

1. 不飽和土石流モデルの構築（担当：竹林洋史）

(1) 概要

2016（平成28）年4月14日と16日に九州中部で発生した地震により、熊本を中心とした広い範囲で斜面崩壊が発生した。特に、本震である4月16日の地震によって非常に多くの斜面崩壊が阿蘇地域を中心に発生した。地震発生直後に河道に流入した土砂量は、約100万 m^3 と見積もられており、その内の約半分の50万 m^3 が阿蘇大橋西の斜面崩壊によるものである¹⁾。崩壊した土砂の中には、山王谷川のように、豪雨中に発生した崩壊では無いにも係わらず、流動化して土石流・泥流となり下流域に伝播し、土砂災害を発生させたものもある。しかし、**図1**の2016年4月の南阿蘇の日降水量データが示すように、土砂災害が発生した4月16日はわずかに雨が降っているが、降水量として非常に小さい。また、比較的まとまった雨が降ったのは、9日前の4月7日であり、斜面内に崩土が流動化するに十分な水分が存在していたかどうか不明である。

地震時に崩土が土石流化し、どの程度の規模の土石流となって下流域に被害を与えるかどうかを予測することは、防災上非常に重要である。本研究では、2016（平成28）年4月16日に九州中部で発生した地震により発生した山王谷川の土石流に関する現地調査を実施した。また、地盤の間隙が水に一部だけ満たされている不飽和地盤上に形成される土石流を解析するモデルを構築するとともに、土壌水分特性が土石流の流動特性に与える影響を検討した。

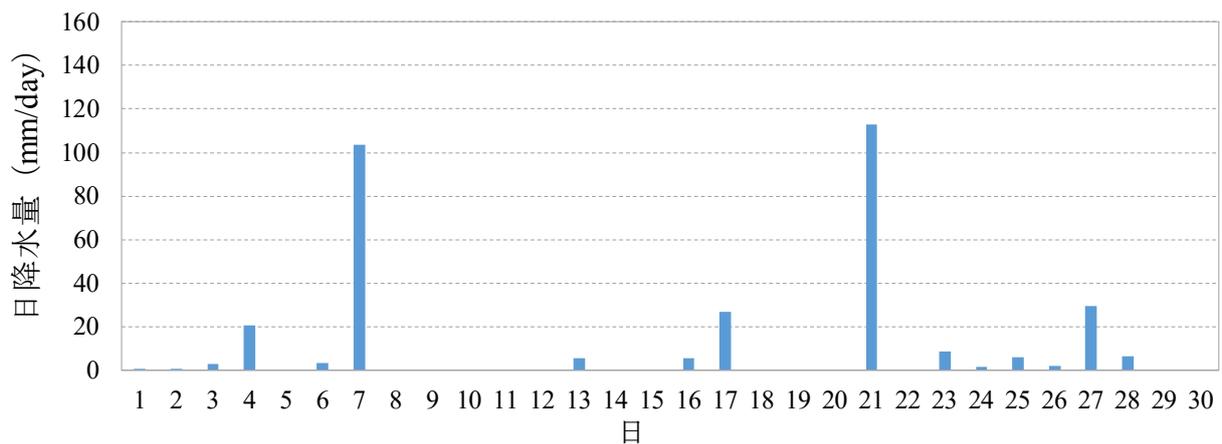


図1 2016年4月の南阿蘇の日降水量（気象庁）



図2 山王谷川流域の位置



図3 黒色の細粒土砂

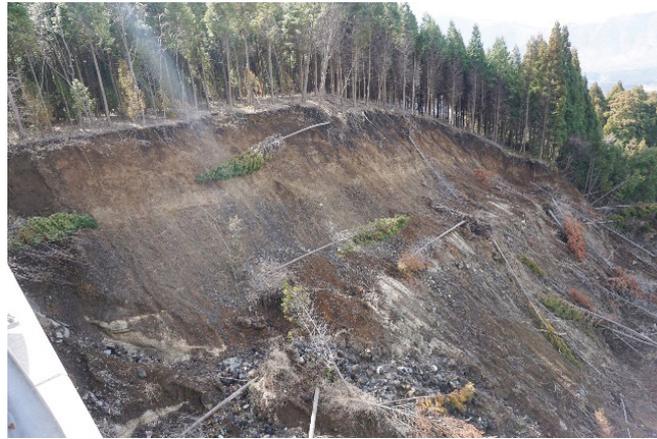


図4 薄い表層の黒色土



図5 被災前（2016年4月15日）の山王谷川流域の様子

(2) 現地調査

a) 山王谷川の概要

山王谷川は、阿蘇カルデラ内の烏帽子岳の西側斜面を西に流れる溪流である（図2）。流域内の表土は図3に示すような黒色の細粒土砂で覆われている。図4に示すように細粒土砂層の厚さは非常に薄く、多くの場所で1mに満たない厚さである。図5にGoogle Earthによる被災前（2016年4月15日）の流域の写真を示す。図2と比べると、地震によって非常に多くの斜面崩壊が発生していることがわかる。これらの斜面崩壊の多くは4月16日の本震時に発生したと考えられ、ほぼ同時刻に急激な土砂が生産され溪流



図6 流域内の砂防ダム



図7 被災した家屋



図8 家屋を破壊した黒色の細粒土

に流れ込んだことが推察される。

本溪流は、以前から土砂の生産が活発だったようであり、図6に示すように、溪流内には多くの砂防ダムが建設されている。

b) 山王谷川の土石流災害の現地調査

4月16日の本震時に発生した斜面崩壊により、下流の宅地まで到達する土石流が発生した。図7は、土砂氾濫域下流端付近の家屋の被災状況である。河道内には、直径数十cm～数mの巨礫が存在するが、河



(a) 2016年6月7日



(b) 2016年4月26日

図9 被災した家屋直上流の橋梁



図10 迂回流による河岸の浸食



図11 被災直後の氾濫域上流部

道から氾濫して家屋に流れ込んだ土砂は、図3に示した地盤表面を薄く覆っている黒色の細粒土砂であった(図8)。図9(a)に図7に示した家屋の直上流に位置する橋梁の被災後の様子を示す。また、図9(b)に被災直後(2016年4月25日)の橋梁の様子を示す。被災直後の写真からわかるように、橋梁には直径2m~3m程度の2つの巨礫が引っかかっており、これらの巨礫によって河道が閉塞され、土砂の氾濫が助長されたことが推定される。図10は、図9の橋梁の左岸側の様子である。土石流も河川流と同様に、橋梁周辺で迂回流として流下し、河岸が浸食されていることがわかる。



図12 河道内に残された巨礫



図13 氾濫域上流端の砂防ダム



図14 破壊された砂防ダム右岸側の袖部

図11は、被災直後（2016年4月20日）の氾濫域上流部である。氾濫した土砂及び河道内の土砂は、黒色の細粒土砂であることがわかる。しかし、図12に示すように、河道内の細粒土砂の下は数十cm～数mの巨礫であることがわかる。

図13は、氾濫域上流端に位置している砂防ダムである。ダム内には、非常に多くの流木が堆積していることがわかる。図4に示すように、表土の崩壊・浸食厚さは非常に薄い、図2に示すように、崩壊・浸食面積が非常に広いため、多くの流木が生産されたと考えられる。本砂防ダムにより、流域からの総流出土砂量（約41,000m³）の半分（約20,000m³）がダム上流域に堆積したとのことである²⁾。また、砂防ダム右岸側の袖部が破壊されており、図14に示すように、下流の左岸側まで流れていた。

(3) 数値シミュレーションの概要

本解析では、水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる。

デカルト座標系と一般座標系との関係は、以下のものである。

$$J = \frac{1}{\begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \end{pmatrix}} \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = J \frac{\partial y}{\partial \eta} \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = -J \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial y} = -J \frac{\partial x}{\partial \eta} \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = J \frac{\partial x}{\partial \xi} \quad (1-5)$$

ここに、 ξ と η は一般座標系における流下方向と横断方向の座標であり、 x と y はデカルト座標系での座標である。

水及び土砂の混合物の質量保存則は地盤の間隙の水による飽和度 S_r の変化を考慮した以下の式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{hV}{J} \right) = \frac{E}{c_* J} \left(1 - (1 - c_*) \left(1 - \frac{S_r}{100} \right) \right) \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 z は水位である。表面流の水深は h である。 U と V は ξ と η 方向における反変速度成分であり、以下のように定義される。

$$U = \frac{\partial \xi}{\partial x} u + \frac{\partial \xi}{\partial y} v \quad (3)$$

$$V = \frac{\partial \eta}{\partial x} u + \frac{\partial \eta}{\partial y} v \quad (4)$$

ここに、 u と v は x と y 方向における流速成分、 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、以下の式³⁾を用いる。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (5)$$

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。

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (6)$$

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、以下の関係がある。

$$\tan \theta_e = \frac{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)^{\bar{c}}}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)^{\bar{c}+1}} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (7)$$

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は以下のものである。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\bar{c}h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\bar{c}hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\bar{c}hV}{J} \right) = \frac{E}{J} \quad (8)$$

運動量保存則は以下のものである。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(U \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(V \frac{hU}{J} \right) \\ & - \frac{hu}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \right) - \frac{hv}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \right) \\ & = -gh \left(\frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial P}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\xi}}{\rho_m J} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(U \frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(V \frac{hV}{J} \right) \\ & - \frac{hu}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \right) - \frac{hv}{J} \left(U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right) \\ & = -gh \left(\frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{1}{J} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial P}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\eta}}{\rho_m J} \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 g は重力、 z_b は河床位である。 P は圧力であり、以下の関係を用いる。

$$P = \int_0^h \rho_m g (h - z) \cos \theta dz \quad (11)$$

ここに、 z は鉛直方向の軸である。 ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho \quad (12)$$

ここに、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度である。 $\tau_{b\xi}$ と $\tau_{b\eta}$ は ξ と η 方向における反変掃流成分であり、以下のように定義される。

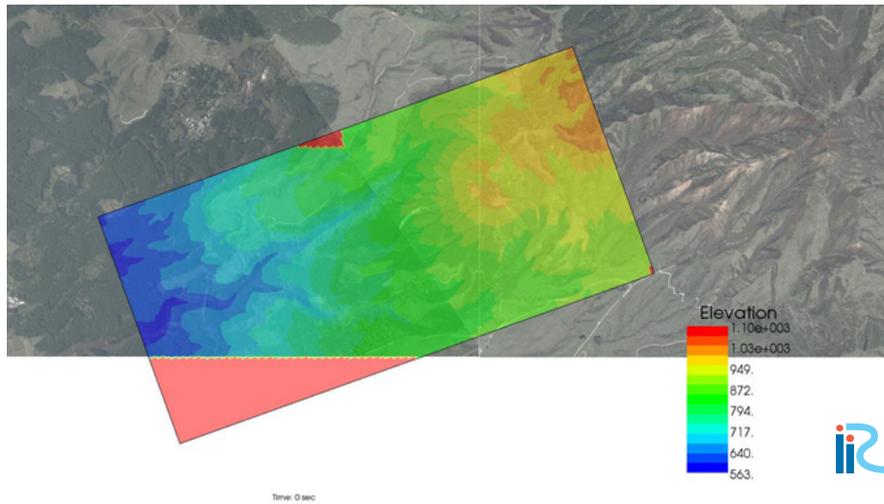


図15 解析に用いた地形データ

$$\tau_{b\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \tau_{by} \quad (13)$$

$$\tau_{b\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \tau_{by} \quad (14)$$

ここに、 τ_{bx} と τ_{by} は x と y 方向におけるの掃流力成分であり、以下のものである。

$$\tau_{bx} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (15)$$

$$\tau_{by} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (16)$$

ここに、 τ_y は降伏応力であり、以下の関係¹⁾を用いる。

$$\tau_y = \left(\frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{\frac{1}{n}} (\sigma - \rho) \bar{c} g h \cos \theta \tan \phi_s \quad (17)$$

ここに、 n は常数であり、ここでは5を用いる。 f_b は抵抗係数であり、土石流の場合の以下の関係を用いる。

$$f_b = 72\alpha^2, \quad \alpha = \frac{\kappa}{6} \quad (\text{乱流域}) \quad (18)$$

$$f_b = \frac{25}{4} \left\{ k_f \frac{(1-\bar{c})^{\frac{5}{3}}}{\bar{c}^{-\frac{2}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) \bar{c}^{-\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad (\text{層流域})^{1)} \quad (19)$$

ここに、 $k_f=0.16$, $k_d=0.0828$, e は粒子の反発係数, d は土砂の平均粒径である。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) = -\frac{E}{c_* J} \quad (20)$$

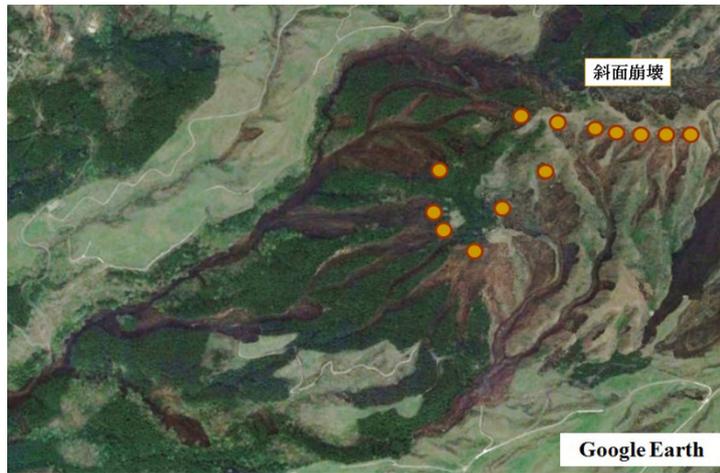


図16 解析で想定した斜面崩壊発生場所

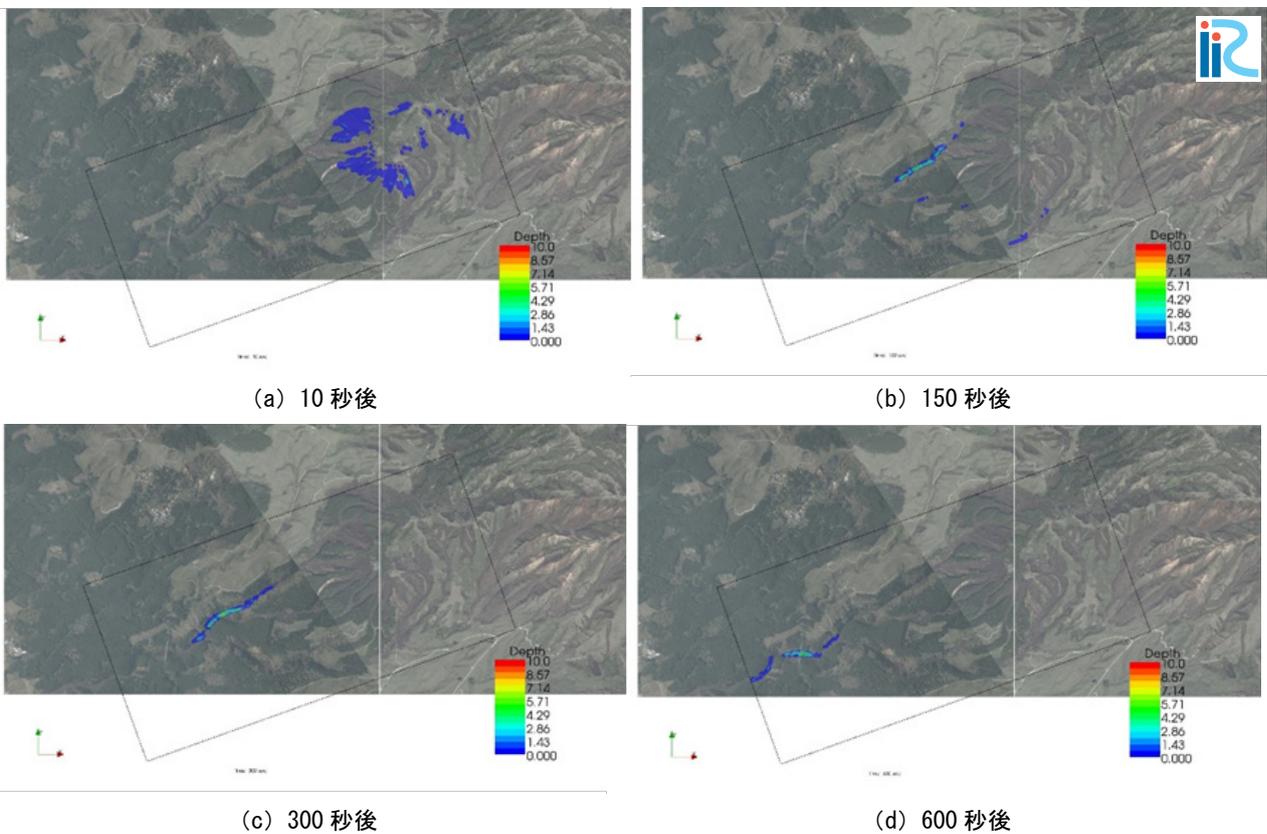
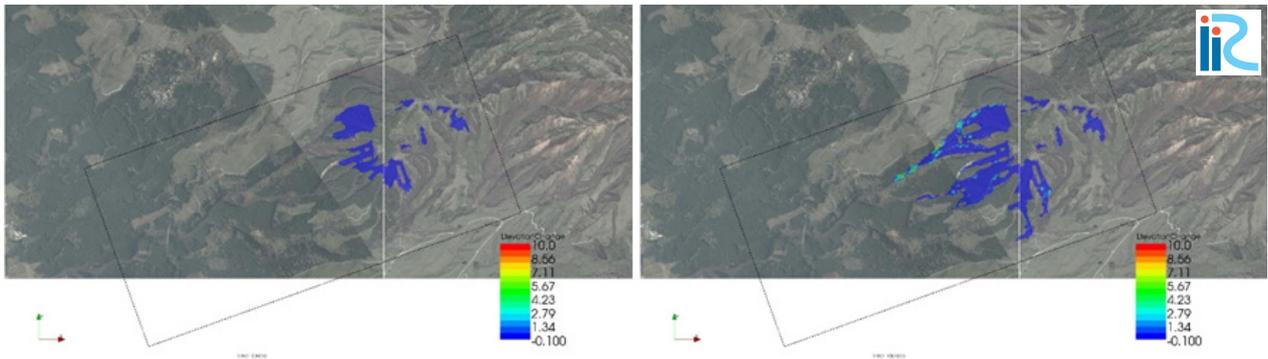


図17 Case1（全ての崩壊が同時に発生，細粒土砂相変化）の流動深

(4) 解析条件

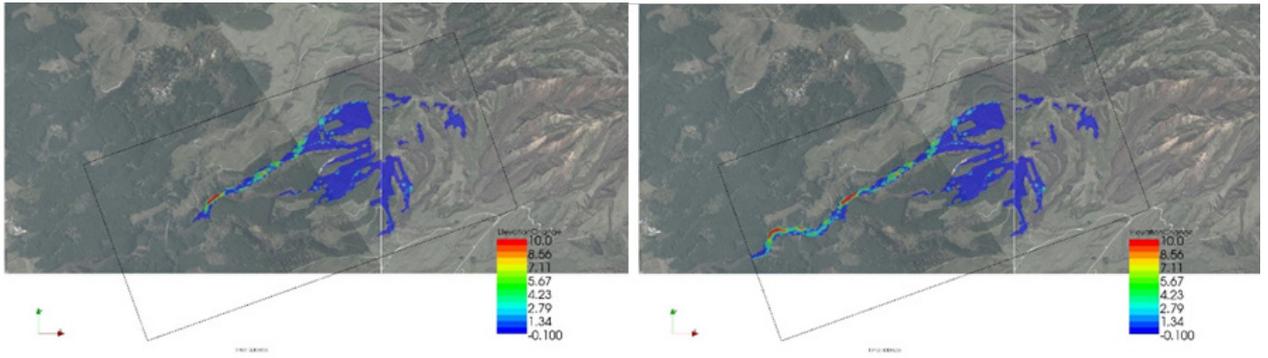
図15に解析に用いた地形データのコンター図を示す．地形データは国土交通省九州地方整備局により，被災前に測定されたものであり，平面的に1mの解像度のDEMデータである．流域が比較的広いため，本解析では10mメッシュを用いた．図16に解析で想定した斜面崩壊発生場所を示す．本解析では細粒土砂の相変化を考慮しているが，比較のため相変化を考慮していない条件でも解析を実施した．Case1では地盤内の間隙は水で飽和しているものとし，細粒土砂の相変化を考慮して解析を行った．

た．Case2では地盤内の間隙は水で飽和している点はCase1と同じであるが，細粒土砂の相変化を無視した．Case3は細粒土砂の相変化は考慮しているが，地盤内の間隙は水で飽和しておらず，飽和度50%の条件で解析を行った．



(a) 10 秒後

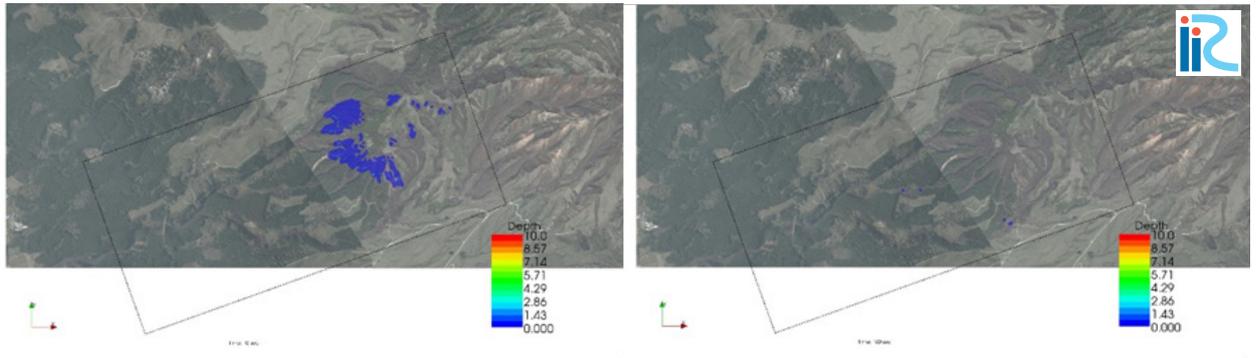
(b) 150 秒後



(c) 300 秒後

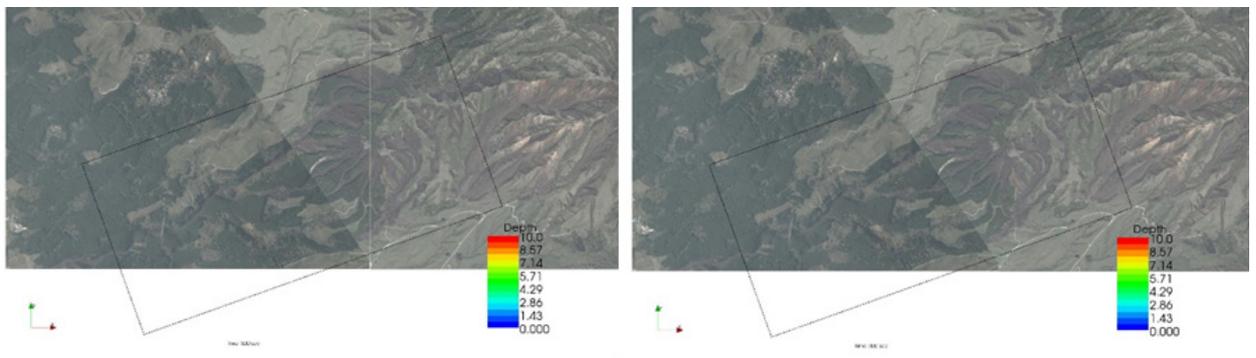
(d) 600 秒後

図18 Case1 (全ての崩壊が同時に発生, 細粒土砂相変化) の浸食・堆積深さ



(a) 10 秒後

(b) 150 秒後



(c) 300 秒後

(d) 600 秒後

図19 Case2 (全ての崩壊が同時に発生, 細粒土砂相変化無し) の流動深

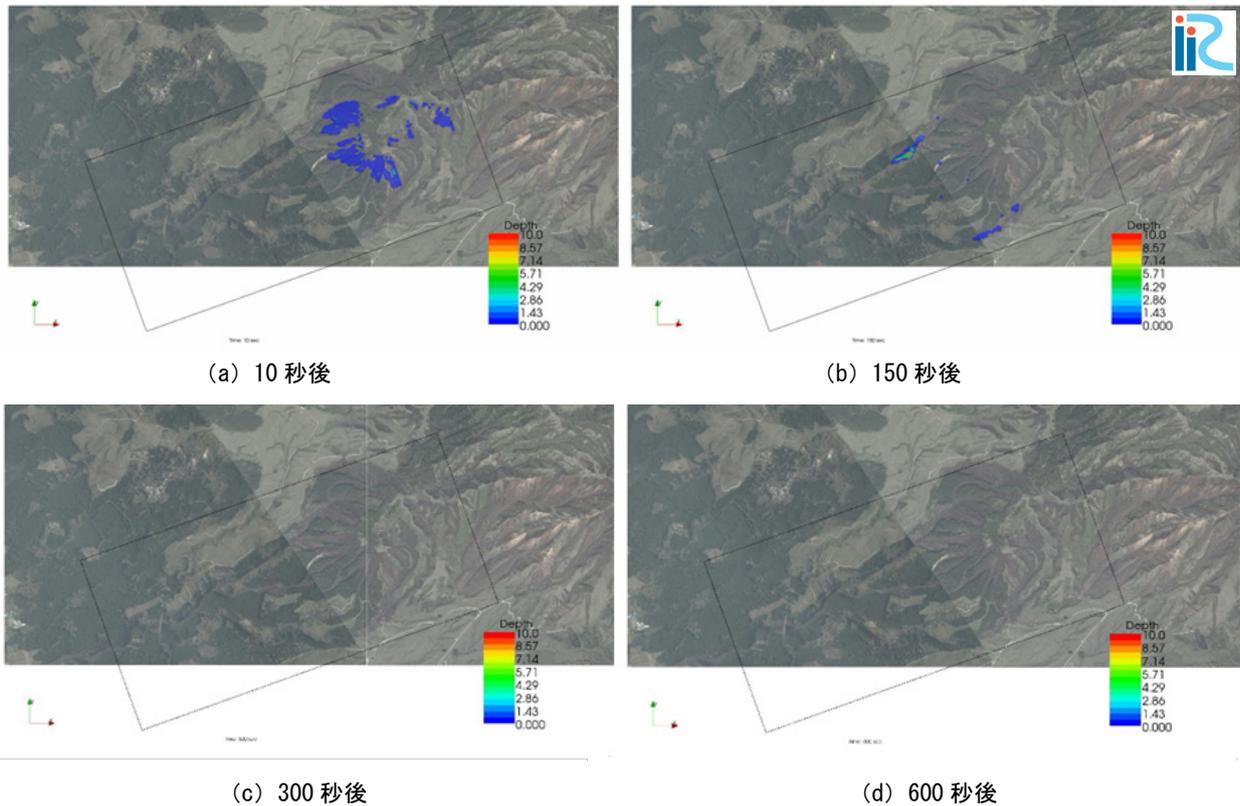


図20 Case3（細粒土砂相変化考慮，飽和度50%）の流動深

(5) 解析結果

図17に全ての崩壊が同時に発生したCase1の流動深さの時間的な変化を示す。図に示すように、北側及び西側斜面で発生した土石流が時間とともに下流に流下しながら合流し、最終的に下流域へ流れていく過程が再現できている。また、西側及び南側斜面で発生した土石流は実現象と同様に、途中の斜面で堆積して下流まで流下しなかった。図18にCase1の浸食・堆積深さの時間的な変化を示す。途中、勾配の緩い区間もあるため、土石流によって輸送された土砂が堆積する区間もあり、土石流は発達と減衰を繰り返しながら下流に到達している。本計算により、表層の細粒土砂は静止体積濃度が小さいとともに保水性が高いため、降雨が無くても崩壊土砂が流動化して土石流を形成し、下流に伝播した可能性が示された。

図19に地盤内の間隙は水で飽和しているものとし、細粒土砂の相変化を考慮しなかったCase2の流動深さの時間的な変化を示す。図に示すように、土石流は途中で堆積し、下流まで到達しなかった。これは、細粒土砂の相変化が土石流の流動に強い影響を与えることを示すと同時に、この度の山王谷の土石流現象において、細粒土砂の相変化が実際に発生している可能性を示している。

図20に細粒土砂の相変化は考慮しているが、地盤内の間隙は50%だけ水で満たされているものとしたCase3の流動深さの時間的な変化を示す。図に示すように、土石流は途中で堆積し、下流まで到達しなかった。これは、まとまった雨が降ってから8日後の土石流であったが、地盤内の間隙はかなり水で満たされていた可能性を示している。つまり、対象流域の表層は黒ぼくと呼ばれる非常に保水性の高い細粒土砂で覆われていたことが、地震時においても山王谷川で土石流現象を発生させた一つの要因となっている可能性を示している。

(6) 本章のまとめ

2016（平成28）年4月16日に九州中部で発生した地震により発生した山王谷川の土石流に関する現地調査の結果を検討した。また、地盤の間隙が水の一部だけ満たされている不飽和地盤上に形成される土石流を解析するモデルを構築するとともに、土壌水分特性が土石流の流動特性に与える影響を検討した。

4月16日の本震時に発生した斜面崩壊により、下流の宅地まで到達する土石流が山王谷川では発生した。河道内には、直径数十cm～数mの巨礫が存在するが、河道から氾濫して家屋に流れ込んだ土砂は、地盤表面を薄く覆っている黒色の細粒土砂であった。家屋の直上流に位置する橋梁には直径2m～3m程度の2つの巨礫によって河道が閉塞され、土砂の氾濫が助長されたことが推定された。また、土石流も河川流と同様に、橋梁周辺で迂回流として流下し、河岸が浸食されていることが明らかとなった。

不飽和地盤上に形成される土石流を解析するため、地盤の間隙の水による飽和度 S の時空間的な変化を考慮した基礎式を導出した。さらに、導出した基礎方程式を用いて、山王谷川を対象として異なる飽和度を用いた平面二次元の土石流の数値シミュレーションを実施した。その結果、地震によって同時に発生した崩壊による土石流は合流しながら規模を拡大させ、下流に伝播していたことが明らかとなった。また、細粒土砂の相変化が発生しなかったり、地盤内の間隙の水の飽和度が低いと、土石流は下流まで到達しない可能性が示された。

参考文献（第1章分）

- 1) 国道交通省九州地方整備局, <http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h28/160520/data/shiryoku3>.
- 2) 国土交通省砂防部http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/160914_gaiyou_sokuhou.pdf.
- 3) 江頭進治・伊藤隆郭：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, 2004.