犠牲者を生じた（Fig. 1）⁸⁾。この災害では、土砂災害防止法の施行から13年以上が経過していたにも関わらず、警戒区域の指定や、基礎調査が完了していない地域が多く存在することが露呈した。このため、住民に対し土砂災害の危険性が十分に伝わっていなかったことや、土砂災害の警戒避難体制が整備されていないことなどが指摘された⁹⁾。この災害を受け2014（平成26）年11月に、さらに2017（平成29）年6月にも土砂災害防止法等が改正され、ハザード・リスク情報の公表や避難体制の強化が定められた。さらに、土砂災害防止法による警戒区域等の指定を行う前には、住民に対する説明も行われている。それでもなお、2018（平成30）年7月豪雨では、土砂災害により119名の犠牲者を生じ、被災位置が特定

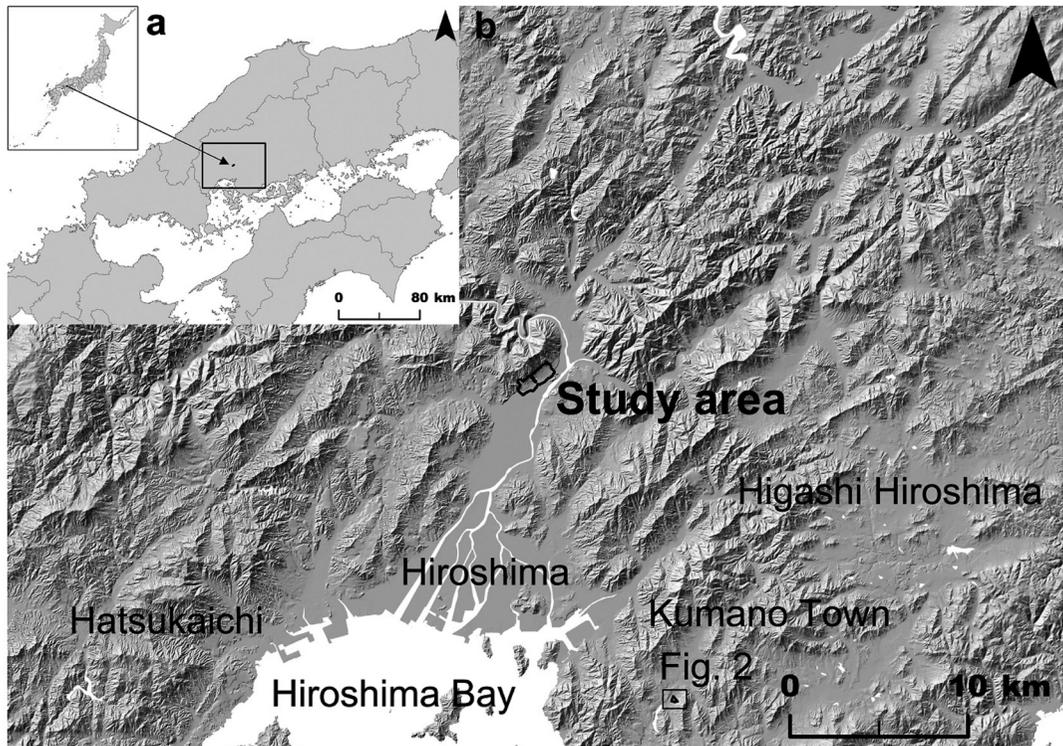


Fig. 1 Study area. (a) Chugoku district, Japan. (b) Study area in Asaminami-ku, Hiroshima City, Hiroshima Prefecture, which was damaged by debris flow on 20 August 2014.

できた107名のうち、94名(87.9%)が土砂災害警戒区域内で被災したことが指摘された¹⁰⁾。これらの事実から、土砂災害リスクが高まった場合でも、事前の避難率が高いとはいえない状況が示唆される。

(2) 現在のハザード・リスク情報の課題

ここで、土砂災害防止法におけるハザード・リスク情報の構築手法を概観する。土砂災害警戒区域等は、基礎調査と呼ばれる詳細な調査を経て区域設定が行われる。これには、膨大な個所を対象とする調査の迅速な推進、コストおよび精度のバランスの観点から、現状でのベストエフォートな手法が運用されていると考えられる。しかし、土

砂災害警戒区域等を個別にみていくと、いくつかの課題も指摘できる。

Fig. 2は、平成30年7月豪雨により広島県安芸郡熊野町川角5丁目で発生した土石流による災害事例である。この図で示された土砂災害警戒区域等は、災害が発生する前年に指定された。このうち、土石流の土砂災害特別警戒区域(レッドゾーン)の範囲、すなわち土石流により建築物等に損壊が生じ、生命や身体に著しい危害が起これるとされる区域は非常に狭い(Fig. 2のA)。しかし実際には、レッドゾーンを超える広範囲で建築物の損壊が発生した。また、南側の沢(Fig. 2のB)では土石流が発生したが、警戒区域等は設定されていなかった。同様に、北側の0次谷(Fig. 2のC)

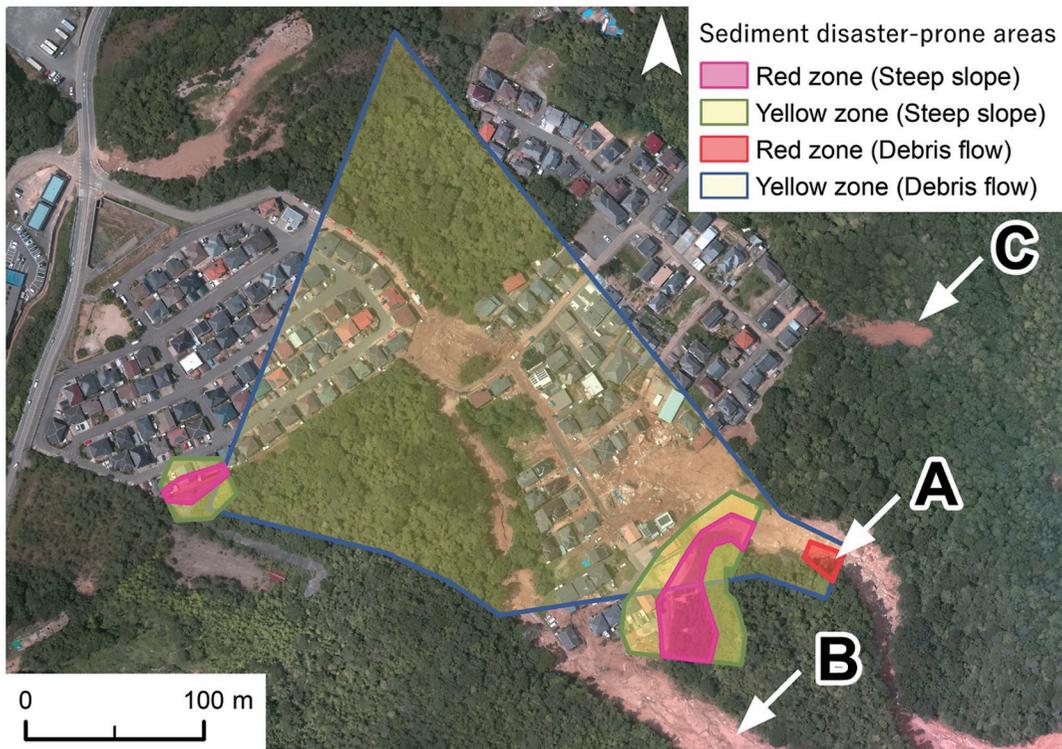


Fig. 2 Damage range of actual debris flow in designated sediment disaster-prone areas during the heavy rain event of July 2018 in Kumano Town, Hiroshima Prefecture. Note that debris flow ran from the point indicated by arrow A, in a designated red zone, where the flood height of the debris flow was assumed to reach 0.76 m (Hiroshima Prefecture, 2017)¹¹⁾. Arrow B points to a debris flow in a small valley, outside of zoned SDPAs. Arrow C shows a small-scale collapse occurring in a zero-order basin, where the occurrence of sediment disasters was not predicted. SDPA designations in the figure were set on 9 March 2017, before the disaster. The orthomosaic image was taken and created by the authors.

では、崩壊による住宅被害が発生したが、こちらの被害も事前に評価されてはいなかった。このように、被害想定と実際の被害には乖離が生じており、これは、警戒区域等の設定、すなわち現在の被害想定手法によるハザード・リスク情報の構築の難しさを示す一面といえるだろう。

1.2 研究の目的

避難を含めた防災減災対策を行うためには、科学的根拠に基づく災害リスクの評価が重要であることは論を待たない。一方で、前節で挙げたように、そのようにして構築されたハザード・リスク情報は不確実性を伴う。さらに、災害現象の予測情報の伝達方法および伝達タイミングのあり方も課題である。これらの技術的な問題に加えて、認知心理学的な側面、例えば人間には正常性バイアスのような誤った現状リスク認識が生じるといった問題もある¹²⁾。ここに列挙した問題は、総合的かつ学際的な検討が必要な課題と考えられる。本研究では、これらの中でも、前節で挙げた課題、つまりハザード・リスク情報のあり方に着目する。

ハザード・リスク情報の構築のために、土石流による被害の範囲や規模を予測することは重要であるが、現地調査のみで流域の不安定土砂量やその物性を把握することは難しく¹³⁾、したがって、それに続く被害予測も難しい。そこで土石流の流動や到達範囲を予測する目的で、シミュレーションの活用が行われている¹⁴⁾。土石流シミュレーションでは、設定した初期条件をもとに、土砂の移動・堆積といった土石流の影響範囲を、定量的に予測することができる¹⁵⁾。近年は、シミュレーションソフトウェアの高度化や、基盤地図情報数値標高モデル(国土地理院)の普及、計算機性能の向上も相まって、住宅などの構造物を考慮した解析も行われるようになった^{16,17)}。しかしながら、実際の住宅地には様々な種類や形状の建物に加え、植生や農地、空き地などの土地利用もあり、そうした場所に土石流が流下したときの地物に対する影響は、一様ではないことが予想される。また、近年では2017(平成29)年7月九州北部豪雨の被害にみられたように、土石流とともに流下す

る流木は、平地での建物等の被害を大きくする要因にもなる^{18,19)}。このように、土石流シミュレーションを実施する場合でも、現実在即した結果を得られるよう、実際の災害で発生した被害の実態を明らかにする必要がある。

しかし、災害直後の現地調査の自由度には制約もあり、土石流の到達範囲や被害分布を、家屋単位で面的かつ網羅的に記述した例は多くはない。そこで、本研究では、2014(平成26)年8月豪雨により発生した広島市の土石流災害を対象として、被害実態を面的かつ詳細に記述し、土砂堆積量の計測および被害家屋の空間分布特性を地図化するを目的とする。実際の災害における土石流被害の実態を明らかにし、土石流の挙動と流路上の建物や植生、および地質との関係性を理解することは、土石流のハザード・リスク情報の構築にとって重要である。

2. 対象地域

2.1 地域区分と被害概要

本研究では、2014(平成26)年8月20日未明に発災した土石流により被災した、広島県広島市安佐南区(Fig. 1)の6地区(緑井8丁目、八木3丁目、八木3丁目東、八木3丁目梅林、八木3丁目阿武、八木4丁目)を対象とした(Fig. 3)。本地域では、6地域で54名の犠牲者を生じた。これらの地域は、流域により区分した。また、緑井8丁目の東側の流域では住宅単独の人的被害が生じたが(Fig. 3のA)、被害家屋の下流側に土砂堆積がみられないため、地域区分には含めなかった。地区名は、町丁目と地名を合わせた本研究独自の呼称である。

2.2 地質

本研究の対象地の地質²⁰⁾は、西側が花崗岩類、東側がホルンフェルスの2種に大別される。西側の緑井8丁目、八木3丁目、八木3丁目東、八木3丁目梅林の4地域が花崗岩類、東側の八木3丁目阿武、八木4丁目の2地域がホルンフェルスの分布域にそれぞれ該当する。千木良ほか(2015)²⁰⁾によれば、花崗岩類の分布する低標高域は中粒で

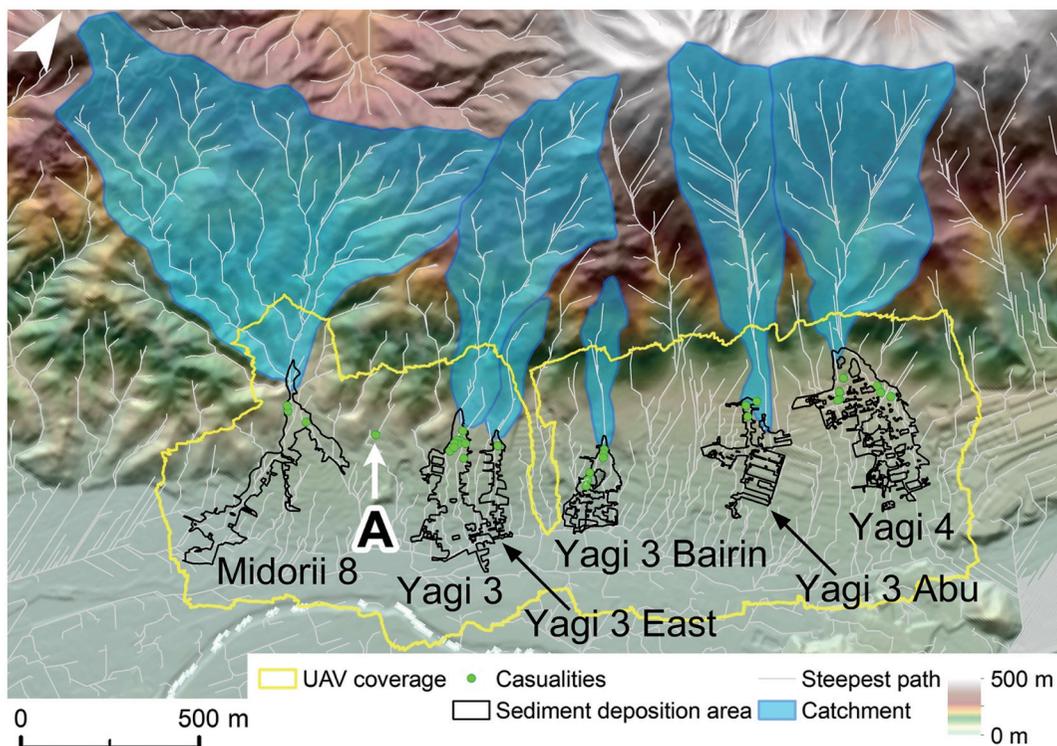


Fig. 3 Catchments and sediment deposition areas within the study area. Note that green points mark sites of human casualties. Although a house was partially washed away on the eastern side of Midorii 8, no sediment deposition was designated downstream of the house, so the site was not analyzed. The background shows elevation tints and shading created by GIS from a Fundamental Geospatial Data Digital Elevation Model 5-m Mesh (Geospatial Information Authority of Japan)²²⁾. The steepest paths, indicated by the gray drainage lines, were plotted by ESRI ArcGIS Spatial Analyst from the same data source.

シーティングが発達し、高標高域は細粒でマイクロシーティングが発達する。土石流が、シーティングと高角節理に分離されて緩んだ大きな岩塊を巻き込んで流下したことにより、破壊力が大きくなったとされる。また、ホルンフェルスの低標高域では硬質、高標高域では強風化を示す。ホルンフェルス地域の下流には相対的に大きな沖積錐が分布するが、土石流の広がった範囲は、花崗岩類地域に比して狭いことが指摘されている。そして、両地域ともに今回の土石流のほとんどが最上部に崩壊源を持つとされる²⁰⁾。また、斎藤ほか(2015)²¹⁾の地質図では、本研究対象地の西側が花崗岩類、東側は接触変成作用を被った結晶片岩類等が分布し、その境界には斑状流紋岩岩脈が貫くとされる。

そして、細粒 - 中流斑状花崗岩の急斜面、および斑状流紋岩岩脈と接触変成作用を被った結晶片岩類の急崖の崩壊を発端として土石流が発生し、谷筋の岩屑を押し流して災害を引き起こしたとされる²¹⁾。

3. 調査方法

土砂災害の調査手法には、現場へ進入して行う現地調査と、人工衛星リモートセンシングや航空機などの遠隔観測による方法とが挙げられる。現地調査は、得られるデータの信頼性は高いが、二次災害リスクが大きい場合や、立ち入り規制が行われた場合には、調査は大きく制約される。さらに、得られるデータはピンポイントの情報であり、

面的に均質なデータの取得は難しい。これに対して、遠隔観測による手法は、アクセス困難な場所を含む広範囲のデータを、地表面の状態を乱すことなく面的に取得できる。しかし、人工衛星や航空機を使用した調査はコストが大きく、分解能の低さや観測タイミングの不一致が課題になる²³⁾。このように、既存の調査手法では、災害直後の人命が関わる状況という特質も相まって、俯瞰的に把握したり、被害全体を面的に捉えたりすることは容易ではない。

そこで、本研究では、UAV (Unmanned aerial vehicle) による撮影と、SfM (Structure from Motion) 多視点ステレオ写真測量を適用した (以下、UAV-SfM)²⁴⁻²⁸⁾。この手法は、必要な時にデータを取得できる適時性、空間分解能が数センチメートルに迫る高分解能性、運用が低コストで機動性が高いことによる連続的な繰り返し観測を現実のものとし、さらに面的な三次元情報が得られることがメリットである²³⁾。

3.1 地表面高さ変化の把握

地表面の高さ (以下、DSM: Digital surface model) の変化は、災害前後の2時期のDSMの差分から求めた。DSMは、災害前後の各時期の空中写真と、GNSS (Global Navigation Satellite System) で計測した地上基準点および精度検証点を使用し、SfM解析により求めた。災害前の空中写真には、2008 (平成20) 年5月21日に撮影された23枚のデジタル空中写真 (国土地理院撮影・日本地図センター販売) を使用し、災害後の空中写真には、発災から4日後の2014 (平成26) 年8月24日にUAVで撮影した画像のうち、約700枚の垂直写真を使用した (Table 1)。地上基準点および精度検証点は、VRS-RTK (Virtual reference station and real-time kinematic) 方式のGNSS測量により30地点を計測し、地上基準点として10点、

精度検証点として14点を使用した。SfM解析により作成した災害前DSM (以下、2008 DSM) およびオルソモザイク画像の空間分解能は20 cm、災害後DSM (以下、2014 DSM) およびオルソモザイク画像の空間分解能は3.5 cmとなった。DSMの精度検証はSfMソフトウェア上でを行い、14地点の精度基準点における三次元の二乗平均平方根誤差 (以下、RMSE: Root Mean Squared Error) は、26.2 cm (災害前の2008 DSM)、11.5 cm (災害後の2014 DSM) であった。地表面の高さ変化は、GISのラスタ演算で次式により、2014 DSMから2008 DSMを減算して求めた (Fig. 4)。

$$\text{地表面高さ変化} = 2014 \text{ DSM (災害後)} - 2008 \text{ DSM (災害前)}$$

GNSS測量の機材には、二周波対応のGPS受信機であるTrimble 5800、SfMソフトウェアにはAgisoft PhotoScan Professional Edition 1.0.4、GISにはESRI ArcGIS for Desktop 10.2を用いた。

3.2 土砂堆積量の計算

調査対象の6地域について、災害後のオルソモザイク画像から目視により土砂堆積範囲を判読し、ポリゴンデータを作成した (Fig. 5, 白破線)。オルソモザイク画像の判読では、下流部の土砂は泥状に薄く広範囲に拡散しており、下限域の正確な判定は困難であった。さらに、道路の応急復旧により、土砂が除去されている場所も多かった。このため、本節後半に述べる2時期のDSMの誤差を考慮して、また、作図上の適当な区切りとして0.3 m以上の堆積が認められる範囲を堆積域の下限として認定した (Fig. 4)。また、土砂の堆積とは無関係な地表面変化の影響を除外するため、植生、一部の建物、SfM解析不良域の3種類について、土砂堆積範囲のポリゴンから除外した。こ

Table 1 Specifications of the aerial photographs.

	Date	Camera	Platform	Ground resolution	Flight altitude	Flight path	Number of shots
Pre-disaster	May 21, 2008	Intergraph DMC	Aircraft	20 cm	1,920 m	3	23
Post-disaster	August 24, 2014	Ricoh GR	UAV	3.5 cm	150 m	14	5,500

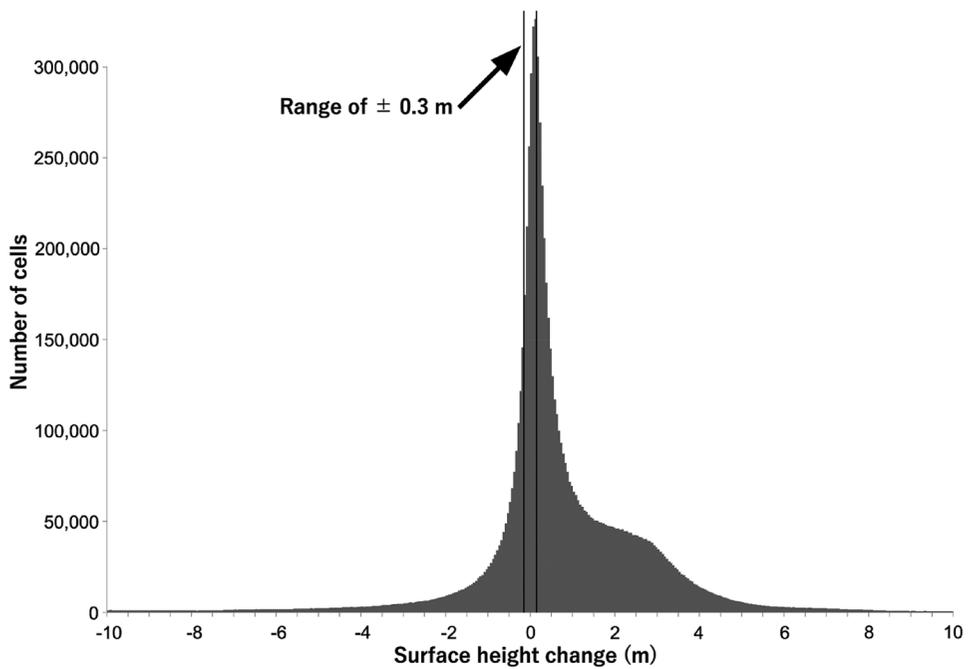


Fig. 4 Histogram of surface height change. Note that negative values of surface height change (left side) correspond to erosion; positive values (right side) correspond to deposition. The two solid black lines in the middle indicate the range of surface change that was excluded as measurement error (± 0.3 m).

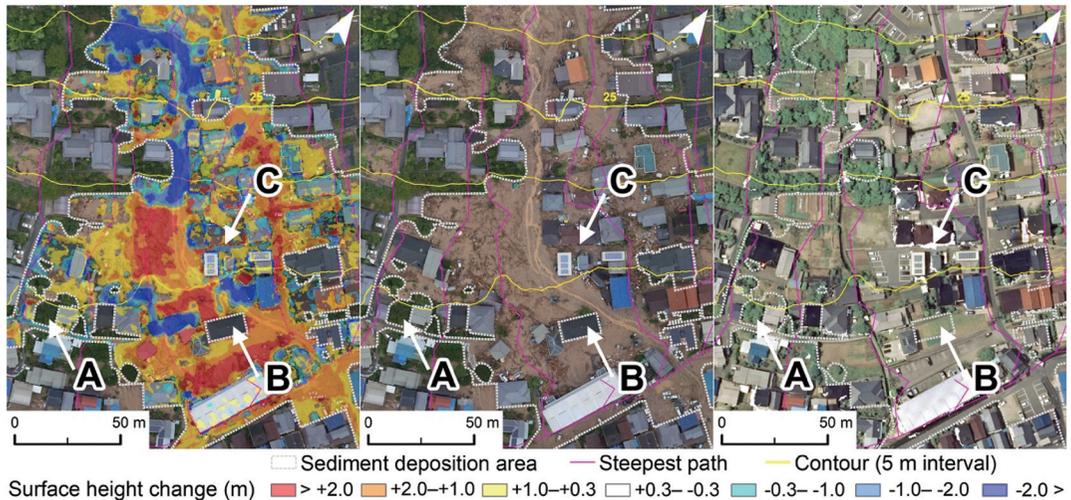


Fig. 5 Exclusion of surface height change areas unrelated to sediment deposition (example from downstream of Yagi 3). Left: Ground surface height change. Center: Orthomosaic image after disaster. Right: Orthomosaic image before disaster.
 A: Area where vegetation growth or removal is excluded from surface height change.
 B: Changes in structures and land use are excluded from surface height change.
 C: An unnatural surface height change in an area where SfM analysis could not be performed.

れには、使用データと解析方法に起因する制約事項が関与している(3.4節で後述)。なお、侵食量は計算の対象としなかった。これは、写真測量では樹冠下の林床のような写真に写らない場所を計測できないため、森林植生の流失と地表面の侵食を分離できないことが理由である。

前節で2時期のDSMの差分から求めた地表面高さ変化データのうち、土砂堆積範囲ポリゴンの内部では、正の値を持つメッシュが災害前から災害後にかけて、地表面の高さが高くなったことを意味しており、すなわち土砂が堆積したメッシュと考えることができる。ここから、正の値を合計することにより土砂堆積量の合計値を求めた。これには、ESRI ArcGIS Spatial Analystの「サーフェイスの体積」ツールを使用した。土砂堆積量を求めるにあたり、次のように2時期のDSMの誤差を考慮した。前項で得た各時期のRMSE(災害前26.2 cm、災害後11.5 cm)の二乗和平方根(28.6 cm)を求め、これより高さ変化が大きいメッシュを対象として土砂堆積量を求めた。

本研究で使用した災害後のUAV撮影画像やGNSS測量データは、この場所で行われていた捜索救助活動を支援する目的で取得したものである。災害直後に、これらのデータを「捜索支援地図」として図面化し、現場で実際の捜索救助活動に活用された²⁹⁾。このためデータの取得や解析時の緊急性が高く、堆積土層厚のグランドトゥルースなど、研究目的での検証用データ取得の機会は得られなかった。こうしたことから、土層厚の検証を行う目的で、八木3丁目阿武の既往調査報告³⁰⁾に記載された堆積土砂の高さとの比較を行った。

3.3 人的被害発生位置の把握

人的被害について、当時のニュース記事、慰霊碑、住宅地図を突合することにより、全員の氏名、住居、被災状況を確定した。移動中に被災した1名を除き、被災家屋の位置をポリゴンデータとして作成した。加えて、災害前後のオルソモザイク画像を比較判読し、人的被害が生じていないが住宅被害が発生した家屋も、同様にポリゴンデータ化した。データ化した住宅被害の分類

は、流失、一部流失・形状をとどめて流下、損壊の3種とした。実際には、土砂等が住宅内部に流れ込む被害は多く生じたが、本研究では、オルソモザイク画像から判断できる場合に限りデータ化した。また、被害実態の考察に使用するため、ESRI ArcGIS Spatial Analystの累積流量ラスタの作成(Flow Accumulation)ツールにより、基盤地図情報5mメッシュ(国土地理院)から落水線を作成した。この基盤地図情報の数値標高モデルは、主に航空レーザー測量データから住宅や植生を除去して作成されたものであり、人工改変された地形を再現したデータである。

3.4 使用データ・解析手法に起因する制約事項

地表面高さ変化を求めるにあたり、災害前後の撮影時期が6年3か月離れたDSMを使用したことから、これに起因する以下の3点の制約事項が存在する。

- ・地表面高さの変化には、災害による変化以外の現象を含む

土砂堆積にみえる現象として、植生の生長、建物の新築等、駐車場の車や災害対応車両の存在などが挙げられる。これに対処するため、3.2節で述べたように、土砂堆積量への影響が大きいと考えられる植生、建物の新築等の範囲について、オルソモザイク画像の判読により土砂堆積範囲のポリゴンデータから除外した(Fig. 5)。

- ・UAVの撮影は、発災から4日後に行ったため、災害直後の状況とは異なる

下流部の大きな道路や、災害対応車両が駐車している梅林小学校のグラウンド(Fig. 8のD)など、応急復旧のために優先的に土砂が撤去された場所が存在する。このため、今回の土砂堆積範囲は、災害直後の土砂堆積範囲に比して、下流側が小さく判定されたと考えられる。このほか、判読された土砂堆積範囲内でも、一部で土砂の除去、整地が進んだ場所があり、そのような地点でのDSMの高さ変化量は、災害直後の土砂堆積量とは異なる値を示すと考えられる。

- ・土砂堆積厚さは、土石流サージの最大浸水高ではない

土石流は流下開始から徐々に流量が増加し、ピークを迎えたのちに、流量が低下して現象が収束する。このため、建物の壁に残された浸水痕跡は、最終的に堆積した土砂の厚さよりも高い位置に残され、これは土石流サージにおける最大浸水高を示す。しかしながら、災害後の UAV 写真は土石流が停止した後に撮影されたため、土石流シミュレーションや現地踏査で記録される最大浸水高よりも低い値を示す。

4. 結果

4.1 土砂堆積量と各地域の被害分布

計測した土砂堆積量を **Table 2** に示す。この表の右側には、本研究との比較のため、既存文献³⁰⁾で示されている上流域の区間土砂量を併せて示した。最初に、土砂堆積厚の検証結果について述べ、次に既存文献³⁰⁾での土砂量の求め方とデータの特徴について、最後に6地域における土砂堆積量と被害分布の調査結果について、それぞれ述べる。

(1) 土砂堆積厚の検証結果

土砂堆積厚を検証する目的で、八木3丁目阿武の既往調査報告³⁰⁾に記載された堆積土砂の高さと比較を行った。この結果、谷出口 (**Fig. 9** の B 付近) では、同文献³⁰⁾で 3.0 m、本研究では 2.8 m から 3.2 m であり、既往調査と調和的な値が得られた。ただし、同文献³⁰⁾には、計測場所、計測手法、および計測誤差についての詳細な説明はなく、厳密な比較ではない。

(2) 既存文献における計測土砂量の特徴

既存文献³⁰⁾では、航空レーザー測量によって計測された2時期の地形面データを用いて 1 m メッシュごとに比較を行い、土砂量が計測された。災害前は 2009 (平成 21) 年度後半、災害後は 2014 (平成 26) 年 8 月 25 日 (災害後) に計測された。土砂量の計測は、保全対象 (住家等) の上流側に設定された谷出口を境として、上流域と下流域のそれぞれについて、流域ごとの区間土砂量 (区間内の堆積と侵食の合計値) が計測された。下流域の堆積範囲は、航空レーザー測量と同時に撮影したオ

ルソモザイク画像で判読された。上流域の区間土砂量は流域の土砂生産量に、下流域の区間土砂量は堆積した土砂量に相当する。これらの値のうち、上流域の区間土砂量は、本災害の検証調査や土石流シミュレーションで使用されている^{17, 31, 32)}。また、下流域の区間土砂量の一部については、複数の流域が合算されているため、流域の個々の比較ができない。また、合算した理由は説明されていない。そして、上流域と下流域のそれぞれの区間土砂量に差がある場合、撤去や流出等により失われた土砂量と説明されている。

土砂量については、ほかに同類のデータがないことから、この文献が、本災害における土砂生産量、および土砂移動量を定量的に示した唯一の資料である。このため、本研究でも比較のために引用するが、次の4点の問題があり、必ずしも単純比較はできない。1点目は、既存文献³⁰⁾では、計測誤差の扱いが説明されていないことである。対して、本研究では災害前後の各時期の計測誤差を考慮して、堆積厚が 28.6 cm より小さいメッシュは除外して土砂堆積量を求めた (3.2節)。このため、本研究で示した土砂堆積量は、既存文献³⁰⁾に比して小さく見える。2点目は、既存文献³⁰⁾における下流域の土砂量計測データが、複数地域で合算されていることである。本研究の対象地域では、4地域 (緑井8丁目、八木3丁目、八木3丁目東、八木3丁目梅林) が合算されていた。3点目は、谷出口の位置の設定が本研究とは異なることである。特に、八木3丁目阿武の谷出口は、本研究のそれよりも 125 m 上流側に設定されていた。4点目は、下流域に設定された堆積域の範囲が、本研究とは異なることである。しかしながら、既存文献³⁰⁾では、谷出口の位置および下流域の堆積域の範囲ともに、小縮尺図にごく小さく示されているため、正確な比較は難しい。これらの点から、**Table 2** には既存文献³⁰⁾の値のうち、既往研究^{17, 31, 32)}で使われている上流域の区間土砂量の値を示すこととした。

(3) 緑井8丁目

緑井8丁目地区では、土砂堆積量のボリューム

は大きいですが、流域面積も広いいため、単位流域面積当たりの堆積量としては最小を示した (Table 2)。土石流の流路となった道路は侵食され、道路縁に土壌が積まれて水路となった (Fig. 6のA)。また、流路沿いに上下に並ぶ住宅2棟(犠牲者は各1名)が破壊され、その瓦礫の一部は、すぐ下流側の住宅にせき止められた (Fig. 6のB)。東側に分岐した土石流の流路に着目すると、犠牲者1名を生じた住宅は、オルソモザイク画像上では損壊として判定されたが、屋内に土砂等が流入したことにより被害を生じた。この住宅のすぐ上流側には、災害前は5段の水田と1段の畑が広がっており、その開けた土地に層厚2mを超える土砂が堆積した (Fig. 6のC)。泥流は谷出口から600m下流まで流下した。下流部の一部は、重機で整地された部分も含まれるが、層厚1m近い土砂が堆積した (Fig. 6のD)。

(4) 八木3丁目

八木3丁目地区では、土砂堆積量および単位流域面積あたりの堆積量ともに、対象地域内で最大級の値を示した (Table 2)。中央部に落水線が近接して2本あり、約25m幅の広い主流路となった。上下70mの区間に分布する7棟が流失し、20名の犠牲者を生じた (Fig. 7のA)。このうち1名は、住宅から50m下流で発見された。この並びの最下流部にある住宅では、建物の一部が形状をとどめたまま下方に移動し、2名の犠牲者を生じた。また、この住宅の並びの中間部には、

2014(平成26)年4月に完成したばかりの新しいアパートが存在したが、土石流により流失した。しかし、災害前の空中写真では空き地であったため、DSMの高さ変化の見かけ上は、堆積にみえた (Fig. 7のB)。落水線上に位置する県営住宅では、建物の流失や移動は生じなかったが、1階に土砂等が流れ込み、1名の犠牲者を生じた (Fig. 7のC)。主流路に隣接する植生域のうち、流路に近い側の一部が侵食されたが、流路から遠い部分は残存した (Fig. 7のD)。主流路における泥流の流下経路では、土砂の堆積厚が薄いエリア (DSMの高さ変化の凡例が無着色のエリア)があった (Fig. 7のE)。主流路の突き当りにあるアパートの駐車場には、層厚2mを超える土砂が堆積した。オルソモザイク画像では、下流部の堆積物に礫は少なく、泥状のテクスチャーを示した (Fig. 7のF)。

(5) 八木3丁目東

八木3丁目東地区では、土砂堆積量は少ないが流域面積が小さいため、単位流域面積あたりの堆積量は比較的大きな値を示した (Table 2)。谷出口から50mの距離にある住宅が流失し、犠牲者1名を生じた (Fig. 7のG)。破壊され、流失した家屋は、土砂、流木とともに直下の駐車場に堆積した (Fig. 7のH)。主流路沿いの単木と思われる植生が流失した (Fig. 7のI)。下流側の堆積範囲は、八木3丁目の堆積範囲と隣接した (Fig. 7のJ)。

Table 2 Comparison of sediment deposition volumes measured from the surface height change and sedimentary volumes provided in the literature.

District	Catchment area (m ²)	sedimentary area (m ²)	Measured sedimentary volume (m ³)	Sediment volume per unit catchment area (m ³ /km ²)	Sedimentary volume upstream (m ³) (CRDB, 2014)
Midorii 8	629,342	36,582	11,303	17,960	11,200
Yagi 3	238,956	36,281	14,269	59,715	33,000
Yagi 3 East	29,603	8,115	987	33,324	3,100
Yagi 3 Bairin	35,609	16,397	1,947	54,683	7,900
Yagi 3 Abu	202,152	20,683	4,095	20,258	n/a
Yagi 4	288,227	50,612	9,460	32,821	10,400

Note: Sedimentary volumes cited from the literature (Chugoku Regional Development Bureau, 2014)³⁰⁾ correspond to the volume of sediment production upstream.

n/a: The value depends greatly on where the fan apex is set.

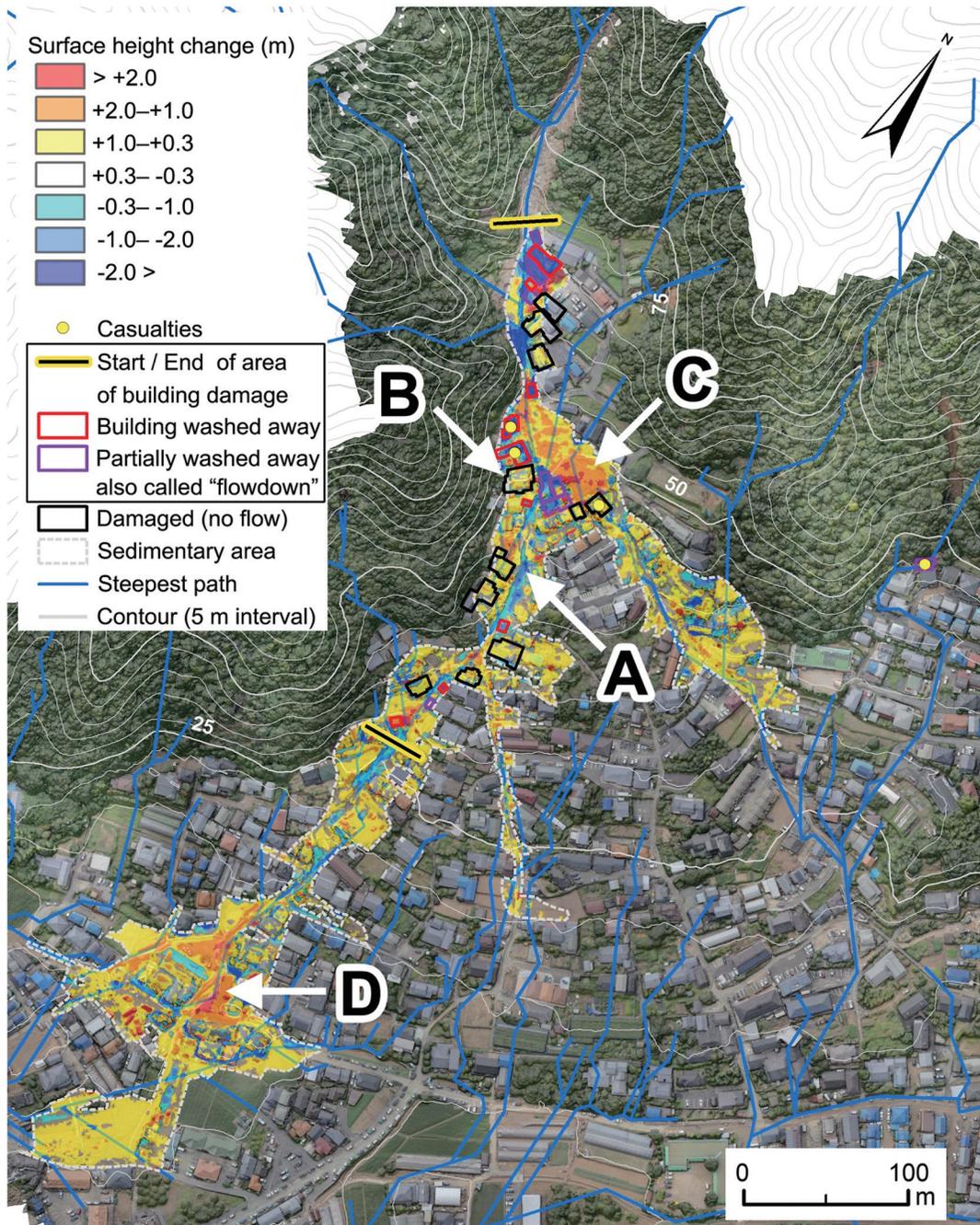


Fig. 6 Damage distribution in Midorii 8. A: An eroded road that became a waterway. B: There were three houses along the flow path. C: Thick sediment accumulation upstream of a house, causing casualties with sediment influx. D: Thick sediment deposition downstream.

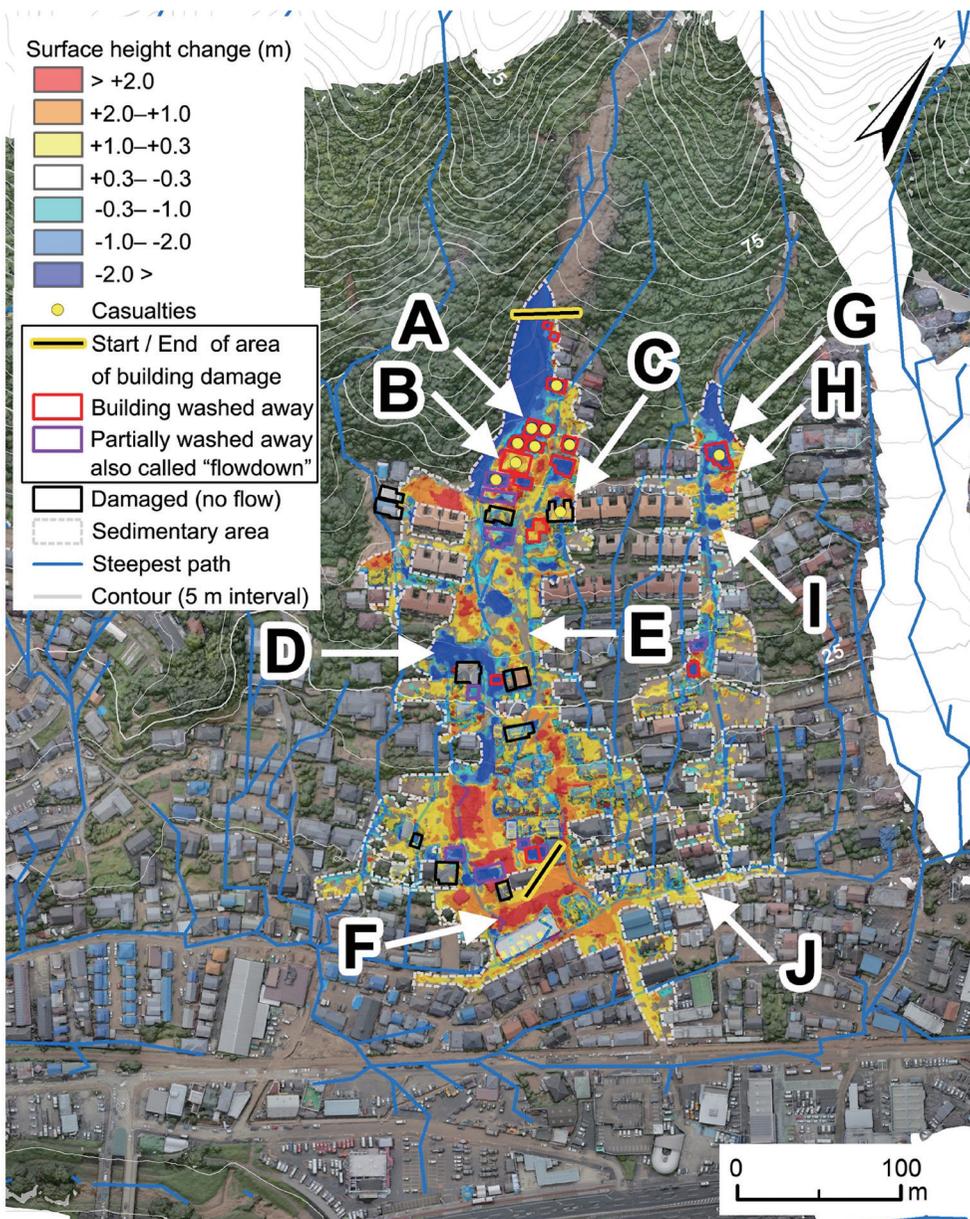


Fig. 7 Damage distribution on Yagi 3 and Yagi 3 East. Note that on Yagi 3, A: The area close to the fan apex, where casualties were concentrated. B: A newly built apartment in the vacant lot shown here was lost in the disaster. C: This building situated on a steep path survived, but a person inside the house died because of sediment inflow. D: Vegetation several meters in height, in which the portion close to the main flow path side was eroded. E: A zone characterized by thin sediment deposition on the main flow path. F: Thick sediment accumulation in a parking lot at the end of the main flow path. While on Yagi 3 East, G: A building destroyed by debris flow, which killed a person. H: Debris flow carried the house at G to a vacant lot downstream. I: Shrubs or trees lost along the main flow path. J: Downstream adjacent to the sediment area of Yagi 3.

(6) 八木3丁目梅林

八木3丁目梅林地区では、単位流域面積あたりの土砂堆積量は、6地域中で最大を示した(Table 2)。災害前には、谷出口の直下に広がっていた森林が土石流により流失し、広い範囲で地表が露出した(Fig. 8のA)。上下125mの区間で、落水線上に位置する6棟が流失・移動した。上流側の3棟は流失し、7名の犠牲者を生じた(Fig. 8のB)。下流側の3棟のうち、上流側の2棟が移動し、3名の犠牲者を生じた。その並びの最下流部の1棟が流失し、2名の犠牲者を生じた(Fig. 8のC)。堆積域の下流側に位置する梅林小学校とそのグラウンドにも土砂が堆積したが、撮影時にはその大半が除去されていた(Fig. 8のD)。このため、災害直後の土砂堆積量や流下距離は、ここで示した計測値(Table 2)よりも大きいと考えられる。

(7) 八木3丁目阿武

八木3丁目阿武地区では、上流の小河川から土石流があふれて直線的な流路が形成され、樹林帯を押し流して住宅地に流入した(Fig. 9のA)。谷出口直下かつ落水線上に位置する住宅2棟が移動、流失し、犠牲者3名を生じた(Fig. 9のB)。屋内への土砂等の流入により、犠牲者1名を生じた。しかし、オルソモザイク画像上では建物の被害が判読できなかった(Fig. 9のC)。主流路に直交する道路へ、土砂の堆積が生じた。しかし、災害前写真でSfMの解析不良が生じており、正常な高さ変化量を求めることができなかつたため、この住宅地一帯を計測から除外した(Fig. 9のD)。また、オルソモザイク画像上では、より下流側の遠方まで泥の拡散がみられるが、計測可能な厚さを持って堆積していなかつたため、堆積域には含めなかつた(Fig. 9のE周辺)。

(8) 八木4丁目

八木4丁目地区では、土砂堆積量、単位流域面積あたりの堆積量ともに中間的な値を示した(Table 2)。谷出口の上流側には二本の落水線が存在した(Fig. 10のA)。谷出口を出ると土石流

は二股に分岐して流下した。いずれも住宅密集地に流れ込み、住宅に被害を生じた。破壊された建物を含む土砂は、周囲の住宅にせき止められた(Fig. 10のBとC)。分岐した土石流のうち、西側の落水線上では、4棟の住宅が流失し5名の犠牲者を生じた。流失した住宅の下流側にあった住宅は、形状をとどめたまま下方へ移動し、さらに下流側の住宅にせき止められた(Fig. 10のB)。東側に分岐した土石流により、落水線上に位置する3棟で5名の犠牲者が生じた。上流側と下流側の2棟が流失し、中間の位置にある1棟では、住宅の一部が流下した。この被害域の周囲には、大量の礫が厚く堆積した(Fig. 10のC)。土石流の主流路以外の場所、例えばFig. 10のDや、標高60mより低い地域では、礫や流木の堆積はほぼみられなかつた。

4.2 被害分布と地形的特徴

(1) 土石流の流路と人的被害発生位置、および住宅被害との関係

土石流の主流路は、落水線上を流下した。落水線は、基盤地図情報数値標高モデル5mメッシュ(国土地理院)から作成したものであり、地形改変の影響を反映した地形標高モデルである。落水線は、自然の小河川、人工水路、道路などに分布した。また、いずれの地域でも谷出口に近い上流側の主排水路は暗渠化されていた。

犠牲者を生じた住宅被害について、谷出口からの流路長の最大値を求めた。この結果、谷出口から平均132mの流路沿いに人的被害が生じた住宅が分布した(Table 3)。人的被害を生じた住宅の被害の類型は、流失型と土砂流入型の2つに大別された。流失型はさらに、住宅全体が破壊され、原型をとどめずに流下したもの、および、住宅の全体または一部が、原型をとどめたまま下方へ移動したものとの2つに細分された。土砂流入型では、住宅は原位置のまま、かつ原型をとどめているが、屋内への土砂等の流入により人的被害を生じた。人的被害を生じた家屋の総数は29棟で、うち流失型は27棟(93%)、土砂流入型は2棟(7%)であった(Table 3)。流失型被害の特徴は、被災

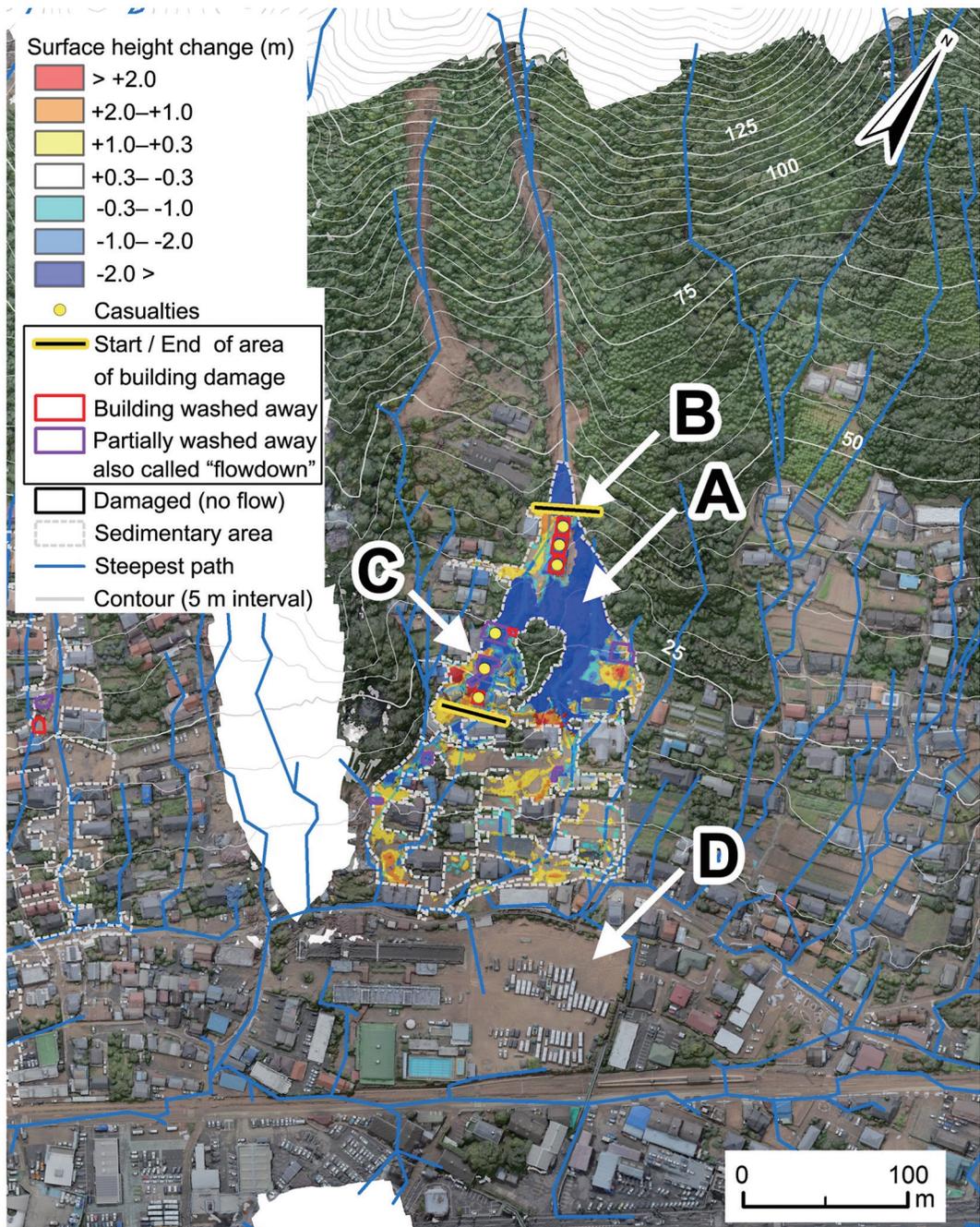


Fig. 8 Damage distribution in Yagi 3 Bairin. A: A run-down forest, with the surface terrain exposed. B: Three destroyed upstream houses, with loss of life. C: Two houses moved downstream, the lower of which was destroyed. D: Sediment accumulation in the schoolyard of Bairin elementary school, which had been removed at the time of aerial observation.

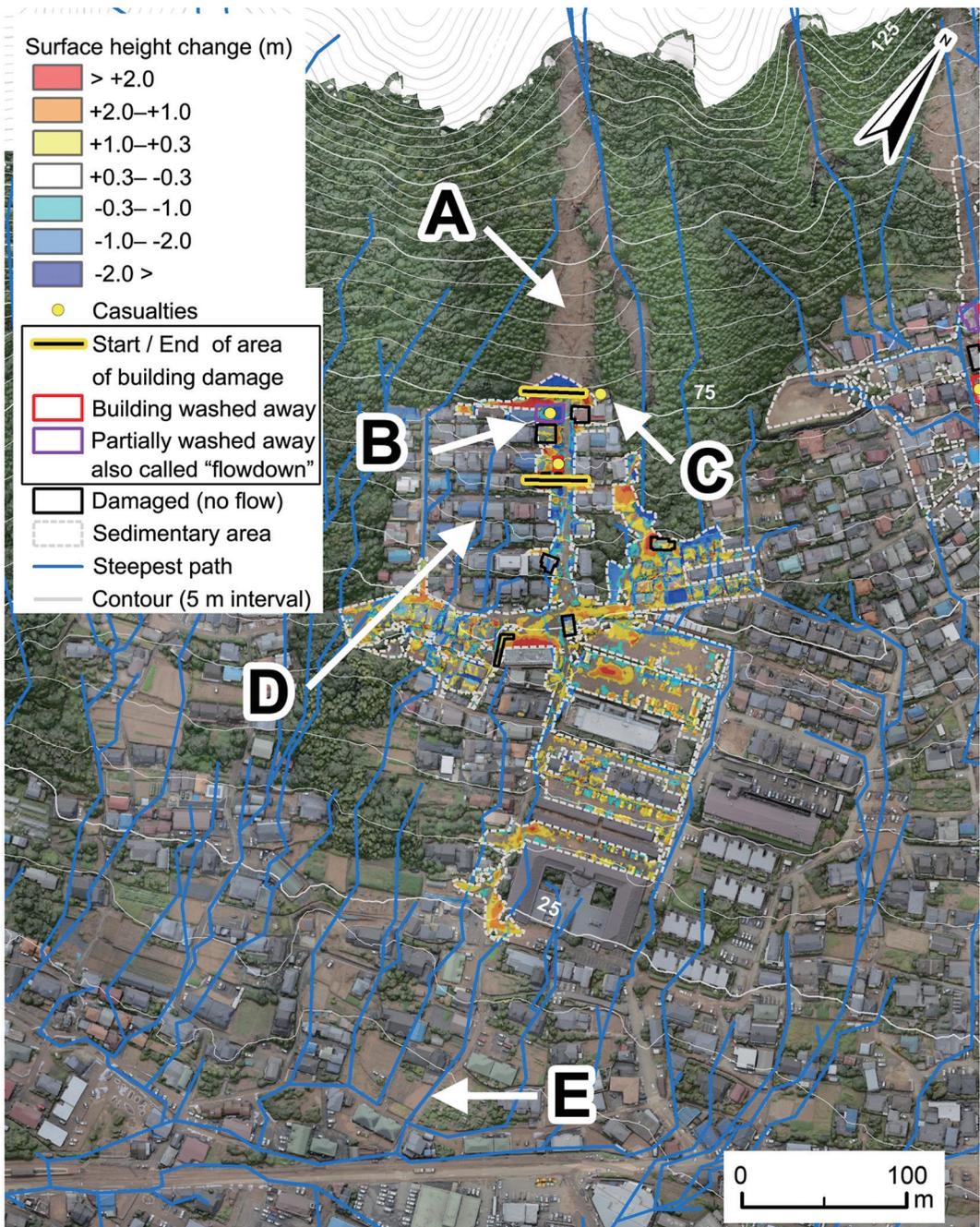


Fig. 9 Damage distribution in Yagi 3 Abu. A: Debris overflow from a small stream created a new flow path. B: Two buildings on the steep path moved downslope, with loss of life. C: Sediment inflow that caused casualties where damage to the building cannot be interpreted in the image. D: Although sediment accumulated here, it is excluded from this study owing to failure of area analysis via SfM. E: Downstream mud deposition of <0.3 m, excluded from volume measurement.

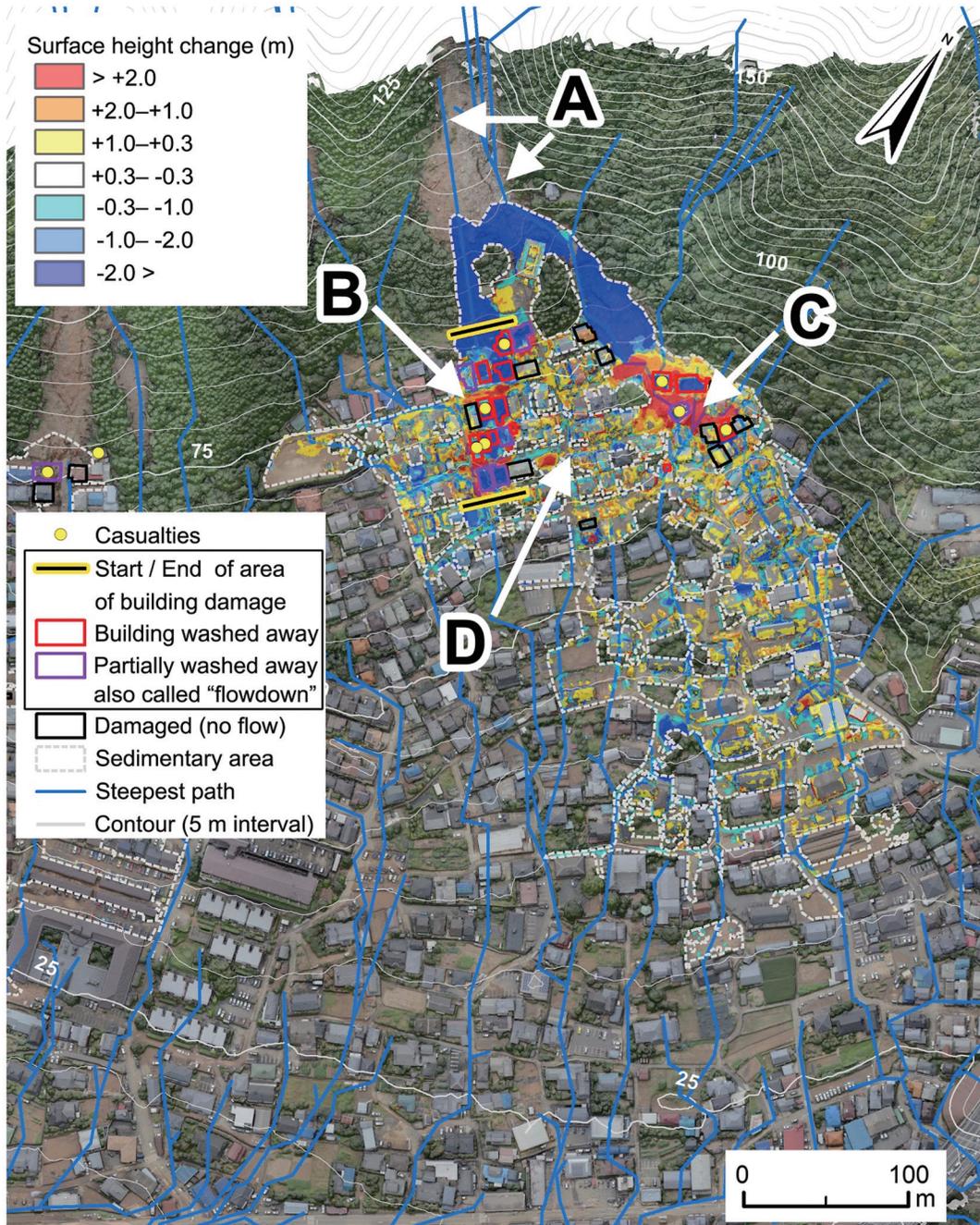


Fig. 10 Distribution of damage in Yagi 4. A: Area of two steep paths near the fan apex before the disaster. B: Area where casualties occurred on the west-side flow path at the point of debris flow divergence. C: Area where casualties occurred on the east-side flow path at the point of debris flow divergence; thick sediment accumulation is visible in the immediate vicinity. D: Almost no deposition of boulders and driftwood in places far from the main flow path.

Table 3 Building damage and human casualties.

District	Loss		Number of casualties in the building					Total number of buildings damaged in the district		
	Building	Victim	Flowdown*		Damage		Distance from fan apex (m)	Loss	Flowdown*	Damage
Midorii 8	2	2	0		1	1	195	9	7	12
Yagi 3	7	20	1	2	1	1	140	14	8	11
Yagi 3 East	1	1	0		0		45	2	1	0
Yagi 3 Bairin	4	9	2	3	0		154	5	7	0
Yagi 3 Abu	1	1	1	2	0		55	1	1	7
Yagi 4	6	8	1	2	0		200	14	6	10
Total	21	41	5	9	2	2	Average 132	45	30	40

*Partially washed away.

Note: In total, 29 buildings had casualties, including 1 on the east side of Midorii 8 which was not analyzed in this study (refer to the description of Fig. 3) and is not listed here. There were 54 human victims, including 2 not included here. In addition to the damage listed here, the extent of damage to 1 building at Yagi 3 Abu was not confirmed in the orthomosaic image, but 1 human casualty was recorded; and another human casualty due to partial building damage on the east side of Midorii 8 was recorded.

家屋が落水線上、あるいは落水線に挟まれた細い土地に位置しており、ほぼ例外はなかった。これに対して、土砂流入型の2例は、それぞれ次の特徴がみられた。八木3丁目地区の県営住宅建物は、落水線上に位置するものの、建物が丈夫で流失しなかったと考えられるケースであり (Fig. 7のC)、緑井8丁目地区では、住宅の上流側にあった水田と畑に大量の土砂が堆積したことにより、土石流が減速して家屋の流失を免れた (しかし住宅内に土砂は流入した) と考えられるケースである (Fig. 6のC)。

オルソモザイク画像で判読可能な、6地域の全ての住宅被害に着目すると、115棟の住宅被害が確認された (Table 3)。このうち、流失が45棟、一部流下が30棟、損壊が40棟であった。115棟の住宅被害のうち、78棟 (68%) が、人的被害発生位置の周辺50 m以内、またはその上流側に分布した。

(2) 堆積域の地形的特性

災害発生前の勾配に着目するため、基盤地図情報数値標高モデル5 mメッシュ (国土院) から傾斜角を求め、そこからさらに計算窓サイズを5 mメッシュ (25 m) とした移動平均による平均勾配を求めた。人的被害を生じた30棟の家屋の中心位置について、その平均勾配は10.0度、標準偏差は2.4であった。同データを用いると、緑井8丁目、

八木3丁目、八木3丁目東、八木3丁目梅林の4地域について、その堆積域の下端付近の平均勾配は2度、八木3丁目阿武および八木4丁目地区では4度であった。後者の2地域の平均勾配が少し大きい原因は、本研究で設定した土砂堆積範囲が扇状地の下端に達していないため、堆積域の下限標高が他の地区よりも20 mほど高いことが関係している。

堆積物として0.5 mから1 m径の巨礫、および流木に着目すると、流木のほうが巨礫よりも上流側で停止する傾向を示した (Table 4)。これとは別に、土砂の堆積厚に着目すると、緑井8丁目地区や、八木3丁目地区では、幅の広い主流路が下流側まで続き、下流側にも厚い土砂堆積が生じた。なお、オルソモザイク画像では、泥流はかなり遠方まで流下したことが読み取れるが、厚さをもって堆積したのか、薄く泥水が覆った状態なのかまでは判定できなかった。

4.3 地質と被害実態との関係

本研究対象地域では、西側が花崗岩類、東側にホルンフェルスが分布している (2.2節)。地質による被害実態の差異に着目するため、各地域について傾斜分布図を作成し、そこに人的被害、建物被害、土砂堆積域をプロットした。これらのうち、八木4丁目の例を Fig. 11に示した。次に、土石流の流路のうち、流失型の建物被害 (4.2節)

Table 4 Topographic features of sedimentary areas.

District	Fan apex	Elevation (m)			Flowdown distance along flow path (m)
		Lower limit of driftwoods	Lower limit of boulders	Lower limit of sedimentary area	
Midorii 8	65	45	20	10	619
Yagi 3	65	15	25	10	416
Yagi 3 East	55	25	30	10	307
Yagi 3 Bairin	45	25	25	10	305
Yagi 3 Abu	80	50	25	25	355
Yagi 4	100	60	50	30	511

Note: Drainage from each fan apex in all districts is run in culverts.

の上流端から下流端までの区間を建物被害区間として、GISでその水平距離、および平均勾配を求めた (Table 5)。Fig. 6から Fig. 11の図中に、表に集計した建物被害区間の上流端と下流端を図示した。この表には、Table 3に記載した、人的被害が生じた流路の谷出口からの最大距離も併記した。なお勾配のGISデータには、4.2節で作成したデータを用いた。

この結果、花崗岩類地域では、建物被害区間は堆積域の下限近くまで分布した。ホルンフェルス地域では、地形は堆積域の下流部まで急勾配が続くが、建物被害区間は、堆積域の上部のみに分布した (Fig. 11)。つまり、マサ化した細粒の花崗岩類を崩壊源に持つ西側4地域では、ホルンフェルス分布域の東側2地区に比して、建物被害区間が相対的に長かった。これは、建物被害区間の水平距離の絶対値の違いとしても現れた (Table 5)。また、建物被害区間の平均勾配は、花崗岩類地域では9.0度、ホルンフェルス地域では11.8度であった。なお、人的被害が生じた最大流路長の平均は、前者が134 m、後者は128 mで、類似した値を示した (Table 5)。

5. 考察

5.1 被害実態と地質との関係

ここまでの結果から、土石流発生域の地質、つまり土石流構成堆積物の粒度特性の違いと、災害前の地形である縦断勾配変化に注目することにより、本イベントによる土石流の到達範囲について、次式で表される特徴が示された。

沖積錐の地形発達範囲 \geq 本イベント土石流の到達範囲 $>$ 本土石流による人的被害発生範囲

ホルンフェルス分布域では、急勾配が続く斜面の途中であっても、建物により土石流が停止したが (Fig. 10, Fig. 11)、花崗岩類分布域では細粒分が建物の隙間を縫って、より下流へ到達した (Fig. 7, Fig. 8など)。このことから、本イベントにおける土石流の到達範囲の関係性には、建物などの人工構造物が与えた影響が示された。

5.2 土石流流下経路における被害実態の差異

ここまでの結果から、扇状地上の土石流の流路を決める要素として、地形改変後の落水線、建物などの人工物を挙げることができる。河川が暗渠化された住宅地の場合、谷出口に近い道路はしばしば落水線となり、これは主要な土石流の流路となった。また、八木3丁目阿武では、谷地形の元の流路が侵食され、新たな流路で土石流が流下した (Fig. 9のA)。建物の影響として、上流側で建物の流失、その下流で建物流下、さらに下流側では建物内への土砂流入のように、上流から下流に向かって、建物被害の実態が軽減される場合がみられた。Fig. 11のように地形勾配が縦断方向に大きくは変化しない場合、建物を破壊し流下した土石流は、最終的に周囲の建物によってせき止められたことが示唆される。加えて、人工物の隙間を縫って流下する場合がみられた。これは、土石流の源頭部の地質の違いが、被害実態の違いとして、ここでは特に到達距離と堆積土砂の粒度の違いとして表出したものと考えられる。

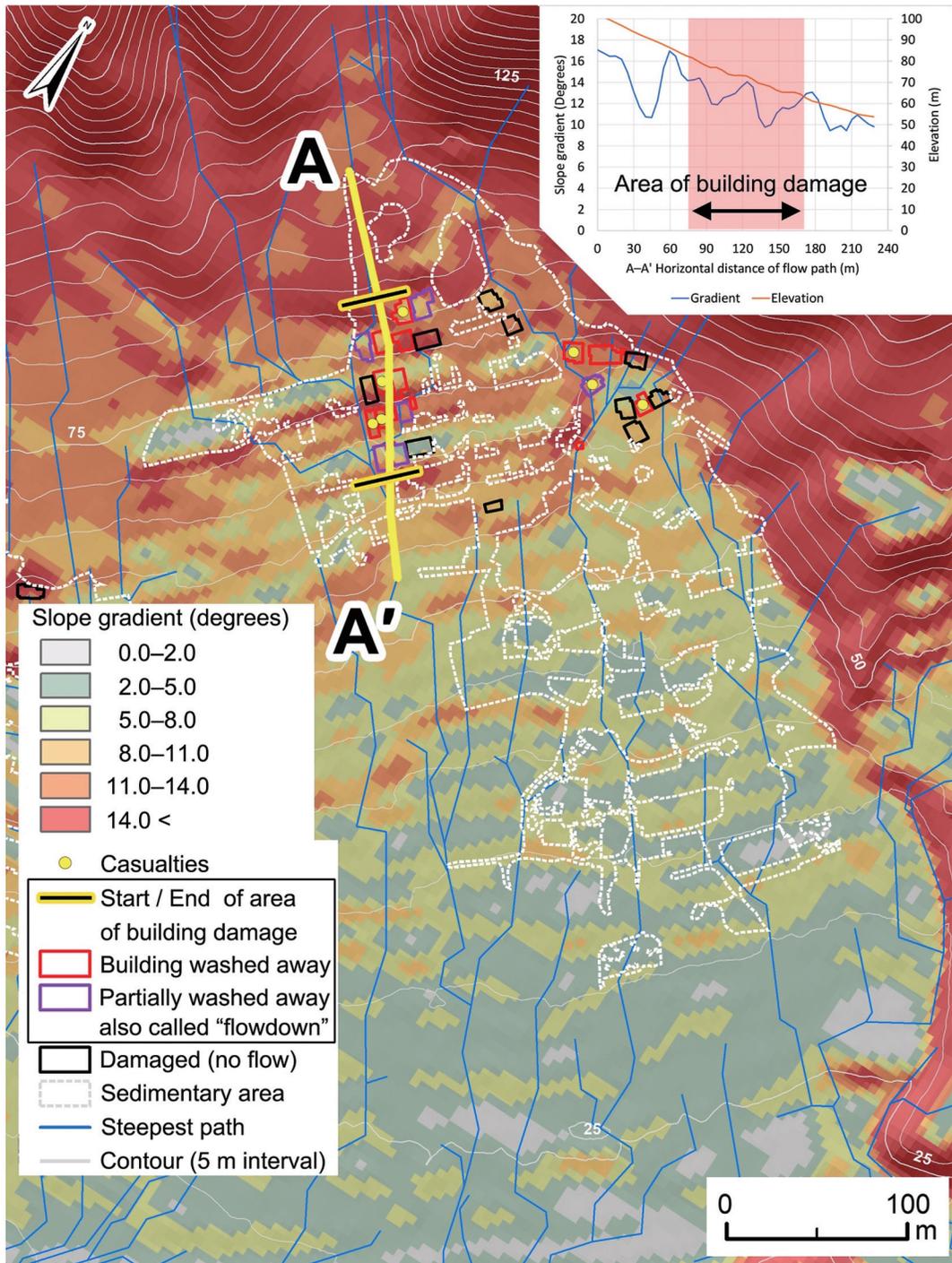


Fig. 11 Slope gradient map (example from Yagi 4).

Table 5 Slope gradient and geology.

District	Areas of building damage					Areas of human casualties		Geology (Chigira et. al., 2015)
	Slope gradient (degrees)	Standard deviation	Ave. gradient by geology (degrees)	Horizontal distance of flow path (m)	Ave. horizontal distance of flow path by geology (m)	Max. horizontal distance of flow path from fan apex (m)	Ave. max. horizontal distance of flow path by geology (m)	
Midorii 8	9.0	2.6		335		195		
Yagi 3	9.0	3.0		375		140		
Yagi 3 East	10.4	1.2	9.0	140	266	45	134	Granite
Yagi 3 Bairin	7.6	1.8		213		154		
Yagi 3 Abu	12.4	1.0		50		55		
Yagi 4	11.1	2.6	11.8	65	58	200	128	Hornfels

5.3 建物被害による土石流運動エネルギーの指標

建物被害の発生は、到達時の土石流の運動エネルギーの大きさに影響を受けると考えられる。本研究では、外見上明らかな建物被害を、その被害の大きさに応じて3分類した。これは、定性的ではあるが、土石流の運動エネルギー量の大小の指標として対応するものと思われる。また、土石流が地物に到達した時、建物に与えた影響に応じて土石流の運動エネルギーは減衰するであろう。例えば、八木4丁目地区のように住宅が密集した地域へ流入した土石流は、住宅に被害をおよぼした後、下流側に流下経路と同等の勾配が続く場合であっても停止した (Fig. 10のB)。このことから、土石流の到達時、対象物の破壊に至らない場合、建物の存在は土砂をせき止め、下流側を保護する機能を発揮する場合があると考えられる。

6. 課題と展開

6.1 土砂災害の減災に向けた被害分析結果の活用

(1) 分析結果の活用

本研究により、土石流は落水線を流下し、谷出口に近い場所に人的被害が集中したこと、また、流路沿いで被害が生じたこと、そして、土石流が上流側の建物へ衝突し、下流側への被害の程度に影響をおよぼしたことが示された。こうした被害実態の分析により得られた知見は、今後の防災対策に活用することができるものと考えられる。

一つは、人工地形を反映した地形データ (例えば、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル5

mメッシュ) を使用して落水線を求めることにより、土石流の流下しやすい経路や、0次谷の位置を可視化できる可能性がある。落水線は、累積流量ラスタをベクター化したGISデータだが、既存研究³³⁾では、この累積流量の分析により、落水線の水量を定量的に扱える可能性を指摘している。落水線の解析は屋内作業で完結でき、かつ、既存データの解析だけで結果が得られるため、調査に要するコストも小さく、活用しやすい分析ツールになりうる。

折しも、地球温暖化による気候変動により、豪雨頻度の増加、雨の降り方の局地化、激甚化が指摘されている³⁴⁾。こうした「新たなステージ」³⁴⁾に対応するために、災害リスクを踏まえた住まい方への転換も議論され始めた³⁴⁾。そのような中、人的被害の分布傾向をはじめとした詳細な被害実態分析例の蓄積は、土石流被害が起きやすい空間的条件の一般化に寄与しうる。これは、土石流により生じる被害の一般論として、防災教育や都市開発などで活用可能な知見となりうる。また、災害発生直後の、被災現場の情報が少ない中での捜索救助活動における要救助者の位置推定において、有効な着眼点ともなる³⁵⁾。

(2) 分析手法の制約と課題

本研究では、オルソモザイク画像から判読された被害実態をもとに分析を行っているため、オルソモザイク画像から読み取ることでできない被害、例えば、住宅内部への土砂等の流入による被害は評価されていない。しかし、巨礫や流木は単体であってもその衝突の被害が大きいと、これ

らの挙動の理解や評価は、今後の課題である。

6.2 減災の実現に求められるハザード・リスク情報の活用

本研究に限らず、防災減災に関する研究の最終的な目的は、言うまでもなく、生命財産を守り地域社会の存続発展に貢献することにある。そのような一段大きな観点からも、本研究の知見の活用について検討を加えたい。

減災の実現を視野に入れた具体的な対応を検討する場合、ハザード・リスク情報の作成と提供のみで終わることなく、自然災害の危険が迫った際に、住民自身による判断によってハイリスク地域から避難を行うことが、減災の実現につながるものと考えられる。ハザードマップによる土地リスクや、自治体による避難情報が提供されても、その意味や重要性が理解されず、避難行動に結びつかないことが課題として指摘されている(例えば、国土交通省社会資本整備審議会(2018)³⁶⁾など)。このことから、減災の実現には、ハザード・リスク情報の構築と提供に加えて、その内容を住民自身が理解することも求められる。これには、自分の住む地域で何が起りうるのか、その時、どのような行動をとらなくてはならないのかといった、「減災において宿命的に含まれる個人や地域の自主的な判断」³⁷⁾を養う取り組みが相当する。防災減災の実現には、それに関わる関係者が、個々の分野における専門的な貢献を生かしつつ、学際的な視点を持って、住民とのリスクコミュニケーションに積極的に取り組む必要があると考える。

7. まとめ

2014(平成26)年8月広島市土石流災害を対象として、災害前後の2時期のDSMの差分から土砂堆積の厚さと範囲をマッピングし、土砂堆積量の計測と被害実態の把握を行った。この結果、沖積錐の縦断勾配や曲率が、地質に起因する粒径によって異なることが示唆された。また、人的被害の発生範囲は、上流側に局所的に分布することが示された。人的被害の発生位置および建物被害は、谷出口から平均で132 mの流路沿いに集中した。

人的被害を生じた家屋30棟が位置する地表面の平均勾配は10.0度、標準偏差は2.4であった。また、改変後地形をあらわす基盤地図情報数値標高モデル5 mメッシュ(国土地理院)から算出した落水線が土石流の流路となり、流路沿いに被害を生じた。土石流の流路上に位置する人工物の被害実態として、下流側に向かって被害が小さくなることが示された。このことから、建物の分布が被害実態に影響を与えることを示した。また、人工改変地形を反映した地形標高データから算出した落水線は、潜在的な土石流の流路の判断に活用できること、また、0次谷の位置を求める際に有効であることを指摘した。被害実態の空間分布から得られたこれらの知見は、土石流のハザード・リスク情報の高度化や、土石流被害が起きやすい空間的条件の一般化と、それによる防災教育や避難計画などの防災対策、都市計画への活用、また、災害発生直後の被害家屋の早期把握などに有用と考えられる。さらに、住民が住まう地域の災害リスクを理解し、実際の避難行動に結びつくためには、関係者が学際的な視点を持って総合的に取り組む必要性を指摘した。

謝辞

3名の匿名の査読者により、本論文の質が向上した。本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H02031の助成を受けたものである。また、土砂災害警戒区域等の英訳は、法務省の日本法令外国語訳データベースシステムを参考にした。記して感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 砂防法(明治30年3月30日法律29号)
- 2) 地すべり等防止法(昭和33年3月31日法律第30号)
- 3) 急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律(昭和44年7月1日法律第57号)
- 4) 中央防災会議(1963)防災基本計画 昭和38年6月
- 5) 国土交通省(2018a)土砂災害防止法の概要、<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/linksinpou.htm>, 2018年12月5日閲覧。

- 6) 内閣府 (2017) 付属資料21土砂災害の発生状況の推移. 平成29年版防災白書.
- 7) 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律 (平成12年法律第57号)
- 8) 内閣府 (2014) 平成26年8月20日に発生した広島市土砂災害の概要. 総合的な土砂災害対策検討ワーキンググループ, 第1回ワーキンググループ資料2.
- 9) 山越伸浩 (2014) 広島市の土砂災害を受けた土砂災害防止法の改正 - 今後の土砂災害対策の推進に当たっての留意点 -. 立法と調査, No. 359, pp. 19-31.
- 10) 国土交通省 (2018b) 土砂災害警戒区域の検証. 実効性のある避難を確保するための土砂災害対策検討委員会資料4, http://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_jikkousei.html, 2018年12月5日閲覧.
- 11) 広島県 (2017) 土砂災害警戒区域・土砂災害特別警戒区域図, 箇所番号 I-2-3-61.
- 12) 菊池 聡 (2018) 災害における認知バイアスをどうとらえるか - 認知心理学の知見を防災減災に応用する -. 日本地すべり学会誌, Vol. 55, No. 6, pp. 286-292.
- 13) 江頭進治・伊藤隆郭 (2004) 土石流の数値シミュレーション. 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, Vol. 12, No. 2, pp. 33-43.
- 14) 糸数 哲・中谷加奈・山野井一輝・長谷川祐治・藤田正治 (2016) 土石流シミュレータを用いた土石流発生時の避難経路の検討. 京都大学防災研究所年報, Vol. 59 (B), pp. 420-425.
- 15) 中谷加奈 (2016) 土石流シミュレーション. 土砂災害と防災教育, 朝倉書店, pp. 123-127.
- 16) 中谷加奈・小杉 恵・内田太郎・里深好文・水山高久 (2014) 土石流の氾濫・堆積に及ぼす家屋の影響 - 平成24年7月熊本県阿蘇市土井川で発生した土石流を対象として -. 第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 85-90.
- 17) 中谷加奈・小杉 恵・里深好文・水山高久 (2017) 家屋や道路が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響 - 2014年8月に発生した広島土砂災害を対象として. 砂防学会誌, Vol. 69, No. 5, pp. 3-10.
- 18) 水原邦夫 (2016) 土石流に伴う流木による災害とその防止軽減対策に関する考察. 水利科学, Vol. 60, No. 352, pp. 1-46.
- 19) 久保田哲也・武田 剛・Andang Suryana Soma・水野秀明 (2018) 平成29年九州北部豪雨による林地荒廃と流木発生の特徴. 平成30年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 23-24.
- 20) 千木良雅弘・松四雄騎・ツォウ チンイン (2015) 平成26年8月広島土砂災害の実態. 日本地すべり学会関西支部シンポジウム 土砂災害が迫る中での避難指示・勧告 - 平成26年8月の西日本災害を例に -, pp. 1-11)
- 21) 斎藤 眞・川畑大作・佐藤大介・土志田正二・新井場公德 (2015) 2014年8月20日広島豪雨による土石流発生地域の地質. 地質学雑誌, Vol. 121, No. 9, pp. 339-346.
- 22) 国土地理院 (2018) 基盤地図情報数値標高モデル (5 m メッシュ). <https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>, 2018年12月5日閲覧.
- 23) 内山庄一郎 (2019) 新たな観測手法としての SfM 写真測量の活用. 地震ジャーナル, Vol. 67, pp. 58-62.
- 24) Snavely, N., Seitz, S. M. and Szeliski, R. (2007) Modeling the world from Internet photo collections. International Journal of Computer Vision, Vol. 80, pp. 189-210. doi:10.1007/s11263-007-0107-3
- 25) Furukawa, Y. and Ponce, J. (2010) Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 32, pp. 1362-1376. doi:10.1109/TPAMI.2009.161
- 26) 満上育久 (2011) Bundler: Structure from motion for unordered image collections. 映像情報メディア学会誌, Vol. 65, pp. 479-482. doi:10.3169/itej.65.479.
- 27) 内山庄一郎・井上 公・鈴木木奈子 (2014) SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所研究報告, No. 81, pp. 37-60.
- 28) 早川裕式・小花和宏之・齋藤 仁・内山庄一郎 (2016) SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応用, Vol. 37, No. 3, pp. 321-343.
- 29) 内山庄一郎・井上 公・後藤秀昭・中田 高・井田康之・梅田 篤 (2014) 平成26年8月豪雨による広島土石流災害における空撮写真を用いた捜索支援地図の作成. CSIS DAYS 2014研究アブストラクト集, p. 16.
- 30) 中国地方整備局 (2014) 平成26年8月豪雨災害 (広島豪雨災害) 主要被災エリア崩壊土砂量等算出.
- 31) 土木学会・土木学会中国支部・地盤工学会 (2014) 平成26年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告

- 書.
- 32) 三浦弘之・弓真由子 (2015) 非線形写像法による航空レーザ測量データの幾何補正とそれに基づく2014年広島豪雨災害での崩壊土砂量の推定. 地域安全学会論文集, No. 27, pp. 283-291.
- 33) 沢野伸浩・千川剛史・小島誠一郎・石尾志保美 (2010) Flow Accumulation を用いた中山間地における豪雨災害の被害予測に関する考察. 日本災害情報学会第12回学術大会予稿集, pp. 141-146.
- 34) 国土交通省 (2015) 新たなステージに対応した防災・減災のあり方. 新たなステージに対応した防災・減災のあり方に関する懇談会, pp. 1-22.
- 35) 村上 圭・松上倫也 (2016) 土砂災害時における災害対応の標準化. 都市政策, No. 164, pp. 63-68.
- 36) 国土交通省社会資本整備審議会 (2018) 大規模広域豪雨を踏まえた水災害対策のあり方について～複合的な災害にも多層的に備える緊急対策～. 大規模広域豪雨を踏まえた水災害対策検討小委員会答申, pp. 1-29.
- 37) 宮城豊彦 (2012) ミレニアムクラスの複合災害を克服するための新しいパラダイムの構築. 地域災害と環境脆弱性の克服に関する報告書 (概要版), pp. 8-9.
- (投稿受理: 2019年4月1日
訂正稿受理: 2019年7月3日)

要 旨

2014 (平成26) 年8月20日に広島県広島市で発生した土石流災害について, 無人航空機 (UAV) 撮影と SfM 写真測量により土砂堆積量を計測し, 地質による被害特性の差異を明らかにした. 人的被害は, 谷出口から平均132 m の範囲で発生し, これは建物被害域よりも小さかった. 建物被害域は, ホルンフェルス地域よりも花崗岩地域のほうが範囲が大きかった. また, ホルンフェルス地域では, 建物が土石流を停止させる働きを示したが, 花崗岩地域では, 細粒な土砂が建物の間を通過して, より遠方まで到達した. これらの結果は, このイベントにおける土石流の到達範囲が, 沖積錐の地形発達範囲と同等か, それよりも小さいことを示している.