

2014年8月に広島で発生した土石流の流動・氾濫特性

Flow and Inundation Characteristics of Debris Flow Occurred in Hiroshima City on August 2014

竹林洋史・藤田正治・江頭進治⁽¹⁾

Hiroshi TAKEBAYASHI, Masaharu FUJITA and Shinji EGASHIRA⁽¹⁾

(1) 水災害・リスクマネジメント国際センター

(1) International Centre for Water Hazard and Risk Management

Synopsis

Debris flows were occurred in Yagi 3 Chome, Asaminami, Hiroshima on 20 August 2014. The geology around Asaminami area is granite which has many joints and is easy to be weathered. Hence, the permeability of the seepage is high and fine sediment is easy to be produced. In this study, the horizontal two dimensional debris flow model considering the both the laminar and the turbulence flows is developed. Subsequently, the model is applied to the debris flow occurred in Yagi 3 Chome, Asaminami, Hiroshima and discussed the applicability of the model. The differences of the horizontal inundation areas in the residential area between the simulated results and the field data are discussed and it was found that the horizontal distribution of the sediment deposition of the coarse material is reproduced well. When the houses are considered in the analysis, sediment deposited in the upstream region of the houses and the inundation area is reduced.

キーワード: 土石流, 土砂災害, 数値解析, 広島, 氾濫

Keywords: debris flow, sediment disaster, numerical analysis, Hiroshima, inundation

1. はじめに

2014年8月19日から20日早朝にかけて、広島市上空に線状降雨帯が形成され、局所的な短時間豪雨が発生した。豪雨が発生した地域の地質の多くは、風化しやすい花崗岩で構成されている。また、地盤勾配が非常に急であるとともに、斜面下部に多くの宅地が存在している。そのため、斜面崩壊に起因した土石流が発生し、宅地が土石流によって被災して多くの人命が失われた。

本研究では、広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流について、現地調査を実施するとともに、平面二次元数値シミュレーションを実施することによって土石流の流動特性を検討した。

2. 広島市安佐南区八木三丁目

Fig. 1 に被災後の広島市安佐南区八木三丁目の様子を示す。図に示すように、本川で3箇所、支川は途中で2つに分岐して、各支川で1箇所ずつ斜面崩壊が発生したものと推察される。また、河道内には岩が露出し、河床勾配が非常に急な領域があり、これらの領域からも斜面崩壊や表面浸食に起因した土石流が発生した可能性も考えられる。対象斜面の下の方には、広島花崗岩と呼ばれる風化しやすい岩と花崗岩が風化した真砂土が分布している。斜面の上の方には、変成作用を受けて堅くなった岩も分布しているが、現地を見る限り、そのような場所にも多

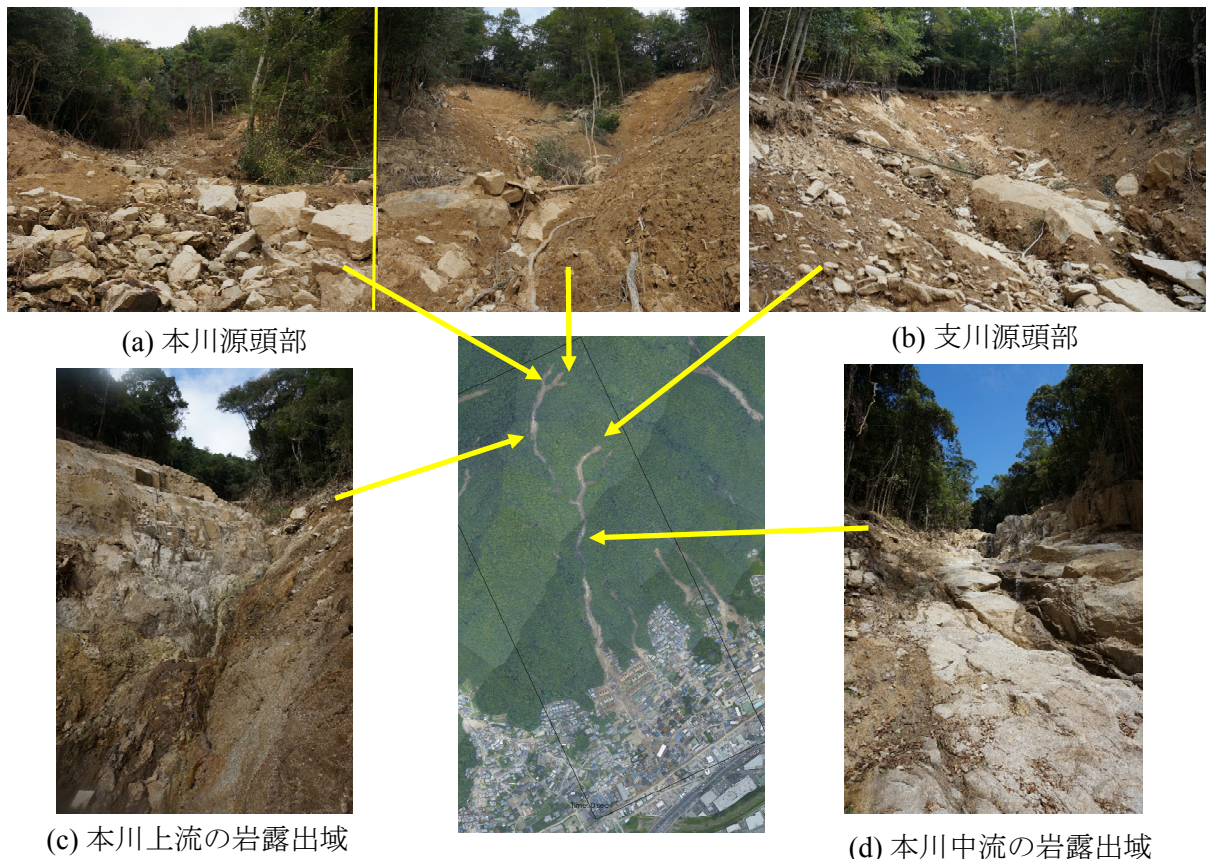


Fig.1 Landslide and exposed base rock in Yagi 3 Chome, Asaminami, Hiroshima

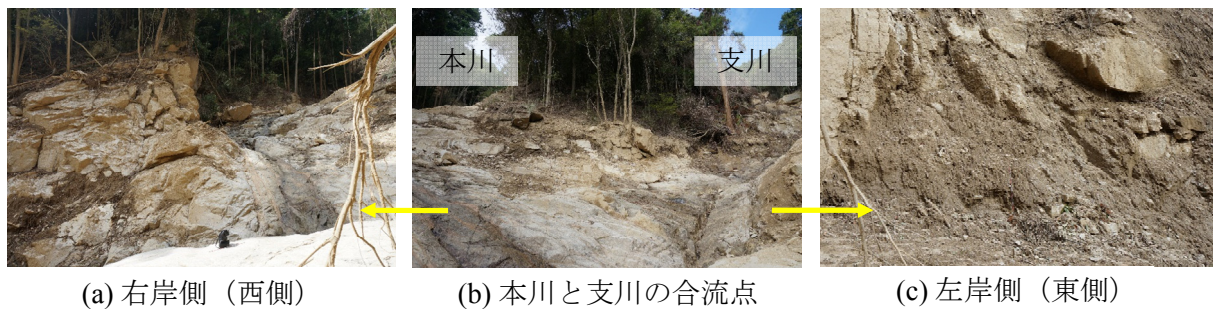


Fig. 2 Confluence between main channel and tributary



Fig. 3 Confluence between tributaries

くの真砂土が存在していた。広島花崗岩は風化しやすいため、土石流の流動によって浸食されやすく、節理も多く入っており、岩の中では比較的透水性が



Fig. 4 Residential area (taken by Luce Search)

高い。そのため、不安定土砂に加えて、土石流の通過によって花崗岩や変成岩が破壊されて土石流に取り込まれ、土石流の規模をさらに大きくしたと考え

られる。

Fig. 2 に本川と支川の合流部の被災後の様子を示す。合流点直下流の右岸（西側）は基岩が露出しており、支川からの土石流によって河岸が浸食されたことがわかる。一方、合流点直下流の左岸（東側）は、本川からの土石移流の浸食を受けたと思われるが、斜面の表面に土砂が堆積していることがわかる。河道湾曲部では外岸が浸食され、内岸には土砂が堆積することを考えると、最後の土石流は支川から流出してきたと考えられる。

Fig. 3 に二つの支川の合流部の被災後の様子を示す。西側の支川の土石流の規模の方が、東側の支川の土石流の規模よりかなり大きかった。また、西側の支川の土石流の堆積物が東側の支川の流れによって浸食されているため、西側の土石流が先に発生し、その後に東側の土石流が発生したものと考えられる。

Fig. 4 に 8 月 25 日に撮影された被災後の住宅地の様子を示す。溪流の出口付近の住宅地には、多くの木造家屋と鉄筋コンクリート製の県営住宅が存在していたが、溪流に沿った領域の木造家屋の多くが流出していた。一方、県営住宅の一部には土石流が衝突しているが、建物の形状が変形するような損傷は受けていなかった。しかし、土石流は窓ガラスを割って室内にも流れ込んだため、県営住宅の居住者も被災した。土石流は横断的にはあまり広がらず、道路にや建物と建物の間に沿って斜面下方に比較的直線的に流下したようである。

3. 土石流の数値シミュレーションの概要

3.1 基礎方程式

安佐南区八木三丁目で発生した土石流の流動特性を明らかにするために、土石流の平面二次元解析を行った。解析に用いた基礎方程式を以下に示す。

水及び土砂の混合物の質量保存則（江頭・伊藤, 2004）は以下のものである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 h は泥流の流動深である。 u と v は x と y 方向における速度成分、 c_* は静止堆積層の砂礫の堆積濃度、 E は河床の浸食速度であり、以下の江頭らの式（江頭・伊藤, 2004）を用いる。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (2)$$

ここに、 θ は流動方向の河床勾配であり、以下の関係がある。

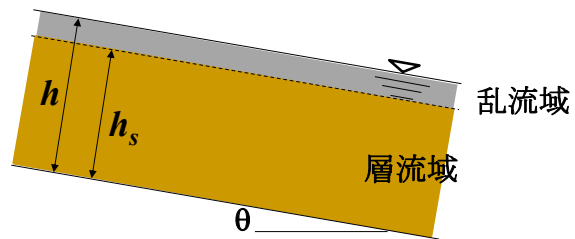


Fig. 5 Two layers model

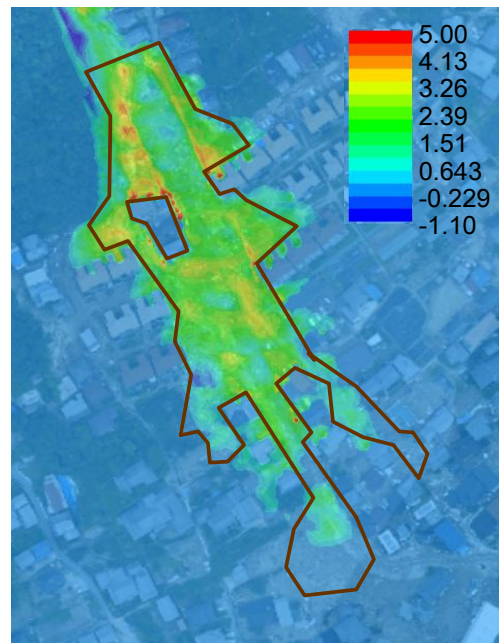


Fig. 6 Horizontal distributions of bed deformation obtained by numerical analysis (color contour) and the coarse sediment observed in the residential area (brown line).

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3)$$

ここに、 θ_x は x 方向の河床勾配、 θ_y は y 方向の河床勾配である。 θ_e は水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度 $\bar{c}$ に関する流動方向の平衡河床勾配であり、Fig. 5 のように、水と土砂の混合物に対して河床近傍に層流域、その上に乱流域を有する二層流を考え、 $\bar{c}$ を一定とすると、以下の関係が得られる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (4)$$

ここに、 ϕ_s は土砂の内部摩擦角である。流体中の土砂の質量保存則（江頭・伊藤, 2004）は以下のようである。

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}hU}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}hV}{\partial y} = E \quad (5)$$

運動量保存則（江頭・伊藤, 2004）は以下のようである。

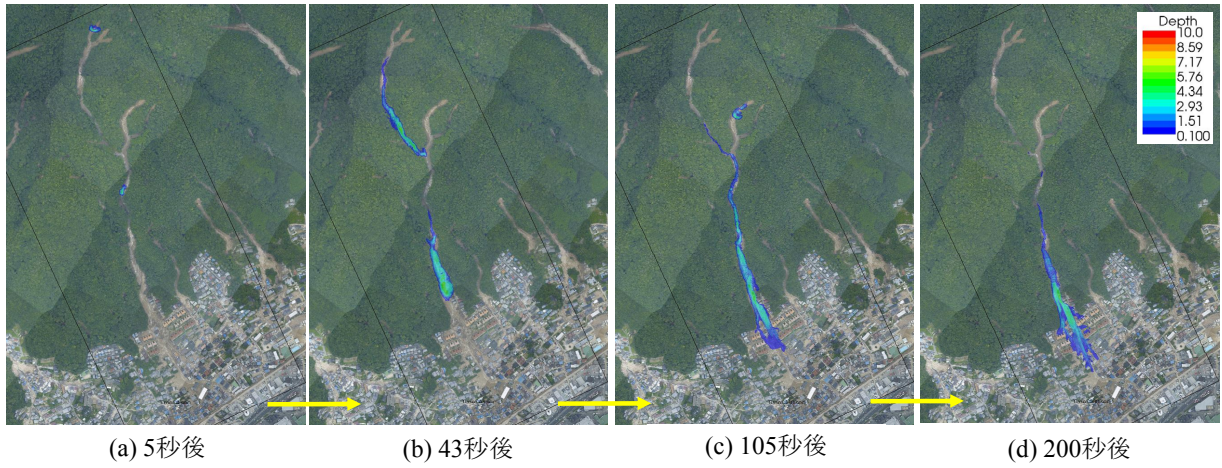


Fig. 7 Spatiotemporal change of flow depth

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_s} \quad (13)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (7)$$

ここに、 g は重力、 z_b は河床位である。 P は圧力であり、静水圧近似を用いる。

ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho \quad (8)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 σ は土砂の密度である。 τ_{bx} と τ_{by} は x と y 方向における掃流力成分であり、乱流域が卓越していると考えると以下のようなのである。

$$\tau_{bx} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (10)$$

τ_y は降伏応力であり、本泥流解析では以下の関係を用いる。

$$\tau_y = \left(\frac{\bar{c}}{c_s} \right)^{\frac{1}{n}} (\sigma - \rho) \bar{c} g h_s \cos \theta \tan \phi_s \quad (11)$$

f_b は抵抗係数であり、本泥流解析では以下の関係を用いる。

$$f_b = \frac{4}{25} \left\{ k_f \frac{(1 - \bar{c})^{\frac{1}{3}}}{\bar{c}^{\frac{1}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) \bar{c}^{\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} + 9\alpha^2 \left(1 - \frac{h_s}{h} \right) \quad (12)$$

k_f , k_d , α は係数であり、 $k_d = 0.0828$, $k_f = 0.16$, $\alpha = 0.37$ である。 e は粒子間の反発係数である。河床位方程式 (江頭・伊藤, 2004) は以下のようなのである。

3.2 解析条件

土石流は、斜面崩壊を発端として発生するものとした。斜面崩壊の場所は、本川中流部、本川源頭部、支川源頭部の3箇所を想定し、各1回ずつ崩壊が発生するとした。崩壊の発生時刻は不明であるが、現地調査の結果から支川からの土石流が本川の土石流よりも後に発生している可能性が高い。そのため、本川中流部と本川源頭部で斜面崩壊は同時刻に発生するとし、本川上流からの土石流が本川と支川の合流点を通過した時刻に支川上流端の崩壊が発生するとした。崩壊の大きさは、現地の調査の結果を参考にし、数種類を検討したが、宅地に流入する土石流の特性にはほとんど影響を与えなかった。これは、斜面崩壊による流出土砂量よりも流下しながら河床や河岸から土石流に取り込まれる土砂量の方がかなり多いためである。また、家屋を考慮した解析と家屋を無視した解析を行った。家屋は被災後に残存したもののみを考慮し、全壊したものは考慮していない。家屋は、不透過で非越流の構造物として扱った。

解析に用いた地形データは、国土交通省による平成21年度1mDEMデータ (被災前の地形データ) を用いた。解析格子は、家屋の形状をある程度表現するため、2m×2mの正方形格子とした。

4. 結果と考察

Fig. 6に解析後の地盤高さの変化量の平面分布と被災後の写真や映像から得られた粒径の大きい岩石の平面分布を示す。図に示すように、解析結果は、粒径の大きい岩石の平面分布とほぼ一致していることがわかる。これは、本解析が土石流の発生・流動・堆積過程に関する数値シミュレーションであり、土

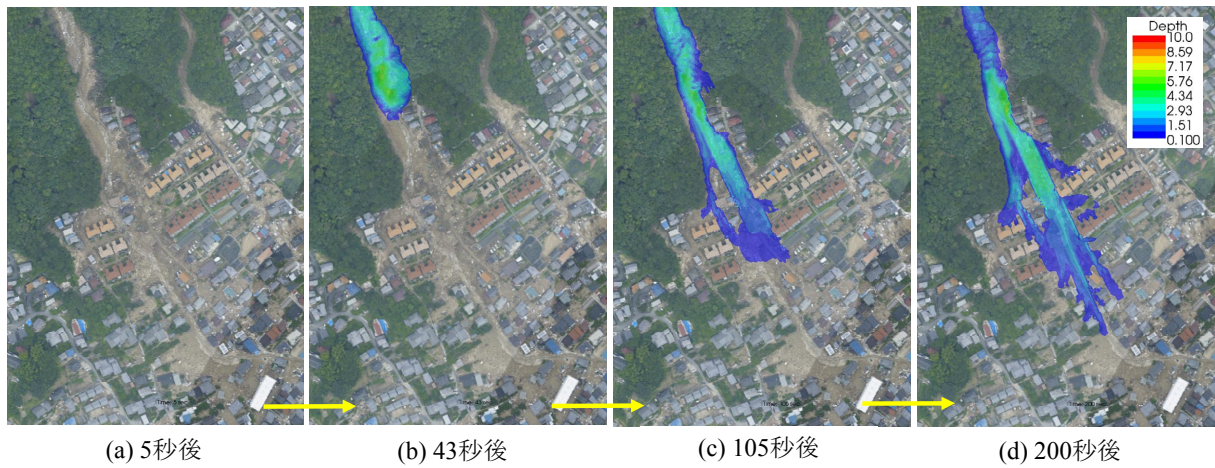


Fig. 8 Spatiotemporal change of flow depth in the residential area

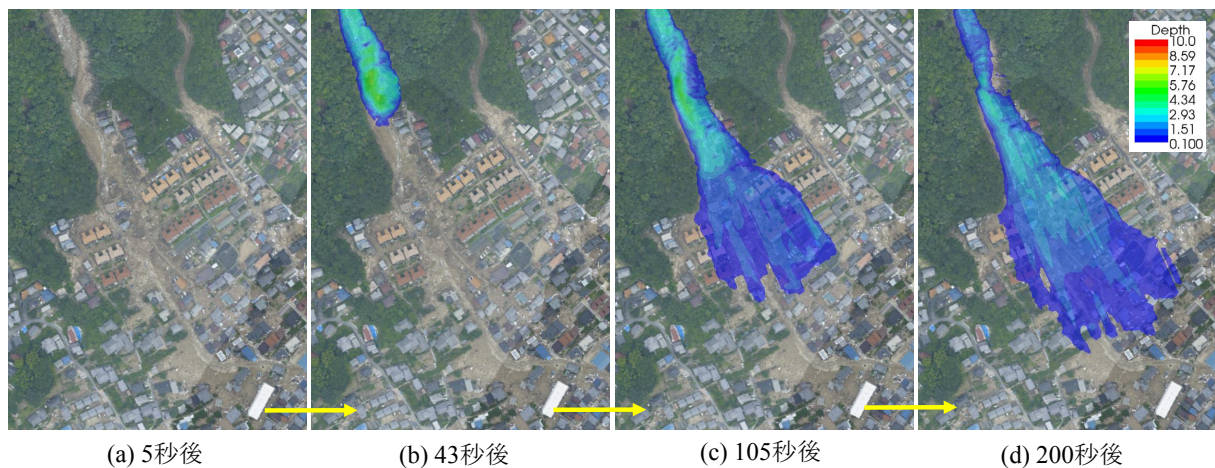


Fig. 9 Spatiotemporal change of flow depth in the residential area without houses

土石流による土砂が堆積した後に降り続いた豪雨による粒径の細かい土砂の浸食を対象としていないためである。本結果より、土石流発生から土石流が宅地に堆積した直後までの現象に対しては、本解析モデルによってある一定レベルで評価が可能である。

Fig. 7に流域全体の土石流の深さの時空間的な変化を示す。土石流発生直後は土石流の規模は非常に小さいが、時間とともに大きくなり、宅地に流れ込んだ時点では非常に大きくなっていることがわかる。中流域で発生した土石流は、43秒で宅地に到達しており、本川源頭部で発生した土石流でも96秒で宅地に到達している。土石流の発生した時刻が午前3時～4時であり、就寝時刻であることと、屋外で高強度の雨が降っていたことを考え合わせると、土石流発生時点で土石流発生の連絡があったとしても避難所などへの避難は困難であることがわかる。土石流の平均速度は約9m/sであり、宅地に流れ込んだ時点では約8m/sであった。

Fig. 8に住宅地での土石流の深さの時空間的な変化を示す。土石流は家屋の上流域に土砂を堆積させるため、家屋に土石流が衝突しても横に大きく広が

ることはなく、斜面下方に伸びている道路や家屋と家屋の間を比較的直線的に下流に流下していることがわかる。これは、今回の土石流は比較的大きな粒径の岩石が含まれているとともに、地盤の勾配が非常に急な地域に宅地が建設されているためと考えられる。

Fig. 9に家屋を考慮していない場合の住宅地での土石流の深さの時空間的な変化を示す。家屋を考慮しないことにより、土石流は扇形に広く薄く流れていることがわかる。つまり、家屋の存在により土石流から守られた場所もある一方で、土石流の流下経路に周辺は、土石流の深さは深くなり被害も大きくなったと考えられる。

5. 結論

広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流について、現地調査を実施するとともに、平面二次元数値シミュレーションを実施することによって土石流の流動特性を検討した。得られた成果をまとめると以下のようなものである。

- 1) 支川と本川の合流点を見る限り、最後の土石流は支川で発生したと思われる。
- 2) 八木3丁目の土石流に対して、平面二次元の土石流の解析を行った。土石流の到達範囲は、比較的粒径の大きい土砂が堆積した領域と一致する。これは、被災後の豪雨による土石流堆積物の浸食に伴う細粒土砂の氾濫を考慮していないためと考えられる。
- 3) 八木3丁目の土石流の平均速度は9m/s程度であり、住宅地に侵入した時点での速度は8m/sである。
- 4) 本数値解析によると、中腹での斜面崩壊による土石流が宅地に到達するまでの時間は44秒、本川源頭部での斜面崩壊による土石流が宅地に到達するまでの時間は96秒、支川源頭部での斜面崩壊による土石流が宅地に到達するまでの時間は67秒であった。
- 5) 住宅を障害物として考慮した場合としていない場合を比較すると、家屋を考慮すると斜面下方に伸びた道路に土石流が集中し、流動深が深くなる。しかし、家屋の上流域に土砂が堆積するため、下流に流れる土砂の量が減少し、氾濫域の最下流点の位置は宅地を考慮しない場合とあ

まり変わらない。また、宅地を考慮した場合は家屋上流域で土砂が堆積するため、横断方向の氾濫域は狭くなる。

謝 辞

本調査・解析の実施において、国土交通省、広島市消防局、株式会社パスコ、ルーチェサーチ株式会社から資料をご提供頂いた。また、京都大学防災研究所、土木学会水工学委員会、科研費（代表：山本晴彦）からは調査費をサポート頂いた。さらに、広島市の皆様には、被災からの復興にお忙しい中、親切にご対応頂き、被災時の詳細な情報をご提供頂いた。

ここに記して、関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

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，第 12 巻，第 2 号，pp. 33-43.

（論文受理日：2015 年 6 月 25 日）