

数値標高モデルによる経験的な土石流氾濫域の予測手法の 都市域に対する適用性の検討

Applicability of Empirical Models to Urban Area for Predicting Debris Flow Inundation
Areas by Using Digital Elevation Model

三浦弘之¹, 日朝健太²

Hiroyuki MIURA¹ and Kenta HIASA²

¹ 広島大学 大学院工学研究科 建築学専攻

Department of Architecture, Hiroshima University

² 広島大学 工学部第四類 (研究当時)

Cluster 4, School of Engineering, Hiroshima University

Applicability of digital elevation model (DEM)-based empirical models such as Laharz and Flow-R to an urban area for predicting debris flow inundation areas is discussed using the pre-event DEM in Hiroshima city area affected by the debris flow event in August 2014. While Laharz can predict the runout distance by the function of flow volumes, Flow-R can evaluate the bifurcation of the flow to multiple directions. The simulations revealed that Flow-R can more accurately reproduced the debris flow inundation areas because the wider flow spreading is important in the urban area located on low-slope open-basin. The debris flow susceptibility mapping by Flow-R is validated with the actual inundation areas and the designated debris flow prone areas.

Keywords: debris flow, inundation area, digital elevation model, empirical models

1. はじめに

豪雨により引き起こされる斜面崩壊、地すべり、土石流といった土砂災害は、世界各地で頻発しており、多くの物的被害、人的被害が生じている。土砂災害は自然災害の中でも発生頻度が高く、わが国では過去10年間（2006～2015年）に平均で年1,000件もの土砂災害が発生している¹。最近では2014年8月に発生した豪雨により、広島市安佐北区、安佐南区で多数の土石流が発生し、甚大な被害が発生した。20世紀中頃以降の急速な都市の発展により、平地だけでなく山地や丘陵といった傾斜地へ拡大した市街地が広く存在していることから、広島での災害のような都市域における土砂災害に対する対策を考えておくことは、防災上ますます重要となっている。

近年では、土砂災害による被害の防止・軽減を目的として、砂防堰堤などの土砂災害防止施設の整備や警戒避難体制の充実・強化など、ハード・ソフト面での災害対策が進められている。ソフト面の対策のひとつとして、2015年に改正された土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域や土砂災害特別区域の指定が各地で進められている。例えば、広島県では警戒区域の指定のための基礎調査が進められており²、その結果はWebのハザードマップ上へ順次公開されている³。この基礎調査では、現地地の地形や地質の調査、過去の災害実績の調査等の詳細な調査が行われる。しかし、対象となる危険箇所は全国で約65万箇所⁴、広島県内でも約3万2千箇所⁵も存在すること

から、調査には多大な労力と時間が必要となる。国土交通省は2019年度末までに全国の基礎調査を完了させるよう各自治体に求めているが、調査の困難さもある⁶。これららの調査に要する労力を軽減するには、数値標高モデル（Digital Elevation Model : DEM）を用いて、簡便に広域の土砂災害危険箇所を把握することが有効であると考えられる^{例えば、7,8}。

土砂災害のうち、土石流は短時間のうちに広範囲へ土砂が流出することから、甚大な被害を引き起こすことが多く、予想される氾濫範囲をあらかじめ把握しておくことが重要となる。DEMを用いて土石流の氾濫範囲を予測する手法は数多く提案されている。これらの手法のうち、動的数値シミュレーションに基づく方法^{例えば、9～12}は、上流の崩壊箇所から下流の氾濫域までの土砂の動きをとらえることが可能であるから、個々の溪流に対する氾濫域を詳細に評価するには適している。しかし、解析には対象地域固有の多数の土質情報が必要となることから、広域に対する予測を行うことは難しい。

近年、より簡便な氾濫域の予測手法として、過去の土石流災害によるデータに基づく経験的な方法がいくつか提案されている。これらの方法のうち、Laharz^{13, 14}は、過去の土砂災害のデータから構築した崩壊土砂量と氾濫面積の関係式を利用して、想定される崩壊土砂量に対する氾濫域を予測する手法である。土石流だけでなく、火山泥流（ラハール）や岩石なだれに対する経験式が構築

されている。土砂量を入力値とするため、異なる土砂量に対する氾濫域の変化を評価することが可能であるが、単一方向への土砂の流れしか考慮できない。一方で、Flow-R^{15, 16)}は、過去の土石流データに基づく閾値等を用いて、土石流の発生箇所や土砂の氾濫域を半自動的に計算するモデルである。Flow-Rは多方向への土砂の分岐を計算することができるが、崩壊土砂量を考慮していないため、土砂量の違いによる氾濫域の変化を評価することはできない。いずれの手法も、世界各地の傾斜地への適用性が検討されているが^{17~20)}、対象地域は宅地開発されていない比較的単純な地形による山地や丘陵地が多く、傾斜地が隣接する市街地に対する適用性は十分に検討されていない。

そこで本研究では、広域での簡便な土石流氾濫域の評価手法の確立に資することを目的として、2014年8月の広島市土砂災害により甚大な被害が生じた地域を対象として、DEMによる経験的な土石流氾濫域の評価手法を適用する。実際の氾濫域や指定された土砂災害警戒区域との比較から、精度良く氾濫域を評価する手法を検討すると共に、手法の適用範囲を明らかにする。

2. 対象地域と使用したデータ

本研究では、2014年8月20日に発生した土石流により被害が生じた広島市安佐北区、安佐南区の被災地周辺を対象とした。被災地では災害後に高解像度なDEMが得られており、崩壊土砂量の分布や総量の把握に利用されている²¹⁾。しかし、氾濫域の予測手法を検証するには、災害前のデータを用いる必要がある。また、手法を広域に適用することを考えると、全国的に整備されているデータを用いることが望ましい。そこで、本解析には国土地理院による5mメッシュのDEM²²⁾を用いることとした。このDEMは航空レーザ測量によって取得されたデータであり、わが国では人口の少ない山地以外のほとんどの地域で整備されている。なお、対象地域のDEMは2009年に作成されたものである。

対象地域のDEMによる地形陰影図を図1(a)に示す。図中の赤色は土石流により土砂が氾濫した箇所を表す。これらの地域は、災害後の航空写真、現地調査結果などを参考にして判読した。図中の青線は、8月19日午後6時から8月20日午前6時までの12時間における累積降雨量が180mmとなる地域²³⁾を表す。これを見ると、土石流は累積降雨量が180mm以上の地域で発生したことがわかる。また、DEMによる勾配の分布をみたところ、土石流の源頭部からの上流域では30度以上の地域が多いが、下流域の土砂が堆積する範囲では15度以下で、住宅等が分布する地域は0~10度程度となっており、勾配の小さい地域まで土石流が氾濫していた。図1(b)は同地域の地理院地図と氾濫域を表している。

なお、土石流の氾濫解析においては、樹木や家屋が土砂の流れに影響を及ぼすことが指摘されている^{24, 25)}。しかし、これらの地物の影響は、流出する土砂の特性や量、樹木の種類や大きさ、建物の構造や壁・窓の配置、塀の有無などに依存すると考えられることから、広域に対して統一的な評価を行うことは難しい。このため、本研究では地物の影響は考えず、DEMのみを用いて評価を行うこととした。

3. 経験的な土石流氾濫域の評価手法

本研究では、簡便な土石流氾濫域の評価手法として、

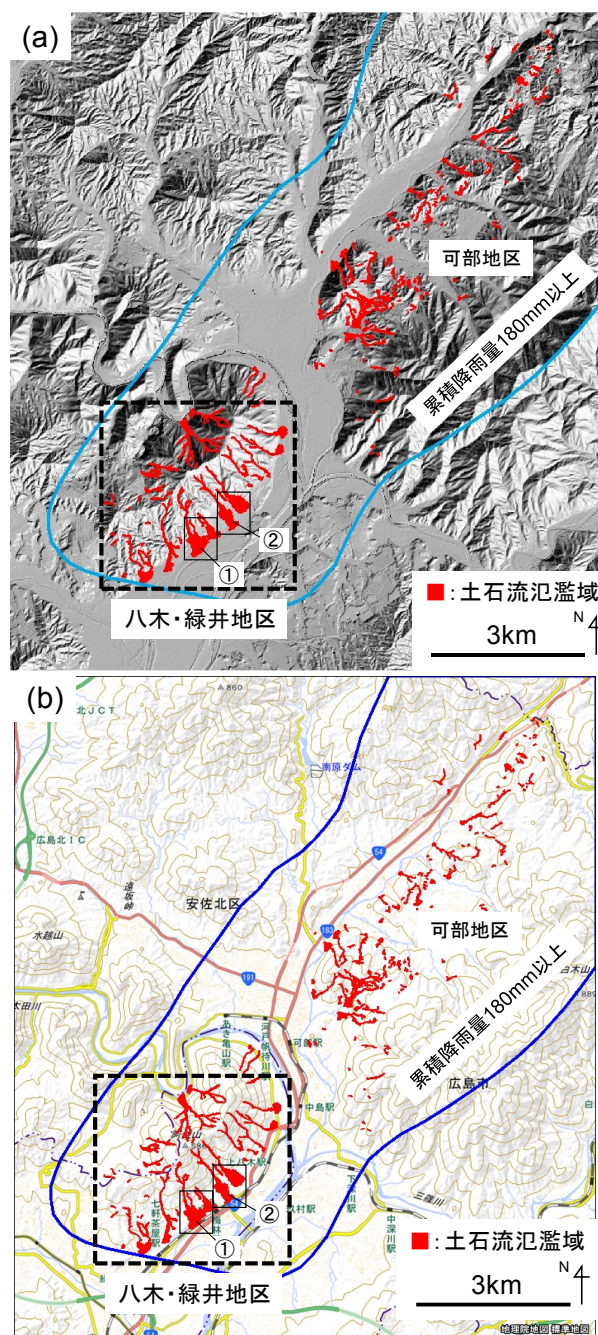


図1 (a) 対象地域の地形陰影図と2014年の土石流災害による氾濫域および累積降雨量180mmの範囲
(b) 対象地域における地理院地図(標準地図)

LaharzとFlow-Rを適用することとした。両者ともDEMのみを利用した解析が可能であり、比較的少ないパラメータで土石流による氾濫域を予測することができる。以下にそれぞれの手法の概要を示す。

(1) Laharzによる手法

Laharz¹⁴⁾は、米国地質調査所の研究グループが開発した無償のソフトウェアで、Web上でダウンロード可能²⁷⁾であり、ArcGIS上のツールボックスとして使用できる。主として土砂が下流域のどの範囲まで氾濫(堆積)するのかを予測する手法であり、Laharzにおける評価方法の模式図を図2に示す。まず、源頭部から土砂が堆積し始める地点までの上流側の地域を土砂生成域、土砂が堆積する下流側の地域を土砂氾濫域に分け、土砂が堆積し始め

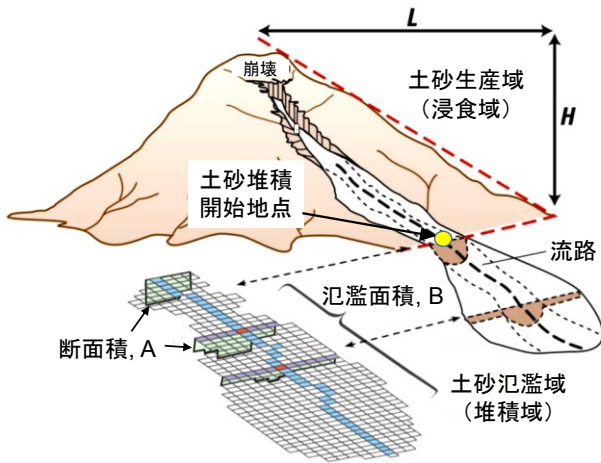


図2 Laharzによる土砂堆積域計算の模式図¹⁴⁾に加筆

る地点を手動ないし半自動的に設定する。次に、過去の土砂災害データから構築した土砂氾濫域における土砂量と氾濫面積の関係式を利用して、与えられた土砂量に対する氾濫域を求める。関係式は以下の2つからなる。

$$A = 0.1V^{2/3} \quad (1)$$

$$B = 20V^{2/3} \quad (2)$$

ここで、 V は想定する崩壊土砂量 (m^3)、 A は土砂流出方向と直交する面における氾濫域の断面積 (m^2)、 B は全体の氾濫面積 (m^2)を表す。これらの関係式は過去の世界各地の土石流災害のデータベースから構築されたものとなっている¹³⁾。

解析では、まず想定される土砂量と土砂堆積開始地点を設定する。与えられた開始点から、最急勾配となる方向を土砂流出方向として求め、それに直交する方向に対して、式(1)を満たす範囲を氾濫域として抽出する。次に、土砂流出方向のピクセルへ移動して、再度式(1)を満たす範囲を抽出する。この処理を繰り返し、氾濫面積の合計が式(2)を満足するまで行う。以上により抽出された範囲が土砂氾濫域として出力される。これらの処理により、与えられた土砂量に対する氾濫域を求めることができる。

最近の研究では、土砂内の水分量や土粒子の大きさの違いなどにより、式(2)の関係式では氾濫域を過小評価する場合があることから、以下の式を用いる方法も提案されている²⁰⁾。

$$B = 40V^{2/3} \quad (3)$$

事前解析から、対象地域では式(3)の方が実際の氾濫域に近い結果が得られたことから、本研究では氾濫面積の経験式として式(3)を用いることとした。なお、Laharzによる適用範囲は、崩壊土砂量で $10^1 \sim 10^7$ (m^3)程度であり、広島市土砂災害による崩壊土砂量は最大でも 10^5 (m^3)程度であったため²¹⁾、適用範囲内にある。

(2) Flow-Rによる手法

Flow-R¹⁶⁾は、スイスの研究グループが開発した無償のソフトウェアで、Web上でダウンロード可能²⁸⁾であり、計算結果をArcGIS上で表示することができる。Flow-Rでは、まず山地上流での崩壊開始点(ピクセル)に氾濫危

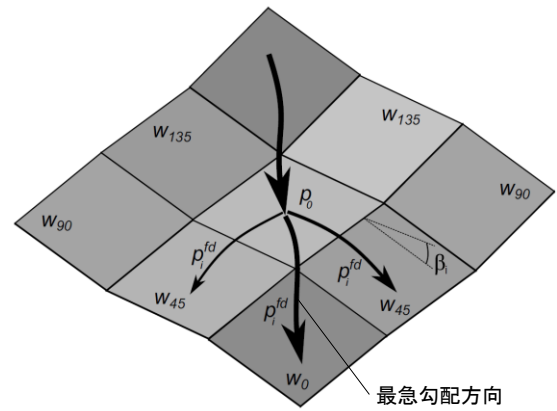


図3 Flow-Rによる土砂の流れの模式図¹⁶⁾に加筆

表1 土砂の流れやすさを表す係数

	w_0	w_{45}	w_{90}	w_{135}	w_{180}
Default	1	1	1	1	1
Gamma	1.5	1	1	1	0

険度1.0の初期値を与え、その周囲の標高の低い全てのピクセルに対して勾配の大きさに応じて危険度を分配する。危険度が分配された全ピクセルに対して同様の処理を繰り返し、各ピクセルにおける危険度を算出する。氾濫域の末端部がある条件を満たしたときに計算を終了する。本手法では、得られた危険度の大きさを擬似的に確率表示することにより氾濫域を出力する。Flow-Rにおける土砂の流れの模式図を図3に示す。あるピクセルでの危険度の大きさは以下の式で表される。

$$p_i = \frac{p_i^{fd} p_i^p}{\sum_{j=1}^8 p_j^{fd} p_j^p} p_0 \quad (4)$$

$$p_i^{fd} = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{j=8}^8 (\tan \beta_j)^x} \quad (\text{for all } \tan \beta > 0) \quad (5)$$

$$p_i^p = w_{\alpha(i)} \quad (6)$$

ここで、 p_0 は中心ピクセルにおける危険度の大きさ、 i, j は周囲の方向を表し(3x3ピクセルの計8方向)、 p_i は*i*方向へ分配された危険度の大きさ、 p_i^{fd} は*i*方向に分配する危険度の割合、 p_i^p および $w_{\alpha(i)}$ は周囲のピクセルへの土砂の流れやすさを表す係数、 $\alpha(i)$ は土砂の進行方向の角度(0, 45, 90, 135, 180度)を表す。式(5)の β は、中心ピクセルから周囲のピクセルに対する下り方向の勾配を表す。この式は、中心のピクセルに比べて標高の低い全てのピクセルに対して危険度を分配する式であり、多方向への土砂の流れが計算できる。式中の x は危険度の分配割合を表す係数であり、 $x \rightarrow \infty$ とするとLaharzと同じく単一方向にのみ土砂の流れを与える式、逆に x を小さくすると多方向により多くの危険度を配分する式となり、 $x=4 \sim 6$ 程度の値が推奨されている¹⁶⁾。

Flow-Rでは中心のピクセルの標高を dh (m)分だけかさ上げすることで、元データの勾配よりも大きな勾配を与

え、より広範囲への土砂の氾濫を求めることができる。この処理により、局所的な凹地での誤計算を防ぎ、実際の氾濫域を精度良く評価できることが示されている¹⁶⁾。また、周囲 8 方向への係数 w の代表的な値として、表 1 に示す値が使用できる。表中の w_0 は土砂の進行方向つまり最急勾配方向への重みを表し、逆に w_{180} は進行方向と逆方向への重みを表す。通常の Default の設定では全ての方向への重みを 1 とするが、Gamma による方法のように進行方向への重みを大きくし、逆方向への重みをゼロとして過剰な土砂の伝播を抑制する方法が使用できる¹⁶⁾。

計算を終了するための条件として、非線形摩擦則に基づく方法と限界到達角に基づく方法の 2 つが使用できる。前者は物理的に明快な条件式となっているが、摩擦係数や土の流動しやすさを表す係数等が必要となる。この条件式で用いるパラメータを現地計測等で得ることは難しく、実際にはパラメータスタディによって適当な値を探すことが行われる²⁰⁾。後者は崩壊開始点から氾濫域末端部までの水平到達距離と標高差のなす角度を到達角と定義して、その下限値を設定し、到達角が下限値に達すると計算を終了する。過去の土砂災害データから、到達角の下限値として、比較的粒径の粗い土砂については 11 度、細かい土砂については 7 度という経験値が利用されることが多い¹⁶⁾。

本手法で得られる危険度は、物理的に厳密な土石流が氾濫する可能性を示す確率値ではなく、氾濫しやすさを定性的に表したものである。また、土砂量については考慮していないため、本手法で得られる分布は、ある崩壊箇所から予測される最大の氾濫範囲を表すものである。

4. 各手法による計算結果

本検討では、主に市街地の存在する下流域での土石流の氾濫域の計算結果について比較するために、Laharz による計算で必要な土砂堆積開始値点は、2014 年の土石流災害での航空写真や災害前後の標高差分布²¹⁾を参考にし、あらかじめ開始点を与えることとした。また、入力値として崩壊土砂量を与える。2014 年の災害では、各流域で事前に予測されていた土砂量の最大 4 倍以上もの土砂が流出した²⁶⁾ことから、解析では、実際に流出した土砂量や事前に基礎調査書で想定されていた土砂量など複数のケースの土砂量を与えて氾濫域を計算した。

Flow-R においても、本解析では上流の崩壊箇所は 2014 年の災害での崩壊開始地点をあらかじめ与えた。その他のパラメータとして、 $x=4$ 、 $dh=2m$ 、 w の分布は Default によるものを与えた（以降、条件 A とする）。表 2 に条件 A をまとめたものを示す。計算終了条件としては限界到達角による閾値を用いた。対象地域では、比較的粒径の細かい土砂が流出したことから²³⁾、本研究では下限値を 7 度と設定して計算した。計算の結果得られる危険度の下限値を 0 として表示すると過大な範囲が氾濫域として推定されることから、既往の研究¹⁶⁾において標準的な下限値として用いられている 0.0003 を採用した。つまり、解析では 0.0003～1.0 までの大きさの危険度をもつピクセルを出力する。

2014 年の土石流で最も甚大な被害が生じた八木三丁目の県営緑丘住宅周辺（図 1 中の①で示す箇所）での土石流における計算結果の比較を図 4 に示す。図中の青枠は航空写真や現地調査等から判読した土石流氾濫域、黒枠は建物被害が発生した範囲を表す。この箇所では 2 つの

流路による土石流が下流域で合流しているが、本解析では南西側の主たる流路を対象として計算を行った。

図 4(b)でカラーで示している箇所が Laharz によってそれぞれの土砂量に対する計算結果を表す。赤色で示す範囲が災害前に想定されていた土砂量（7,000m³）²⁹⁾に対する結果を、黄色で示す範囲が実際の災害で流出した土砂量（36,000m³）を表す。式（3）から求まる前者の氾濫面積は約 15,000m²であるのに対して、後者の氾濫面積は 44,000m²となり、土砂量が約 5 倍となると氾濫面積が約 3 倍に増大することがわかる。黄色で示す範囲は、実際の氾濫域全体と比べるとやや過小評価となっているが、建物被害が発生した範囲はカバーできており、主要な氾濫域については評価できている。ただし、Laharz による計算では、末端部においてギザギザ状のやや不自然な氾濫域が求められている。これは、傾斜が小さくフラットに近い地形上では浸水深さが大きくなりやすく、式（1）による断面積の条件を満たすために、より遠くの範囲まで氾濫域として抽出されてしまうためである。この傾向は、崩壊土砂量が大きく、より下流の平坦な地域まで土砂氾濫域が及ぶ場合に顕著になる。

図 4(c)に Flow-R による計算結果を示す。崩壊開始点は図の範囲外の北側にある上流に設定した。図中の黄色～赤色で示された範囲が、推定された土砂氾濫域を表す。Laharz による結果と比べると、多方向への土砂流出を考慮しているため、より広範囲が氾濫域として抽出されており、実際の氾濫域とよい対応を示している。ただし、末端部はやや過小評価となっている。これは末端部手前において下限到達角が 7 度に達してしまっただけである。

パラメータによる計算結果の違いを比較するために、条件を $x=4$ 、 $dh=0m$ 、 w の分布を Gamma によるものを用いた場合（以降、条件 B とする）の結果を図 4(d)に示す。表 2 に条件 B をまとめたものを示す。この条件は広範囲への土砂の流出を抑制するものであり、推定される氾濫域は小さくなるものと予想される。

条件 A による結果と比較すると、建物被害が発生した地域はカバーできているものの、氾濫域は小さく、実際の氾濫域と比べてもやや過小評価となっている。また、被災箇所の末端部には破線で示すように土石流と直交する方向に水路が存在し、被災時には土砂が水路から溢れ、より南側へ流出した。条件 A では中心ピクセルでの標高をかさ上げたことにより、この土砂の流出をある程度表現できている。しかし、条件 B では標高のかさ上げがされていないため、この水路が局所的な凹地となって計算が終了している。このような狭小な水路での溢流を考慮するには、中心ピクセルへの標高のかさ上げが有効であることがわかった。

別の例として、八木三丁目阿武の里団地周辺（図 1 中の②で示す箇所）における斜め写真²⁶⁾を図 5 に示す。現地調査²⁹⁾によると、土石流の第 1 波は北東側の流路を通じて伝播し、下流の住宅地に到達した。その後、第 1 波により上流で堆積した土砂の影響により流路が変化し、第 2 波は南西側の流路を大量の土砂が伝播した。このため、第 2 波の流路の下流にある住宅地では多くの建物に被害が生じた。つまり、この地域では土石流の分岐が発生し、互いに異なる流路を通じて土砂が流出した。

この土石流での計算結果を図 6 に示す。この箇所でも事前に想定されていた土砂量は 8,000m³、実際に流出した土砂量は 30,000m³であった²⁹⁾。Laharz では土砂堆積開始地点をわずかに変化させた 2 箇所を設定して計算した。そ

これらの結果をみると、図 6(b)のように開始地点を北東側に設置すると、第 1 波の流路を取って下流へ伝播する様子が求められた。一方で、図 6(c)のように開始地点を南西側に設置すると、上流部は第 2 波の流路を通るものの、下流部では建物被害地域よりさらに西側の流路を伝播している様子がみられる。いずれのケースでも建物被害地域での氾濫を再現できていない。これは、Laharz では単一の流れ方向しか考慮していないため、土石流の分岐を表現できないためと考えられる。対象地域のように比較的勾配が緩い地形では、わずかな開始地点の違いが勾配方向の違いをもたらし、推定される氾濫域にも大きな違いとなって現れる場合があることがわかった。

一方で、Flow-R による条件 A での計算結果を図 6(d)、条件 B での結果を図 6(e)に示す。末端部までの到達距離は両者に大きな違いはみられず、いずれのケースでも実際の氾濫域とほぼ同程度の距離まで推定された。ただし、条件 B による計算では、第 1 波の流路しか採用されず、土砂の分岐が表現されないために氾濫域の幅が過小評価されている。それに対して、条件 A による結果では、より広範囲への氾濫が求まるために、実際の氾濫域のほとんどをカバーしていることがわかる。

以上より、Laharz は土砂量の違いによる土砂の到達距離の変化を評価するのには有効であった。ただし、土石流の分岐により広範囲へ土砂が流出する場合、Flow-R の方が実際の氾濫域を精度良く評価できること、Flow-R の解析条件としては、広範囲への氾濫を評価できる条件を用いることが有効であることがわかった。

表 2 Flow-R の解析条件

条件	x	dh (m)	係数 $w_{a(i)}$	下限到達角
A	4	2.0	Default	7度
B	4	0.0	Gamma	7度

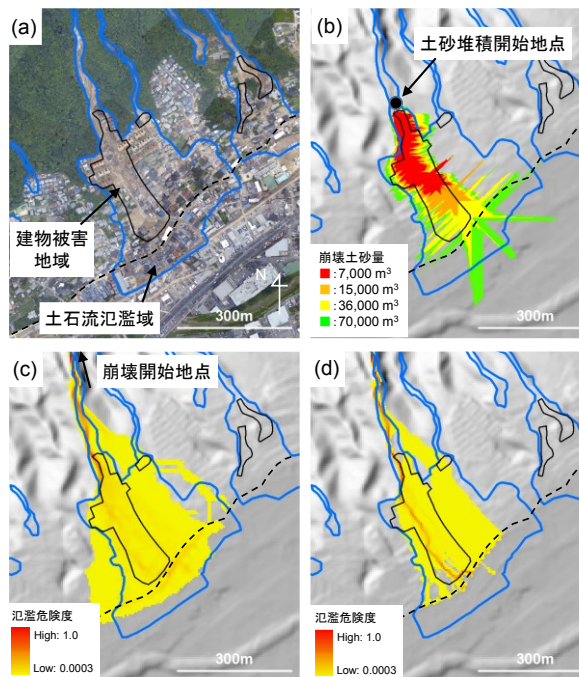


図 4 県営緑丘住宅周辺での計算結果 (a) 災害後航空写真と土石流氾濫域, (b) Laharz による計算結果, (c) Flow-R による条件 A での計算結果, (d) Flow-R による条件 B での計算結果



図 5 阿武の里団地における土石流の挙動と建物被害地域

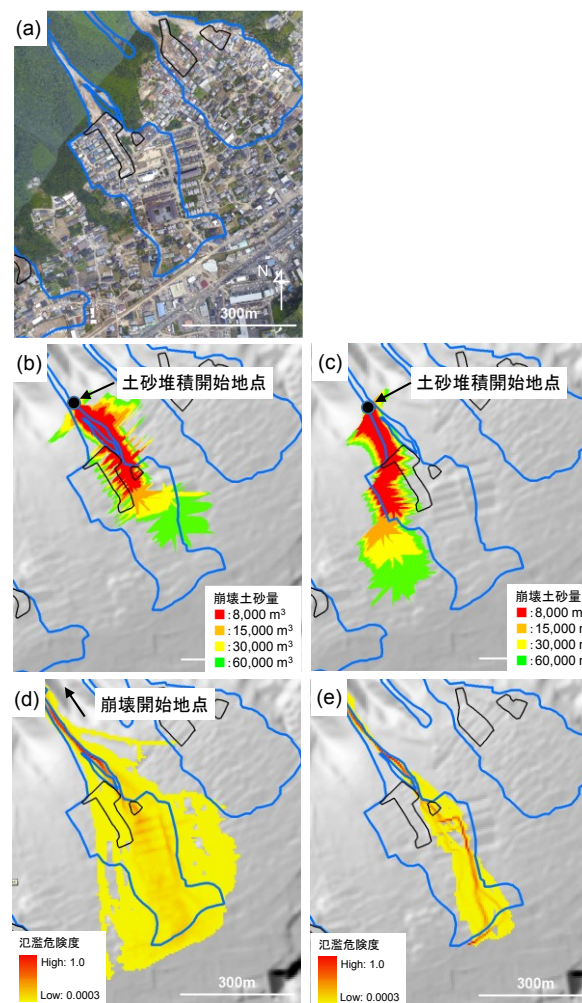


図 6 阿武の里団地周辺での計算結果 (a) 災害後航空写真と土石流氾濫域, (b), (c) Laharz による計算結果, (d) Flow-R による条件 A での計算結果, (e) Flow-R による条件 B での計算結果

5. Flow-R による土石流氾濫域の予測

Flow-R によって実際の氾濫域をどの程度抽出できるのかを調べるために、図 1 中の破線枠で示す八木・緑井地区を対象として、2014 年災害時の崩壊開始点を与え、条件 A による氾濫域を計算した結果を図 7 に示す。図 7(a) は地理院地図と氾濫域、(b) は計算結果と氾濫域を表している。図は被害の大きかった地域を拡大したものを示している。また、実際の氾濫域と比較した場合の抽出精度を表 3 に示す。表中には、実際の氾濫域および非氾濫域をどの程度抽出できたかを表すプロデューサ精度（抽出率）、推定した氾濫域および非氾濫域がどの程度実際と対応しているかを表すユーザ精度（正答率）および総合精度も併せて示している。なお、Flow-R による計算では、

土砂量を考慮しておらず、想定される最大の氾濫域を推定しているため、計算では実際の氾濫域よりも広い範囲が氾濫域として抽出され、安全側の評価となる。このため、氾濫域のユーザ精度は低くなる。しかし、表 3 をみると、氾濫域のユーザ精度以外の精度は全体的に高く、特に氾濫域のプロデューサ精度は約 85% と高かった。なお、一般に氾濫域に比べて非氾濫域の面積の方が大きいため、総合精度は非氾濫域のプロデューサ精度・ユーザ精度に大きく左右される。本研究では、主に氾濫域のプロデューサ精度とユーザ精度について議論することとし、それ以外の精度については参考のために示すものとする。図 7 に示すように、氾濫域の末端部ではやや過小評価となる地域がみられるが、建物被害をもたらすような主要な氾濫域は抽出できていることがわかる。このこ

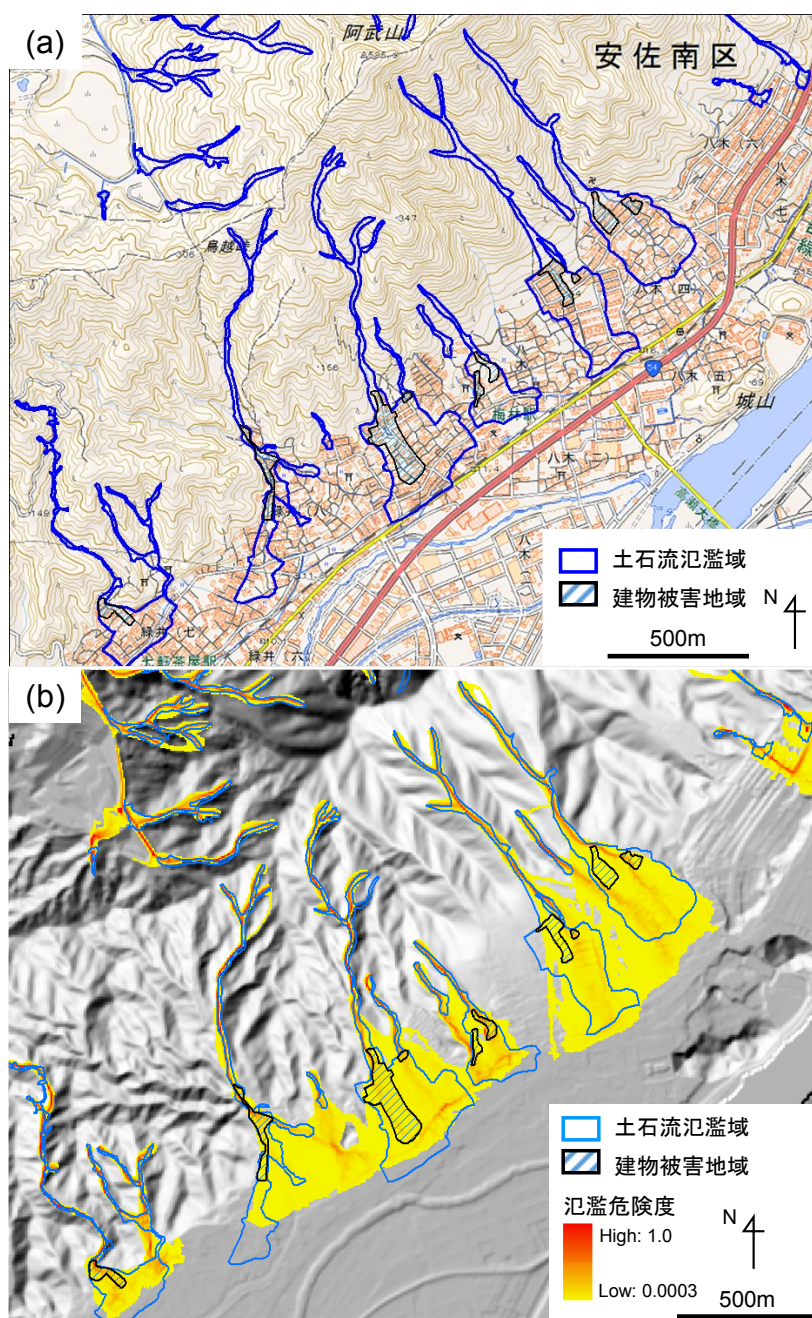


図 7 (a) 八木・緑井地区における地理院地図と土石流氾濫域
(b) Flow-R による土石流氾濫域の評価結果

表 3 八木・緑井地区における氾濫域の抽出精度
(2014 年災害時の崩壊開始点を与えた場合)

		実際の氾濫域(ピクセル数)			ユーザ精度(%) (正答率)
		氾濫域	非氾濫域	計	
Flow-Rによる 評価結果 (ピクセル数)	氾濫域	27,517	45,321	72,838	37.8
	非氾濫域	5,876	224,023	229,899	97.4
	計	33,393	269,344	302,737	-
プロデューサ精度(%) (抽出率)		82.4	83.2	-	総合精度(%) 83.1

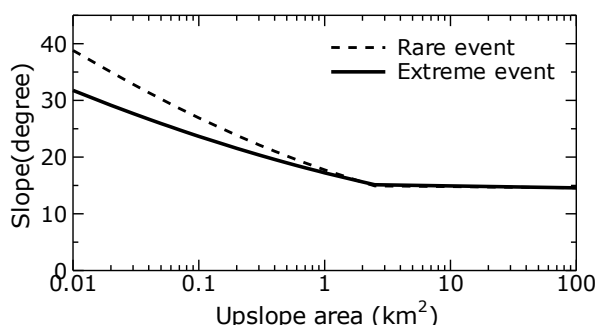


図 8 土石流発生源の推定のための斜面勾配と
上流累積流量の閾値

とは、土石流の発生源を特定できれば、高い精度で氾濫域を予測できることを示している。

ここで、広域での土石流発生危険箇所を事前に把握しておくには、上述までの検討のように実際の事例から土石流の崩壊開始点を与える場合だけでなく、発生源が未知な状態における土石流氾濫域の評価を行い、実際の氾濫域や指定されている警戒区域と比較することが重要である。Flow-R では、ユーザの指定する地質図や土地利用図などの地図データおよびDEMによる地形情報を基に発生源を与えることができる。特に、DEMによる地形情報として、各ピクセルの斜面勾配(度)と上流累積流量(m^2)の値が閾値以上となるピクセルを土石流の発生源として推定する方法が提案されている。ここで用いる閾値には、まれに発生する土石流(Rare event)とごくまれに発生する土石流(Extreme event)の2通りが想定されており、それぞれの閾値は以下の通り設定される。

$$\begin{cases} \tan \beta_{\text{thres}} = 0.32 S_{\text{uca}}^{-0.2} & \text{if } S_{\text{uca}} < 2.5 \text{ km}^2 \\ \tan \beta_{\text{thres}} = 0.26 & \text{if } S_{\text{uca}} \geq 2.5 \text{ km}^2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tan \beta_{\text{thres}} = 0.31 S_{\text{uca}}^{-0.15} & \text{if } S_{\text{uca}} < 2.5 \text{ km}^2 \\ \tan \beta_{\text{thres}} = 0.26 & \text{if } S_{\text{uca}} \geq 2.5 \text{ km}^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中の β_{thres} は各ピクセルの斜面勾配、 S_{uca} は上流累積流量を表す。また、これらの式を図示したものを図 8 に示す。図中の実線ないし破線よりも大きな値をもつピクセル、つまり水が集まりやすく勾配の大きなピクセルを土石流の発生源として与える。Extreme event の閾値の方が小さく、より多くの発生源を与えるモデルとなっている。両モデルによる閾値で試算したところ、2014 年に発生した 174 箇所の土石流のうち、Rare event の閾値では 132 箇所、Extreme event の閾値では 154 箇所の土石流の発生源を抽出できた。抽出できなかった土石流はいずれも規模の小さいものであったが、なるべく漏れの少ない推定を行うために、本検討では Extreme event の閾値を用いて発生源を与えることとした。なお、各ピクセルの斜面勾配

表 4 八木・緑井地区における氾濫域の抽出精度
(式 8 により発生源を推定した場合)

		実際の氾濫域(ピクセル数)			ユーザ精度(%) (正答率)
		氾濫域	非氾濫域	計	
Flow-Rによる 評価結果 (ピクセル数)	氾濫域	23,745	69,403	93,148	25.5
	非氾濫域	4,387	149,935	154,322	97.2
	計	28,132	219,338	247,470	-
プロデューサ精度(%) (抽出率)		84.4	68.4	-	総合精度(%) 70.2

表 5 対象地域全域における氾濫域の抽出精度
(式 8 により発生源を推定した場合)

		実際の氾濫域(ピクセル数)			ユーザ精度(%) (正答率)
		氾濫域	非氾濫域	計	
Flow-Rによる 評価結果 (ピクセル数)	氾濫域	38,108	113,485	151,593	25.1
	非氾濫域	13,500	280,155	293,655	95.4
	計	51,608	393,640	445,248	-
プロデューサ精度(%) (抽出率)		73.8	71.2	-	総合精度(%) 71.5

と上流累積流量は、それぞれ ArcGIS の Spatial Analyst ツールによる Slope と Flow Accumulation 計算機能から算出した。

図 1 に示す対象地域全域における計算結果を図 9 に示す。2014 年での土石流氾濫域も併せて示している。本解析により主要な土石流氾濫域は抽出されていることが確認できる。八木・緑井地区の範囲を対象とした場合の、2014 年の氾濫域に対する抽出精度を表 4 に示す。実際の崩壊開始点を与えた場合の結果を表 3 と比較すると、本解析による結果では、実際よりも多くの箇所で土石流が氾濫するものと推定されるため、氾濫域のユーザ精度は低下し、過抽出の傾向がみられる。ただし、氾濫域のプロデューサ精度については約 84%と実際の崩壊開始点を与えた場合とほぼ同等の精度で抽出できていることがわかる。また、対象地域全域における 2014 年の氾濫域に対する抽出精度を表 5 に示す。北東部の可部地区におけるいくつかの小規模な土石流を推定することができなかったこともあり、実際の氾濫域に対するプロデューサ精度は約 74%とやや低下したが、全体としては比較的高い精度で氾濫域を抽出できることがわかった。また、図 9 をみると、実際の土石流氾濫箇所以外の地域でも多くの範囲が危険度の高い地域として抽出されており、被災地と同程度の氾濫しやすさをもつ地形が広範囲に広がっていることがわかる。

図 9 中の青枠は、県による基礎調査によって指定された土石流に対する警戒区域^{2,3)}を表す。本解析では土砂災害警戒区域よりも多くの地域が危険箇所として抽出されており、やや過抽出の傾向がみられるが、指定されている箇所の概ねカバーしていることがわかる。八木・緑井地区における抽出された氾濫危険度の分布と土砂災害警戒区域の比較を図 10 に示す。図からわかるように、八木・緑井地区においては指定された警戒区域のほぼ全域を本解析により抽出できていることが確認できる。表 4、5 との比較のため、八木・緑井地区の警戒区域に対する抽出精度を表 6 に、対象地域全域の警戒区域に対する抽出精度を表 7 にそれぞれ示す。なお、図 10 に示すように警戒区域は土砂が堆積する下流側のみ指定されており、崩壊が発生する上流側は指定されていないため、本分析では発生源周辺の上流側が非警戒区域として判別されてしまうこととなる。このため、ここでは警戒区域に対するプロデューサ精度のみ議論することとする。表 6 に示すように、八木・緑井地区の警戒区域については約 84%

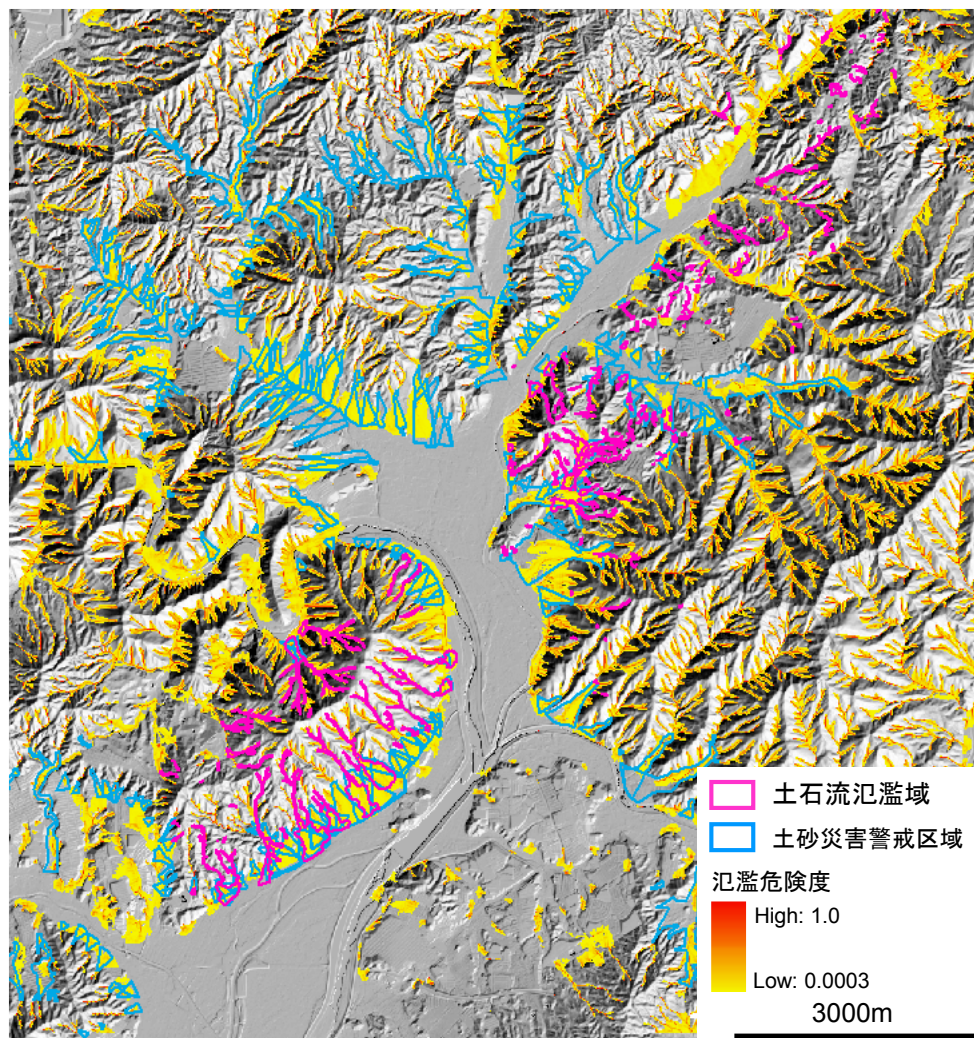


図9 対象地域全域における土石流氾濫危険度の評価結果

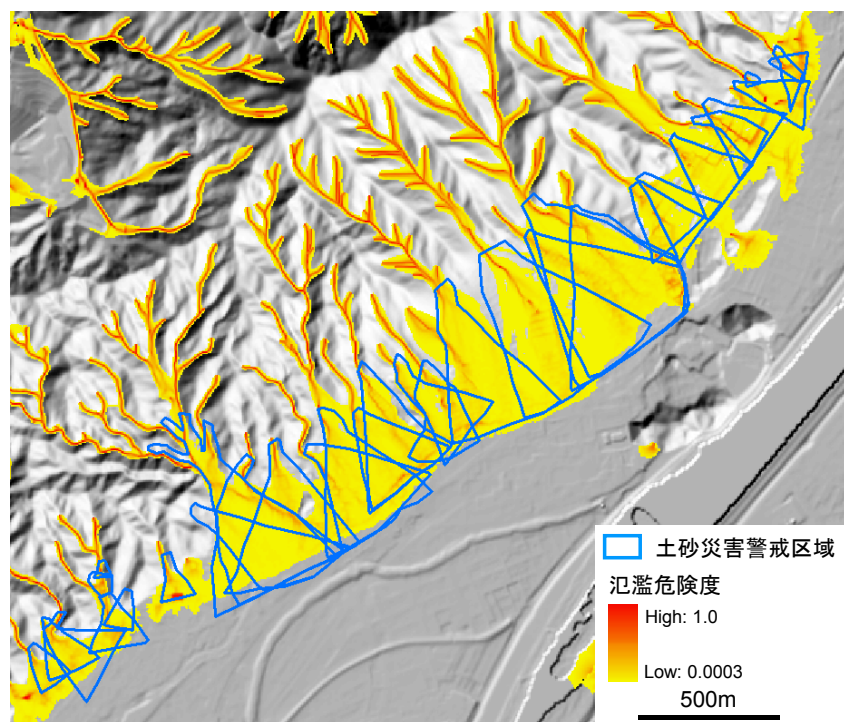


図10 八木・緑井地区における土石流氾濫危険度の評価結果と土砂災害警戒区域の比較

表 6 八木・緑井地区における警戒区域の抽出精度
(式 8 により発生源を推定した場合)

		県による基礎調査結果			ユーザ精度(%) (正答率)
		警戒区域	非警戒区域	計	
Flow-Rによる 評価結果 (ピクセル数)	氾濫域	49,214	34,814	84,028	58.6
	非氾濫域	9,534	141,263	150,797	93.7
	計	58,748	176,077	234,825	-
プロデューサ精度(%) (抽出率)		83.8	80.2	-	総合精度(%) 81.1

表 7 対象地域全域における警戒区域の抽出精度
(式 8 により発生源を推定した場合)

		県による基礎調査結果			ユーザ精度(%) (正答率)
		警戒区域	非警戒区域	計	
Flow-Rによる 評価結果 (ピクセル数)	氾濫域	225,942	175,892	401,834	56.2
	非氾濫域	140,801	771,423	912,224	84.6
	計	366,743	947,315	1,314,058	-
プロデューサ精度(%) (抽出率)		61.6	81.4	-	総合精度(%) 75.9

を抽出できている。ただし、表 7 に示すように、全域を対象とした場合、警戒区域のプロデューサ精度は 60%強に低下した。これは、北東部の可部地区では、八木・緑井地区に比べて下流側の傾斜の緩やかな地域まで広く警戒区域として指定されている箇所が多く、これらの範囲が抽出されずに過小評価となったためである。警戒区域は地形的特徴だけでなく、地質や土地利用状況なども考慮して指定されることが、傾斜が緩やかな地域まで警戒区域として指定された一因と考えられる。

本検討では地形的要因のみから土石流の発生源を推定したが、地質や土地利用など地形以外の要因も大きいものと予想される。今後は発生源の特徴やその要因についても分析を進めることが必要と考えられる。

6. 結論

本研究では、2014 年広島市土石流災害での被災地周辺における災害前 DEM を用いて、経験的な土石流氾濫域の予測手法を適用し、実際の氾濫域との比較から手法の都市域に対する適用性を検討した。解析には、土砂量と氾濫面積の関係式を用いる Laharz と崩壊地点から末端までの土砂の流れを計算する Flow-R を用いた。各土石流の解析開始地点を与えて氾濫域を求めた結果、Laharz については、比較的単純な谷地形における土石流に対しては実際の氾濫域と近い範囲が求められたが、土石流の分岐が発生し、多方向への土砂の流出が発生した箇所については、開始地点のわずかな違いや地形の変化によって推定結果が大きく変化し、実際の氾濫域とはやや異なる結果となることがあることがわかった。一方で、Flow-R による解析では、多方向への土砂の流出を計算するために、広範囲への土砂の流出を計算するパラメータを用いることにより実際の氾濫域の 80%強の範囲を正しく再現することがわかった。さらに、Flow-R を用いて、事前に得られた崩壊地点を与えることなく、DEM の地形情報のみから崩壊地点を予測し、それに基づき土石流氾濫域の推定を行ったところ、実際の氾濫域の 70~80%強の範囲を正しく抽出できることを示した。また、推定された範囲を県が調査した土砂災害警戒区域の範囲と比較したところ、八木・緑井地区については警戒区域の 80%強の範囲を、対象地域全体では 60%強の範囲を抽出できることを示した。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 27 年度 国土交通白書，<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h27/index.html> (2016 年更新，2017 年 7 月閲覧)。
- 2) 広島県：土砂災害防止法に基づく基礎調査結果の公表，<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/100/kisotyoua-kouhyou.html> (2017 年 3 月更新，2017 年 7 月閲覧)。
- 3) 広島県防災 Web：土砂災害ポータルひろしま，<http://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/Top.aspx> (2017 年 3 月更新，2017 年 7 月閲覧)。
- 4) 山越伸浩：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，359, 19-31, 2014。
- 5) 広島県：土砂災害危険箇所一覧表，<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/100/kikenkasyo.html> (2011 年 12 月更新，2017 年 7 月閲覧)。
- 6) ハザードラボ：土砂災害警戒区域 65 万カ所に増加 実地調査の遅れ目立つ，<http://www.hazardlab.jp/know/topics/detail/9/6/9684.html> (2015 年 4 月更新，2017 年 7 月閲覧)。
- 7) 三浦弘之，翠川三郎，井上聡史：高解像度数値標高モデルを用いた都市域での急傾斜地崩壊危険箇所の抽出手法，地域安全学会論文集，7, 299-306, 2005。
- 8) 川崎昭如，佐土原聡：急傾斜地とその被災危険区域の抽出手法についての考察 レーザープロファイラ・データと DEM の空間解析と崩壊履歴の活用可能性，地域安全学会論文集，8, 15-22, 2006。
- 9) O'Brien, J. D.: *FLO-2D User's manual, Version 2007*, FLO Engineering, 2007。
- 10) Wang, C., Li, S. and Esaki, T.: GIS-based two-dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 47-58, 2008。
- 11) 中谷加奈，里深好文，水山高久：GUI を実装した土石流一次元シミュレータ開発，砂防学会誌，61 (2), 41-46, 2008。
- 12) 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，64 (6), 25-31, 2012。
- 13) Griswold, J. P. and Iverson, R. M.: *Mobility statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches (Ver. 1.1, April 2014)*, U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5267, 59p, 2008。
- 14) Schilling, S. P.: *Laharz-py: GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones*, U. S. Geological Survey Open-File Report 2014-1073, 78p, 2014。
- 15) Horton, P., Jaboyedoff, M., and Bardou, E.: Debris flow susceptibility mapping at a regional scale, *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards*, 339-406, 2008。
- 16) Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. and Zimmermann, M.: Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 869-885, 2013。
- 17) Oramas Dorta, D., Toyos, G., Oppenheimer, C., Parechi, M. T., Sulpizio, R., Zanchetta, G.: Empirical modelling of the May 1998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ, *Natural Hazards*, 40, 381-396, 2007。
- 18) Magirl, C. S., Griffiths, P. G., and Webb, R. H.: Analyzing debris flows with the statistically calibrated empirical model LAHARZ in southeastern Arizona, USA, *Geomorphology*, 119, 111-124, 2010。
- 19) Kappes, M. S., Gruber, K., Frigerio, S., Bell, R., Keiler, M., and

- Glade, T.: Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 627-641, 2011.
- 20) Blais-Stevens, A. and Behnia, P.: Debris flow susceptibility mapping using a qualitative heuristic method and Flow-R along the Yukon Alaska Highway Corridor, Canada, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 449-462, 2016.
- 21) 三浦弘之, 弓真由子: 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, 27, 283-291, 2015.
- 22) 国土地理院: 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, (2017年3月更新, 2017年7月閲覧).
- 23) Wang, F., Wu, Y-H., Yang, H., Tanida, Y. and Kamei, A.: Preliminary investigation of the 20 August 2014 debris flows triggered by a severe rainstorm in Hiroshima City, Japan, *Geoenvironmental Disasters*, 2, doi:10.1186/s40677-015-0025-6, 2015.
- 24) 中谷加奈, 小杉恵, 長谷川祐治, 里深好文, 水山高久: 家屋が存在する扇状地における土石流の挙動に関する実験的検討, 砂防学会誌, 67 (6), 22-32, 2015.
- 25) 鈴木拓郎: 土石流に及ぼす樹木の影響に関する数値実験, 第127回日本森林学会大会, 120, 2016.
- 26) 国土地理院: 平成 26 年(2014 年)8 月豪雨による被害状況に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h26-0816heavyrain-index.html>, (2014 年 9 月更新, 2017 年 7 月閲覧).
- 27) U. S. Geological Survey: <https://pubs.usgs.gov/of/2014/1073/> (2014 年 4 月更新, 2017 年 7 月閲覧) .
- 28) Flow-R: Flow path assessment of gravitational hazards at a regional scale, <http://www.flow-r.org/> (2015 年 4 月更新, 2017 年 7 月閲覧) .
- 29) 土木学会, 地盤工学会: 平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団・調査報告書, 296p, 2014.

(原稿受付 2017.5.20)

(登載決定 2017.9.9)