

土石流氾濫域における家屋の影響と 危険度評価に関する研究

2025 年

中 本 英 利

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 近年の土砂災害の現状と課題	1
1.1.2 土砂災害に関する避難・警戒の現状と課題	5
1.2 研究目的	9
1.3 論文構成	9
参考文献	11
第 2 章 既往研究	12
2.1 概説	12
2.2 土石流の数値シミュレーションに関する研究	13
2.3 土石流の数値シミュレーションを用いた避難・警戒に関する研究	21
2.4 結語	26
参考文献	27
第 3 章 家屋破壊の影響を考慮した 土石流の数値シミュレーションモデルの構築	30
3.1 概説	30
3.2 土石流の数値シミュレーションモデルの概要	31
3.3 土石流による家屋破壊実態の把握	35
3.4 土石流による家屋破壊モデル	40
3.5 結語	42
参考文献	43

第4章 土石流による家屋破壊モデルの現地への適用	44
4.1 概説	41
4.2 平成26年8月豪雨による広島土砂災害への適用	45
4.2.1 広島市安佐南区八木三丁目で発生した土砂災害の概要	45
4.2.2 土石流による家屋破壊状況の再現	50
4.3 平成30年西日本豪雨による広島土砂災害への適用	55
4.3.1 広島市安芸区矢野東（梅河団地）で発生した土砂災害の概要	55
4.3.2 宅地内における家屋倒壊の再現	60
4.3.3 土砂災害警戒区域等の課題と評価	65
4.4 結語	69
参考文献	70
 第5章 宅地域における土石流の流動特性と危険度評価	 71
5.1 概説	71
5.2 宅地に存在する家屋が土石流の流動特性に与える影響	72
5.2.1 解析条件	73
5.2.2 家屋破壊の有無が土石流氾濫域に与える影響	74
5.2.3 家屋の存在が土石流氾濫域に与える影響	76
5.3 土石流発生条件の違いによる土石流氾濫リスクの空間分布	78
5.3.1 解析条件	78
5.3.2 土石流氾濫リスクの空間分布に関する解析結果及び考察	80
5.4 宅地域における土石流の危険度評価	90
5.4.1 土石流による被害形態	90
5.4.2 危険度評価手法	92
5.4.3 解析条件	93
5.4.4 被害形態に応じた土石流危険度の評価	95
5.5 結語	102
参考文献	103

第 6 章	災害に強いまちづくりのための 土石流の数値シミュレーションの活用法	104
6.1	概説	104
6.2	検討方法	105
6.3	家屋配置条件の違いによる危険度評価	108
6.4	土石流の流動特性を考慮したまちづくり	113
6.5	結語	115
	参考文献	116
第 7 章	結論	117
	謝辞	121

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 近年の土砂災害の現況と課題

近年，地球温暖化等の影響に伴い増加する集中豪雨や継続期間の長い降雨等により，毎年各地で甚大な土砂災害や人的被害が生じている。

図 1.1.1 は，過去 20 年間の土砂災害発生件数をまとめたものである¹⁾。過去 10 年間（平成 26 年～令和 5 年）の平均発生件数は 1,499 件であり，その前の 10 年間（平成 16 年～平成 25 年）の平均発生件数 1,184 件の約 1.3 倍となっている。特に，10 個の台風が日本に上陸した平成 16 年は 2,537 件，西日本豪雨が発生した平成 30 年には 3,459 件の土砂災害が発生しており，台風や豪雨が多く発生した年には，土砂災害も多く発生している。

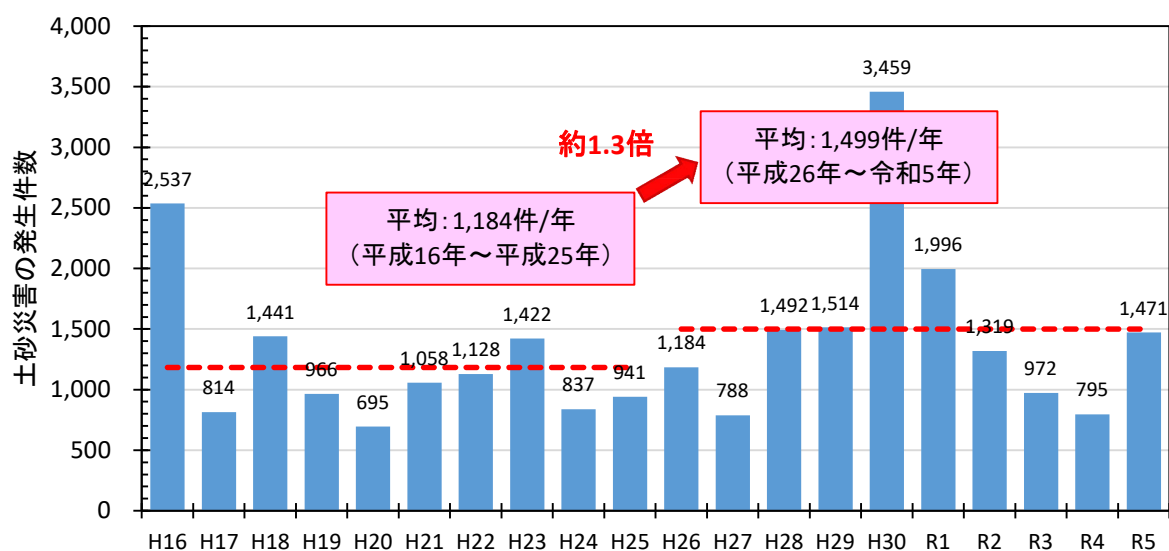


図 1.1.1 過去 20 年間の土砂災害発生件数（平成 16 年～令和 5 年）¹⁾

図 1.1.2 は，平成 16 年から令和 5 年までの 20 年間における土砂災害の発生件数と，人的・家屋被害件数の推移を比較したものである。それぞれ，内訳として，土砂災害発生件数では，がけ崩れ，地すべり，土石流に，人的被害者数では，死者・行方不明者，負傷者に，家屋被害戸数では，全壊，半壊，一部損壊に分けて示している。

図 1.1.2 より，土砂災害による人的被害者数と家屋被害戸数は，その年の発生件数に概ね対応していることがわかる。土砂災害は洪水災害等と異なり突発的に発生することから，土砂災害の発生により，人的被害・家屋被害等の何らかの被害を伴うことがみて取れる。

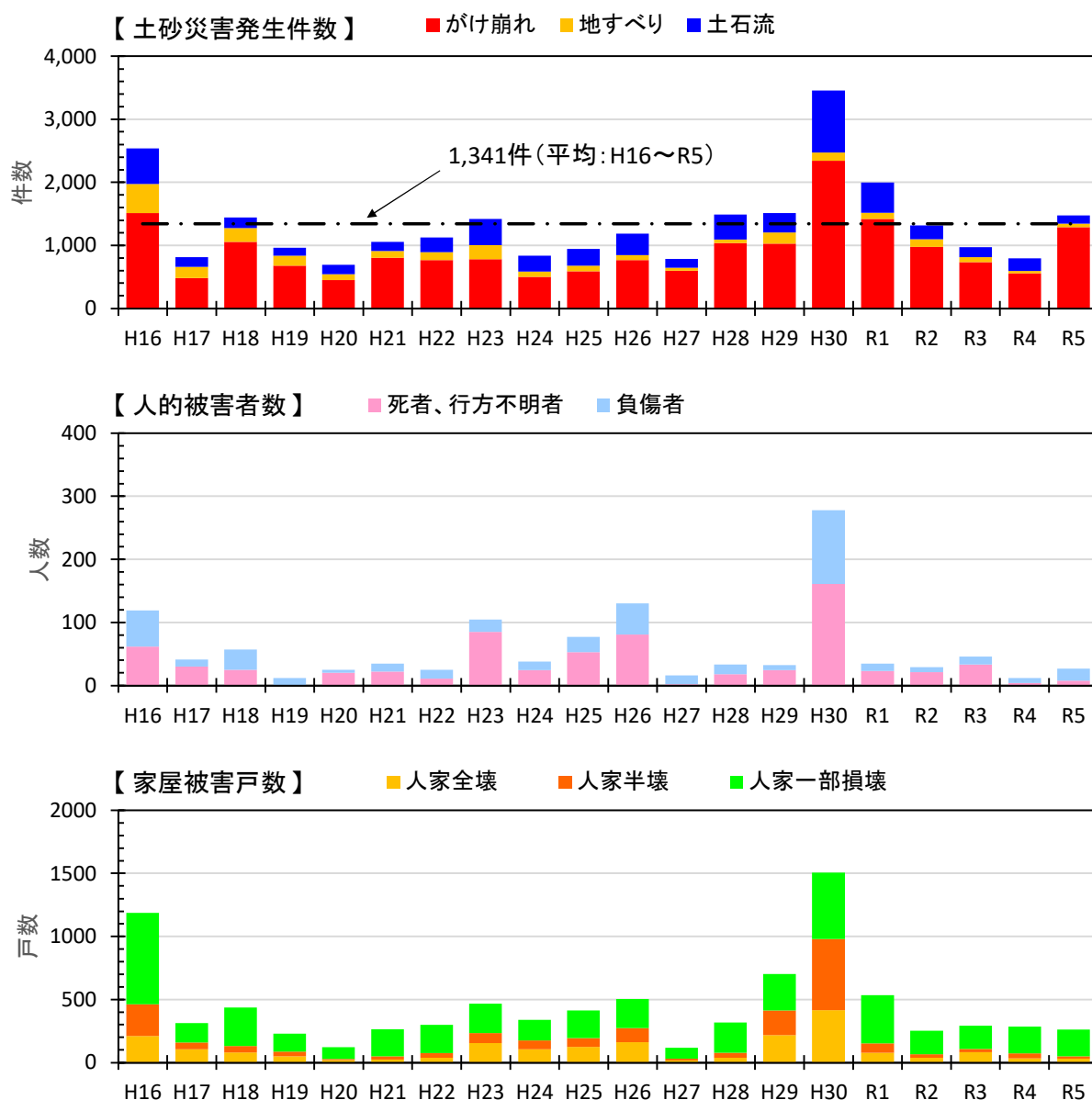


図 1.1.2 近年の土砂災害発生件数，人的被害者数，家屋被害戸数の推移（H16～R5）¹⁾

また，近年 20 年間ににおける年平均土砂災害発生件数は 1,341 件である．その土砂災害の内訳を，近 10 年間（平成 26 年～令和 5 年）とその前の 10 年間（平成 16 年～平成 25 年）で比較してみると，がけ崩れで 1.41 倍，地すべりで 0.51 倍，土石流で 1.35 倍となり，近年では，がけ崩れ，土石流による土砂災害の発生割合が特に増加していることがわかる．

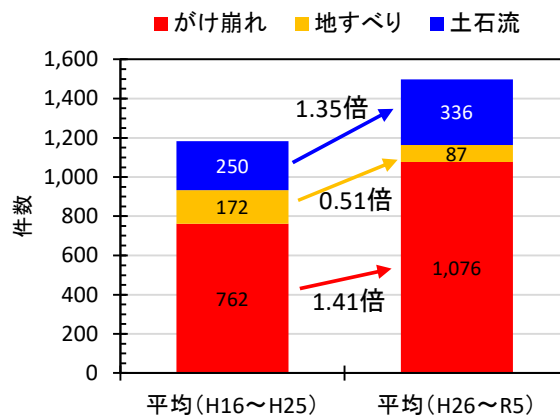


図 1.1.3 土砂災害発生件数の増加割合

近年の各地における土砂災害では、平成 25 年の伊豆大島²⁾、平成 26 年の広島³⁾、平成 29 年の朝倉・日田⁴⁾、平成 30 年の広島⁵⁾など、短時間で高強度の豪雨や計画を上回るような規模の長期間の降雨により斜面崩壊が発生し、それに起因した土石流・泥流によって宅地が被災する土砂災害が頻発している。



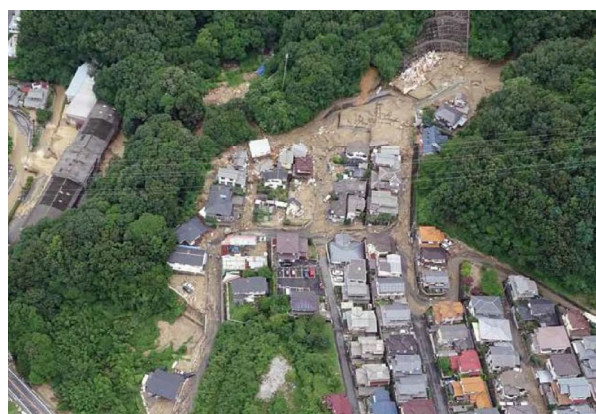
(a) 平成 25 年台風 26 号による土砂災害
(伊豆大島)²⁾



(b) 平成 26 年 8 月豪雨による土砂災害
(広島市安佐南区)³⁾



(c) 平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害
(福岡県朝倉市・大分県日田市)⁴⁾



(d) 平成 30 年 7 月豪雨による土砂災害
(広島市安芸区矢野東)⁵⁾

図 1.1.4 近年の土砂災害の状況

平成 25 年台風 26 号に伴う土砂災害では、東京都大島町において、火山地域で発生した流木を伴う大規模な泥流により、死者 35 名、行方不明者 4 名、家屋被害（全壊，半壊）86 戸の甚大な被害が発生した²⁾。この土砂災害では、最大時間雨量 118.5mm，最大 24 時間雨量 824.0mm を記録し、短期間に高強度な降雨により、遷急線（緩斜面の下に急斜面が接続する境界線）直下の狭い範囲に多数の表層崩壊（火山灰を主体とする表層土の崩壊）が集中し、大量の泥流と流木が発生した²⁾。発生した泥流は、尾根を乗り越え、砂防施設が設置されていない流域へも流下し、下流の宅地域へ氾濫している。

平成 26 年 8 月豪雨による土砂災害では、広島市安佐南区の高瀬観測所において、最大時間雨量 87.0mm、最大 24 時間雨量 247.0mm を記録し、広島市安佐南区、安佐北区を中心に、166 件の土砂災害が発生（土石流：107 件、がけ崩れ：59 件）、死者 74 名、家屋被害（全壊、半壊）255 戸の甚大な被害が発生した³⁾。この土砂災害では、狭い範囲に短時間に豪雨が集中したことで、山裾に高度に宅地化された住宅地背後の溪流において、土石流やがけ崩れが発生し、多くの人的被害や家屋被害が生じた。

平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害では、福岡県朝倉市黒川において、最大時間雨量 124.0mm、最大 24 時間雨量 829.0mm を記録し、福岡県、大分県を合わせて、人的被害は、死者 36 名、行方不明者 5 名、家屋被害は、全壊 275 戸、半壊 1,061 戸の甚大な被害が発生した⁴⁾。この土砂災害では、短時間で高強度の豪雨により、同時多発的に斜面崩壊が発生し、多量の土砂と流木が流出したことで、下流の河道の河床上昇・河道埋塞が生じ、土砂・洪水氾濫が発生した。

平成 30 年 7 月豪雨による土砂災害では、九州から東北にかけた広い範囲で断続的に発生した記録的な豪雨により、1 道 2 府 28 県において、1,464 件の土砂災害が発生（土石流：465 件、地すべり：50 件、がけ崩れ：949 件）し、死者 118 名、家屋被害（全壊、半壊）133 戸の甚大な被害が発生した⁶⁾。この土砂災害では、山腹崩壊により発生した大量の土砂が下流河道に流下し、河積を阻害した結果、多くの土砂・洪水氾濫が生じた。

これらの土砂災害では、高強度の豪雨によって発生した斜面崩壊により、土石流が発生し、溪流出口に開発された宅地域が被災するケースが多くみられた。宅地域には多くの家屋や道路等が存在するため、土石流は家屋を破壊し複雑に氾濫する。また、平成 26 年 8 月に広島市安佐南区八木 3 丁目で発生した土石流では、本川源頭部で発生した土石流は 100 秒程度で宅地に達している⁷⁾。



図 1.1.5 溪流出口の宅地域に氾濫した土石流の状況（広島市安佐南区八木 3 丁目）⁸⁾

以上のように、近年、土砂災害が多くみられる溪流出口に宅地域が広がるような箇所では、土石流発生情報が得られても、遠方への避難は困難である。一方、家屋が密集するような宅地域での土石流の氾濫特性や土石流氾濫域の情報が不足しているのが現状である。

1.1.2 土砂災害に関する警戒・避難の現状と課題

1) 土砂災害警戒情報、土砂災害警戒区域等の現状と課題

突発的に発生する土砂災害から身を守るためには、リアルタイムで発表される様々な防災情報を得るとともに、土砂災害に対して日頃から備えておくことが必要である。そのためには、いつ（時間）、どこで（場所）、どれぐらい（規模）の三要素の情報が重要であり、現在、地域住民の方が知ることのできる土砂災害に関する情報としては、いつ（時間）、どこで（場所）の情報に当たる「土砂災害警戒情報」、どこで（場所）、どれぐらい（規模）の情報に当たる「土砂災害警戒区域」がある。

(1) 土砂災害警戒情報に関する現状と課題

土砂災害警戒情報は、降雨による土砂災害の危険が高まったときに、市町村長が避難指示を発令する際の判断や、自主避難の参考となるよう、都道府県と気象庁が共同で発表している防災情報⁹⁾である。長期降雨の指標となる土壌雨量指数と短期降雨の指標となる60分間積算雨量（国交省、気象庁のレーダ雨量を各雨量計で補正して解析した雨量）との関係が、過去の土砂災害事例等をもとに設定された発表基準線（CL）を超えた場合に発表されるものである。

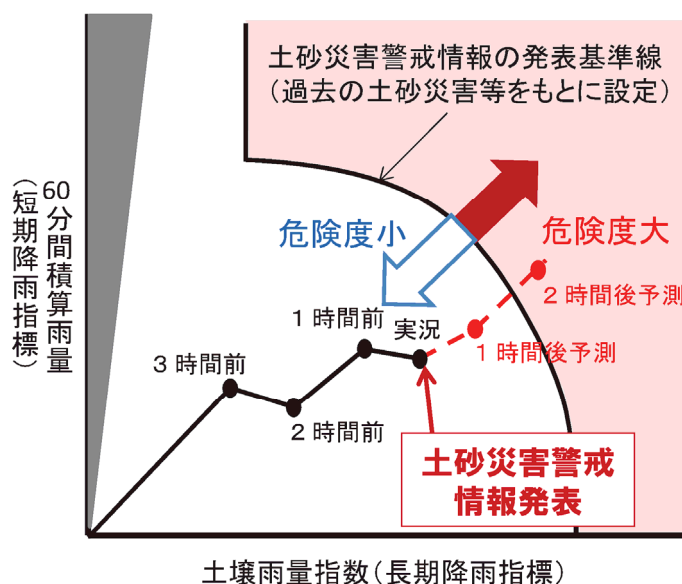


図 1.1.6 土砂災害警戒情報の発表基準⁹⁾

平成30年7月豪雨に伴う土砂災害では、人的被害が発生した全ての箇所において、発災前に土砂災害警戒情報発表され、その約7割で避難勧告が発災前に発令されていた。一方で、土砂災害警戒情報が発表された市町村のうち、土砂災害が発生しなかった市町村は約6割であり¹⁰⁾、いわゆる「空振り」の割合は決して低いとはいえず、市町村長による避難勧告等の判断支援のため、その予測精度向上には改善の余地がある。

(2) 土砂災害警戒区域等の現状と課題

土砂災害警戒区域は、土砂災害防止法に基づき、溪流や斜面及びその下流など、土砂災害により被害を受けるおそれのある区域の地形、地質、土地利用状況について基礎調査を実施し、結果を公表するとともに、土砂災害のおそれのある区域等を指定するものである。土砂災害が発生した場合に、住民等の生命又は身体に危害が生ずるおそれがあると認められる土地の区域である「土砂災害警戒区域（イエローゾーン）」と、土砂災害警戒区域のうち、土砂災害が発生した場合には建築物の損壊が生じ、住民等の生命又は身体に著しい危害が生じるおそれがあると認められる土地の区域である「土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）」がある¹¹⁾。



図 1.1.7 土砂災害警戒区域等の指定の流れ¹¹⁾

令和4年6月末時点において、全国で基礎調査を実施し、公表済みの区域は、全国で約68万3千区域であり、そのうち、約67万8千区域（約99%）で土砂災害警戒区域等が指定されているが、都道府県別にみると、区域指定が9割程度に止まり、指定の手続きに時間を要している都道府県もある¹²⁾。基礎調査が完了し、結果が公表されているにもかかわらず、区域指定に向けた手続き中に土砂災害が発生した事例¹⁰⁾もあり、基礎調査完了後の速やかな区域指定が望まれる。また、令和元年東日本台風及び低気圧等に伴う大雨による土砂災害では、人的被害及び家屋被害が生じた259箇所のうち、約4割（112箇所）が土砂災害警戒区域等に指定されておらず¹⁰⁾、区域の指定基準や指定に係わる技術的な改良が必要である。

2) 土砂災害に関する避難の現状と課題

平成 30 年 7 月豪雨後に, 国土交通省が被災地域において実施したアンケート調査結果¹⁰⁾によれば, 自宅が土砂災害警戒区域に含まれているかを正しく認識できていたのは全体の約 2 割程度であり, 土砂災害警戒区域の中でも, 土砂災害のおそれがあることが十分に認識されていない。

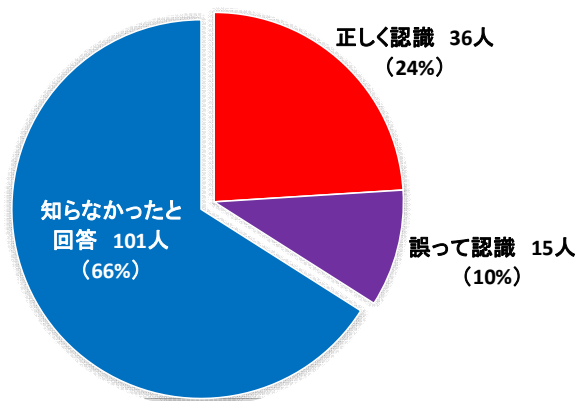


図 1.1.8 土砂災害警戒区域の認知状況¹⁰⁾

また, 県立広島大学の研究チームが実施した平成 30 年 7 月豪雨後のアンケート結果¹³⁾では, 避難しなかった理由として, 「自分の家は大丈夫だと思っていた」が 51.0%と最も高く, 次いで「避難する緊急性を感じなかった」が 41.1%となっており, 自分は大丈夫といった過信 (正常性バイアス) や間違った自己判断による避難の遅れ, 自分が居住する地域の災害リスクを十分に理解していないことにより, 避難行動をとっていない可能性が懸念される。

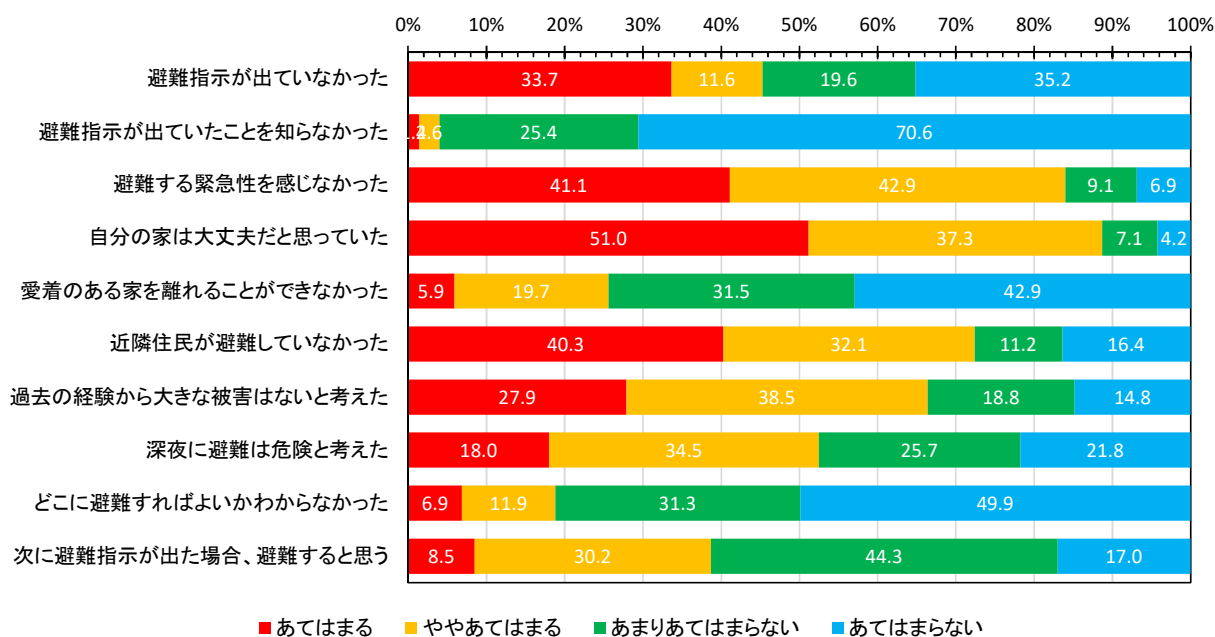


図 1.1.9 避難しなかった理由 (平成 30 年 7 月豪雨) のアンケート結果¹³⁾

日頃からの備え（日頃から知っているもの・準備していること）についてのアンケート結果¹³⁾では、「地区の避難場所」、「ハザードマップ」、「土砂災害警戒区域等の指定」を知っているが比較的多い、一方、「自治体の防災メールサービスの登録」や「防災訓練への参加」は低く、具体的な避難の判断や実際の避難行動に課題がみられる。

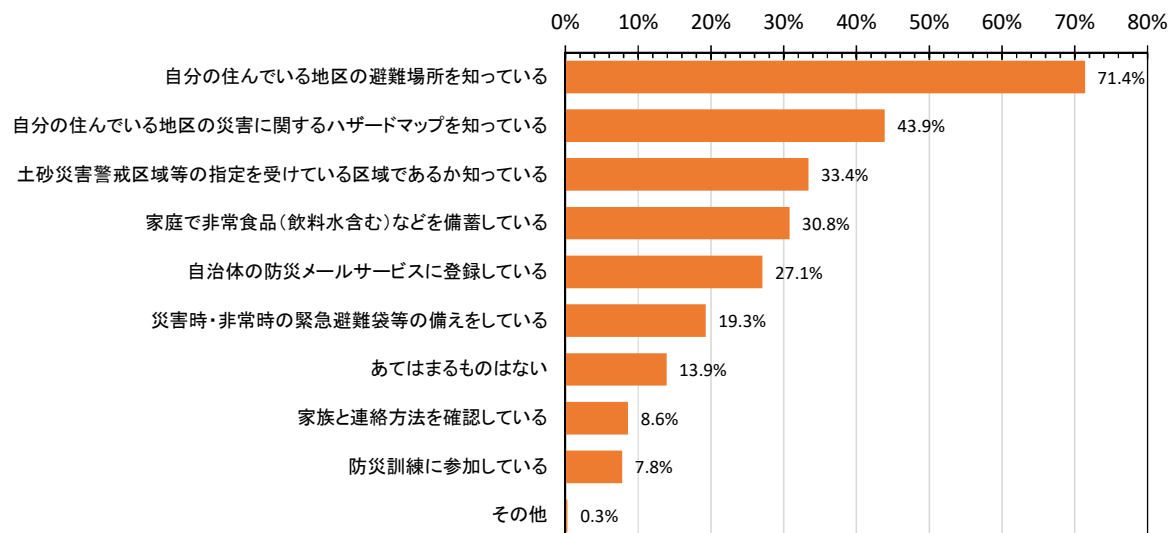


図 1.1.10 日頃からの備えに関するアンケート結果¹³⁾

避難場所を知っていても、避難しようとした際には、すでに周辺状況が危険で避難場所に到達できない場合等、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内における相対的な土砂災害リスクを評価し、柔軟的に避難路や避難場所を設定する必要がある。

平成 29 年 7 月九州北部豪雨や平成 30 年 7 月豪雨等に伴い発生した土砂災害を受け、顕在化している土砂災害の課題に関して、「社会資本整備審議会 河川分科会 土砂災害防止対策小委員会」が設置され、令和 2 年 3 月に「近年の土砂災害における課題等を踏まえた土砂災害対策のあり方について 答申」¹⁰⁾ がまとめられた。この答申では、比較的危険度の低い避難場所の確保等を支援するため、土砂災害警戒区域内の相対的な土砂災害の被害リスクを評価できるよう、数値計算による土石流等のシミュレーション等も含めて検討を深めるべきであるとまとめられている。

1.2 研究目的

以上のように、近年、短時間で高強度の豪雨や継続時間の長い降雨等によって発生した斜面崩壊により、土石流が発生し、溪流出口の宅地域が被災するケースが多くみられる。溪流出口に宅地が広がるような箇所では、土石流発生情報が得られても、遠方への避難は困難である。避難のための土石流の動態や土石流氾濫域の情報が不足している。

全国で指定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）は、ある一定レベルの精度で土砂の氾濫域を把握できるが、実際の土石流は、建物や道路の影響を受けて複雑な形状で氾濫する。土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内には多くの家屋が存在しており、実際に土石流が溪流で発生した時、「土石流が自宅まで来るのかどうか」、「来るのであれば、その土石流の深さや速さ」、「どこが安全か・どこに逃げるか」等の情報が不足している。

そこで、本研究では、家屋が密集するような宅地域での土石流の動態・氾濫特性の把握や避難・警戒のための情報提供を目的として、溪流出口の土石流氾濫域に開発された宅地域を対象に、家屋等の影響を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施し、家屋の存在や破壊が土石流の氾濫域に与える影響を検討する。また、土砂災害警戒区域等の中の相対的な土砂災害の被害リスクの評価を目的として、土石流の数値シミュレーションを用いた土石流の危険度評価手法を検討するとともに、土砂災害警戒区域等内にも多くの家屋が存在している現状を鑑み、災害に強いまちづくりのための土石流の数値シミュレーションの活用法について検討する。

1.3 論文構成

本論文は、本章を含め 7 章で構成され、各章の構成を以下に示す。

第 1 章では、研究の背景として、近年の土砂災害の現状と課題、土砂災害に関する警戒・避難の現状と課題を述べた上で、本論文の目的について概説した。

第 2 章では、本研究に関連する既往研究として、土石流の数値シミュレーションに関する研究、土石流の数値シミュレーションを用いた警戒・避難に関する研究を整理する。

第 3 章では、本研究で基本的に用いる土石流の数値シミュレーションモデルの概要について述べる。また、近年の土石流による家屋破壊実態について整理した上で、実際の被災直後の家屋の痕跡等から、家屋に作用する応力について考察し、土石流の数値シミュレーションにおいて家屋の破壊過程を考慮するための家屋破壊モデルについて提案する。

第 4 章では、第 3 章で構築した家屋の破壊過程を考慮するモデルを用い、実際の土石流災害における家屋の破壊状況の再現計算をすることで、現地への適用を検討する。再現計算は、平成 26 年 8 月豪雨により広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流と、平成 30 年 7 月豪雨により広島市安芸区矢野東の梅河団地で発生した土石流を対象にする。また、現状における土砂災害警戒区域等の課題を整理した上で、再現計算結果をもとに、実際に設定されている土砂災害警戒区域等の評価を行う。

第 5 章では、土石流の数値シミュレーションを用い、宅地域における家屋影響の有無による土石流の流動特性を検討するとともに、溪流上流域における土石流の発生条件による土石流氾濫リスクの空間分布を検討する。また、土石流による被害形態を整理した上で、土石流の数値シミュレーションを用いた新たな危険度評価手法を提案し、宅地域における家屋や道路の配置が土石流の被害形態に与える影響や土石流による危険度の空間分布を検討し、被害形態に着目した危険度の評価を行う。

第 6 章では、第 5 章で提案した危険度評価手法を用いて、宅地域における家屋配置の違いによる土石流危険度の空間分布を検討するとともに、まちづくりのためのハード・ソフト対策に関する土石流数値シミュレーションの活用法を検討する。

最後に第 7 章では、各章で得られた成果と知見をとりまとめ、結論を述べる。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ：過去の災害対応（平成 16 年～令和 4 年）.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/saigai_sokuhou.html
- 2) 国土交通省ホームページ：平成 25 年台風 26 号伊豆大島の土砂災害の概要.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/h25_typhoon26/izuooshimagaiyou131112.pdf
- 3) 国土交通省ホームページ：広島県で発生した土砂災害への対応状況.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/H26_hiroshima/141031_hiroshimadosaikiryu.pdf
- 4) 国土交通省ホームページ：平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害の概要.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf
- 5) 広島市ホームページ：平成 30 年 7 月豪雨災害の記録.
<https://www.city.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/54807.pdf>
- 6) 国土交通省ホームページ：平成 30 年 7 月豪雨による土砂災害の概要.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/H30_07gouu_gaiyou1807311800.pdf
- 7) 竹林洋史：広島市で発生した土石流の数値シミュレーションの事例と対策，地盤工学会誌，Vol.64，No.4，pp12-15，2016.
- 8) 広島県ホームページ：平成 26 年 8 月 20 日発生 8.20 土砂災害.
https://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/sonota/sabo/pdf/216_H26_820dosyasaigai.pdf
- 9) 国土交通省ホームページ：土砂災害警戒情報について.
<https://www.mlit.go.jp/common/001023998.pdf>
- 10) 社会資本整備審議会：近年の土砂災害における課題等を踏まえた土砂災害対策のあり方について 答申，2020.
- 11) 国土交通省ホームページ：土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等について.
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/gaiyou.pdf>
- 12) 国土交通省ホームページ：土砂災害警戒区域等の指定状況.
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/linksinpou.html>
- 13) 平成 30 年 7 月豪雨の避難意識と行動に関する調査（防災マーケティング研究チーム調査結果【速報】），広島県立大学大学院経営管理研究科，2018.
https://mba.pu-hiroshima.ac.jp/pdf/h30/180801a_bousaipress.pdf?r=180801

第2章 既往研究

2.1 概説

IPCC のレポート¹⁾によると、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、近年、短時間で高強度の豪雨の頻発化によって土砂災害の発生リスクや発生規模が増大していると考えられる。中でも、土石流による災害は、溪流源頭部から高速で流下した土石流が、溪流出口の宅地域で氾濫し、広範囲に家屋等が破壊されるため、地滑りやがけ崩れに比べ、甚大な被害が生じやすい。また、宅地域に流出した土石流は、家屋や道路等の影響で複雑に氾濫するため、効果的な対策を行うためには、土石流氾濫域又は宅地域での土石流の動態を把握した上で、ハード面・ソフト面での対策が必要となってくる。

土石流の対策を検討する上で必要となる情報としては、土石流の氾濫域、流動深、流速、土砂量等である。これらの情報は、被災後であれば、現地調査により、ある程度の情報は得られるものの、土石流発生から停止までの時系列・空間的な変化までは得られず、そもそも被災経験のない溪流等では、土砂災害警戒区域等で知ることができる想定される氾濫域の情報のみであり、その他の情報を得ることはできない。その点、土石流の数値シミュレーションは、溪流上流域の土砂の情報や氾濫域も含めた地形データを取得するだけで、時々刻々と変化する土石流の流動深や流速、氾濫域等を追跡することが可能で、効率的で効果的なハード面・ソフト面の土石流対策を検討するための情報を提供することができ、非常に有効なツールとなる。

近年、土石流の数値シミュレーションは、GUI を装備し、出力としてアニメーションや Google Earth 上への表示も容易に可能となっているものもあり、研究や実務の場においても多く用いられてきている。そのほとんどが、砂防施設の効果等のハード面の対策に活用されている事例が多いが、土石流の発生・流動・堆積過程を視覚的に捉えることができるため、警戒・避難等のソフト面の対策についても、土石流に関する数値シミュレーションの活用が有効である。

本章では、近年、多く用いられている GUI を実装した土石流の数値シミュレーションモデルに関する既往研究成果について整理する。また、土石流の数値シミュレーションの活用に関し、特に、土石流の危険度評価や避難計画の立案等に土石流の数値シミュレーションを用いた既往研究成果について整理する。

2.2 土石流の数値シミュレーションに関する研究

1) 既往の土石流の数値シミュレーション

渓流出口の扇状地や土石流氾濫域を対象にした土石流の数値シミュレーション（平面 2 次元モデル）については、1980 年代中頃より盛んに研究が進められ、これまでに様々なモデル^{2)~15)}が開発されている。これらの多くは、模型実験や実際に発生した土石流災害の再現計算、砂防施設の効果・機能評価等に用いられ、現地調査や観測、模型実験の結果だけでは得られないような多くの情報が提供されている。

高橋ら²⁾は、土石流は停止するまでは、土砂と水が一体となった連続流体の挙動をしており、平面 2 次元流れの解析では抵抗項の違いを別にすれば、水流に対するものと同様に取り扱うことができるとして、実験や実際の土石流氾濫に対して、十分な再現性を持っていることを示した。また、水山ら^{3),4)}、福田ら⁵⁾は、土石流の氾濫シミュレーションと水理模型実験との比較を行い、土石流氾濫範囲の再現性を検討するとともに、計画中の土石流対策施設の効果を評価している。これらのモデルは、渓流出口付近から下流の土石流氾濫域を対象としたものがほとんどである。一方、高橋⁶⁾ら、中川ら⁷⁾、江頭⁸⁾らは、渓床堆積物の浸食・堆積による土石流ハイドログラフ及び土砂濃度の変化を 1 次元解析で求め、これを渓流出口での境界条件として土石流氾濫域上の氾濫・堆積を平面 2 次元解析で求めるシミュレーション手法を用い、実際に発生した土石流災害の事例に適用し、再現性を確認している。しかし、1 次元解析の川幅は被災後の渓流の浸食幅をもとに一定として設定されている場合が多く、この手法を被災していない渓流等へ適用する場合は、川幅の設定方法等の合理的な説明が困難である。

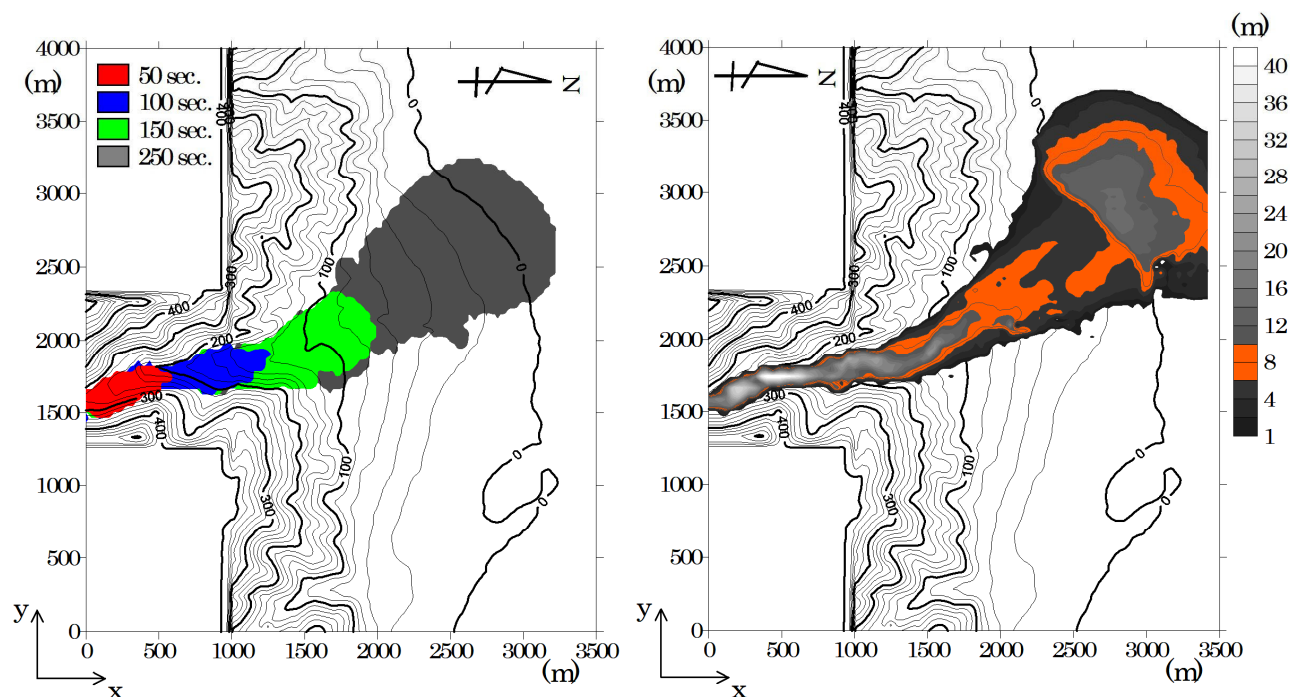


図 2.2.1 扇状地における土石流の時間的広がり（左）と最大流動深の分布（右）⁸⁾

一方, Armanini ら⁹⁾, Crosta ら¹⁰⁾, Han ら¹¹⁾ は, 溪流部分も含めた 2 次元解析を行うことで, 基盤岩上の不安定土砂の層が厚く, 地形の勾配が急な場合, 側岸からの土砂の巻き込みを考慮した解析を行っている。

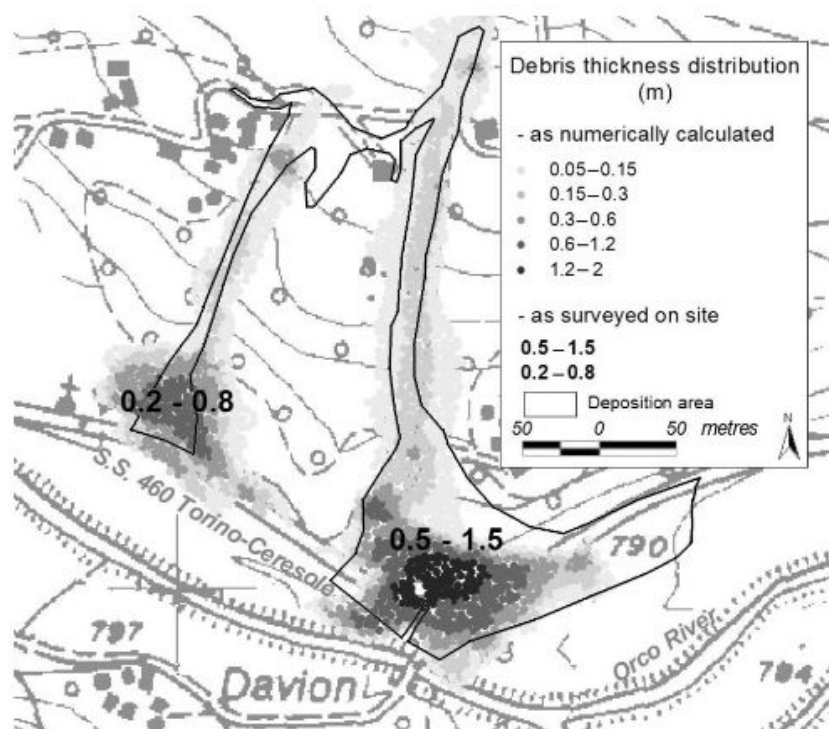


図 2.2.2 数値計算による堆積深分布と現地調査による堆積深分布の比較¹²⁾

また, Pirulli ら¹²⁾ は, 2000 年にイタリアアルプス北西部で発生した土石流の数値シミュレーションを行い, 最終的な堆積深分布の再現性を確認している. Chiang ら¹³⁾ は, 2009 年 8 月に台湾を襲った台風モーラコットによる地滑りと土石流の数値シミュレーションを行い, 浸水域と堆積土砂量を予測している. Vagnon ら¹⁴⁾ は, Pirulli ら¹²⁾ と同様の土石流を対象に, 同じパラメータ, 同じ基礎式を実装しているが, 異なる 2 つの水深平均数値モデルの比較を行っている。

これらの数値シミュレーションモデルの多くは, 実際に発生した土石流災害の再現を行っているが, 土石流の氾濫域に含まれる建物の存在を無視している. 実際の土石流は, 氾濫域の建物や道路の影響を受け, より複雑な形状で氾濫する. 竹林ら¹⁵⁾ は, 災害後に破壊されなかった建物を不透過性の非破壊構造物として解析に考慮しており, 建物の存在を無視した場合と比較して, 土石流の氾濫域の再現精度を飛躍的に向上させている. しかし, この手法は土石流による建物の破壊の有無を考慮していないため, 土石流による被害が発生し, 解析前に建物の破壊の有無の情報が得られている居住地域にしか適用できない。

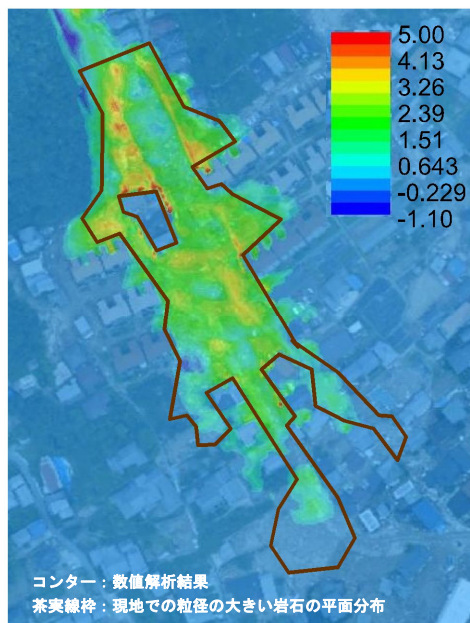


図 2.2.3 地盤高変化の平面分布¹⁵⁾

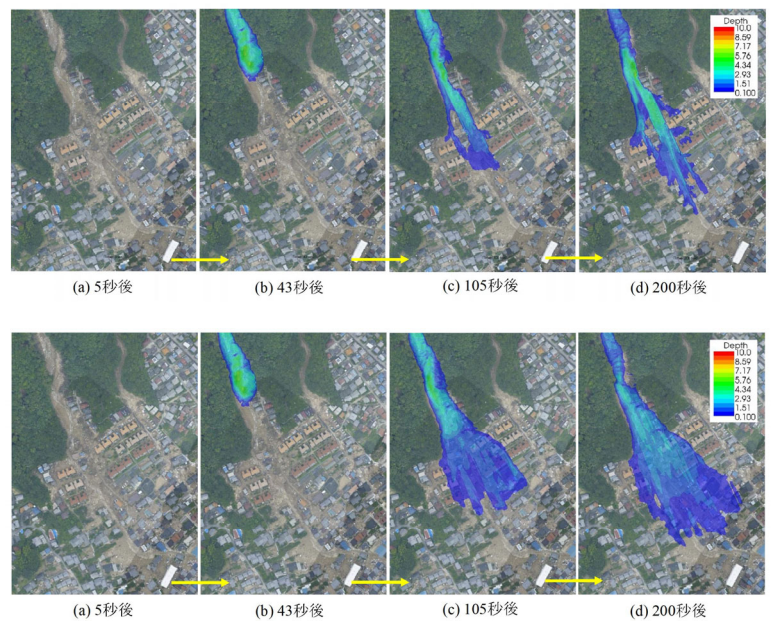


図 2.2.4 土石流の流動深の時空間的变化¹⁵⁾
(上段：家屋考慮あり，下段：家屋考慮なし)

2) GIS や GUI を実装した土石流シミュレータ

近年では、LP データや DEM（数値標高モデル）等も土石流の数値シミュレーションに用いられるようになり、データ作成に GIS を利用したものや、入出力に GUI を実装した汎用性の高いシミュレータの開発も行われている。

Wang ら¹⁶⁾ は、2003 年 7 月九州南部の水俣市で発生した土石流を対象に、GIS 技術と組み合わせた数値シミュレーション手法を適用し、現地調査と比較して妥当な結果を得ている。GIS 技術と数値シミュレーションを組み合わせることにより、計算データを作成するための前処理、計算後の可視化、結果分析、そしてリスク分析やハザードマップ作成のための効果的なツールとなる。Beguiria ら¹⁷⁾ は、GIS 環境で実装されている 2 次元モデル「MassMov2D」をオーストリア・チロル州（ヴァルトシェンバッハ川）とフランス・アルプス山脈（フォーコン川）の 2 つの扇状地における土石流に適用し、土石流流量、流入流量、堆積量に関する既存データを用いて、これらの事象を逆解析することで、主要パラメータの値を推定している。GIS を用いることで、入力ファイルの準備と解析結果の出力が容易になり、数値計算の専門家でない人でも使いやすいインターフェイスを実現している。Jian¹⁸⁾ らは、2010 年 10 月に奄美大島で発生した土石流を対象に、GIS を組み込んだ数値シミュレーションを適用している。シミュレーション用のグリッドネットワークを GIS ラスターデータから抽出でき、シミュレーション結果を GIS に変換して土石流ハザードマップを作成することが可能である。

中谷ら¹⁹⁾ は、GUI を実装した汎用土石流シミュレータ「kanako」を開発している。「kanako」は、初期条件入力や計算結果表示を担うインターフェイス部分と、シミュレーションを行う計算部分

を併せ持つ。インターフェイス部分では、利用者が計算条件などを簡単に入力し、シミュレーション結果を直感的に把握できるよう、マウスによる入力、及びグラフィックを多用した GUI を実装している。また、シミュレーション部分の土石流の流動・堆積過程に関する支配方程式として高橋ら⁶⁾のモデルが使用され、和田ら²⁰⁾によって提案された「結合モデル」が採用されている。「結合モデル」では、1次元計算領域下流端の境界条件に平面2次元計算領域を反映させており、従来と比較してより合理的な計算が可能となっている。

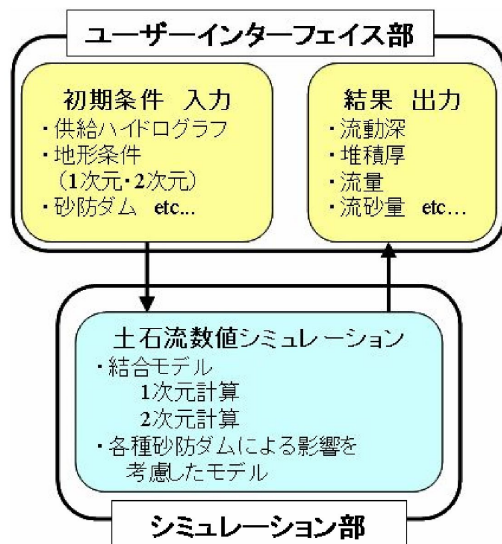


図 2.2.5 システム諸機能関連図¹⁹⁾

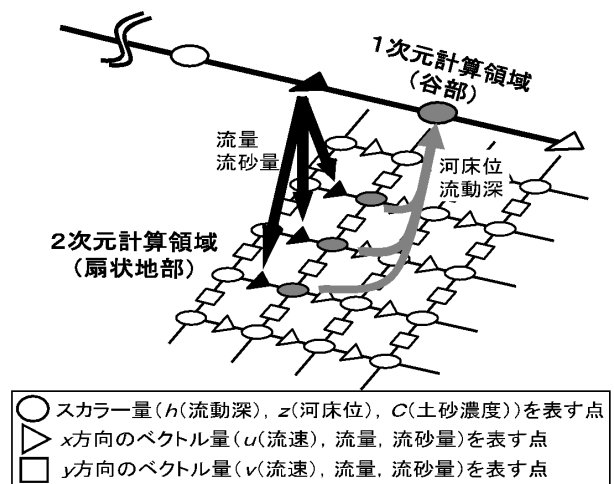


図 2.2.6 結合モデルの概略²⁰⁾

また、中谷ら²¹⁾は、GUI を実装した汎用土石流シミュレータ「kanako」を、京都市右京区水尾地区の実地形に適用し、土石流危険渓流である水尾川における土石流の流動・堆積領域での被害状況推定や対策施設計画、施設効果の検証を行っている。水尾川での計算結果から、土石流が発生した場合に保全対象に被害を及ぼす氾濫が起こりうることを確認され、適切な砂防堰堤や導流工などの砂防施設を設置することによって、被害が大幅に軽減されることを導いている。

堀内ら²²⁾は、土石流シミュレーションは1次元及び平面2次元計算を連続して計算できる「kanako」のプログラムをベースに、高精度のLPデータ等の地形データに柔軟に対応できるGISシステムを活用し、土石流シミュレーションを簡便かつ精度よく実行するための統合型システム「Hyper KANAKO」を開発した。従来、土石流シミュレーションを実施するには、データ作成からシミュレーションの実施、結果の保存まで多くの工程があり、特に平面2次元地形データを作成する工程には時間と手間がかかっていた。「Hyper KANAKO」では、使用する地形モデルのソースをLPデータとすることにより、その取得・入力にかかる時間や手間を大幅に短縮するとともに、2次元地形データのメッシュ数や1メッシュのサイズに関してフレキシブルなデータ作成が可能な仕組みとなっている。

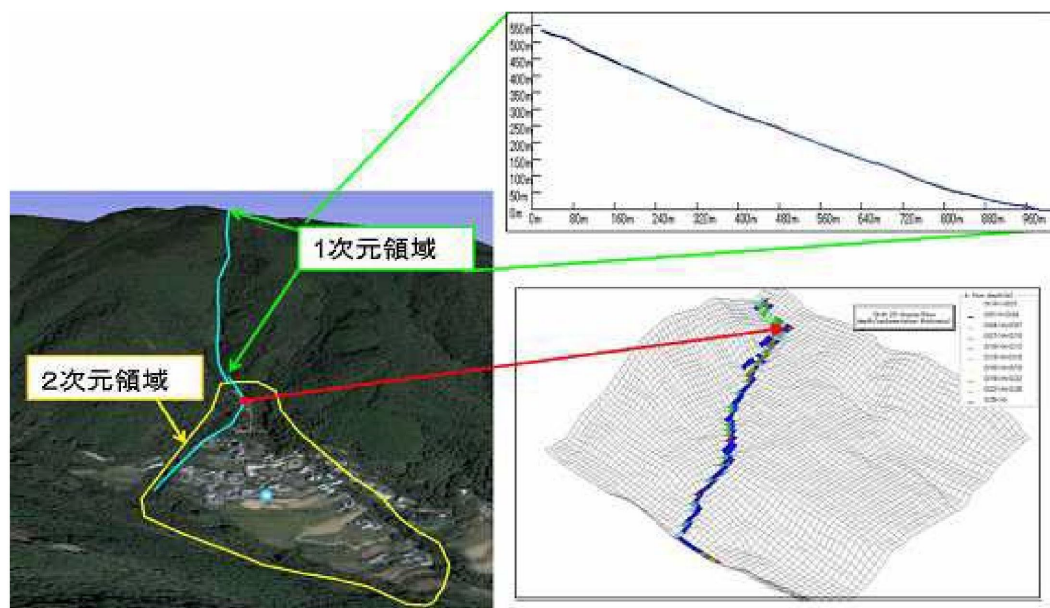


図 2.2.7 水尾地区（左図）と kanako での 1 次元領域（右上図）、2 次元領域（右下図）の対応 ²¹⁾

「Hyper KANAKO」は、GUI を実装し、GIS システムを活用することで、インターフェイス部分は汎用性を有しているが、シミュレーション部分については、支配方程式として高橋ら ⁶⁾ のモデルが使用され、急勾配である山地の溪流部を 1 次元、緩勾配となる扇状地の氾濫原を平面 2 次元で表現する必要がある。両者を結合することで土石流の一連の流動を表現しているが、溪流部は 1 次元の枠組みで流路や流動幅等は固定化され、土砂量についても、シミュレーションを実行する前に初期条件として設定しておく必要がある。土石流被害の再現計算を行うなど、被災後、溪流部の情報や氾濫した土砂量等が得られる場合は問題ないが、予測計算として、被災していない溪流等へ適用する場合に、溪流の流路や流動幅、土砂量等を合理的に設定する方法や地形・流動幅変化等の影響によって宅地域に流入する土石流ハイドログラフの変化を評価できないなどの課題は残る。

竹林 ²³⁾ は、フリーの解析インターフェイス iRIC ²⁴⁾ のソルバーとして導入された平面 2 次元土石流シミュレーションモデルである「Morpho2DH」を開発している。iRIC ²⁴⁾ は、河川に関するシミュレーションをサポートする統合環境であり、必要な入力情報の作成から解析の実行、解析結果の表示までの諸作業を統合された環境下で一貫して行えるソフトウェアである。プリプロセッサー、ソルバー、ポストプロセッサーの 3 つの機能から構成されており、2 次元又は 3 次元の流況解析や河床解析など様々なソルバーを搭載され、GUI でプリプロセッサー処理（メッシュ作成や地形、粗度、構造物データ作成など）から、ポストプロセッサー処理（平面分布図、コンター図、アニメーションなど）を一貫して実行することができる。

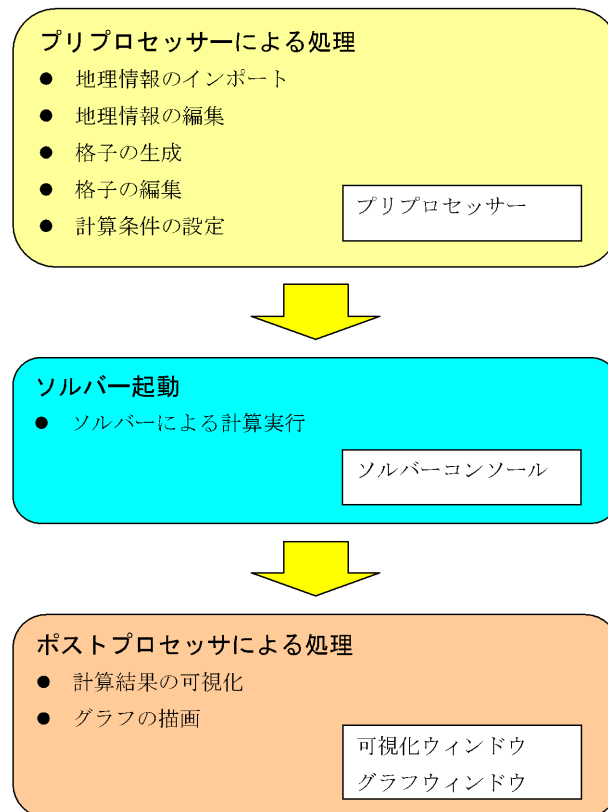


図 2.2.8 iRIC を用いた処理の流れ ²⁵⁾

iRIC に導入されている土石流シミュレーションモデル「Morpho2DH」は、土石流が斜面崩壊発生地点から斜面・溪流を流動して宅地などの緩勾配域で堆積するまでの過程全てを平面 2 次元で解析する数値シミュレーションモデルであり、以下のような機能や現象を考慮したシミュレーションが可能である ²⁶⁾。

- 複数の崩壊及び複数の支川
- 溪床・河岸の浸食
- 砂防ダムや治山ダムによる土砂の捕捉
- 家屋や建物による遮蔽
- 溪流及び宅地における土石流ハイドログラフの自動計算
- 一般曲線格子の使用

また、iRIC インターフェイスは、国土地理院等の DEM データや衛星写真のダウンロード、Google Earth に解析結果の画像や動画を出力することができる ²⁶⁾。

竹林ら^{27)~28)}は、平成30年7月に広島市安芸区矢野東²⁷⁾及び安芸郡熊野町²⁸⁾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、iRIC-Morpho2DHを用いた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ている。広島市安芸区矢野東²⁷⁾では、斜面崩壊は北側の溪流の山頂付近に1箇所、南側の溪流の山頂付近に2箇所の計3箇所を考慮し、現地の状況から、南側の溪流の2箇所の斜面崩壊が最初に同時に発生し、後から北側の溪流の斜面崩壊が発生させた解析を行い、2つの溪流が合流した地点に設置してある土石流の捕捉機能を有した治山ダムに流れ込んだ土石流が、治山ダムに堆積するするとともに、一部は治山ダムを乗り越えて下流の宅地（梅河団地）に流れ込んでいる状況を再現している。

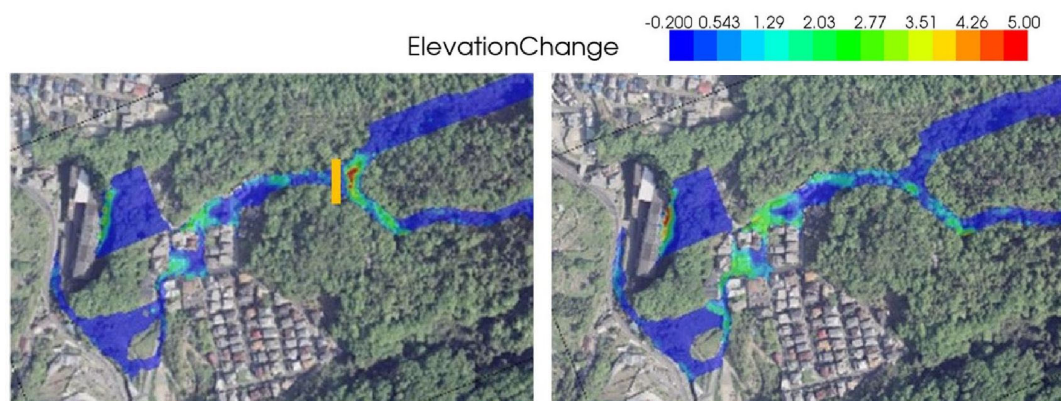


図 2.2.9 地盤高変動量の平面分布（280 秒後）（左：治山ダムあり，右：治山ダムなし）²⁷⁾

また、広島県安芸郡熊野町²⁸⁾では、山頂付近に2箇所、中腹付近に1箇所の計3箇所の斜面崩壊を考慮し、山頂付近の2箇所から発生した土石流が中腹付近で合流・分派して、2つの溪流に分かれて宅地へ流入している状況を検討している。このように、土石流の流下過程において合流や分派の現象を再現できるのは、斜面崩壊発生地点から斜面・溪流を流動して宅地などの緩勾配域で堆積するまでの過程全てを平面2次元で解析する「Morpho2DH」の特徴といえる。

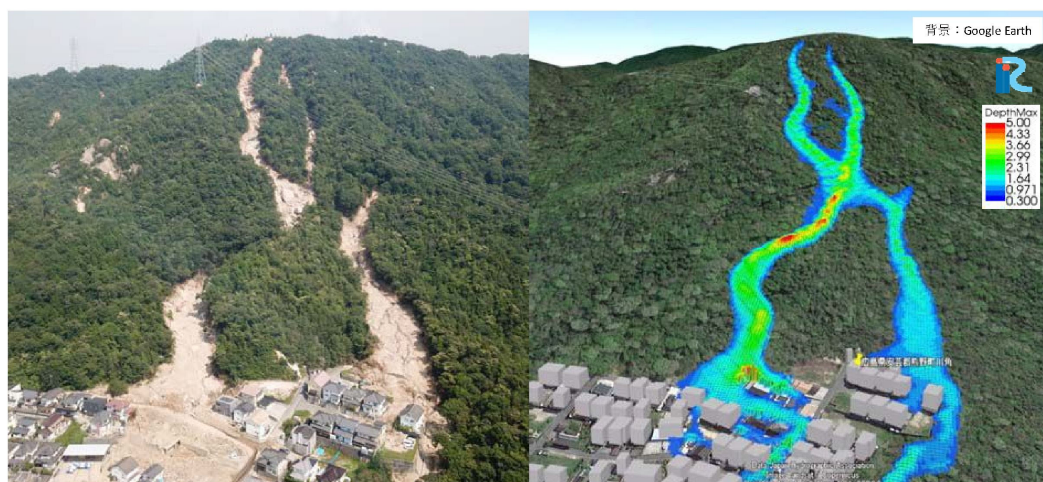


図 2.2.10 土石流による現地の浸食領域と解析結果（左：現地状況，右：解析結果）²⁸⁾

また、Takebayashi ら²⁹⁾ は、一般曲線座標系において土石流の基礎方程式を導出し、河川や谷の平面形状に沿った格子を用いた土石流の数値シミュレーションモデルを開発している。一般曲線座標系の基礎方程式を用いたモデルは、直交座標系の基礎方程式を用いたモデルと比較して、流動深、流速、流量の再現性を向上させることができることを示している。

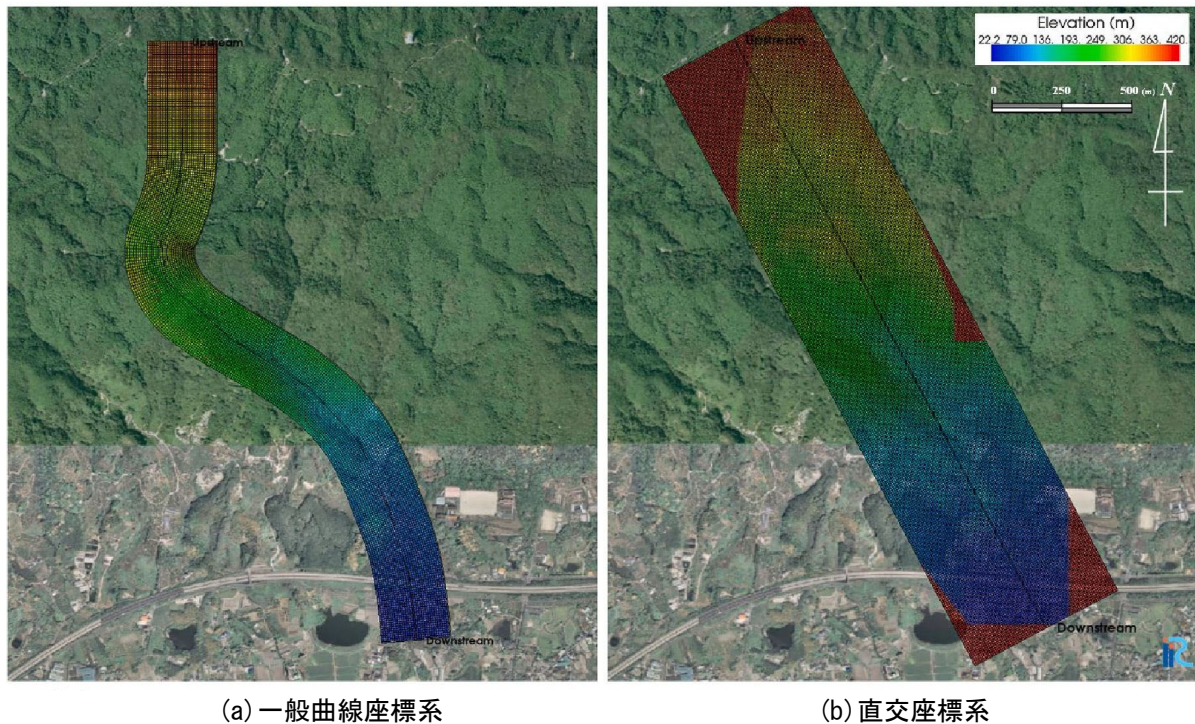


図 2.2.11 解析に用いられた格子と地形標高²⁹⁾

「iRIC-Morpho2DH」は、斜面崩壊地点を発端として発生した土石流が、溪床や河岸を浸食しながら発達し宅地などの緩勾配域で堆積するまでの過程全てを平面 2 次元で表現しており、土石流の流下過程において、地形に応じて合流や分派の現象も表現できる。

2.3 土石流の数値シミュレーションを用いた警戒・避難に関する研究

渓流出口等に開発された宅地域等において土石流対策を講じる場合、住民に土石流の危険性について正しい情報を提供し、適切な避難を実施することにより被害を最小限にとどめようとするソフト対策が重要である。その際、いつどのような規模の土石流が発生し、どのような範囲にどのような深さ・流速で土石流が氾濫・堆積するかを予め知っておくことは、ソフト・ハード対策を講じる上で重要である。このような問題に対する一つの方法として土石流の数値シミュレーションを用いた解析が挙げられる。土石流の数値シミュレーションについては、前項において整理したが、そのほとんどが模型実験や実際に発生した土石流災害の再現計算、砂防施設の効果・機能評価等に用いられることが多く、現地を対象として、警戒・避難等のソフト対策に土石流の数値シミュレーションを用いた研究は少ない。

そこで、ここでは、実際に土石流により被災した地区等を対象とし、土石流の数値シミュレーションを用いた警戒・避難に関する既往研究成果について整理する。

高橋ら³⁰⁾は、土砂災害のハザードマップ、リスクマップを作成する上で、数値シミュレーションが有効であることを示し、実際の流域を対象に、具体的なシミュレーション手法、及び危険度ランク別の危険度評価を行っている。昭和54年8月22日に土石流が発生した岐阜県上宝村栃尾の洞谷扇状地を対象（総流出土砂量は約70,000m³）とし、扇状地上に存在していた家屋群を考慮した場合と、家屋が存在していなかったと仮定した場合の計算結果を示し、両方の場合について危険度評価を行って、それらの結果を総合的に判断するのがよいとしている。

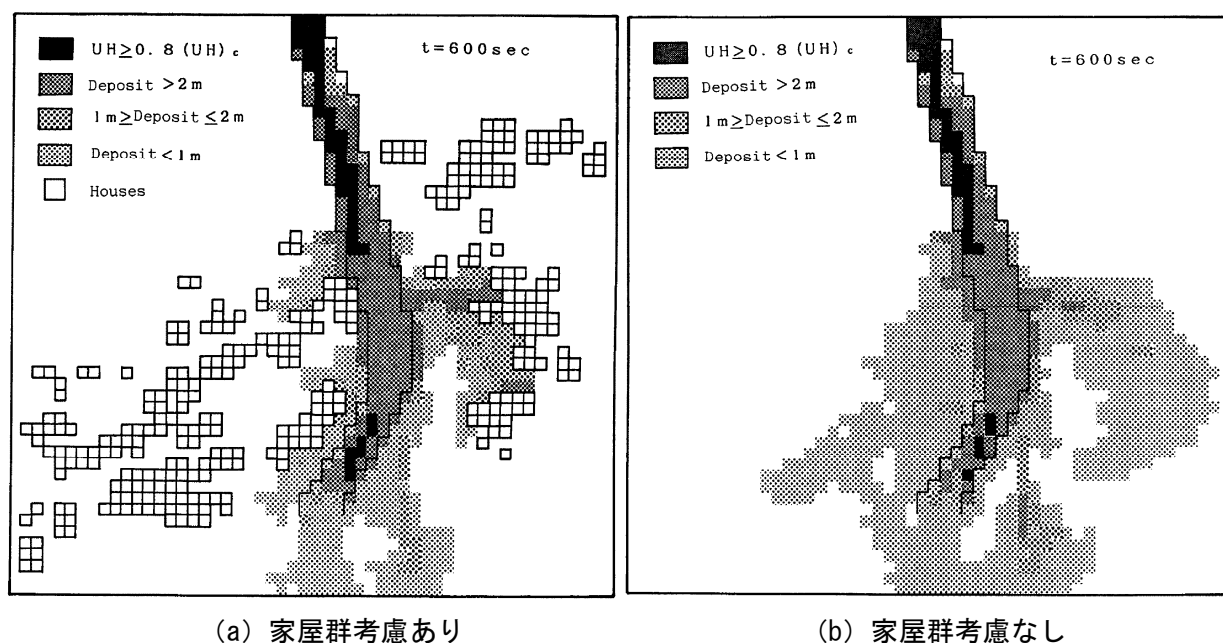


図 2.3.1 危険度マップ³⁰⁾

なお、危険度ランクは以下のとおり 4 区分としている。

- I : 家屋流出, 土石流先端部の到達範囲
- II : 2m 以上の土砂堆積
- III : 2m~1m の土砂堆積
- IV : 1m 未満の土砂堆積

これらの手法は、土石流氾濫域に存在する家屋等の影響は考慮しているものの、土石流規模（流量）の条件としては、実績規模の 1 ケースであり、土石流の規模別の発生頻度等を加味した総合的な危険度評価とはなっていない。

また、中川ら^{31),32)}は、上記と同様の洞谷流域を対象に、支川上流源頭部における崩壊発生箇所を支川①、支川②の 2 箇所想定し、支川①の源頭部で崩壊が発生した場合（CASE1）と支川①と支川②の源頭部の崩壊が同時に発生した場合（CASE2）について、源頭部から渓流出口までの 1 次元モデルにより求めた土石流ハイドログラフを境界条件として与え、扇状地での土石流の氾濫・堆積のシミュレーション予測を行っている。CASE2 の場合、土石流のピーク流量は CASE1 の約 2 倍、流出流量が約 1.4 倍となったが、土石流の氾濫・堆積規模は両者とも類似しており、この流域での土石流氾濫・堆積の基本的な特徴がこの結果によって表されたとしている。しかし、流域の地形や河道条件によっては、氾濫・堆積範囲が大いに変化することが考えられ、流域に応じてこのような感度分析を実施し、どのように総合的な危険度評価に繋げていくかが課題として残る。

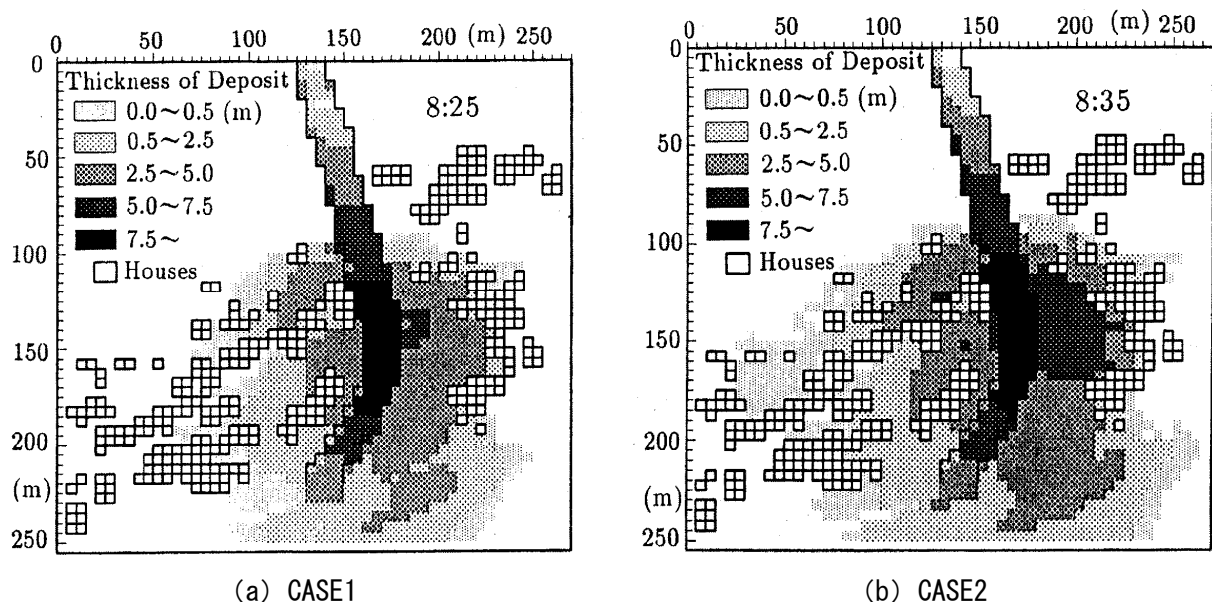


図 2.3.2 土石流氾濫・堆積の計算結果³²⁾

糸数ら³³⁾は、土砂災害発生時の避難経路や避難所の安全性を事前把握しておくことは、避難行動（垂直避難・水平避難）や避難経路を選択する上で重要な事項であることを指摘した上で、京都市内の土石流危険渓流を対象に、「Hyper KANAKO」²²⁾を用いて、家屋のほか、流路工等も考慮した上

で土石流シミュレーションを実施し、土砂の堆積範囲や浸水範囲をもとに土石流発生時の避難経路や避難所の安全性の検討を行っている。

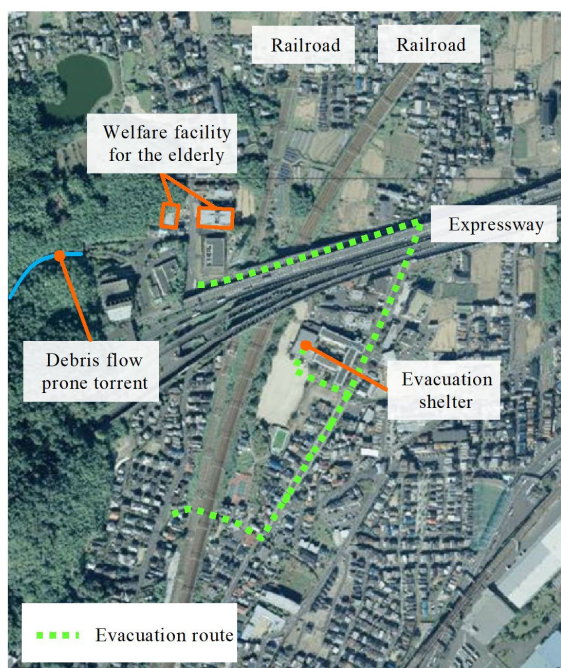


図 2.3.3 避難経路³³⁾

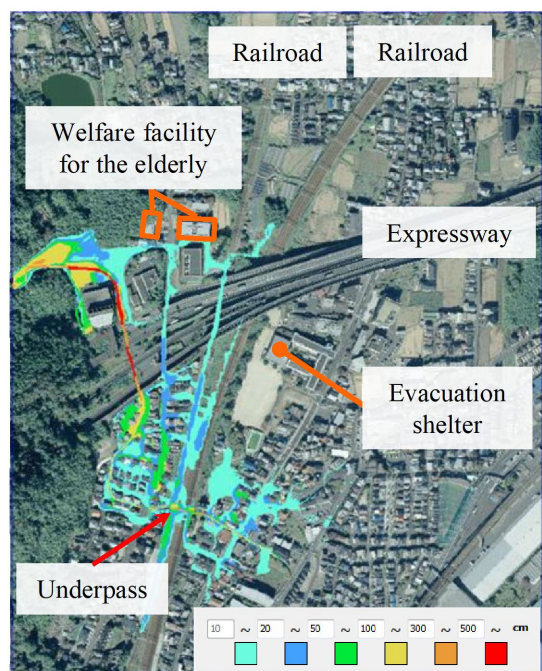


図 2.3.4 土石流痕跡の解析結果³³⁾

100 年確率規模の時間雨量によって土石流が発生した場合、要配慮者利用施設から避難所までの避難経路の一部が浸水、土砂が堆積することや、氾濫水が道路上や線路上を流下して線路下のアンダーパスに集中する結果を示し、避難所までの避難経路の安全性について、重要な情報を提供している。

長谷川ら³⁴⁾は、平成 30 年 7 月豪雨で土石流が発生した広島市安芸区矢野東の 13, 14 渓流を対象に、複数段階の土砂量やピーク流量の規模を設定した複数シナリオを考慮し、土砂災害警戒区域内の相対的な危険度分布を示す方法を提案している。土石流の数値シミュレーションモデルについては、GIS と連携した「Hyper KANAKO」²²⁾を用い、地形データに DEM（植生や建物等を除いた地盤高データ）と DSM（建物等の標高が反映された地盤高データ）を用いることで建物の影響を考慮している。境界条件としては、一次元領域の上流端から水と土砂を供給するが、土石流のシナリオを設定するにあたり、最小土砂量を 1,000m³として、最大土砂量を基礎調査の約 3 倍まで想定（1,000m³刻み）し、上流端から供給するハイドログラフは三角形形状として与えている。

表 2.3.1 計算ケース一覧表³⁴⁾

渓流	土砂量 m ³ 空隙込	ピーク流量 m ³ /s	地形 データ
13 渓流	1,000-6,000 (6 ケース)	11.4-68.6	DSM
	1,000-12,000 (12 ケース)	11.4-137.1	
	1,000-18,000 (18 ケース)	11.4-205.7	DEM
4 渓流	1,000-7,000 (7 ケース)	11.4-80.0	DSM
	1,000-14,000 (14 ケース)	11.4-160.0	
	1,000-21,000 (21 ケース)	11.4-240.0	DEM

危険度分布については、シミュレーション結果より、各計算メッシュで最大水位が閾値（0.5m, 1.0m）を超えたケースを計数して、その回数をケース数で除すことで最大水位の頻度分布を求めている。

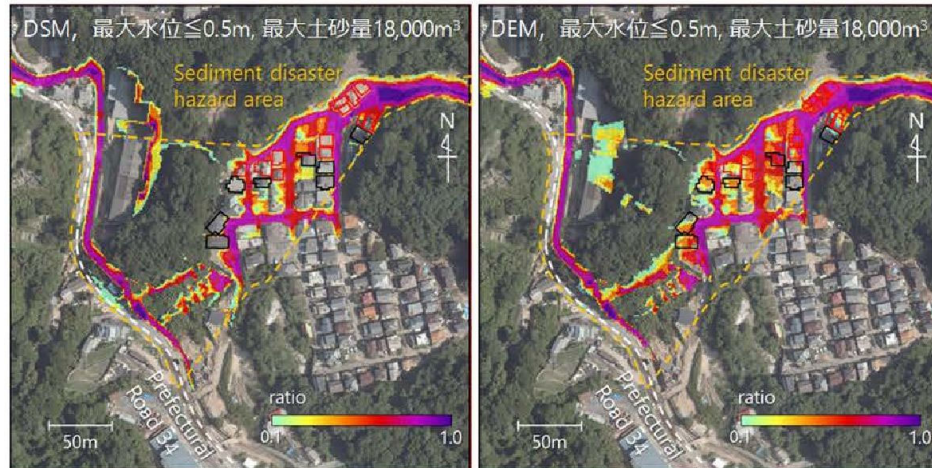


図 2.3.5 最大水位の頻度分布 ³⁴⁾

複数の土石流規模による最大水位を重ねて頻度分布を作成した結果、危険側の条件として最大土砂量を多く、閾値を小さくすることで、頻度分布から相対的な危険度の高低が示され、危険度分布をより明確に示すことができ、また、土砂災害警戒区域内で相対的に危険度が低い場所を示すことができるとしている。

さらに、長谷川ら ³⁵⁾ は、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て、「Hyper KANAKO」²²⁾ を用い、異なる土石流の規模（流量 5 ケース、土砂量 5 ケースの組み合わせ 25 ケース）や建物破壊の有無（DSM と DEM の 2 ケースの地形データ）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、建物被害の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いる。家屋破壊の指標となる流体力 F (N/m) は、以下の式で表される。

$$F = \rho \cdot h \cdot u^2$$

ここに、 ρ ：土石流の密度 (kg/m³)、 h ：流動深 (m)、 u ：流速 (m/s) である。

流体力 F については、津波による建物被害に関する既往研究より、木造・鉄骨の建物被害が急増する 50kN/m を閾値とし、危険度分布の評価方法としては、DSM と DEM の各 25 ケースの計算結果と二つの地形データを合わせた 50 メースの計算結果より、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除した「閾値を超過する確率」を指標として評価している。また、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できる。

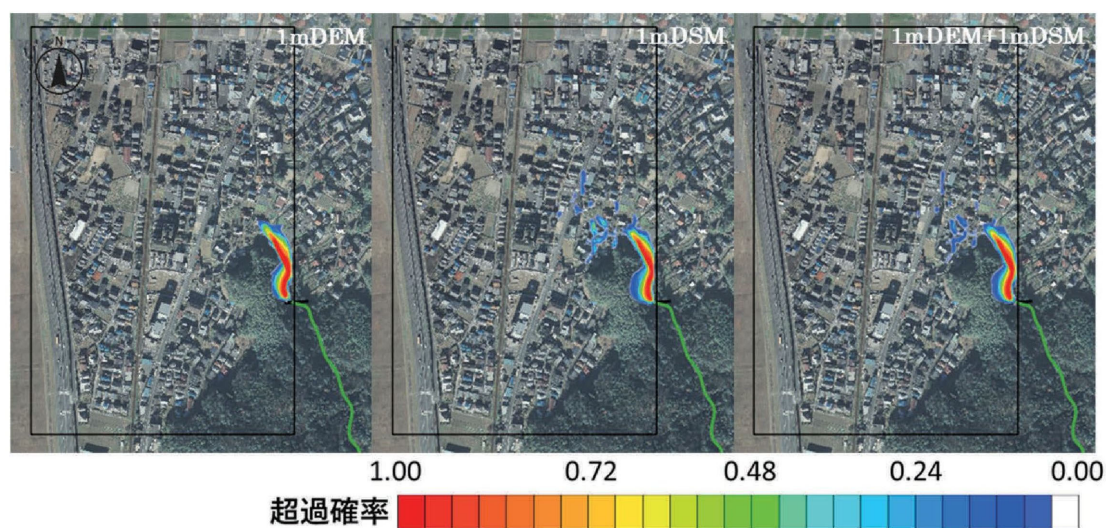


図 2.3.6 流体力 50kN/m を閾値とした危険度分布³⁵⁾

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、住宅地内の詳細な危険度分布を示す方法を提案しているが、シナリオや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と述べている。

糸数ら³³⁾、長谷川ら^{34)~35)}は、数値シミュレーションモデルとして「Hyper KANAKO」²²⁾を用いているため、境界条件として 1 次元領域の上流端から水と土砂量を与える必要がある。危険度評価を検討する場合、複数ケース組み合わせて、土石流シナリオを設定する必要があるため、別途、水のハイドログラフと土砂量を想定しておく必要があるなど、被災履歴がなく、土砂生産域の十分な情報が得られない溪流への適用等については課題が残る。土石流の氾濫特性を踏まえた最適な避難場所・避難経路の設定、避難計画への適用等についても、上記、土石流シナリオの設定方法によるところが多い。

2.4 結語

本章では、本研究に関連する既往研究として、土石流の数値シミュレーションに関する研究、土石流の数値シミュレーションを用いた警戒・避難に関する研究を整理した。

土石流の数値シミュレーションに関する研究では、1980年代中頃より進められてきた様々な数値シミュレーションについて整理した。また、近年、研究・実務において多く用いられている GUI を実装した汎用土石流シミュレータについて、それぞれのモデルの特徴、主に土石流災害の再現計算の研究事例について整理し、GUI を実装したシミュレータとしての機能や土石流対策のハード面・ソフト面における土石流の数値シミュレーションの活用法の様々な可能性について示した。「Hyper KANAKO」は、急勾配である山地の溪流部を 1 次元、緩勾配となる扇状地の氾濫原を 2 次元で表現し、両者を結合することで土石流の一連の流動を表現している。しかし、溪流部は 1 次元の枠組みで流路や流動幅等は固定化されており、地形や流動幅変化による土石流ハイドログラフの変化を評価できないなどの課題は残る。一方、「iRIC-Morpho2DH」は、土石流が斜面崩壊発生地点から斜面・溪流を流動して宅地などの緩勾配域で堆積するまでの過程全てを 2 次元で表現しており、土石流の流下過程において、地形に応じて合流や分派の現象も表現できる。

土石流の数値シミュレーションを用いた警戒・避難に関する研究では、土石流のソフト対策を講じる際に、住民に土石流の危険性についてより詳しい情報を提供し、適切な避難行動に繋げるための研究事例について整理し、土石流氾濫原の危険度評価や指定されている避難場所・避難経路の安全性評価、避難計画の立案等に、土石流の数値シミュレーションの活用が有用であることを示した。土石流氾濫原の危険度評価では、土石流氾濫域や土砂災害警戒区域内においても、家屋の有無や構造物の影響等により、土石流による危険度に分布がみられることが分かり、住民への有用な情報となり得る。しかし、前提となる数値シミュレーションを実施する上では、境界条件として 1 次元領域の上流端から水と土砂量を複数ケース組み合わせ、土石流シナリオを設定する必要があるため、別途、水のハイドログラフと土砂量を想定しておく必要があるなど、被災履歴がなく、土砂生産域の十分な情報が得られない溪流への適用等については課題が残る。土石流の氾濫特性を踏まえた最適な避難場所・避難経路の設定、避難計画への適用等についても、上記、土石流シナリオの設定方法によるところが多い。

以上を踏まえ、本研究では、土石流の発生・流動・堆積の全ての過程を平面 2 次元で表現できる「iRIC-Morpho2DH」を用いることを基本とし、宅地域の家屋の影響や土石流シナリオの設定の違いによる土石流の氾濫特性について検討する。また、新たな危険度評価手法を検討し、その活用方法について提案する。

参考文献

- 1) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) : 第 5 次評価報告書統合報告書 政策決定者向け要約, 2014.
- 2) 高橋保, 辻本浩史 : 土石流氾濫・堆積の数値シミュレーション, 京都大学防災研究所年報, No.27, B-2, pp.467-485, 1984.
- 3) 水山高久, 阿部宗平, 下東久巳 : 土石流氾濫シミュレーションと模型実験による土石流災害の再現, 砂防学会誌, Vol.40, No.3, pp.17-22, 1987.
- 4) 水山高久, 北原一平, 原義文 : 土石流氾濫シミュレーションモデルによる土石流対策工の効果評価, 砂防学会誌, Vol.40, No.5, pp.14-21, 1988.
- 5) 福田義昭, 渡邊康玄, 星清 : 土石流氾濫シミュレーションモデルの適用検討, 開発土木研究所月報, No.421, pp.14-26, 1988.
- 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, pp.12-19, 1991.
- 7) 中川一, 高橋保, 里深好文, 川池健司 : 1999 年ベネズエラのカムリグランデ流域で発生した土砂災害について—数値シミュレーションによる再現計算と砂防施設配置効果の評価—, 京都大学防災研究所年報, Vol.44, B-2, pp.207-228, 2001.
- 8) 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.
- 9) Armanini A, Fraccarollo L, Rosatti G : Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels, Comput Geosci, 35, pp.993-1006, 2009.
- 10) Crosta G.B, Imposimano S, Roddeman D : Numerical modeling of 2-D granular step collapse on erodible and nonerodible surface, J.Geophys.Res.Earth Surf, 114, F03020, 2009.
- 11) Han Z, Chen G, Li Y, Tang C, Xu L, He Y, Huang X, Wang W : Numerical simulation of debris-flow behavior incorporating a dynamic method for estimating the entrainment, Eng.Geol, 190, pp.52-64, 2015.
- 12) Pirulli M, Marco F : Description and numerical modelling of the October 2000 Nora debris flow, Northwestern Italian Alps, Canadian Geotech. J, 47, pp.135-146, 2010.
- 13) Chiang S.H, Chang K.T, Mondini A.C, Tsai B.W, Chen C.Y : Simulation of event-based landslides and debris flows at watershed level, Geomorphology 138, pp.306-318, 2012.
- 14) Vagnon F, Pirulli M, Yague A, Pastor M : Comparison of two depth-averaged numerical models for debris flow runout estimation, Canadian Geoch.J, 56, pp.89-101, 2019.
- 15) 竹林洋史, 藤田正治, 江頭進治 : 2014 年 8 月に広島で発生した土石流の流動・氾濫特性, 京都大学防災研究所年報, No.58, A, pp.34-39, 2015.

- 16) Wang C, Li S, Esaki T : GIS-based two-dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow, *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 8, pp.47–58, 2008.
- 17) Beguería S, Van Asch T.W.J, Malet J.P, Gröndahl S.A : GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain, *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 9, pp.1897–1909, 2009.
- 18) Jian W, Guang-qi C, Lu Z, Ying-bin Z : GIS-based Numerical Modelling of Debris Flow Motion across Three-dimensional Terrain, *Journal of Mountain Science*, 10(4), pp.522-531, 2013.
- 19) 中谷加奈, 和田孝志, 里深好文, 水山高久 : GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発, 第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.149-154, 2008.
- 20) 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, pp.36-40, 2008.
- 21) 中谷加奈, Sumaryono, 里深好文, 水山高久 : 汎用土石流シミュレータ Kanako の実地形への適用, 水工学論文集, No.53, pp.703-708, 2009.
- 22) 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, pp.25-61, 2012.
- 23) 竹林洋史 : 広島市で発生した土石流の数値シミュレーションの事例と対策, 地盤工学会誌, Vol.64, No.4, pp.12-15, 2016.
- 24) Jonathan M. Nelson, Yasuyuki Shimizu, Takaaki Abe, Kazutake Asahi, Mineyuki Gamou, Takuya Inoue, Toshiki Iwasaki, Takaharu Kakinuma, Satomi Kawamura, Ichiro Kimura, Tomoko Kyuka, Richard R. McDonald, Mohamed Nabi, Makoto Nakatsugawa, Francisco J. Simoes, Hiroshi Takebayashi, and Yasunori Watanabe : The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications, *Advances in Water Resources*, Vol.93, pp.62-74, 2016.
- 25) iRIC ソフトウェア : User's Manual, <https://i-ric.org/download/users-manual/>.
- 26) 竹林洋史 : iRIC-Morpho2DH を用いた土石流・泥流の数値シミュレーション, *sabo*, Vol.134, pp.3-7, 2023 Summer.
- 27) 竹林洋史, 藤田正治 : 2018 年 7 月に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の流動特性, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.I_859-I_864, 2019.
- 28) 竹林洋史, 藤田正治 : 2018 年 7 月に広島県安芸郡熊野町で発生した土石流の宅地内の氾濫特性, 京都大学防災研究所年報, No.62, A, pp.6-12, 2019.
- 29) 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.

- 30) 高橋保, 中川一, 佐藤広章: 扇状地における土砂氾濫災害危険度の評価, 京都大学防災研究所年報, No.31, B-2, pp.655-676, 1988.
- 31) 中川一, 高橋保, 澤田豊明, 里深好文: 計画土石流の設定と避難計画, 京都大学防災研究所年報, No.39, B-2, pp.655-676, 1996.
- 32) 中川一, 高橋保, 澤田豊明, 石橋晃睦: 豪雨性表層崩壊に起因する土石流の規模予測とGISを用いた避難行動の解析, 水工学論文集, No.42, pp.325-330, 1998.
- 33) 糸数哲, 中谷加奈, 山野井一輝, 長谷川祐治, 藤田正治: 土石流シミュレータを用いた土石流発生時の避難経路の検討, 京都大学防災研究所年報, No.59, B, pp.420-425, 2016.
- 34) 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.
- 35) 長谷川祐治, 中谷加奈, 青柳昌憲, 海堀正博, 里深好文: 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, 第10回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.193-198, 2020.

第3章 家屋破壊の影響を考慮した土石流の数値シミュレーションモデルの構築

3.1 概説

近年、土石流の数値シミュレーションは多く行われるようになってきており、実際に発生した土砂災害の再現計算による検証、砂防施設の機能評価、砂防計画や警戒・避難のための基礎情報として用いられている。

従来、土石流の数値シミュレーションでは、10m～20m 程度の解析格子を用いて解析することが多く、宅地内の家屋や道路の形状を考慮した解析はほとんど実施されていない。そのような中、竹林¹⁾は、平成 26 年広島市で発生した土砂災害に対して、家屋の存在を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施し、土石流の氾濫域を再現している。中谷ら²⁾も、平成 26 年広島市で発生した土砂災害に対して、家屋の存在を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施しており、家屋の存在によって土石流が横断的に広がる宅地が存在することが示されている。しかし、これらの数値シミュレーションは、家屋を不透過な非破壊構造物として扱っており、家屋の破壊過程を組み込んだ土石流・泥流の数値シミュレーション手法に関する研究事例はみられない。

家屋の倒壊については、洪水氾濫や津波などに対しては多くの既存研究が存在する。洪水氾濫に関する家屋の倒壊条件について、佐藤ら³⁾は、洪水氾濫過程の数値シミュレーション結果をもとに、観測された床上浸水深、最大流体力及び被害度の関係から、流体力が $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を超えると住居不可能となる家屋が出現するとしている。高橋ら⁴⁾は、家屋に作用する流体力とモーメントに関する実験結果より、家屋の破壊限界に関する流速と水深の関係式を導き、再現計算結果と被害家屋の調査データがよく一致することを示している。「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）」⁵⁾では、氾濫流に対する家屋倒壊等の危険性を表す「洪水時家屋倒壊危険ゾーン」を設定する条件として、木造 2 階建てのモデル家屋を想定した荷重条件等より倒壊・滑動・転倒限界の関係式を示している。しかし、土石流による家屋の破壊プロセスは洪水氾濫や津波とはいくつかの点で異なっており、これらの方法をそのまま適用するのは困難である。

本章では、まず、本研究で用いる土石流の数値シミュレーションモデルの概要を述べる。次に、近年の土石流による家屋破壊実態の事例を紹介した上で、土石流による家屋破壊の特徴等について考察するとともに、土石流の数値シミュレーションにおいて、家屋の破壊過程を考慮するための家屋破壊モデルについて説明する。

3.2 土石流の数値シミュレーションモデルの概要

本研究では、土石流の数値シミュレーションモデルとして、Takebayashi ら⁶⁾によって開発された Morpho2DH を用いる。このモデルは、iRIC (international River Interface Cooperative)⁷⁾ のソルバーとして導入されているもので、斜面崩壊を初期条件として、土石流の発生・流動・堆積の全ての過程を2次元で表現可能なモデルである。

土石流の発達過程から堆積が終了するまでの過程を追跡するための基礎方程式は、土石流全体及び土砂の質量保存則、流れの運動量保存則および河床位方程式から構成される。

1) 水と土砂の混合物の質量保存則

土石流は、流れる水と土砂の混合物からなり、その質量保存則⁸⁾は以下のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (3-1)$$

ここに、 t は時間、 h は土石流の流動深、 u と v はそれぞれ x と y 方向における速度成分、 c_* は静止堆積層の砂礫の体積濃度である。 E は河床の浸食速度であり、以下の江頭ら⁸⁾の式を用いる。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (3-2)$$

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。

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

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濃度 $\bar{c}$ に関する流動方向の平衡河床勾配であり、図 3.2.1 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、 $\bar{c}$ を一定と仮定すると、以下の関係が得られる。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (3-4)$$

ここに、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度、 ϕ_s は土砂の内部摩擦角である。

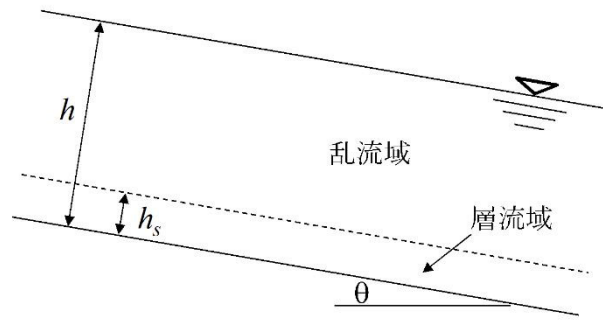


図 3.2.1 層流域と乱流域を有する二層流の模式図

また，層流域の厚さ h_s は，以下の式で推定される．

$$\frac{h_s}{d_m} = \frac{1}{\bar{c} \cos \theta (\tan \phi_s - \tan \theta)} \tau_{*m} \quad (3-5)$$

ここに， d_m は土石流の平均粒径， τ_{*m} は平均粒径の無次元せん断応力である．

2) 土砂の質量保存則

水と土砂の混合物における土砂の質量保存則は以下のとおりである。

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}hu}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}hv}{\partial y} = E \quad (3-6)$$

ここに、 t は時間、 $\bar{c}$ は土石流における砂礫の平均体積濃度、 h は土石流の流動深、 u と v はそれぞれ x と y 方向における速度成分、 E は河床の浸食速度である。

3) 水と土砂の混合物の運動量保存則

水と土砂の混合物の運動量保存則⁸⁾は以下のとおりである。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (3-8)$$

ここに、 g は重力加速度、 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。土石流の密度 ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho \quad (3-9)$$

ここに、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度である。

τ_{bx} と τ_{by} はそれぞれ x と y 方向におけるせん断応力であり、以下のとおりである。

$$\tau_{bx} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3-10)$$

$$\tau_{by} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3-11)$$

ここに、 τ_y は降伏応力であり、次式を用いる。

$$\tau_y = \left(\frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{\frac{1}{5}} (\sigma - \rho) \bar{c} g h_s \cos \theta \tan \phi_s \quad (3-12)$$

f_b は抵抗係数であり，以下の関係を用いる．

$$f_b = \frac{25}{4} \left\{ k_f \frac{(1 - \bar{c})^{\frac{5}{3}}}{\bar{c}^{\frac{2}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) \bar{c}^{\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h_s}{d_m} \right)^{-2} + 9\alpha^2 \left(1 - \frac{h_s}{h} \right) \quad (3-13)$$

ここに， $k_f=0.16$ ， $f_d=0.0828$ ， e は粒子間の反発係数， d_m は土砂の平均粒径， $\alpha=\kappa/6$ である．

4) 河床位方程式（流砂の連続式）

河床位方程式⁸⁾ は以下のようなものである．

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{E}{c_*} \quad (3-14)$$

3.3 土石流による家屋破壊実態の把握

1) 近年の土石流による家屋破壊実態

土石流の数値シミュレーションにおいて、家屋破壊の考慮や破壊過程を組み込んだモデル化を考える際、実際の土石流災害による家屋被害の状況を把握することは重要である。しかし、近年の既往土石流災害による家屋被害の実態に関する調査事例は少ない。ここでは、近年の土石流災害における被害状況写真等から、家屋の破壊状況の実態について整理する。

(1) 渓流出口付近の家屋の破壊状況

図 3.3.1 に、近年発生した土石流災害における渓流出口付近の家屋の破壊状況^{9),10)}を示す。急勾配の渓流を高速で流下した土石流はそのエネルギーを保持したまま渓流出口付近の家屋に衝突し、家屋は破壊され、ほぼ全壊している状況が分かる。破壊された家屋は大きく傾き、大規模に破壊されたり、被災前の場所から下流側へ流されており、土石流により家屋に大きな応力が作用したと考えられる。



(a) 広島市安佐南区八木⁹⁾
(平成 26 年 8 月豪雨)



(b) 広島市安佐北区可部東⁹⁾
(平成 26 年 8 月豪雨)



(c) 広島市安佐北区口田南¹⁰⁾
(平成 30 年 7 月豪雨)



(d) 広島市安芸区矢野東¹⁰⁾
(平成 30 年 7 月豪雨)

図 3.3.1 渓流出口付近の家屋の破壊状況^{9), 10)}

(2) 渓流及び道路に沿った家屋の破壊状況

図 3.3.2 に、近年発生した土石流災害において、土石流が流下した渓流及び道路に沿って建てられていた家屋の破壊状況^{9)~11)}を示す。渓流出口から宅地域へ流下した土石流は家屋や道路の影響を受け、より複雑な形状で氾濫する。その際、渓流及び道路に沿って建てられた家屋の一部を取り込む形で流下し、家屋は半壊・一部損壊している状況が分かる。土石流の流速や流動深の影響により応力が作用した壁や家屋の一部が破壊したと考えられ、土石流による家屋被害の特徴の一つである。



(a) 広島市安佐北区可部東⁹⁾
(平成 26 年 8 月豪雨)



(b) 福岡県朝倉郡東峰村¹¹⁾
(平成 29 年 7 月九州北部豪雨)



(c) 広島市安佐北区口田南¹⁰⁾
(平成 30 年 7 月豪雨)



(d) 広島市安芸区矢野東¹⁰⁾
(平成 30 年 7 月豪雨)

図 3.3.2 渓流及び道路に沿った家屋の破壊状況^{9)~11)}

(3) 渓流出口より下流部の家屋の被害状況

図 3.3.3 に、近年発生した土石流災害における渓流出口より下流部の家屋の被害状況^{9),10)}を示す。家屋の周辺に土石流による土砂の堆積がみられ、家屋や敷地内に土砂が侵入する被害が生じているが、家屋の破壊に至っては至っていないことが分かる。土石流が発生した渓流の出口より下流部では、

地盤勾配も比較的緩くなるため、大きな流速が生じず、家屋を破壊するような大きな応力が作用していなかったためと考えられる。



(a) 広島市安佐南区八木⁹⁾
(平成 26 年 8 月豪雨)



(b) 広島市安芸区矢野町¹⁰⁾
(平成 30 年 7 月豪雨)



(c) 広島市安芸区中野東¹⁰⁾
(平成 30 年 7 月豪雨)



(d) 広島市東区馬木町¹⁰⁾
(平成 30 年 7 月豪雨)

図 3.3.3 渓流出口より下流部の家屋の被害状況^{9), 10)}

以上のように、近年の土石流災害における被害状況写真等から、家屋の破壊状況の実態について整理した。渓流出口付近は、土石流の流速や流動深が大きく、家屋に大きな応力が作用することにより家屋が破壊する。土石流が発生した渓流出口付近の家屋は、基礎部分も含め、家屋本体が大規模に損壊し全壊する。また、土石流の流動による直接的な家屋破壊を免れたとしても、渓流や道路に沿って流下した土石流により、家屋の半壊や一部損壊する場合もあり、居住を継続するのは困難となると考えられる。

土石流が発生した渓流出口からの距離や渓流の向き、宅地域の道路や家屋の配置により、家屋の破壊状況も異なり、家屋の破壊を考える場合、土石流の数値シミュレーションにより、土石流の流動特性を把握し、宅地域に氾濫した土石流の流動深や流速の空間分布を得ることが重要である。

2) 土石流流下時に家屋に作用する応力

実際の土石流は、氾濫域の家屋や道路の影響を受け、より複雑な平面形状で氾濫し、家屋が倒壊するかしないか、全壊か半壊かでも、その影響を受け、土石流の氾濫域は大きく変化する。そのため、土石流の数値シミュレーションにおいて、家屋の破壊過程を考慮することで、より精度の高い氾濫域の予測が可能となると考えられる。

家屋の破壊を考える上では、土石流の流動深と流速が非常に重要な要素となる。また、洪水氾濫³⁾や津波¹²⁾による家屋被害の評価に用いられる流体力（流速の2乗と浸水深との積）も家屋の破壊を判定する上で重要な指標となる。しかし、土石流による家屋の破壊プロセスは洪水氾濫や津波とは異なる部分もある。



図 3.3.4 泥流により被災した家屋（令和3年7月 静岡県熱海市伊豆山）

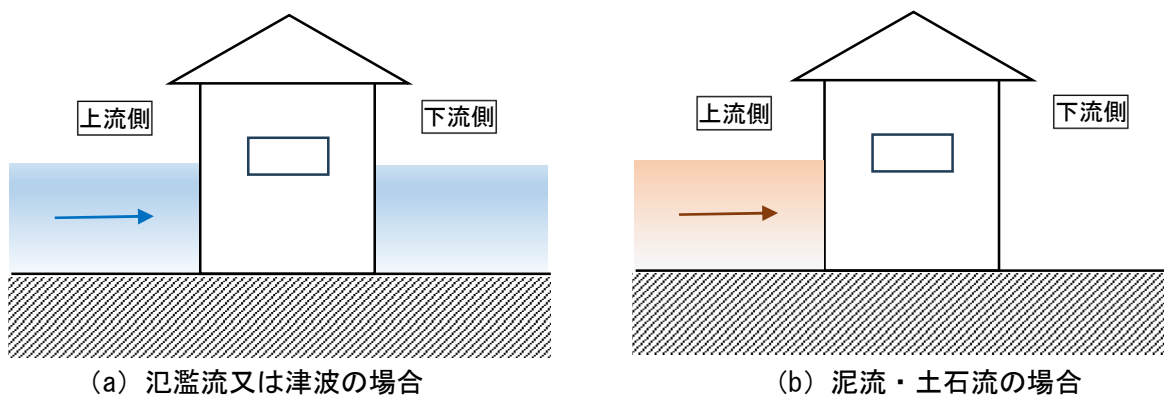


図 3.3.5 家屋に作用する水圧・土圧の概念図

図 3.3.4 は、令和 3 年 7 月に静岡県熱海市伊豆山で発生した泥流による被災直後の写真である。中央の白い家屋は鉄筋コンクリート構造のため家屋自体の倒壊はしていないが、1 階には土砂が流入し壊滅的な被害を受けている。家屋の側面には泥流の痕跡がみられ、ピーク時には家屋の屋根付近まで流動深が達していたことが想定される。一方、家屋の下流面には泥流の痕跡がみられず、家屋の上流側と下流側で流動深に差が生じていたことが分かる。このことは、泥流や土石流の特徴の一つであり、洪水氾濫や津波でみられる清水の挙動とは異なる部分である。

図 3.3.5 は、氾濫流又は津波、もしくは泥流・土石流が宅地に流れ込んだ際、家屋に作用する水圧・土圧の概念図を示している。(a) 氾濫流又は津波の場合、流れの流動性は高いため、流水は上流側から下流側へ速やかに回り込み、家屋の上流側と下流側の水位差は小さく、水圧の大きさがほぼ同じで打ち消し合うため、水圧を無視することが多い。(b) 泥流・土石流の場合、清水よりも流動性が低く、家屋の裏側に回り込まず、水位差が生じるため、上流側の水圧・土圧は無視できなくなる。

以上のように、土石流の数値シミュレーションにおいて、家屋の破壊過程を考慮するためには、家屋に作用する応力として、土石流の流動に起因した応力と水圧・土圧による応力を考える必要がある。

3.4 土石流による家屋破壊モデル

1) 数値シミュレーションにおける家屋の破壊・非破壊の考え方

津波および洪水流の数値シミュレーションによって家屋に作用する応力を算定する場合、家屋をコントロールボリュームとして家屋周辺に作用する応力を積分して得られた力が用いられる。これは、洪水流先端部が家屋に到達した直後に家屋が破壊されるのではなく、家屋背面や家屋内に水が到達してから家屋が流出する状況が被災地によく観察されるためである。しかし、土石流の場合は土石流先端部が家屋に到達した直後に家屋が破壊され、家屋がその形状を保たずに、家屋の一部損壊が発生することが多い。そのため、家屋をコントロールボリュームとして得られた力よりもより小さいコントロールボリュームを用いて得られた力によって家屋の破壊過程を評価する方が適切と考えられる。

そこで、本研究では図 3.4.1 のように家屋形状を複数の解析格子で表現し、各解析格子をコントロールボリュームとして作用する力を計算し、家屋の破壊・非破壊の判定に用いる。

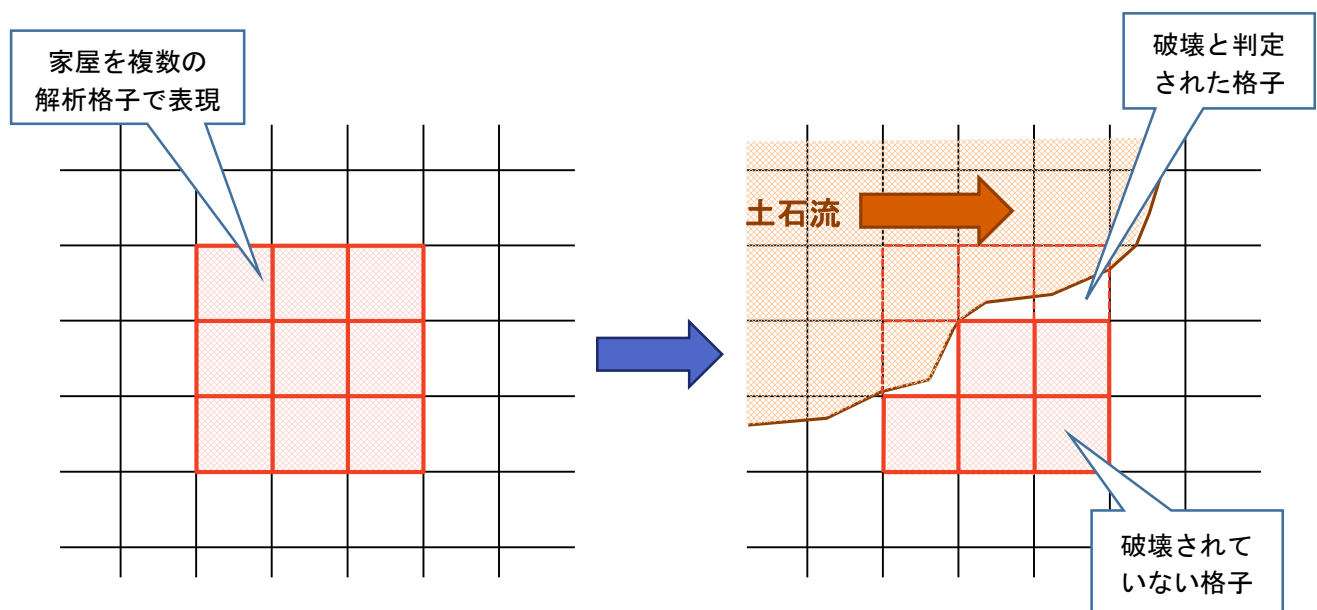


図 3.4.1 家屋の破壊・非破壊の考え方

2) 土石流による家屋破壊モデル

解析で用いる格子を正方形格子と仮定し、横断方向の流速をゼロ、横断方向圧力は左右で方向は異なるが、同一の値を有しているとし、土石流が流下方向に流れて家屋壁面に垂直に作用している場を考える。木造家屋は可撓性が弱いため、壁はある一定以上の応力が作用すると瞬時に破壊されるとし、家屋破壊時の水深・流速の時間的な変化を無視する。さらに、河床勾配や家屋破壊時のエネルギー散逸はそれほど大きくないため無視するとともに、家屋内にはまだ土石流が流れ込んでいないことを考える。この場合、家屋の解析格子に働く単位幅あたりの流下方向の応力 F_{hx} は、以下のように土石流の静水圧近似による水圧・土圧（右辺第1項）と家屋に作用する運動エネルギーによる流体力（右辺第2項）の和で評価できる。

$$F_{hx} = \frac{1}{2} \rho_m g h^2 \cos \theta + \rho_m h u^2 \quad (3-15)$$

ここに、 g は重力、 h は流動深、 θ は河床勾配、 u は流速、 ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho \quad (3-16)$$

ここに、 σ は土砂の密度、 ρ は水の密度、 $\bar{c}$ は土石流の鉛直平均濃度である。

図 3.4.1 に示すように家屋を複数の格子で表現し、解析格子ごとに家屋の破壊・非破壊を判定する。家屋は不透過構造物として扱い、下式のとおり、土石流により家屋破壊限界応力 (F_{hxc}) 以上の応力が作用した場合、対象格子の家屋部分が流失したとみなし、対応する家屋部分を除去する。

$$F_{hx} \geq F_{hxc} : \text{家屋破壊限界応力} \quad (3-17)$$

土石流により家屋を表す格子の全てに家屋破壊限界応力 (F_{hxc}) 以上の応力が作用した場合は、家屋は全壊とみなし、一部の格子のみに家屋破壊限界応力 (F_{hxc}) 以上の応力が作用した場合、家屋は半壊とみなす。なお、家屋破壊限界応力 (F_{hxc}) が非常に高い鉄筋コンクリート造の建物は流出しないものとする。

なお、流水中の家屋に働く応力を計算する場合、(3-15) 式の右辺第1項の水圧を無視することがある。これは、図 3.3.5 に示すように、家屋の上流と下流で水圧の大きさがほぼ同じで打ち消し合うためである。しかし、土石流の場合、地盤が急勾配で、土石流は清水よりも流動性が低く、家屋の裏側に回り込まずに家屋が破壊されるため、右辺第1項は無視できない。

3.5 結語

本章では、まず、本研究で用いる土石流の数値シミュレーションモデル「Morpho2DH」の概要を述べた。次に、近年の土石流による家屋破壊実態について整理し、土石流の数値シミュレーションにより、流動深や流速の空間分布を得ることが重要であることを示した。また、実際の被災直後の家屋の痕跡から、家屋に作用する応力について考察し、土石流の数値シミュレーションにおいて家屋の破壊過程を考慮するためには、家屋に作用する応力として、流動に起因した応力と水圧・土圧による応力を考える必要があることを示した。

最後に、数値シミュレーションにおける家屋の破壊・非破壊の考え方について、家屋形状を複数の解析格子で表現し、各解析格子をコントロールボリュームとして作用する応力を算定し、家屋の破壊・非破壊の判定手法を示した。家屋の破壊を判定するための家屋に作用する応力については、土石流の静水圧近似による水圧・土圧と家屋に作用する運動エネルギーによる流体力の和で評価し、土石流により家屋破壊限界以上の応力が作用した場合、対象格子の家屋部分が流失したとみなし、対応する家屋部分を除去することで、家屋の破壊過程を考慮できるモデルを構築した。

次章では、これら家屋破壊モデルを iRIC-Morpho2DH に組み込み、実際の土石流災害の再現計算をすることで、現地への適用性を検討する。

参考文献

- 1) 竹林洋史：広島市で発生した土石流の数値シミュレーションの事例と対策，地盤工学会誌，Vol.64，No.4，pp12-15，2016.
- 2) 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.
- 3) 佐藤智，今村文彦，首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について－8610号台風による吉田川の場合－，第33回水理講演会論文集，pp.331-336，1989.
- 4) 高橋保，中川一，加納茂紀：洪水氾濫による家屋流失の危険度評価，京都大学防災研究所年報，No.28，B-2，pp.455-470，1985.
- 5) 国土交通省：洪水浸水想定区域図作成マニュアル(第4版)＜参考資料1＞，pp.viii-xiii，2015.
- 6) Hiroshi Takebayashi, Masaharu Fujita：Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model, Geosciences, 10, 45, 2020.
- 7) Jonathan M. Nelson, Yasuyuki Shimizu, Takaaki Abe, Kazutake Asahi, Mineyuki Gamou, Takuya Inoue, Toshiki Iwasaki, Takaharu Kakinuma, Satomi Kawamura, Ichiro Kimura, Tomoko Kyuka, Richard R. McDonald, Mohamed Nabi, Makoto Nakatsugawa, Francisco J. Simoes, Hiroshi Takebayashi, and Yasunori Watanabe：The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications, Advances in Water Resources, Vol.93, pp.62-74, 2016.
- 8) 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.
- 9) 広島県ホームページ：平成26年8月20日発生 8.20土砂災害。
https://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/sonota/sabo/pdf/216_H26_820dosyasaigai.pdf
- 10) 広島市ホームページ：平成30年7月豪雨災害の記録。
<https://www.city.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/54807.pdf>
- 11) 国土交通省ホームページ：平成29年7月九州北部豪雨による土砂災害の概要。
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf
- 12) 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.69，No.2，pp.I_386-I_390，2013.

第4章 土石流による家屋破壊モデルの現地への適用

4.1 概説

平成 25 年の伊豆大島，平成 26 年の南木曽・広島，平成 29 年の朝倉・日田など，短時間で高強度の豪雨によって発生した表層崩壊に起因した土石流・泥流により宅地が被災する土砂災害が近年頻発している．平成 26 年 8 月の広島市安佐北区，安佐南区等で発生した局地的豪雨では，75 名もの人命が失われた．表層崩壊に起因した土石流は，降雨継続時間が短くて総降水量が小さくても，降雨強度が高いと発生しやすい．そのため，地球温暖化による気象特性の極端化によって表層崩壊に起因した土石流・泥流の発生回数が増加することが予想され，土石流の宅地域での動態の解析と解析結果にもとづいた効果的な対策が求められている．

下流域に宅地などが存在する山地溪流では，土砂災害の警戒区域が各自治体によって設定されている．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，質量保存則及び運動量保存則に基づいた数値シミュレーションによって得られた結果は用いられておらず，土石流扇状地の上流端である土石流堆積開始地点を起点とした扇形の土砂氾濫域を想定し，地盤勾配が緩やかになる地点（勾配 2 度）を土石流氾濫範囲の下端としている．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，氾濫域の建物や道路の影響を受け，より複雑な形状で氾濫し，さらに，土石流の流体力により，家屋が全壊もしくは一部半壊する被害が生じる．

本章では，「3.4 土石流による家屋破壊モデル」で示した家屋破壊モデルを用いて，実際の土石流による家屋破壊状況の再現計算をすることで，現地への適用性を検討する．また，現状における土砂災害警戒区域（イエローゾーン），土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の課題を示すとともに，実際に設定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）や土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）を例に，家屋破壊モデルを用いて，その評価を行う．

4.2 平成 26 年 8 月豪雨による広島土砂災害への適用

4.2.1 広島市安佐南区八木三丁目で発生した土砂災害の概要

1) 気象概要

平成 26 年 8 月豪雨では、日本海に停滞する前線に向かい、南から暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で、広島県では、20 日未明から明け方にかけて広島市安佐南区、安佐北区を中心に猛烈な雨となった。安佐南区、安佐北区可部を襲ったこの豪雨は、暖かく湿った空気が流入し続け、同じ場所で積乱雲が繰り返し発生する「バックビルディング現象」が原因の一つと考えられる¹⁾。

広島市安佐北区三入において、最大 1 時間降水量が 101.0mm、最大 3 時間降水量が 217.5mm、最大 24 時間降水量が 257.0mm となり、いずれも観測史上第 1 位の値を更新した。

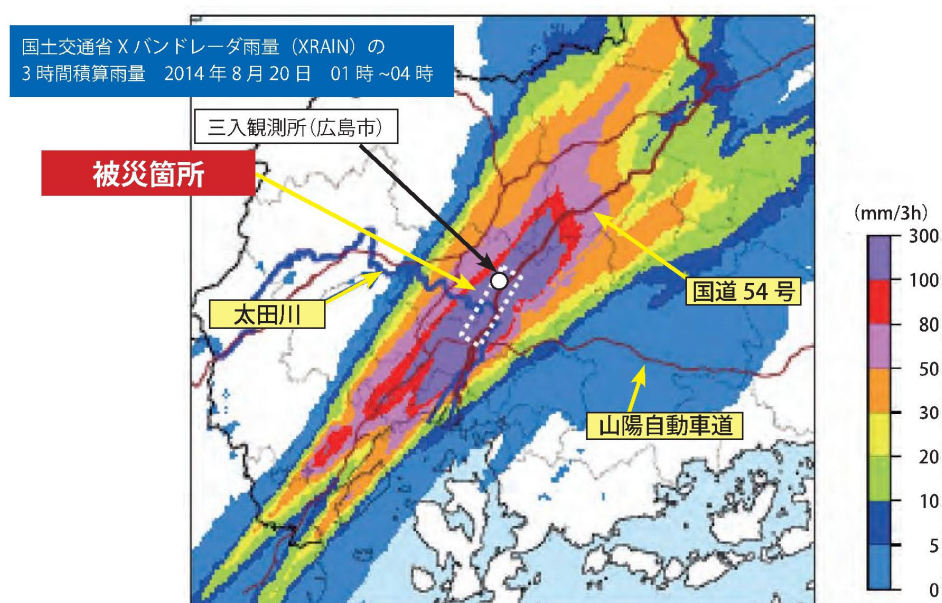


図 4.2.1 3 時間積算雨量分布図 (XRAIN)¹⁾

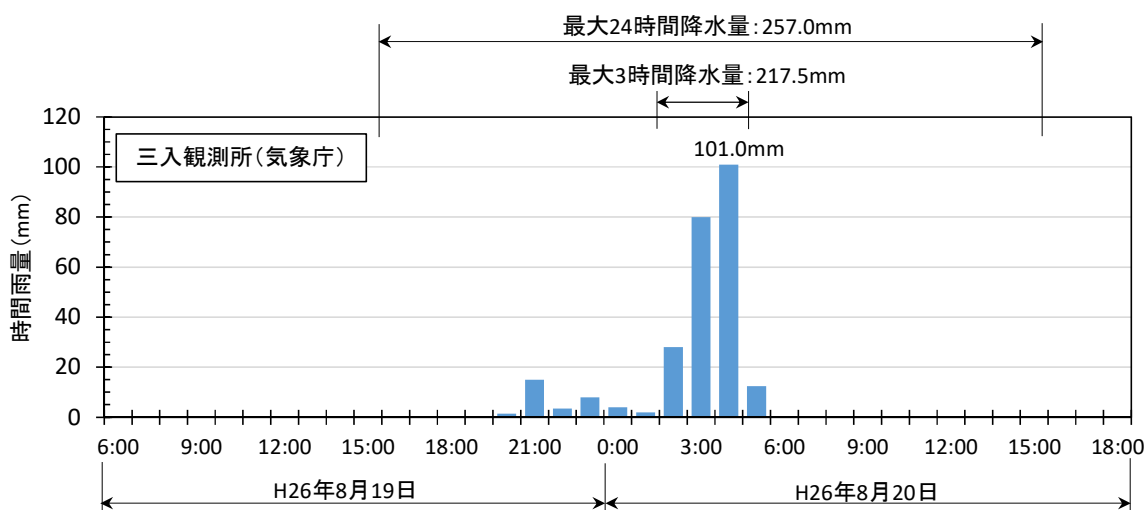


図 4.2.2 時間雨量 (三入観測所)

2) 土砂災害概要

平成 26 年 8 月 20 日の未明から明け方にかけての豪雨により，広島市安佐南区，安佐北区，西区を中心に，土石流 107 箇所，がけ崩れ 59 箇所の計 166 箇所で土砂災害が発生し，死者 77 名（うち関連死 3 名），重軽傷者 68 名の人的被害があった．家屋被害では，全壊 179 棟，半壊 217 棟を含む合計 585 棟（浸水被害含まず）で，特に，その半数以上は安佐南区を中心に被害が発生した¹⁾．



(a) 安佐南区緑井八丁目、八木三丁目付近



(b) 安佐南区八木三丁目・四丁目・六丁目付近

図 4.2.3 広島市安佐南区の被災状況¹⁾



図 4.2.4 広島市安佐南区八木三丁目付近の被災状況¹⁾

3) 広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流の状況

図 4.2.5 に被災後の広島市安佐南区八木三丁目上流溪流部の様子を示す。図に示すように、本川源頭部など複数の場所で斜面崩壊が発生した。

対象斜面の下領域には、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²⁾。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²⁾とされているが、現地を見る限り、斜面の上の方にも多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、また、節理も多く入っており、地盤は比較的透水性が高い。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。

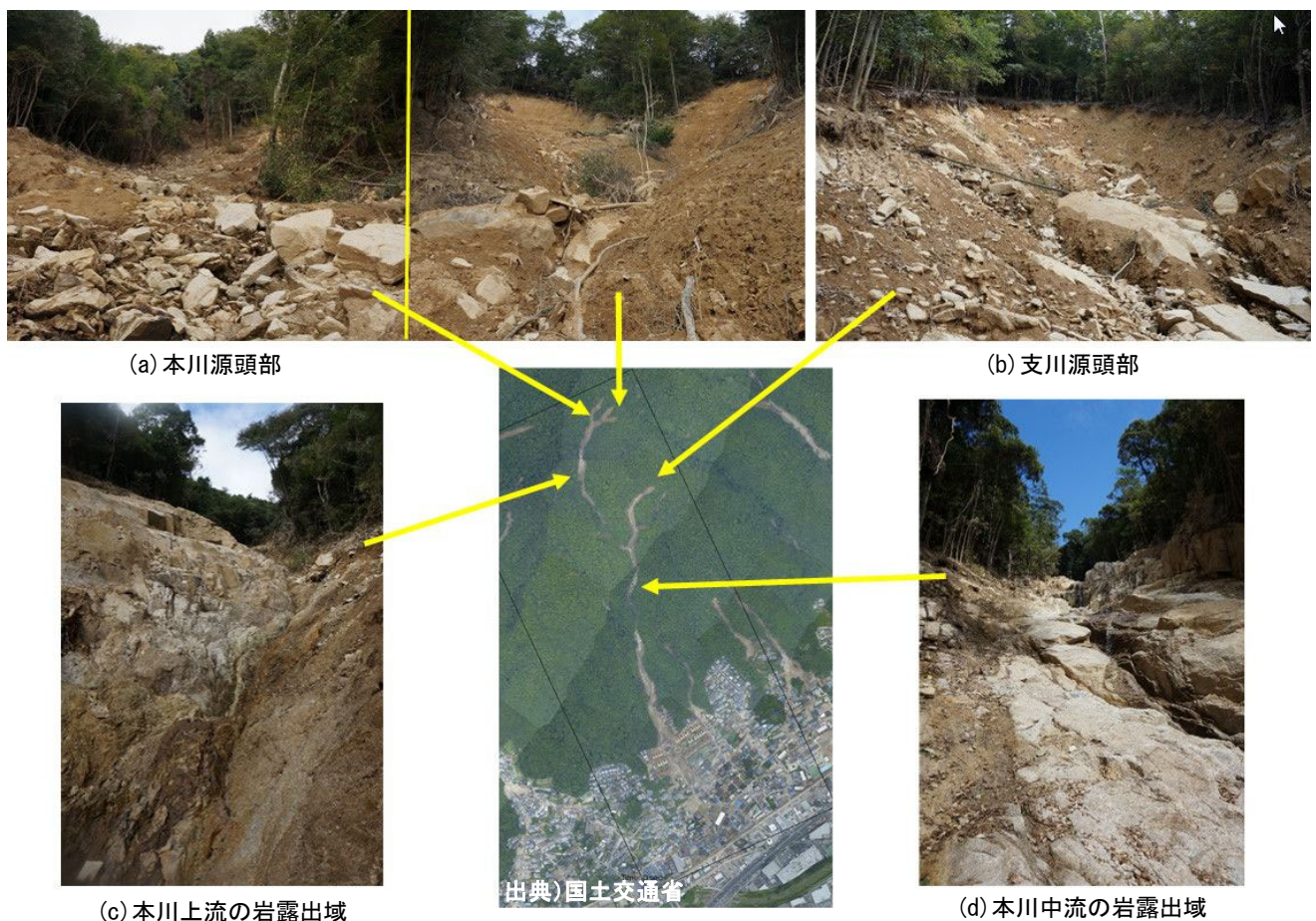


図 4.2.5 広島市安佐南区八木三丁目の斜面崩壊跡と岩露出域

4) 広島市安佐南区八木三丁目における家屋の被災状況

図 4.2.6 に 8 月 25 日に撮影された被災後の住宅地の様子を示す。溪流の出口付近の宅地には、鉄筋コンクリート構造の県営住宅（図 4.2.6(c)）と多くの木造家屋が存在していた。

溪流出口に位置する鉄筋コンクリート構造の建物（県営住宅）は、流速・流動深が大きい状態で土石流が衝突したと考えられるが、図 4.2.6(c)に示すように、建物の破壊には至っておらず、外装の一部が損傷しただけとなっている。一方、溪流に沿った領域の多くの木造家屋が全壊・半壊の被害を受けていた。



(a) と (b) はルーチェサーチによる撮影

図 4.2.6 広島市安佐南区八木三丁目における家屋の破壊状況

図 4.2.7 には、被災前後の航空写真と家屋破壊領域（オレンジ）・家屋非破壊領域（黄）の平面分布を示している。

図に示すように、溪流の出口から斜面下方に沿って設置されている道路周辺で木造家屋の被害が確認できる。また、家屋は全てが全壊しているわけではなく、家屋の一部のみが破壊されたものも多いことがわかる。

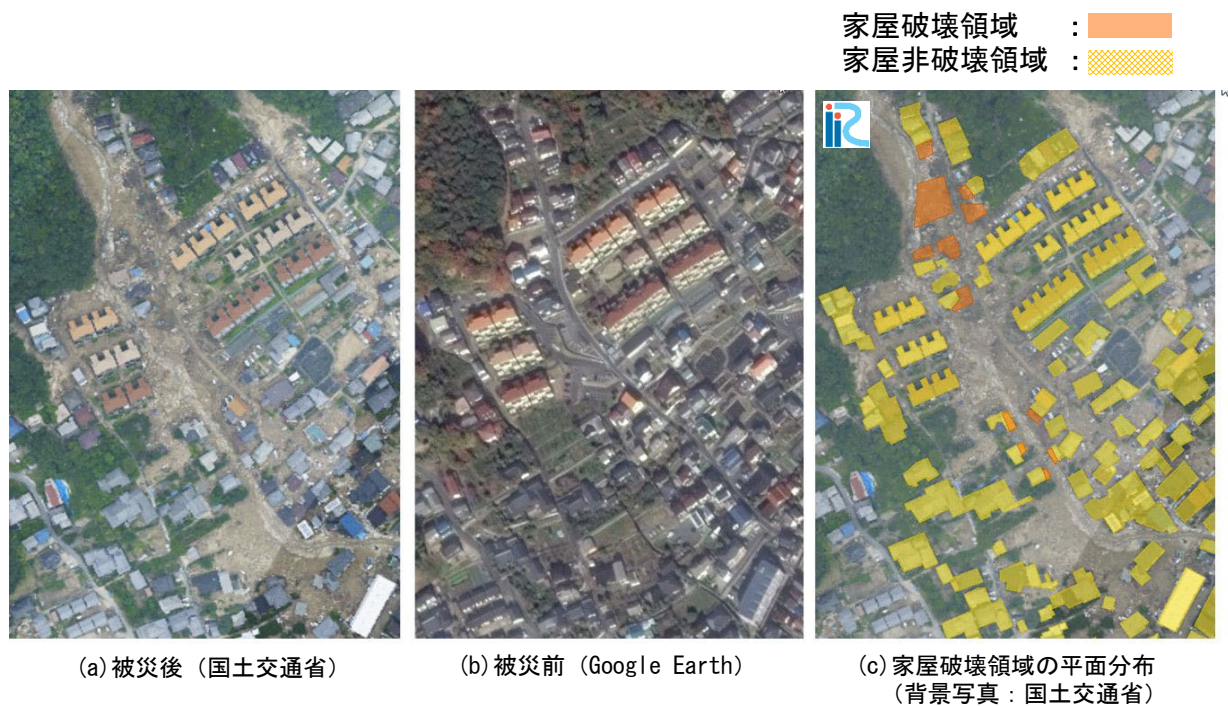


図 4.2.7 被災前後の航空写真と家屋破壊領域の平面分布

4.2.2 土石流による家屋破壊状況の再現

宅地内の家屋の一部が全壊・半壊した平成 26 年の広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流を対象とし、家屋の破壊過程を考慮した平面 2 次元の土石流数値シミュレーションを実施し、家屋の破壊状況の再現を行った。

1) 解析モデル

本解析では、「第 3 章 家屋破壊の影響を考慮した土石流の数値シミュレーションモデルの構築」で示した平面 2 次元土石流解析モデルを用いる。なお、平成 26 年 8 月豪雨による広島市安佐南区八木三丁目における本解析モデルを用いた土石流の流動特性の再現性については、竹林ら³⁾により、被災後に残存した家屋のみを対象とし、現地における土石流流動域の平面分布や被災後の浸食・堆積域の概形に対して十分評価できることが確認されている。

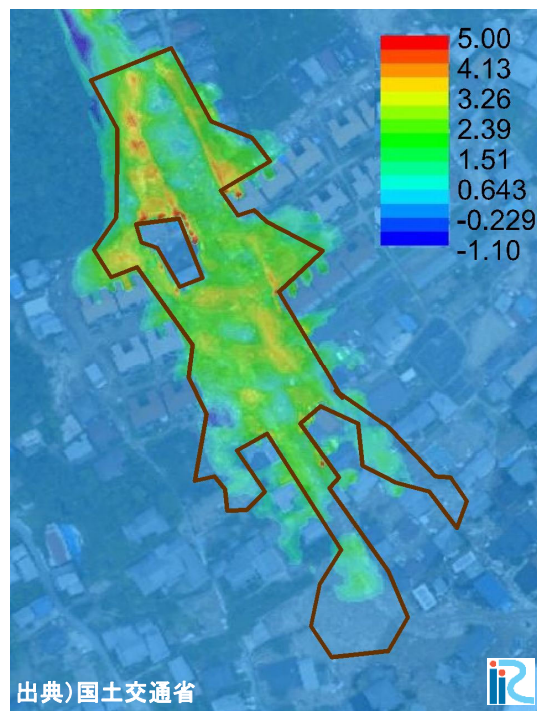


図 4.2.8 数値解析による地盤変化の平面分布と
現地における粒径の大きい岩石の平面分布（茶色実線枠）³⁾

本解析モデルは、実現象と同様に斜面崩壊を発端として土石流を発生させているため、仮定した水や土石流の流量を上流端境界条件とする必要が無い。また、全領域を平面 2 次元モデルで解いているため、全ての解析領域で、土石流の浸食・堆積を評価することができる。

2) 解析条件

(1) 計算領域及び斜面崩壊地点

計算領域は、図 4.2.9 に示す本川源頭部から JR 加治線までの $2\text{km} \times 0.7\text{km}$ の領域である。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）であり、解析格子は、家屋や道路の形状をある程度表現するため、 $2\text{m} \times 2\text{m}$ の正方形格子とした。

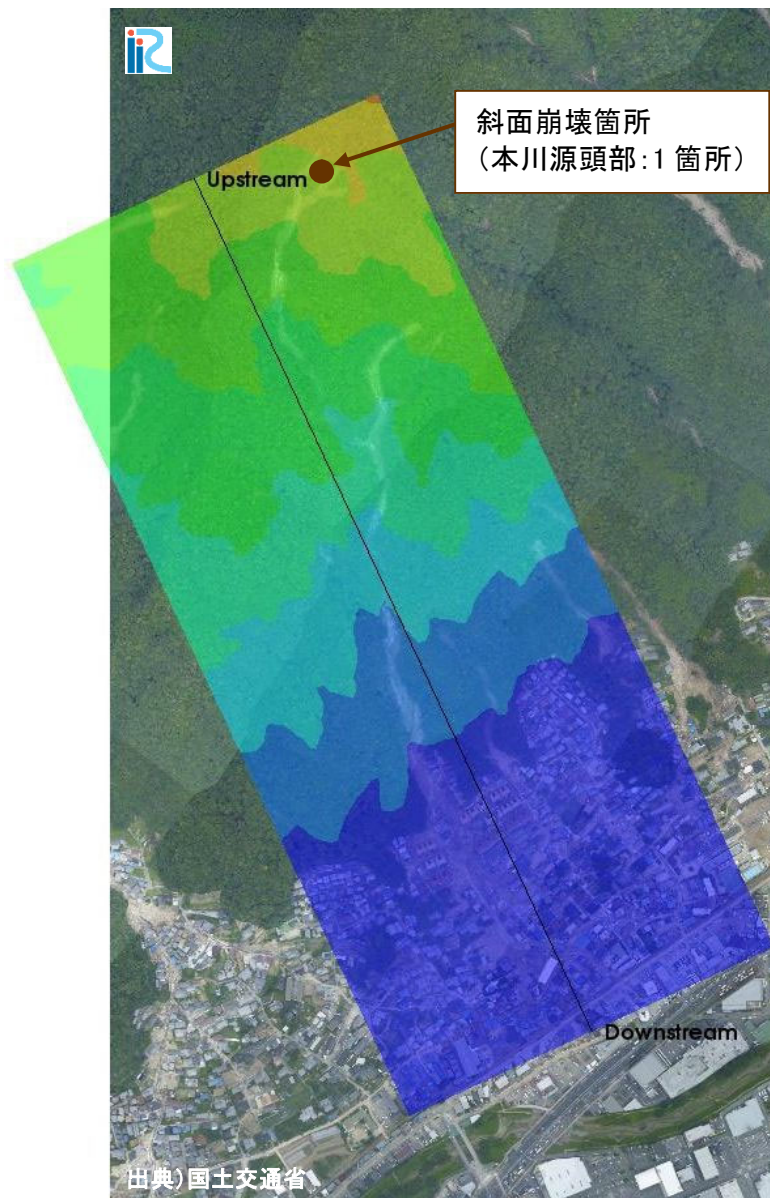


図 4.2.9 計算領域と斜面崩壊地点

土石流は斜面崩壊を発端として発生するものとし、条件として飽和状態の崩壊土量を与えた。斜面崩壊の発生場所は、図 4.2.9 に示す現地で斜面崩壊が確認され、家屋破壊に最も寄与したと考えられる本川源頭部の 1 箇所とした。

(2) 家屋破壊条件

家屋の破壊については，第 3 章で提案した家屋破壊モデルの下式を適用するものとした．

$$F_{hx} = \frac{1}{2} \rho_m g h^2 \cos \theta + \rho_m h u^2 \quad (4-1)$$

ここに， g は重力， h は流動深， θ は河床勾配， u は流速， ρ_m は以下の関係がある．

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho \quad (4-2)$$

ここに， σ は土砂の密度， ρ は水の密度， $\bar{c}$ は土石流の鉛直平均濃度である．

上式による家屋の解析格子に働く単位幅あたりの流下方向の応力（ F_{hx} ）が，家屋破壊限界応力（ F_{hxc} ）を上回った場合に家屋が破壊されたと判断し，家屋が破壊されたと判断された解析格子は，次の計算ステップでは家屋無しの解析格子として扱う．家屋は複数の解析格子で表現されており，破壊限界を超えた部分のみが破壊と判断されるため，半壊・一部破壊などが評価可能となる．なお，単位幅当たりの家屋破壊限界応力（ F_{hxc} ）については，家屋の構造によって異なると考えられる．本解析では被災後の広島市安佐南区八木三丁目の家屋の全壊・半壊状況の再現から最適な値を設定するものとした．

家屋の破壊は木造家屋のみで発生するとし，鉄筋コンクリート構造の県営住宅は破壊しないものとした．

(3) 解析条件

本解析の解析条件と整理すると下表のとおりとなる．

表 4.2.1 解析条件一覧表

項 目	解析条件	備 考
対象地区	広島市安佐南区八木三丁目	
解析領域	流下方向 2km×流下横断方向 0.7km (本川源頭部～JR 加治線までの領域)	
解析格子	2m×2m (正方形メッシュ)	
地形データ	1mDEM データ (国土交通省：平成 21 年度)	被災前地形データ
粒径条件	平均粒径：1cm	
斜面崩壊条件	・斜面崩壊箇所：本川源頭部 1 箇所 ・崩壊土砂量：70m ³	
家屋条件	・木造家屋のみ崩壊 ・鉄筋コンクリート構造の家屋：破壊しない	

3) 解析結果及び考察

図 4.2.10 に、解析結果より得られた土石流流下後の住宅地での地盤高さの変化量の平面分布を被災後の写真と重ね合わせたものを示す。図中に青色で示されている地点は家屋が破壊されたと判断された地点である。一方、家屋が存在するにも係わらずコンターが示されていない領域は、家屋が破壊されなかった地点である。

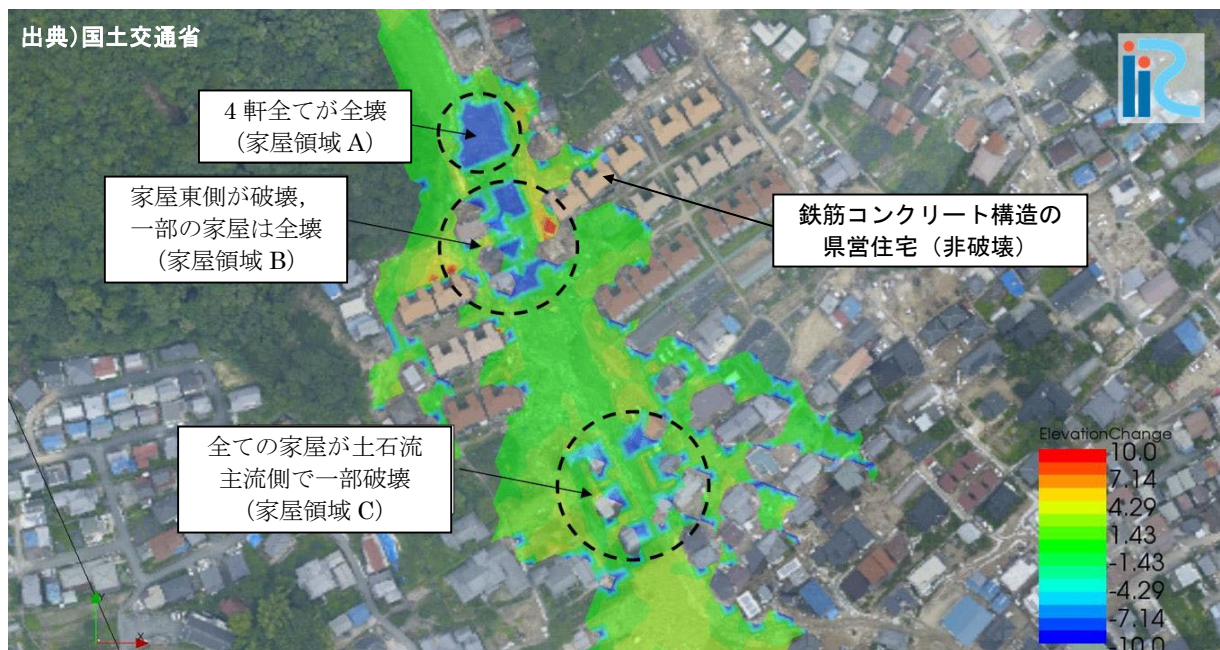


図 4.2.10 解析結果における家屋の破壊状況

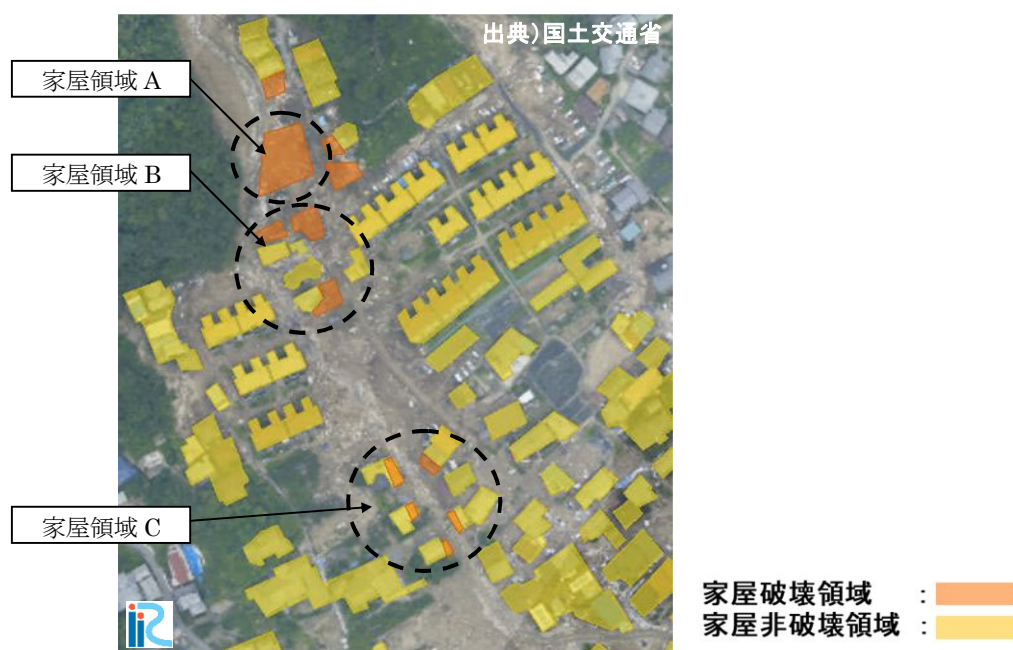


図 4.2.11 家屋の被災状況（実績）

図 4.2.10 に示すように、渓流出口の直下流に位置する家屋領域 A では、全て青色となっており、この領域の 4 軒全ての家屋が全壊したという解析結果となっている。家屋領域 A は、渓流出口の正面に位置しており、本川源頭部の斜面崩壊による発生、溪床や溪岸の土砂を浸食し、土石流に取り込まれながら発達した土石流から、直接、大きな応力を受けたと考えられる。実際、現地においてもこの領域の家屋は全て全壊となっている。

下流の家屋領域 B は、一部の家屋が全壊し、半壊家屋も存在しており、土石流は、鉄筋コンクリート構造の県営住宅の西側の道路を流下したと考えられる。図 4.2.11 に示した家屋の被災状況をみると、この領域は全壊家屋と半壊家屋が存在しており、半壊家屋は解析結果と同様に、家屋領域の東側（土石流の主流に近い側）で破壊が発生していることがわかる。

下流の家屋領域 C をみると、全壊と判定された家屋は無いが、土石流が流下したとみられる家屋領域 C の中央部の道路に沿って一部損壊している家屋がみられる。この領域についても図 4.2.11 に示した家屋の被災状況から、一部損壊している家屋がみられ、解析結果と一致していることがわかる。

家屋破壊限界応力 (F_{hxc}) は、家屋の構造等より異なると考えられるが、広島市安佐南区八木三丁目の家屋破壊状況の再現では、800kN/m（四寸角の柱であれば、柱に作用する力は 96kN）を全ての木造家屋に適用することにより、上記の再現性が確認された。これは、渓流出口付近の地盤勾配が約 10 度であることを考慮すると、例えば、土石流の流速が約 10m/s、流動深が約 3.5m で家屋が破壊される値程度となる。

以上のように、平成 26 年 8 月豪雨で発生した土石流により、宅地内の家屋の一部が全壊・半壊した広島市安佐南区八木三丁目を対象に、家屋の破壊過程を考慮した平面 2 次元の土石流数値シミュレーションを実施し、家屋破壊モデルの現地への適用を確認した。その結果、本解析モデルによって、家屋の半壊・全壊の状態を比較的良く再現でき、土石流で全壊・半壊する可能性のある家屋を評価することがある程度可能であることがわかった。

4.3 平成 30 年西日本豪雨による広島土砂災害への適用

4.3.1 広島市安芸区矢野東（梅河団地）で発生した土砂災害の概要

1) 気象概要

平成 30 年西日本豪雨では、前線の停滞や台風 7 号の影響により、日本付近に暖かく非常に湿った空気が供給され続け、西日本を中心に広い範囲で記録的な大雨となりました。

広島市東区の温品観測所（国）において、最大 1 時間降水量 40mm、最大 24 時間降水量 317mm、7 月 5 日～7 日までの総雨量は 430mm に達し、これは広島市における 7 月の平均降水量 258.6mm の約 1.7 倍に相当する規模となった⁴⁾。

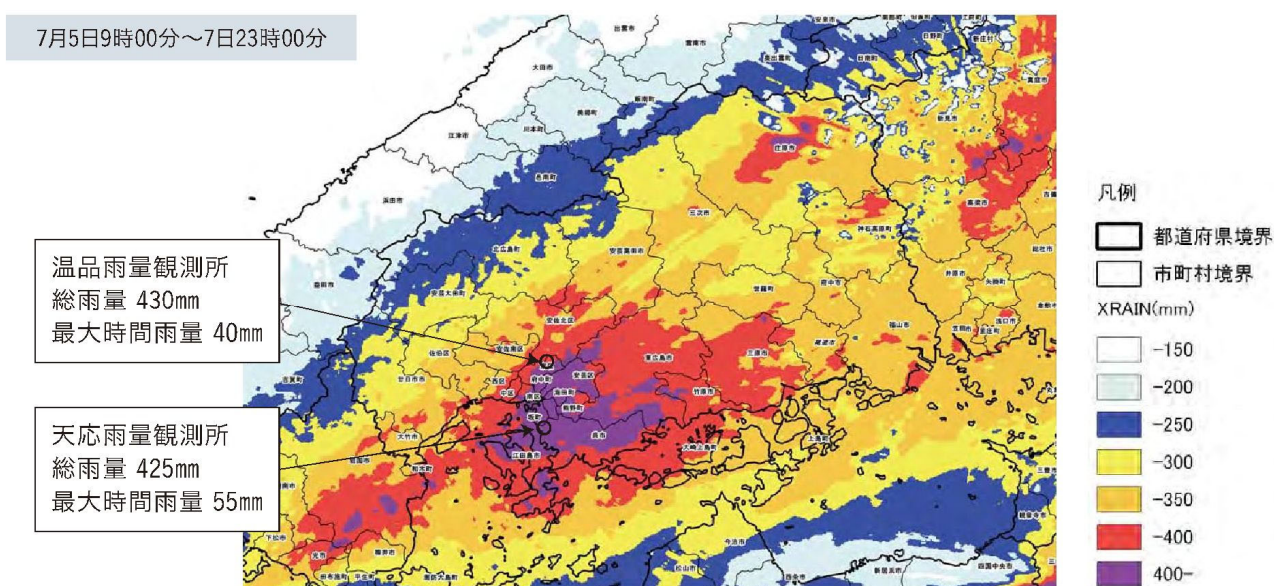


図 4.3.1 3 日間積算雨量分布図（XRAINN）⁴⁾

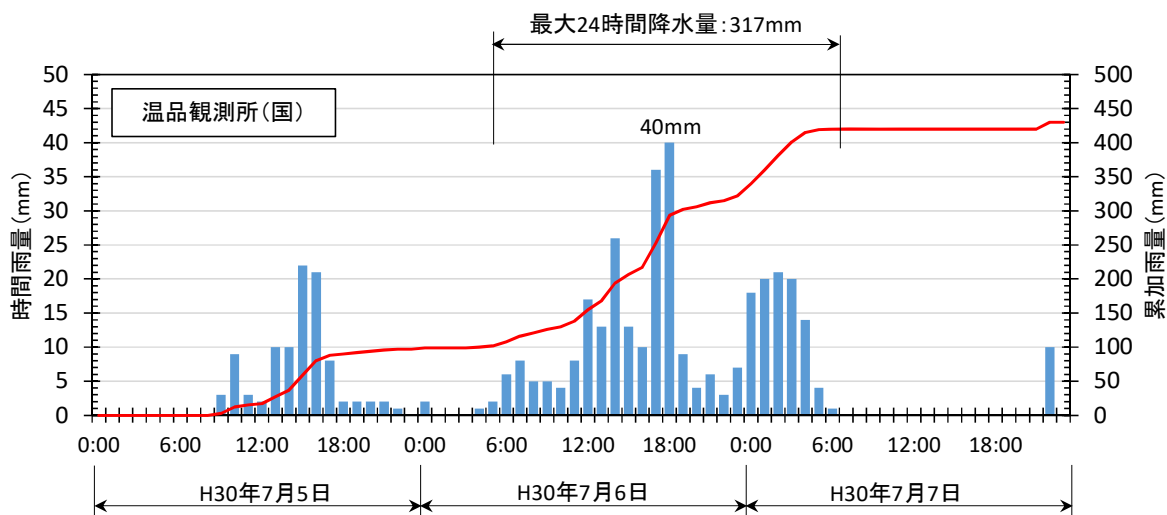


図 4.3.2 時間雨量及び累加雨量（温品観測所）

2) 土砂災害の概要

平成 30 年 7 月 5 日から 7 日の集中豪雨により、広島県内で総雨量が 400mm 以上を記録した地域では、上流で山腹崩壊が多数発生したことに伴い、大量の土砂や流木が流出し、家屋等に甚大な被害が発生した。広島県内の土砂災害発生箇所数は、1,242 箇所におよび、土砂災害による人的被害は、87 名に達した⁴⁾。



図 4.3.3 平成 30 年西日本豪雨による広島県内の被災状況⁴⁾

3) 広島市安芸区矢野東（梅河団地）の被災状況

図 4.3.4 に被災前後の梅河団地の航空写真を示す。梅河団地では、北側の 13 溪流，南側の 14 溪流でいずれも土石流が発生し，特に北側の 13 溪流で発生した土石流は，規模が大きく，人的被害も生じている。

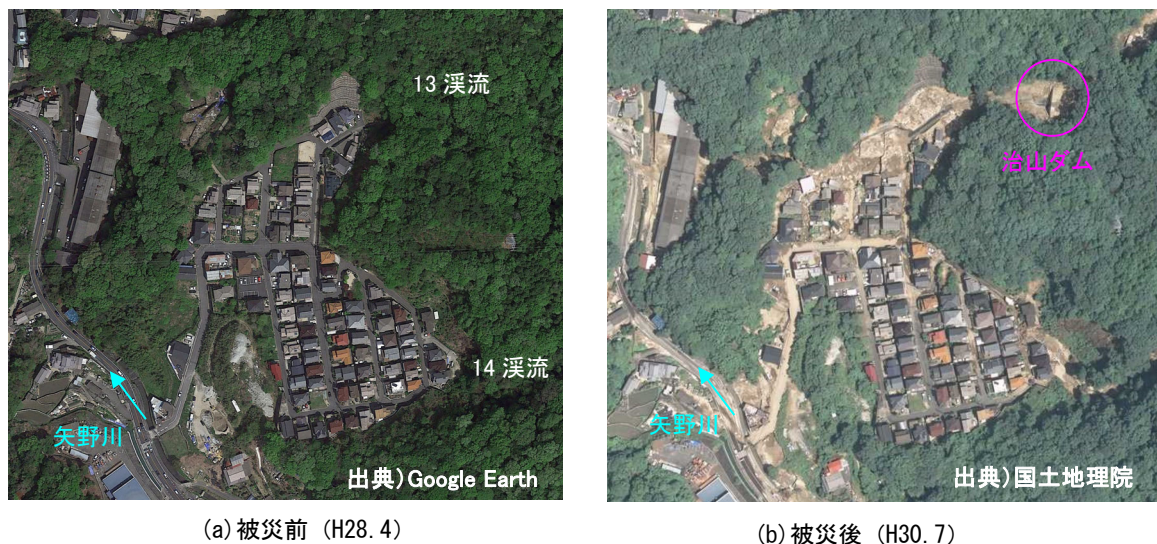


図 4.3.4 被災前後の状況（梅河団地）

多くの人的被害を発生させた土石流が流下した北側の 13 溪流の被災後の様子を図 4.3.5 に示す。山頂から宅地までの斜面は平均 24 度の急斜面となっており，溪流の地質は花崗岩であり，地盤の表層は花崗岩が風化した真砂土に加えて，球状風化した直径数 m の巨礫が存在していた。土石流は大きく 2 つの溪流（斜面崩壊は北側溪流で 1 箇所，南側溪流で 2 箇所）から発生しているが，両溪流は宅地に流入する直前に合流しており，合流後のすぐ下流に治山ダム（図 4.3.4(b) 参照）が設置されていた⁵⁾。



図 4.3.5 梅河団地北側 13 溪流の被災後の様子⁵⁾

治山ダムは、被災 5 ヶ月前の平成 30 年 2 月に完成したばかりのもので、発災直前の時点では、土砂はほぼ堆積していなかったと考えられる。一般に、治山ダムは土石流を受け止めるようには設計されていないが、当該治山ダムは、土石流を捕捉できる機能を持たせたものとなっていた⁵⁾。

図 4.3.6 に、治山ダム下流の土石流が宅地に流れ込んだ場所の様子を示す。

図 4.3.6(a) に示すように、被災前は、土石流が宅地に流れ込む領域には家屋が密集していたことがわかる。しかし、図 4.3.6(b) に示すように、被災後は、それらの家屋の多くが土石流によって流失している。



(a)被災前 (Google earth)



(b)被災後



(c) 宅地内の土石流の流動経路

図 4.3.6 土石流が宅地に流れ込んだ場所の様子

図 4.3.6(c)に土石流が家屋に流入した地点の被災後の様子を上空から撮影した様子を示す。溪流の平面形状が緩やかに左に曲っており溪流右岸側(湾曲外岸側)の家屋が全て流出している。一方、左岸側(湾曲内岸側)の家屋は流出せずに残っている家屋が存在することがわかる。また、土石流は宅地の北側(図 4.3.6(c)の右側)を直線的に流れたものと宅地中央の道路を南下した流れ(図 4.3.6(c)の左に分岐した流れ)の大きく二つに分岐して流れており、宅地の北側を直線的に流れた土石流の多くは宅地西側(図 4.3.6(c)の奥側)の崖を流れ下った。

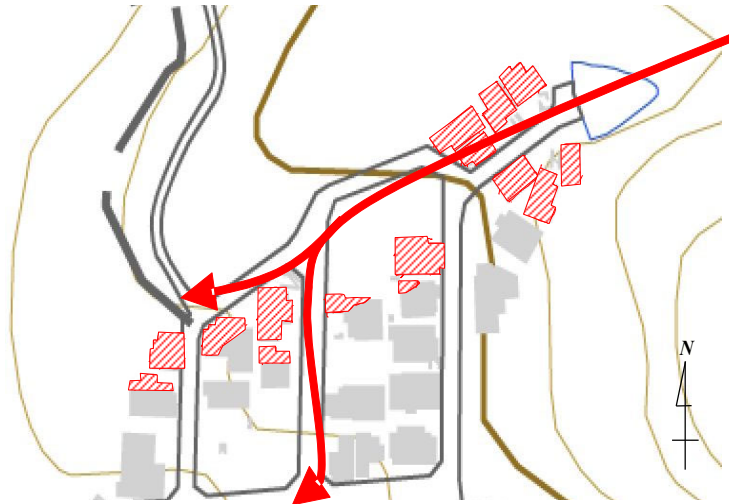


図 4.3.7 被災した家屋（赤斜線）と土石流の流れ

図 4.3.7に破壊された家屋の位置を示す。家屋の破壊は、主として宅地の北側(図 4.3.6(c)の右側)を直線的に流れた土石流によって引き起こされている。多くの家屋が全壊となっているが、全壊家屋の南側に一部半壊している家屋もある。

4.3.2 宅地内における家屋倒壊の再現

平成 30 年 7 月の西日本豪雨による広島市安芸区矢野東で発生した土石流を対象に，土石流の数値シミュレーションを実施し，土石流の流下範囲や家屋に作用する土石流の流体力分布を明らかにし，宅地内における土石流の氾濫特性や家屋倒壊の再現性の確認を行った。

1) 解析モデル

本解析でも，「第 3 章 家屋破壊の影響を考慮した土石流の数値シミュレーションモデルの構築」で示した平面 2 次元土石流解析モデルを用いる。また，家屋に作用する応力 (F_{hx}) については，式 (4-1) を用いる。

2) 解析条件

(1) 計算領域及び斜面崩壊地点

解析領域は，図 4.3.8 の航空写真内の黒枠で示された領域であり，梅河団地 13 溪流源頭部から矢野川までの約 950m×400m の領域である。地形データは，国土地理院により被災前に測定されたもので，平面的に 5m の解像度の DEM データである。解析格子は，家屋の形状や道路上を流下する土石流を表現するため，2m×2m の正方形格子を用いた。

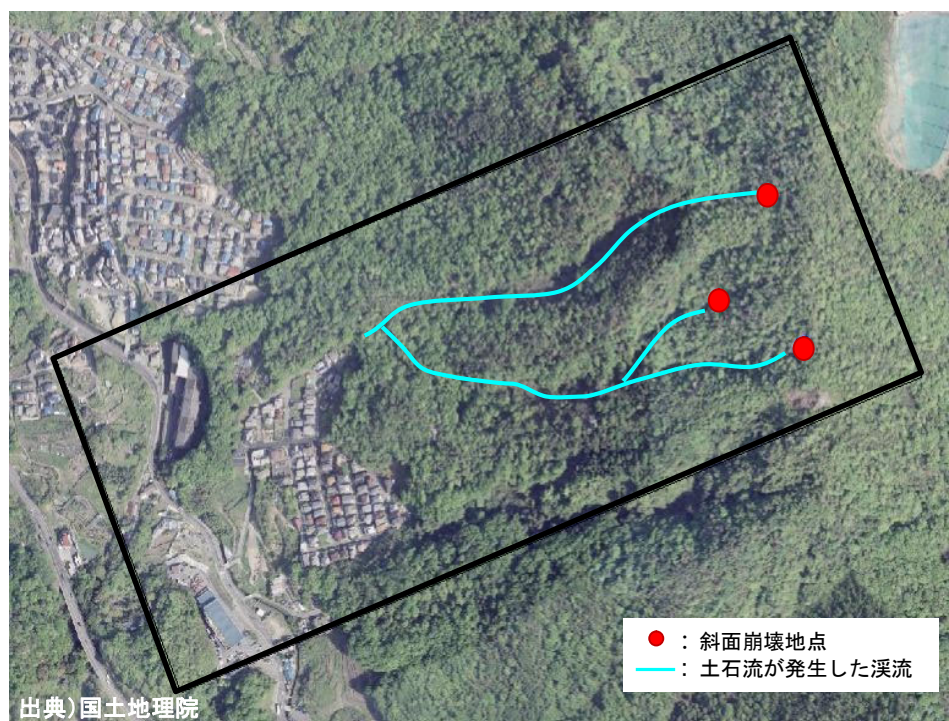


図 4.3.8 計算領域と斜面崩壊地点

土石流は斜面崩壊を発端として発生するものとし，条件として飽和状態の崩壊土量を与えた。斜面

崩壊は、図 4.3.8 に示すように北側の溪流山頂付近に 1 箇所、南側の溪流山頂付近に 2 箇所の計 3 箇所を考慮した。現地の状況から、南側の溪流からの土石流が北側の溪流の土石流よりも先に発生していると考えられる。

(2) 解析条件

本解析の解析条件と整理すると下表のとおりとなる。

表 4.3.1 解析条件一覧表

項 目	解析条件	備 考
対象地区	広島市安芸区矢野東（梅河団地）	
解析領域	流下方向 950m×流下横断方向 400m （梅河団地 13 溪流源頭部～矢野川までの領域）	
解析格子	2m×2m（正方形メッシュ）	
地形データ	5mDEM データ（国土交通省）	被災前地形データ
粒径条件	平均粒径：1cm	
斜面崩壊条件	・斜面崩壊箇所：13 溪流源頭部の 3 箇所 （北側溪流 1 箇所，南側溪流 2 箇所） ・崩壊土砂量 ：約 5m ³	
家屋条件	・非被災家屋：非破壊構造物として扱う ・被災家屋：家屋が無い仮定して扱う （家屋の破壊は考慮していない）	

なお、治山ダムは非浸食性の構造物として扱い、高さは現地で計測した値を用いた。宅地の中の家屋は、非浸食域としたが、土石流によって流された家屋については、本解析では家屋が無いと仮定して扱っている。

また、斜面崩壊については、現地の状況から、南側の溪流からの土石流が北側の溪流の土石流よりも先に発生していると考えられるため、本解析では、南側の 2 つの溪流から同時に発生した土石流が宅地に到達した直後（100 秒後）に、北側の溪流で斜面崩壊を発生させる条件とした。

3) 宅地内における家屋倒壊の再現

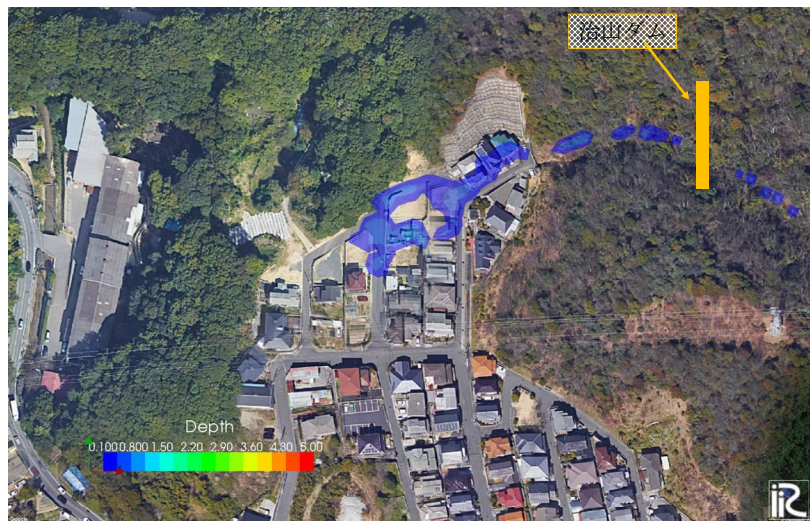
解析結果より、宅地内における土石流の流動深及び土石流が家屋に作用する最大応力の時空間的な分布を、それぞれ図 4.3.9、図 4.3.10 に示す。

120 秒の時点では、南側の溪流で発生した土石流のみが宅地に流れ込んだ状態である。南側溪流からの土石流は溪流出口の治山ダムに一部堆積するため、宅地内における流動深及び家屋への作用応力は非常に小さい。そのため、この時点では、宅地内の家屋の被災も少ないと考えられ、南側の溪流で発生した土石流のみを考えると、土石流を捕捉できる機能を持たせた治山ダムの効果が認められる。

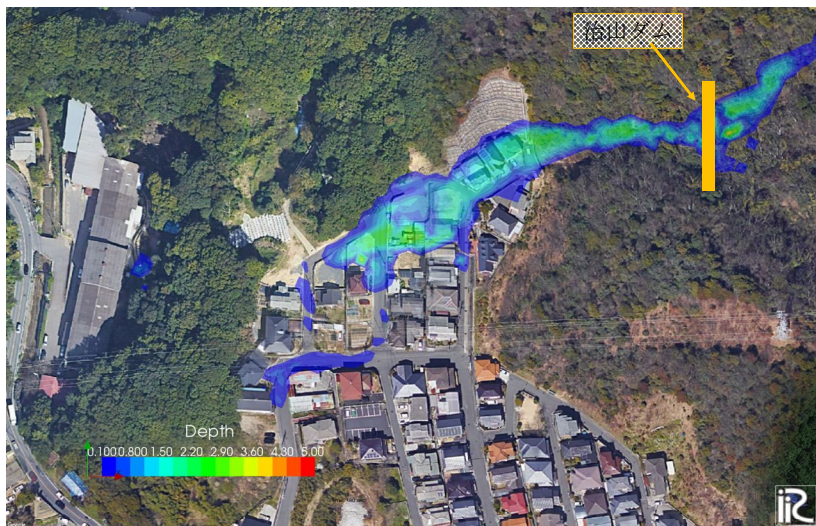
180 秒以降は北側の溪流からの土石流も、ほぼ満砂の治山ダムを乗り越えて宅地に流れ込んでいる。180 秒の時点では土石流が宅地北側を直線的に西に向かって流れ、団地を通過して北西の崖下の工場にまで達している。また、宅地北側における家屋に作用する最大応力が非常に大きくなっていることから、対象地点の家屋の多くは、第 2 波となる北側溪流からの土石流によって破壊された可能性が高いと考えられる。

240 秒の時点では、宅地北側に堆積した土砂により、土石流が西に直線的に流れることができなくなり、土石流の流れが宅地中央の道路を南下している。南下した土石流は、流動深は大きい流速が小さいため、家屋に作用する応力は宅地北側ほど大きくない。宅地中央の道路を南下した土石流は、流動深及び家屋に作用する応力も小さい薄い流れとなって、そのまま道路に沿って矢野川まで達している。また、240 秒の時点での宅地内における家屋に作用する最大応力の大きい領域は、図 4.3.7 の破壊した家屋の分布と良く一致していることがわかる。なお、本解析による治山ダム上流域の浸食量は約 6,400m³ であり、治山ダムの堆積可能容量約 2,400m³ を大きく上回る。

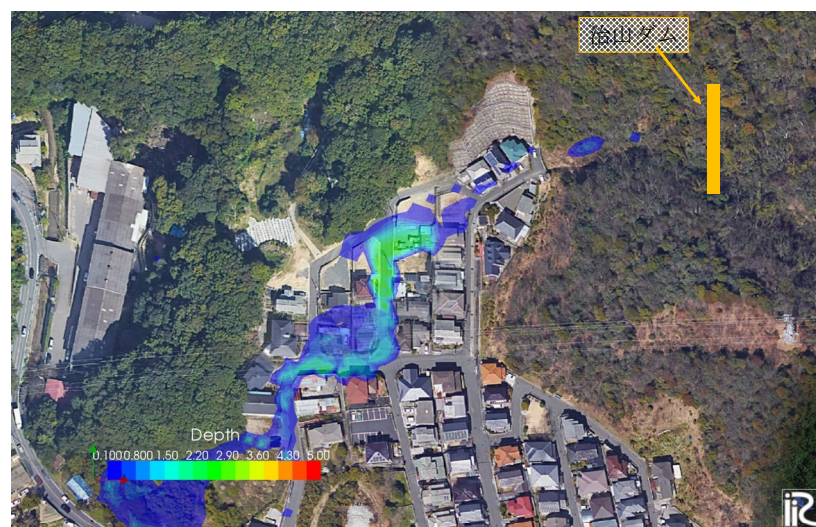
宅地の北側には南北に道路が 3 本みられるが、このうち、土石流が通過したのは中央と西側の道路で、土石流が発生した溪流に一番近い東側の道路に土石流は流下していないことがわかる。また、宅地中央を東西に横断する道路により、土石流が西側へ向きを変え流下したため、宅地中央を東西に横断する道路の南側には土石流は流下していない。このことは、避難経路や避難所等を考える上で非常に重要な情報となる。



(a) 120 秒後

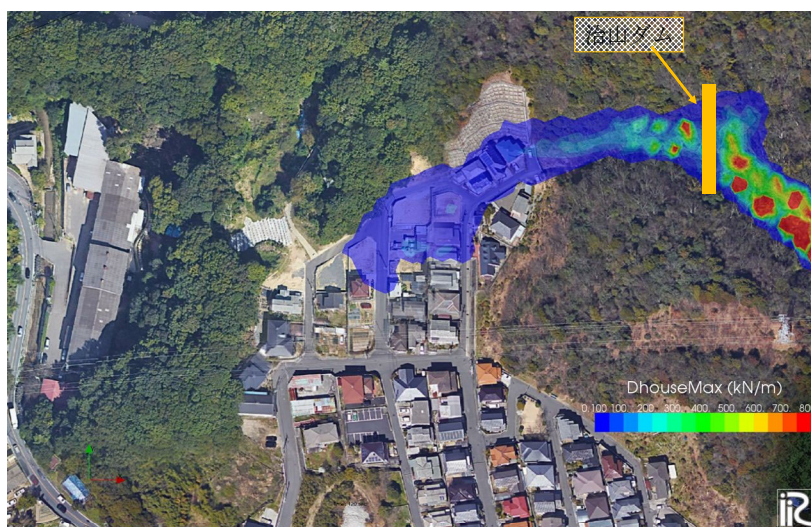


(b) 180 秒後

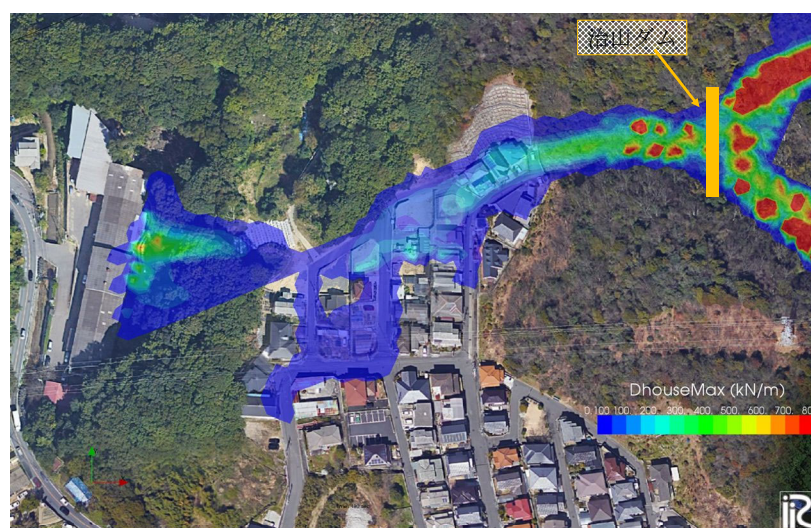


(c) 240 秒後

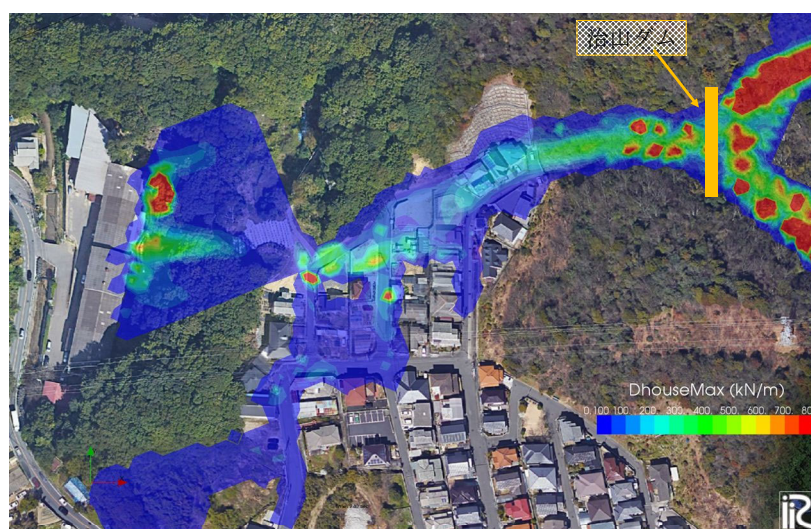
図 4.3.9 宅地内における流動深の時空間的な変化



(a) 120 秒後



(b) 180 秒後



(c) 240 秒後

図 4.3.10 宅地内における家屋に作用する最大応力の時空間的な変化

4.3.3 土砂災害警戒区域等の課題と評価

現在、住民が知ることのできる土砂災害情報の一つに、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）及び土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）がある。これらの区域は、各自治体によって基礎調査を基に指定され、土砂災害に対する避難・警戒、家屋建造可否や家屋を守るための防災対策など非常に有効な情報となっている。

ここでは、現状における土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の課題を示すとともに、広島市安芸区矢野東（梅河団地）に設定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）や土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）を例に評価を行った。なお、土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等⁶⁾には、「土石流」、「地滑り」、「急傾斜地の崩壊」とあるが、ここでは、土石流による土砂災害警戒区域等について述べるものとする。

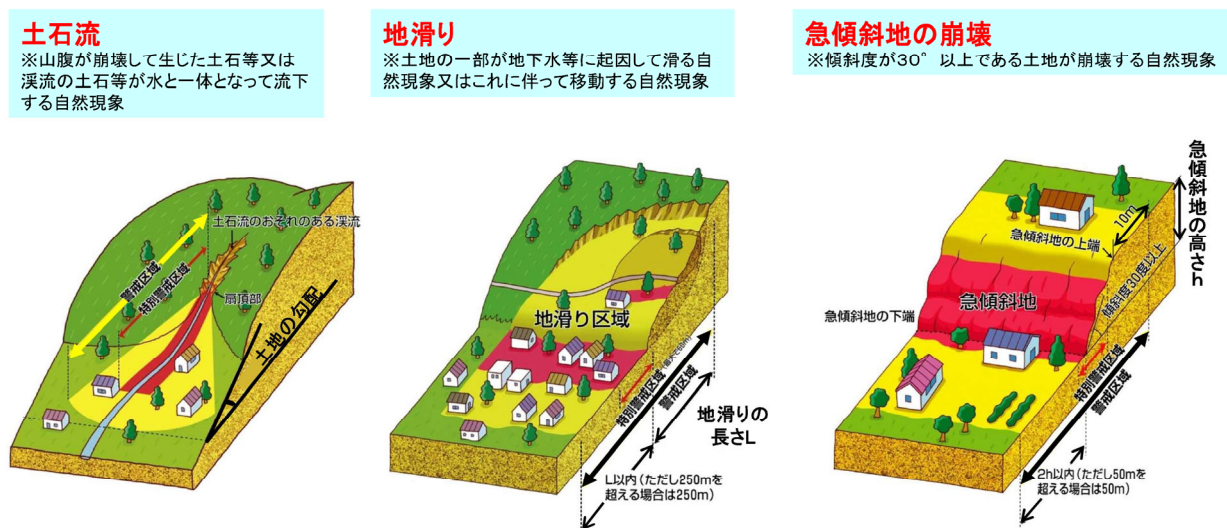


図 4.3.11 土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等⁶⁾

1) 土砂災害警戒区域（土石流）等の課題

土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等について、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）は、土砂災害が発生した場合に、住民等の生命または身体に危害が生じるおそれがある区域、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）は、土砂災害が発生した場合に、建築物に損壊が生じ住民等の生命または身体に著しい危害が生じるおそれがある区域であり、土石流の場合は、それぞれ、土石流が氾濫する区域、土石流により家屋が倒壊する区域と考えることができる。

平成 30 年 7 月の西日本豪雨では、土砂災害による死者の約 9 割（被災位置が特定できた 107 名のうち、土砂災害警戒区域内での被災は 94 名）は、土砂災害警戒区域等で発生⁷⁾していた。一方で、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内ではあるが、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）外で家屋の全壊が生じた事例や土砂災害警戒区域（イエローゾーン）外においても家屋の全壊被害が生じ死者が発生した事例^{7) 8)}も確認されている。

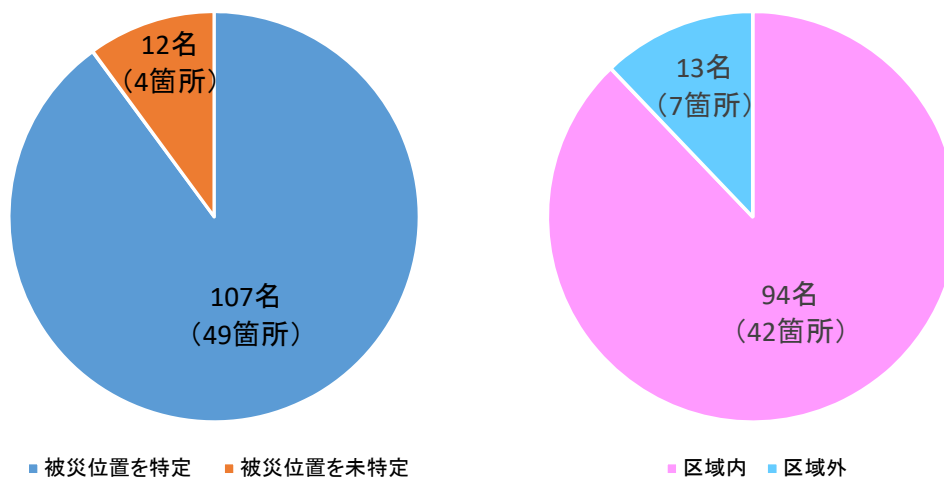


図 4.3.12 人的被害発生箇所における土砂災害警戒区域の指定状況（平成 30 年 7 月豪雨）



図 4.3.13 土砂災害警戒区域（イエローゾーン）外において全壊被害が生じた事例⁸⁾

また、国土交通省国土技術政策総合研究所が実施した過去の土砂災害 16 事例の検証結果⁹⁾では、実際の被災家屋のうち、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）と同等の方法で設定された家屋被災範囲に含まれるのは、約 7 割～8 割程度に留まっている。

表 4.3.2 過去の土砂災害 16 事例の検証結果⁹⁾

		①／②	該当数①	全数②	備考
被災家屋含有率 (的中率)	全壊・半壊合計	0.767	23 戸	30 戸	
	全壊	0.700	7 戸	10 戸	
	半壊	0.800	16 戸	20 戸	
無被災家屋率(空振率)		0.772	78 戸	101 戸	

※被災家屋含有率（的中率）：土石流により被災した家屋のうち、当該範囲内において全壊あるいは半壊の状態になった家屋
無被災家屋率（空振率）：当該範囲内の家屋のうち、被災しなかった家屋

これらの要因は、両警戒区域の設定方法に起因すると考えられる。

両警戒区域は基礎調査結果をもとに設定され、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）は、土石流扇状地の上流端である土石流堆積開始地点を起点とした扇形の土砂氾濫域を想定し、地盤勾配が緩やかになる地点（勾配 2°）を土石流の氾濫範囲の下端とした区域とされ地形条件のみで設定される。土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）は、土石流により建築物に作用すると想定される流体力が建築物の耐力を上回る範囲を区域として設定するが、いずれも等流仮定や経験式から算出されるものである¹⁰⁾。

現状の土砂災害警戒区域等の設定方法は、全国の膨大な土石流危険渓流に適用するために簡便な方法が用いられており、家屋が存在しない想定など、ある一定レベルの精度で氾濫域等の予測はできるが、谷出口で渓流が屈曲した局所的な地形や家屋・道路等の影響を踏まえた土石流の動態までは捉えることができていない。

2) 広島市安芸区矢野東（梅河団地）に設定されている土砂災害警戒区域等の評価

前項の広島市安芸区矢野東(梅河団地)を対象とした宅地内における家屋倒壊の再現結果をもとに、設定されている土砂災害警戒区域等の評価を行った。

図 4.3.14 に、梅河団地 13 渓流に設定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）を示す¹¹⁾。図には、平成 30 年 7 月豪雨時に発生した土石流により破壊した家屋も示している。宅地内の破壊家屋は、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内ではあるが、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の外となっており、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）以外でも、家屋が破壊するおそれのある箇所が存在することが示唆される。

図 4.3.15 に、数値シミュレーションによる 240 秒までに土石流が家屋に作用した最大応力の分布

を示す。宅地北側における家屋に作用する最大応力が非常に大きくなっており、土石流は団地を通過して北西の崖下の工場（イエローゾーン外）にまで達している。宅地域における家屋に作用する最大応力の大きい領域は、破壊した家屋の分布とよく一致していることがわかる。

本解析では、土石流によって流された家屋は無いものと仮定して扱っているが、家屋があった場合、家屋前面に土石流が堆積し、さらに大きな応力が作用すると考えられる。また、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内においても、土石流が流れてこない被災リスクが低い箇所が存在しており、避難を考える上で非常に重要な情報となる。



図 4.3.14 土砂災害警戒区域等と家屋被害の分布

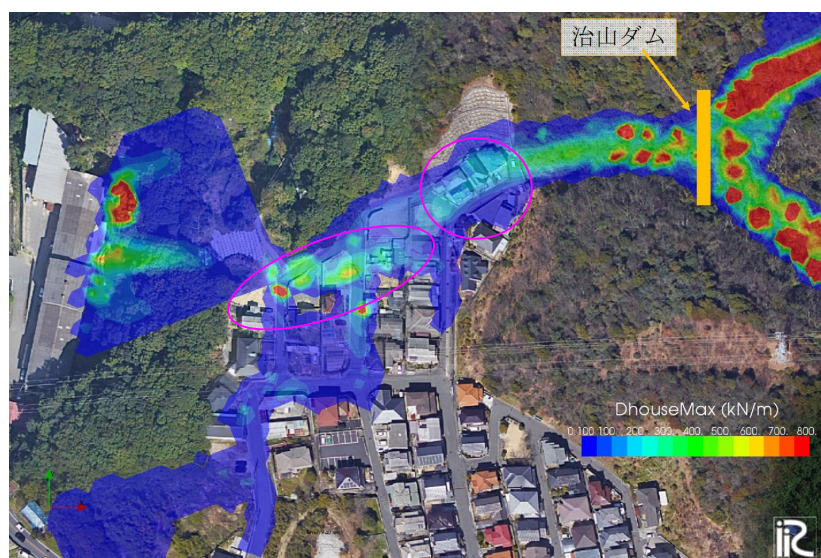


図 4.3.15 家屋作用する最大応力（240 秒後）

4.4 結語

本章では、平成 26 年 8 月豪雨で発生した土石流により、宅地内の家屋の一部が全壊・半壊した広島市安佐南区八木三丁目を対象に、家屋の破壊過程を考慮した土石流の数値シミュレーションにより再現計算を実施し、家屋破壊モデルの現地への適用を確認した。その結果、本解析モデルによって、家屋の半壊・全壊の状態を比較的良く再現でき、土石流で全壊・半壊する可能性のある家屋を評価することがある程度可能であることがわかった。

また、平成 30 年 7 月の西日本豪雨による広島市安芸区矢野東（梅河団地）で発生した土石流を対象に、土石流の数値シミュレーションを実施し、土石流の流下範囲や家屋に作用する土石流の流体力分布を明らかにし、宅地内における土石流の氾濫特性や家屋倒壊の再現性の確認を行った。さらに、実際の被災事例から、現状における土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の設定方法等に関する課題を挙げるとともに、広島市安芸区矢野東（梅河団地）の再現計算結果をもとに、設定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）や土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の評価を行った。

参考文献

- 1) 国土交通省 中国地方整備局 広島西部山系砂防事務所：平成 26 年 8 月 20 日豪雨 広島土砂災害.
- 2) 独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター：20 万分の 1 日本シームレス地質図.
- 3) 竹林洋史，藤田正治，江頭進治：2014 年 8 月に広島で発生した土石流の流動・氾濫特性，京都大学防災研究所年報，第 58 号 A，pp34-39，2015.
- 4) 国土交通省 中国地方整備局 広島西部山系砂防事務所：平成 30 年 7 月豪雨 土砂災害版.
- 5) 竹林洋史，藤田正治：2018 年 7 月に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の流動特性，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.75，No.2，ppI_859-I_864，2019.
- 6) 国土交通省ホームページ：土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等について。
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/gaiyou.pdf>
- 7) 国土交通省：「実効性のある避難を確保するための土砂災害対策のあり方について」報告書，2019.
- 8) 国土交通省：実効性のある避難を確保するための土砂災害対策検討委員会（第 1 回），資料 4 土砂災害警戒区域の検証，2018.
- 9) 寺田秀樹，水野秀明：土石流による家屋被災範囲の設定方法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.70，pp9-23，2003.
- 10) 広島県土木建築局：基礎調査マニュアル（案）（土石流編・システム利用），pp.4-10-4-169，2016.
- 11) 広島県ホームページ：広島県防災 Web，土砂災害ポータルひろしま。
<https://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/map/keikai.aspx>

第5章 宅地域における土石流の流動特性と危険度評価

5.1 概説

下流域に宅地などが存在する山地溪流では、土砂災害警戒区域等（土砂災害警戒区域：イエローゾーン、土砂災害特別警戒区域：レッドゾーン）が各自治体によって設定されている¹⁾。土砂災害警戒区域等の設定に用いられる土石流の氾濫域は、質量保存則及び運動量保存則に基づいた数値シミュレーションによって得られた結果は用いられておらず、例えば、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）では、溪流出口を起点とした扇形の土砂氾濫域を想定し、地盤勾配が緩やかになる地点（勾配2度）を土石流氾濫範囲の下端としている²⁾。しかし、実際の土石流は、宅地域に存在する家屋やその破壊の有無、道路の影響等を受け、より複雑な形状で氾濫するため、土砂災害警戒区域等の区域内においても、危険度に分布が生じることが考えられる。

また、一方で、近年では、土石流の数値シミュレーションを用いて、宅地域の家屋や道路の影響を考慮した土石流の流動特性や被災状況の再現等が行われるようになっており^{3),4),5),6),7)}、数値シミュレーションから得られる情報も非常に有効な情報となっている。

本章では、溪流出口に宅地域が広がる地区を対象に、家屋の影響を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施し、宅地域における家屋影響の有無による土石流の流動特性を検討する。次に、複数の斜面崩壊の発生タイミングや斜面崩壊数の違いが、宅地域に流入する土石流の氾濫域や流動深の空間分布に与える影響を検討する。最後に、宅地域における家屋や道路の配置が土石流の被害形態に与える影響や、土石流による危険度の空間分布を検討し、被害形態に応じた危険度の評価を行う。



(a) 広島市安佐南区八木三丁目で発生した土砂災害
(平成26年8月豪雨)⁸⁾

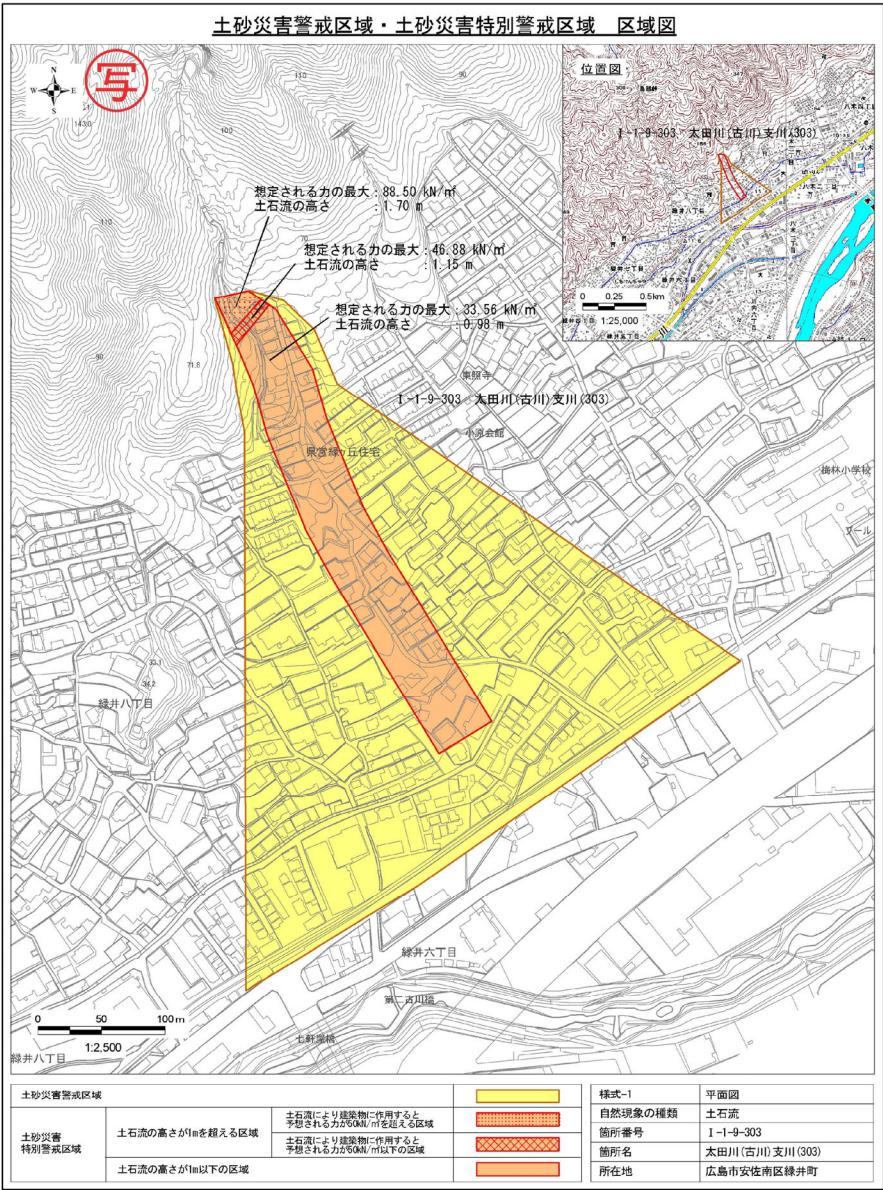


(c) 広島安芸区矢野東で発生した土砂災害
(平成30年7月西日本豪雨)⁹⁾

図 5.1.1 同時または多発的に発生した土石流の事例

5.2 宅地に存在する家屋が土石流の流動特性に与える影響

溪流出口付近に宅地域が拡がり、家屋が密集するような箇所では、土石流が発生し、宅地域に氾濫した場合、家屋や道路等の影響を受け、より複雑な形状で氾濫する。また、家屋破壊の有無によっても、氾濫した土石流の動態は変化することとなる。そこで、本節では、「4.2 平成 26 年 8 月豪雨による広島土砂災害への適用」で家屋破壊モデルの現地への適用を行った広島市安佐南区八木三丁目を対象に、家屋の影響を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施し、宅地域における家屋影響の有無による土石流の流動特性を検討した。なお、図 5.2.1 には、平成 26 年 8 月豪雨による広島土砂災害後に、対象となる広島市安佐南区八木三丁目において指定された土砂災害警戒区域、土砂災害特別警戒区域（平成 27 年 3 月 30 日指定：広島県告示第 249 号）を示す¹⁰⁾。



※平成 26 年 8 月豪雨による被災当時は調査中

図 5.2.1 土砂災害警戒区域、土砂災害特別警戒区域（広島市安佐南区緑井町）¹⁰⁾

5.2.1 解析条件

解析条件については，基本的に 4.2 と同様で，表 5.2.1 に示す．

表 5.2.1 解析条件一覧表

項 目	解析条件	備 考
対象地区	広島市安佐南区八木三丁目	
解析領域	流下方向 2km×流下横断方向 0.7km (本川源頭部～JR 加治線までの領域)	
解析格子	2m×2m (正方形メッシュ)	
地形データ	1mDEM データ (国土交通省：平成 21 年度)	被災前地形データ
粒径条件	平均粒径：1cm	
斜面崩壊条件	・斜面崩壊箇所：本川源頭部 1 箇所 ・崩壊土砂量：70m ³	
家屋条件	・木造家屋のみ崩壊 ・鉄筋コンクリート構造の家屋：破壊しない	

解析ケースについては，表 5.2.2 に示すとおりである．

表 5.2.2 解析ケース一覧表

ケース名	内 容	備 考
Case1	家屋破壊モデルにより，家屋の破壊を考慮した解析	
Case2	家屋を不透過な非破壊構造物として扱った解析	
Case3	家屋の存在を無視し，地盤高を地形条件とした解析	

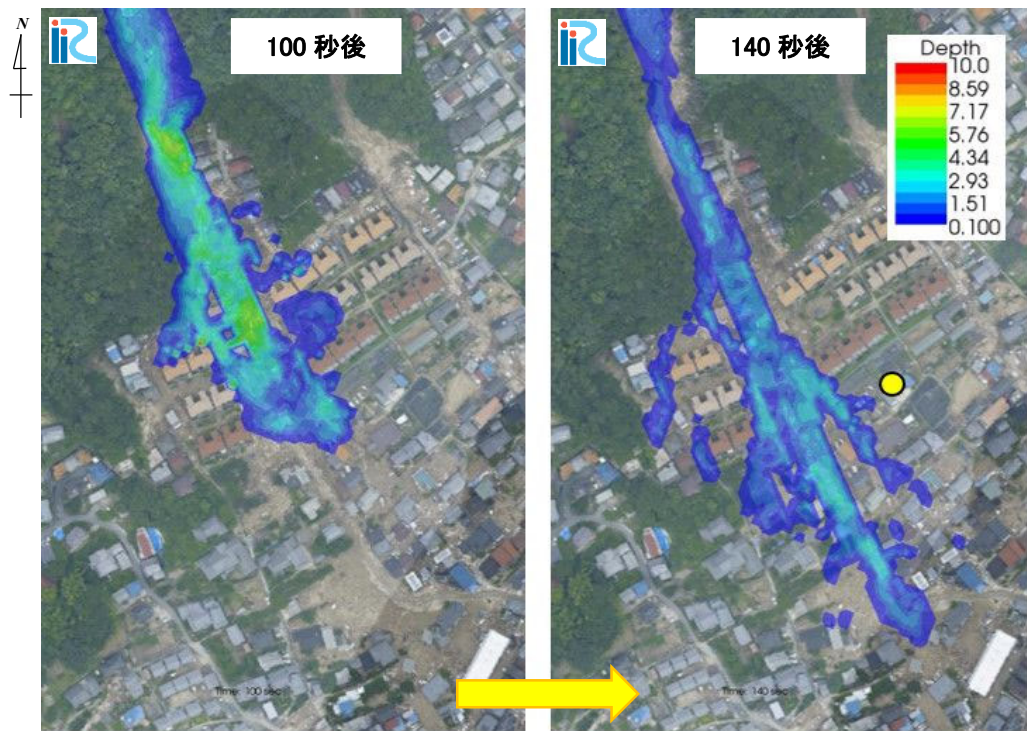
5.2.2 家屋破壊の有無が土石流氾濫域に与える影響

図 5.2.2 に、実際の広島市安佐南区八木三丁目における家屋の被災状況と、家屋の破壊を考慮した Case1、家屋を不透過な非破壊構造物として扱った（家屋の破壊を考慮していない）Case2 の宅地域における土石流の主流部の流れを示す。また、図 5.2.3 に、Case1 と Case2 の宅地域における土石流の流動深の時空間的な変化を示す。なお、経過時間は斜面崩壊開始からの時間を示している。

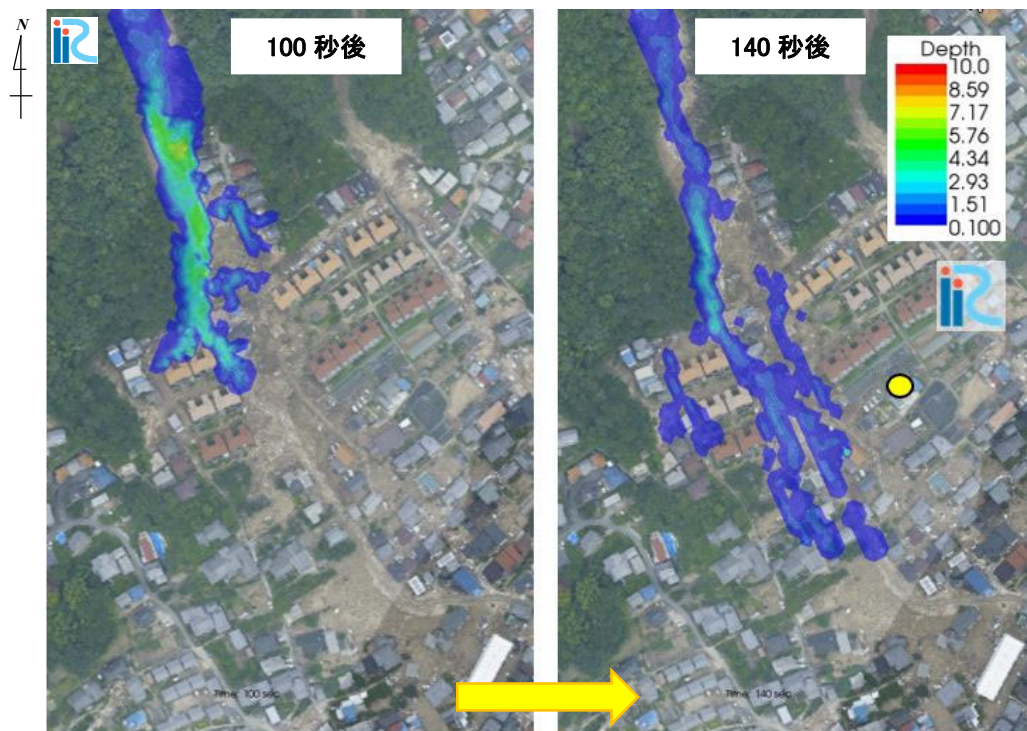
図 5.2.2 より、Case1 では、溪流出口から宅地域に流入した土石流は、溪流出口の家屋（4 軒）を破壊し、さらに家屋を破壊しながら直線的に流下している一方、溪流出口の家屋（4 軒）を非破壊とした Case2 では、土石流の流れは家屋を避けるように西側に主流部の向きを変え、山裾から道路へと流下している。また、図 5.2.3 より、Case2 のように、家屋の破壊を無視すると、家屋の上流域に顕著な土砂の堆積域が形成されるため、氾濫範囲が狭くなることがわかる。溪流出口の家屋（4 軒）が破壊されなかったため、土石流の主流が西側の家屋の少ない領域に移動しており、実現象と大きく異なる結果となった。



図 5.2.2 家屋の被災状況と家屋破壊の有無による土石流の流れ



(a) 流動深の時空間変化 (Case1) (背景写真：国土交通省)



(b) 流動深の時空間変化 (Case2) (背景写真：国土交通省)

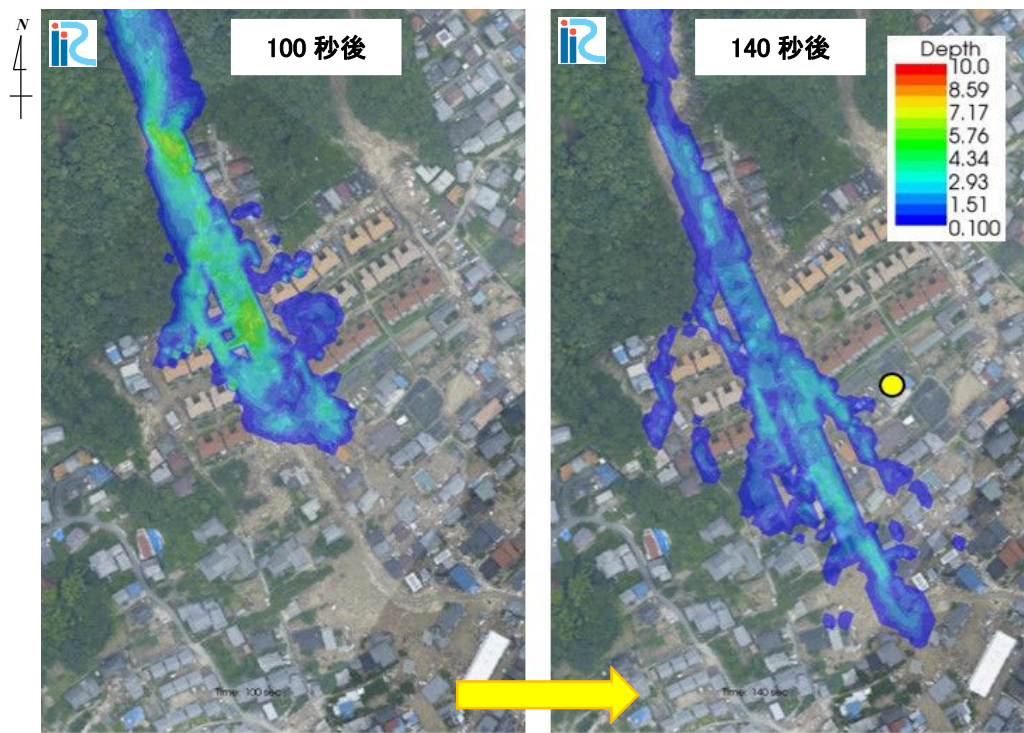
図 5.2.3 家屋の破壊が土石流の流動深に与える影響 (Case1 と Case2 の比較)

5.2.3 家屋の存在が土石流氾濫域に与える影響

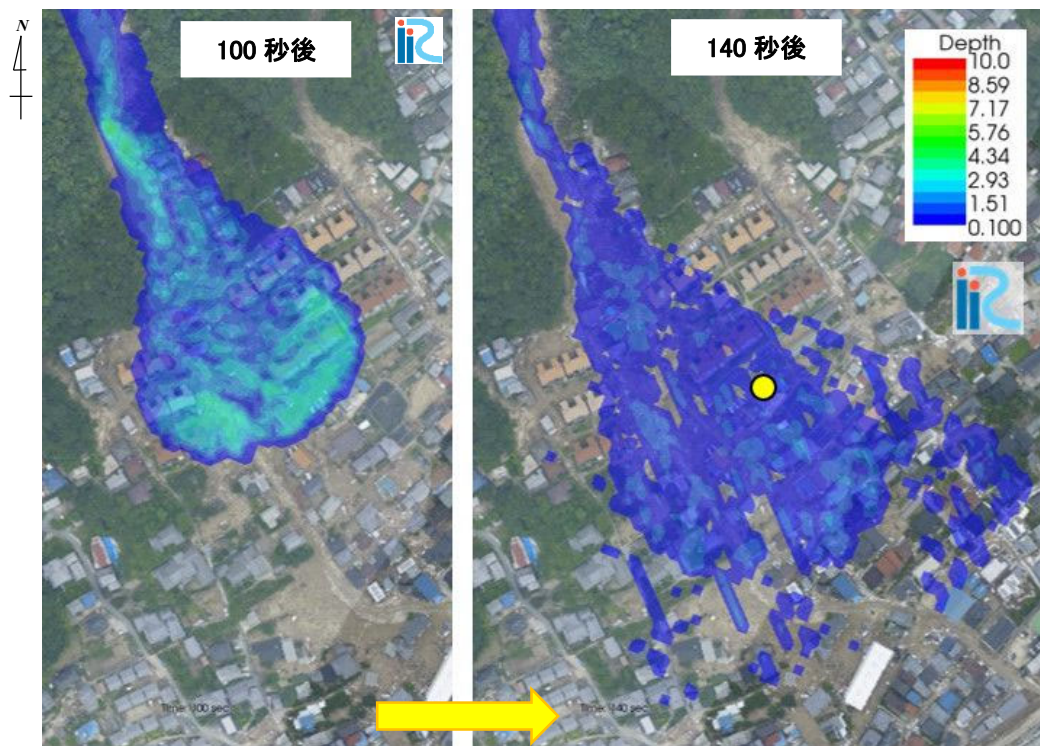
図 5.2.4 に、家屋の破壊を考慮した Case1 と家屋の存在を無視した Case3 の宅地域における土石流の流動深の時空間的な変化を示す。

図 5.2.4 より、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、土石流扇状地を形成していることがわかる。また、Case1 と比較すると土石流の氾濫域が大きく異なっており、宅地においては、家屋の存在を考慮した解析の必要性が高いことがわかる。Case1 と Case3 の図中に表示されている黄色い点の場所に着目すると、Case1 では土石流は流れてきていないが、Case3 では土石流が流れてきている。土砂災害警戒区域の設定に用いられる土石流の氾濫は、Case3 の氾濫域と比較的近い（図 5.2.1 参照）。つまり、土砂災害警戒区域として指定されている領域においても家屋の存在によって土石流が流れてこない場所が広く存在することになる。

これらの情報は、土石流発生時の避難を考えた場合、非常に重要な情報となる。一般的に、土石流発生時は非常に強い雨が降っているため、遠方への避難は困難である。そのため、家屋を考慮した数値シミュレーションによって土砂災害警戒区域内の安全な場所を把握すると、遠方への避難が困難な場合に少しでも生存率を高めるための近くの避難候補地を把握する際に非常に有効である。



(a) 流動深の時空間変化 (Case1) (背景写真：国土交通省)



(b) 流動深の時空間変化 (Case3) (背景写真：国土交通省)

図 5.2.4 家屋の存在が土石流の流動深に与える影響 (Case1 と Case3 の比較)

5.3 土石流発生条件の違いによる土石流氾濫リスクの空間分布

近年の土砂災害では、短時間で高強度の豪雨によって、多発的な斜面崩壊に伴う土石流が発生し、土石流が宅地へ流入した箇所では、多くの家屋被害や人的被害が生じている。また、土砂災害警戒区域等の設定に用いられる土石流溪流からの土砂流出量は、最も規模の大きい単一の溪流からの土砂流出量を想定しており、支川や複数溪流からの土砂流出等は考慮されていない。複数の斜面崩壊のタイミングや斜面崩壊数の違いによっては、宅地域に流入する土石流の氾濫域・流動深も大きく異なることが想定され、宅地域の土石流氾濫リスクを考える上で非常に重要な条件となってくると考えられる。そこで、本節では、「4.3 平成 30 年西日本豪雨による広島土砂災害への適用」で家屋破壊モデルの現地への適用を行った広島市安芸区矢野東（梅河団地）を対象に、複数の斜面崩壊の発生タイミングや斜面崩壊数の違いが、宅地域に流入する土石流の氾濫域や流動深の空間分布に与える影響を検討した。

5.3.1 解析条件

1) 解析条件

解析条件については、基本的に 4.3 と同様で、表 5.3.1 に示す。

表 5.3.1 解析条件一覧表

項 目	解析条件	備 考
対象地区	広島市安芸区矢野東（梅河団地）	
解析領域	流下方向 950m×流下横断方向 400m （梅河団地 13 溪流源頭部～矢野川までの領域）	
解析格子	2m×2m（正方形メッシュ）	
地形データ	5mDEM データ（国土交通省）	被災前地形データ
粒径条件	平均粒径：1cm	
斜面崩壊条件	・斜面崩壊箇所：13 溪流源頭部の 3 箇所 （北側溪流 1 箇所、南側溪流 2 箇所） ・崩壊土砂量 ：約 5m ³	
家屋条件	・非被災家屋：非破壊構造物として扱う ・被災家屋：家屋が無い仮定して扱う （家屋の破壊は考慮していない）	

2) 解析ケース

解析ケースとしては、表 5.3.2 に示すとおり、斜面崩壊のタイミングと崩壊箇所を 5 ケース設定した。なお、Case 0 は、4.3 において被災時の再現を実施した条件と同様である。

表 5.3.2 解析ケース一覧表

ケース名	斜面崩壊の条件
Case 0	南側溪流の S1, S2 が同時に崩壊後、土石流が宅地に到達した直後（100 秒後）に北側溪流の S3 が崩壊（4.3 の条件と同条件）
Case 1	南側溪流の S1, S2, 北側溪流の S3 が同時に崩壊
Case 2	南側溪流の S1 のみ崩壊
Case 3	南側溪流の S2 のみ崩壊
Case 4	北側溪流の S3 のみ崩壊

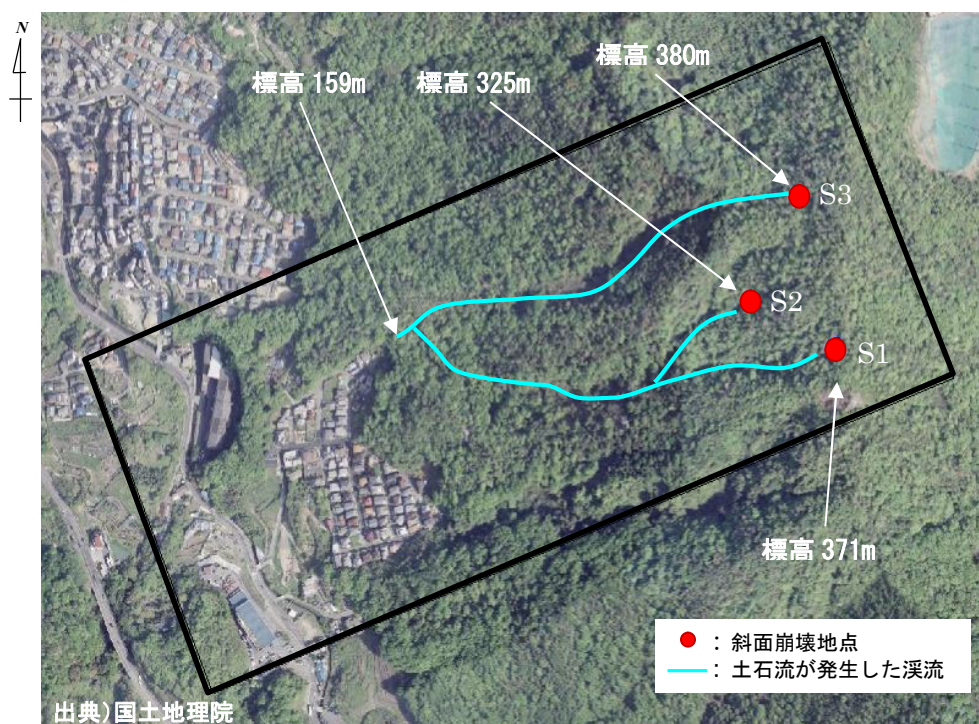


図 5.3.1 斜面崩壊地点

5.3.2 土石流氾濫リスクの空間分布に関する解析結果及び考察

図 5.3.2～図 5.3.6 に、各ケースの数値シミュレーションによって得られた梅河団地における土石流の最大流動深の空間分布を、図 5.3.7～図 5.3.11 に各ケースにおける土石流の流動深の時系列変化を示す。

Case 0 は南側溪流の斜面崩壊と北側溪流の斜面崩壊に時間差が生じたケース（被災時の再現を実施した条件と同様）、Case 1 は南側と北側の溪流の斜面崩壊が同時に生じたケースである。Case 1 では、南側溪流で発生した土石流と、北側溪流で発生した土石流は、ほぼ同時に治山ダム地点に到達し合流する。そのため、治山ダム上下流において、Case 0 に比べて流動深が大きくなっており、5m 以上の流動深で宅地域に流入している。Case 0 と Case 1 を比べると、宅地域に流入する土石流の土砂量は Case 1 の方が大きいため、流動深は大きくなり、特に家屋の前面等でその影響は顕著にみられる。一方で、土石流の氾濫範囲はほとんど変わっていないことがわかる。ただし、時系列的にみると、Case 0 では、1 回目の土石流で宅地北側を西に直線的に流れ堆積し、2 回目の土石流で宅地中央の道路を南下するのに対し、Case 1 では、宅地北側を西に向かう流れと、宅地中央の道路を南下する流れがほぼ同時に生じている。このことは、宅地に流入する土石流の規模やタイミングを考慮することによって、土石流氾濫リスクの空間分布が得られ、土石流の氾濫が生じにくい箇所等、優先的に避難場所や避難経路等を選定することができることを示している。

Case 2 と Case 3 は、同じ南側溪流の斜面崩壊であるが、Case 2 は土石流が宅地内に流入し氾濫しているのに対し、Case 3 では、溪流の出口付近で土石流が堆積して止まっている。これは、Case 2（斜面崩壊地点は図 5.3.1 の S1）が Case 3（斜面崩壊地点は図 5.3.1 の S2）に比べて、斜面崩壊地点の標高が高く流下距離が長い点、また、Case 2 の方が上流域の勾配が急なため、土石流が流下する過程で溪床や河岸を多く浸食し、土石流の規模を大きくした点が考えられる。このように同じ溪流でも斜面崩壊地点の違いにより、宅地に流入する土石流の規模が異なることがわかり、被害を想定するには斜面崩壊の発生場所の評価が重要であることがわかる。

Case 4 は、北側溪流のみで斜面崩壊が生じたケースである。Case 2 と比べると、土石流の氾濫範囲はほとんど同じであるが最大流動深は Case 4 の方が相対的に大きく、南側溪流より北側溪流からの流出土砂量が多いことがわかる。

従来、土石流溪流からの土砂流出量は、最も規模の大きい単一の溪流からの土砂流出量を用いることになっているが、本対象溪流のような場合、南側溪流、北側溪流のどちらを想定しても土石流の範囲はほぼ同じであるが、宅地域に氾濫する土石流の流動深は大きく異なるため、避難計画等を立案する際には、溪流からの土砂流出量を小さく見積もらないよう、複数の溪流からの土砂流出量を考慮する必要がある。

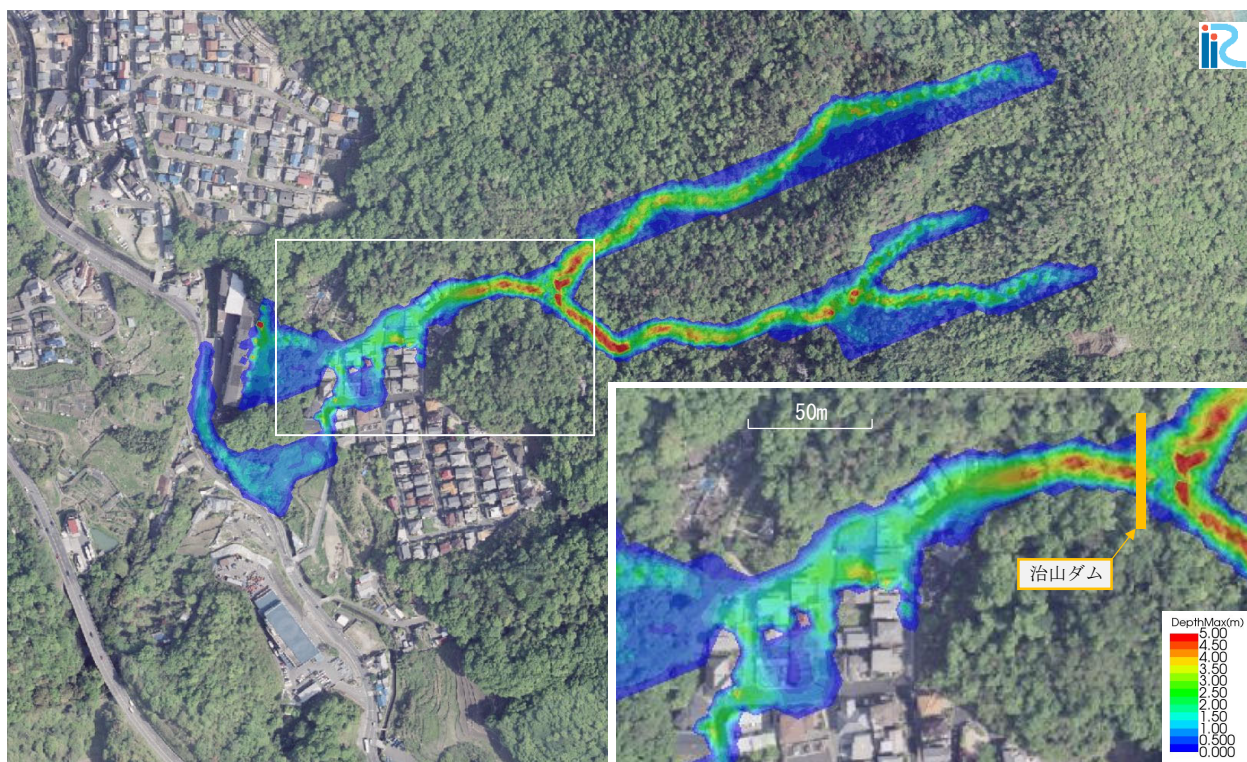


図 5.3.2 最大流動深の空間分布 (Case0)

(背景写真：国土地理院)

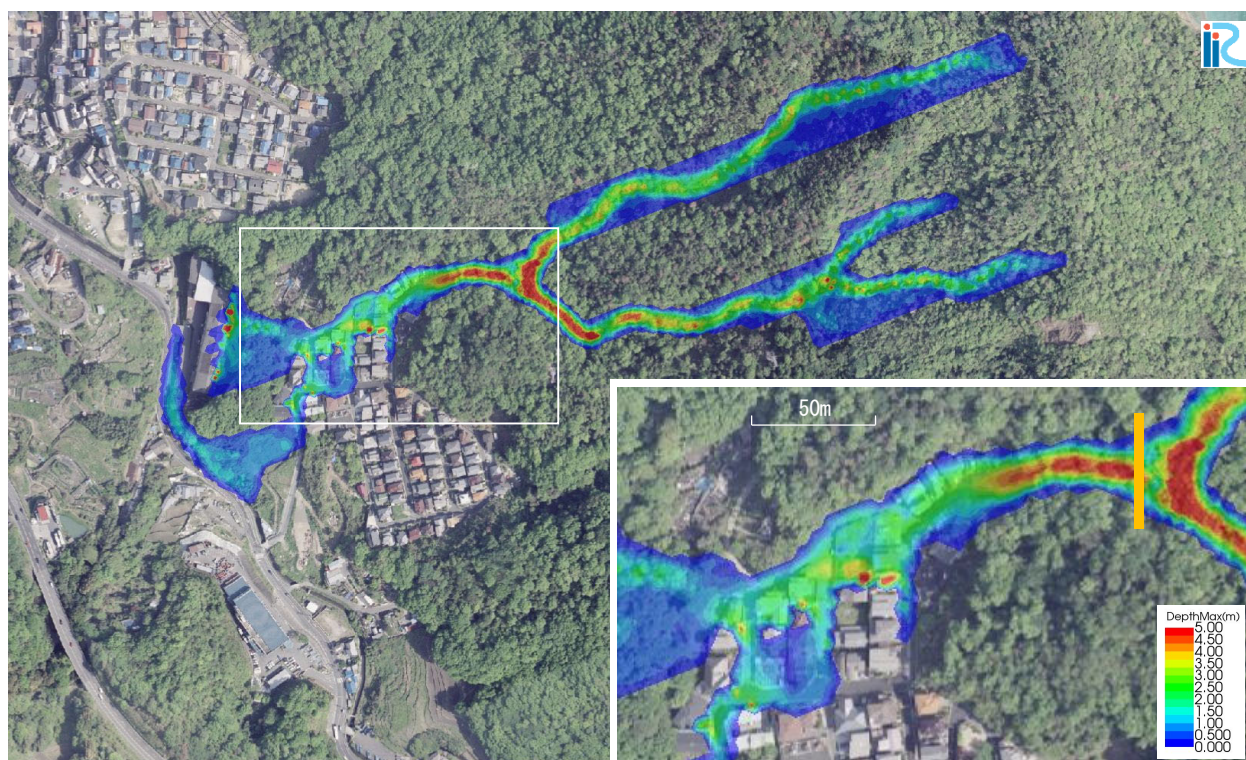


図 5.3.3 最大流動深の空間分布 (Case1)

(背景写真：国土地理院)



図 5.3.4 最大流動深の空間分布 (Case2)

(背景写真：国土地理院)



図 5.3.5 最大流動深の空間分布 (Case3)

(背景写真：国土地理院)



図 5.3.6 最大流動深の空間分布 (Case4)

(背景写真：国土地理院)



(a) 10 秒後



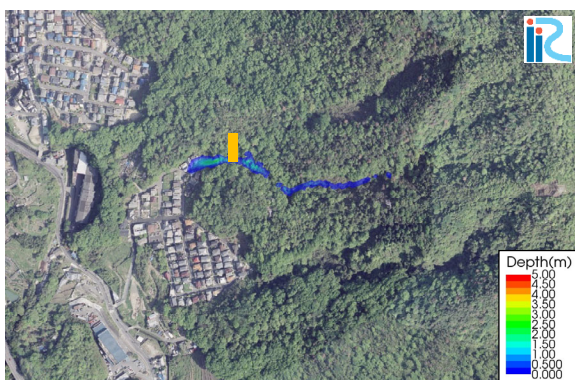
(b) 20 秒後



(c) 40 秒後



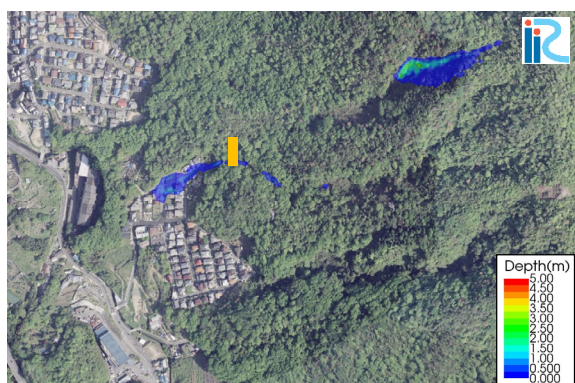
(d) 60 秒後



(e) 80 秒後



(f) 100 秒後



(g) 120 秒後



(h) 140 秒後

図 5.3.7(1) 流動深の時系列変化 (Case0) (背景写真：国土地理院)



(i) 160 秒後



(j) 180 秒後



(k) 200 秒後



(l) 220 秒後



(m) 240 秒後



(n) 260 秒後

図 5.3.7(2) 流動深の時系列変化 (Case0) (背景写真：国土地理院)



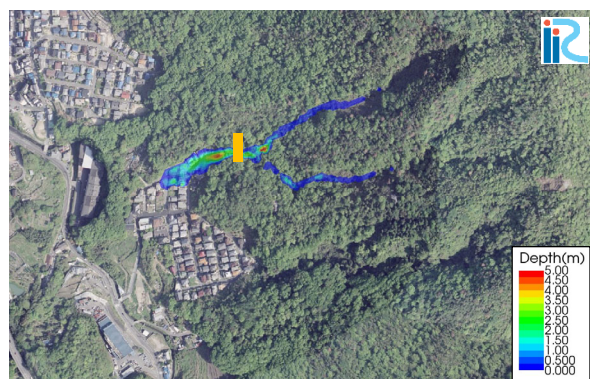
(a) 10 秒後



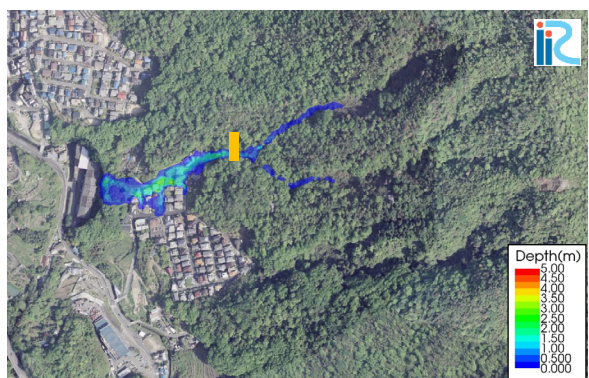
(b) 20 秒後



(c) 50 秒後



(d) 80 秒後



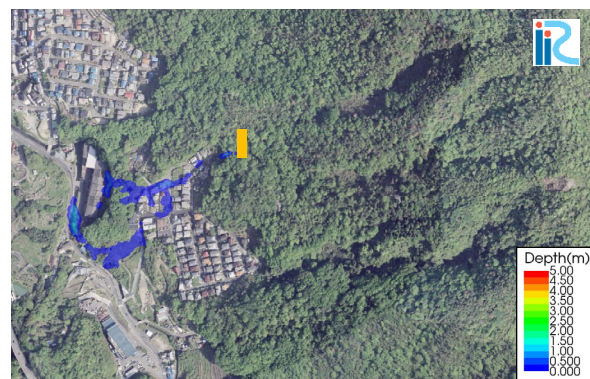
(e) 100 秒後



(f) 120 秒後



(g) 150 秒後



(h) 180 秒後

図 5.3.8 流動深の時系列変化 (Case1)

(背景写真：国土地理院)



(a) 10 秒後



(b) 20 秒後



(c) 50 秒後



(d) 80 秒後



(e) 100 秒後



(f) 120 秒後



(g) 150 秒後



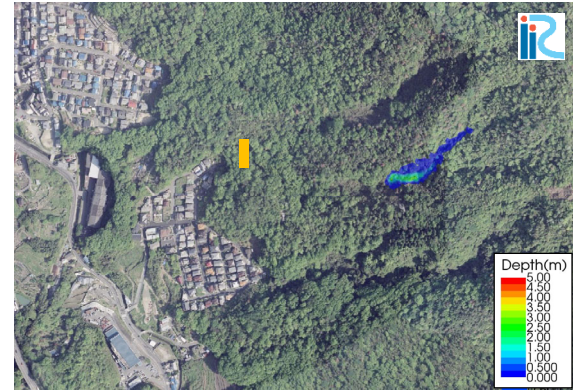
(h) 200 秒後

図 5.3.9 流動深の時系列変化 (Case2)

(背景写真：国土地理院)



(a) 10 秒後



(b) 20 秒後



(c) 40 秒後



(d) 60 秒後



(e) 80 秒後



(f) 100 秒後



(g) 120 秒後



(h) 140 秒後

図 5.3.10 流動深の時系列変化 (Case3) (背景写真: 国土地理院)



(a) 10 秒後



(b) 20 秒後



(c) 50 秒後



(d) 80 秒後



(e) 100 秒後



(f) 120 秒後



(g) 150 秒後



(h) 180 秒後

図 5.3.11 流動深の時系列変化 (Case4)

(背景写真: 国土地理院)

5.4 宅地域における土石流の危険度評価

近年、土石流の流動・発達・氾濫過程に関する数値シミュレーション法が開発され、宅地域における土石流の氾濫過程・氾濫範囲をある程度予測可能となっており^{3),6)}、非常に有効な情報が提供されている。また、土石流の数値シミュレーションを用いて避難計画の参考とするための危険度分布を検討した研究^{11),12)}もみられる。しかし、土石流の発端となる斜面崩壊を考慮せず、解析上流端から流量ハイドログラフを与えるとともに、宅地に流れ込む溪流での土石流を川幅一定の 1 次元モデルで解析しており、川幅の変化や土石流の流動特性に対応した宅地に流れ込む土石流ハイドログラフを評価できていない。また、家屋に作用する土石流応力の最大値や土石流氾濫域の空間分布を合理的に評価できていない。現地で計測可能な溪流の不安定土砂の厚さの情報から流出土砂量を予測する場合、流動幅の変化が評価可能な平面 2 次元による解析が有効であると考えられる。また、宅地域における家屋や道路の配置が土石流の被害形態に与える影響や、被害形態に応じた危険度の評価については、十分な知見が得られていないのが現状である。そこで、本節では、斜面崩壊起源の土石流の平面 2 次元数値シミュレーションを用いて、土石流による危険度の空間分布を検討するとともに、被害形態に応じた危険度評価を検討した。

5.4.1 土石流による被害形態

溪流出口から宅地域へ氾濫した土石流は、様々な被害をもたらす。図 5.4.1 に、平成 26 年及び平成 30 年に広島県広島市、呉市、安芸郡で発生した土石流による被害状況^{8),9)}を示す。

図 5.4.1(a)～(d)は、宅地域を流下した土石流の流動による被害状況を示している。何れも溪流出口直下流付近の宅地域であり、土石流の流下に伴う河床や河岸の浸食、宅地域地の地盤の浸食や土砂堆積がみられ、土石流の流動による比較的大きな流動深及び流速を伴った被害が生じている。そのため、土石流の流下時に、家の外に出て避難することは危険を伴うことがわかる。また、土石流が流下した後には、大きな粒径の石礫の堆積がみられる。

図 5.4.1(e)～(f)は、土石流による家屋被害の状況を示している。土石流が家屋に衝突し破壊しており、土石流の家屋に作用する流体力及び流動深の大きさにより家屋被害が生じることになる。家屋は、ほぼ全壊しており、家屋の 2 階以上へ移動する垂直避難も困難となるため、土石流が発生する前に避難しておく必要がある。

図 5.4.1(g)～(h)は、土石流の土砂堆積による被害状況を示している。土石流が発生した溪流の出口より下流部の地盤勾配の緩い地点であり、比較的粒径が小さい礫が堆積している。家屋被害や地盤の浸食等の被害はみられないが、土砂が家屋の敷地内に流れ込むことによる間接的な被害や、道路への土砂堆積による交通途絶、被災後の土砂撤去等による復旧に多大な時間と労力を要することになる。

以上のように、土石流による被害形態、被害の要因、被害が生じる箇所等は様々であり、それらに応じた土石流危険度を評価する必要がある。



(a) 土石流の流れによる被害



(b) 土石流の流れによる被害



(c) 土石流の流れによる被害



(d) 土石流の流れによる被害



(e) 土石流による家屋被害



(f) 土石流による家屋被害



(g) 土砂堆積による被害



(h) 土砂堆積による被害

図 5.4.1 土石流による被害^{8), 9)}

5.4.2 危険度評価手法

宅地域へ氾濫した土石流による危険度を評価するため、土石流流量を変化させて 3 種類の数値解析を行い、解析結果が、ある指標の閾値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毎の危険度を段階的に評価するものとした。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閾値以上となったか調べることで、領域ごとの土石流に対する危険度を 4 段階で評価した。本研究では、危険度を図 5.4.2 に示すように Level1~4 で定義し、色分けして領域表示するものとした。

- | | | | | |
|---------|---|-----|---|------------------------|
| Level 4 | : | 紫色 |  | (3 種類の危険領域すべてに含まれる領域) |
| Level 3 | : | 赤色 |  | (2 種類の危険領域に含まれる領域) |
| Level 2 | : | 黄色 |  | (1 種類の危険領域に含まれる領域) |
| Level 1 | : | 色なし |  | (いずれの種類の危険領域にも含まれない領域) |

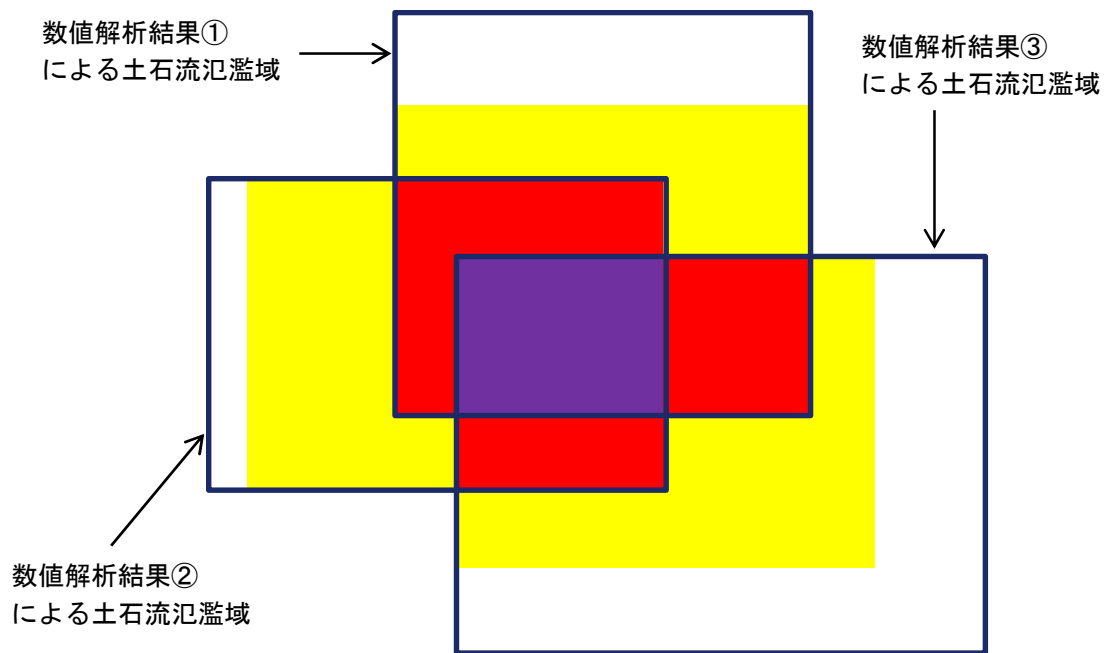


図 5.4.2 危険度評価のイメージ

5.4.3 解析条件

1) 対象領域

本解析では、平成 26 年 8 月豪雨による土砂災害において甚大な被害が発生した広島市安佐南区八木三丁目を対象領域とした。図 5.4.3 に、1974 年、2008 年における広島市安佐南区の空中写真を示す。各写真の中央部に県営緑丘住宅がある。図より、1974 年では、黄色の楕円で示した土石流渓流出口部分の開発が進み始めており、県営緑丘住宅は鉄筋コンクリート構造への立て替え前であることが分かる。なお、本解析では、対象領域である八木三丁目の土石流渓流の上流部は宅地開発が進み始めた（実際に家屋が建設され始めた）1974 年の宅地の状態である図 5.4.4 に示す家屋配置を基本とした。

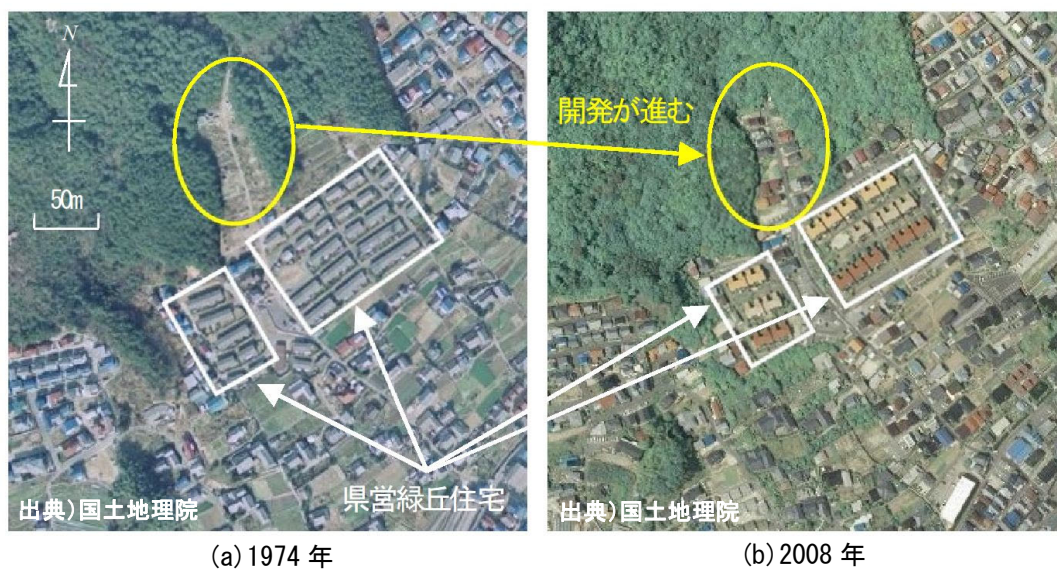


図 5.4.3 対象領域

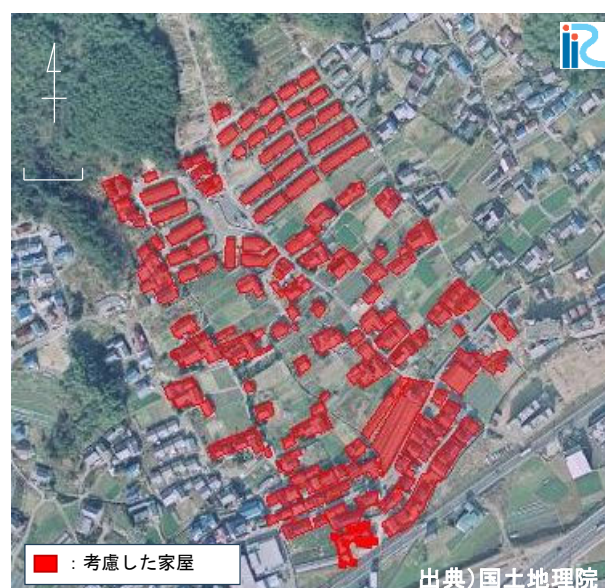


図 5.4.4 家屋配置 (1974 年)

2) 解析条件

本解析では、土石流は斜面崩壊を発端として発生するものとしている。竹林ら²⁾は同地区において平成 26 年 8 月豪雨により、広島市安佐南区八木三丁目で発生した土砂災害を再現した際、斜面崩壊において与える土砂量を数種類検討しているが、土石流の流動距離が長く、溪流に不安定土砂が多く存在する場合は、宅地に流入する土石流の流動特性にほとんど影響を与えないことを確認している。このことから、土砂量は流下中の土石流が地盤を浸食する深さの最大値（最大浸食深）を変更することで表現した。本解析では 0.3m, 0.5m, 1.0m の 3 種類とした。また、本解析の目的は、土石流による被害形態別に危険度を評価することであるため、本川の源頭部付近で発生した 1 つの崩壊を考慮した。

解析条件について、表 5.4.1 に示す。

表 5.4.1 解析条件一覧表

項 目	解析条件	備 考
対象地区	広島市安佐南区八木三丁目	
解析領域	流下方向 2km×流下横断方向 0.7km (本川源頭部～JR 加治線までの領域)	
解析格子	2m×2m (正方形メッシュ)	
地形データ	1mDEM データ (国土交通省：平成 21 年度)	被災前地形データ
粒径条件	平均粒径：1cm	
斜面崩壊条件	・斜面崩壊箇所：本川源頭部 1 箇所 ・崩壊土砂量：70m ³	
最大浸食深条件	0.3m, 0.5m, 1.0m の 3 種類	
家屋条件	・1974 年当時の家屋配置 ・家屋は不透過で非越流の破壊しない条件	

5.4.4 被害形態に応じた土石流危険度の評価

図 5.4.1 に示されるような溪流出口から宅地域に氾濫した土石流の流動による被害、家屋破壊による被害、土砂堆積による被害に着目し、土石流数値シミュレーションを用いて、それぞれの被害形態に応じた危険度評価を行った。

1) 土石流の流動による危険度評価

図 5.4.1(a)～(d)に示すように、溪流出口から宅地域へ氾濫した土石流は、流動深・流速が大きい状態で流下することで、宅地域の地盤の浸食や土砂堆積による被害が生じる。そこで、宅地域に流下した土石流の流動深及び流速を指標とすることで、土石流の流動による危険度を評価する。まず、土石流の流動深による危険領域については、流動深が 0.5m 以上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、また、水害による調査結果によると、浸水深が 0.5m 以上になると人の非難が困難となる¹³⁾。そこで、ここでは、土石流の流動深を指標として危険度評価を試みた。

図 5.4.5 に、最大流動深 0.5m 以上を閾値として、家屋の存在を考慮しないケースの解析結果を示す。なお、Level 4 の領域は最大浸食深 0.3m の解析結果とほぼ同じ範囲となり、Level 3 と Level 2 の領域もそれぞれ最大浸食深 0.5m、1.0m とした解析結果と同じ範囲となっている。

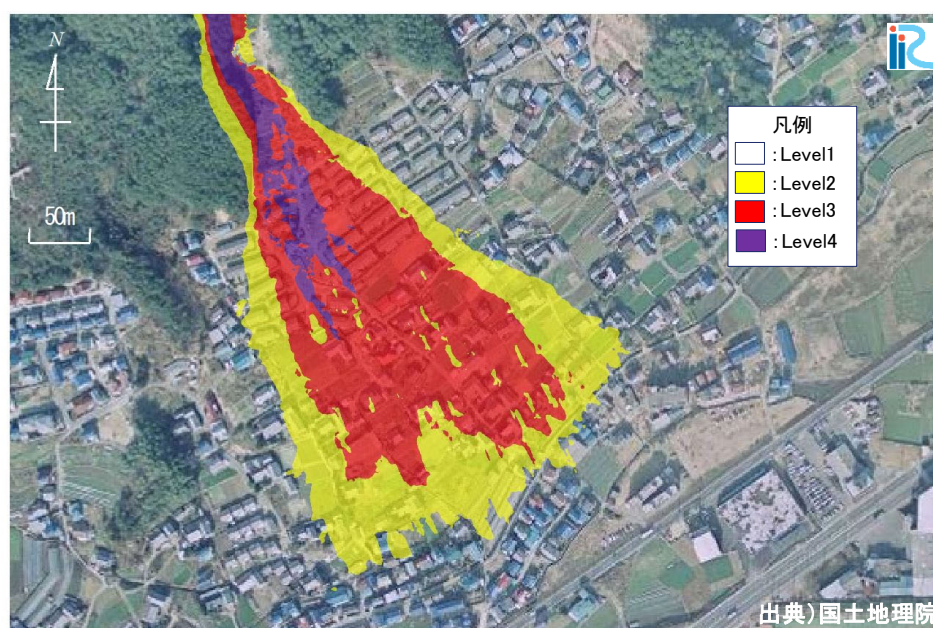


図 5.4.5 危険度分布（最大流動深：家屋考慮なし）

図 5.4.5 より、最大浸食深を深くすることで土石流の流量が大きくなり、それに従い危険領域も広がっていることが分かる。また、最大浸食深に 0.5m の差がある Level 2 と Level 3 の領域の差（約 24 千 m²）に対して最大浸食深の差が 0.2m の Level 3 と Level 4 の領域の差（約 28 千 m²）がかなり大きい。これは、溪流における土石流の発達にともなう流動幅（浸食領域）の変化によって土石流

流量が変化するためである。つまり、最大浸食深 0.3m と 0.5m では流動幅が大きく異なり、宅地に流れ込む土石流流量に大きな違いが発生したが、最大浸食深 0.5m と 1.0m では流動幅に大きな差が無く、宅地に流れ込む土石流流量に大きな差が発生しなかったと考えられる。以上の結果から、本解析では、現地で計測可能な溪流の不安定土砂の厚さの情報と土砂災害危険度の関係を直接的に導くことが可能であり、実際の現地での危険度評価において非常に有効な方法であることが分かる。

次に、図 5.4.6 に家屋を考慮したケースの解析結果を示す。家屋を考慮しないケースと異なり、県営住宅の西側、及び東側（図 5.4.6 の白丸領域）に危険領域が広がっている。これは、土石流が県営住宅に衝突し流れが西側、東側へ分かれて流れたためである。一方、県営住宅の中及び下流では、土石流が家屋の間を縫うように進み、全体としては土石流が広がらず、道路に沿って直線的に流下しており、家屋を考慮しない場合に比べて危険領域が小さくなっている。

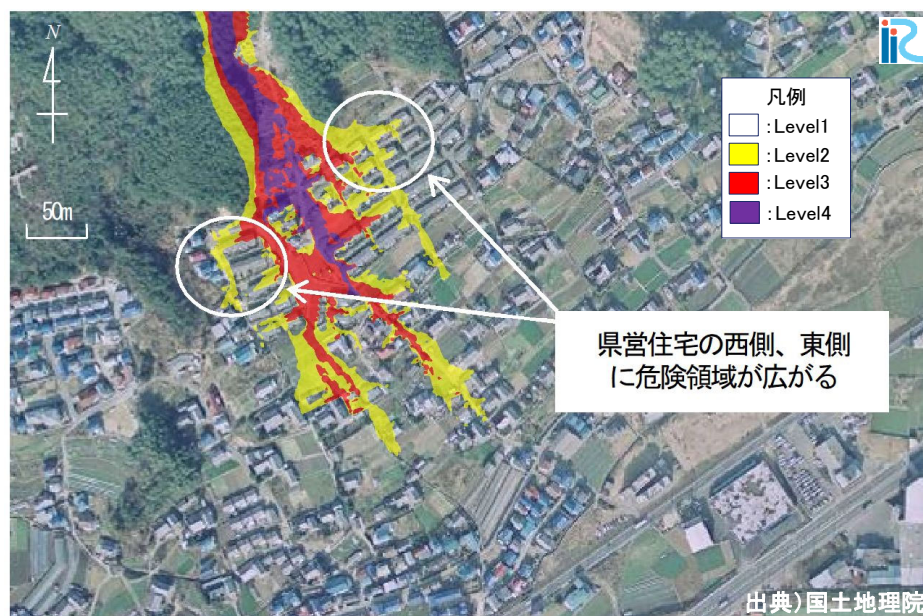


図 5.4.6 危険度分布（最大流動深：家屋考慮あり）

2) 土石流の流速による危険度評価

平成 30 年 7 月，広島市安芸区矢野東において，図 5.4.7 に示すように，急勾配の道路を走行していた多数の自動車が土石流によって流された．道路上の土石流の流動深は 20cm 以下，流速は 1.0～2.0m/s 程度であり，清水であれば自動車が流されるような流体力ではなく，土石流の流れに含まれる細かい土砂の存在によりタイヤが滑ったものと考えられる．そこで，ここでは，最大流速 1.0m/s を閾値として，土石流の流速による危険度評価を試みた．



図 5.4.7 広島市安芸区矢野東の土石流（提供：広島ホームテレビ）

最大流速 1.0m/s 以上を閾値として，家屋を考慮しないケースの解析結果を図 5.4.8 に，家屋を考慮したケースの解析結果を図 5.4.9 に示す．

図 5.4.5 と図 5.4.8，図 5.4.6 と図 5.4.9 を比較すると，家屋の考慮の有無に関わらず，Level2～Level4 の危険領域がほぼ同様の分布を示していることが分かる．これは，土石流の特徴の一つであり，流れが水だけの場合，下流方向への流量の変化は少ないため，道路勾配が緩やかになると，流速が小さくなり水深が大きくなる．道路勾配が急になると，流速が大きくなり水深が小さくなる．一方，土石流の場合，土石流による土砂の堆積に伴い，土石流の流量が小さくなるが，これは流動深が小さくなるにつれて流速が低下するためである．

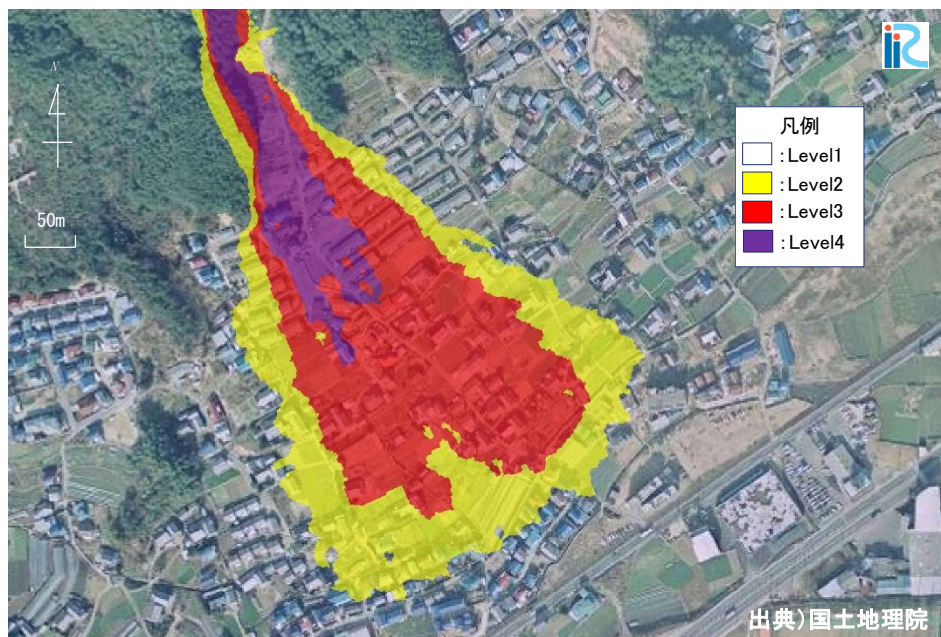


図 5.4.8 危険度分布（最大流速：家屋考慮なし）

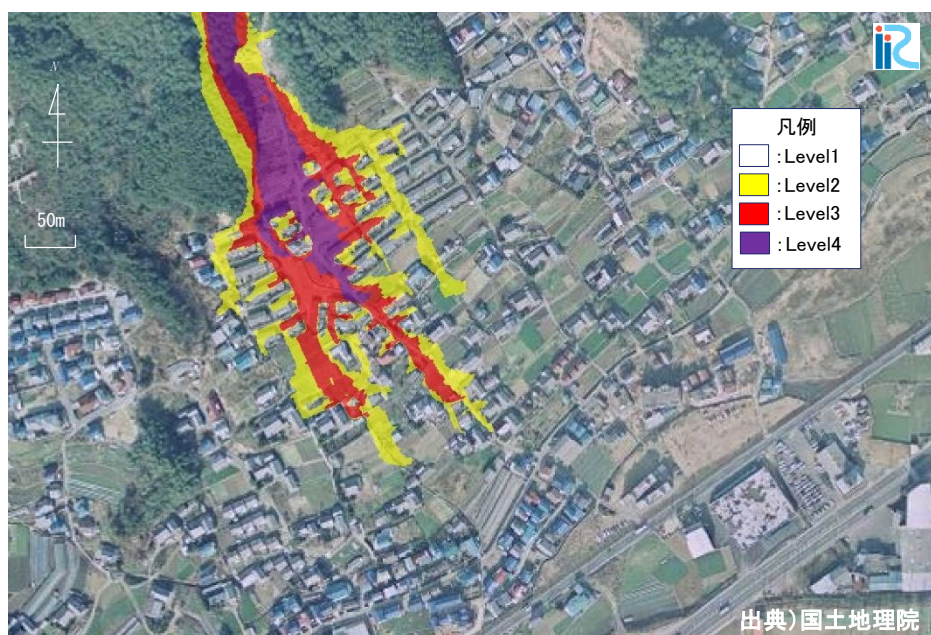


図 5.4.9 危険度分布（最大流速：家屋考慮あり）

3) 家屋破壊による危険度評価

近年、溪流出口から宅地域に氾濫した土石流等により、木造家屋の倒壊が頻発している。一般的な家屋は、建築基準法等により地震の揺れに対する耐震性は確保されているものの、土砂災害に対する規定等はないため、土石流の氾濫により大量の土砂が家屋に衝突した場合、倒壊する可能性が高くなる。このため、土砂災害により危険が予測される場合には、災害が発生する前に避難することが必要となる。避難方法としては、近隣の安全な避難所に移動することが最も有効と考えられるが、夜間や豪雨といった条件下では避難が困難になる場合も多い。家屋に倒壊の恐れがない場合には、家屋の2階以上へ移動する垂直避難も安全確保の一つとして有効である¹⁴⁾。そのため、どの程度の土砂量であれば家屋が倒壊するかといった目安が必要である。

「第4章 土石流による家屋破壊モデルの現地への適用」では、土石流による家屋破壊モデルの現地への適用性において、土石流の数値シミュレーションを用いて、家屋に作用する応力を評価し、土石流により家屋の全壊・半壊の状態を比較的良好に再現している。

ここでは、式(4-1)に基づき、土石流により家屋に作用する応力を指標とすることで、家屋破壊による危険度を評価する。土石流による家屋破壊の危険領域としては、家屋に作用する最大応力が家屋破壊限界応力以上となる領域とする。家屋破壊限界応力については、家屋の構造によって異なると考えられるが、「4.2 平成26年8月豪雨による広島土砂災害への適用」の再現計算結果等を踏まえ、家屋破壊限界応力の閾値を200kN/m²として設定した。なお、地形に対する危険度を評価するため、家屋は考慮していない。

図5.4.10に、家屋破壊による危険領域の解析結果を示す。図5.4.10より、溪流出口付近の一部の家屋がLevel2の危険領域に含まれているが、それほど下流域へは広がらないことが分かる。土石流の流動による危険領域(図5.4.5)と比較すると、土石流の流動による危険領域内でも、家屋破壊の危険領域となっていない領域がみられ、このような領域においては、夜間や豪雨時に土石流が発生した場合でも、家屋の2階以上へ移動するような垂直避難による安全性の確保が可能であることが示唆される。

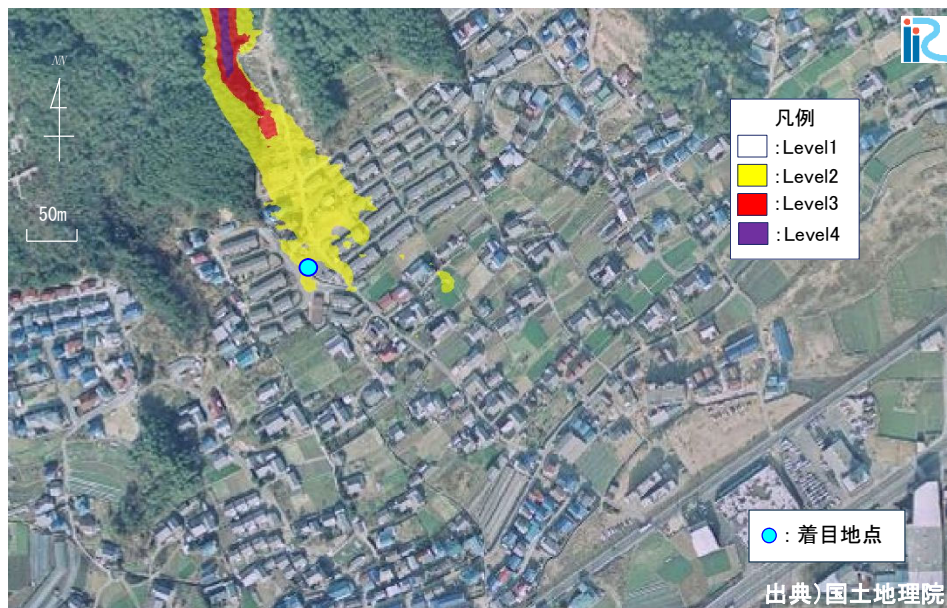


図 5.4.10 危険度分布（家屋破壊）

4) 土砂堆積による危険度評価

溪流出口より氾濫した土石流は、下流の宅地域で広がり流速を小さくしながら堆積する。これは地盤勾配が緩くなる影響によるところが大きい。宅地域に堆積した土砂の堆積深は土石流流量や地形形状により分布が異なる。また、宅地域に氾濫した土砂は、家屋等に衝突して破壊するような直接的な被害のほかに、道路や家屋の敷地内に流れ込むことによる間接的な被害や、被災後の土砂撤去等による復旧に多大な時間と労力を要することになる。

そこで、宅地域に氾濫した土石流の堆積深を指標することで、土砂堆積による危険度を評価する。土石流による土砂堆積の危険領域としては、堆積深 0.5m 以上として設定した。なお、地形に対する危険度を評価するため、家屋破壊の危険度と同様に、家屋は考慮していない。

図 5.4.11 に、土砂堆積による危険領域の解析結果を示す。図 5.4.11 より、Level2 の危険領域が土砂氾濫域の下流部に広がっていることが分かる。家屋破壊による危険領域（図 5.4.10）と比較すると、両者はほとんど重なっていない。つまり、溪流出口から下流に離れた地域では、家屋の破壊等の甚大な被害は受けないものの、敷地への土砂の堆積や家屋への土砂流入などの被害が生じる可能性がある。また、土石流の流動による危険領域（図 5.4.5）と比較すると、両者が重なっている領域が存在し、土石流発生時の避難だけでなく、被災後の復旧時への影響が考えられる。

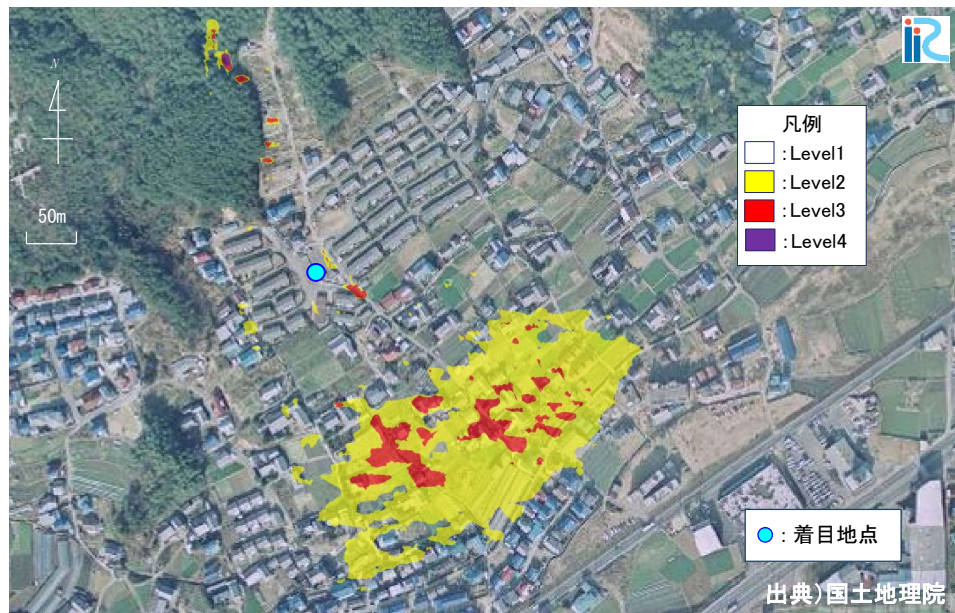


図 5.4.11 危険度分布（土砂堆積）

また、図 5.4.10 と図 5.4.11 の図中に表示されている青点は、それぞれの危険度が、図 5.4.10 では Level 2、図 5.4.11 では Level 1であることを示している。このように、土石流による被害形態に応じて危険度レベルが異なる結果となっており、土石流被害によるハード対策とソフト対策を検討する際には、様々な被害形態を想定して危険度を評価することが重要である。以上のように、土石流の被害形態の違いによる危険度情報を得ることは、土石流による避難計画や被災後の復旧計画を立案する上で、非常に有用であると考えられる。

5.5 結語

本章では、まず、広島市安佐南区八木三丁目を対象に、家屋の影響を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施し、宅地域における家屋影響の有無による土石流の流動特性を検討した。家屋の破壊を無視し、家屋を不透過な非破壊構造物として扱った場合、家屋の上流域の多くに顕著な土砂の堆積域が形成され、実現象と大きく異なる結果となった。また、家屋の存在を考慮しない場合、土石流は扇形に広く薄く流れ、土石流扇状地を形成する。この氾濫域は、設定されている土砂災害警戒区域と比較的近い結果となった。土砂災害警戒区域として指定されている領域においても家屋の存在によって土石流が流れてこない場所が広く存在することを示した。これらの情報は、土砂災害警戒区域内であっても家屋の影響により比較的安全な場所が存在することを意味し、遠方への避難が困難な場合の避難候補地を把握する際、非常に有効である。

次に、広島市安芸区矢野東（梅河団地）を対象に、土石流の発生条件の違いが、宅地域に流入する土石流の氾濫域や流動深の空間分布に与える影響を検討した。複数の斜面崩壊のタイミングや斜面崩壊数の違いによっては、宅地域に流入する土石流の氾濫域・流動深も大きく異なることが分かった。従来、土石流溪流からの土砂流出量は、最も規模の大きい単一の溪流からの土砂流出量を用いることになっているが、避難計画等を検討する際に、土石流の数値シミュレーションを活用する場合、想定する溪流からの土砂流出量を小さく見積もらないように、複数の溪流からの土砂流出量を考慮するなどのシナリオ設定が重要であることを示した。

最後に、土石流による被害形態を整理した上で、土石流の数値シミュレーションを用いた新たな危険度評価手法を提案し、宅地域における家屋や道路の配置が土石流の被害形態に与える影響や土石流による危険度の空間分布を検討し、被害形態（土石流の流動による被害、家屋破壊による被害、土砂堆積による被害）に着目した危険度の評価を行った。宅地域へ氾濫した土石流による危険度を評価するため、土石流流量を変化させた 3 種類の数値解析結果において、ある指標の閾値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した。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閾値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。本研究では、危険度を Level1～4 で定義し、色分けして領域表示するものとした。この手法を用い、それぞれの被害形態に応じた危険度を比較することで、危険領域の重なり等を視覚的に捉えることができ、土石流の被害形態の違いによる危険度情報を得ることは、土石流による避難計画や被災後の復旧計画を立案する上で、非常に重要であるとことを示した。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ：土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等について。
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/gaiyou.pdf>
- 2) 例えば, 広島県土木建築局:基礎調査マニュアル(案)(土石流編・システム利用), pp.4-10-4-169, 2016.
- 3) 竹林洋史, 藤田正治, 江頭進治:2014年8月に広島で発生した土石流の流動・氾濫特性, 京都大学防災研究所年報, No.58 A, pp.34-39, 2015.
- 4) 竹林洋史, 藤田正治:2018年7月に広島県安芸郡熊野町で発生した土石流の宅地内の氾濫特性, 京都大学防災研究所年報, No.62 A, pp.6-12, 2019.
- 5) 竹林洋史, 藤田正治:2018年7月に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の流動特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.2, pp.I_859-I_864, 2019.
- 6) 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・堆積に及ぼす影響ー2014年8月に発生した広島土砂災害を対象としてー, 砂防学会誌, 第69巻, 5号, pp.3-10, 2017.
- 7) 中谷加奈, 長谷川祐治, 笠原拓造, 海堀正博, 里深好文:平成30年7月豪雨で発生した土石流被害と谷出口の道路の影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第75巻, 1号, pp.403-413, 2019.
- 8) 広島県ホームページ:平成26年8月20日発生 8.20 土砂災害.
https://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/sonota/sabo/pdf/216_H26_820dosyasaigai.pdf
- 9) 広島市ホームページ:平成30年7月豪雨災害の記録.
<https://www.city.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/54807.pdf>
- 10) 広島県ホームページ:広島県防災 Web, 土砂災害ポータルひろしま.
https://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/keikai/keikaidata/zumen/doseki_S/I-1-9-303.pdf
- 11) 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), 第75巻, 2号, pp.I_181-I_186, 2019.
- 12) 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, 第72巻, 6号, pp.8-17, 2020.
- 13) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室:水害ハザードマップ作成の手引き, pp.76-79, 2023.
- 14) 三浦弘之, 白川隼也:土石流高さに注目した数値解析に基づく木造家屋の倒壊危険度評価, 地域安全学会論文集, No.39, pp.73-79, 2021.

第6章 土砂災害に強いまちづくりのための土石流の数値シミュレーションの活用

6.1 概説

台風等による豪雨の頻発するわが国では、土砂災害が多発しており、それらの要因となる土石流等の発生自体を防止することは非常に困難な状態にある。平成 26 年 8 月豪雨では、全国各地で洪水や土砂災害が多発し、その中でも広島市安佐南区・安佐北区で発生した土砂災害では、犠牲者は災害関連死を含めて 77 名となり家屋被害は全壊 133 棟、半壊 122 棟にのぼる甚大な被害となった¹⁾。

土砂災害が多発する背景として、山地域が国土の約 3/4 を占め、居住区に適する平野部が少ないわが国では、山裾、時には山地域の斜面を開発し家屋を建てている状況が挙げられる。戦後の高度経済成長期の人口増加に伴い各地域の開発が進んだ結果、山地域に隣接した土砂災害の恐れのある領域も宅地開発され、多くの家屋が建てられた。

現在では、「土砂災害防止法」が制定され、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）や土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）が設定されている。土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）に指定された領域では、建築物の構造規制が行われ、既存の建築物に対しては移転等の勧告を行う等の規制が設けられるようになった²⁾が、費用等の問題から、家屋の移転や補修は進んでいるとはいえず、土砂災害特別警戒区域に多くの家屋が存在する状態が続いている。また、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）や土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の設定方法等についての課題³⁾も挙げられている。

土砂災害防止法に基づく基礎調査の実施、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の指定は、全国の各自治体で実施され、区域指定については概ね完了し、2 巡目の区域指定の見直しが進められている自治体もみられる。一方、令和 4 年度末時点において、全国の人家 5 戸以上が存在する土砂災害警戒区域（約 20 万 3 千区域）のうち、被害軽減対策が行われた区域の割合は 22.2%（約 4 万 5 千区域）⁴⁾であり、区域指定後、十分な被害軽減対策が行われているとは言えない状況である。

土砂災害の恐れのある山地域まで宅地化されている現状の土地利用状況を踏まえると、区域指定された土砂災害警戒区域内に多くの家屋が存在する状態は今後も続くと考えられ、土砂災害による被害を防止・軽減するための危険の周知、警戒避難体制やハザードマップの整備等のソフト対策がさらに重要となってくる。また、土砂災害警戒区域に指定された地区では、全ての箇所に砂防堰堤等のハード対策を早急に施すことは時間的・費用的な制約により困難であるため、土石流の流動特性や地形特性等を踏まえた上で、道路、建物の配置見直しや宅地の補強等、市町村と連携しながら、土砂災害に強いまちづくりへ向けた方策を検討する必要がある。

そこで、本章では、「5.4 宅地域における土石流の危険度評価」における危険度評価手法を用いて、宅地域における家屋の有無や配置の違いによる土石流危険度の空間分布を検討するとともに、まちづくりのためのハード・ソフト対策に関する土石流数値シミュレーションの活用方法を検討する。

6.2 検討方法

1) 対象領域

本研究では、平成 26 年 8 月豪雨による土砂災害において甚大な被害が発生した広島市安佐南区八木三丁目を対象領域とする。図 6.2.1 に対象領域の位置図，1961 年，1974 年，2008 年における広島市安佐南区の空中写真⁵⁾を示す。各写真の中央部が県営緑丘住宅である。図より，1974 年では，黄色の楕円で示した土石流渓流出口部分の開発が進み始めており，県営緑丘住宅は鉄筋コンクリート構造への建て替え前であることが分かる。なお，本研究では八木三丁目の土石流渓流の上流部の宅地開発が進み始めた（実際に家屋が建設され始めた）1974 年の宅地の状態（図 6.2.1(b)）を基本として検討を行う。

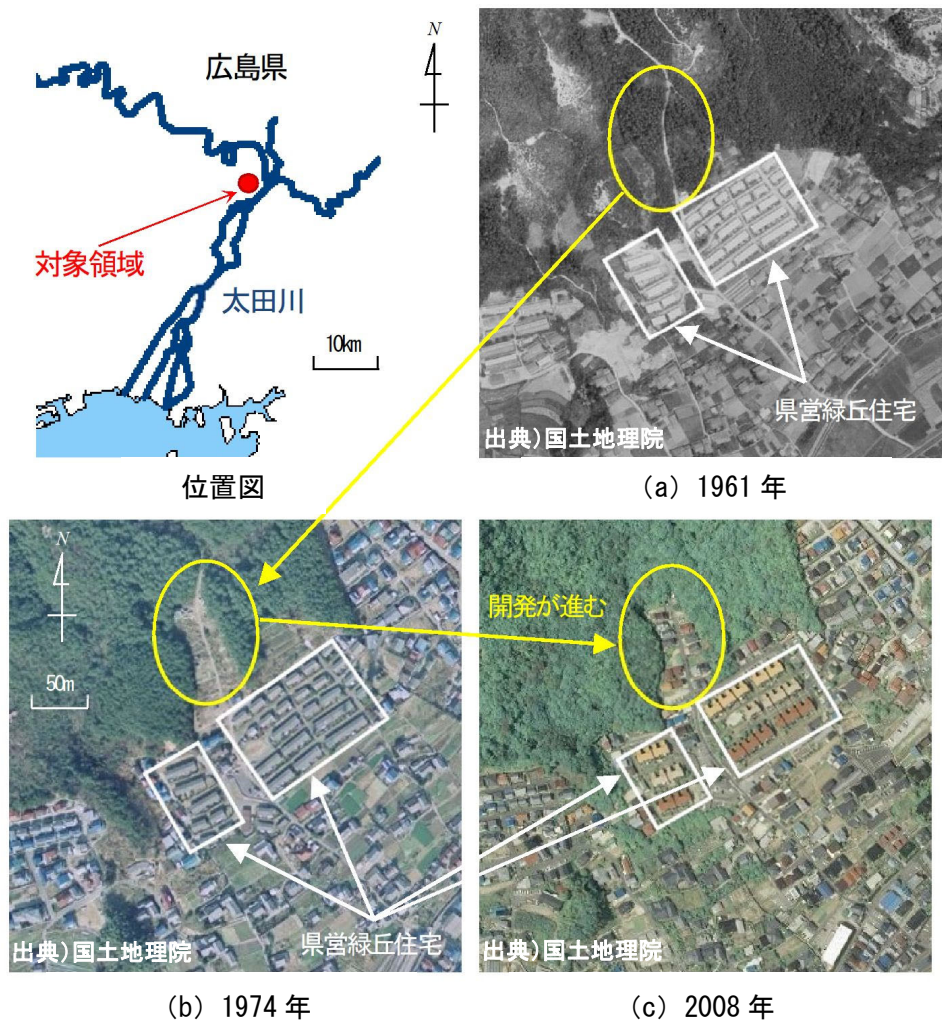


図 6.2.1 対象領域（広島市安佐南区八木三丁目）

2) 家屋の配置条件

解析を行う家屋配置ケースとして、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（図 6.2.2 参照）、そこから開発が進み 6 軒の家屋を新設することを仮定した 2 つのケース（図 6.2.3 参照）の計 4 ケースにおいて、危険度評価手法を用いて考察を行う。解析ケースをまとめると表 6.2.1 以下のとおりである。

表 6.2.1 家屋配置条件一覧表

ケース名	家屋の配置条件
Case 1	家屋の存在を考慮しない
Case 2	1974 年（昭和 49 年）時点で存在する家屋を考慮する
Case 3	Case 2 に新たに家屋を加える (切り開かれていた部分の南側に家屋が建てられたとする)
Case 4	Case 2 に新たに家屋を加える (切り開かれていた部分の東側に家屋が建てられたとする)

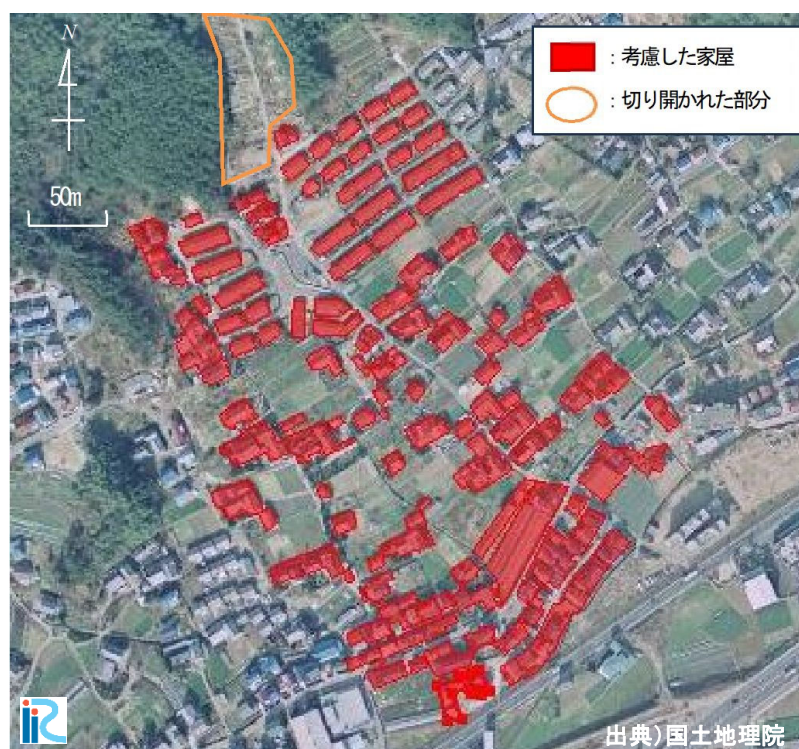


図 6.2.2 家屋の配置条件 (Case2)

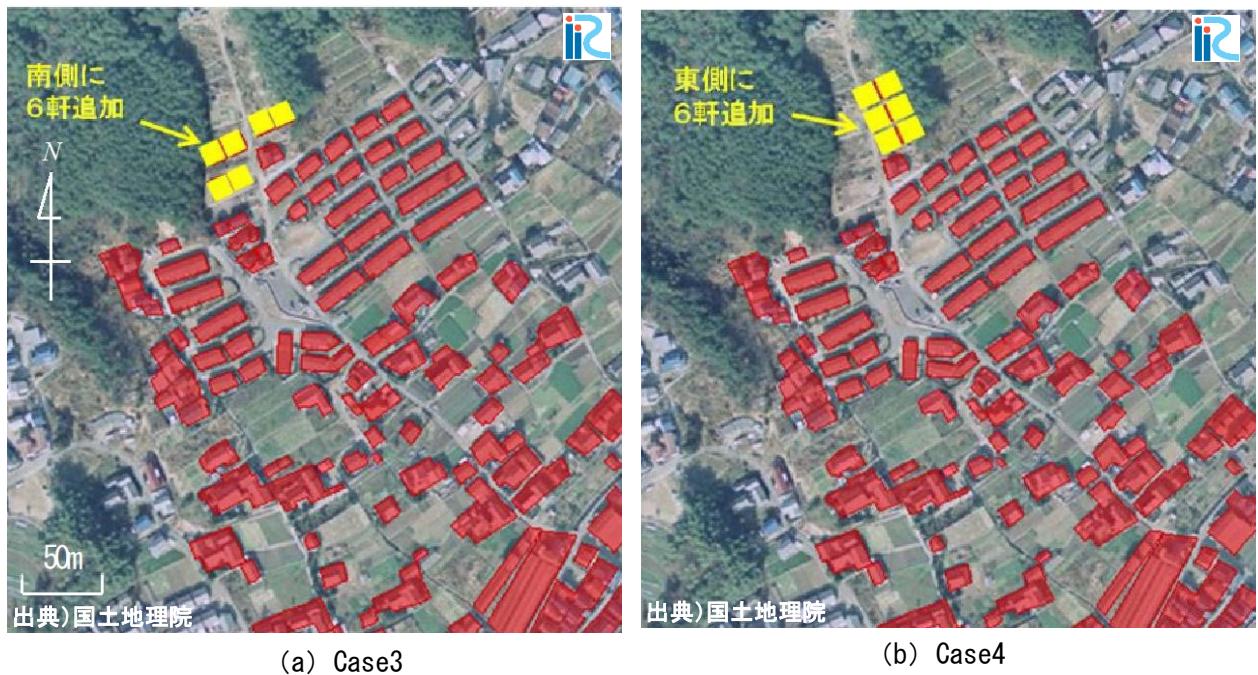


図 6.2.3 家屋の配置条件 (Case3, Case4)

3) 解析条件

解析条件については、「5.4 宅地域における土石流の危険度評価」における解析条件とほぼ同様である。斜面崩壊は、本川の源頭部付近で発生した 1 つの崩壊を考慮し、宅地域に流入する土石流の流量は、土石流が地盤を浸食する深さの最大値（最大浸食深）を 0.3m, 0.5m, 1.0m の 3 種類として設定した。

家屋は土石流により破壊されることも考えられるが、本解析では、家屋等の構造物の配置条件が土石流の流動特性に与える影響を検討するため、家屋は不透過で非越流の破壊しない構造物として扱った。Case3, Case4 で追加する家屋は、対象地域の木造家屋の平均的な大きさを想定して、10m×10m の正方形の家屋とした。図 6.2.2 に Case2, 図 6.2.3 に Case3, Case4 で考慮する家屋を赤色・黄色で示した。図 6.2.2 の土石流渓流の上流側で開発が進められている領域に、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、国土交通省により平成 21 年度に取得されていた 1mDEM データ（被災前の地形データ）をすべてのケースで用いた。解析格子は、2m×2m の正方形格子とした。

6.3 家屋配置条件の違いによる危険度評価

前項の検討方法の基づき、広島市安佐南区八木三丁目を対象に、土石流の数値シミュレーションを実施し、家屋配置条件の違いによる危険度評価を行った。

解析結果は 1974 年（昭和 49 年）の空中写真を背景に示し、危険度は図 5.4.2 に従い、色分けして表示している。

図 6.3.1 に Case1（家屋の存在を考慮しない）の解析結果を示す。なお、Level 4 の領域は最大浸食深 0.3m 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 0.5m, 1.0m とした解析結果と重なっている。図 6.3.1 より、最大浸食深を深くすることで土石流の流量が大きくなり、それに従い危険領域も広がっていることが分かる。

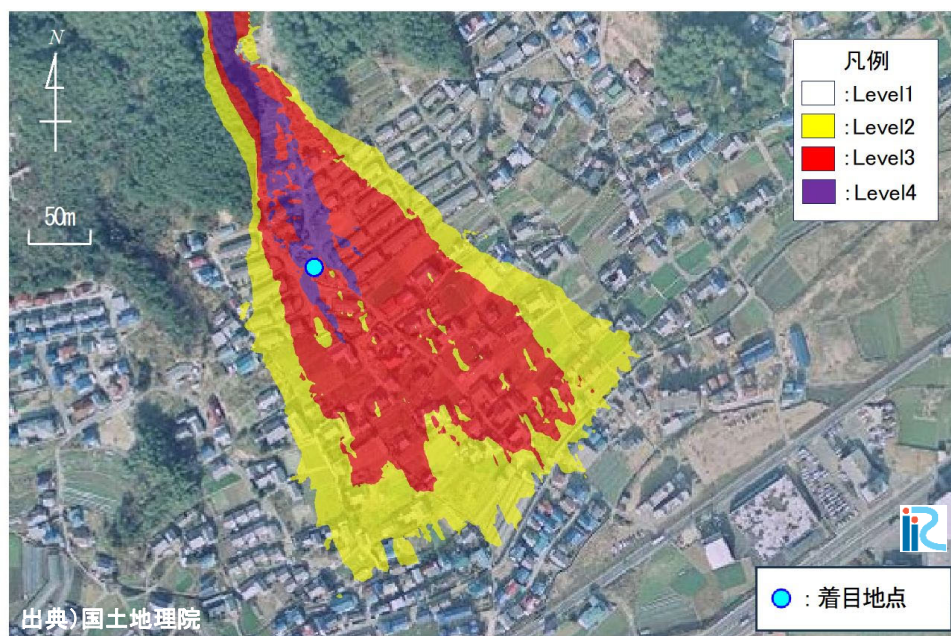


図 6.3.1 危険度分布 (Case1)

また、家屋を考慮していないことから、Level 2 と Level 3 の領域は扇型に広がっていることが分かる。図 6.3.2 に、平成 26 年 8 月豪雨の被災後に指定された同一溪流の土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）を示す。図 6.3.1 と比較すると分かるように、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）の概形は、Case1 の危険領域の概形と比較的近い。一方で、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内においても、土石流の氾濫による危険度に分布がみられることが分かる。

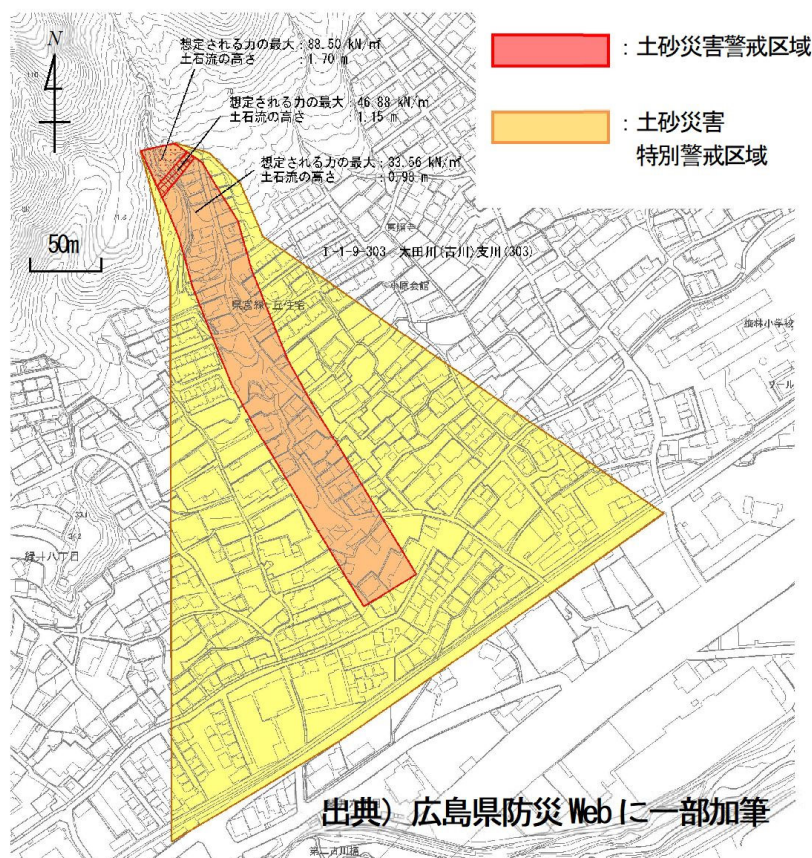


図 6.3.2 土砂災害警戒情報等（広島市安佐南区緑井町）

次に、図 6.3.3 に Case2（1974 年（昭和 49 年）時点で存在する家屋を考慮する）の解析結果を示す。Case1 と異なり、県営住宅の西側、及び東側に危険領域が広がっている。これは、土石流が県営住宅に衝突し流れが西側、東側へ分かれて流れたためである。一方、県営住宅の中及び下流では、土石流が家屋の間を縫うように進み、全体としては土石流が広がらず、道路に沿って直線的に流下する結果となった。ここで、図 6.3.4 に、Case2 の最大浸食深 0.5m とした解析結果において、最大流動深の空間分布を示す。図 6.3.4 より、家屋の上流側で土砂が多く堆積していることが分かる。そのため、家屋の下流部に流れる土砂量が減少し、下流部の危険領域が狭まる結果となった。なお、0.3m、1.0m の解析結果でも同様の傾向がみられた。

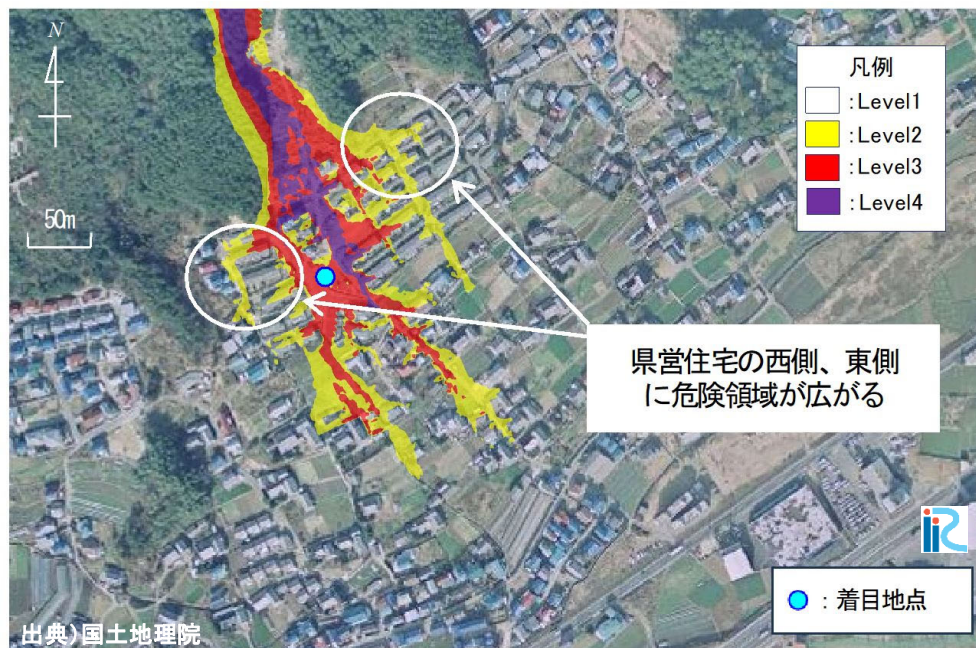


図 6.3.3 危険度分布 (Case2)

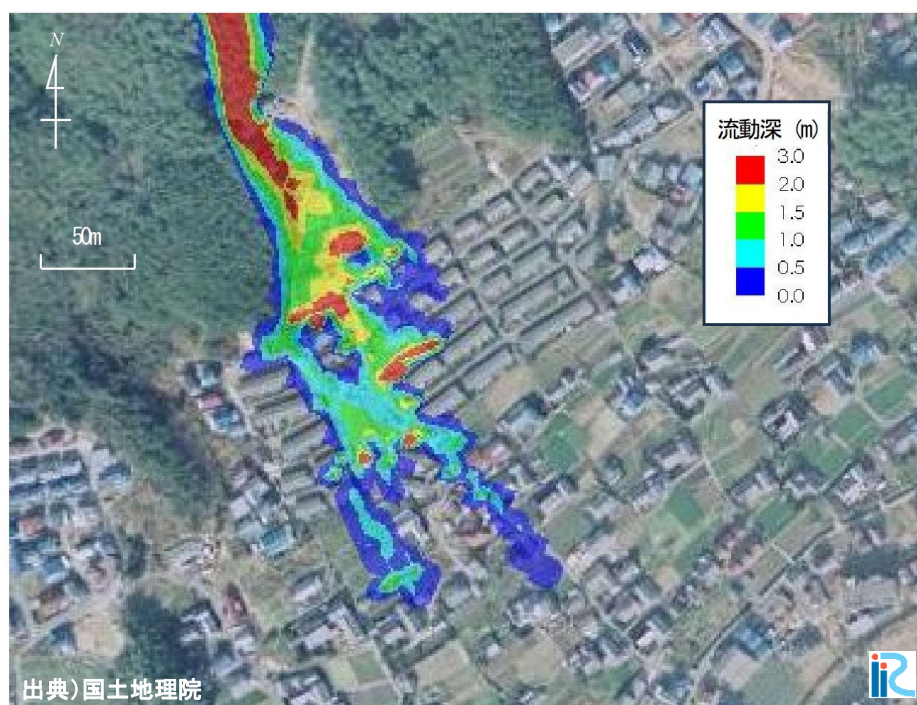


図 6.3.4 最大流動深 (Case2 : 最大浸食深 0.5m)

図 6.3.5、図 6.3.6 に、Case2 に新たな家屋を追加した Case3（南側に新設）と Case4（東側に新設）の解析結果をそれぞれ示す。

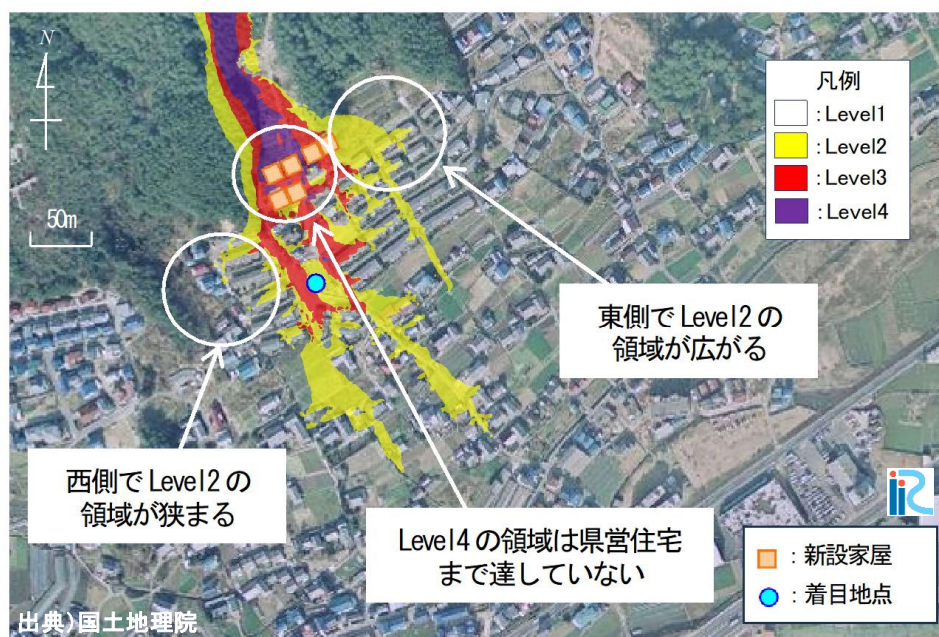


図 6.3.5 危険度分布 (Case3)

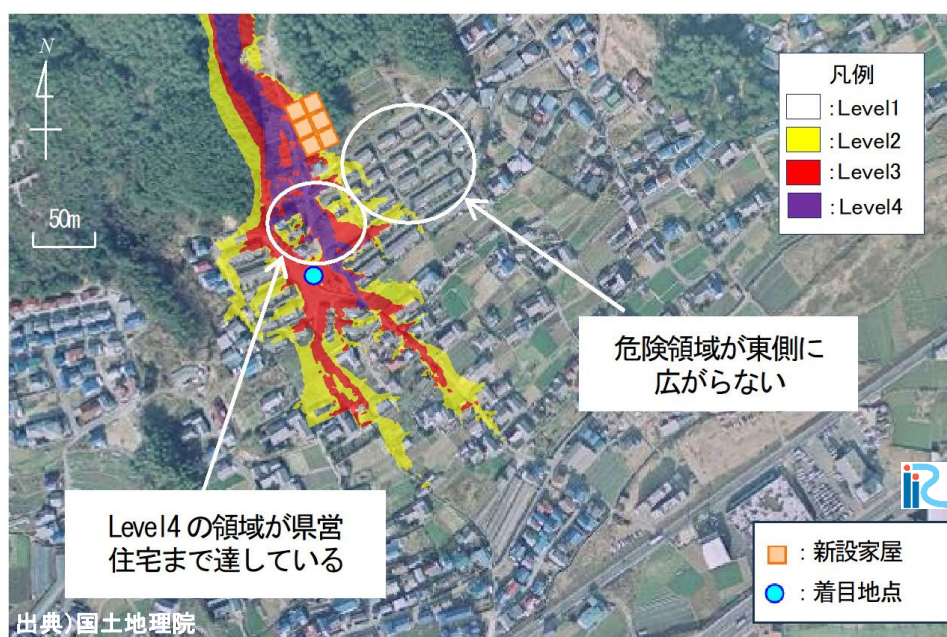


図 6.3.6 危険度分布 (Case4)

図 6.3.5 より、Case3 については、土石流が南側に新設した家屋に衝突し、家屋を避けるように流下したことで、Case2 と比較すると新設した家屋の東側領域で、Level 2 の範囲が広がっている一方で、県営住宅の西側では、Level2 の領域が狭まっている。また、Level 4 の領域は県営住宅付近ま

で到達していない。これは土石流が新設した家屋に衝突し家屋上流部で堆積したことにより、新設家屋の下流側では、Case2 と比較して危険度レベルが低くなったことを示している。

図 6.3.6 より、Case4 で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。これは、土石流が東側に新設した家屋に沿って流下したからである。図 6.3.5 と図 6.3.6 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。

また、図 6.3.1 (Case1)、図 6.3.3 (Case2)、図 6.3.5 (Case3)、図 6.3.6 (Case4) の図中に表示されている青点（着目地点）は、同一地点を示しており、図 6.3.2 より、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）内となる地点である。それぞれの危険度は、Case1 が Level 4、Case2 が Level 3、Case3 が Level 2、Case4 が Level 3 となっており、家屋の配置により土石流の氾濫による危険度レベルが大きく異なる結果となった。

以上のように、家屋を新設する位置の変更のみでも危険領域に大きな差がみられ、土石流の数値シミュレーションによる危険度分布の評価が、減災対策の計画段階において有効な手段であることが分かる。

6.4 土石流の流動特性を考慮したまちづくり

本研究で対象領域とした広島市安佐南区八木三丁目の地形特性を考慮すると、本来、Case1 の危険領域に家屋を建てるのは危険であり、この範囲の外側に家屋等は建てるべきである。また、この範囲内に家屋を建てるのであれば、1階をピロティー構造にして主とした生活の場を2階以上にするこ
とや、地盤の高さを上げる等の対策が必要であると考えられる。既に危険領域内に位置する家屋では、土砂を堆積させ、流向を変えるような鉄筋コンクリート構造の遮蔽壁を家屋の上流側に設けることなどが有効であると考えられる。ただし、Case1 で危険領域と判断された領域外であっても上流部渓流出口の脇部分（図 6.4.1 の赤色枠内）に家屋を建てる際は、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。下流部の扇型の氾濫域の脇や下流端の先（図 6.4.1 の黄色枠内）であれば新たに危険領域となることはほぼ無いといえ、家屋などの人が長時間滞在する建物を新設する場合、この領域や、より外側に建設することが望ましいといえる。

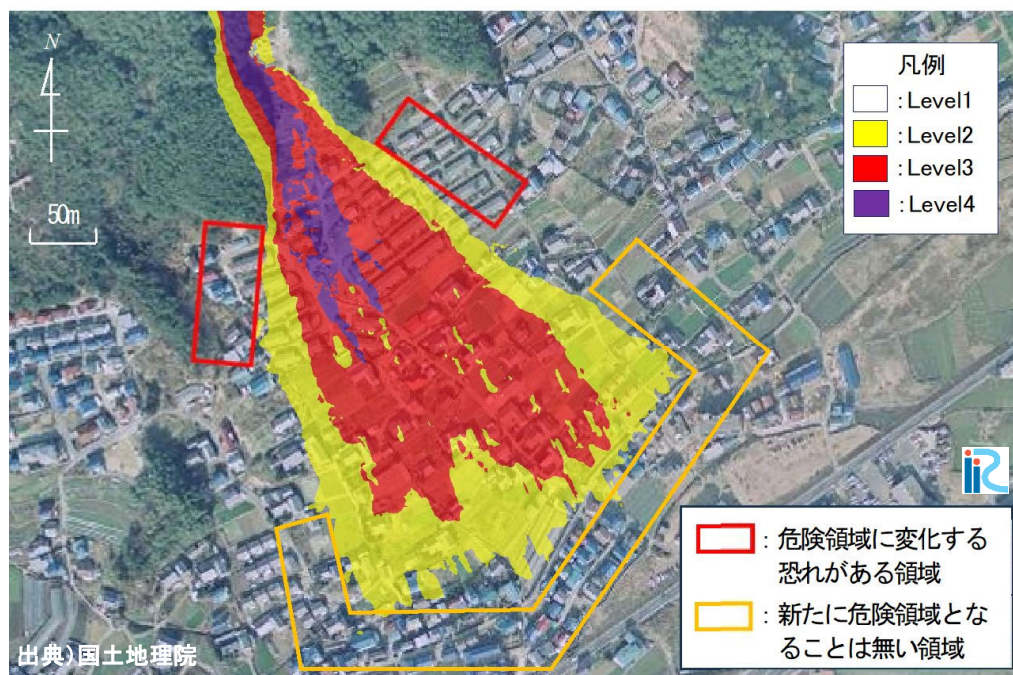


図 6.4.1 まちづくりのための危険領域の評価
(背景の危険度評価は Case1 を使用)

本解析結果からも分かるように、土石流は家屋等の構造物がある場合、土砂が構造物上流部に堆積することで下流部の氾濫範囲が小さくなるという特性を持つ。よって、上流部の渓流出口において、危険であるという理由で家屋を移転させた場合でも、下流部がより危険になることで宅地域全体として被害のポテンシャルは大きく変化しない場合もある。

一方で、渓流の出口となる氾濫域の上流部は、土石流に対してより危険であり、上流部に家屋を新設することは望ましいとはいえないが、上流部に構造物があれば下流部の被害を軽減することができ

る。よって、土石流渓流の出口となる領域に、例えば、鉄筋コンクリート構造の倉庫のような人が長時間滞在しない構造物等を建設することで、下流部の氾濫を軽減することができる。また、キャンプ場のように、豪雨中は人が滞在しないような施設を設置し、土石流渓流の出口に鉄筋コンクリート構造の管理棟を設置しておくといった方法も考えられる。

土石流の流動範囲は、構造物の存在によって複雑に変化し、構造物を新設すれば下流部の氾濫範囲に影響を与える。実際には、このような点を考慮したまちづくりが検討されることが望ましいが、現在の制度では、これらのことは十分に考慮されていない状況にある。日本の人口のうち、約 6 割が市街化区域に居住しており⁷⁾、広島市安佐南区八木三丁目のように、これから開発をする、又は再開発を行おうとする地域は、多くの場合、都市計画区域であり市街化区域である。市街化区域は、市街化を抑制する市街化調整区域と異なり、計画的に市街化を図る区域である。この区域では建築物を建設する場合でも、用途地域や地区計画等に反していなければ、建築確認申請のみで建築物を建設することができる。これもあくまで申請であるので、一般的な広さの土地での建築物は基本的に規制されずに建設される状態にある。一方で、土砂災害防止法によって土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）に入っている場合は、土石流等が衝突した際でも安全である強度にしなければならないという規制はあるものの、建築そのものは可能となっている。

本研究のような土石流の数値シミュレーションを用いた評価は、現地調査等と異なり、比較的短時間で行えるものであるので、まちづくりにおける土砂災害の減災対策に対しても有効な手段になると考えられる。家屋を新設することによって他の家屋の土砂災害の危険性を高めてしまう可能性もあるので、行政など第三者の主導により行われるのがよいと考えられるが、土石流の流動特性を考慮した新たなまちづくり制度の実現が求められる。

現在、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の指定は全国各地で完了しつつある状況である。また、土石流は家屋や道路等の存在によって複雑に流下・氾濫し、より広い範囲で警戒が必要となる。これらのことから、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）のみでなく、より広い範囲で指定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内に構造物を建設する場合でも、建築確認申請と同時に、土石流の数値シミュレーションを行い、その構造物に対して、土石流氾濫域の危険度を評価し、他の家屋等への影響を調査するといった制度が一例として考えられる。新設する構造物が土石流に対して危険である又は地域全体での被害ポテンシャルが大きくなる可能性が高いと判断された場合には、建築の許可を与えない、又は用途を制限するなどの対応が求められる。

一方で、実際に土砂災害に見舞われる可能性があるということを、そこに居住している住民が知っており、実感しているということが減災において決定的に重要である。そのためには、住宅の購入の際に不動産会社から詳しい土砂災害リスク情報を得ることができ、自治体は土砂災害への注意を定期的に喚起する等、土砂災害に強いまちづくりへ向けた制度改革も非常に重要であると考えられる。

6.5 結語

本章では、第 5 章で提案した危険度評価手法を用いて、宅地域における家屋配置の違いによる土石流危険度の空間分布を検討するとともに、まちづくりのためのハード・ソフト対策に関する土石流数値シミュレーションの活用法を検討した。

広島市安佐南区八木三丁目を対象に、土石流の数値シミュレーションを実施し、家屋配置条件の違いによる危険度評価を行った。家屋を考慮すると、家屋の上流側で土砂が堆積し、家屋の下流部に流れる土砂が減少するため、下流部の危険領域が狭まることが分かった。また、溪流出口の南側に家屋を新設した場合、土石流が新設した家屋に衝突し、家屋上流部で堆積したことで、新設家屋の下流側では、家屋を新設しない場合と比較して危険度レベルが低くなった。溪流出口の東側に家屋を新設した場合、危険領域が東側に広がらなくなった一方で、土石流が新設した家屋に沿って流下したことで下流部の危険度レベルが高くなった。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差がみられ、土石流の数値シミュレーションによる危険度分布の評価が、減災対策の計画段階において有効な手段であることが分かった。

土石流は家屋等の構造物がある場合、土砂が構造物上流部に堆積することで下流部の氾濫範囲が小さくなるという特性を持つ。よって、上流部の溪流出口において、危険であるという理由で家屋を移転させた場合でも、下流部がより危険になることで宅地域全体として被害のポテンシャルは大きく変化しない場合がある。一方で、溪流の出口となる氾濫域の上流部は、土石流に対し、より危険であり、上流部に家屋を新設することは望ましいとはいえないが、上流部に構造物があれば下流部の被害を軽減することができる。このことは、土石流の数値シミュレーションにより評価することが可能である。土石流の数値シミュレーションを用いた評価は、現地調査等と異なり、比較的短時間で行えるものであるので、まちづくりにおける土砂災害の減災対策に対しても有用な手段になると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ:平成 26 年 8 月豪雨による広島県で発生した土砂災害への対応状況.
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/H26_hiroshima/141031_hiroshimadosekiryu.pdf.
- 2) 国土交通省ホームページ：土砂災害防止法の概要.
<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/gaiyou.pdf>.
- 3) 中本英利, 竹林洋史, 藤田正治：宅地域における土砂災害警戒区域等の評価と土石流氾濫リスクの空間分布, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第 78 巻, 2 号, pp.I_997—I_1002, 2022.
- 4) 国土交通省ホームページ：土砂災害警戒区域の整備状況
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/content/seibi2022.pdf>
- 5) 国土地理院：平成 26 年（2014 年）8 月豪雨による広島市における土砂災害に関する情報.
<http://www.gsi.go.jp/chugoku/201408disaster.html>.
- 6) 国土交通省 川の防災情報：浸水深と避難行動について.
<http://www.river.go.jp/kawabou/reference/index05.html>.
- 7) 川上光彦：都市計画第 3 版, 森北出版株式会社, 2017.

第7章 結論

本論文の各章で得られた成果と知見を以下にまとめる。

第 1 章では、本研究の背景として、近年の土砂災害の現状と課題、土砂災害に関する警戒・避難に関する現状と課題を整理した上で、本研究の目的を述べ、本論文の構成及び内容について示した。

第 2 章では、本研究に関連する既往研究として、土石流の数値シミュレーションに関する研究、土石流の数値シミュレーションを用いた警戒・避難に関する研究を整理した。

土石流の数値シミュレーションに関する研究では、既往の土石流の数値シミュレーションや GIS・GUI を実装した土石流シミュレータについて、土石流対策のハード面・ソフト面における土石流の数値シミュレーションの活用法の様々な事例について確認した。「Hyper KANAKO」は、急勾配である山地の溪流部を 1 次元、緩勾配となる扇状地の氾濫原を 2 次元で表現し、両者を結合することで土石流の一連の流動を表現している。しかし、溪流部は 1 次元の枠組みで流路や流動幅等は固定化されており、地形や流動幅変化による土石流ハイドログラフの変化を評価できないなどの課題は残る。一方、「iRIC-Morpho2DH」は、土石流が斜面崩壊発生地点から斜面・溪流を流動して宅地などの緩勾配域で堆積するまでの過程全てを 2 次元で表現しており、土石流の流下過程において、地形に応じて合流や分派の現象も表現できる。

土石流の数値シミュレーションを用いた警戒・避難に関する研究では、土石流のソフト対策を講じる際に、住民に土石流の危険性について正しい情報を提供し、適切な避難行動に繋げるための研究事例について整理し、土石流氾濫原の危険度評価や指定されている避難場所・避難経路の安全性評価、避難計画の立案等に、土石流の数値シミュレーションの活用が有用であることを確認した。しかし、想定する土石流シナリオの設定方法や危険度を評価するための評価指標（閾値）の課題について述べた。

第 3 章では、本研究で基本的に用いる土石流の数値シミュレーションモデル「Morpho2DH」の概要について、土石流の発達から堆積が終了するまでの過程を記述するための基礎方程式（土石流全体及び土砂の質量保存則、流れの運動量保存則、河床位方程式）を整理した。

次に、近年の土石流災害における被害状況写真から、家屋の破壊状況の実態について整理し、土石流が発生した溪流出口からの距離や溪流の向き、宅地域の道路や家屋の配置により、家屋の破壊状況も異なることを示した。家屋の破壊を考える場合、土石流の数値シミュレーションにより、土石流の流動特性を把握し、宅地域に氾濫した土石流の流動深や流速の空間分布を得ることが重要である。

以上を踏まえ、実際の被災直後の家屋の痕跡等から、家屋に作用する応力について考察し、土石流の数値シミュレーションにおいて家屋の破壊過程を考慮するためには、家屋に作用する応力として、流動に起因した応力と水圧・土圧による応力を考える必要があることを示した。また、家屋形状を複数の解析格子で表現し、土石流により家屋に作用する応力が、家屋破壊限界応力を超えた場合、対象

格子（家屋）が流失したと判断することで、家屋の破壊過程を考慮できるモデルを構築した。

第 4 章では、第 3 章で構築した家屋破壊モデルを iRIC-Morpho2DH に組み込み、実際の土石流災害の再現計算をすることで、現地への適用性を検討した。

宅地内の家屋の一部が全壊・半壊した平成 26 年の広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流を対象とし、家屋の破壊過程を考慮した平面 2 次元の土石流数値シミュレーションを実施し、家屋の存在が土石流の氾濫域に与える影響を検討した。その結果、本数値シミュレーションモデルによって、家屋の半壊・全壊の状態を比較的良く再現でき、土石流で全壊・半壊する可能性のある家屋を評価することが可能である。

広島市安芸区矢野東の梅河団地で発生した複数の土石流を対象に、土石流の数値シミュレーションを実施し、土石流の流動特性と再現性の評価を行った。対象地点の家屋の多くは第 2 波である北側溪流からの土石流によって破壊された可能性が高いことが明らかとなった。また、宅地内における家屋に作用する最大応力の大きい領域は、破壊した家屋の分布と良く一致していた。

また、現状における土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の課題を整理した。現状の土砂災害警戒区域等の設定方法は、全国の膨大な土石流危険溪流に適用するために簡便な方法が用いられており、家屋が存在しない想定など、ある一定レベルの精度で氾濫域等の予測はできるが、谷出口で溪流が屈曲した局所的な地形や家屋・道路等の影響を踏まえた土石流の動態などは捉えることができていない。広島市安芸区矢野東（梅河団地）を対象に、設定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）や土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の評価を行った。再現計算結果から、設定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内においても、土石流が流れてこない被災リスクが低い箇所が存在すること、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）以外でも、家屋が破壊するおそれのある箇所が存在することが示唆され、避難を考える上で非常に重要な情報となる。

第 5 章では、土石流の数値シミュレーションを用い、宅地域における家屋影響の有無による土石流の流動特性を検討するとともに、溪流上流域における土石流の発生条件による土石流氾濫リスクの空間分布や土石流による危険度評価について検討を行った。

まず、溪流出口に宅地域が広がる地区を対象に、家屋の影響を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施し、家屋が土石流の流動特性に与える影響を検討した。家屋の破壊を無視し、不透過な非破壊構造物として扱った場合、家屋の上流域の多くに顕著な土砂の堆積域が形成されるため、土石流の流下方向の氾濫範囲が狭くなることが明らかとなった。また、家屋の存在を考慮しない場合、土石流は扇形に広く薄く流れて土石流扇状地を形成した。その結果、家屋を考慮した場合とは氾濫域が大きく異なった。家屋の存在を考慮しない場合の氾濫域は、設定されている土砂災害警戒区域と比較的近い結果となり、土砂災害警戒区域として指定されている領域においても家屋の存在によって土石流が流れてこない場所が広く存在することを示した。これらの情報は、土砂災害警戒区域内であっても

家屋の影響により比較的安全な場所が存在することを意味し、遠方への避難が困難な場合の避難候補地を把握する際、非常に有効である。

次に、土石流の発生条件の違いが、宅地域に流入する土石流の氾濫域や流動深の空間分布に与える影響を検討した。複数の斜面崩壊のタイミングや斜面崩壊数の違いによっては、宅地域に流入する土石流の氾濫域・流動深も大きく異なることが分かった。従来、土石流溪流からの土砂流出量は、最も規模の大きい単一の溪流からの土砂流出量を用いることになっているが、同じ溪流でも斜面崩壊地点の違い等により、宅地に流入する土石流の規模（流動深、氾濫域等）が異なることがわかり、被害を想定する際には条件設定やケース設定に注意が必要である。避難計画等を検討する際に、土石流の数値シミュレーションを活用する場合、想定する溪流からの土砂流出量を小さく見積もらないように、複数の溪流からの土砂流出量を考慮するなどのシナリオ設定が重要であることを示した。

最後に、宅地域における家屋や道路の配置が土石流の被害形態に与える影響や、土石流による危険度の空間分布を検討し、被害形態に応じた危険度の評価を行った。土石流の数値シミュレーションを用いて、被災形態別に土石流危険度の評価を行うことで、土石流に対する危険領域を視覚的に捉えることを試みた。土石流による危険領域は家屋の有無や配置の影響を受け、本研究の手法を用いることで家屋の有無や配置によって土石流災害危険領域が変化することを示すことができ、宅地域へ氾濫した土石流による危険度を評価できることを示した。被害形態別に土石流の流動深と家屋破壊との間の危険領域と比較すると、土石流の流動による危険領域の多くは家屋破壊の危険領域外にある。つまり、土石流の流動による危険領域内であっても、家屋を破壊させるほどの強い流体力を持つ土石流の流下範囲は狭く、建物の2階以上への移動などの垂直避難によって確保できる建物が多いことを示した。一方、家屋破壊と土砂堆積の危険領域と比較すると、両者の重複はほとんどみられなかった。つまり、溪流出口から離れた地域では、家屋破壊などの深刻な被害は受けないが、敷地内への土砂堆積や家屋への土砂流入による被害が全くないわけではないことを示した。土石流被害に対するハード・ソフト対策を検討する上で、様々な被害に対する危険度レベルを評価することが重要であると考えた。

第6章では、第5章で提案した危険度評価手法を用いて、宅地域における家屋配置の違いによる土石流危険度の空間分布を検討するとともに、まちづくりのためのハード・ソフト対策に関する土石流数値シミュレーションの活用法を検討した。

広島市安佐南区八木地区を対象に、土石流数値シミュレーションを用いたまちづくりの検討を試みた。土石流の数値シミュレーションの結果をもとに、土石流危険度の評価を行うことで、土石流に対する危険領域を視覚的に捉えることができた。本手法は、現地で計測可能な溪流の不安定土砂の厚さの情報と土砂災害危険度の関係を直接導くことが可能であり、実際の現地での危険度評価において非常に有効な方法である。危険領域は家屋の有無や配置に大きな影響を受け、家屋を新設する際は、本手法を用いることで危険領域の変化を示すことができ、新設する家屋および周辺の危険度を評価できる。家屋等の構造物を考慮する際、その上流部に土砂が堆積することで下流部での危険領域が狭まること、また、上流部にある危険度の高い家屋を移転させたとしても地域全体の減災には繋がらない可

能性があることを示した。土石流氾濫域上流部では、鉄筋コンクリート構造の倉庫や、豪雨中は人が滞在しない施設にする等の対策が考えられ、土石流の数値シミュレーションを用いた危険度の評価が実際にまちづくりに役立てられていくような制度の充実を図っていく必要がある。

謝 辞

本論文は、著者が京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻博士後期課程及び研究指導認定退学後の研究成果をまとめたもので、執筆に当たっては、多くの方々からのご指導、ご助言、ご支援を頂きました。

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 森信人先生、同教授 山口弘誠先生には、本論文をご高覧して頂くとともに非常に貴重なご意見、ご助言を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

京都大学名誉教授 藤田正治先生には、博士後期課程での研究の機会を与えて頂くとともに、博士後期課程の主旨指導教員として研究内容について終始温かいご指導を頂きました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻准教授 竹林洋史先生には、博士後期課程への編入学以前から研究の道筋を立てて頂き、著者の研究活動を通して終始熱意あるご指導を頂きました。さらに、指導教員として本研究の遂行と論文の執筆に当たって多数の貴重なご意見、ご助言を頂くとともに、研究姿勢についても多くを学ばせて頂きました。ここに記して改めて深く感謝の意を表します。また、京都大学大学院農学研究科森林科学専攻准教授 宮田秀介先生、同工学研究科社会基盤工学専攻准教授 山野井一輝先生、砂防工学研究室の皆様には、著者の在学中、研究室内のゼミ発表において、貴重なご意見を頂き、多くの刺激を受けました。心より感謝いたします。

京都大学名誉教授・特任教授 角哲也先生には、博士後期課程の副指導教員として、的確なご指摘と有益なご助言を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。京都大学名誉教授 中川一先生、舞鶴工業高等専門学校名誉教授 川合茂先生には、著者が研究活動を始めて以来、本研究の遂行についてご助言頂くとともに、温かく見守って頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

著者が所属する株式会社東京建設コンサルタントの皆様には、在学中及び研究指導認定退学後の研究活動にご理解を頂くとともに、長くご支援を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に、妻 安妃子、長女 葵、次女 楓、三女 桜には、仕事と研究のために長い間負担をかけ、我慢や寂しい思いをさせてしまいました。妻・子供達の日々の生活の支えがあったからこそ、本論文をまとめることができたと思っています。ここに心より感謝いたします。