

マルチシナリオによる住宅地内の土石流危険度 リスクの評価方法の検討

EVALUATION METHODS FOR DEBRIS FLOW RISK DISTRIBUTION IN RESIDENTIAL AREA CONSIDERING MULTI SCENARIOS

長谷川 祐治¹・中谷 加奈²・青柳 昌憲³・海堀 正博⁴・里深 好文⁵

Yuji HASEGAWA, Kana NAKATANI, Masanori AOYAGI, Masahiro KAIBORI,
and Yoshifumi SATOFUKA

¹ 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8521 東広島市鏡山 1-7-1)

E-mail: y-hasegawa@hiroshima-u.ac.jp

² 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: nakatani.kana.4z@kyoto-u.ac.jp

³ 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

⁴ 広島大学防災・減災研究センター (〒739-8521 東広島市鏡山 1-7-1)

⁵ 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Key Words: debris flow, numerical simulation, risk distribution, multi scenarios, evaluation method

1. はじめに

土石流は発生件数に対して被害の甚大度が大きく、適切な防災対策が必要である。扇状地の住宅地に流入する土石流危険渓流では、地形条件や災害履歴の調査を行い、都道府県が谷出口を基点として単一規模の土石流シナリオを基に、扇形状等に警戒区域を設定する。しかし、日本の土石流危険渓流は十数万存在するため、警戒区域毎に詳細な危険度分布を地方行政が示すのは難しい。また、警戒区域内では一律で危険度が示されるため、区域内の住民が危険性を具体的に認識し難い。警戒区域内でも相対的に危険度が高い場所や低い場所が存在し、具体的な危険度の濃淡を示すことで危険性が認識しやすくなると考えられる¹⁾。詳細な土石流の危険度分布の検討には数値シミュレーションが有用だとされる。

平成 30 年 7 月豪雨により西日本では甚大な土砂災害が発生し、中でも広島県は被害が大きかった。この豪雨により広島県で発生した土石流被害の大部分は県の指定した土砂災害警戒区域内で発生したが、一部では警戒区域外でも被害が発生した(図-1)^{2),3)}。

これより、警戒区域内だけでなく区域外でもリスクの高い箇所があり、警戒区域を含む谷出口の広範囲において詳細な危険度分布を示すことが求められる。また、県が災害前に想定した土石流とは異なる規模で発生して、被害が生じた地域もある。単一の土石流シナリオだけではなく、複数のシナリオによる危険度のリスクを事前に把握し、その評価方法を検討することが求められる^{例えば4)}。

本研究は、平成 30 年 7 月豪雨の土石流事例を対象としてシミュレーションの妥当性を確認した後に、異なる土石流の規模や建物破壊の有無を考慮したマルチシナリオを想定したシミュレーションを実施して、流動深+堆積厚が最大値となる最大水位、建物被害に影響する流体力などを指標に、新たな土石流の危険度分布の評価方法を提案して、防災対策に繋げることを目的とした。

2. 検討方法

(1) 土石流シミュレーション

シミュレーションには、GIS を実装した土石流シ



図-1 平成 30 年 7 月豪雨により発生した土石流前後の DEM 差分と警戒区域の対応³⁾ (口田南三丁目)。

ミュレーションシステムである HyperKANAKO⁵⁾を用いて数値シミュレーションを実施した。本システムは、土石流の抵抗則や侵食堆積速度に高橋モデル⁶⁾を採用し、山間部で流れ方向のみに拘束される一次元領域の谷部から、流れ方向だけでなく横断方向にも流れが広がる扇状地の二次元領域までを連続的に扱える結合モデル⁷⁾を採用している。

(2) 対象地と計算領域

平成 30 年 7 月豪雨で土石流被害が発生した広島市安佐北区口田南三丁目を対象とした。図-1 に示したように、警戒区域外にまで土砂が到達して、被害が発生している。

土石流の実挙動やシミュレーションにおいても、地形(勾配)と土石流の規模が侵食や堆積等の挙動に大きく影響する要因である。本研究は、広島県から提供された災害発生前の解像度 1 m×1 m の地形データとして 1) Digital Elevation Model (DEM), 2) Digital Surface Model (DSM) を採用した。DEM は建物高を除いた詳細な地盤高を、DSM では建物高が表現される。

一次元領域は計算点間隔 5 m, 河道幅 10 m に設定した。図-2 に計算領域と災害時の土砂堆積範囲を示し、図-3 に各地形の二次元領域を示す。両者とも中央部に線路盛土が表現され、DSM では DEM と比較して住宅地内の建物が表現されている。二次元領域は災害時の土砂堆積範囲を囲むように 625 m×400 m の範囲として、計算格子は 1 m×1 m に設定した。

(3) 実災害規模の検討

平成 30 年 7 月豪雨の土砂災害のデータを参考に、航空レーザー測定の災害前後の差分値から移動土砂量 8,000 m³ (空隙込) を得た。この土砂を一次元領域に均一厚さで移動可能土砂として設定した。ハイ



図-2 口田南の計算領域の設定と災害時の土砂堆積範囲 (背景は災害後オルソ)。

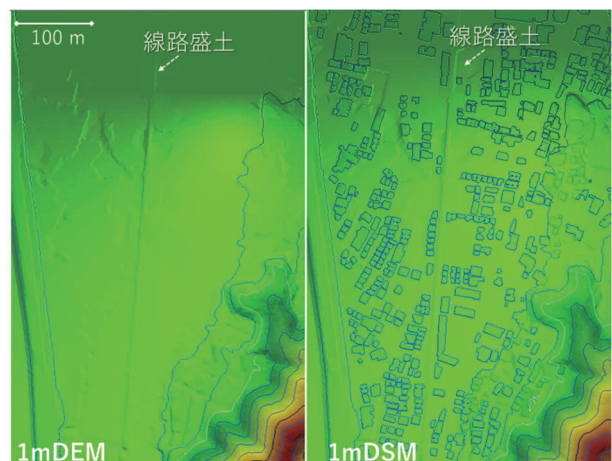


図-3 各地形データの二次元領域 (等高線は 10m 間隔)。

ドログラフは、降雨発生時から災害発生時までの累積雨量 (188 mm) と対象地の流域面積 (0.27 km²) から、土石流発生時には全ての降雨が流出すると仮定して流出率 1.0 を用いて総流出量を算出した。日本の土石流事例を参考に⁸⁾、土石流のピークの継続時間を 300 秒 (全時間を 400 秒) にすると、ピーク流量は 145 m³/s と求められるが、ここでは 150 m³/s と考えた。

上流端からは水のみを供給して、一次元領域で移動可能土砂が侵食されて土石流が発生・発達するシナリオを想定した。その他のパラメータは、現地状況や既往検討を基に、表-1 のように設定した。

図-4 に計算終了時の堆積厚と災害時の土砂堆積範囲を示す。図-1 に示したように、実災害では警戒

区域の西側を超えて、警戒区域外まで土砂が到達した。この場所は横断地形の比高差が5m未満のため、土石流が地形の影響を受けず直進すると考えられるが、実際には地形の影響を受けて左岸側に流動した。数値シミュレーションの結果から、谷出口より下流の住宅地では、DSMではDEMと比較して建物の存在により流れが阻害されることで、堆積範囲が横断方向（図中では南北の方向）に広がる。また、DSMでは相対的に建物よりも低い道路上に流れが集中する様子が堆積厚分布から確認出来る。実災害では南北に通る道路上に細長く土砂が堆積しているが、本計算では表現されていない。これは、実災害では土石流発生後も強い雨が継続して、後続流が長く続いたことで、一度堆積した土砂の再移動が見られたこと等が影響したと推測される。DEM、DSMとも堆積高が10cm以上を示す範囲は、実際の土砂堆積範囲とよく対応している。本手法による土石流シミュレーションの妥当性が示されたと考えられる。

(4) マルチシナリオの設定

前項と同じ計算手法とパラメータを用いて複数シナリオの検討を行った。土砂量を20,000, 16,000, 12,000, 8,000, 4,000 m³（空隙込み）の5種類と設定した。災害前の基礎調査から流出土砂量が13,692 m³、運搬可能土砂量が20,000 m³と示されていることから、本溪流で災害前に想定される最大土砂量と考えた。設定した土砂は、実災害の規模に対して2.5, 2, 1.5, 1, 0.5倍である。ピーク流量も実災害の規模に対して土砂量と同じ倍率を乗じて、375, 300, 225, 150, 75 m³/sと設定した。流量5種類、土砂量5種類の組み合わせた25ケースをDSMとDEMの2種類の地形データを用いて全50ケースを計算した。

(5) 危険度分布の評価方法

本研究では、危険度分布を表す指標として最大水位（流動深+堆積厚の最大値）と流体力の最大値を採用した。最大水位は、家屋が土砂で埋まる状態や家屋の破壊の指標となり、流体力は家屋の破壊の指標となる。流体力 $F(N/m)$ は、式(1)で表される。

$$F = \rho \cdot h \cdot u^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ : 土石流の密度(kg/m³)、 h : 流動深(m)、 u : 流速(m/s)である。以降で考慮する流体力は各シナリオにおける最大値を採用した。

広島県の土石流基礎調査マニュアルによると⁹⁾、流動深が1mを超える場合には著しく危害の恐れのある

表-1 計算パラメータ

パラメータ	数値 (unit)
計算時間	600 (s)
計算の時間間隔	0.01 (s)
代表粒径	0.2 (m)
砂礫の密度	2,650 (kg/m ³)
流体相の密度	1,180 (kg/m ³)
砂の内部摩擦角	37 (deg.)
河床の容積濃度	0.65
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
マンシングの粗度係数	0.03 (s/m ^{1/3})

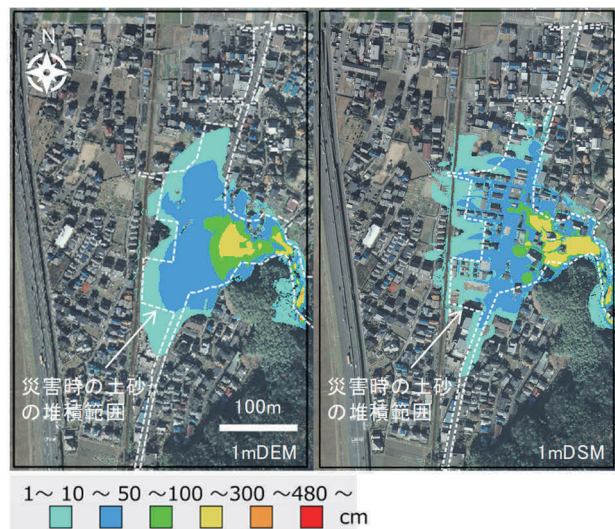


図-4 計算終了時の二次元領域の堆積厚

ある区域として指定されている。本検討ではその数値を参考にシミュレーションで得られた最大水位の1.0mと2.0mを閾値とした。最大水位には土砂堆積が含まれる場合も想定される。一般に、土石流の高さを災害による危険度の指標とする際は、流動深だけでは堆積が含まれないため、高さが低く示される場合がある。そこで、広島県の設定値よりも大きい2mも閾値とした。また、津波による建物被害に関する検討において¹⁰⁾、50 kN/mを超えると木造・鉄骨の建物被害が急増することが示されることから、流体力は50 kN/mを閾値とした。なお、これらの閾値の設定方法については今後さらなる議論が必要である。DSMとDEMの各25ケースの計算設定した閾値を超えた計算メッシュを抽出して、それぞれで閾値を超えた回数をケース数である25で除した「閾値を超過する確率」を指標として、以降、本指標を超過確率と呼ぶ。例えば、超過確率が0では、そのメッシュは全ケースで閾値を超えない地点となり、相対的に安全な地点であることを示す。一方、超過

確率が 1.0 では、そのメッシュは全ケースで閾値を超えており、危険度が非常に高い地点であることを示す。さらに、二つの地形データを合わせた 50 ケース（以降、DEM+DSM と記載）についても、同様の方法で検討を行った。DEM では建物の高さを除いた地盤標高が表される一方、DSM では建物の高さが表現された標高が示されている。そのため、建物が全て破壊された場合の地盤標高の DEM と、建物破壊が全くない場合を想定する DSM の、二つの地形データを合わせて検討することにより、両者の中間的なシナリオとなる一部の建物が破壊された状況の評価することを目指した。

3. 住宅地内の危険度分布

計算結果と最大水位と流体力で設定した閾値の比較から地点ごとに超過確率を求めて、DEM, DSM, DEM+DSM で表した。1 回でも閾値を越え、最小の超過確率が DEM, DSM では 0.04, DEM+DSM では 0.02 となる。

図-5 に最大水位の閾値を 1.0 m とした場合の危険度分布を示す。まず、DEM と DSM を比較すると、建物の高さが表現される DSM の方が、超過確率 0.04 以上を示す範囲が広い。また、超過確率が 1.0 となる範囲が広い。特に、図中に黒○で示した範囲で顕著な違いが見られる。一方、建物の高さを表現しない DEM では赤○で示した南側で DSM より高い超過確率を示す。ここでは、水位が上昇したことで線路盛土を越えて西側に流出していることがわかる。この結果から、DEM では地形勾配の影響を受けて南側に流れる割合が多い傾向を示し、DSM では建物の

間が移動経路となるため DEM よりも地形勾配の制約を受けずに南側に流れる割合が少なくなり、北西向きに流れる傾向を示す。また、線路沿いの北側に一部で高い超過確率を示す地点が点在する。これらは、移動途中は高い水位を示さないが、この地点に流入すると、地形的な制約や水・土砂が集まることで高い最大水位を示す「流れのたまり場」となる。すなわち、流れのたまり場では、土石流の直撃により破壊や損傷を受ける危険性ではなく、土石流が流動してきた際に周囲と比較して大きな最大水位を生じやすい場であることから、当該地点に道路や家屋などの構造物が存在すると、水や土砂で埋没する危険性が高いことを示唆する。線路を超えた西側では、DSM の方が高い超過確率を示す範囲が広い。これは、DSM では線路沿い東側で最大水位が高くなる箇所が複数あるため、そこから線路を越えて西側に流出したためである。線路の東側と西側を超過確率で比較すると、西側の方が明らかに小さい。また、DSM で超過確率が 0.72 以上を示す範囲は、DEM では 0.5 を示す範囲とほぼ同じであり、周囲と比較して流れが溜まりやすい地形を呈していると考えられる。DEM+DSM の結果は、谷出口付近では殆ど同じ結果を示すが、DEM や DSM の一方のみが示す範囲では超過確率が低くなるが、共通して示される場所は高くなる傾向を示す。

図-6 に最大水位の閾値が 2.0 m の危険度分布を示す。閾値が 1.0 m の結果と比べて、流れのたまり場となる地点が多く点在することが確認できる。ここでは、閾値を大きくすることでこのような地点が抽出できる。DEM と DSM の比較では、閾値が 1.0 m の結果と同様に高い超過確率を示す範囲が広い。先

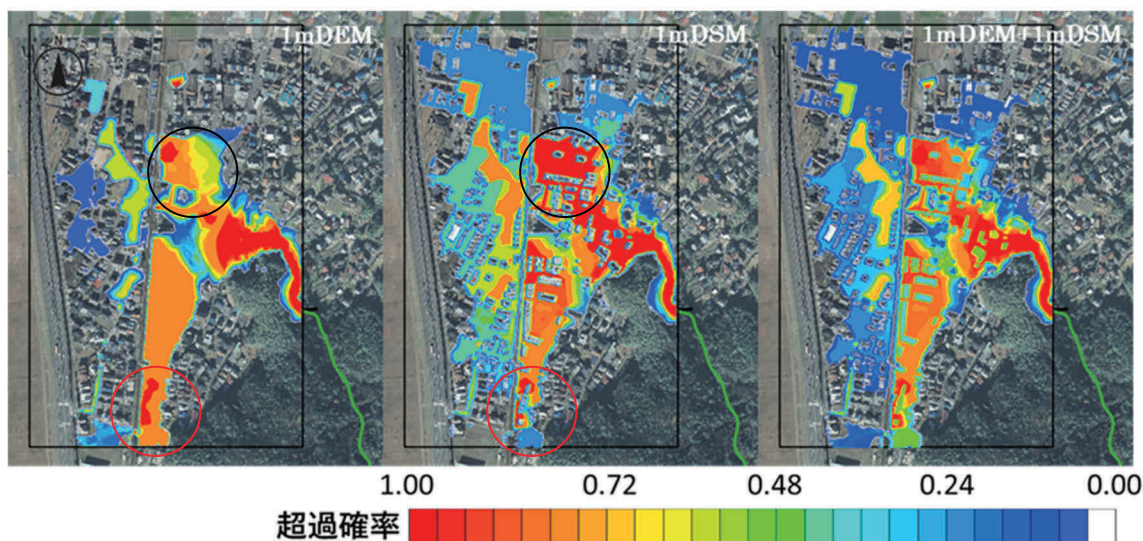


図-5 最大水位 1.0 m を閾値とした危険度分布。

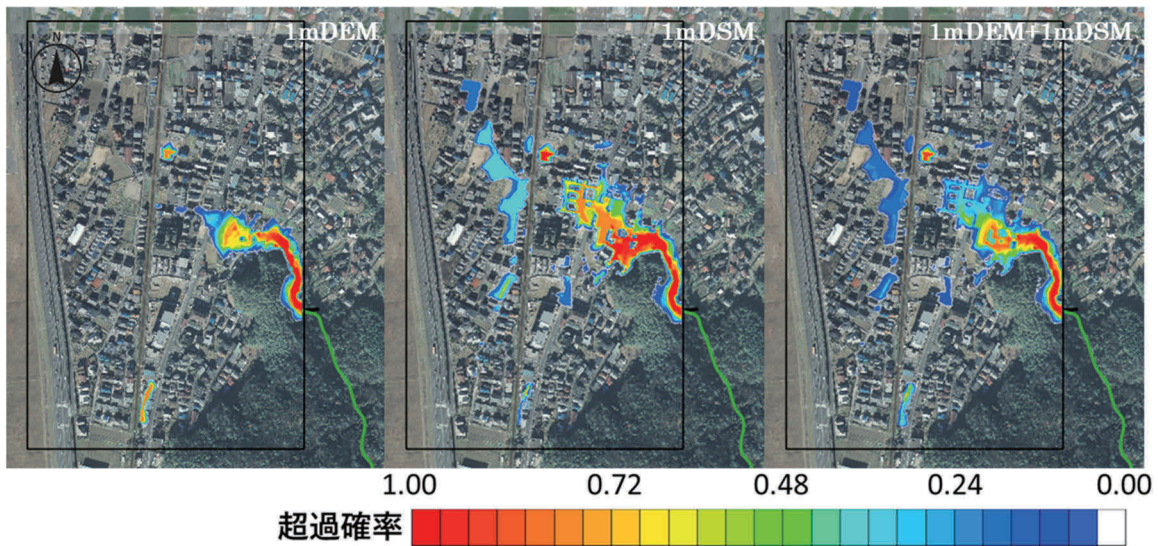


図-6 最大水位 2.0 m を閾値とした危険度分布.

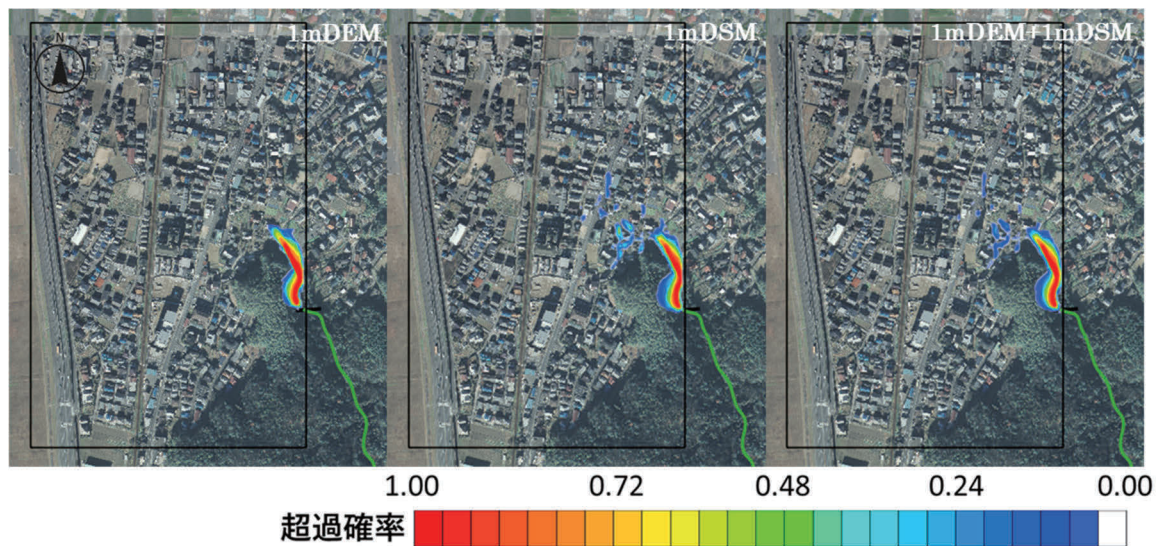


図-7 流体力 50 kN/m を閾値とした危険度分布.

の検討では¹¹⁾、谷出口直下に家屋があると流れを阻害して建物の高さを表現した地形の方が上流側に土砂が堆積する傾向を示したが、この地域では、建物の高さを表現することで下流に多くの流れを流出させる傾向を示す。DEMは線路西側で超過確率が0.04以上を示す範囲は見られず、一方で、DSMでは線路西側にも流出が見られる。DEM+DSMでは、閾値1.0 mの結果と同様の傾向を示す。

図-7に流体力の最大値に関する危険度分布を示す。DEMは0.04以上の超過確率を示す範囲は谷出口にとどまった。DSMはDEMと比較すると、超過確率が1.0を示す地点はほぼ共通するが、それ以下の超過確率を示す地点は谷出口付近ではDEMの方がやや広い。一方で、建物が存在する住宅地を見ると、DSMの方が北西方向に超過確率が0.04以上を

示す範囲が広がり、一部は超過確率が0.5程度を示す地点も確認された。住宅地では、DEMは広がった流れとなり、DSMは建物の間を移動する集中した流れとなるため、住宅地まで流出した流れの流体力はDSMの方が大きくなる傾向を示す。DEM+DSMでは、閾値1.0 mの結果と同様の傾向を示す。しかしながら、50ケースの土石流シナリオを対象として超過確率が1.0を示す範囲は、住宅地において建物が全て破壊された場合、ならびに建物を考慮した住宅地において、全てのシナリオで閾値を超えることから、危険度が著しく高く警戒が必要な領域であり、早い段階から避難行動を起こす等の優先的な防災対策が必要な地点だと考えられる。

4. おわりに

本研究では、単一の土石流シナリオだけではなく、複数のシナリオによる危険度のリスクを事前に把握し、その評価方法について検討を行った。従来の警戒区域のように一律に危険な範囲を示すのではなく、一つの図で複数の土石流シナリオを考慮した上での住宅地内の詳細な危険度分布を示す方法を提案した。マルチシナリオを検討するにあたり、災害実績や基礎調査のデータをベースとして、土砂量と流量からシナリオを設定した。最大水位と流体力を指標として、ある閾値を設定して場所ごとにそれを越えた回数を基に危険度分布を作成した。シナリオ設定は結果に大きく影響することから、今後は特に災害が発生していない地域についてのシナリオの設定方法やその基準、最大値などの検討が必要である。また、閾値の設定方法について、特に流体力の閾値は建物被害との対応を考慮しながら、更なる検討が必要である。今後は複数の指標を組み合わせた危険度分布の提案方法や、対象地を広げることも検討している。

謝辞：本研究の実施にあたり、広島県土木建築局より災害前後の LP データを提供頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 中谷加奈, 長谷川祐治, 里深好文: 異なる Digital Elevation Model を用いたシミュレーションによる土石流の危険度分布の把握と避難計画への活用, 砂防学会誌, Vol. 72, No. 6, pp. 8-17, 2020.
- 2) 広島県: 土砂災害警戒区域等における検討事項, 平成 30 年 7 豪雨災害を踏まえた今後の水害・土砂災害対策のあり方検討会 (第 2 回砂防部会) 資料 2, <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/33203>

- 1.pdf, 2018.
- 3) 広島県: 土砂災害警戒区域等における検討事項, 平成 30 年 7 豪雨災害を踏まえた今後の水害・土砂災害対策のあり方検討会 (第 1 回砂防部会) 資料 4-1, <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/330358.pdf>, 2018.
- 4) 長谷川祐治, 中谷加奈, 海堀正博, 里深好文: 土砂災害警戒区域内の住宅地における土石流の危険度分布の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 75, No. 2, pp. I_181- I_186, 2019.
- 5) 堀内成郎, 岩浪英二, 中谷加奈, 里深好文, 水山高久: LP データを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発, 砂防学会誌, Vol. 64, No. 6, p. 31-38, 2012.
- 6) 高橋保, 中川一: 豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌, Vol. 44, No. 3, p. 12-19, 1991.
- 7) 和田孝志, 里深好文, 水山高久: 土石流計算における 1 次元・2 次元シミュレーションモデルの結合, 砂防学会誌, Vol. 61, No. 2, p. 36-40, 2008
- 8) 池田暁彦, 門馬直一, 堀内成郎, 山田利治: 滑川北股沢で発生する土石流について, 砂防学会誌, Vol. 51, No. 2, pp. 31-38, 1998.
- 9) 広島県 基礎調査マニュアル (案), https://chotatsu.pref.hiroshima.lg.jp/standard/file/sd_kisotyousa_d-s.pdf
- 10) 林里美, 成田裕也, 越村俊一: 東日本大震災における建物被害データと数値解析の統合による津波被害関数, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 29, No. 2, pp. 386-390, 2013
- 11) 中谷加奈, 小杉恵, 里深好文, 水山高久: 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, 2017.

(2020.7.1 受付)