

土石流の流動特性を考慮した被災リスクの評価と避難方法

京都大学 防災研究所 竹 林 洋 史

土石流の流動特性を考慮した 被災リスクの評価と避難方法

Evacuation method and assessment of disaster risk
considering flow characteristics of debris flows

竹林 洋史¹

Hiroshi TAKEBAYASHI

¹ 京都大学 防災研究所 准教授

要 旨

土砂災害警戒区域はイエローとレッドの2段階のリスク評価となっている。しかし、実際の土石流の流れは土砂災害警戒区域内の建物などの影響を受け、被災リスクは空間的に細かく分布している。そのため、土砂災害警戒区域内においても垂直避難で十分な場所などがあり、個々の家屋ごとに最適な避難方法が異なる。本研究では、土石流を対象とした土砂災害警戒区域内の被災リスクの空間分布を評価する方法を示すとともに、土石流からの最適な避難方法を検討した。その結果、最大浸食深を変化させることによって異なる流出土砂量による複数の条件で土石流の数値シミュレーションの結果をもとに、土石流の被災リスクの空間分布を示すことができ、土石流に対する危険領域を視覚的に捉えることが可能となった。また、土砂災害警戒区域の設定には、家屋の存在は考慮されていないが、土石流の被災リスクがある領域は家屋の有無や配置によって大きな影響を受けることが示された。さらに、家屋の存在を考慮した土砂災害の被災リスクの空間分布を用いることによって、個々の家屋ごとに最適な避難方法を選択できる可能性を示した。

《キーワード：iRIC；土石流；土砂災害警戒区域；避難；数値シミュレーション；家屋》

1. はじめに

2018年の西日本豪雨の時の広島県，2019年の台風19号による宮城県，2022年の停滞前線による新潟県など，降雨強度が高い雨によって発生する表層崩壊に起因した土石流・泥流による土砂災害が毎年のように発生している．今後，地球温暖化に伴い気象特性が極端化することが予想されており¹⁾，平均降水量が変化しない条件であっても降雨強度の高い雨の発生回数は増加することが予想されている．総降水量が少なくても降雨強度が高いと表層崩壊は発生しやすいと考えられるため，地球温暖化によって表層崩壊に起因した土石流・泥流の発生回数は増加することが予想される．そのため，土石流・泥流から市民の生命と財産を守るためには，土砂災害対策施設の設計や住民の避難などのハード・ソフト対策を検討するために必要な精度で土石流・泥流の流動・氾濫特性を評価することが重要となる．

土石流・泥流対策を実施する上で必要となる情報としては，土石流・泥流の氾濫域，流動深，流速，生産土砂量などであろう．例えば，土石流の土砂災害警戒区域の設定に用いられる土石流の氾濫域は，**図1**に示すように，土石流扇状地のの上流端付近である土石流堆積開始地点を起点とした扇形の堆積域を想定し，地盤勾配が緩やかになる勾配2度の地点を土石流氾濫範囲の下端としている．土石流氾濫域の設定にこのような簡便な方法が用いられているのは，土石流溪流が非常に多いことと，このような計算方法でもある一定レベルの精度で氾濫域が予測できるためである．しかし，実際の土石流は，氾濫域に存在する建物や道路の影響を受け，より複雑な平面形状で氾濫・堆積する．そのため，土石流による被災リスクも空間的に細かく分布している．また，2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流は，本川源頭部での発生から宅地に到達するまでの時間が100秒程度と見積もられており²⁾，周辺は広い範囲で土砂災害警戒区域が重畳していることを考えると（**図1**），豪雨及び斜面崩壊発生後に避難をする場合は土砂災害警戒区域外の避難所への避難は困難であり，土砂災害警戒区域の中の安全な場所の情報が必要である．このように，土石流の土砂災害警戒区域内の住民にとっては，より詳細な土石流氾濫域の情報が必要である．

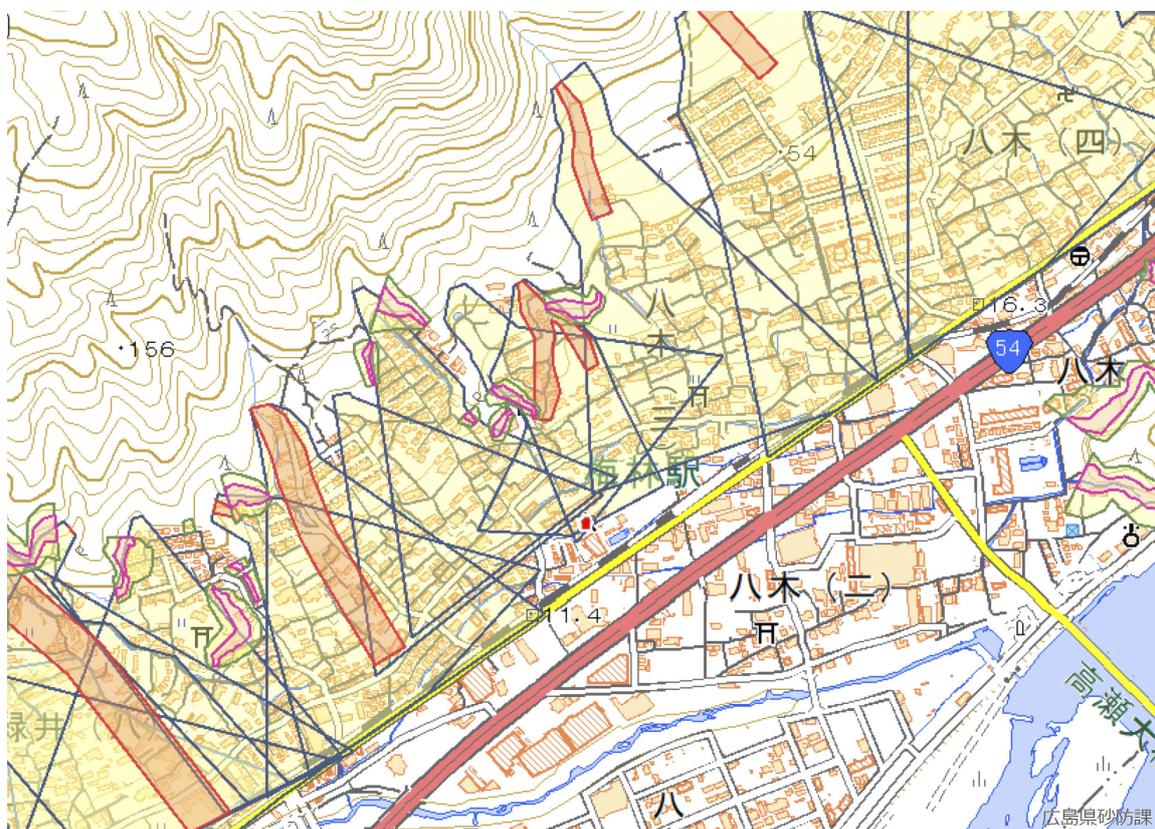


図1 広島市安佐南区八木三丁目周辺の土砂災害警戒区域（土砂災害ポータル広島）

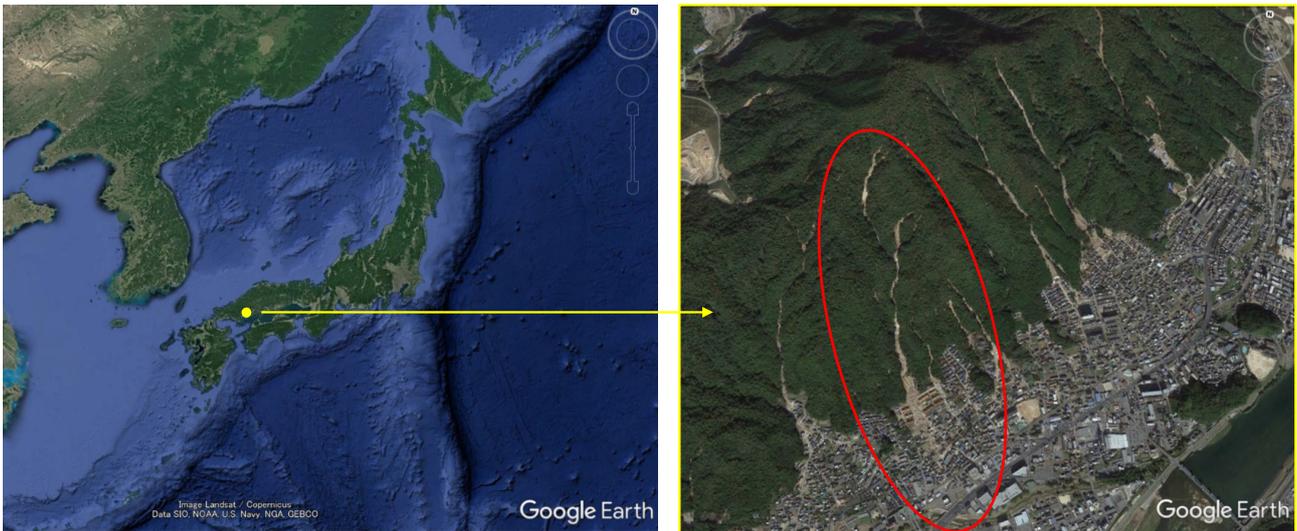


図2 解析対象領域（広島市安佐南区八木三丁目）の位置

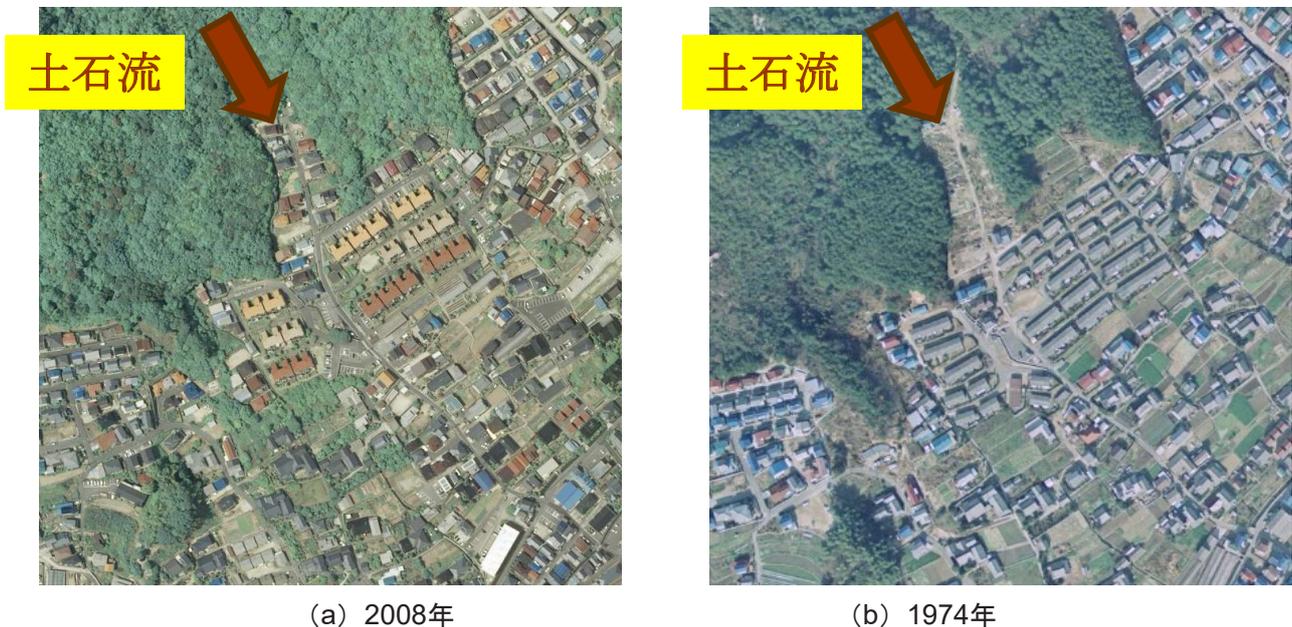


図3 広島市安佐南区八木三丁目周辺の航空写真（国土地理院）

本研究では、異なる流出土砂量による複数の条件で土石流の数値シミュレーションの結果をもとに、土石流を対象とした土砂災害警戒区域内の被災リスクの空間分布を評価する方法を示すと同時に、土石流からの最適な避難方法を検討する。

2. 土石流被災リスクの評価方法

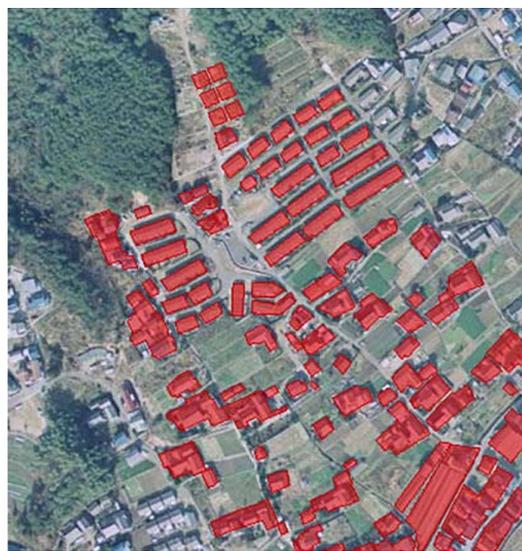
本研究では、2014年8月に線状降水帯による豪雨による土石流災害において甚大な被害が発生した図2に示す広島市安佐南区八木三丁目を対象とする。図3に2008年、1974年における広島市安佐南区の空中写真を示す。対象地域の溪流出口付近には、県営緑丘住宅が存在する。図より1974年では、土石流溪流出口周辺の開発が進み始めており、本解析では1974年（図3 (b)）の宅地の状態を基本として検討を行う。解析を行うケースとして、家屋を考慮しないケース、1974年（昭和49年）時点の家屋の状態でのケース、そこから開発が進み6軒の家屋を建設することを仮定した2つのケースの計4つのケースにおいて、リスク評価を行う。解析条件をまとめると以下のものである。



図4 Case2で考慮する家屋



(a) Case3



(b) Case4

図5 Case3とCase4で考慮する家屋

Case1 家屋の存在を考慮しない。

Case2 1974年（昭和49年）時点で存在する家屋を考慮する。

Case3 Case2に新たな家屋を加える（切り開かれていた里山の南東側に家屋が建設されたとする）。

Case4 Case2に新たな家屋を加える（切り開かれていた里山の北東側に家屋が建設されたとする）。

本研究では、1つの家屋配置条件に対して土砂量を変えて3種類の数値解析を行い、それぞれの土石流の最大流動深が0.5m以上となる領域を危険領域とし、それらを重ね合わせることで領域ごとの危険度を段階的に評価する。0.5mであれば床上浸水となる家屋が多く、家屋内に土石流が侵入しやすい。重ね合わせた結果からその領域が何種類の数値解析により最大流動深0.5m以上となったか調べることにより、領域ごとの土石流に対する危険度を4段階で評価した。ここでは以下のように定義するものとする。

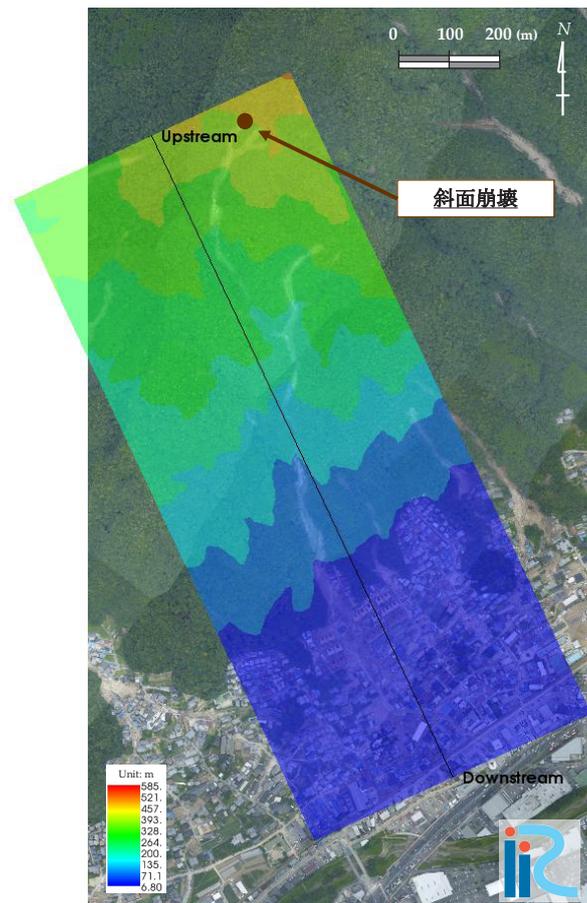


図6 解析領域の地盤高さ

- Level 4 3種類の危険領域すべてに含まれる領域
- Level 3 2種類の危険領域に含まれる領域
- Level 2 1種類の危険領域に含まれる領域
- Level 1 どの種類の危険領域にも含まれない領域

なお、ここで用いた最大流動深によるリスク評価方法は一つのリスク評価方法に過ぎず、家屋の破壊応力などを用いた評価方法なども考えられる。これらについては、何をもって「被災」と判断するかによって選択されるものと考えている。

対象地点で発生した土石流は斜面崩壊を発端として発生したと考えられるが、斜面崩壊発生地点から宅地までの流動距離が非常に長く、土石流となった溪流内の不安定土砂の量は、斜面崩壊によって発生した土砂量の10倍以上と見積もられている。つまり、対象地点の土石流による流出土砂量は、溪流内の不安定土砂の量が大きく影響を与えている。そこで、宅地への流出土砂量の違いは、溪流内の不安定土砂の厚さ（最大浸食深）を変更することで表現した。本解析では0.1m、0.3m、0.5mの三種類の最大浸食深とした。以上より、斜面崩壊の位置や大きさは変えないものとした。斜面崩壊は、2014年に実際に発生した斜面崩壊の内、図6に示すように、本川の源頭部で発生した一つの斜面崩壊を対象とした。

家屋を考慮するケースでは、家屋を不透過で非越流の破壊しない構造物としてとして扱った。Case3、Case4で追加する家屋は一般的な広さのものとして、10m×10mの正方形の家屋とした。図4にCase2、図5にCase3、Case4で考慮する家屋の位置と形状を赤色で示す。図4の土石流溪流の上流側で開発の準備がされている領域に、Case3では南側に、Case4では東側に家屋を6軒追加している。

解析に用いた地形データは、国土交通省による2009年に測定された1mDEMデータ（被災前の地形デー

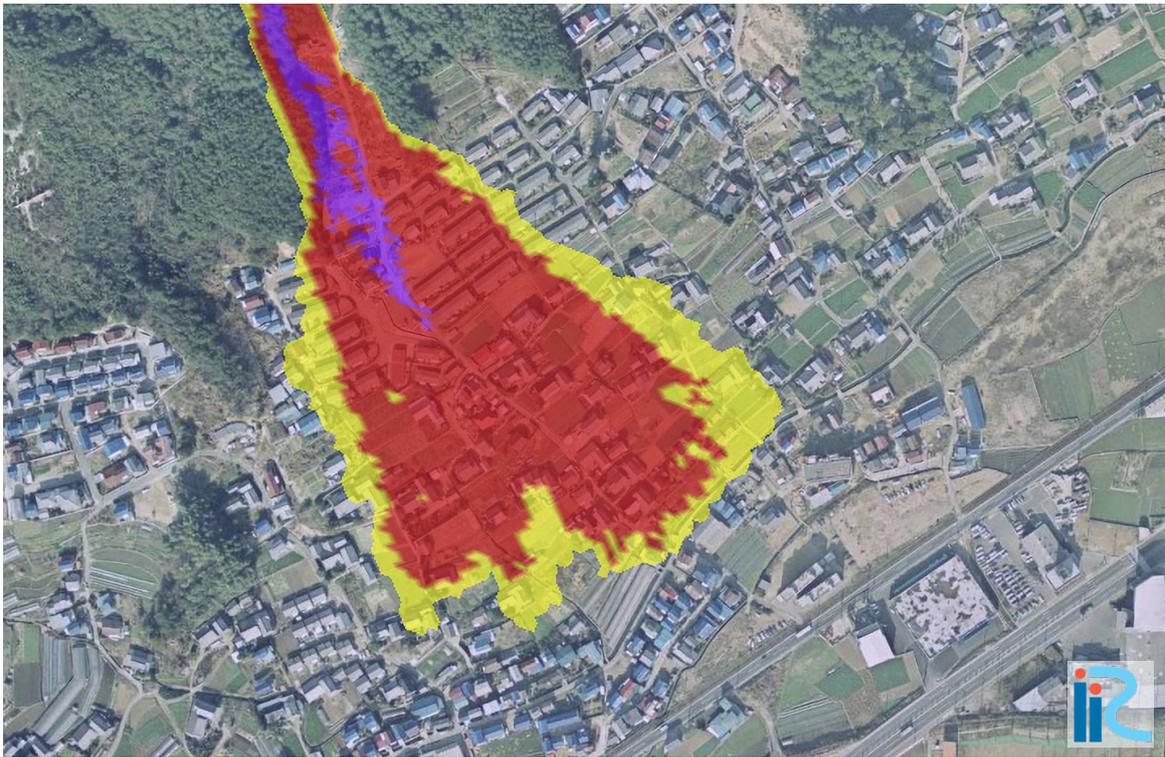


図7 土石流被災リスクの空間分布 (Case1)

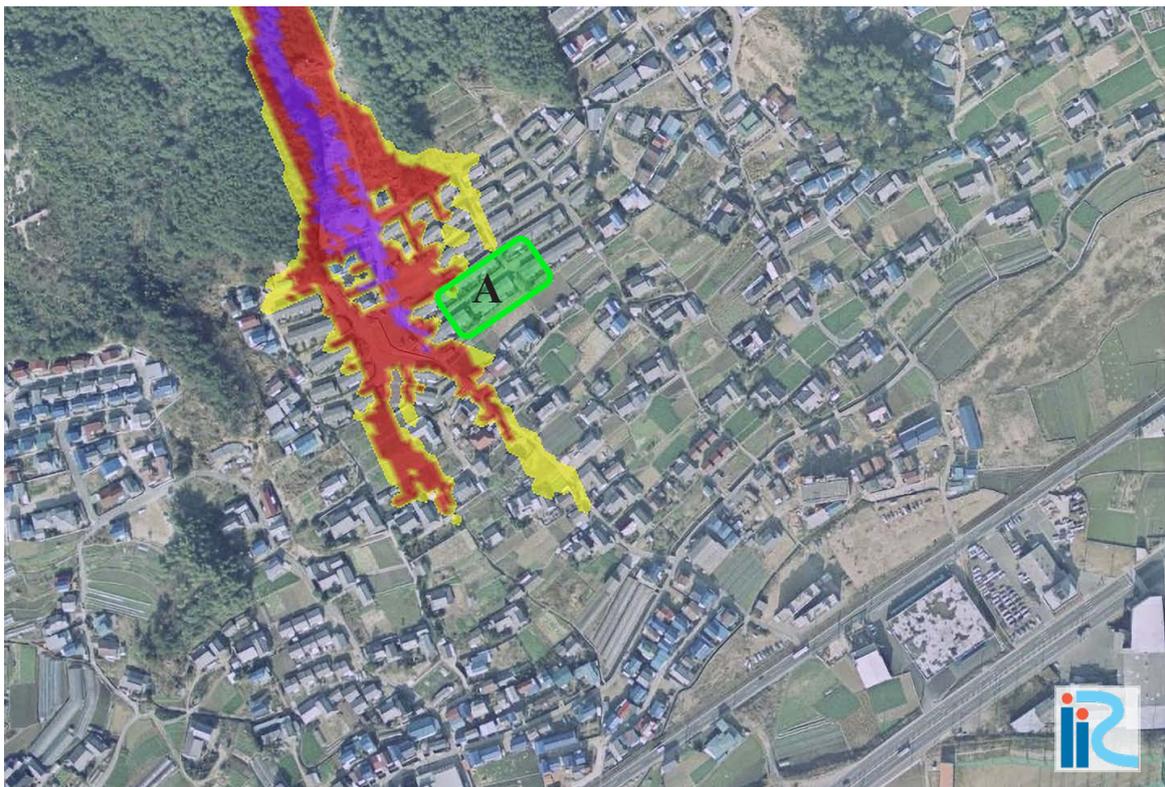


図8 土石流被災リスクの空間分布 (Case2)

タ)をすべての解析で用いた。図6に解析領域の地盤高さを示す。解析格子は、 $2\text{m} \times 2\text{m}$ の正方形格子とした。

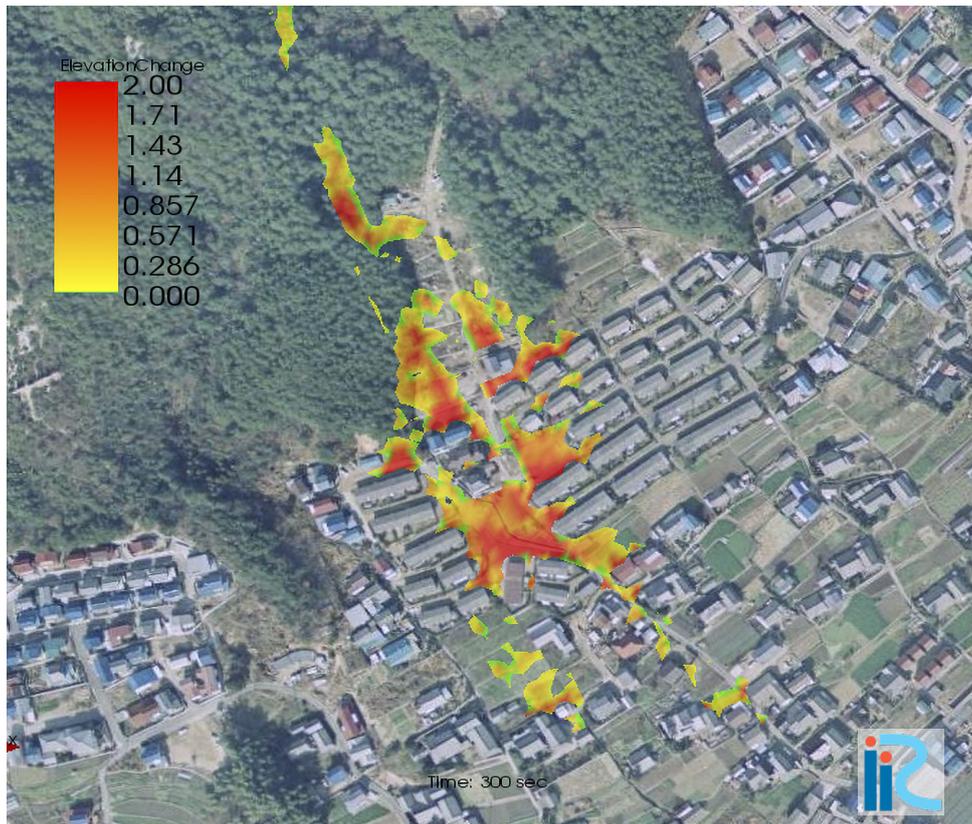


図9 土砂の堆積厚の空間分布 (Case2)

3. 解析方法

解析には、一般座標系による平面二次元流れの土石流の数値シミュレーションモデル³⁾であるiRIC-Morpho2DHを用いる。iRIC-Morpho2DHは、水と土砂の混合物を一つの流体として取り扱った一流体モデルであり、エネルギー散逸機構として、降伏応力とともに、流体運動に起因したエネルギー散逸（土砂の粒子と粒子の間隙内の水の乱れによるエネルギー散逸，土砂の粒子と粒子の非弾性衝突によるエネルギー散逸）を考慮している⁴⁾。また、細粒土砂が水と混合することによって液体のように振る舞う相変化を考慮している。さらに、層流層の上に乱流層が形成されることによる平衡勾配の減少などを考慮した二層モデルとしている⁵⁾。

4. 結果と考察

被災リスクは以下のように色分けし表示している。

- Level 4 紫色（3つの危険領域すべてに含まれる領域）
- Level 3 赤色（2つの危険領域に含まれる領域）
- Level 2 黄色（1つの危険領域に含まれる領域）
- Level 1 色なし（どの危険領域にも含まれない領域）

図7にCase1（家屋の存在を考慮しない）の結果を示す。なお、Level 4の領域は最大浸食深0.1mの解析結果とほぼ重なり、Level 3とLevel 2の領域もそれぞれ最大浸食深0.3m、0.5mとした解析結果と重なっている。図より、最大浸食深を深くすることで土石流の規模が大きくなり、それに従い流出土砂量が増えて危険領域も広がっていることが分かる。また、Level 2とLevel 3の領域に対してLevel 1の領域はかなり狭い。これは、最大浸食深が0.1mの場合は流出土砂量が少なく、広範囲に土石流が流れることな

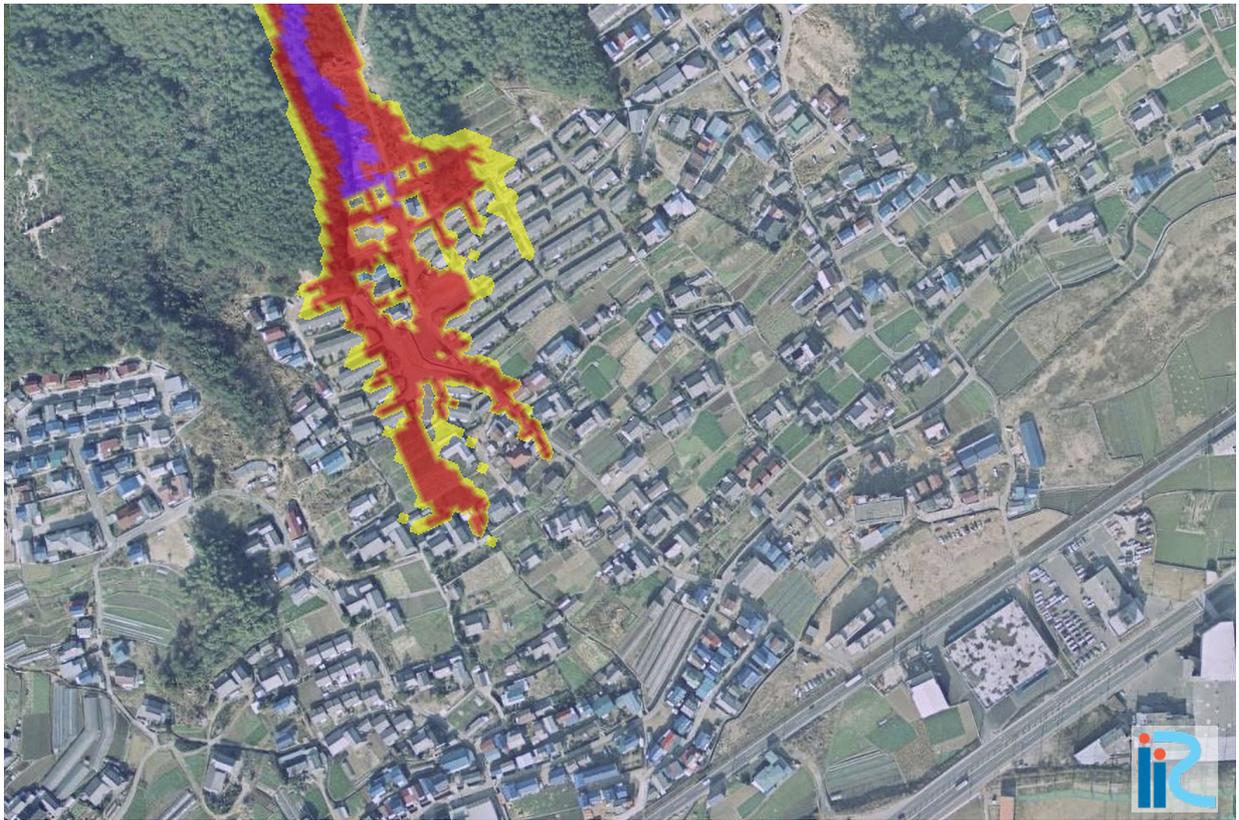


図10 土石流被災リスクの空間分布 (Case3)

く堆積するためである。このように、最大浸食深0.1mと0.3mには土石流の影響範囲に大きな違いが生じることが分かる。また、Level 2とLevel 3の領域は扇型に広がっており、土石流扇状地の形成・発達過程となっていることが分かる。

図8にCase2（1974年時点で存在する家屋を考慮する）の結果を示す。Case1と異なり南西の県営住宅の西側に危険領域が分布しているのは、県営住宅付近で土石流が建物に衝突することによって一部の土石流の流向が西に向けられたためである。県営住宅よりも下流（南東）の領域では、土石流が家屋と家屋の間を流れているため、土石流は横断方向にはあまり広がらず、より直線的な流れとなっている。

図9に、Case2において最大浸食深0.3mとした解析によって得られた土砂の堆積量の空間分布を示す。図9より、家屋の上流側で土砂が多く堆積していることがわかる。その結果、下流部に流れる土砂の量が減少し、下流部の危険領域が狭まる結果となった。図では示していないが、0.1m、0.5mの解析結果でも同様の結果となった。この点は、水のみでの氾濫とは大きく異なる点である。つまり、水のみであれば、一時的に家屋の上流域で流れが滞留したとしても対象地点のような急傾斜地の宅地であれば、最終的にほぼ全ての水は下流に流れる。しかし、土石流の場合は宅地を流下するに従って土石流の流量が減少し、氾濫域が狭くなる。

図10と図11に、Case2に新たな家屋を加えたCase3（南東側に建設）とCase4（北東側に建設）の結果を示す。図10より、Case3に関しては新設した家屋を避けるよう土石流が流れたことにより、Case2と比較すると新設した家屋の東側でLevel 3、Level 2の範囲が広がっている。また、Level 4の領域は県営住宅付近まで到達していない。これは最大浸食深0.1mの土石流が新設した家屋に衝突し家屋上流部で土砂が堆積したことによるものである。つまり、今回新設した家屋が土石流に対し非常に危険であることが分かる。また、図11より、Case4は家屋を東側に新設したことにより危険領域は東側には広がらない結果となったが、これは土石流が東側に新設した家屋を避けるように西側を流下したからである。図10と図11を比較すると、Case4はCase3より上流で堆積する土砂量が少ないことから、県営住宅の間を流れ

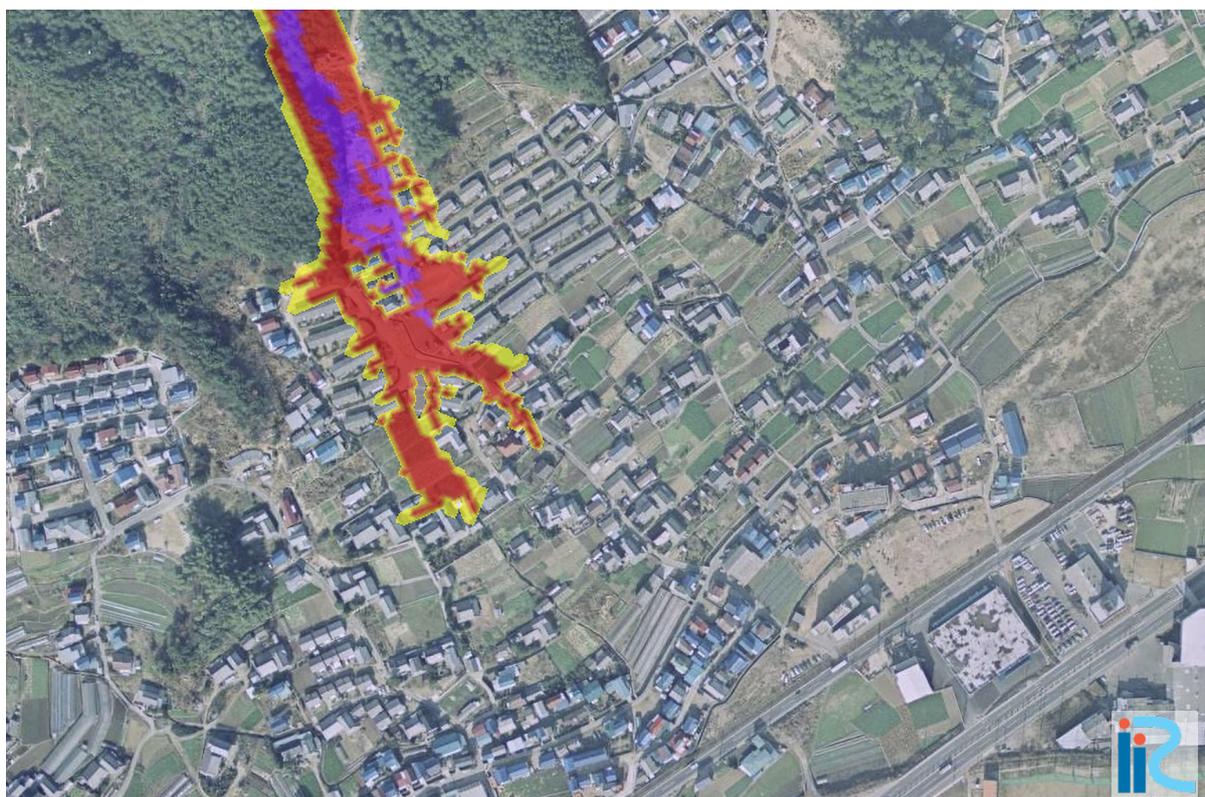


図11 土石流被災リスクの空間分布 (Case4)

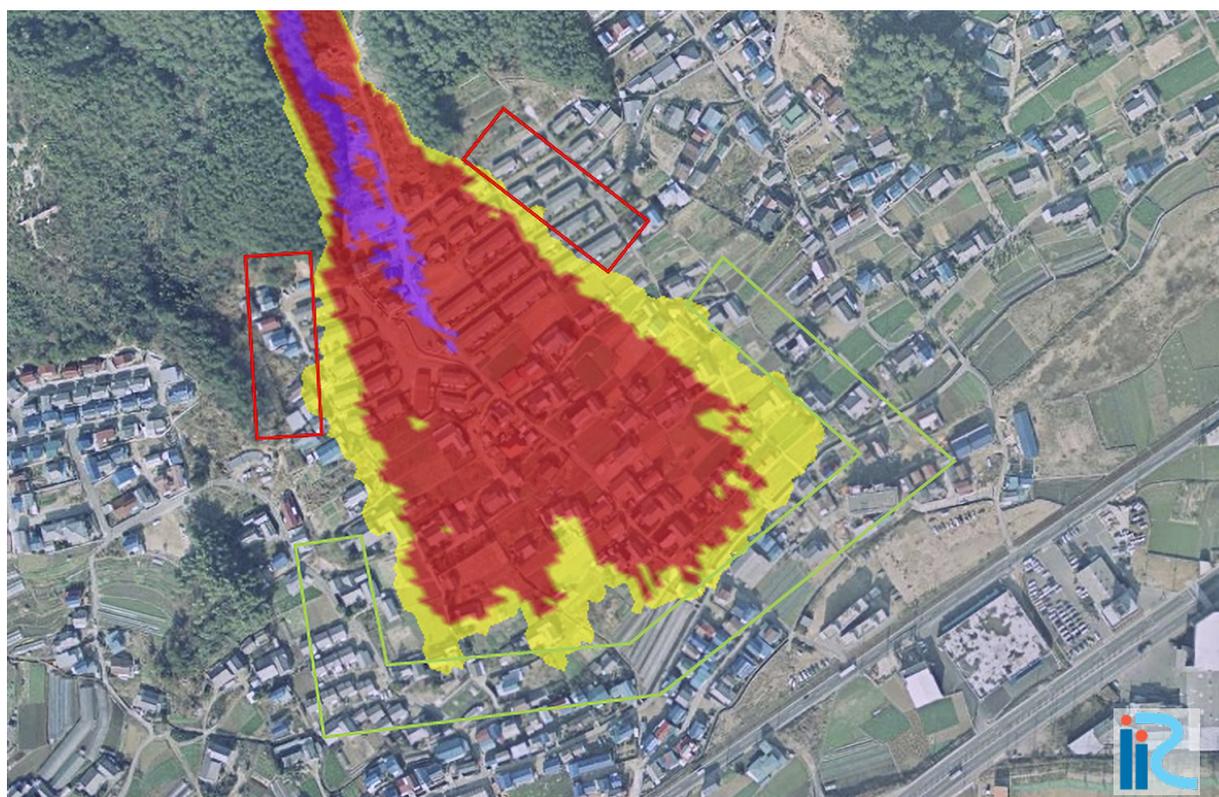


図12 土石流被災リスクの空間分布 (Case1)

る土砂量はCase3より増加している。特にLevel 4の範囲で顕著であり、Case4のLevel 4の範囲はCase1やCase2と近いものになった。このように家屋を新設する位置の変更のみでも危険領域に大きな違いが発生することが分かる。

土石流扇状地というこの地域の地形特性を考慮すると、Case1の危険領域に家屋は建てるのは危険であり、この範囲の外側に家屋等は建設するのが望ましい。この範囲内に家屋を建設するのであれば、土石流発生リスクが高い時の避難方法の検討や地盤高さを上げるなどのハード対策が必要である。一方、Case1で危険領域と判定されていない領域であっても溪流出口周辺（図12赤色枠内）に家屋を建てた際は、より上流部の領域で家屋が新設される等の変化があった場合に危険領域に変化する恐れがある。下流部（図12緑色枠内）であれば新たに危険領域となることはほぼ無いと考えられ、家屋などの人が長時間滞在する建物を建設するならば、この領域やさらに溪流より遠方に建設することが望ましい。

図8を用いて各家屋の避難方法を検討する。紫で表示されているLevel4の領域内及びLevel4の領域に接している家屋については、小規模の土石流であっても土石流が流れてくる可能性があり、豪雨が予想されている時は他の場所への避難が必須である。豪雨発生前に早めに避難できる場合は、土砂災害警戒区域外の避難所に避難するのが望ましいが、避難の初動が遅くなり雨が強くなった後の場合は、家の近くで被災リスクが低い場所へ避難することにより、生存確率が上昇する。例えば、図8に緑で示したA地点のように、Level1の領域の知人の家などに避難できるのであれば、避難距離数10mで避難が可能である。Level1の領域への避難が困難な場合は、Level2やLevel3の領域であっても自宅に留まるよりも生存確率が上昇する。

図8と図9を比較すると、Level3の領域は土砂の堆積厚が比較的厚いが、Level2の領域は土砂の堆積厚が非常に薄い。これらのことから、Level2の領域の家屋については、豪雨中に急傾斜地を遠方の避難所まで移動するリスクを考えると、自宅の高階への垂直避難の方が安全で生存リスクが高くなる可能性が高い。

以上のように、様々な条件（本研究では流出土砂量に着目）で土石流の数値シミュレーションを実施することによって、急傾斜地に存在する宅地における土石流被災リスクの空間分布を示すことができる。また、被災リスク分布を用いることによって、個々の家屋ごとに最適な避難方法を選択できる可能性を示した。

5. 結論

土石流を対象とした土砂災害警戒区域内の被災リスクの空間分布を評価する方法を確立するとともに、土石流からの最適な避難方法を検討した。以下に得られた成果をまとめる。

1. 異なる流出土砂量による複数の条件で土石流の数値シミュレーションの結果をもとに、土石流の被災リスクの空間分布を示すことができ、土石流に対する危険領域を視覚的に捉えることが可能となった。
2. 土砂災害警戒区域の設定には、家屋の存在は考慮されていないが、土石流の被災リスクがある領域は家屋の有無や配置によって大きな影響を受けることが示された。
3. 家屋の存在を考慮した土砂災害の被災リスクの空間分布を用いることによって、個々の家屋ごとに最適な避難方法を選択できる可能性を示した。

参考文献

- 1) IPCC AR4, 2007, Publisher: Cambridge University Press, Cambridge,UK.
- 2) Takebayashi H. and Fujita, M.: Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model, Geosciences, 10, 45, 2020.
- 3) Hiroshi Takebayashi, Masaharu Fujita, Koichiro Ohgushi: Numerical modeling of debris flows using basic equations in generalized curvilinear coordinate system and its application to debris flows in Kinryu River Basin in Saga City, Japan, Journal of Hydrology, 615, Part A, 128636, 2022.

- 4) 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, Vol. 12, No. 2, pp. 33-43, 2004.
- 5) 江頭進治, 佐藤隆宏, 千代啓三: 砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響, 京都大学防災研究所年報, 37号, B-2, pp. 359-369, 1994.