



土石流災害のリスクを知る

中谷 加奈 教授 博士（農学）
NAKATANI Hasegawa Kana

京都大学防災研究所
気象・流域災害研究部門
流砂・砂防研究分野

Outline

- 土砂災害とは？砂防とは？
 - 土砂災害に対する森林のプラス面とマイナス面
- 山間部で発生する土砂を含む流れ（流砂）
- 土石流の特徴、防災対策
 - 京都での土石流の危険性：京都大学、観光地、発生事例
- 土石流による具体的な被害状況の検討
 - 扇状地の建物の土石流挙動への影響
 - 京都府・亀岡市と連携したソフト対策の検討
 - 2014年8月広島県で発生した土石流
 - 土地利用や地形データによる違い
- 土砂・洪水氾濫
- 今後の展望

山間部で発生した土砂災害、流木による被害



2014年長野県南木曽
土石流発生後の下流の状況



閉塞した伊豆大島の橋
（流木除去後）



2014年広島



2013年伊豆大島

土砂災害とは？ 砂防とは？

- 「災害」として定義されるには何らかの被害が発生
 - 大規模に崩れても、人的・物的（家や道路など）に被害がなければ単なる土砂移動現象
 - 小規模でも何らかの被害が生じていれば土砂災害
 - 災害を防ぐ「防災」は、人間社会と密接に関わる



2011年紀伊半島水害 奈良県赤谷地区
アジア航測株式会社 撮影



2014年広島土砂災害 安佐南区 株式会社パスコ 撮影

砂防とは ～土砂災害の発生を予測し、防止・軽減する～

- 効果的な対策には、土砂災害の発生場所や時刻、規模の予測が必要
 - 観測、調査、実験、シミュレーション等の手法

SABOは
世界の共通語



2009年山口県防府市の災害

（左：土石流で被災した建物、右：透過型砂防堰堤で捕捉された流木）

土砂災害とは？

「土砂災害防止法」※では以下により生じる被害を土砂災害と定義

1999年広島土砂災害を契機に成立
2014年広島土砂災害を受けて、改正

正式名称※「土砂災害警戒区域等における
土砂災害防止対策の推進に関する法律」



がけ崩れ



地すべり



土石流

単体で起こるだけでなく、複合的に発生することも

がけ崩れ（急傾斜地崩壊）

- 傾斜度30度以上の土地が崩壊する自然現象（局所的）
- 降雨や融雪，地震などが誘因



都市部のがけは、危険をはらんだ斜面であるとともに、貴重な緑の空間でもある。



がけが迫る海岸の集落



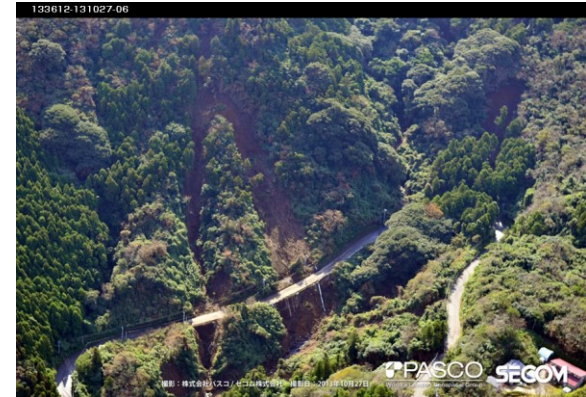
がけと隣り合わせの山間部の集落

地すべり・崩壊

- 斜面の一部あるいは全部が地下水の影響と重力でゆっくり斜面下方に移動する現象
- 土塊量が大きく、動き出すと停止させることは困難
- 崩壊は厚さで分類
 - 表層崩壊：厚さ約0.5～2.0mの表層土が滑落
 - 深層崩壊：すべり面が深部で発生、深層の地盤までが崩壊土塊、比較的規模が大きい



資料：国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/index.html>



2013年伊豆大島の表層崩壊
(撮影：株式会社パスコ)

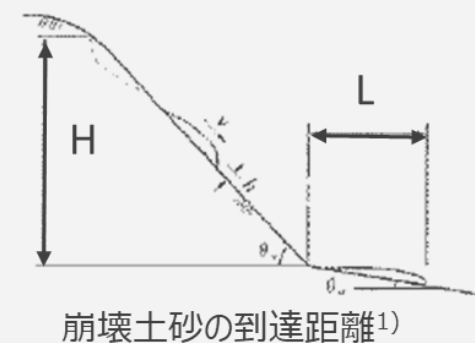


2011年紀伊半島、田辺市熊野の深層崩壊
(撮影：株式会社パスコ)

土石流

- 急勾配で発生する土砂と水の混合物流れ
 - 水と混合することで、流動性が高くなる

- 急勾配で崩壊しても、水と混合しないと
- 土砂の移動距離は短い^{1),2)}
- 崩壊の多くは高さHと移動距離Lの比 (L/H) が1以下で¹⁾、住宅地等まで到達しない



- 時速40kmの速さで動く場合も
- 幅広いサイズの土砂（数mm～数mまで）を含む
 - 巨礫や流木は先端（フロント）部に集中
 - 土石流フロントの巨礫や流木が、建物や車に衝突して被害をもたらすことも

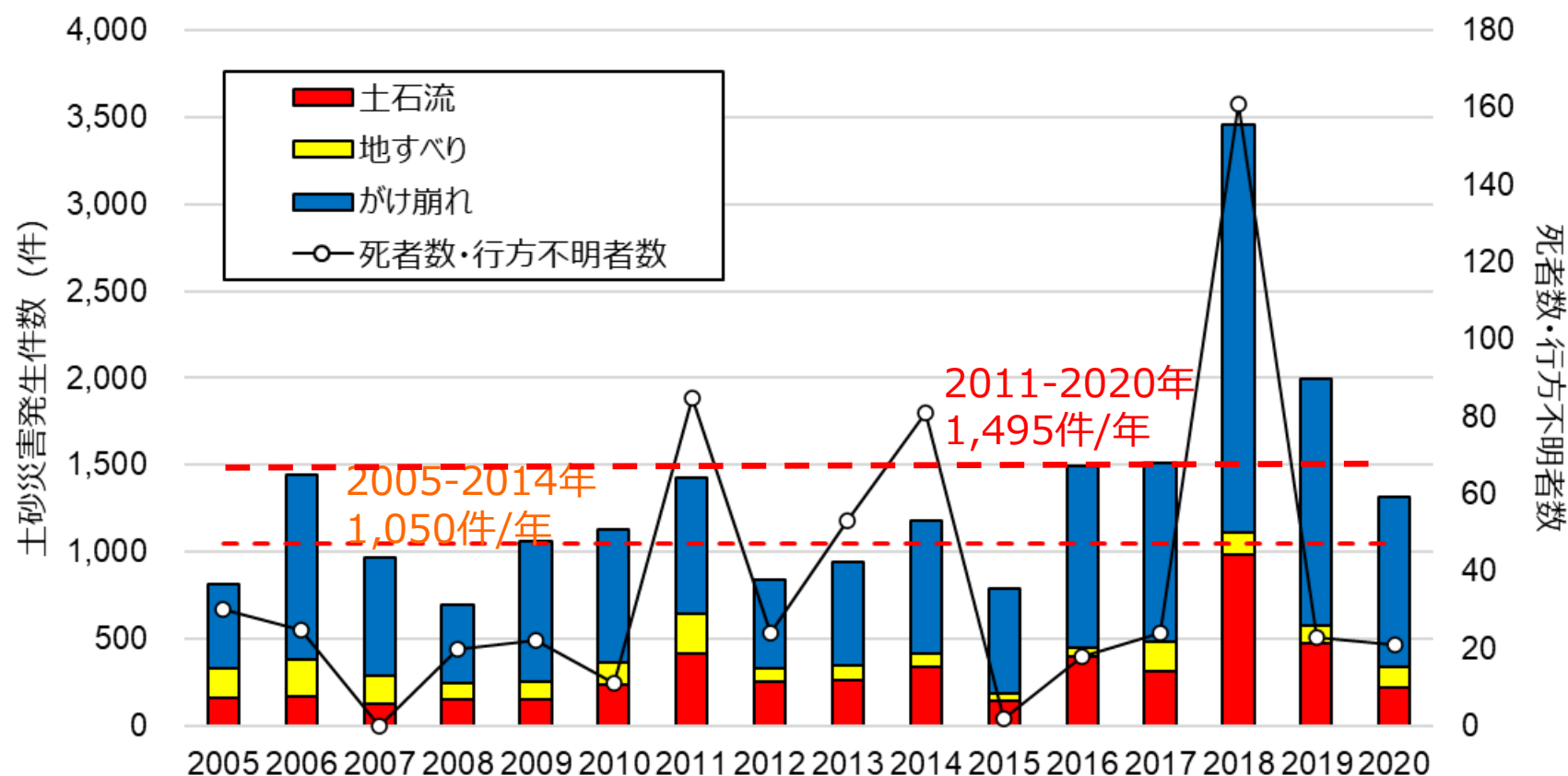


2014年8月に広島で発生した土石流
谷出口から下流の住宅地を望む



資料：国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/index.html>
1) 水理公式集〔2018年版〕, pp. 269-270, 土木学会, 2019.
2) 高橋保：土石流の機構と対策, 近未来社, pp.17-18, 2004.

土砂災害の発生件数と人的被害



- 平成30（2018）年は1982年の集計開始から過去最大の発生件数
- 平均の年発生件数は1,015件（1982～2017年）
- **土石流は発生件数に対して、人的被害が大きい**

2018年7月豪雨、京都福知山で発生した土砂災害

- 2018年7月6-7日に京都府福知山市一級河川由良川の左支川谷河川流域で50mm/hrを越の降雨、右岸斜面で大規模な崩壊が発生、河道閉塞（天然ダム）が形成



谷河川河道閉塞状況
(出典：国際航業株式会社)



崩壊および天然ダム



天然ダム上の道路構造物



天然ダム上流の湛水池



天然ダム下流の流路

参考文献、図・写真の出典
里深ら、砂防学会誌、Vol.71、No.4, 2018

近年の土砂災害 2024年(令和6年)

- 滋賀県米原市伊吹山で土石流が7月1日、25日

8/21現地調査で撮影



7月26日撮影
谷出口の
土砂流出

出典:
朝日航洋
株式会社



- 愛媛県松山市 7月、松山城裏で崩壊・土石流により人的被害3名



松山城北東側
斜面の土砂災害
発生地（左）と
住宅に流れ込ん
だ土砂（右）

出典:
国際航業株式会社

土砂災害に対する森林のプラス面とマイナス面

森林の役割

- 日本は国土の7割を森林が占める
(世界の森林率の平均は3割)
- 森林は水源涵養機能により、洪水ピークの緩和や崩壊や侵食の抑制、根系の緊縛効果などからも、土砂災害の被害軽減に寄与

土砂災害と森林

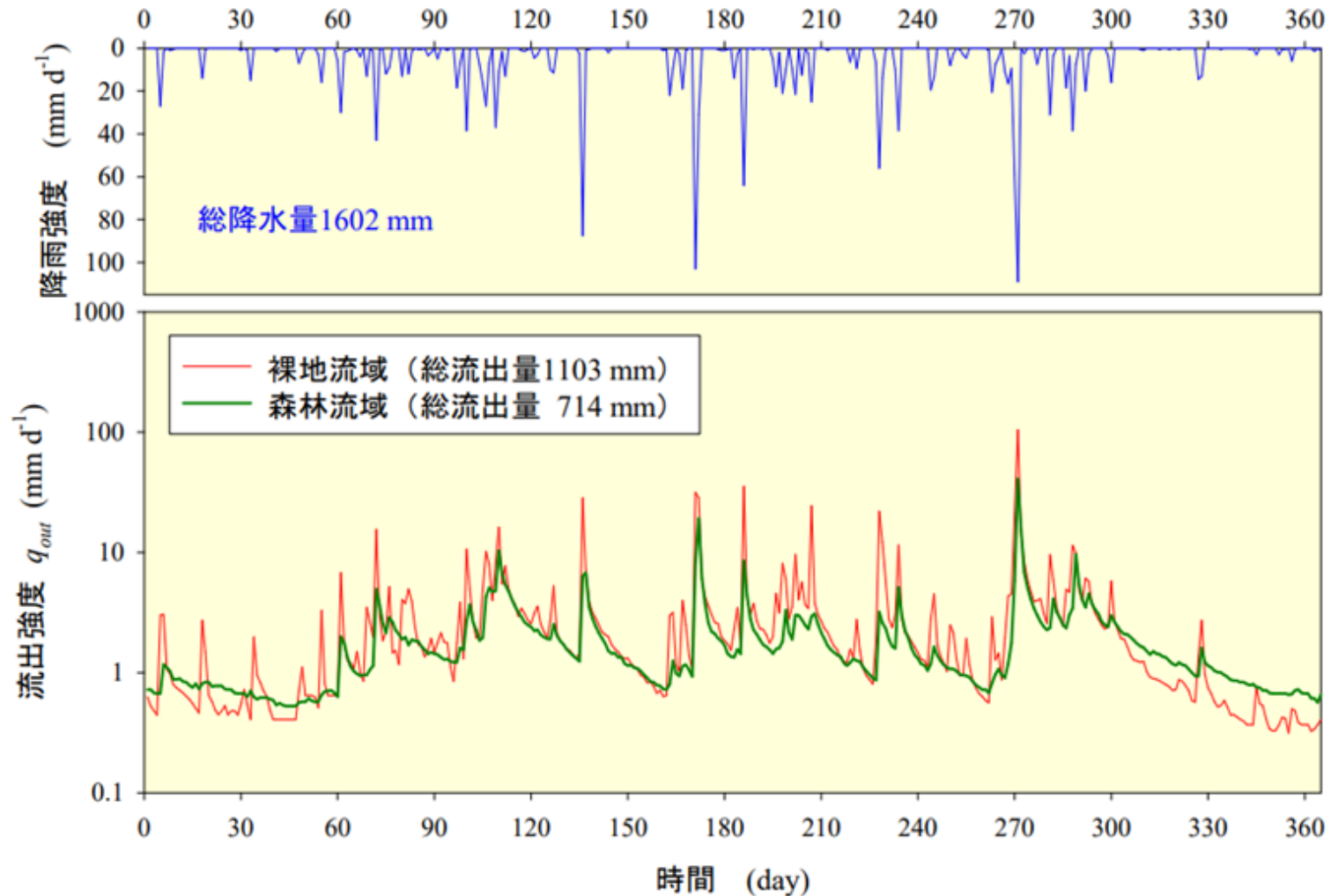
- 豪雨時には森林の水源涵養機能、緊縛効果も限定的
- 土砂災害や崩壊・侵食に伴い、立木が流出して（流木）被害

森林の水資源涵養機能とは

洪水 緩和機能	降雨時に流出ピークを低減させ、遅らせる。ただし、大洪水時は流域が飽和に近い状態になるため顕著な効果は期待できない。 ※一定の効果が保たれるとする研究も（谷, 2018）
水資源 貯留機能	無降雨時に河川流量を多く保ち、利用可能な水量を増加させる。 森林の蒸発散作用により、総流出量は減ることに注意が必要。
水質 浄化機能	流出水の水質が改善、あるいは清澄に保たれる。森林土壌の濾過作用や林床植生の表面侵食防止効果等によって達成される。

（地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について, 日本学術会議, 2001に基づく）
（森林土壌の流出緩和効果に関する研究の展開過程, 谷誠, 2018 水文・水資源学会誌）

森林の水源涵養機能の定量的評価の例



- 滋賀県田上山地の**裸地**と**森林**の流域で流出を比較
- **裸地**に比べ**森林**は流出ピークが低減し、無降雨時の流量を多く保持

出典：小杉賢一郎，森林の「ダム」機能の科学的評価の試み，水利科学,281,18-31, 2005.の図1を改変

森林の植生の影響

出典：林野庁 明治期の治山事業について
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kouhou/archives/tisan/tisan.html>

・ 植生は表面侵食を防ぐ

- ・ 滋賀県の田上山は伐採が広く行われ、江戸時代「田上の禿」と呼ばれる荒廃
- ・ 植生のないはげ山は土壌侵食が進み、土砂災害の原因に
- ・ 明治時代から苗木植栽が主の治山工事、現在は緑が蘇る



田上山の位置図（滋賀県大津市、栗東市）



大正時代の田上山の作業風景



工事着手前の荒廃状況（大正2年）



工事着手直後の状況（大正3年）



現在の成林状況（平成30年）

森林の植生の影響

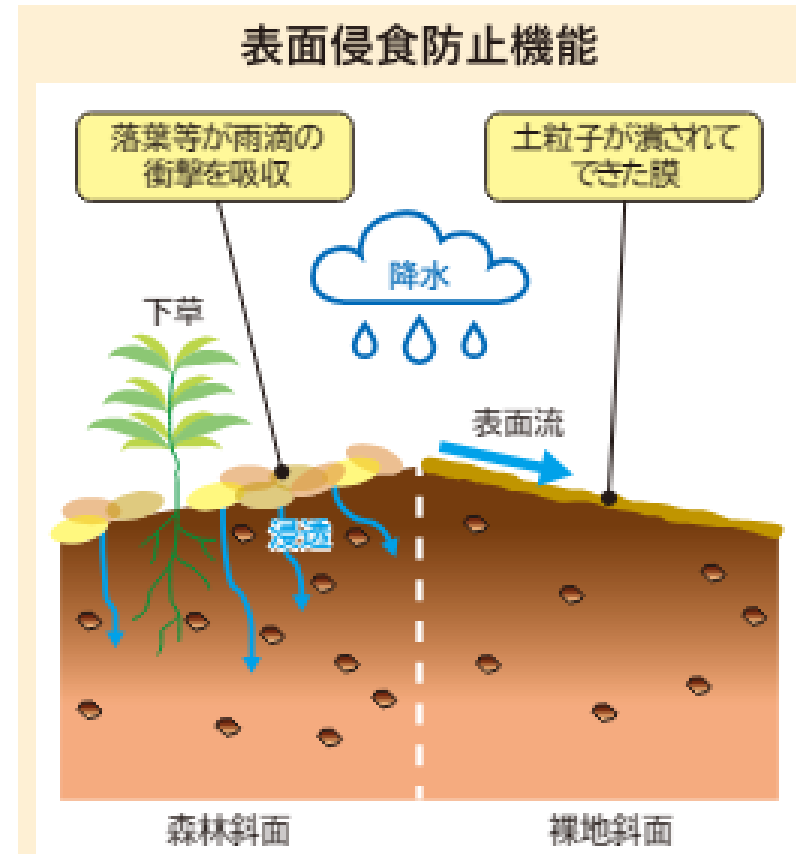
出典：林野庁「令和4年度森林・林業白書」説明資料
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r4hakusyo/attach/pdf/index-5.pdf>

- 植生は表面侵食を防ぐ
- 樹木は落石や雪崩の発生を防ぐが、移動し始めたものを止めるには弱い
 - 樹木が倒れるエネルギー消費で到達距離を短くすることはできる
 - 土石流を止めることはできない
- 土石流や崩壊が起こると、立木が流出して流木被害が起こる場合も



流木の流出

2014年長野県南木曽土石流後の下流



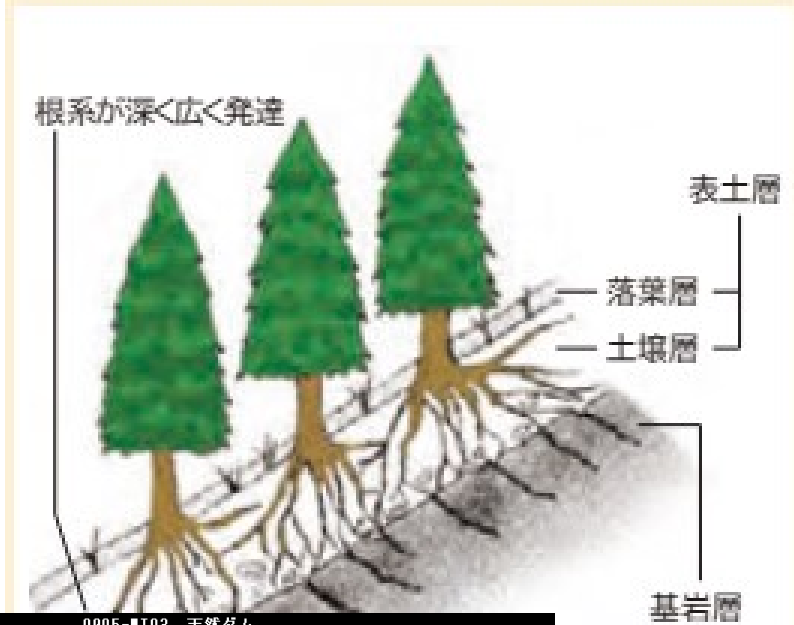
資料：太田猛彦・藤嶋昭特別監修「新しい科学の世界へ③ 自然災害そのメカニズムに学ぶ」(2021)に基づき林野庁治山課作成。

森林の植生、根系の影響

- 木の根の深さは樹種に無関係に1 m程度（長くても2m）
- 崩壊の深さは1.5m程度
 - 2m未満の表層崩壊の軽減には一部寄与？
 - 基岩付近から起こる2m以上の深層崩壊の防止は無理

出典：林野庁「令和4年度森林・林業白書」説明資料
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r4hakusyo/attach/pdf/index-5.pdf>

表層崩壊防止機能



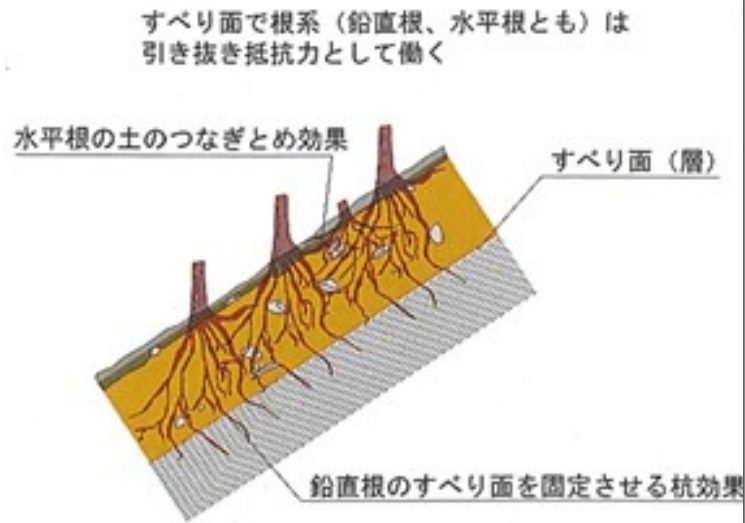
注意：この基岩層の位置は浅すぎ、基岩まで根が到達することはない

出典：株式会社パスコ 災害撮影
[事業活動と社会貢献]

https://www.pasco.co.jp/disaster_info/

根系の緊縛効果

- 根系が土粒子間に侵入、網目のように土粒子を結びつけ一体化し、降雨による侵食、滑動、崩壊への抵抗力を与える効果



樹木の根系が発揮する断面抵抗力^{1),2)}

土中の根の分布状況³⁾

出典：

- 1)林野庁森林整備部治山課：森林が持つ表層崩壊防止機能をもつための 森林施業の計画に関するガイドライン（案）、令和5年3月
- 2)長野県林務部森林づくり推進課：災害に強い森林づくり指針、2008年1月
- 3)古賀尚永：堤防法面張芝の長寿命化を目指して、公益自主事業（九州技報）第64号 2019.03

森林の植生、根系の影響

- 樹木の重さや風で揺すられることが崩壊を助長する場合も
- 皆伐後に浅い崩壊が発生する
 - 伐採前は、根の範囲内の崩壊を防いでいた？



表層崩壊の写真提供：（国研）土木研究所

山間部で発生した土砂災害、流木による被害



2017年 九州北部豪雨災害
福岡県朝倉（左：上流、右：下流）
撮影 アジア航測株式会社



- 豪雨による土砂災害で、立木が流出、流木化して被害
- **土砂だけでなく流木被害の検討、対策が求められる**

2014年 長野県南木曽の
土石流災害（上流の概観）

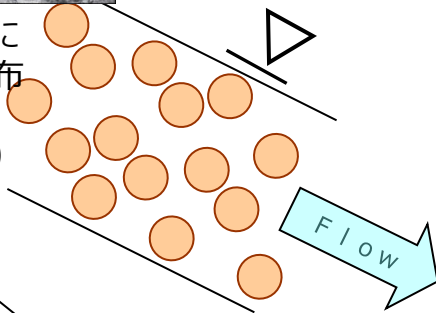
撮影 国際航業株式会社／株式会社パスコ

山間部で発生する土砂を含む流れ（流砂 りゅうしゃ）



流れ全層に
土砂が分布

重力により
駆動



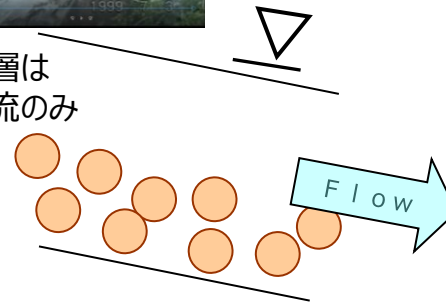
土石流

土砂濃度: 30%以上
粒径: 約10-100cm (500cmも)

※濃度、粒径はイメージを
掴むための大まかな数値



上層は
水流のみ



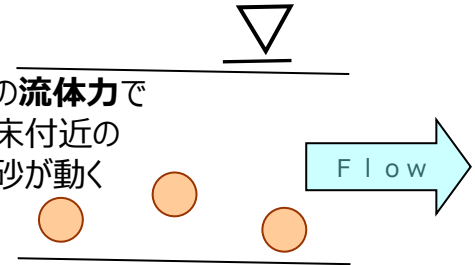
土砂流

土砂濃度: 1-30%
粒径: 約1-10 cm



山間部の川で
通常見られる
のは掃流砂

水の流体力で
河床付近の
土砂が動く



掃流砂

土砂濃度: 1%以下
粒径: 概ね1cm以下

資料: 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/index.html>
奥田節夫ら (1977) 京都大学防災研究所年報、No.20B-1, pp.237-263

土砂災害に対する防災対策

ハード対策

(structural measure)

例えば、**砂防堰堤**、ブレーカー、遊砂地、
床固工、流路工など

： **構造物を用いて土砂を制御**



土石流
捕捉前

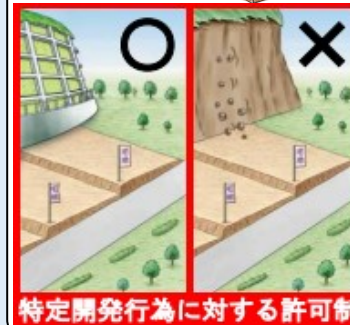
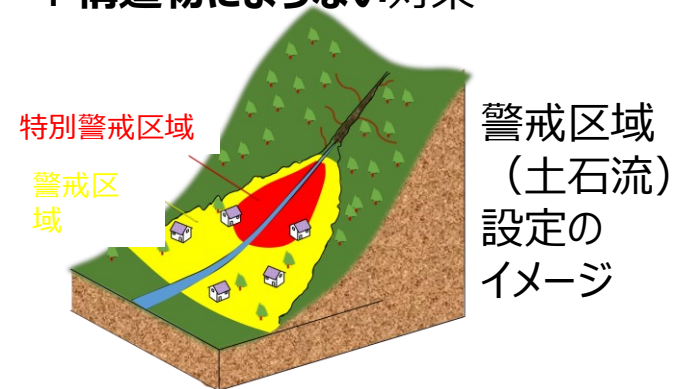


捕捉後

ソフト対策

(non-structural measure)

例えば、避難、警戒情報、
ハザードマップ、土地利用制限など
： **構造物によらない対策**



砂防堰堤（さぼうえんてい、砂防ダムと呼ぶことも）

- 「土砂流出」を抑制
- 水流出は抑制しない
- 堰堤上流の土砂堆積を捕捉（ほそく）と呼ぶ



不透過型砂防堰堤（左：下流から望む、右：上流の堆砂状況）

不透過型砂防堰堤

- コンクリート製
- 上流側で土砂を捕捉
- 通常出水で、堆積することが多い（豪雨前に除石が必要）
- 流木対策の設備が無い場合、大部分の流木は流出



閉塞型の透過型砂防堰堤（鋼製スリットの左：格子型、右：I型スリット）

閉塞型の透過型砂防堰堤

- 袖部はコンクリート、スリット部は鋼製
- 巨礫に対して、鋼管の間隔が1.5倍までほぼ閉塞、2倍は殆ど流出
- 巨礫・流木が含まれない場合は？

不透過型、閉塞型の透過型の
砂防堰堤の実験video

ソフト対策（ハザードマップ）

ハザードマップポータルサイト

身のまわりの災害リスクを調べる

使い方

よくある質問

利用規約/オープンデータ配信 ▾

身のまわりの災害リスクを調べる

重ねるハザードマップ

洪水・土砂災害・高潮・津波のリスク情報、道路防災情報、土地の特徴・成り立ちなどを地図や写真に自由に重ねて表示します。

※お知らせ：浸水継続時間（想定最大規模）のデータに不備があり、それに伴い凡例を修正しました。ご迷惑をおかけしますことをお詫びいたします。詳細はこちらをご確認ください。

住所から探す

住所を入力することで、その地点の災害リスクを調べることができます

例：茨城県つくば市北郷1 / 国土地理院



現在地から探す

現在地から探す

新機能（災害リスク情報のテキスト表示）について

地図から探す



災害の種類から選ぶ



洪水



土砂災害



高潮



津波

地域のハザードマップを閲覧する

わがまちハザードマップ

市町村が法令に基づき作成・公開したハザードマップへリンクします。



都道府県 ▾

市区町村 ▾

ハザードマップの種類 ▾

この内容で閲覧

全国の
ハザードマップを
調べるサイト

ハザードマップポータルサイト
<https://disaportal.gsi.go.jp/>

土石流被害の防止・軽減に向けて

・ハード対策

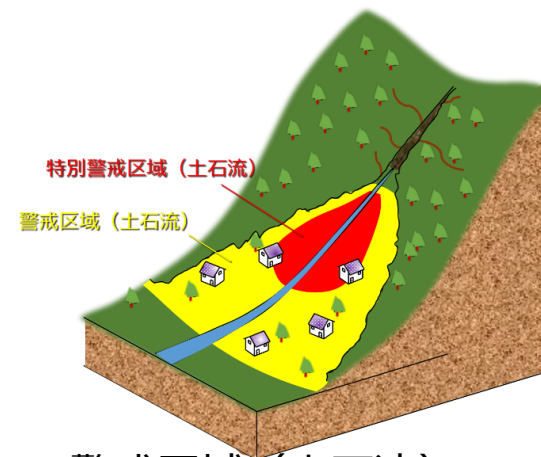
構造物によって土砂を制御



行政による公助だけでなく、自助・共助も重要、
住民による対策の提案・検討

・ソフト対策

構造物によらない対策



警戒区域（土石流）の
設定イメージ

必要な情報



- ・土石流の規模や流下経路、到達範囲
- ・影響が予想される範囲内での危険度分布



土石流シミュレーションの活用

土石流シミュレーションとは？

支配方程式（一次元）

運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho h}$$

全体の保存則 — 質量保存

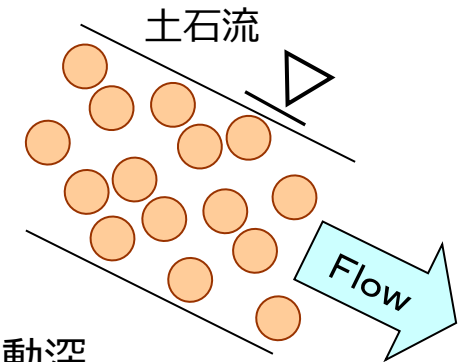
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = i$$

流れ中の土砂の保存則

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} = iC_*$$

河床の連続式 — 侵食・堆積の定義

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0$$



h : 流動深

u : 流速

g : 重力加速度

z : 河床高

$$H = h + z$$

C : 流動層濃度

t : 時間

C_* : 河床堆積物の体積濃度

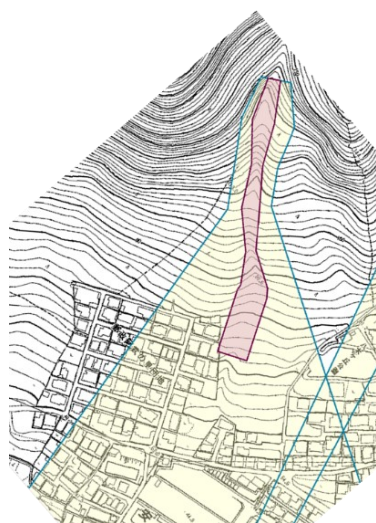
ρ : 土石流（流体相）の密度

i : 侵食・堆積速度

τ : 河床面せん断力

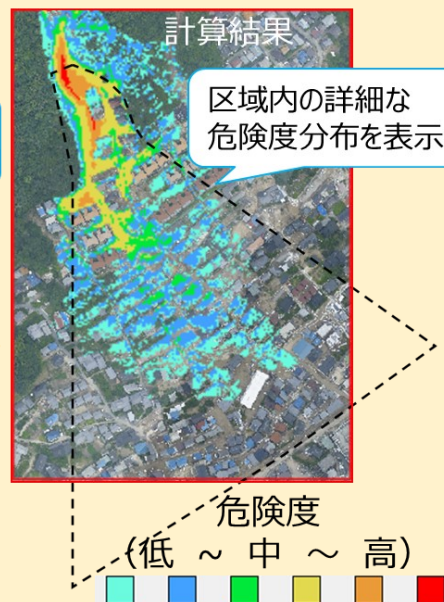
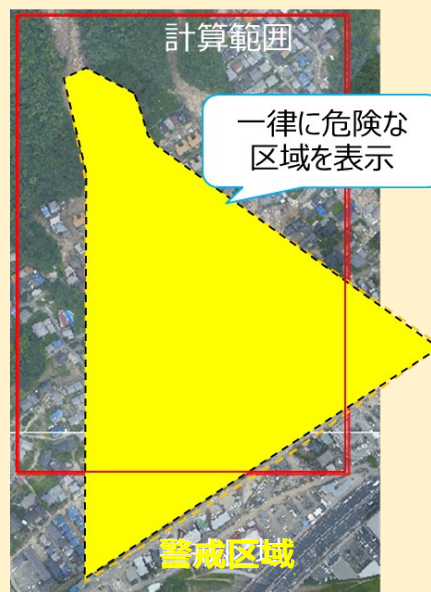
- 運動中の抵抗則、侵食堆積の表現がモデル毎に異なる
 - 侵食：川底の土砂が削られる（河床が下がる）
 - 堆積：川底に土砂が貯まる（河床が上がる）
- 濃度や勾配に応じて**土砂移動形態**を考慮
 - 土石流、土砂流、掃流砂

土石流の危険性が高い場所は？



- 警戒区域内でも危険な場所、安全な場所が混在
- 地形だけでなく道路や建物が影響

2014年に土石流が発生した広島 阿武里団地
左：警戒区域の指定(予定)状況
右：実際の被害状況



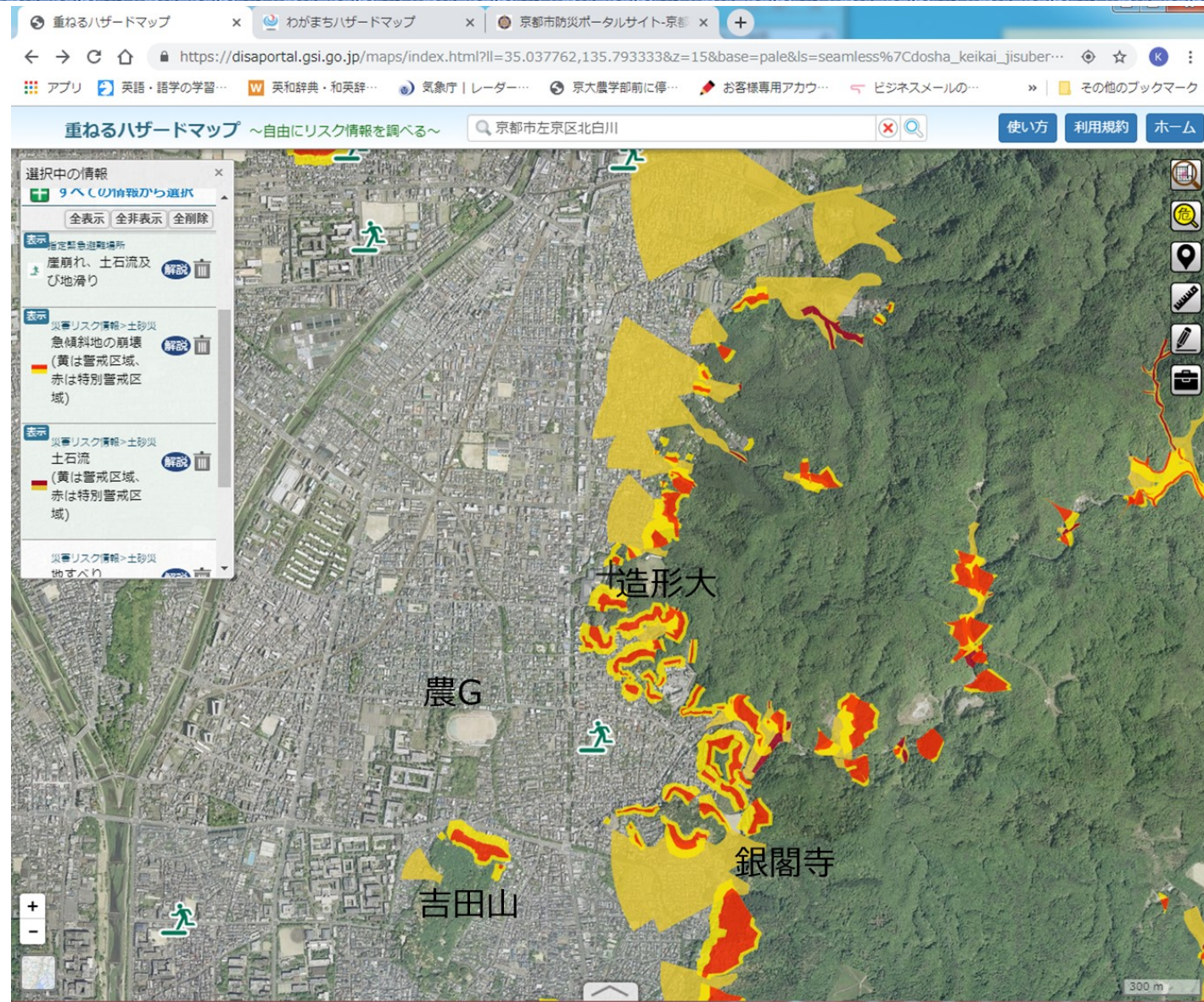
土石流シミュレーション

- 詳細な危険度分布が示される
- 災害の再現、プロセスの検証、防災対策の提案が可能

2014年 土石流発生
広島 県営住宅

京都での土石流の危険性（京都大学）

京都大学吉田キャンパス、
北部構内（農学・理学）



「土砂災害」
「左京区北白川」

検索結果：

- 山裾を中心に警戒区域が多数

土砂災害の危険性の高い場所は、ハザードマップや警戒区域から予め知ることが可能

土砂災害の発生タイミング予測は降雨予測と合わせて進行途上の課題

市町村「避難情報」
国や県の「防災気象情報」等から判断

ハザードマップポータルサイト 重ねるハザードマップから「土砂災害」「左京区北白川」を表示
<https://disaportal.gsi.go.jp/>

京都大学周辺のハザードマップ

洪水浸水想定区域

想定される最大の浸水の深さ

5m以上	2階の屋根 以上が浸水
3～5m未満	2階の屋根 まで浸水
0.5～3m未満	2階の床下 まで浸水
0.5m未満	1階の床下 まで浸水

立退き避難が必要な区域

(建物の倒壊が想定される区域)

堤防が崩れて...

全ての建物の倒壊が
想定される区域

水の流れによって...

木造の建物の倒壊が
想定される区域

雨水出水浸水想定区域

大雨により、側溝や下水道から
水が溢れる可能性がある区域

土砂災害

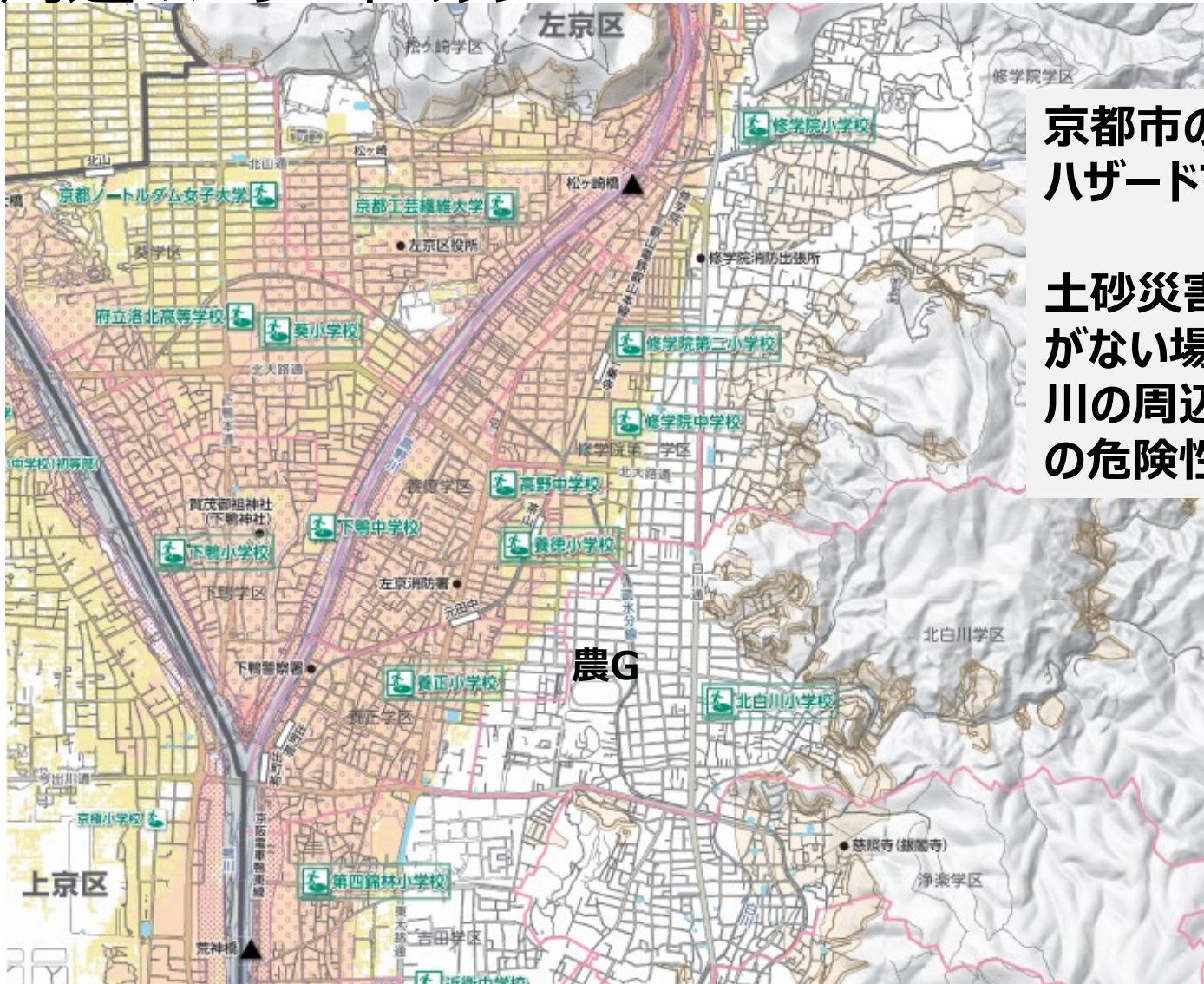
土砂災害警戒区域
土砂災害特別警戒区域

指定緊急避難場所(水害)

水害の危険から身を守るために
一時的に避難する場所

アンダーパス

周辺の地面よりも低く、冠水しやすい
道路

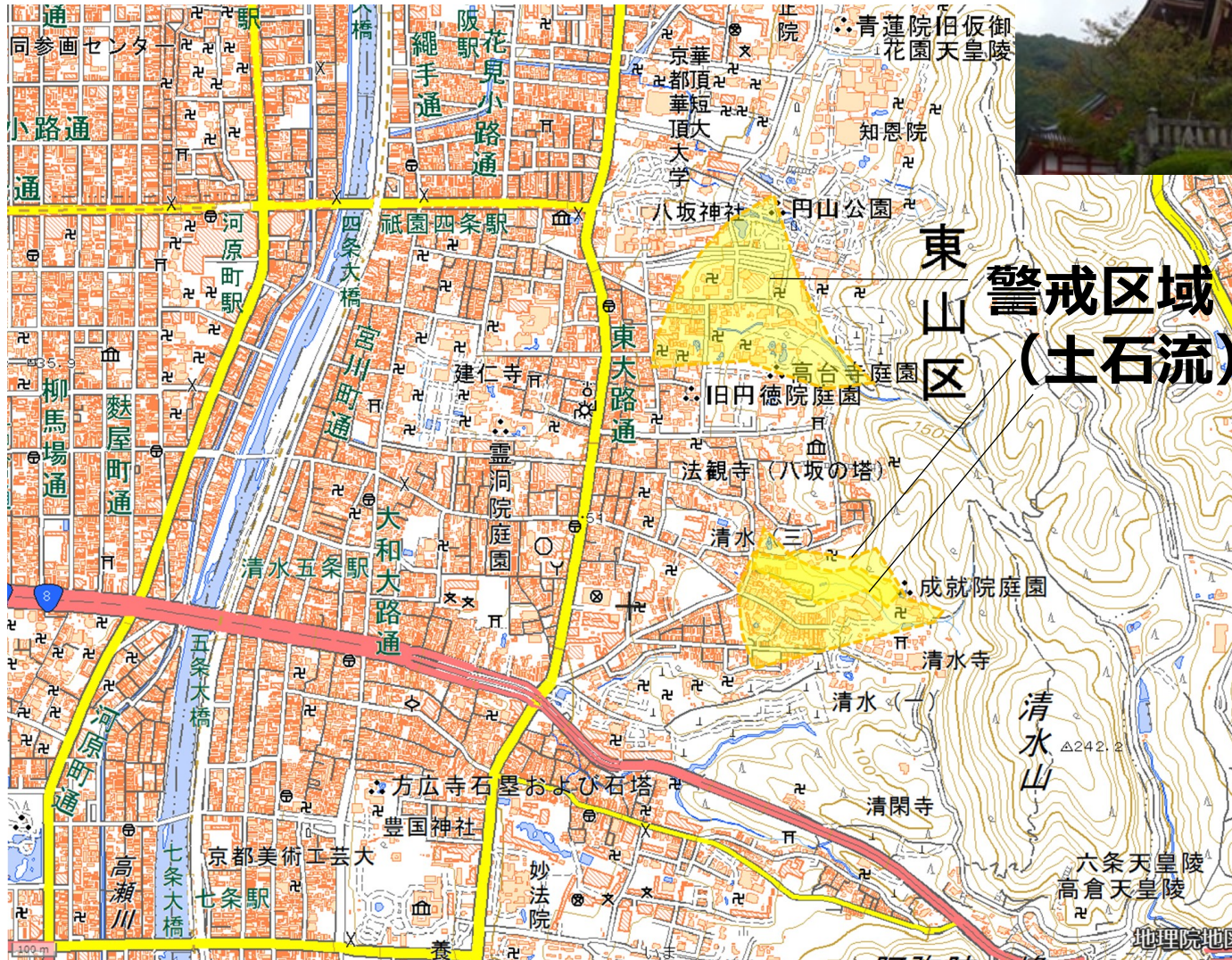


京都市の
ハザードマップ

土砂災害の危険
がない場所も、
川の周辺は氾濫
の危険性が高い

京都市防災ポータルサイト「土砂災害・水害・地震に関するハザードマップ」から、凡例と左京区の一部を拡大
http://www.bousai-kyoto-city.jp/bousai/hazardmap/flow_01.html

京都での土石流の危険性（観光地）



地理院地図
(電子国土Web)
に加筆 (2015/3)

京都での土石流の危険性（観光地）



●●● | 平成24年7月に京都府亀岡市で発生した土石流

- 平成24(2012)年 7月15日未明から朝、京都府では多いところで時間90mmの豪雨、「記録的短時間大雨情報」が出された
- 亀岡市曾我部南条大谷では、人家裏の溪流より土石流が発生して3件の家屋被害（京都府災害警戒本部，2012）
 - 亀岡市では、一時約 1 8 0 人が自主避難
 - 発生したのは警戒区域（土石流）に指定されたエリア







構造物の上流側の堆砂状況



構造物の右岸側、流木も存在

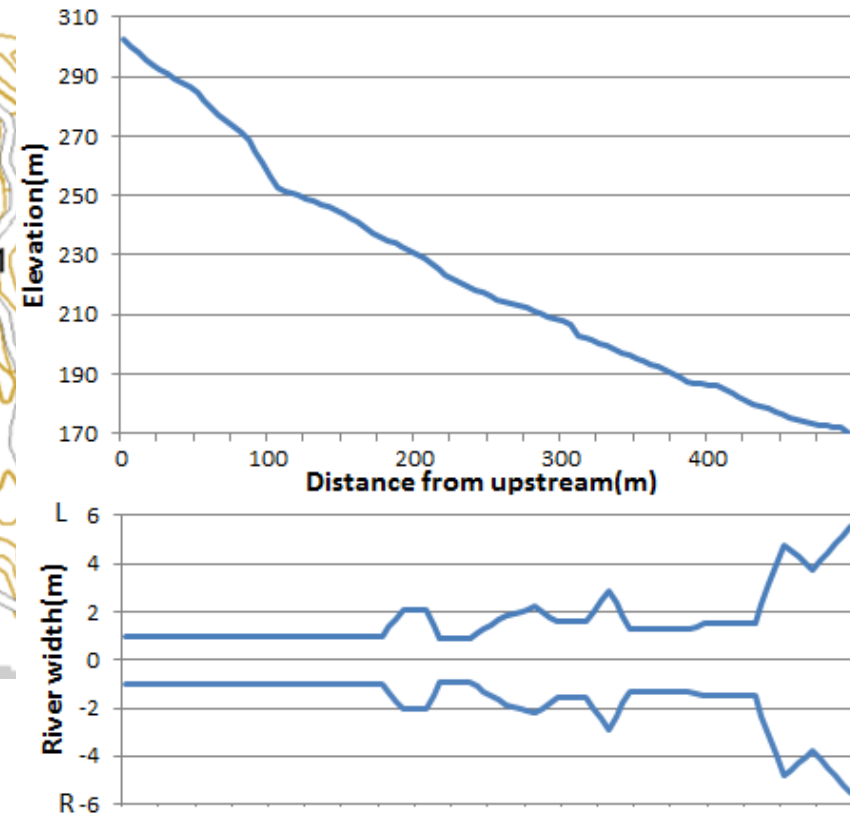
京都府南丹広域振興局農林商工部
森づくり推進室より提供



京都学園大グラウンドまで道路沿いに
土砂・水が流下（調査写真）

●●● | 調査とシミュレーションの実施

- 現地調査 (2012/7/19, 2012/10/17)
 - 川幅, 最大痕跡高 (現河床から流動痕跡の最大までの差) を測量
- シミュレーションの実施



粒径

源頭①付近は数mm程度の細粒が多い

②～④では細粒以外に0.3m程度の礫も存在

⑤～⑦まで0.3m程度の礫は流下

⑧の堆積土砂は最大0.1m程度

最大痕跡高

• 上流, 中下流の川幅の狭い領域：約3m

• 中下流で川幅が大きい領域：2m前後



- : 土石流が発生・流動した溪流
- : 氾濫・堆積領域
- : 土砂災害警戒区域図の砂防基準点
- : 土石流の流下方向



①源頭



②侵食域

災害直後（2012年7月15日）の災害状況



③侵食領域



④侵食領域



⑤ため池の構造物

災害直後（2012年7月15日）の災害状況



⑥土石流の直撃を受けた家屋



⑦被災家屋

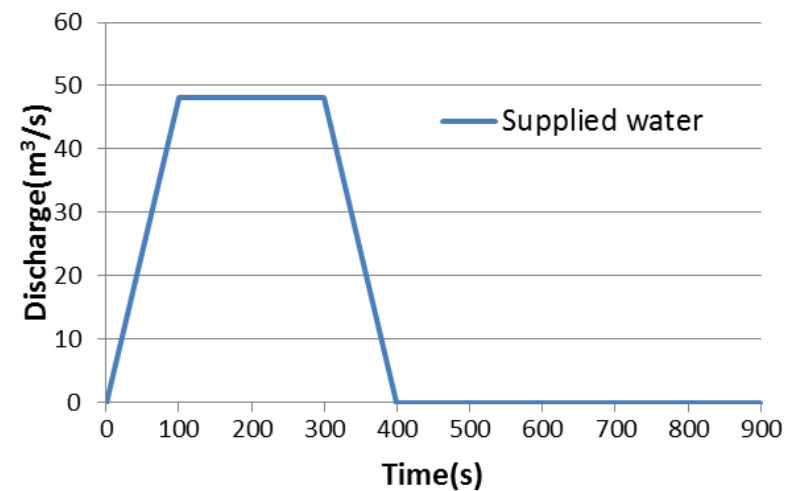


⑧下流の道路の状況

災害直後（2012年7月15日）の災害状況

土石流シミュレーション

- 発表者らが開発した土石流シミュレータKanakano2Dを適用
- 砂防基準点下流のため池を越流後、住宅地へ氾濫・堆積
⇒1次元と2次元領域の境界を砂防基準点に
- 最大時間雨量85mm（2012/7/15,4時）が流域0.17km²に全流出と仮定した水の総量を400秒の台形ハイドログラフで供給
- 土石流は谷を侵食して発生・発達したことが、現地状況より推測
⇒侵食深2mで一次元領域に敷く、代表粒径0.1 m



上流端からの供給ハイドログラフ（水のみ）

計算領域の設定



設定したパラメータ

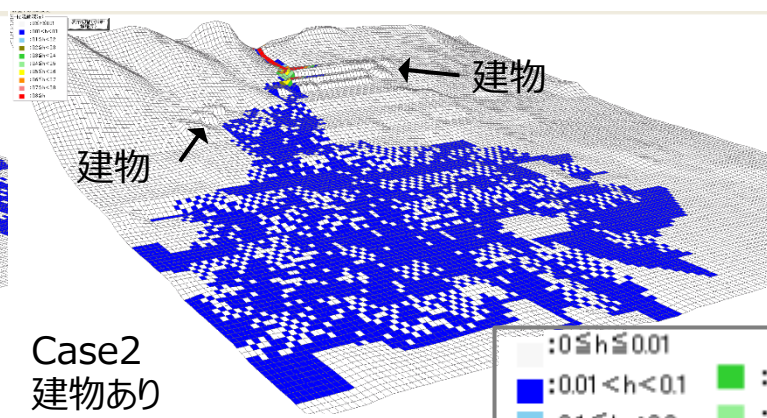
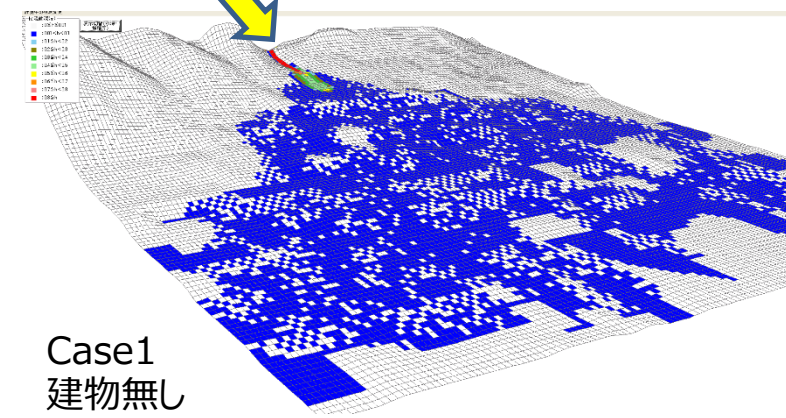
パラメータ	数値
計算時間(秒)	900
計算の時間間隔(秒)	0.01
粒径(m)	0.1
砂礫の密度(kg/m^3) σ	2650
流動層密度(kg/m^3) ρ	1180
河床の容積濃度	0.65
重力加速度(m/s^2)	9.8
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
マンニングの粗度係数($\text{s}/\text{m}^{1/3}$)	0.03
一次元領域の計算点個数	89
一次元領域の計算点間隔 (m)	5
二次元領域の計算点個数	113 × 145
二次元領域の計算点間隔 (m)	5×5

- 地形データは調査時の測量データ、ならびに亀岡市・京都市から提供されたデータを基に作成
- 建物考慮なしと建物考慮あり（2階建て相当で6m上げる）で、検討

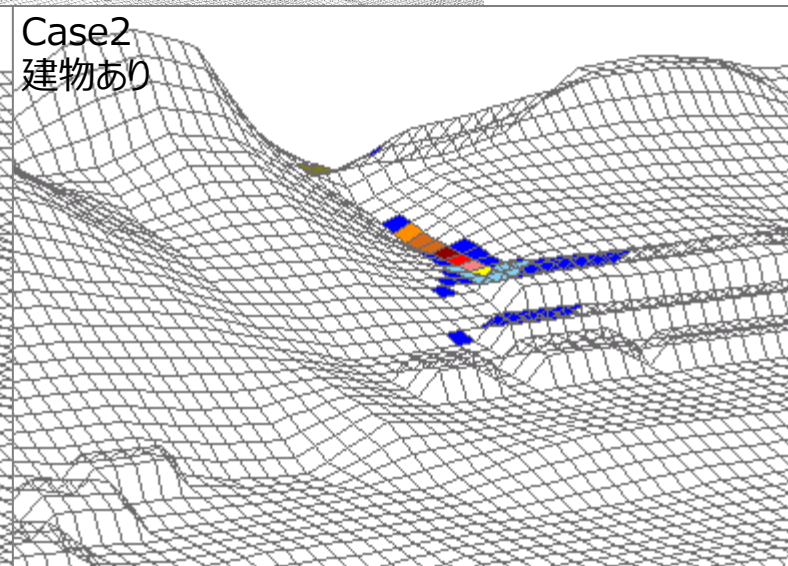
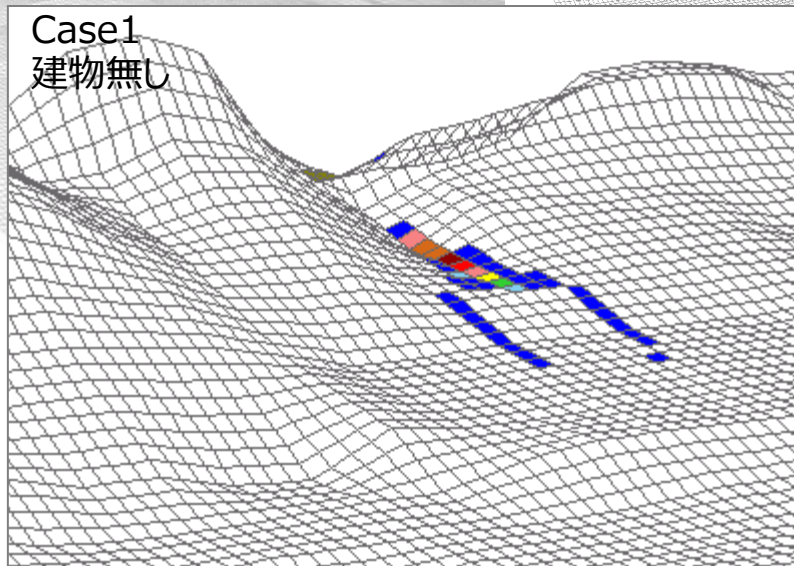
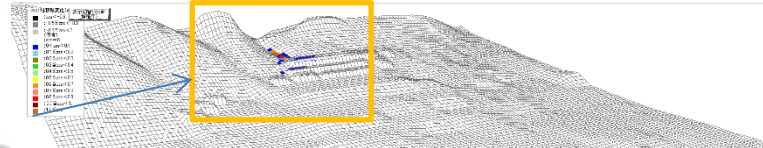
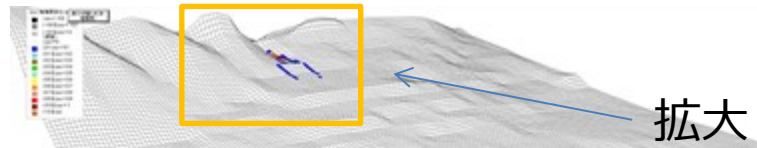
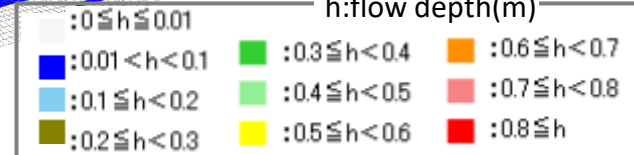
90s

1次元領域からの土石流

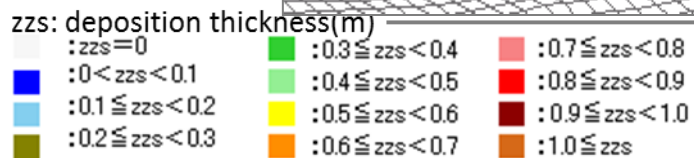
出典：中谷ら、自然災害科学, 33- 1, 2014

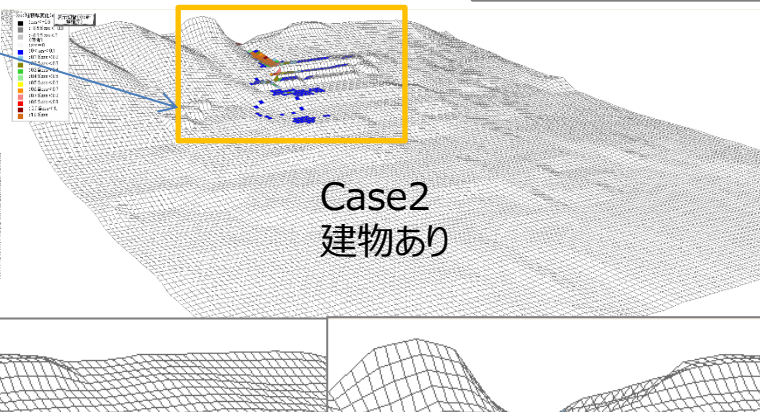
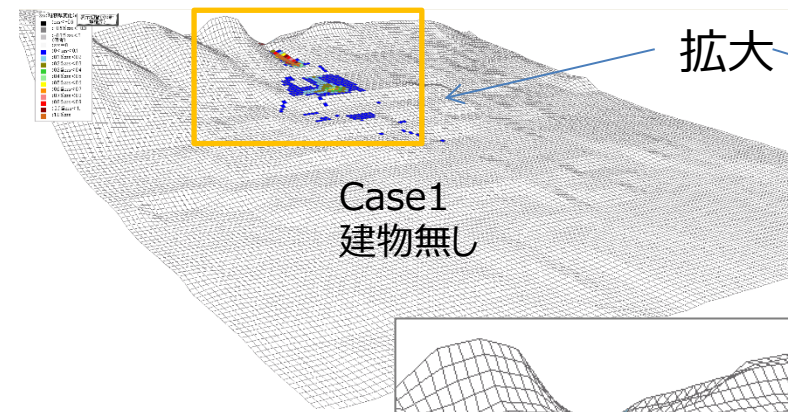
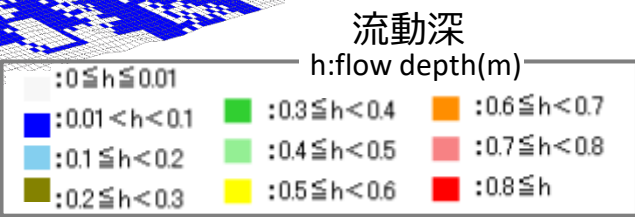
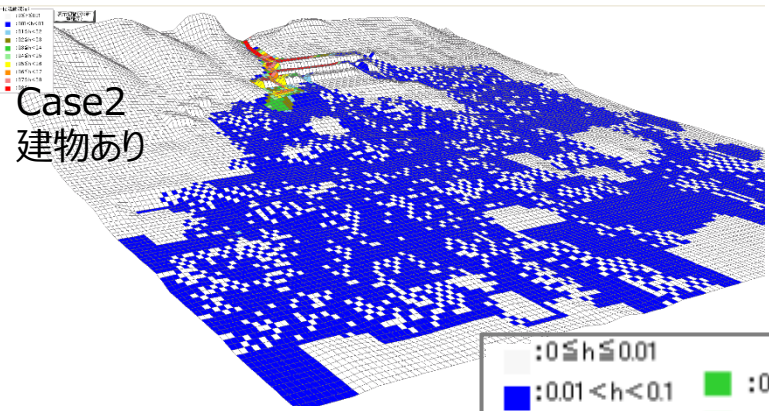
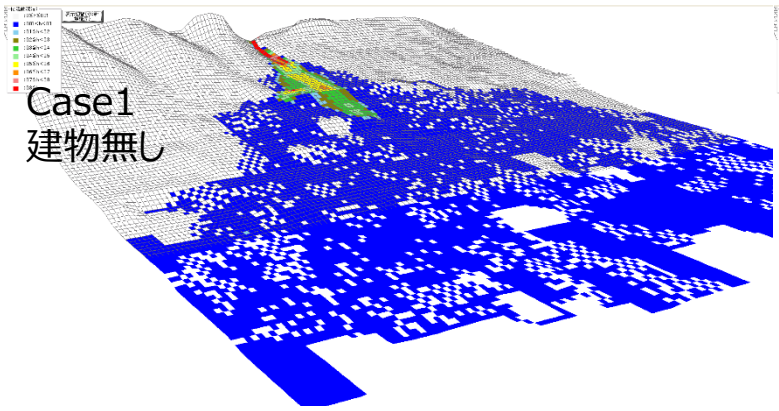


流動深
h: flow depth(m)

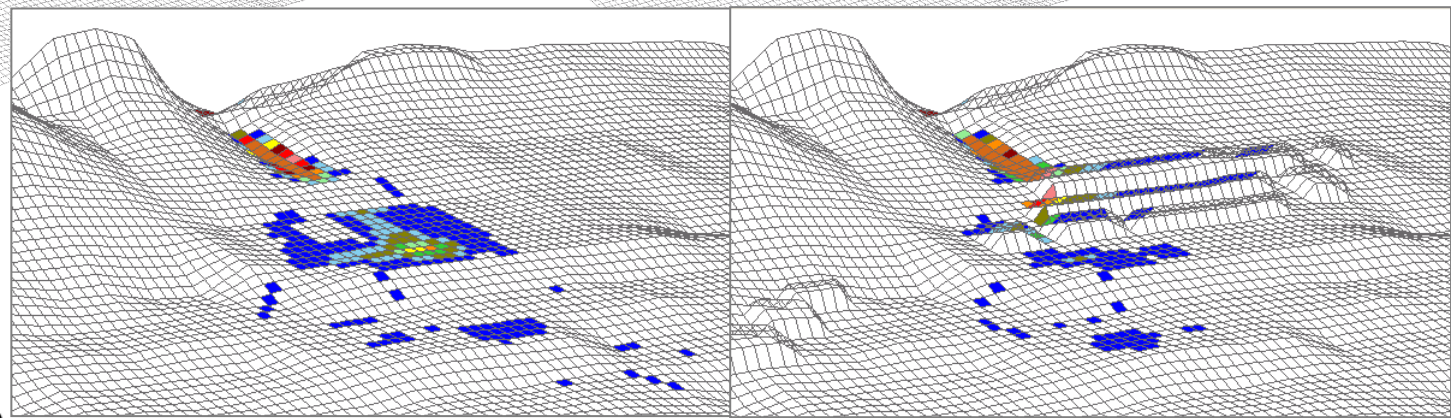


堆積厚

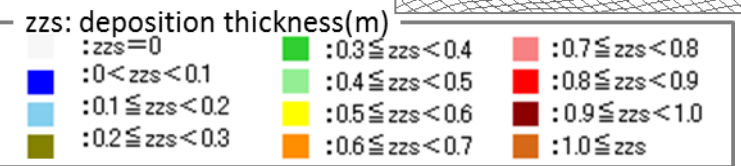




拡大



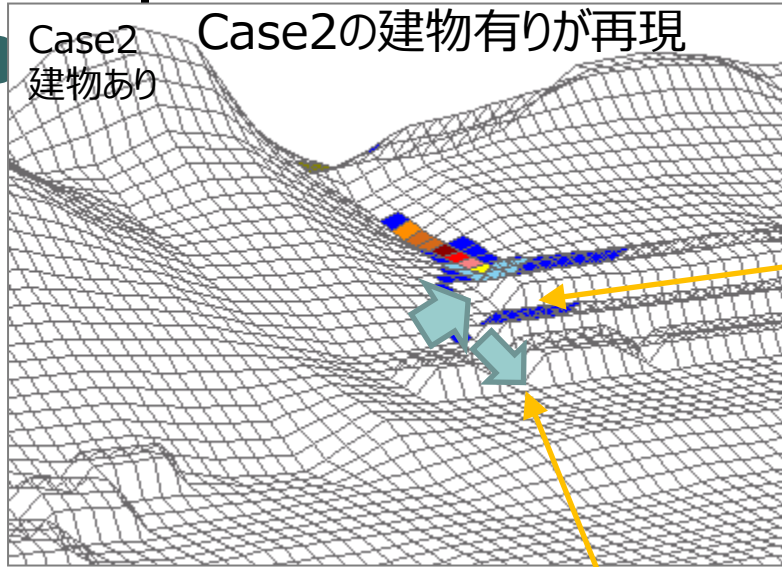
堆積厚



道路上の水・土砂の移動状況は

Case2
建物あり

Case2の建物有りが再現



土石流による具体的な被害状況の検討

【背景と目的】

日本には十数万の土石流危険渓流が存在し、警戒区域内で多くの人が暮らす

膨大な危険区域の中で、対策を施す優先順位は？

【課題】

- 警戒区域は地形や災害履歴、現地調査を基に設定し、**具体的な危険箇所や安全な箇所は示されない**
- 扇状地は**構造物**が多数存在し、**土石流の氾濫・堆積に影響**すると推測されるが、**定量的な検討は殆どない**

警戒区域は全て危ない？
漠然とした情報



指定された警戒区域の一例



土石流シミュレーションを用いて、個別の現象は実験による検証を行い、実地形や災害事例で検証

主なTopics

1. **実験から、土石流が扇状地に到達したときに家屋や塀が存在した場合の氾濫・堆積過程**を検討
2. **京都府・亀岡市と連携して隣接する複数の土石流危険渓流で、シミュレーションにより影響範囲や警戒区域との対応を検証し、土石流の同時多発時の避難場所や道路の安全性**を検討
3. **2014年広島土砂災害の検討-被害状況とシミュレーション-**
4. **異なる地形データや土地利用による土石流危険度分布の把握**

1. 扇状地模型を用いた実験

- 扇状地は多くの集落が立地し、近年も谷出口まで開発が進む
- 山に近いと、土石流が発生すると、氾濫・堆積被害が生じる

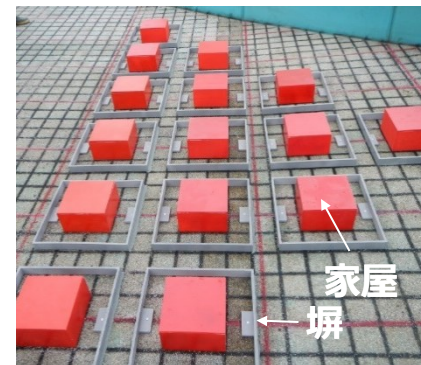
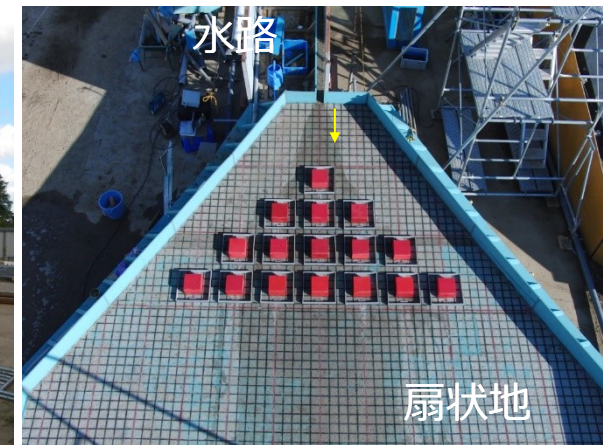
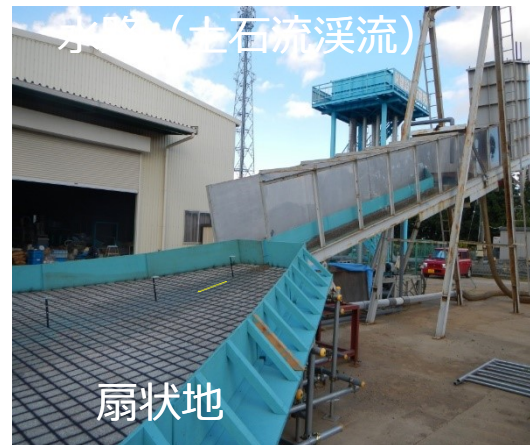
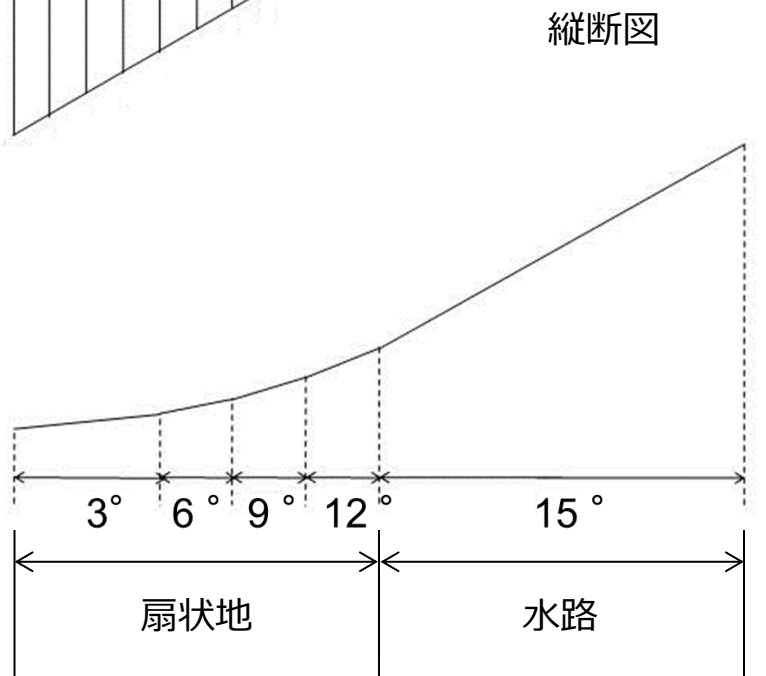
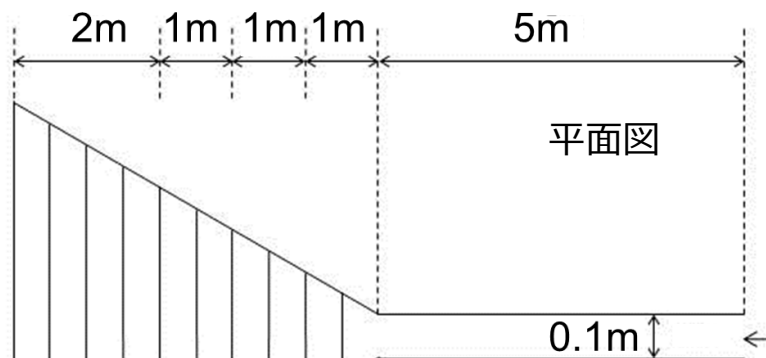


2014年広島土砂災害（株式会社パスコ 撮影）

- 扇状地には家屋、道路等の**人工構造物**が多数存在し、**土石流の氾濫・堆積過程に影響**することが推測
 - 家屋周辺での水位上昇、顕著な土砂堆積
 - 家屋間（道路）の土石流の流動
- **定量的な検討は殆どない**

1. 扇状地模型を用いた実験

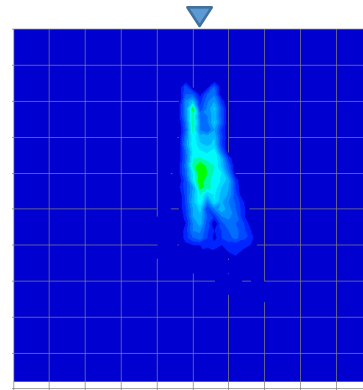
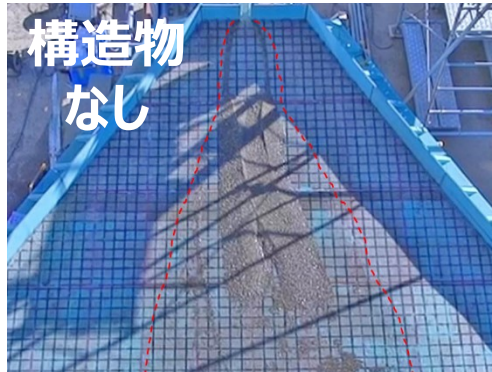
【模型概要】



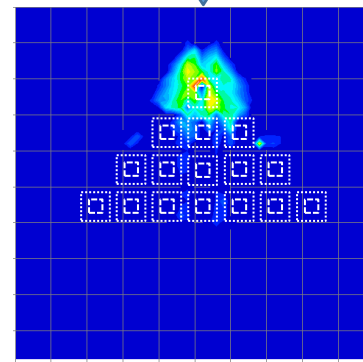
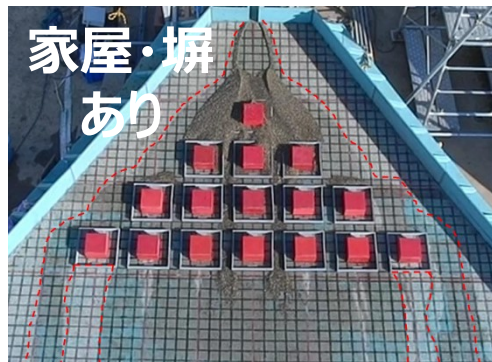
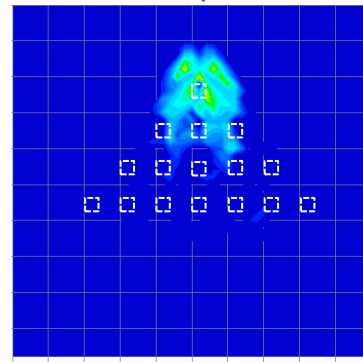
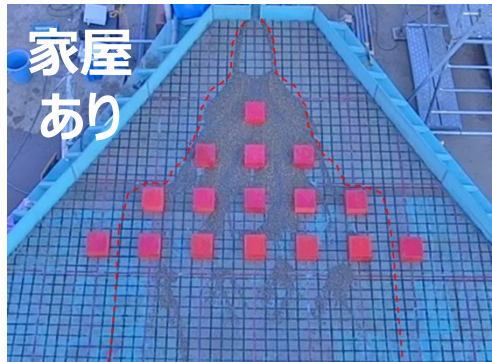
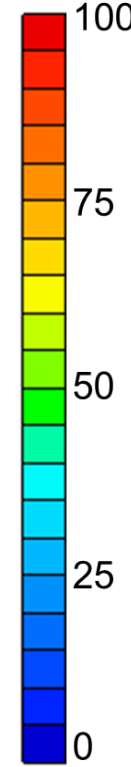
- 上流に土石流溪流を模した直線水路
- 下流に谷に接続する扇状地（住宅地）
- 100年確率程度の規模の土石流シナリオ

1. 扇状地模型を用いた実験

【結果】



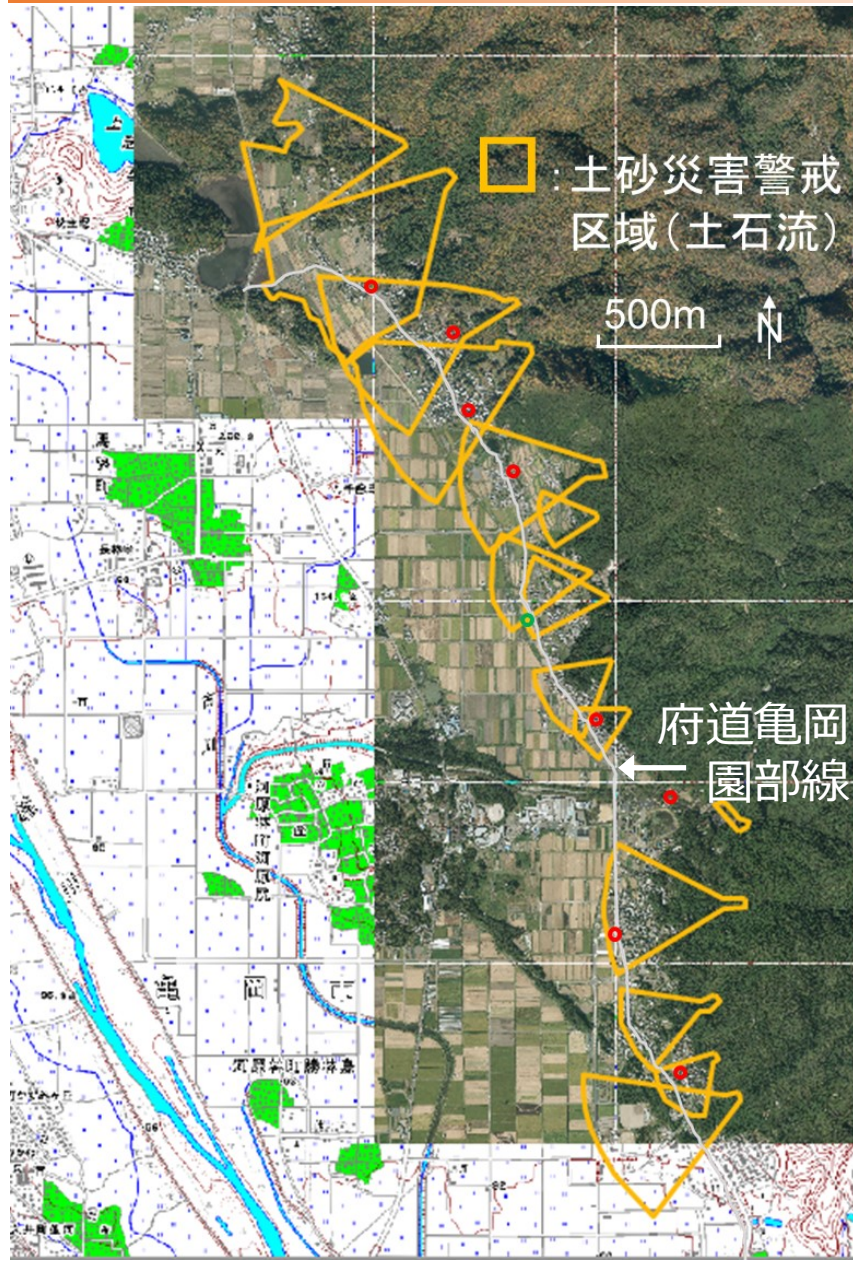
堆積厚
(mm)



- 構造物に流れが阻害されて横断方向に水・土砂が広がる
→到達範囲が異なる
- 家屋や堀の間の道路を伝って、早い時刻に到達する地点も
→元地形とは異なる流動・堆積経路の発生
- 家屋や堀の上流側で水位上昇や顕著な堆積
→堆積が進むと上流にも影響
- 家屋・堀の下流側で氾濫・堆積が少なくなる
→上下流で、家屋の危険性が異なる

--- : 氾濫範囲、白点線は家屋・堀

2. 府・市と連携した土石流の影響範囲の検討



対象

- 京都府亀岡市千歳町
- 15の土石流危険渓流が存在
- 府道亀岡園部線が（災害時の避難経路）南北に縦断

シミュレーションで検証する項目

- 警戒区域との対応
 - **全区域が危険なのか？**
- 避難場所、経路の安全性？
 - 指定避難所○1箇所、一時避難施設等○9箇所（以降shelter）が、警戒区域内や周辺に存在
 - **具体的な危険・安全箇所の把握、ソフト対策の検討**



指定避難所



一時避難施設・避難場所

2. 府・市と連携した土石流の影響範囲の検討

- 日本には十数万の土石流危険渓流が存在し、危険渓流が隣接する地域も多い
- 局所的に発生する豪雨で**隣接渓流からほぼ同時刻**に土石流が多発
 - 2014年8月の広島土砂災害でも確認



2014年8月に広島県で発生した土砂災害（株式会社パスコ 撮影）

土石流シミュレーション

- 発表者らが開発したHyper KANAKOシステムを適用
- GISと連携、LPデータや国土地理院の数値標高データが利用可能
 - 抵抗や侵食堆積は高橋モデルを採用

支配方程式（一次元）

運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho h}$$

全体の保存則

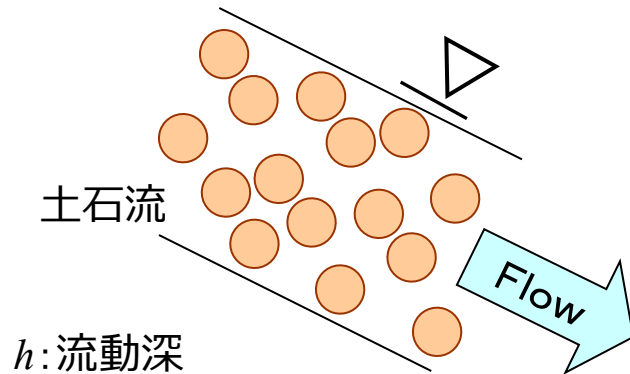
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = i$$

流れ中の土砂の保存則

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} = iC_*$$

河床の連続式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0$$



h : 流動深

u : 流速

g : 重力加速度

z : 河床高

$$H = h + z$$

C : 流動層濃度

t : 時間

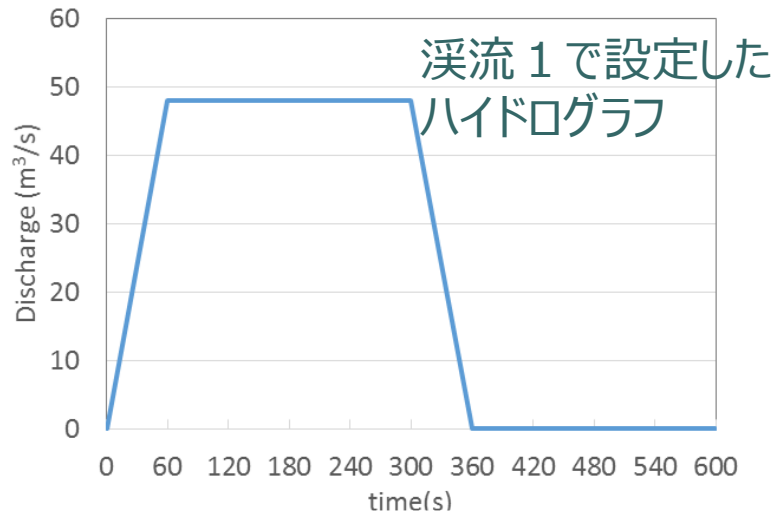
C_* : 河床堆積物の体積濃度

ρ : 土石流（流体相）の密度

i : 侵食・堆積速度

τ : 河床面せん断力

計算条件



- 2012年亀岡市南条の土石流を水・土砂の設定の参考に
- 地形データは国土地理院の公開する10mメッシュを採用

土石流の発生

- 供給ハイドログラフ（水）で河床が侵食し、土石流が発生・発達するシナリオを想定
- 100年確率 1 時間降雨から、各流域面積に流出率0.7で仮定した総流量を360秒で供給

土砂の条件

- 谷部（一次元領域）に移動可能土砂を2m厚、河道幅10m、粒径10cmで設定

家屋の条件

- 元地形と、家屋位置の地盤高6m上げた2つのケースを検討

砂防施設

- ✕ 本検討では考慮せず

パラメータ	数値
計算時間(秒)	600
計算の時間間隔(秒)	0.01
砂礫密度(kg/m³) σ	2650
流体相密度(kg/m³) ρ	1000
粒径(m)	0.1
河床の容積濃度	0.65
重力加速度(m/s²)	9.8
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
マニングの粗度係(s/m ^{1/3})	0.03
一次元領域の計算点間隔(m)	5
二次元領域の計算点間隔(m×m)	5×5



- 家屋は地盤高を補正（壊れない頑丈な建物）
→実験との比較から、妥当性を確認済
- 家屋の有無で範囲が異なる結果もあるが（4,5,12など）、
両者とも区域内
→家屋無しの方が下流まで到達
→有りは家屋から広がり、下流まで移動するものは少ない
⇒扇状地実験と対応

以降、
Case2家屋考慮を対象

家屋考慮Case2

出典：中谷ら、自然災害科学, 35 - 特別, 2016

府道、避難場所への到達時刻（単位：秒）

- ・ 流動深は10cm以上
- ・ 出力間隔10秒単位

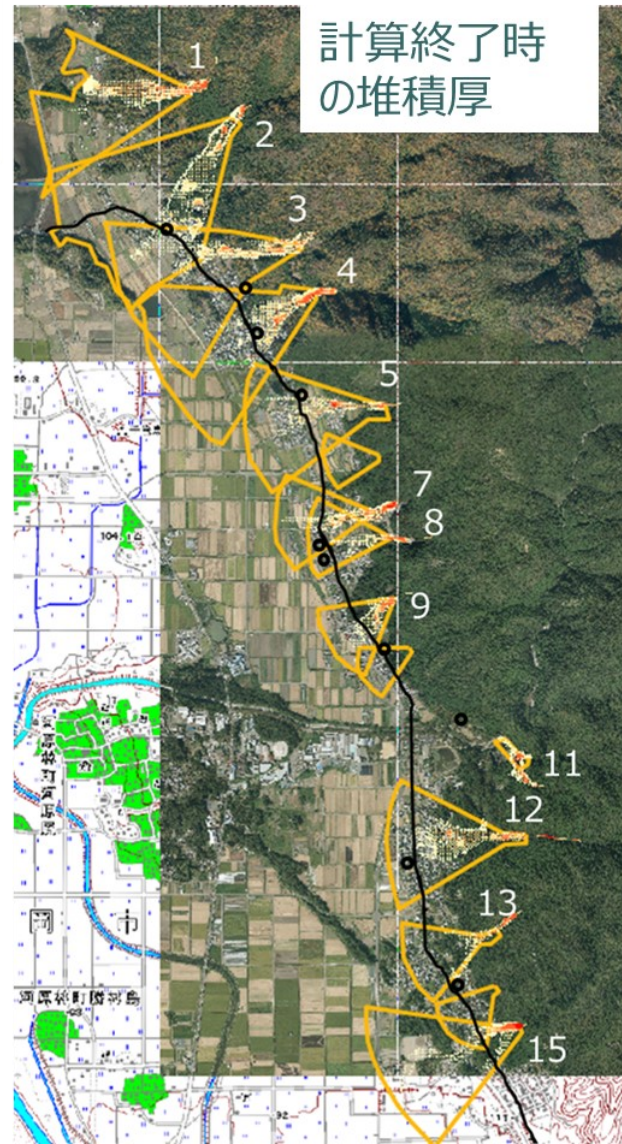
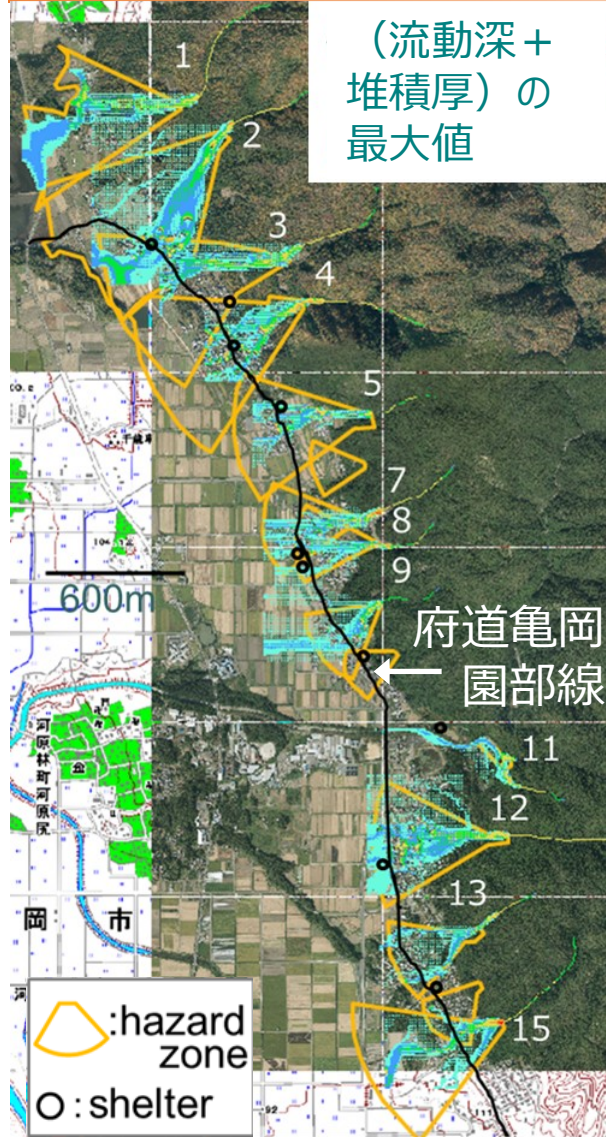
府道

溪流	流動深	堆積厚
1	180	190
2	290	300
3	220	290
4	210	280
5	170	250
7	200	260
8	190	-
9	240	290
11	600	-
12	260	470
13	240	-
15	180	180

避難場所	家屋考慮		溪流	備考
	流動深	堆積厚		
小口区会議所	300	300	2	
出雲台区集会所	-	-	3,4	
出雲公民館	-	-	4	横の道路を流下
北谷区生涯学習	170	230	5	
中村営農集会所	-	-	7,8	
千歳町自治会館	-	-	7,8	
江島里公民館	-	-	9	
七谷川野外活動	-	-	11	横の溪流を流下
国分公民館	290	-	12	
毘沙門区生涯学習	-	-	13,15	

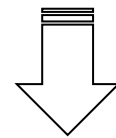
- 道路に土石流は全て到達⇒避難経路には難しい
 - 堆積は起こらないケースも
 - 土石流のみを対象とするが、豪雨時は冠水も想定される
 - 土石流が到達する避難場所が存在⇒場所の見直しが必要
 - 到達する場合（流動深＋堆積厚）の最大値50cm以下
 - 近くの道路・流路を流れるケースも⇒避難経路をどうするか
- 到達せず

計算結果1-15：家屋考慮Case2



【結果】影響範囲、対策

- 警戒区域内でも危険度にばらつき
→区域内で相対的に危険・安全な場所が存在
- 府道は避難経路には適さず、一部の避難場所には水・土砂が到達



垂直避難、安全な近所の建物への避難、避難に適さない道路が検討できた

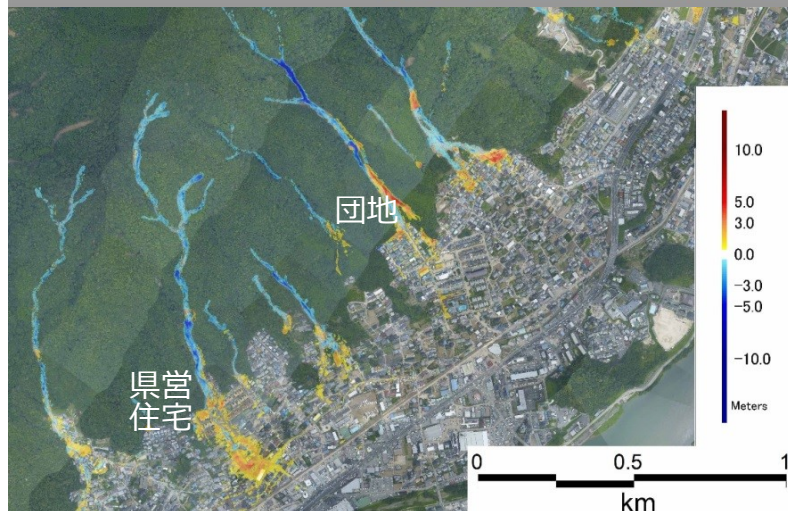
3. 2014年広島土砂災害の検討

出典：中谷ら、砂防学会誌, 69-5, 2017

- ・ 広島市安佐南区八の阿武里団地、県営緑丘住宅（県営住宅）、を対象
- ・ 開発した土石流シミュレータ**Hyper KANAKO**で実施



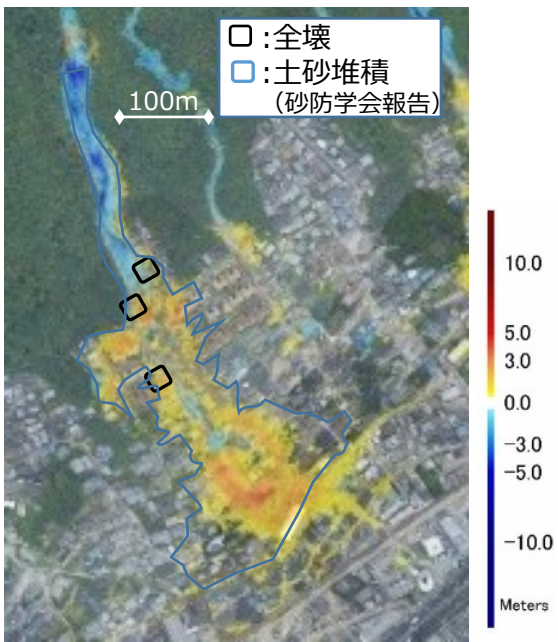
阿武里団地 谷出口から上流を望む



阿武里団地 谷出口から下流の住宅地を望む

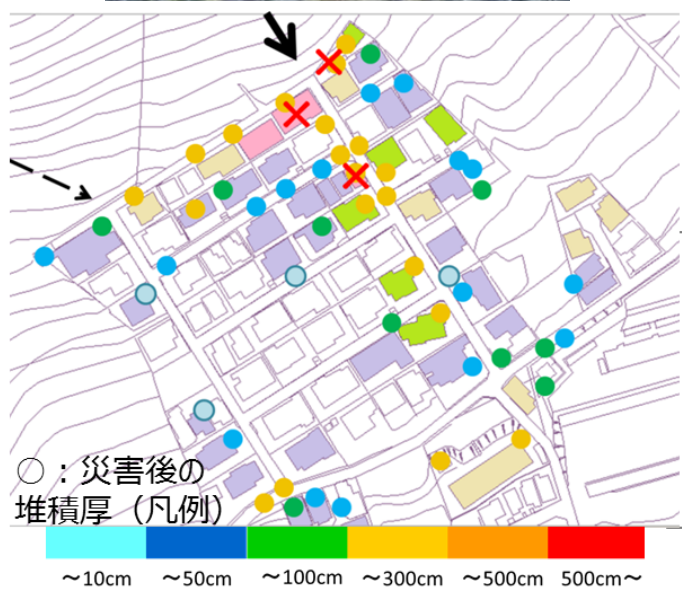
太田川河川事務所提供資料
被災後のLPデータと平成21年LPデータとの差分図
(青系統は侵食、黄赤系統は堆積が卓越)

対象地と被害状況



県営住宅

災害前後のLP差分図
(太田川河川事務所、
(公社) 砂防学会2014 年
広島土砂災害に関する緊急
調査報告会講演概要集より
引用) に加筆



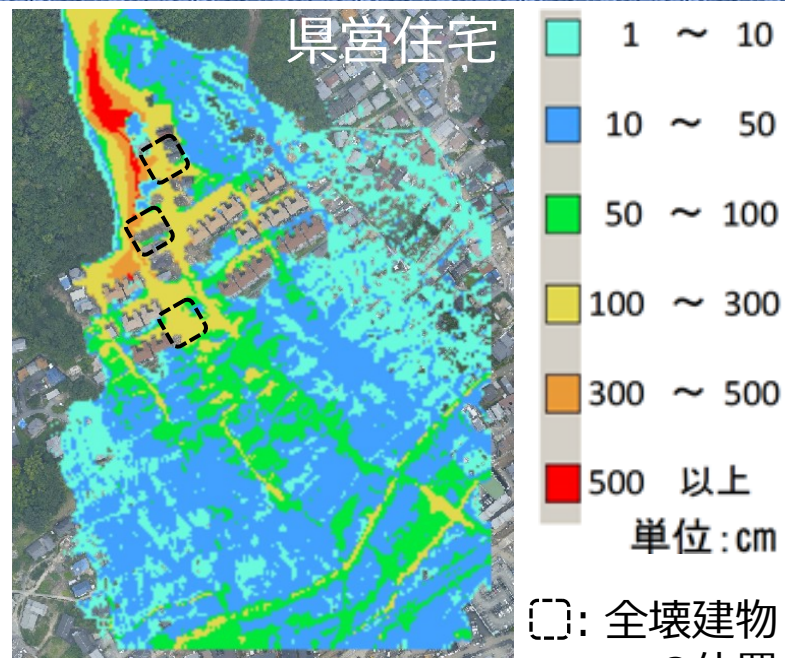
阿武里団地

中谷ら、砂防学会誌,
Vol.69, No.6, 2017

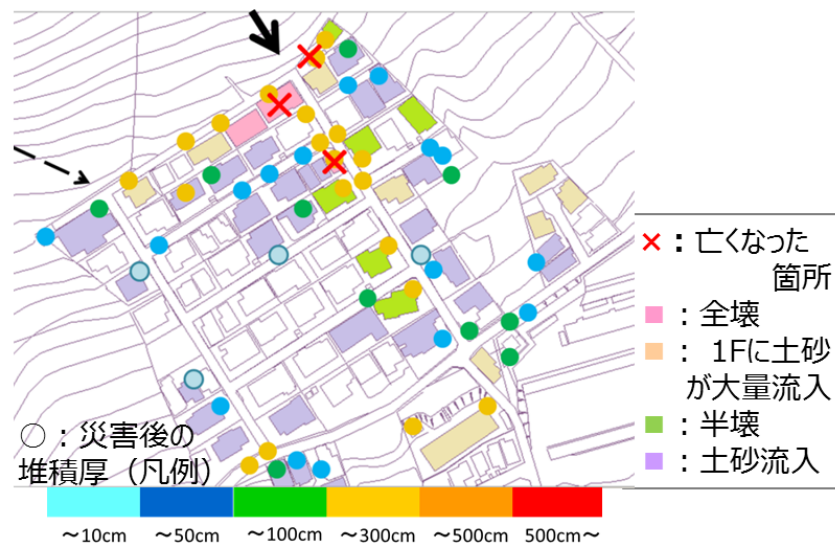
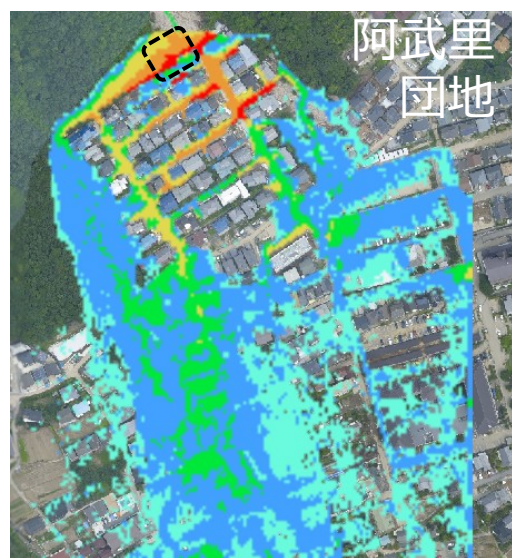
撮影：株式会社パスコ

計算結果 痕跡 (流動深+堆積厚)の最大値

中谷ら、砂防学会誌,
69-6, 2017



- 家屋の存在で局所的な堆積、水位上昇により大きな痕跡が発生
- 実災害の被害の大きい箇所と対応



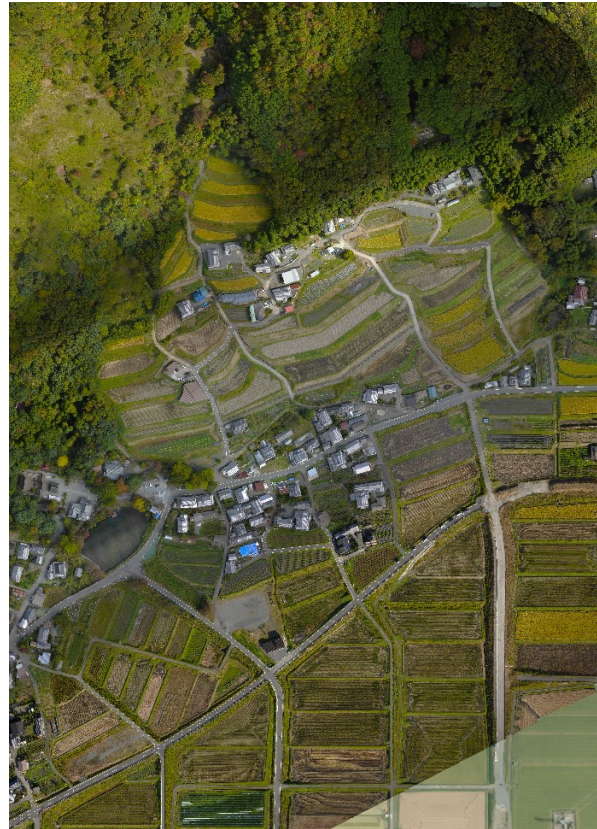
背景: 災害後オルソ

4. 異なる地形データや土地利用による土石流 危険度分布の把握



「住宅地」

- ・谷出口から直線的に延びる道路とそれに直行する道路が多く存在
- ・建物は道路沿いに整然と配置
- ・建物密度が高い



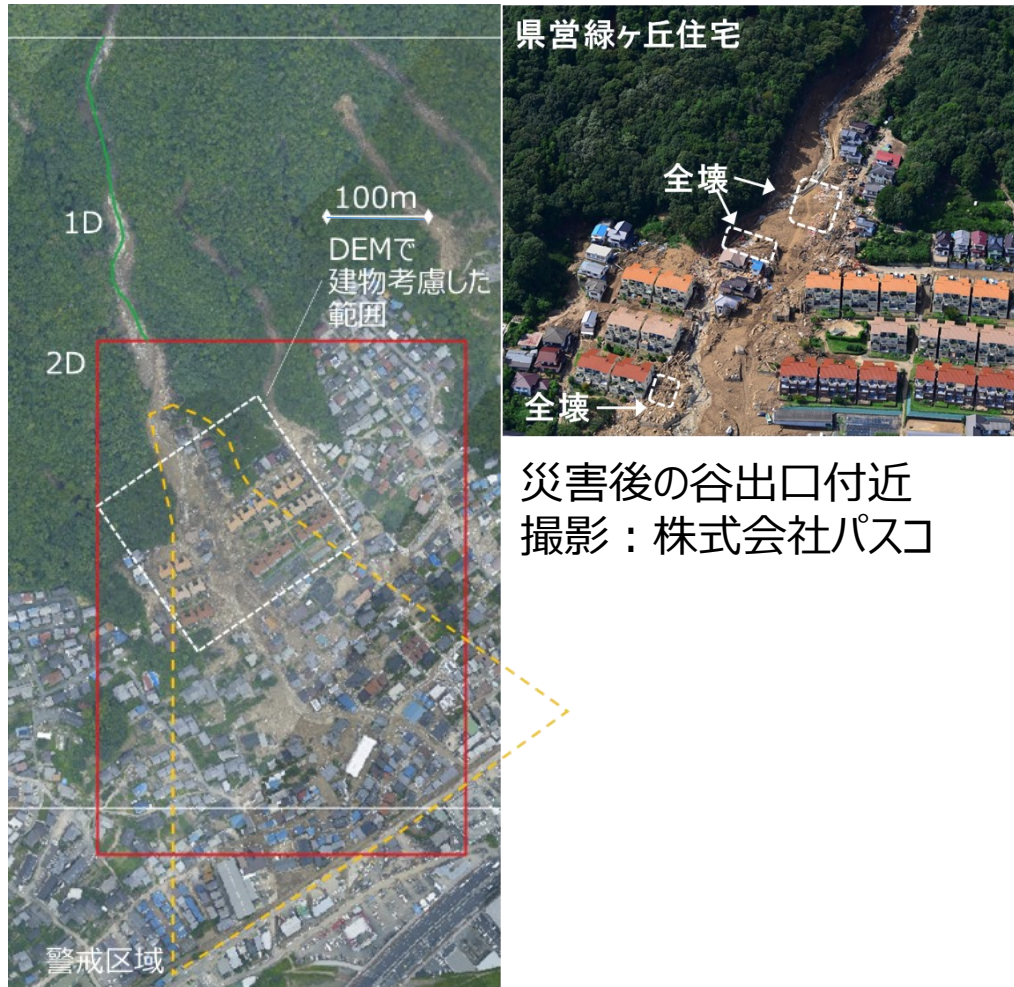
「農地」

- ・農業活動のための田畑や流路が配置
- ・その周辺に建物や道路が整備
- ・建物密度が疎で道路も直線的でない

4. 異なる地形データや土地利用による土石流危険度分布の把握

(2014年8月広島土砂災害)

広島市安佐南区 県営緑ヶ丘住宅



県営緑ヶ丘住宅

全壊

災害後の谷出口付近
撮影：株式会社パスコ

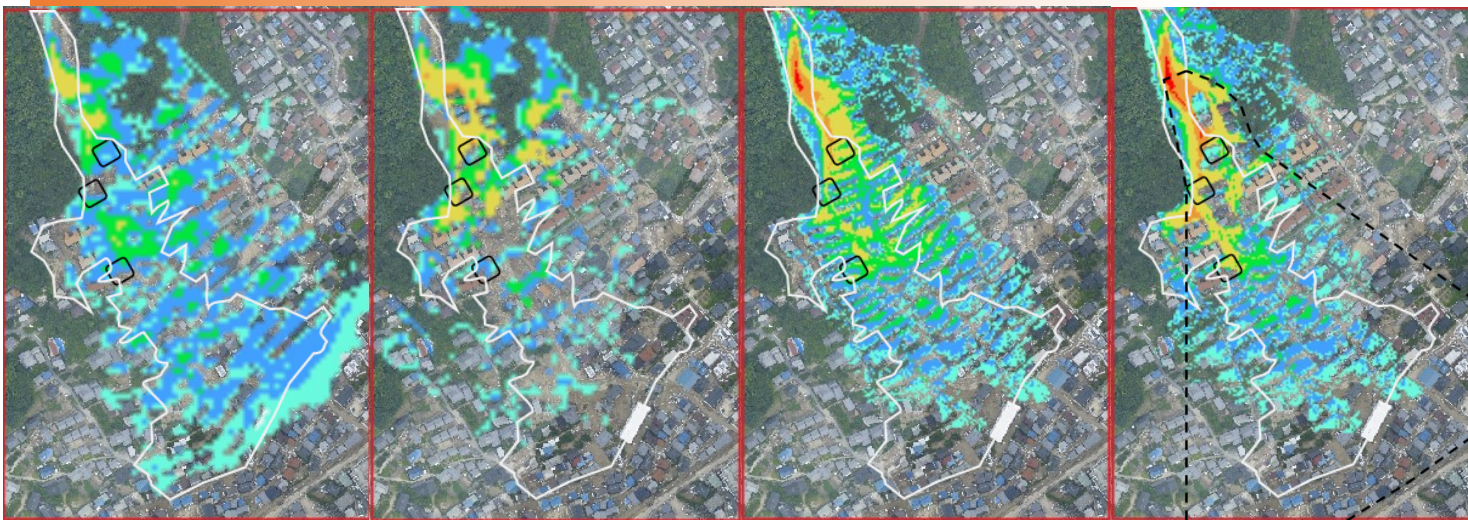
計算Caseと地形data (2D領域)

	基data	建物考慮
Case1	GSI DEM	なし
Case2	GSI DEM	2014.7.1情報から 建物を6m (2階建 て相当) 地盤高 から上げる処理
Case3	LiDAR DEM	なし
Case4	LiDAR DEM	図中に示す点線の 範囲中の建物を手 動で6m上げる処理

1D領域は共通でDEMを使用、計算点間隔5m

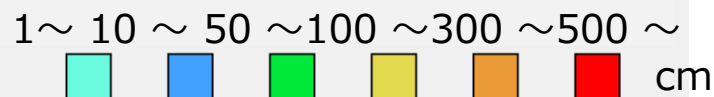
DEM、ortho画像 (災害後) は太田川河川事務所より提供

計算結果 (2014年広島土砂災害、県営住宅)

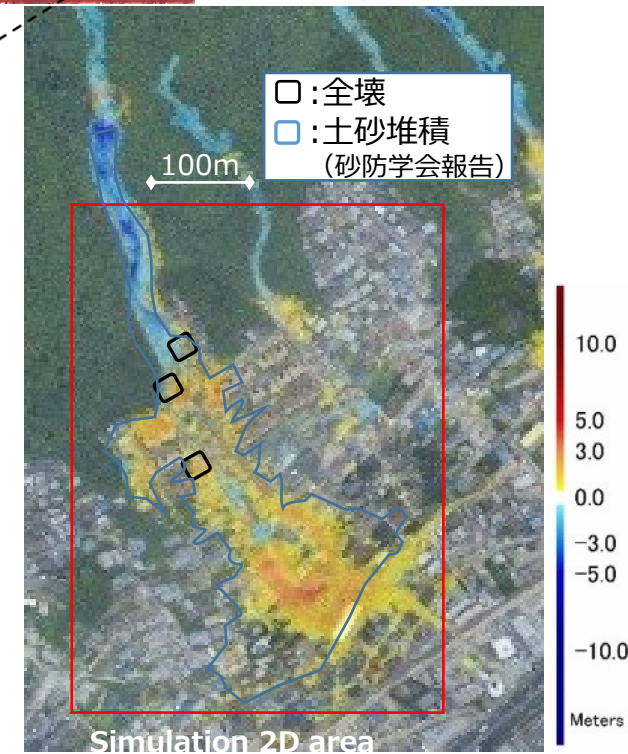


Case1 Case2 Case3 Case4

計算終了時の堆積厚
背景：災害後ortho



- 被害想定範囲の外縁の把握や、谷出口で危険度が高い場所の検討は、いずれのケースでもある程度可能
- LiDAR DEMのCase3-4では、局所的に危険度が高い箇所の抽出や、避難場所や経路の選定に必要な高い空間解像度での流下経路の表現が可能



4. 異なる地形データや土地利用による土石流危険度分布の把握

(農地を対象とした検討)

京都府亀岡市の土石流危険渓流



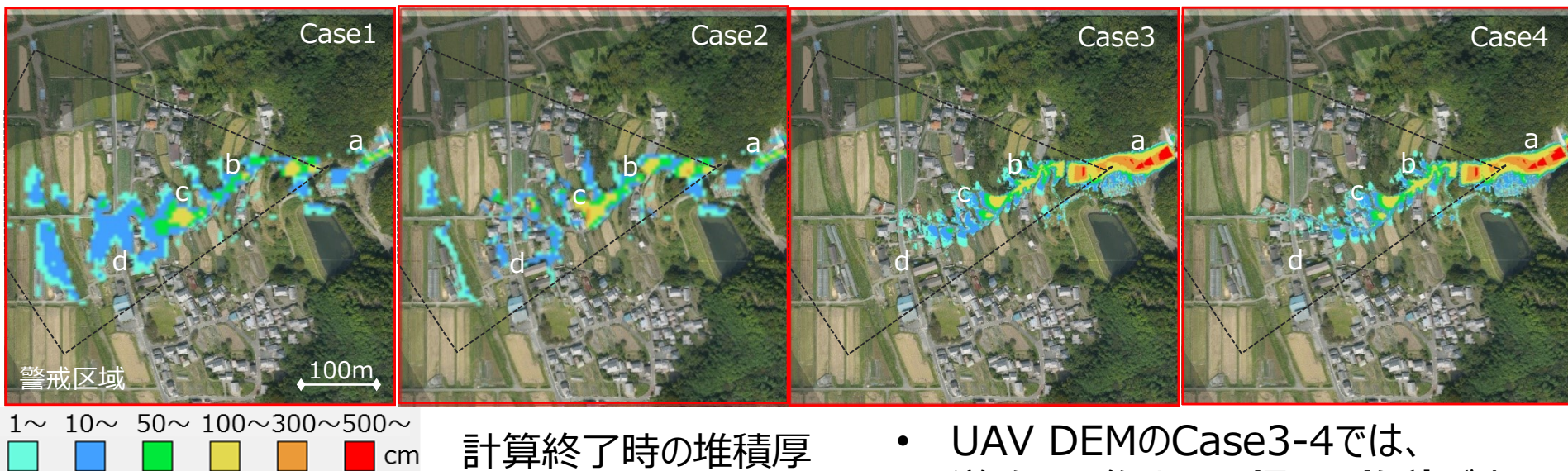
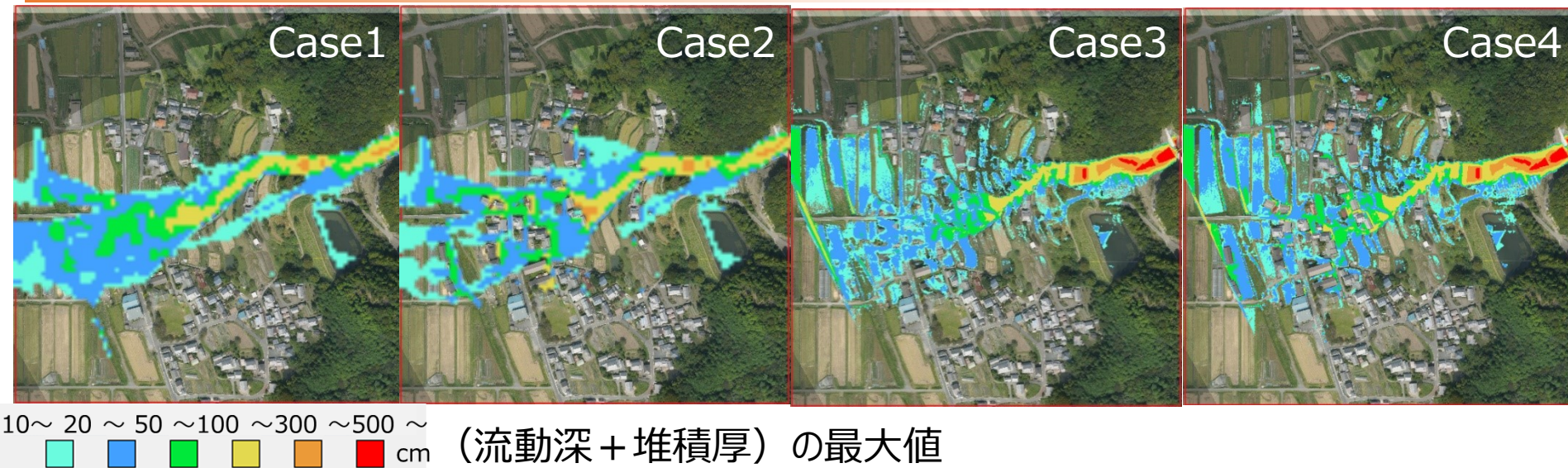
背景画像の一部は地理院タイル
(GSI) を使用

UAV DEM、DSM (0.5m mesh) 、
ortho画像 (二次元領域) は
独自にUAVで2017年10月に取得

	基data	建物考慮
Case1	GSI DEM	なし
Case2	GSI DEM	2019年公開の 最新版情報から 建物を2階建て 相当6m上げる 処理
Case3	UAV DEM	なし
Case4	UAV DEM	建物の位置、 高さをDSMで 取得し反映

1D領域は共通でGSI DEMを使用、
計算点間隔5m

計算結果（京都府亀岡市の土石流危険渓流）



- UAV DEMのCase3-4では、道路への集中、**田畑への堆積**が表現
- 高い空間解像度での挙動が示せる

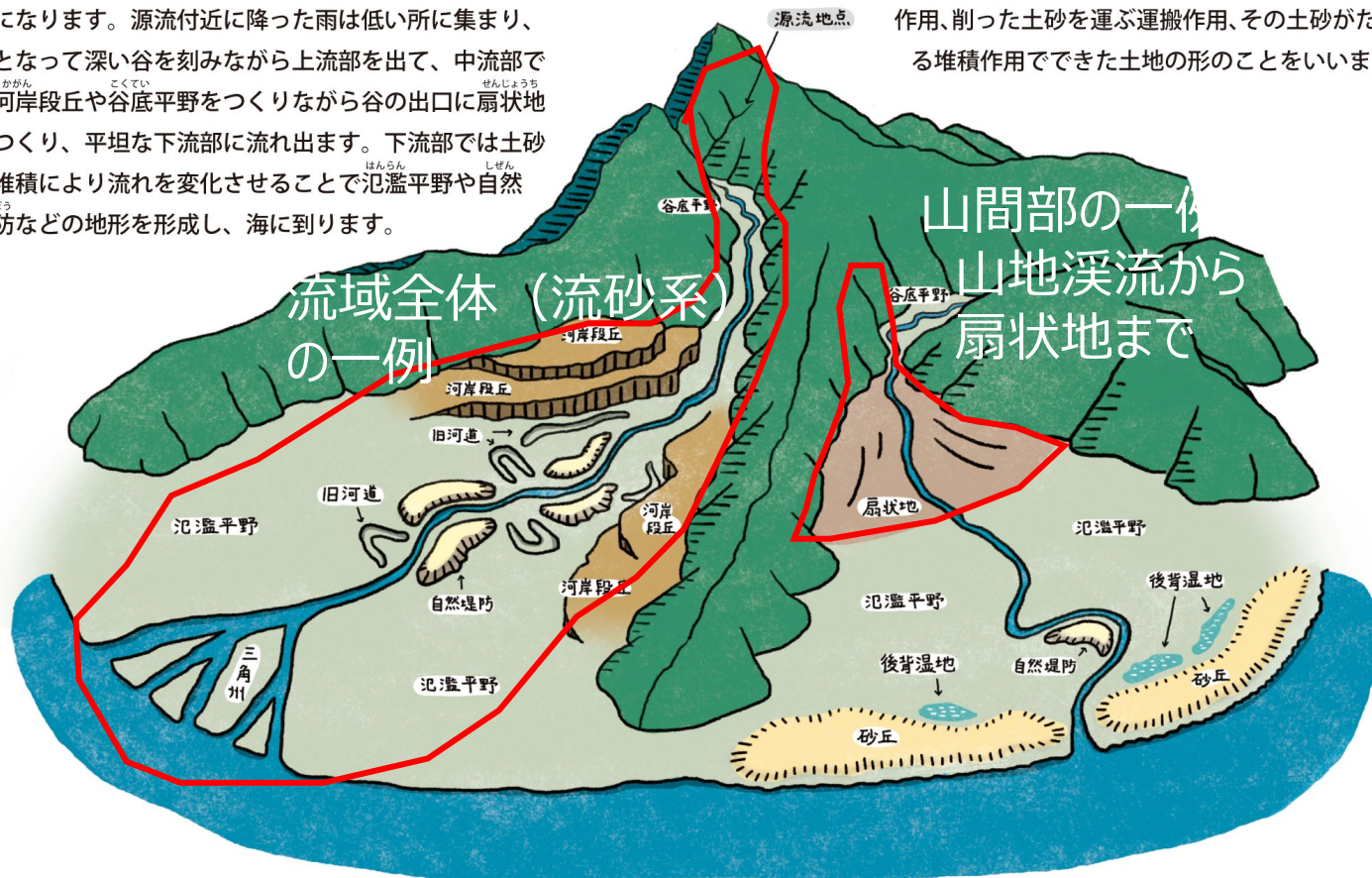
山間部から河川、河口までの流域（流砂系）

川の地形とは

1-1

川の地形を源流から河口までを眺めて見ると下の図のようになります。源流付近に降った雨は低い所に集まり、川となって深い谷を刻みながら上流部を出て、中流部では河岸段丘や谷底平野をつくりながら谷の出口に扇状地をつくり、平坦な下流部に流れ出ます。下流部では土砂の堆積により流れを変化させることで氾濫平野や自然堤防などの地形を形成し、海に到ります。

本書に示す「川の地形」とは、川の水が山を削る侵食作用、削った土砂を運ぶ運搬作用、その土砂がたまる堆積作用でできた土地の形のことをいいます。



流域全体の広域に影響する土砂災害
⇒土砂・洪水氾濫

出典：国土地理院 川の地形とは（参照2024/4/2）
https://www.gsi.go.jp/CHIRIKYOUIKU/kawa_1-1.html

土砂・洪水氾濫



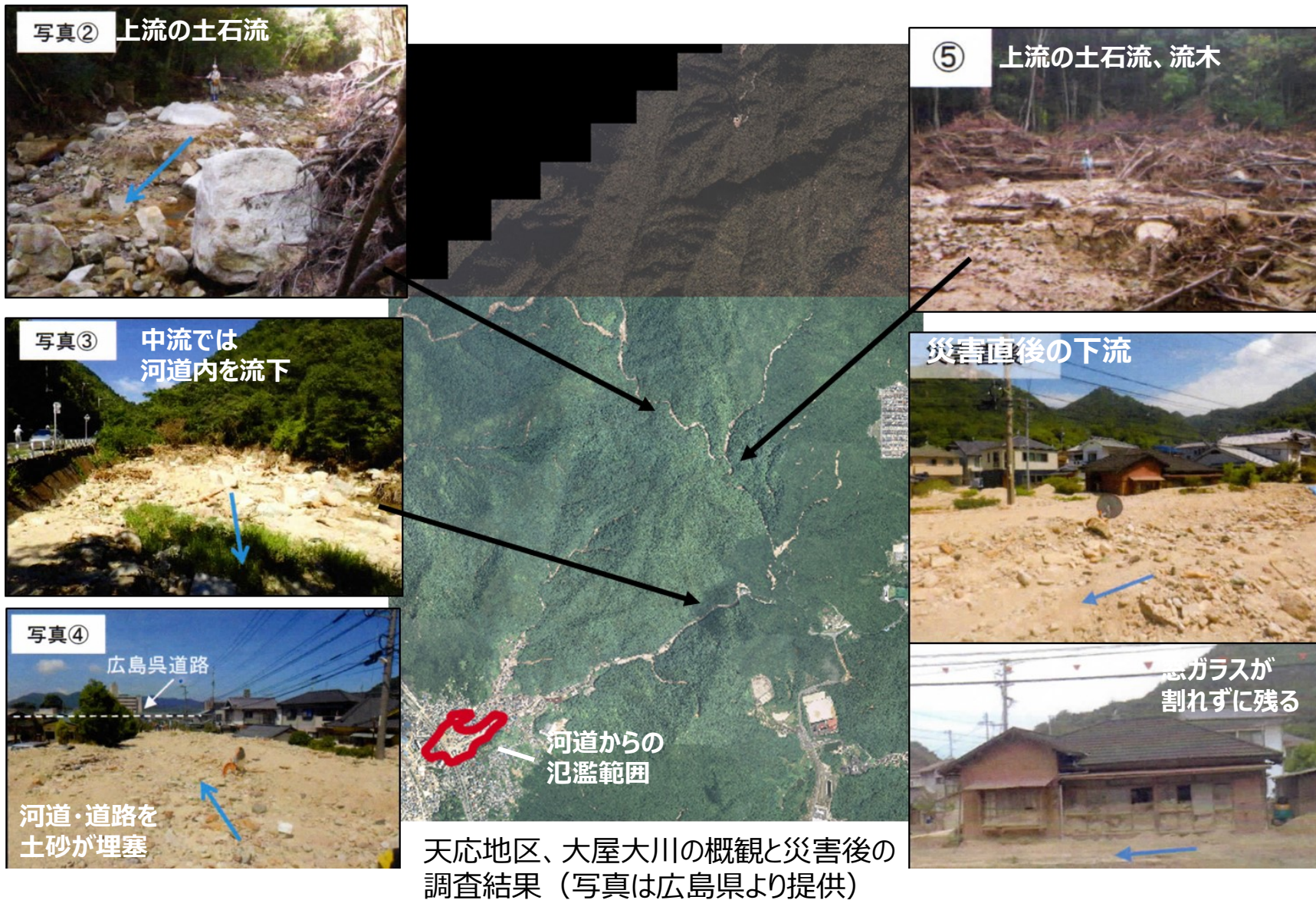
土砂撤去後



- 2018年7月広島県呉市天応地区で発生
- 累加雨量が非常に多く、長時間（十数～数十時間）土砂を含んだ緩やかな流れが居住エリアに流入し、最大2m 厚で堆積
→ **土砂・洪水氾濫**と定義
- 窓ガラスが割れていない埋没建物があり、**土石流の激しい流れ**（数～数十分、木造家屋に直撃すれば全壊）とは異なる

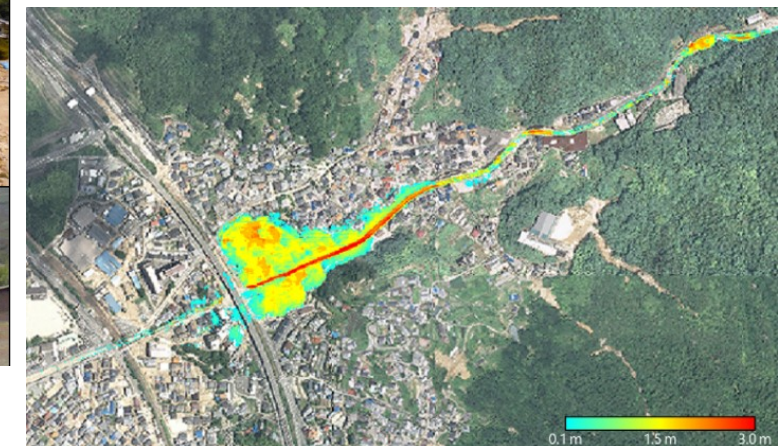
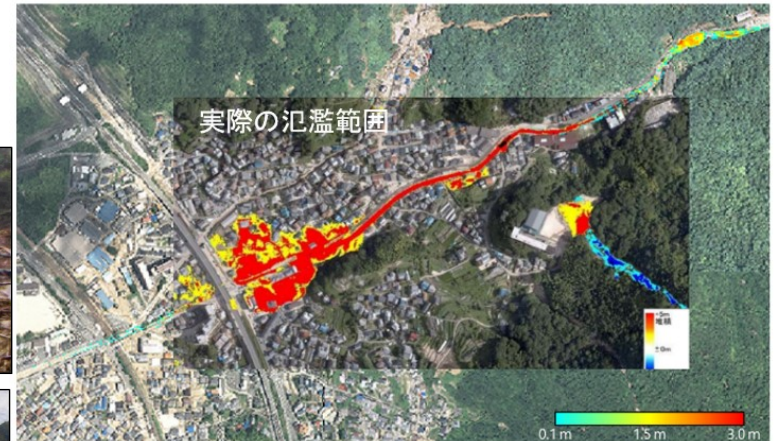
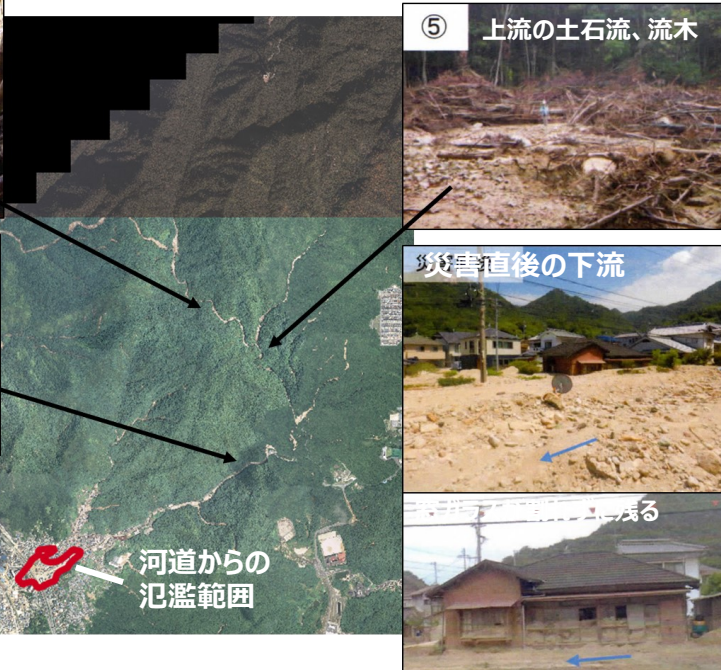
土砂・洪水氾濫

- 2018年広島県呉市天応の土砂・洪水氾濫を現地調査



天応地区の土砂・洪水氾濫シミュレーション

- 上流のハイドログラフ設定が、土砂・洪水氾濫に影響することを明らかにした
 - 今後、観測による時間・空間データの把握と検証、ハイドログラフ推定法の提案など
- ソフト対策の検討
- 河川に水位計やカメラを設置し、水位上昇を**確認した後の避難**も可能
- 事前に氾濫や堆積高を予測し、**垂直避難**も可能⇒シミュレーションの活用



天応地区、大屋大川の概観と災害後の調査結果
(写真は広島県より提供)

実際の河道からの氾濫範囲（上）と
シミュレーションによる氾濫・堆積（下）

今後の展望：シミュレーションによる新たな防災対策の提案

・ 無害化した土砂の流出

- ・ 公園やグラウンドを游砂池として、どの程度の量やサイズ、濃度、時系列変化であれば堆積や誘導が可能かを **調査、実験、シミュレーション** で検討
- ・ 無害化が難しい巨礫や流木等は砂防施設で制御、施設上下流での**観測**
- ・ 砂防だけでなく**河川やダム等の連携分野**と協力

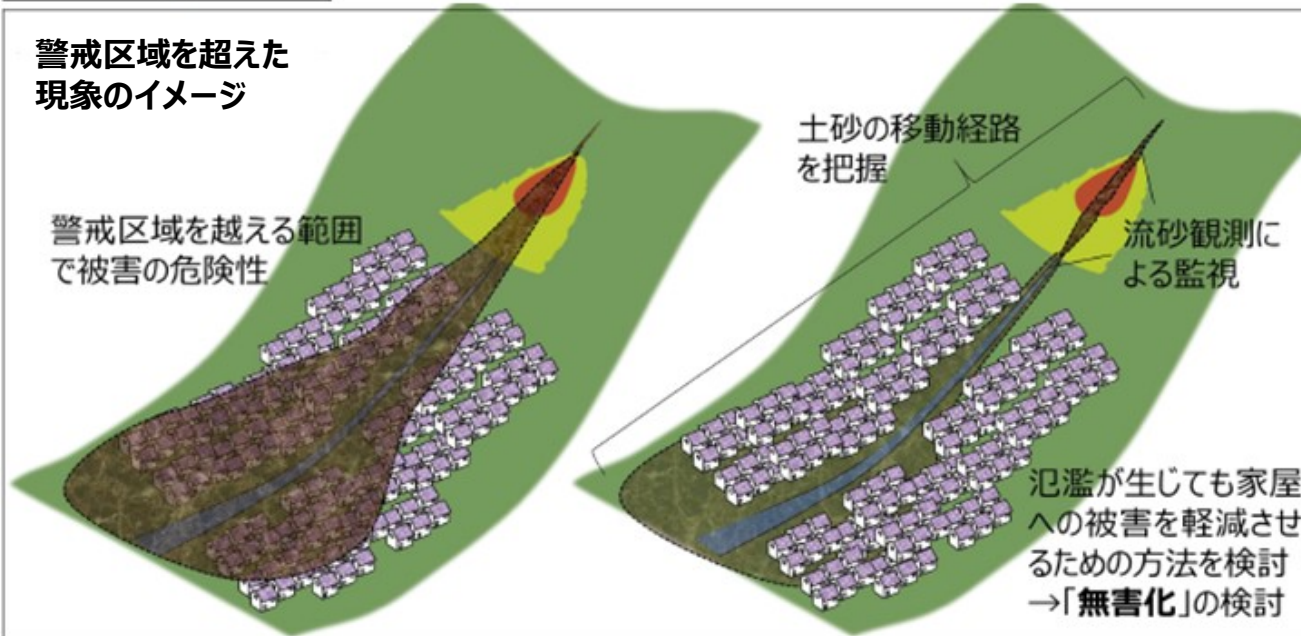
警戒区域のイメージ：
災害履歴や
地形から設定

特別警戒区域
警戒区域（土石流）
（土石流）



警戒区域を超えた
現象のイメージ

警戒区域を越える範囲
で被害の危険性



土砂流出による被害と無害化のイメージ

- ・ 多様なシナリオで **計算事例を蓄積**
- ・ **AI活用**により
無害化した土砂
流出を許容する、
安全度の高い
街づくりの提案