気候変動の影響下での
土砂災害の特徴と対策

京都大学名誉教授
藤田　正治

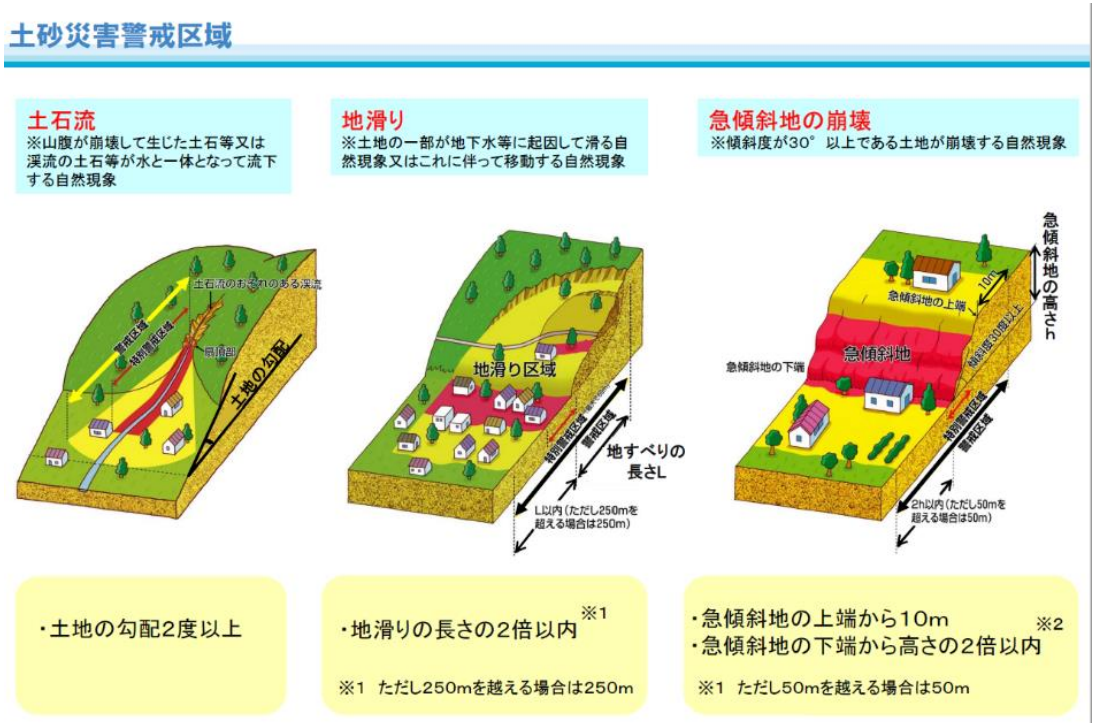
講演内容

- 現在の土砂災害対策の課題抽出
- 気候変動による土砂災害の形態の変化傾向を読み取る
- 気候変動の影響下での土砂災害の特徴と対策
- 今後の課題

現在の土砂災害対策の課題抽出

最も基本的な情報　**土砂災害警戒区域**

土砂災害警戒区域外での土砂災害の発生が問題



国土交通省資料より

↓

＊地すべり地形でない箇所の崩壊性地すべり

＊明瞭な谷地形でない箇所での土石流

↓

より詳細な調査

↓

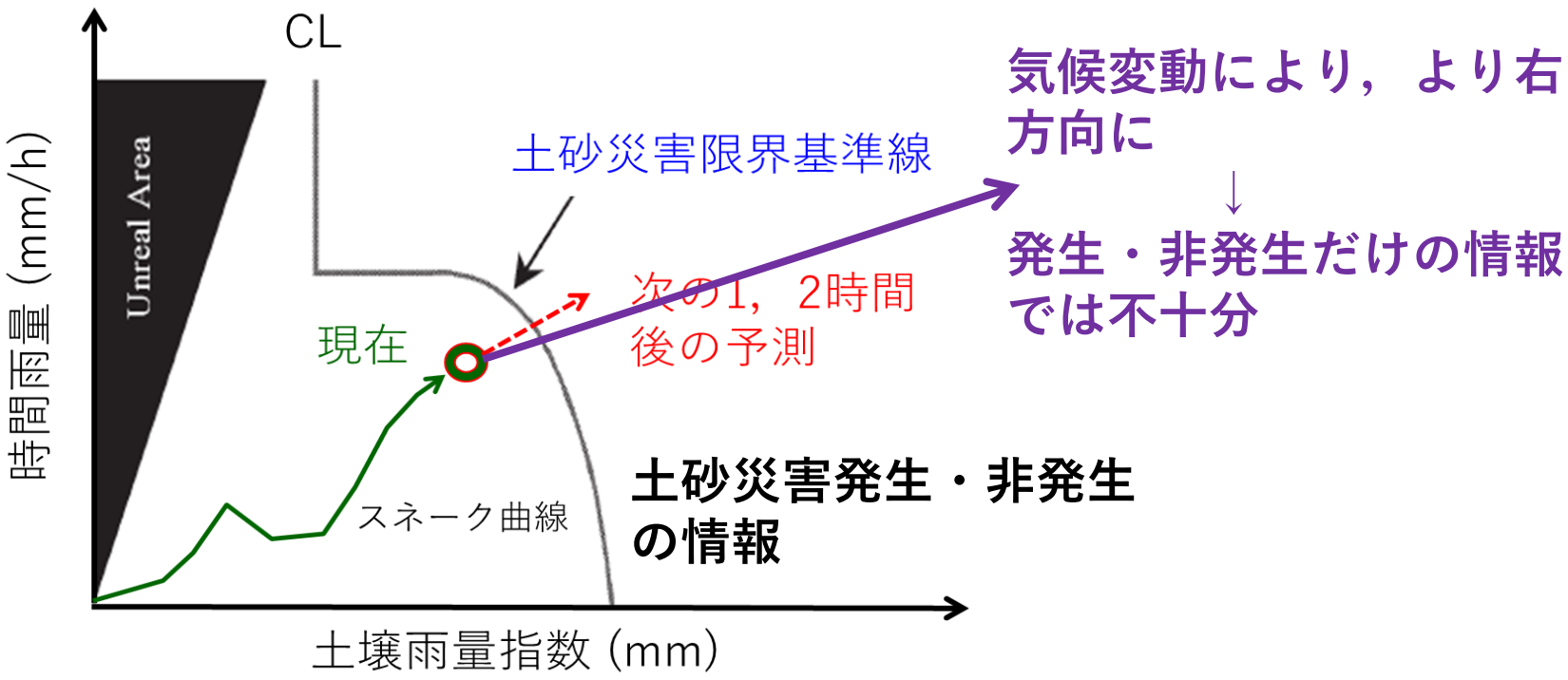
地域からの情報も必要

↓

気候変動により該当地点が増加

避難のタイミング

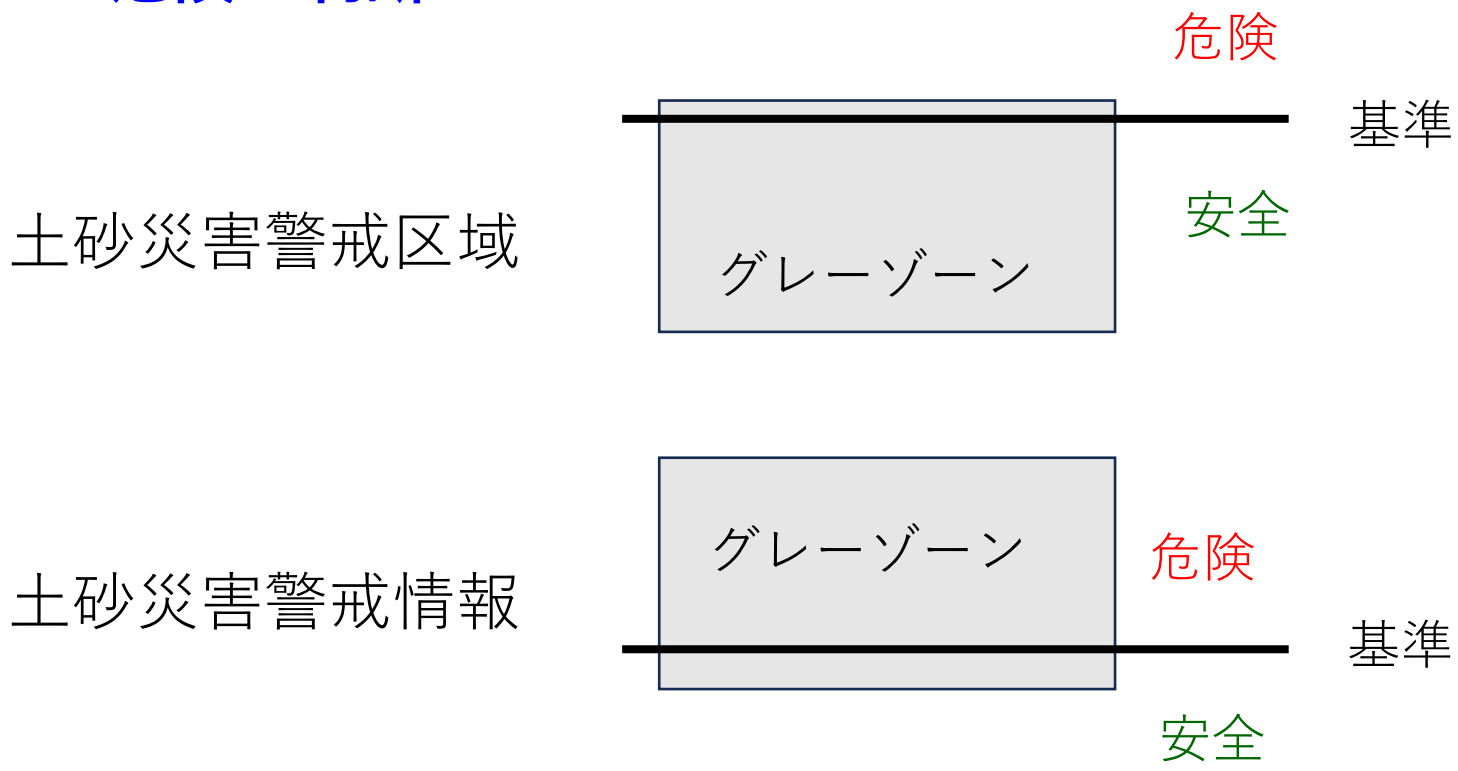
土砂災害警戒情報



平成30年西日本豪雨災害では，土砂災害警戒情報の**捕捉率は100%，空振り率は60%程度**

警戒情報の技術的な限界

基準値による安全と危険の判断 ⟺ **グレーゾーン**



グレーゾーンに対する行政の対応が重要

警戒避難体制は土石流や崩壊の特徴を考慮しているか？

- **土石流・崩壊と洪水氾濫は特徴が異なる**

  洪水氾濫：面的に広範囲，発生までの時間的余裕

  土石流：線的（渓流に沿って）に狭い範囲，急に発生

  崩壊：点的，急に発生

- **下流，上流，背面，対面からの土石流・崩壊起源のハザード**

  ⇒　**洪水氾濫と同じ警戒避難体制は効果的でない**

- **気候変動の影響**

  洪水氾濫：氾濫面積，水深，流速の増加
  危険地域の拡大，シフト

  土石流・崩壊：同時多発化，影響範囲が点，線から面へ
  生産土砂量，土砂流出量の増加
  危険地域の拡大，シフト

気候変動による土砂災害の形態の変化傾向を読み取る

敵の特徴を知るところから対策は始まる.

だれでも発生するハザードの形態変化を
読み解くことができる！



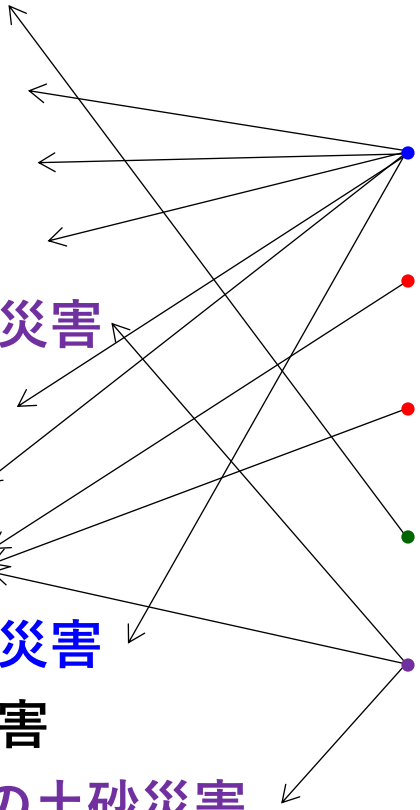
① 降雨量指標の選択（強さと量，強さと時間）

② 降雨量指標と土砂災害の原因となるハザードの関係の調査

③ 降雨量の将来予測による降雨指標の変化

最近の土砂災害

2011年　紀伊半島大水害
2012年　九州北部豪雨災害
2013年　伊豆大島土砂災害
2014年　広島市土砂災害
2016年　北海道・東北豪雨災害
2017年　九州北部豪雨災害
2018年　西日本豪雨災害
2019年　東日本台風災害
2020年　九州地方での土砂災害
2021年　熱海市での土砂災害
青森県下北北部での土砂災害
九州地方での土砂災害



線状降水帯

日本近海で急に発達する台風

強い勢力のまま縦断する台風

進行速度の遅い大型台風

東北地方，北海道地方の豪雨

➡ 降雨量指標と土砂災害の特徴を調べる

豪雨を強さと量でみる

ゆっくり進む台風

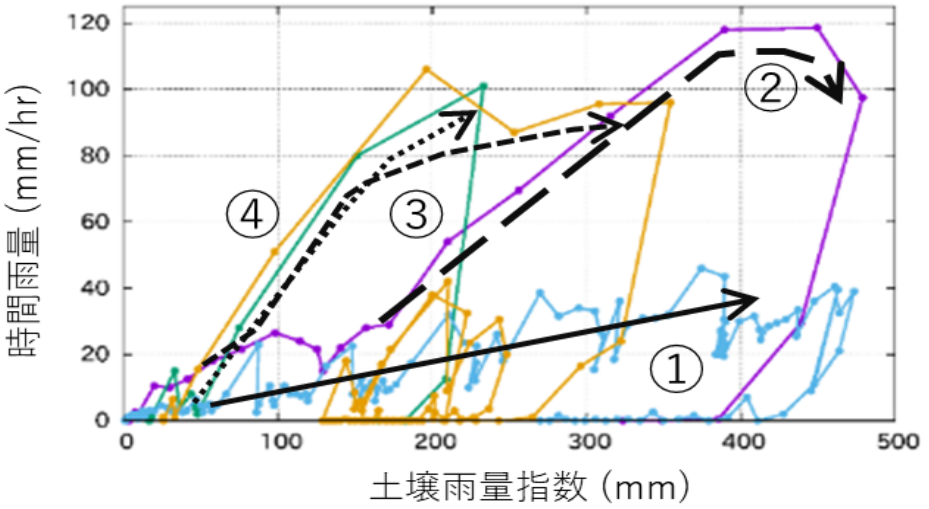
① 積算雨量の極めて大きい強雨
（2011年台風12号紀伊半島大水害）

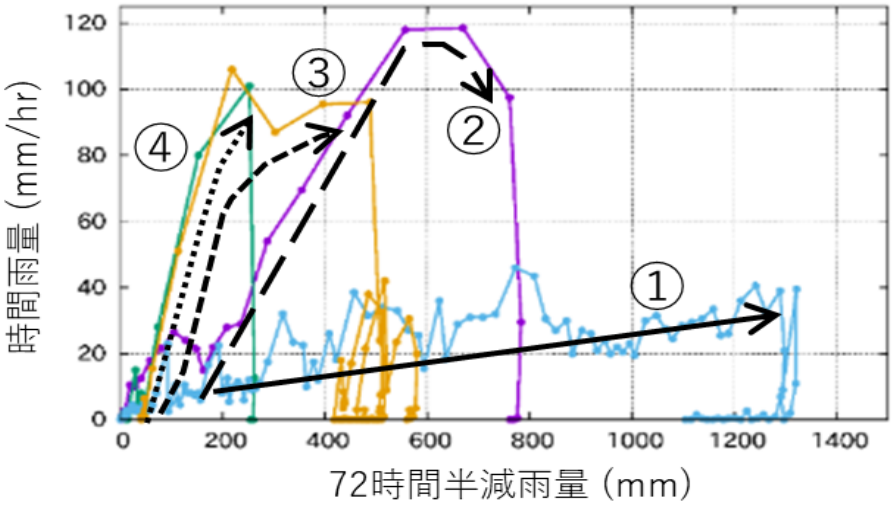
線状降水帯

②, ③ 高強度でかつ積算雨量の大きい豪雨
（2013年台風26号伊豆大島土砂災害）
（2012年九州北部豪雨災害）

2017年九州北部豪雨災害や2018年西日本豪雨災害は③と同様

④ 数時間継続するゲリラ豪雨
（2014年広島土砂災害）



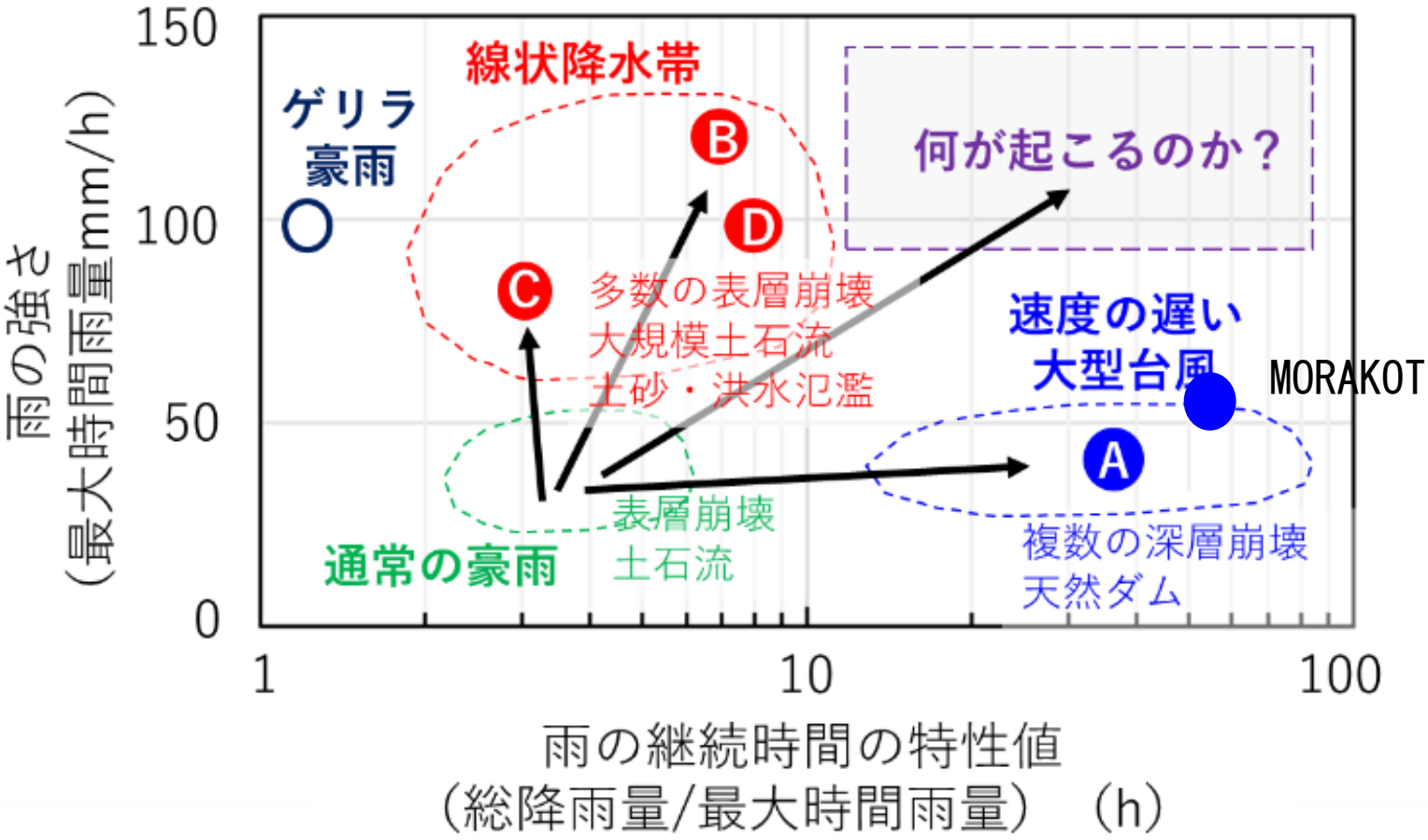


① 紀伊半島大水害（上北山，2011年）
② 伊豆大島土砂災害（伊豆大島，2013年）
③ 九州北部（阿蘇乙姫，2012年）
④ 広島（三入，2014年）

豪雨を強さと時間でみる

A:2011年台風12号紀伊半島大水害　B:2013年台風26号伊豆大島土砂災害

C:2014年8月広島大規模土砂災害　D:2017年九州北部豪雨災害



気候変動の影響下での土砂災害の特徴と対策

- 大規模な土砂災害が頻発する
- 様々なハザードによる土砂災害
- 洪水氾濫と崩壊・土石流の同時発生
- 流域規模での土砂災害
- 過去経験したことのない降雨による土砂災害の予測

大規模土砂災害が頻発する

通常の土砂災害

＊経験が多数

統計解析やシミュレーションによる予測や想定は**内挿的**であり，良好

＊局所的または地区・地域規模，数時間

通常の避難，救援が効果的，早期復旧・復興が可能

大規模土砂災害

＊過去の実績がない

統計解析やシミュレーションによる予測や想定は**外挿的**で，正確性が問題

＊流域規模，複数の県をまたぐ規模，影響時間が長い

通常の避難や救援は機能しにくい．復旧・復興が長期化

様々はハザードによる土砂災害

土砂災害に関係する諸現象

- **直接的**に被害を与える現象
- 避難行動など**間接的**に影響する現象

- 溝や水路からの浸水
- 落石
- 渓流からの土砂流出

- 土石流
- 河岸侵食
- 洪水氾濫・内水氾濫
- 河床低下による河川構造物の流失
- 流砂の氾濫
- 表層崩壊

- 深層崩壊
- 天然ダム
- 天然ダムの決壊による大洪水

「土砂災害」と一口に言っても複雑なプロセス

複合的なハザードの発生プロセスの解明が安全な避難に繋がる

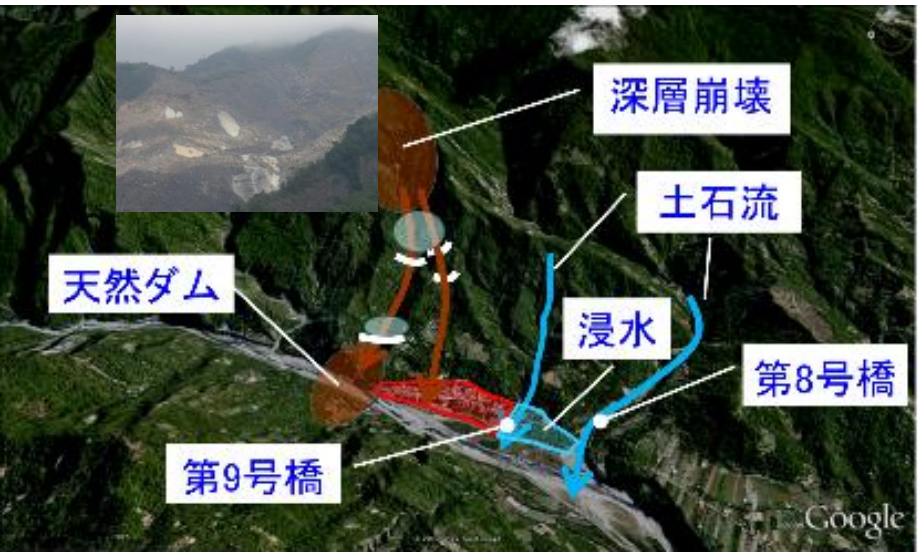
台湾における2009年台風MORAKOT災害

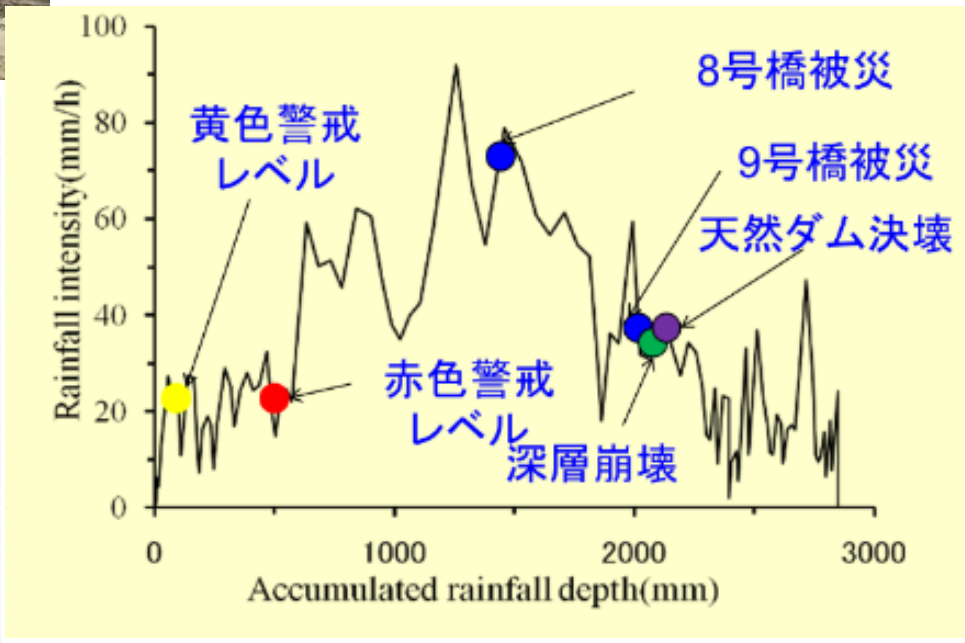
洪水・氾濫 ➡ 土石流 ➡ 深層崩壊 ➡ 天然ダム ➡ 決壊 ➡ 大洪水



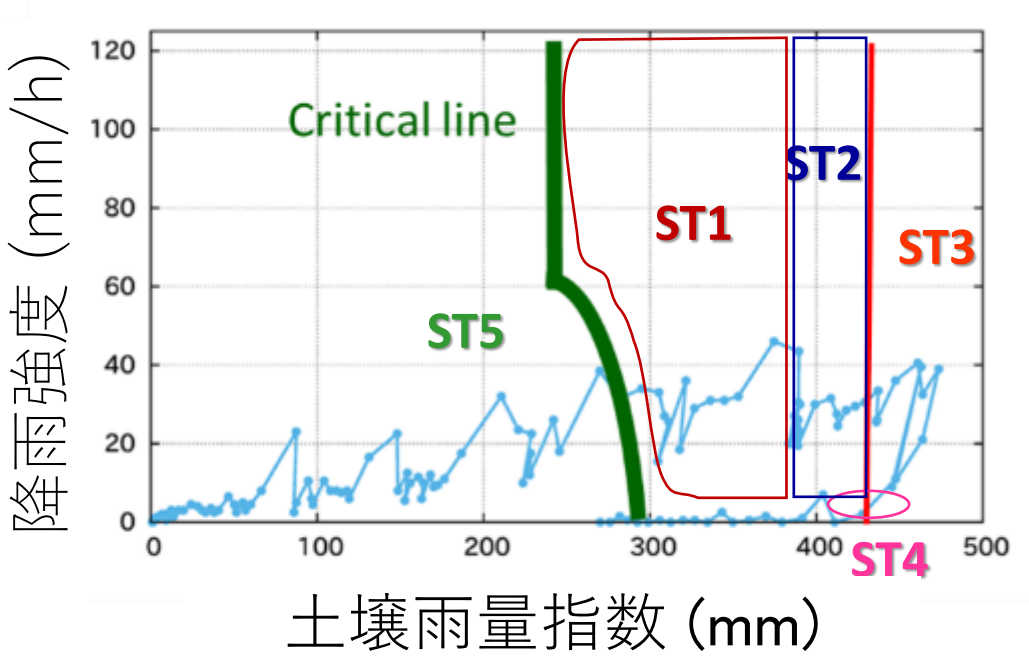


避難するうえで，どのハザードが重要か？





紀伊半島大水害の複合的ハザードの発生





奈良県災害調査資料





ST1: 小規模な土石流，落石，浸水などにより避難困難

ST2: 大規模崩壊の発生，洪水，河岸侵食，橋梁被害

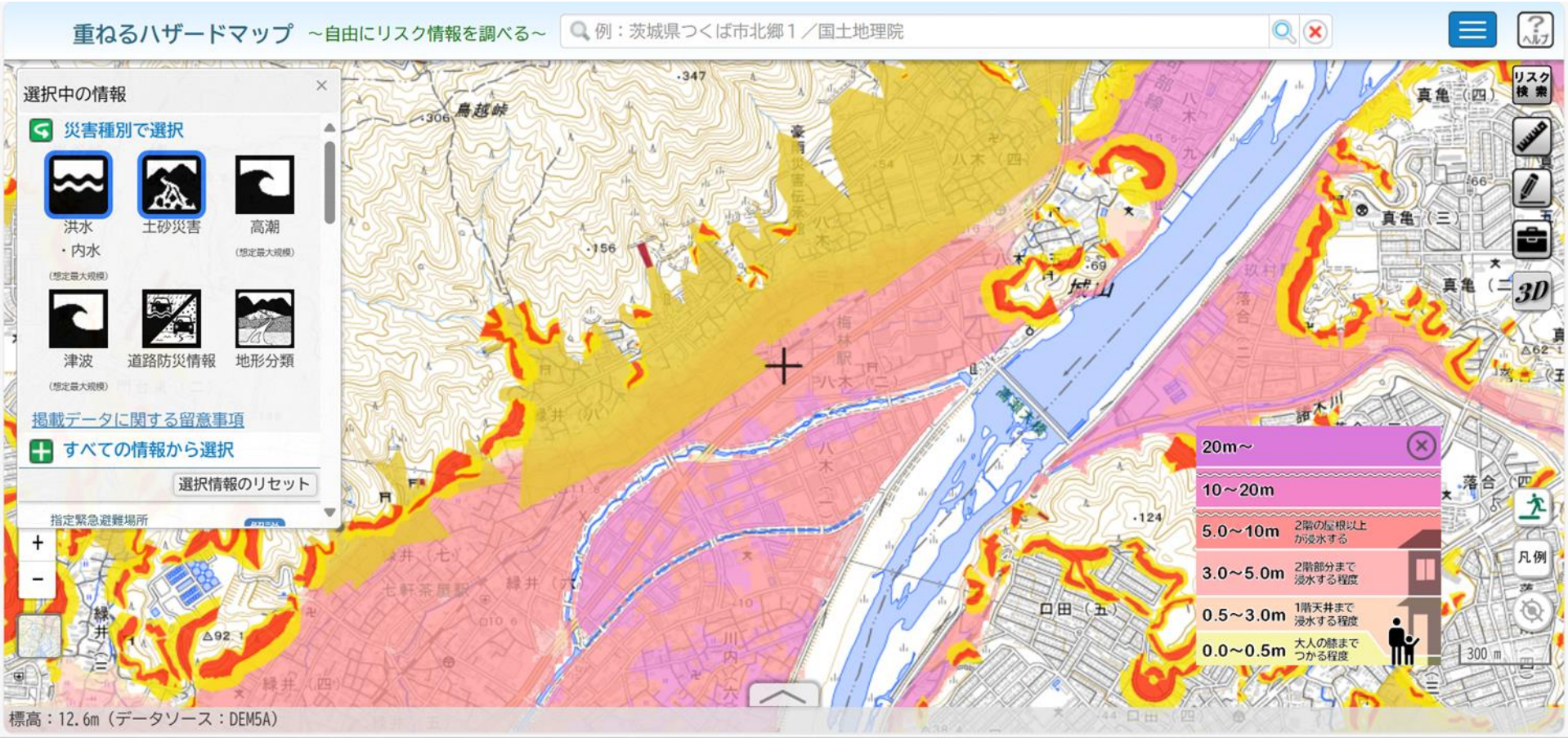
ST3: 深層崩壊の発生，天然ダムの形成

ST4: 深層崩壊の発生

ST5: 通常の状態

洪水氾濫と崩壊・土石流の同時発生

背後からは崩壊・土石流，前面からは洪水氾濫



出典：「ハザードマップポータルサイト」

流域規模での土砂災害

広範囲，強くて長い豪雨 → **広域の同時多発崩壊・土石流，流木，異常な土砂堆積と洪水氾濫**







2017年九州北部豪雨災害　朝倉市





2018年西日本豪雨災害　呉市

土砂・洪水氾濫という専門用語

最近の土砂災害の特徴の一つ

高降雨強度で**総降雨量の大きい**降雨

斜面では，多数の崩壊，土石流

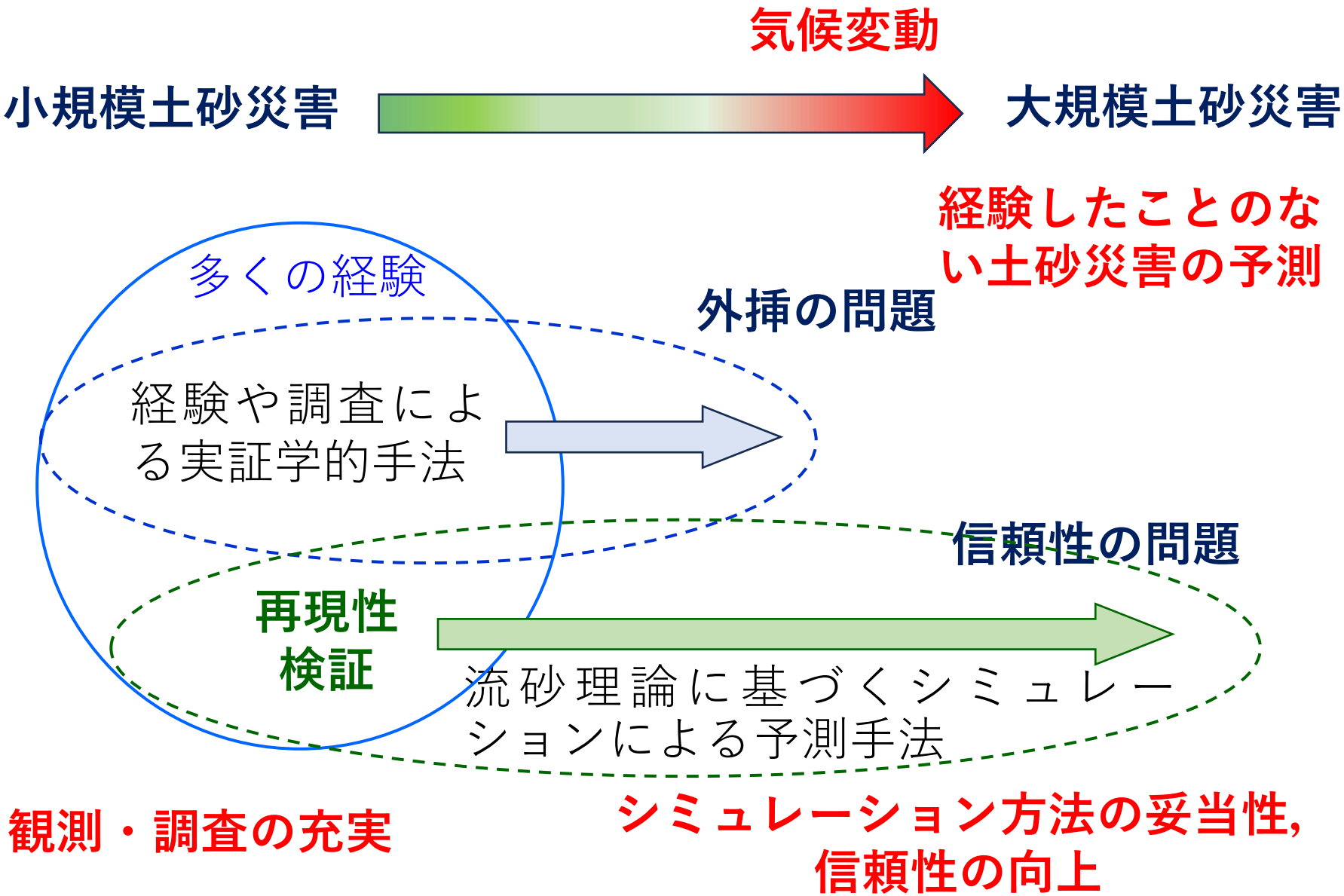
大出水，河床の侵食，渓岸の侵食

大土石流，多量の流木

集落内は浸水，**山側は崩壊や土石流**，**川側は洪水氾濫**という状況をよく考えなければならない。

- ✓ 河道整備だけでは不十分
- ✓ 土砂生産・流出の抑制が重要
- ✓ 流量も非常に大きいので，土砂流出を抑制すると下流側で過度の河床低下が生じ，河川災害が発生するリスクが増加
- ✓ 抑制するだけでなく，土砂供給などの河床低下を緩和する対策が必要

過去経験したことのない降雨による土砂災害の予測



シミュレーション技術の向上と観測・調査の充実

シミュレーション技術の向上

（気候変動の影響下では不可欠）

- 河床変動
- 土砂生産・土砂供給

→ 砂防計画に活用

観測・調査の充実

- シミュレーションモデルの構築（実現象を反映したモデル）
- 計算条件の設定
- 計算精度の検証
- 危機管理への活用

- 実現象
- 流量
- 流砂量
- 土砂生産量

数値シミュレーションの活用

想定外の降雨条件のとき，流域でどのような現象が発生するのか？時系列的にはどうなるのか？安全な場所はあるのか？避難はどうすればいいのか？ハード対策はどこまで効果があるのか？

⇩

これまでの経験に基づく知見（想像力が必要）

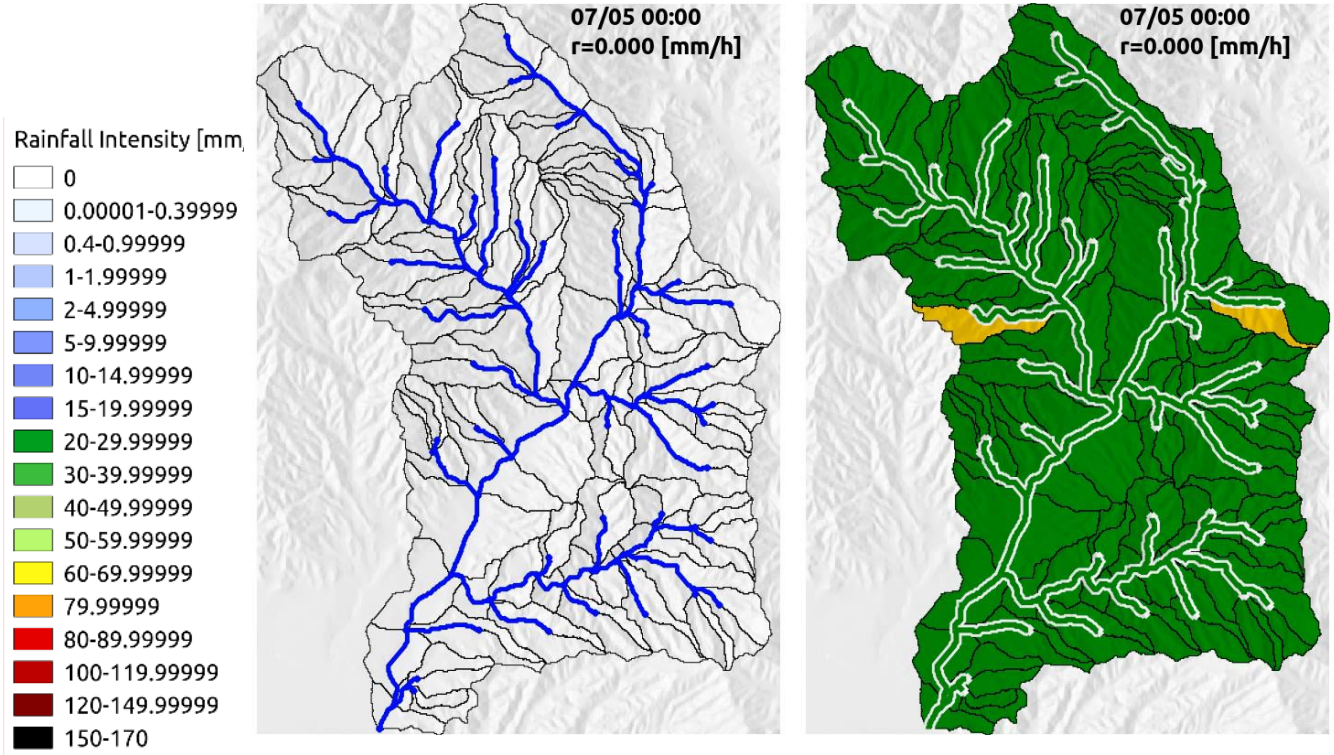
シミュレーション（モデルの妥当性の検証が必要）

- ✓ 実際に経験しなくても経験できる！
- ✓ より危険な場所とより安全な場所がわかる！
- ✓ どのような降雨も想定できる！

想定外の降雨に対して，崩壊，河床変動，土砂流出，洪水氾濫を体験する

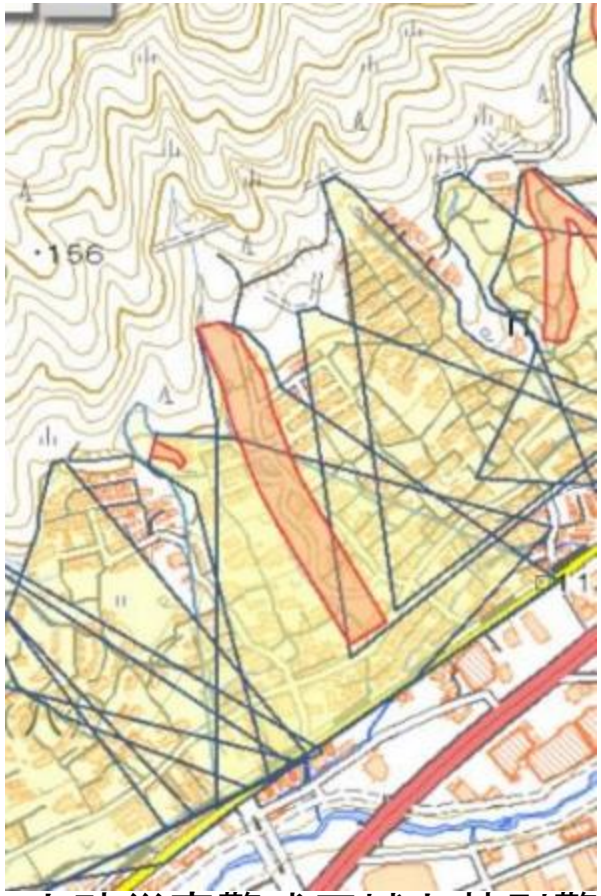
Level 1: ハザード発生の危険が少ない状態
Level 2: ハザード発生の危険が高まっている状態
Level 3: モデル上でハザード発生と判定された状態
Level 4: Level 3よりさらに危険な状態

降雨強度　　崩壊・洪水レベル

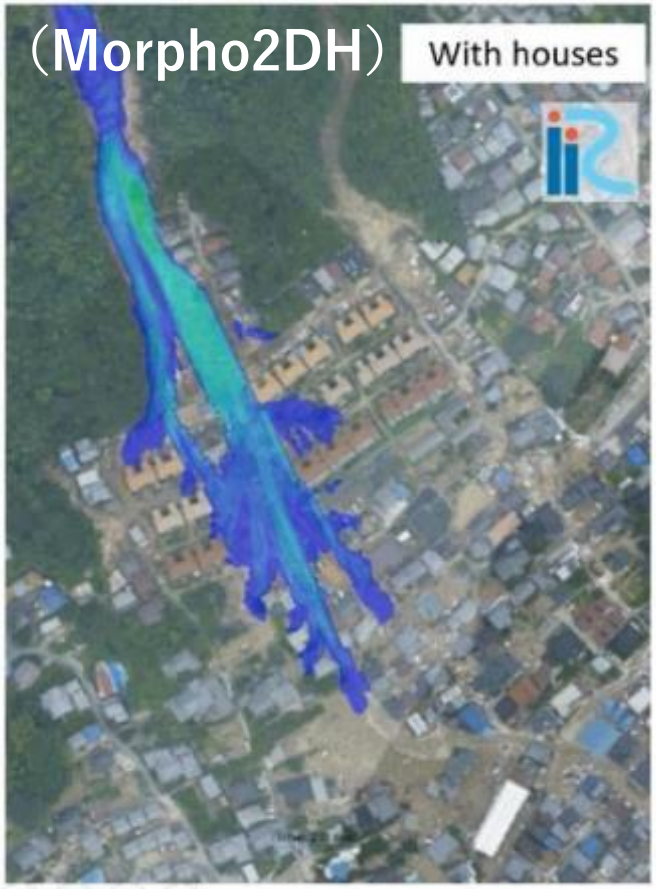


土砂災害警戒区域と緊急避難場所の設定

土砂警戒区域内のリスク分布の評価



土砂災害警戒区域と特別警戒区域（土砂災害ポータル広島より引用）



土石流の氾濫シミュレーション（竹林洋史氏による）

- ✓ より危険な場所の特定
- ✓ より安全な場所の特定
- ✓ イエローゾーンの中の緊急避難場所の設定
- ✓ 砂防構造物の効果
- ✓ より適切な避難経路の設定
- ✓ 砂防構造物と連携した避難経路の設定

土石流を体験する

Morpho2DH

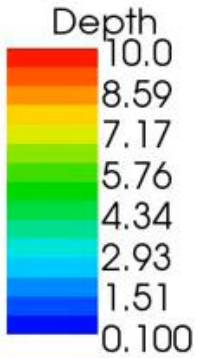
Sediment production by landslides
2000m^3～3000m^3

Sediment flowed into residential area
34000m^3

Time to the residential area：96s
Average velocity　：9m/s
Velocity in the residential area：8m/s



iRIC Software
Changing River Science



単位：m

究極のモデルは流域に雨だけ与えて解析する

降雨開始

SiMHiS

降雨流出解析

洪水氾濫

斜面の安定解析

崩壊発生地点（土砂生産）

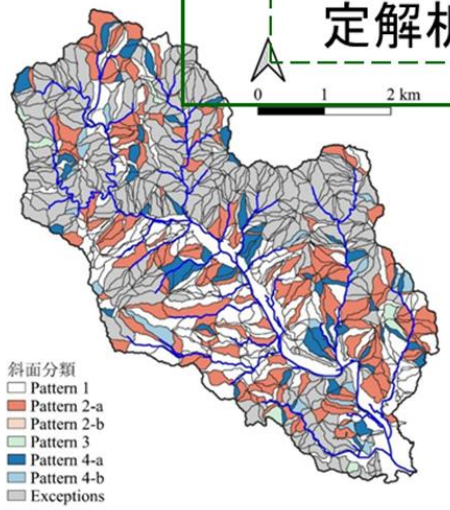
崩壊土の水分状態

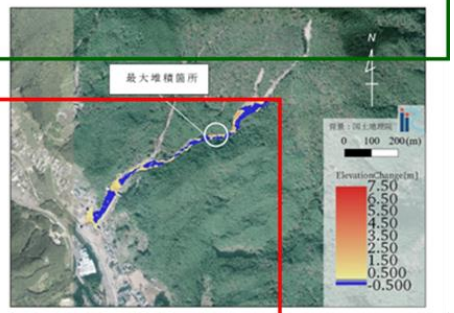
河床変動

土石流の初期条件

Morpho2DH

土石流の侵食・流出解析（土砂生産）





洪水ハイドログラフ

降雨量分布

土石流の流動・流出量

材料特性

飽和度，土石流の卵の数，発生位置

今後の課題

実態の把握

現　象 → **最近の豪雨と大規模土砂災害の特徴**

気候変動の影響 →
- 総降雨量の極めて大きい強雨
- 高強度（強く）でかつ総降雨量（量）の多い豪雨
- 数時間継続するゲリラ豪雨
- 土砂・洪水氾濫，深層崩壊

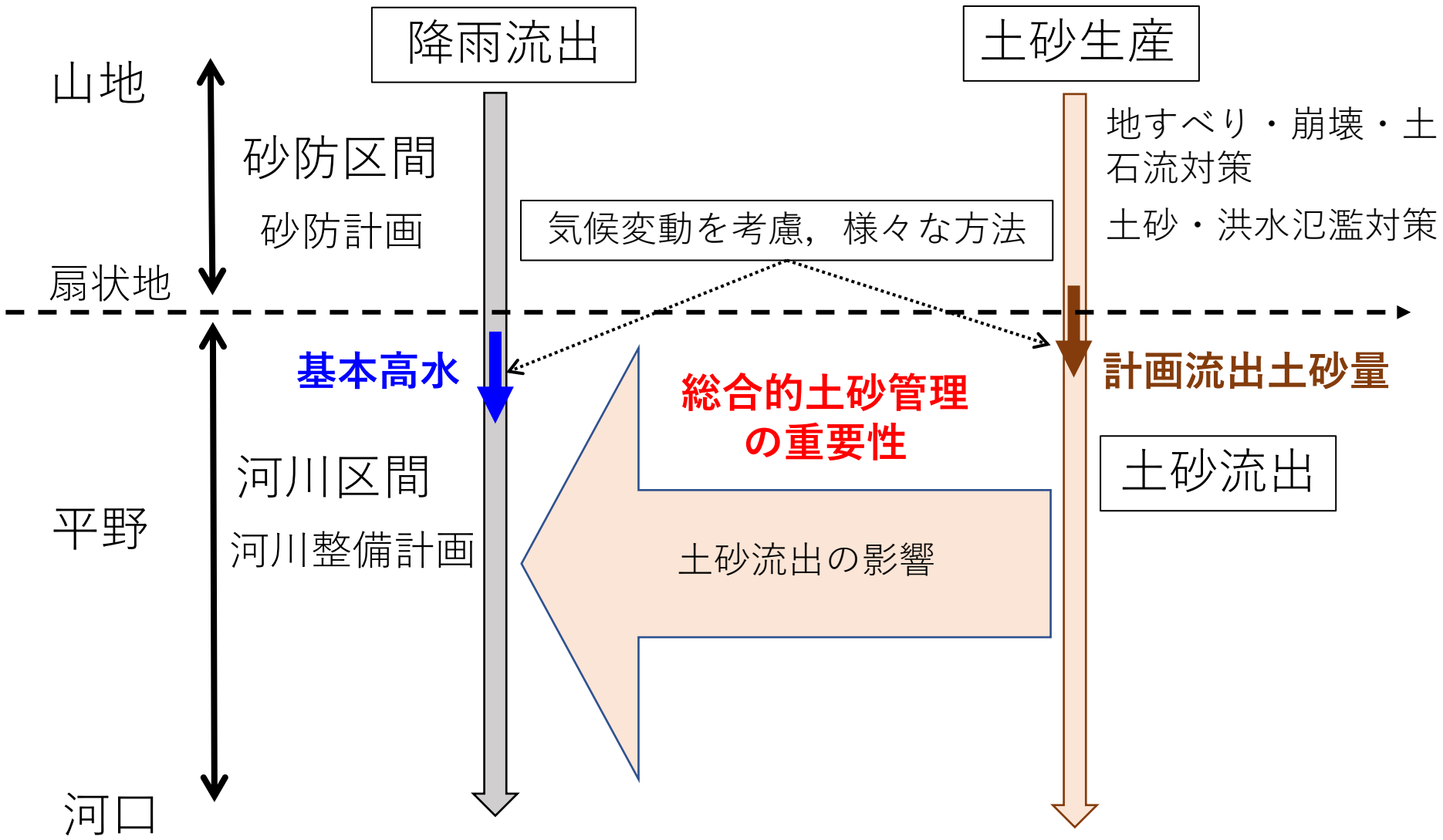
大規模土砂災害対策の技術革新

情　報 → **土砂災害警戒情報の内容の充実**
- マルチハザード情報の重要性
- 土砂移動数値シミュレーションの活用

行　動 → **実効性・有効性のある避難**
- 避難行動に繋がる土砂災害警戒避難システム
- 状況に応じた避難行動

ハード対策 → **ソフト対策と連携したハード対策**

河川整備事業と砂防事業の連携



降雨条件を入れるだけで解析できる統合的モデル

降雨流出から土砂生産・土砂流出まで

気候変動による降雨量の増加を直接的に考慮できる

- 計画生産土砂量
- 計画供給土砂量

- 複合ハザード
- 河床変動の解析
- 洪水氾濫の解析

降雨量の増加率

- **治水計画**

  降雨量を1.1倍　←　流域全体の降雨特性

- **砂防計画**

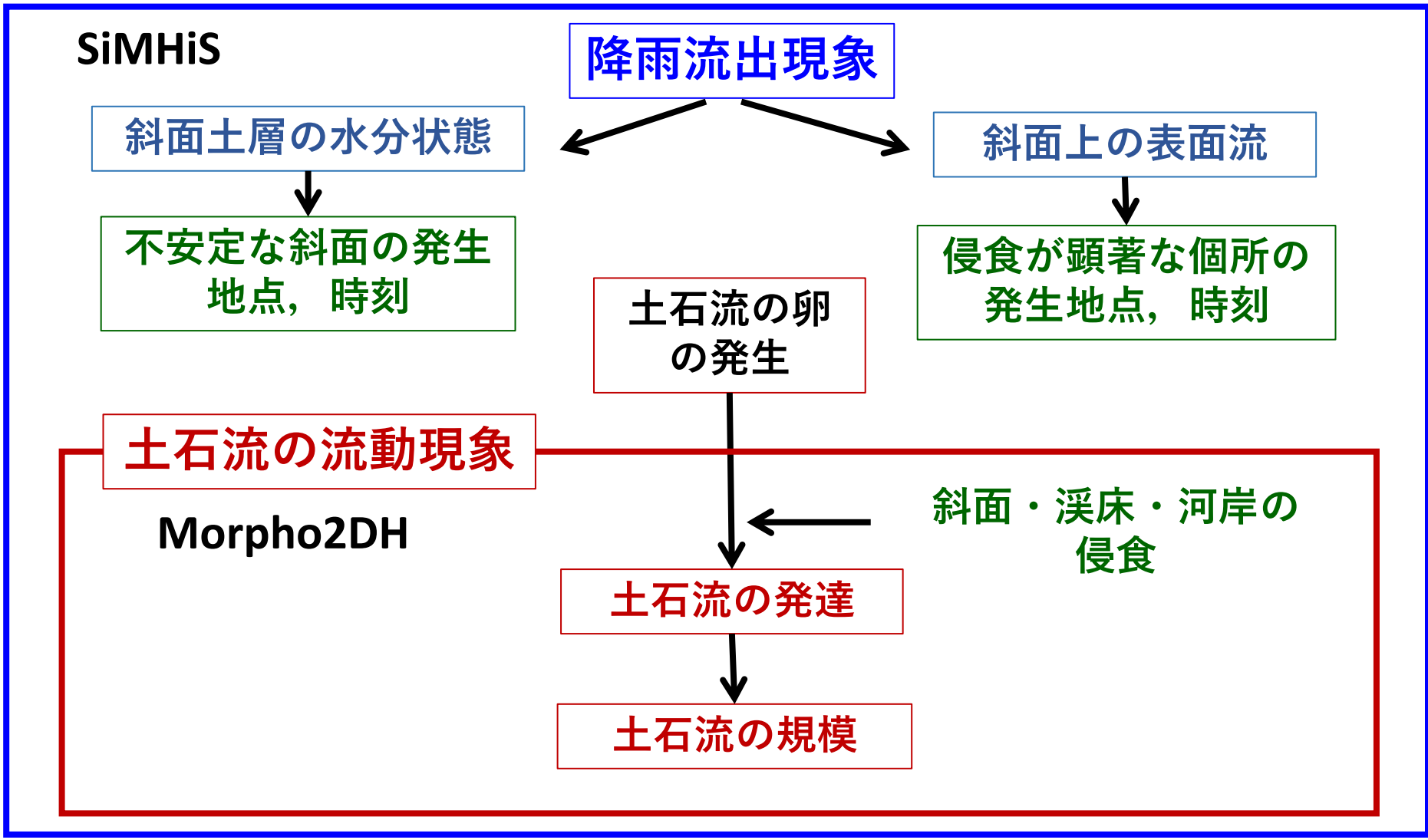
  1.1倍でいいのか？

  土石流・崩壊：山地域の降雨特性

  土砂・洪水氾濫：土砂生産（土石流・崩壊）は山地域の降雨特性

  土砂流出は流域全体の降雨特性

モデルはできつつある

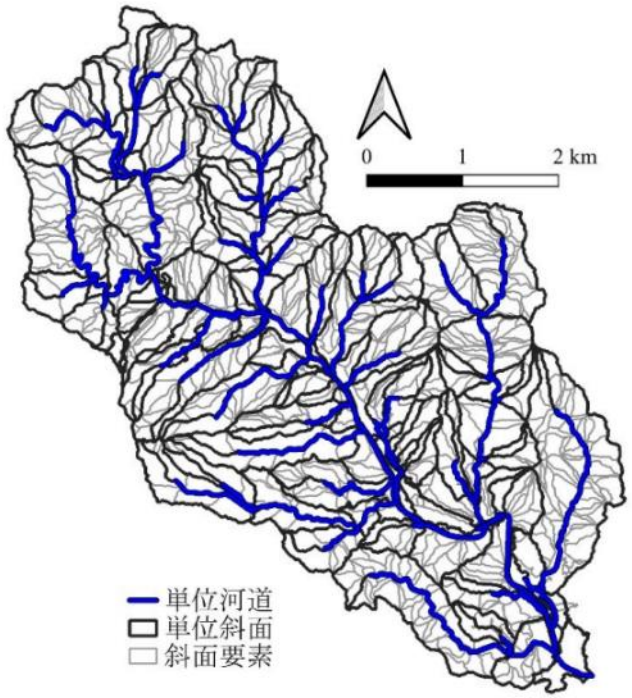

SiMHiS
降雨流出現象
斜面土層の水分状態
斜面上の表面流
不安定な斜面の発生
地点，時刻
侵食が顕著な個所の
発生地点，時刻
土石流の卵
の発生
土石流の流動現象
Morpho2DH
斜面・渓床・河岸の
侵食
土石流の発達
土石流の規模

生産土砂量，供給土砂の算定方法の一手法

- 降雨条件から計算する．気候変動の影響が考慮できる．気候変動モデルの結果も使える．
- 土砂流出プロセスモデルに基づく．
- 崩壊起点の土石流の解析に基づく．

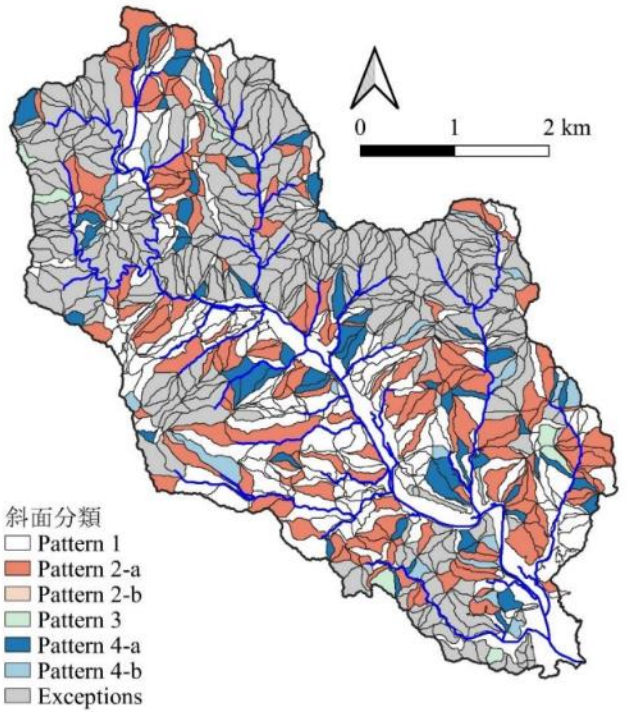
1．地形データから流域モデルを作成する．
2．分布型降雨量を条件とする．
3．SiMHiSによって崩壊（臨界状態も含む）発生点を探査する．
4．発生地点の安定係数，水分状態を分類する．
5．土石流の初期条件を決める．
6．Morpho2DHにより，崩壊地点を起点とした土石流解析を行う．その結果，侵食量（生産土砂量）が算定できる．
7．土石流の解析結果をSiMHiSに戻して，土砂流出解析を行う．
8．土砂・洪水氾濫計算の境界におけるセディグラフを作成する．

Step 1-4



那智川流域地形モデル

降雨分布



斜面の水分，滑動状態

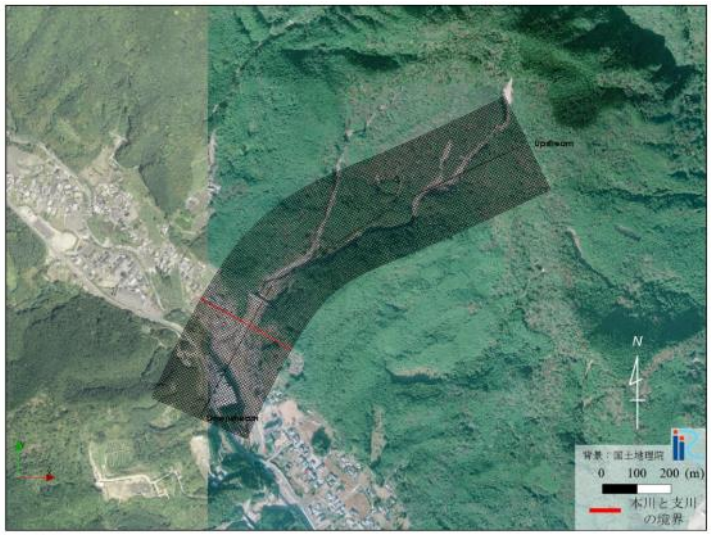
Pattern 1：安定
Pattern 2：飽和土層が臨界状態
Pattern 3：不飽和土層が滑動
Pattern 4：飽和土層が滑動

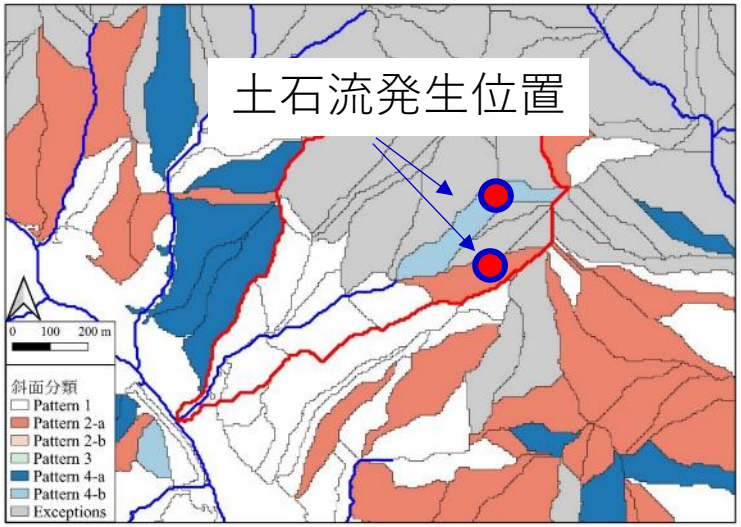
a：表面流小
b：表面流大

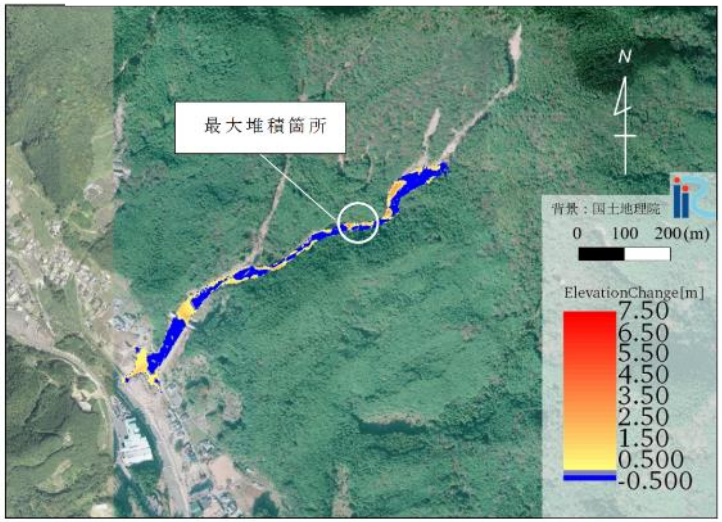
→ 土石流の初期条件

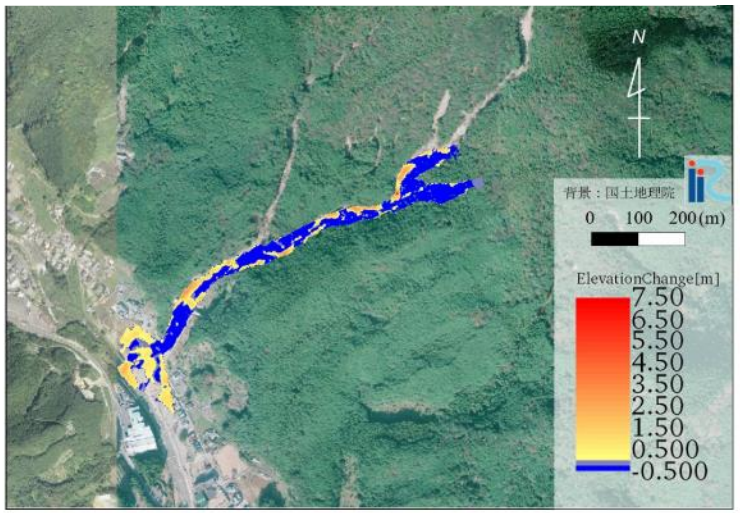
西尾潤太修論（2022）

Step 5, 6
土石流発生位置とMorpho2DHによる土石流の侵食堆積









西尾潤太修論（2022）

ご清聴ありがとうございました.

藤田　正治