

土砂・洪水複合災害の予測を 目的にしたシミュレーション に関する研究

京都大学 山野井一輝

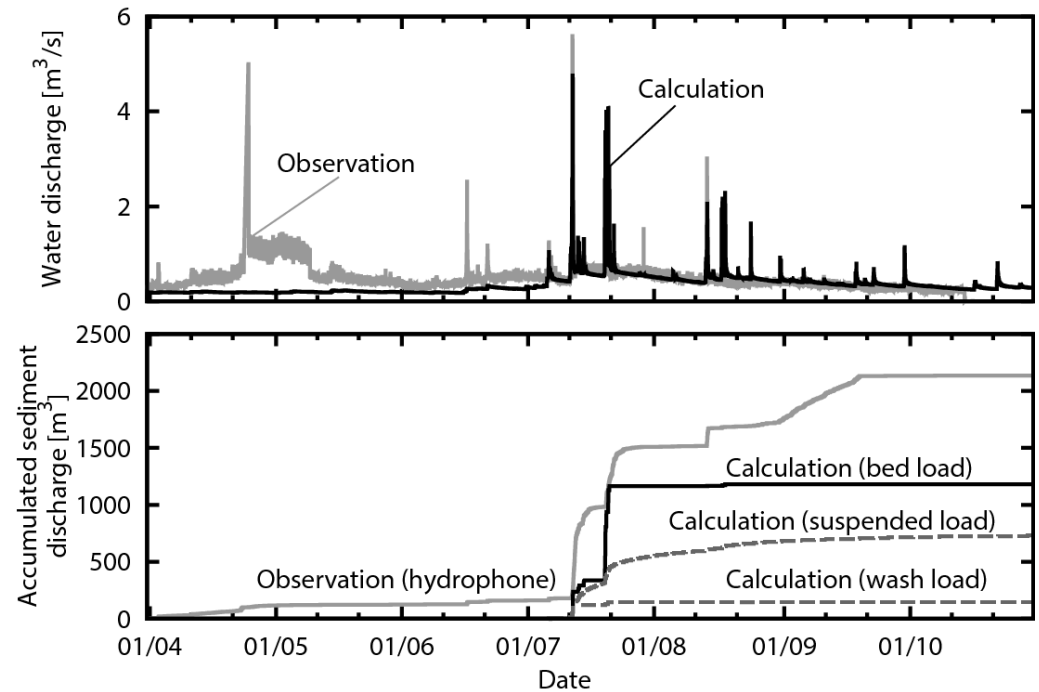
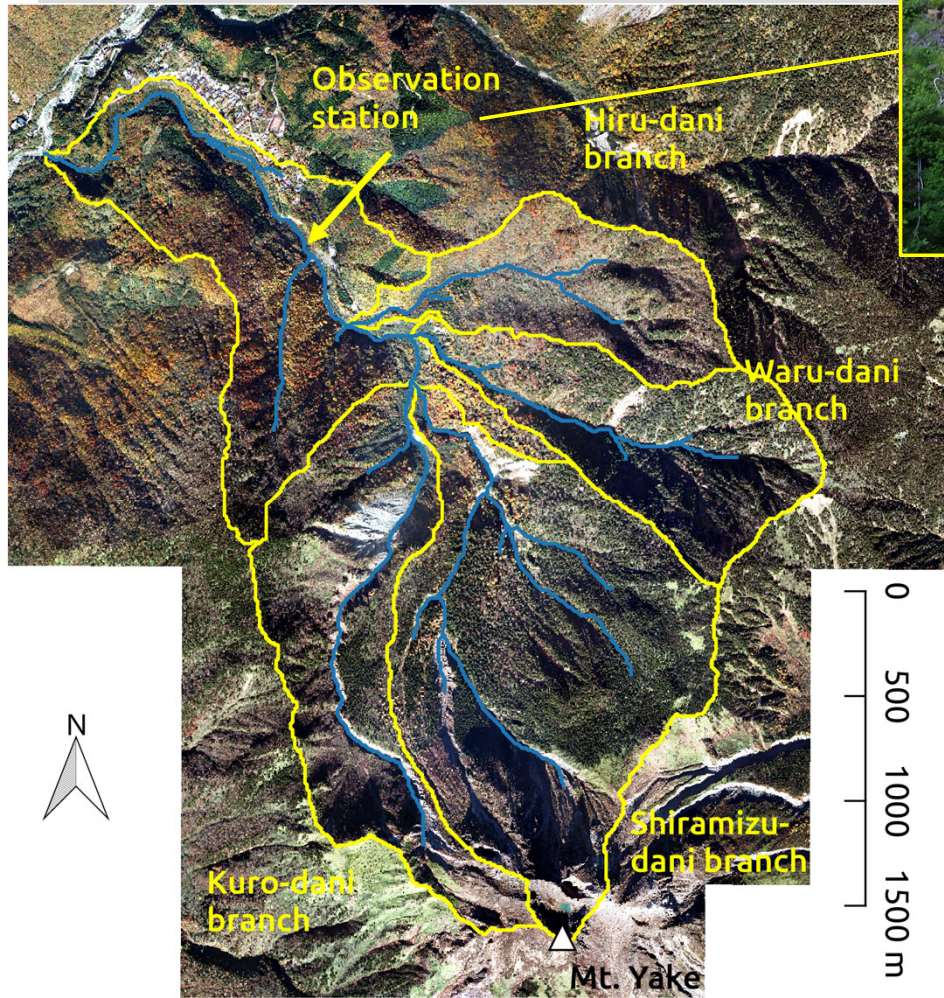
自己紹介 研究歴

- 2011~2014 京都大学工学部・工学研究科修士課程)
 - 土砂動態モデルに関する研究
- 2014~2017 京都大学工学研究科 博士課程 日本学術振興会DC2 (2015~2017)
 - 土砂動態モデルを用いた土砂災害警戒システムに関する研究
- 2017 京都大学防災研究所
 - 火山地域における土砂災害予測に関する研究
- 2018~ 現在 理化学研究所計算科学研究センター
 - スパコンを用いた災害シミュレーションに関する研究
- 2019~ 現在 京都大学防災研究所
 - 土砂・洪水複合災害の予測に関する研究

研究活動の楽しさ・魅力や研究職の入り口

- 博士過程・研究職に進んだ動機
 - 学生で学んだの学んだ土木を活かす仕事をしたかったから
 - 研究だけでなく、そのプロセスの楽しみ
 - 山地でフィールドワーク
 - 海外での活動
 - 機械弄り 等
- 魅力
 - 研究職ゆえの自由さ
- 苦労した点
 - 学生（博士過程）時代
 - 生活費の確保
 - DC1には採択されず、D2でDC2に採択
 - D1のときは奨学金確保に奔走
 - 意外に申請可能な制度が多数あることを知った
- ポスドク時代
 - 雇用形態への理解がされにくい
 - 研究テーマに関する不自由さ
 - 人件費制度（エフォート管理）
 - 人件費を出せない研究テーマ（科研費（制度変更等）や共同研究など）も多数あるが、それに関わることができない。自発的な研究が制度上不可。
 - 制度改善の兆しあり（令和2(2020)年4月から、科研費により雇用される若手研究者が一定の条件の下、雇用元の科研費の業務に充てるべき勤務時間において自発的な研究活動等の実施が可能）(https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/06_jsps_info/g_200812/index.html)

研究対象

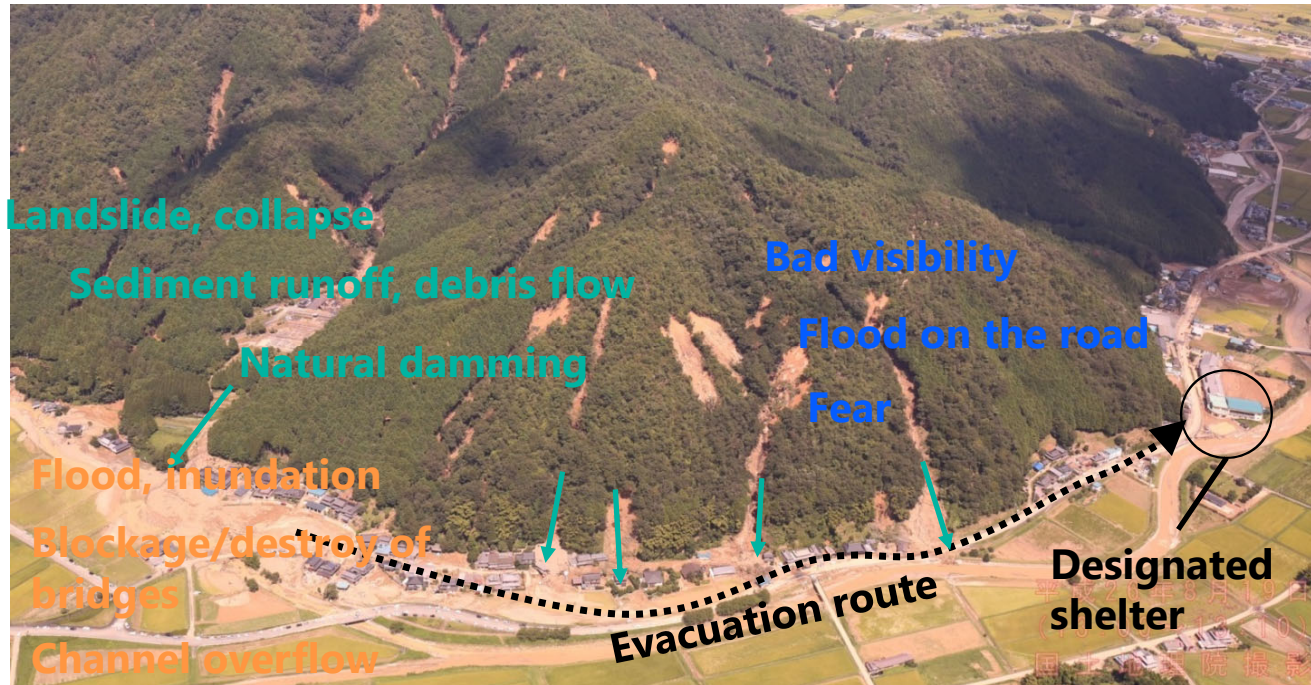


適用事例 (Fujita & Yamanoi, 2015)

岐阜県高山市神通川水系 足洗谷の土砂動態 空間スケール 約 10km^2 , 時間スケール 1年~ 数10年

研究対象

Landslide induced hazards



Rainfall induced hazards

Flood induced hazards

Disaster in Tamba city, Hyogo pref. [Matsumura et al., 2014]

土砂災害中に発生するハザード群

研究対象



[出典：国土地理院HP]



[出典：国土地理院HP]

2017年九州北部豪雨 赤谷川における土砂と洪水の複合的災害（土砂・洪水氾濫）

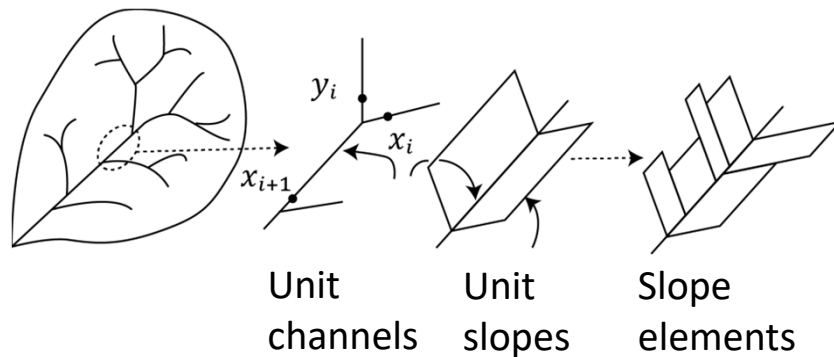
Motivation

- 流域からの土砂流出現象のモデル化と予測は，総合土砂管理や**土砂災害の予測**に有用。
 - 特に**降雨データを入力**とした現象の予測ができれば，
 - 警戒避難
 - 被害想定
 - 気候変動の影響評価
等に応用できる。
 - ここで所謂土砂災害は，次のように分類できる。
 - 斜面崩壊・地すべりによる災害
 - 斜面崩壊が土石流となり，その流下過程で発生する災害
 - 流域全体で多数の斜面崩壊・土石流が発生し，それが集積して地形を変化させ，同時に甚大な洪水が発生して生じる災害（土砂・洪水氾濫）
- これらを予測するには，土砂だけでなく，降雨の流出プロセスも適切に扱う必要がある。

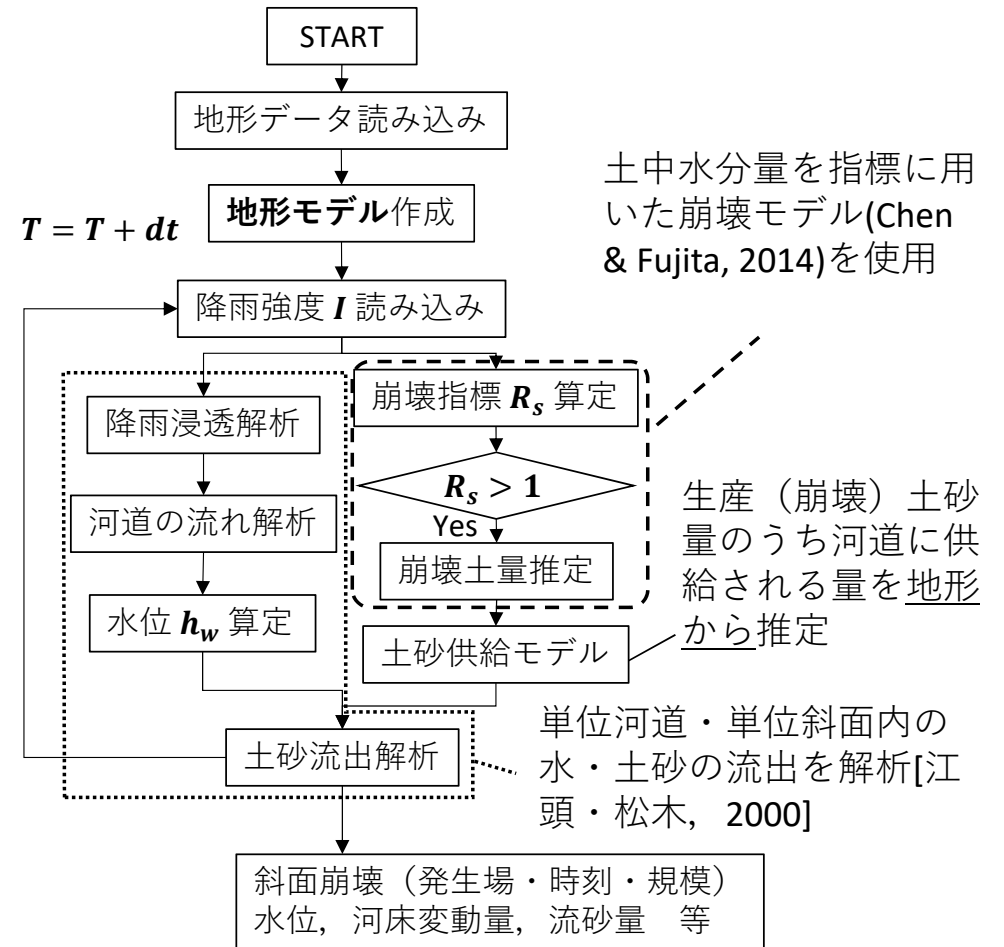
単位河道・単位斜面を用いた事例

SiMHIS [山野井, 藤田, 2016, 土木学会論文集B1]

概要：斜面崩壊モデル，河道への土砂供給量算定モデル，および流域水・土砂流出モデルを統合した解析モデルを用いて，降雨条件と地形条件を元に斜面崩壊・洪水の危険度の空間分布を表示



図：地形モデル（単位河道・単位斜面・斜面要素）

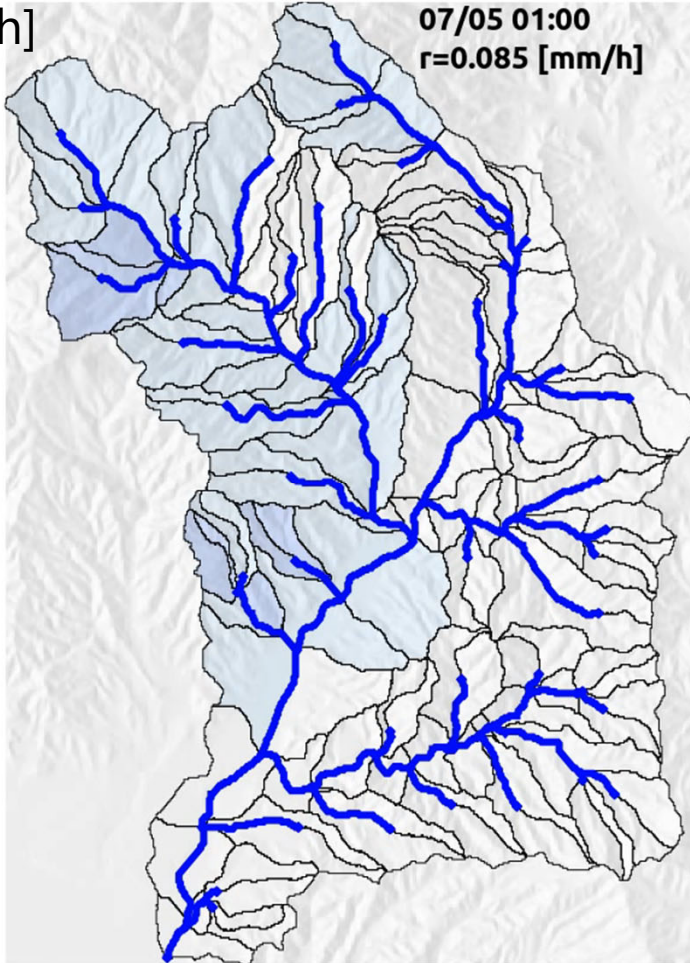
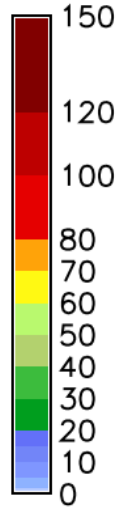


図：計算手法

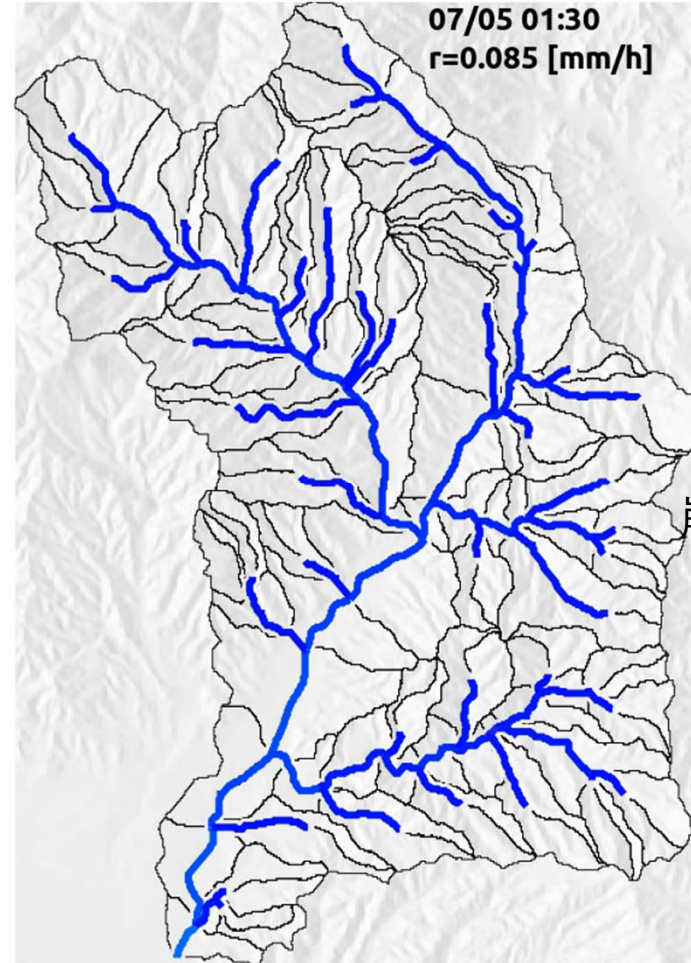
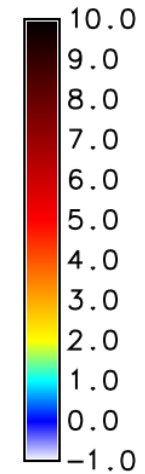
土砂動態モデル(SiMHiS)の適用

降雨強度

[mm/h]



水位[m]



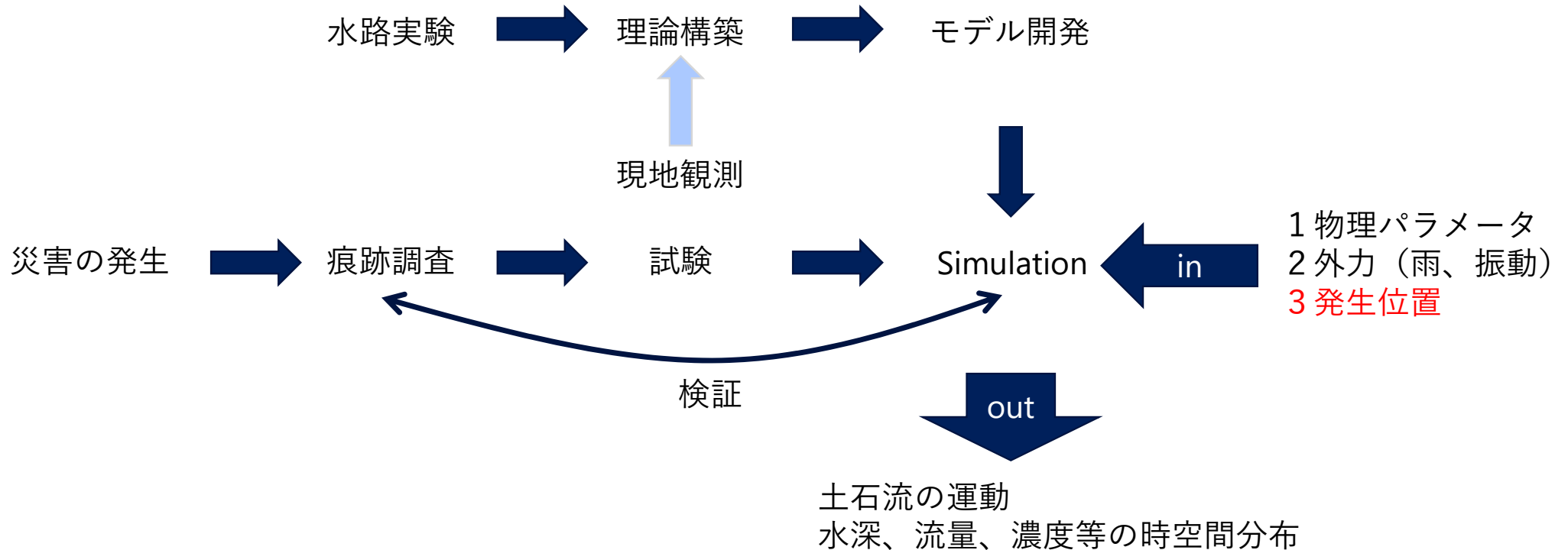
崩壊個数[m]



土砂動態シミュレーションと2次元シミュレーション

- 単位河道・単位斜面の土砂動態モデルで可能になってきたこと
 - ・斜面崩壊と降雨流出の一体的な予測
 - ・時々刻々の危険度変化の予測
- ×土砂動態モデルでは難しいこと
 - ①詳細な被害範囲の予測
 - ・どこで被害が発生するか
 - ②予測の不確実性評価
 - ・どの程度の確率で被害が生じるか
- これらの解決のため、スパコンを活用し、下記を実施
 - ・二次元土石流シミュレーションの流域全体への適用（①の解決）
 - ・斜面崩壊の位置に伴う不確実性の評価（②の解決）

従来のシミュレーション研究



発生位置がわからないので、予測simulationが困難 → simulationをリスク評価に使えない

研究目的：

災害後の再現計算ではなく、災害前にでも実施できる予測的計算スキームの確立

本研究でのシミュレーション手法

災害の発生 → 痕跡調査 → データ蓄積（統計）



疑似的な
条件生成



Simulation
（多ケース）



土石流の運動
水深、流量、濃度等の時空間分布
（の空間統計）



リスク情報

本研究でのシミュレーション手法

災害の発生 → 痕跡調査 → データ蓄積（統計）

※土石流始点（崩壊）の位置と地形条件間の関係をlogistic regression
→崩壊の発生確率の二次元分布を算出。
→疑似乱数により斜面崩壊を発生。

疑似的な
条件生成

京256x60ノードで同時に計算

in → Simulation
(多ケース)

out

土石流の運動
水深、流量、濃度等の時空間分布
(の空間統計)

リスク情報

計算手法

- 有限差分法（デカルト座標）
- 計算スキーム: 人工粘性を更かしたMacCormackメソッド
- 基礎式: 河床の侵食堆積および流動形態に応じたせん断力を考慮した二次元浅水流方程式(Takahashi & Nakagawa, 1991)
- 水と土砂の混合物を1流体として扱う
- 並列化手法: OpenMP-MPI hybrid, 二次元領域分割

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = \mathbf{S}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \\ Ch \\ z_b \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \\ Cuh \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ Cvh \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} gh(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (uh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (uh)}{\partial y} \right\} \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (vh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (vh)}{\partial y} \right\} \\ iC_* \\ -i \end{bmatrix}$$

- (1) Conservation law of fluid material
- (2) Momentum conservation for x direction.
- (3) " " y direction.
- (4) Conservation law of sediment
- (5) River bed erosion/deposition.

h : water depth

u, v : depth-mean velocity (x and y direction, respectively)

C : sediment concentration

z_b : ground surface elevation

ε : eddy diffusivity for momentum

S_{0x}, S_{0y} : gradient of ground surface for x and y direction, respectively

S_{0x}, S_{0y} : friction gradient between fluid and bed surface for x and y direction, respectively

i : speed of erosion/deposition

C_* : sediment concentration of ground material

計算手法

S_{fx}, S_{fy} : friction gradient between fluid and bed surface

$$S_{fx} = \begin{cases} \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}d^2}{8gh^3 \left\{ C + (1-C)\frac{\rho}{\sigma} \right\} \left\{ \left(\frac{C_*}{C}\right)^{1/3} - 1 \right\}^2} & C \geq 0.4C_* \text{ (Debris flow)} \\ \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}d^2}{0.49gh^3} & 0.4C_* > C \geq 0.01 \text{ (Hyperconcentrated flow)} \\ \frac{n_m^2 u \sqrt{u^2 + v^2} d^2}{gh^{4/3}} & C \leq 0.01 \text{ or } h/d \geq 30 \text{ (Water flow)} \end{cases}$$

d : representative grain-diameter
 n_m : manning's roughness coefficient

i : speed of erosion/deposition

$$i = \begin{cases} \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{h\sqrt{u^2 + v^2}}{d} & (C_\infty - C \geq 0) \text{ erosion} \\ \delta_d \frac{C_\infty - C}{C_*} \sqrt{u^2 + v^2} & (C_\infty - C < 0) \text{ deposition} \end{cases} \quad C_\infty = \begin{cases} \frac{0.9C_*}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_w)} & (\tan \theta_w \geq \tan \phi) \\ 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan \theta_w}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \right\}^2 & (\tan \phi > \tan \theta_w \geq 0.138) \\ \frac{\rho(1 + 5 \tan \theta_w)}{(\sigma - \rho)} \left(1 - \alpha_c^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \alpha_c \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) & (0.138 > \tan \theta_w \geq 0.03) \\ & (\tan \theta_w \leq 0.03) \end{cases}$$

C_∞ : equilibrium sediment concentration
 δ_e : erosion coefficient
 δ_d : deposition coefficient

Discretization scheme : MacCormack method

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = \mathbf{S}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \\ Ch \\ z_b \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \\ Cuh \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ Cvh \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} gh(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (uh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (uh)}{\partial y} \right\} \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (vh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial (vh)}{\partial y} \right\} \\ iC_* \\ -i \end{bmatrix}$$

Predictor

$$\bar{\mathbf{U}}_{i,j} = \mathbf{U}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ (\mathbf{E}_{i,j}^n - \mathbf{E}_{i-1,j}^n) - (\mathbf{Q}_{xi,j}^n - \mathbf{Q}_{xi-1,j}^n) \} \\ - \frac{\Delta t}{\Delta y} \{ (\mathbf{F}_{i,j}^n - \mathbf{F}_{i,j-1}^n) - (\mathbf{Q}_{yi,j}^n - \mathbf{Q}_{yi,j-1}^n) \} + \Delta t \mathbf{S}_{i,j}^n$$

Collector

$$\mathbf{U}_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} (\mathbf{U}_{i,j}^n + \bar{\mathbf{U}}_{i,j}) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \{ (\bar{\mathbf{E}}_{i+1,j} - \bar{\mathbf{E}}_{i,j}) + (\bar{\mathbf{Q}}_{xi+1,j} - \bar{\mathbf{Q}}_{xi,j}) \} \\ - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \{ (\bar{\mathbf{F}}_{i,j+1} - \bar{\mathbf{F}}_{i,j}) + (\bar{\mathbf{Q}}_{xi,j+1} - \bar{\mathbf{Q}}_{xi,j}) \} + \frac{1}{2} \Delta t \bar{\mathbf{S}}_{i,j}^n$$

where,

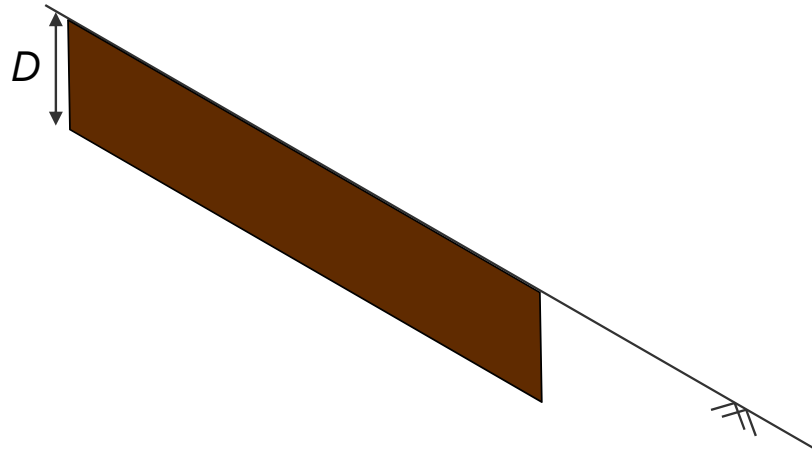
$$\mathbf{Q}_{xi,j} = \frac{K_v u_* h}{\Delta x} (\mathbf{U}_{i+1,j}^n - 2\mathbf{U}_{i,j}^n + \mathbf{U}_{i-1,j}^n)$$

$$\mathbf{Q}_{yi,j} = \frac{K_v u_* h}{\Delta y} (\mathbf{U}_{i,j+1}^n - 2\mathbf{U}_{i,j}^n + \mathbf{U}_{i,j-1}^n)$$

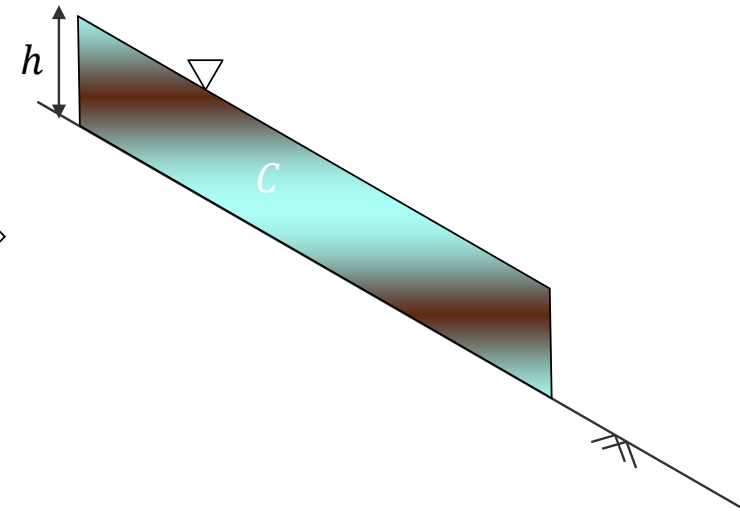
K_v : coefficient for artificial viscosity (= [2.5, 2.5, 2.5, 1, 1])

土石流の生起方法

斜面（表層）崩壊



土石流（水と土砂の混合物）



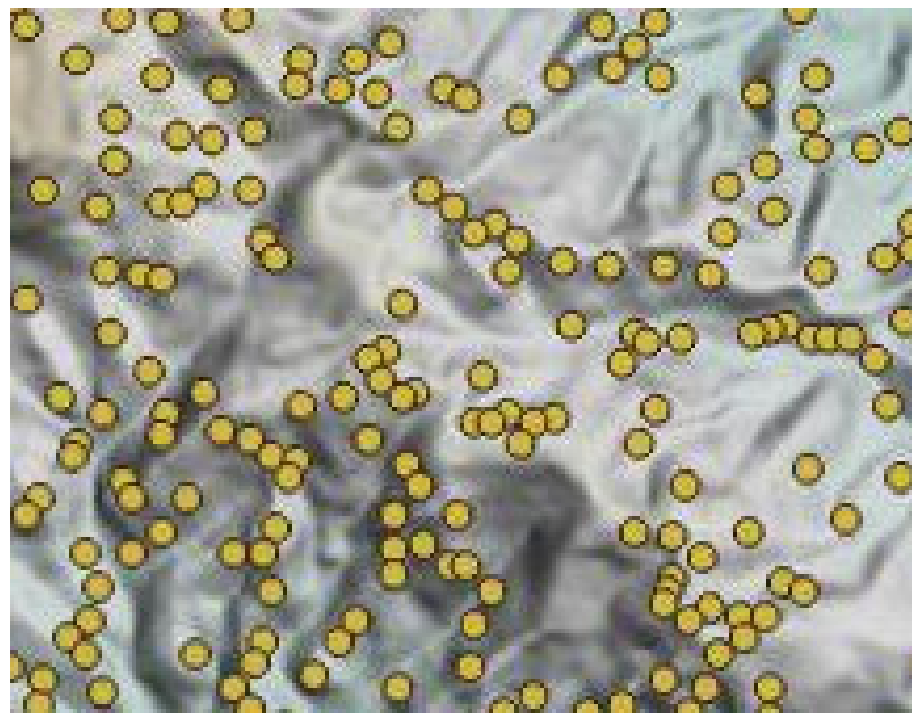
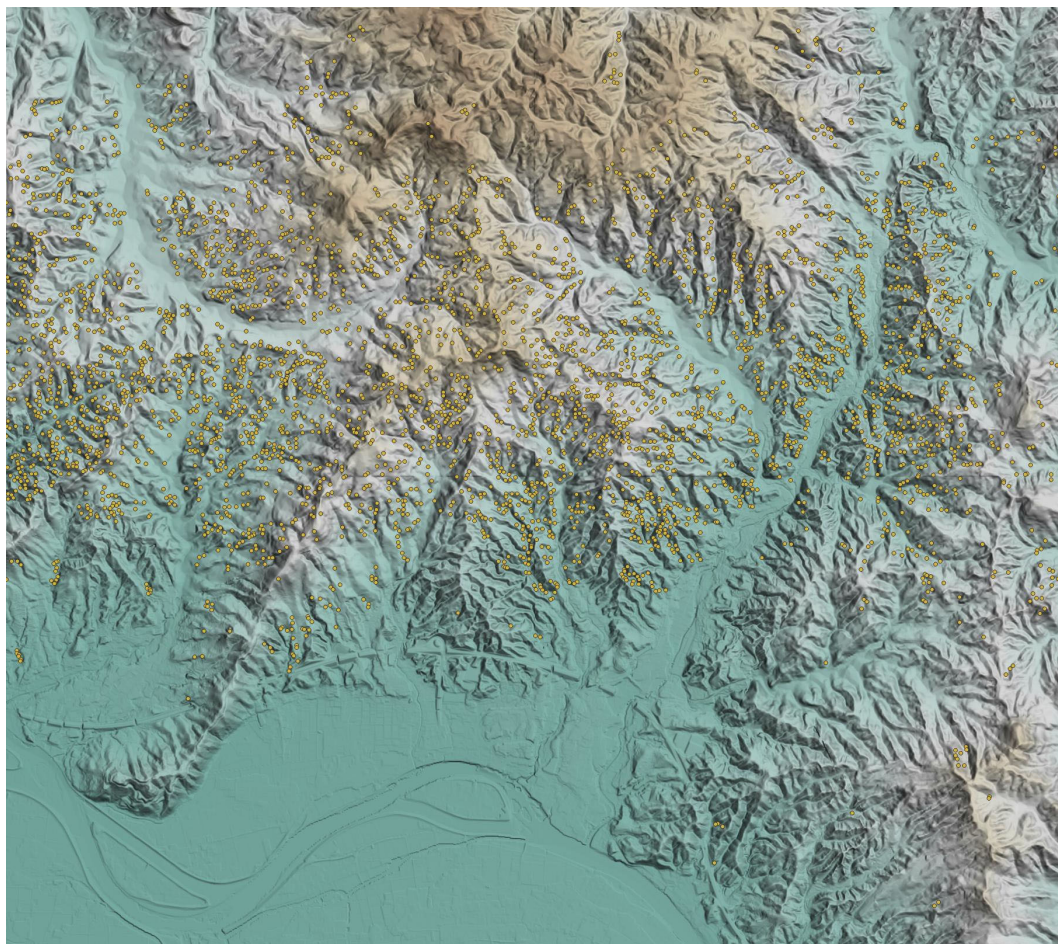
$$C = C_{ini}$$
$$h = D$$

仮定

- 全域が飽和していると仮定（簡易的な雨の扱い）
- 侵食可能な深さは1mに制限（土壌深さ）
- 崩壊面積は10m x 10m (5m解像度で2 x 2 meshes)

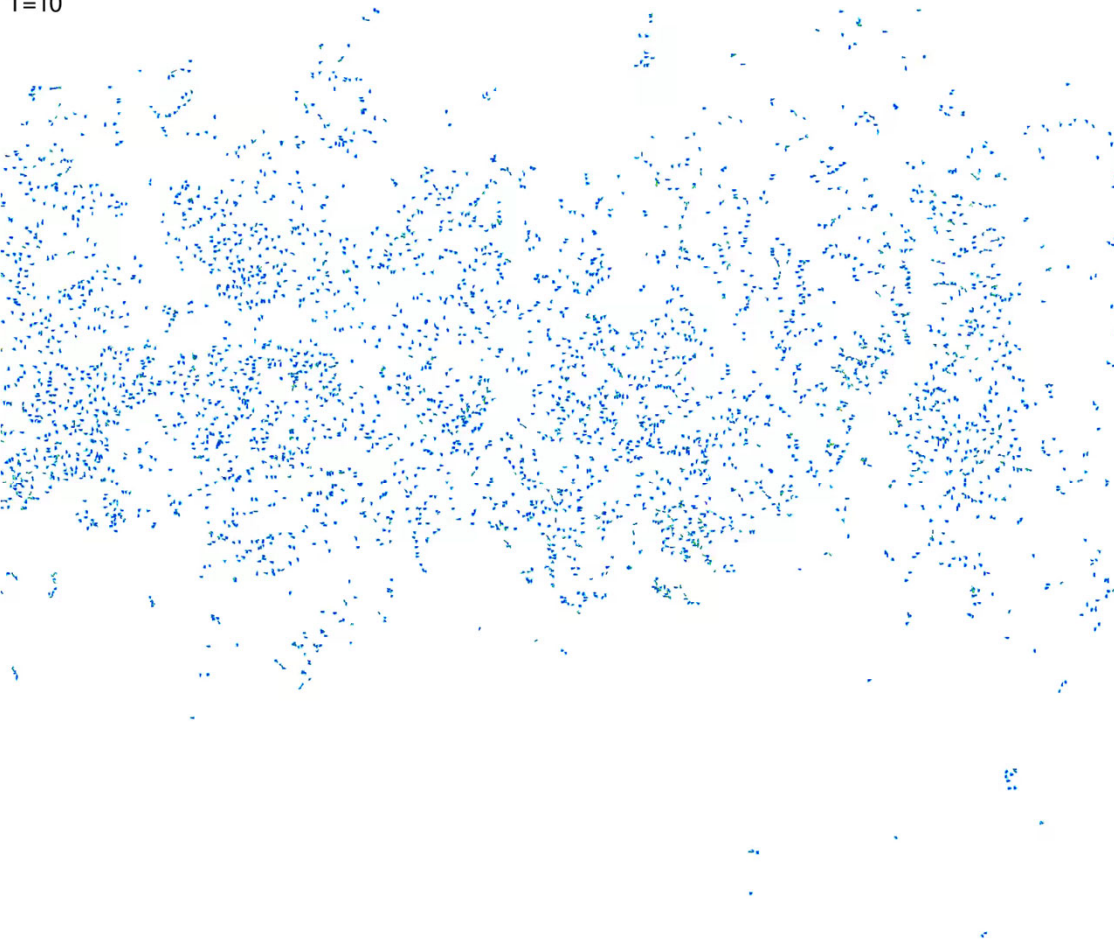
➡ 一旦発生させれば、下流を侵食して流れていく。すなわち崩壊の発生場所情報だけで計算ができる。

再現計算：条件生成

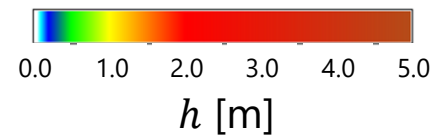
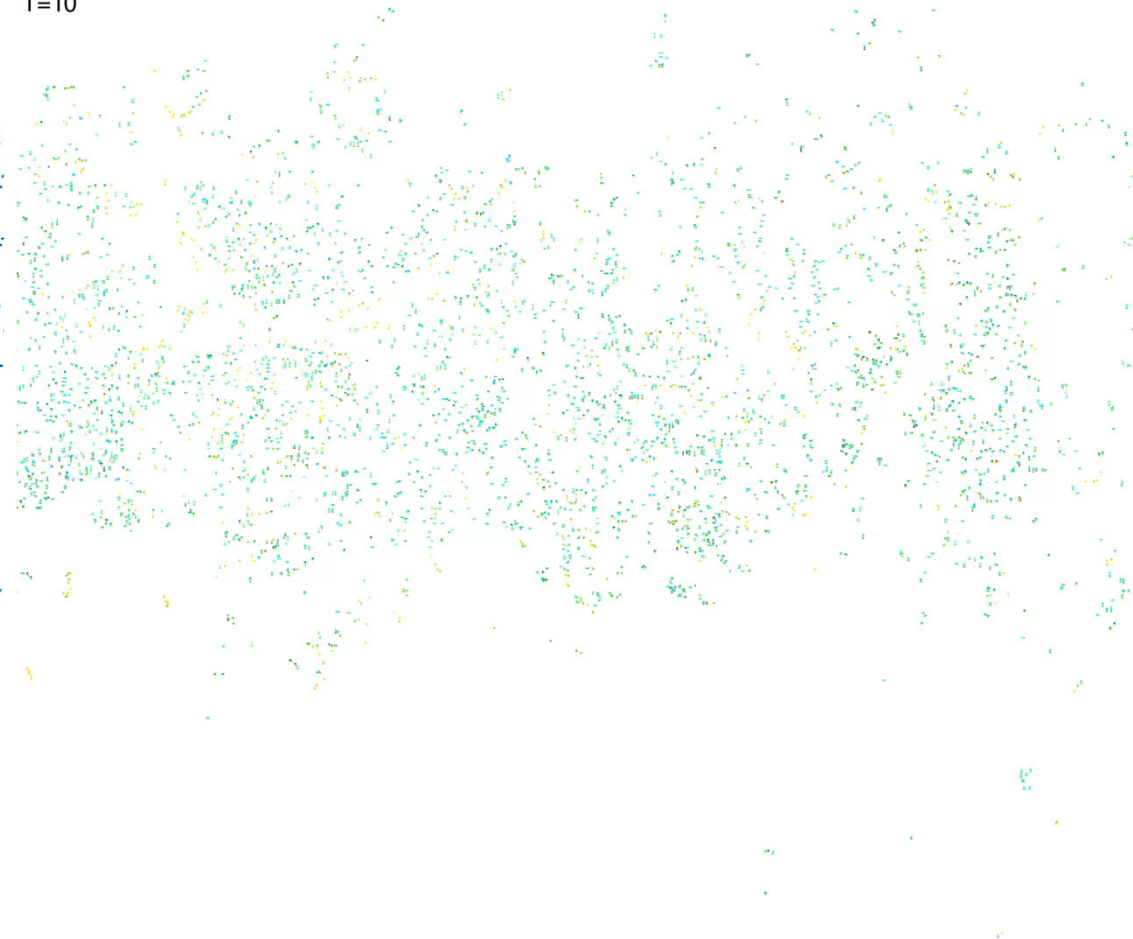


再現計算：条件生成

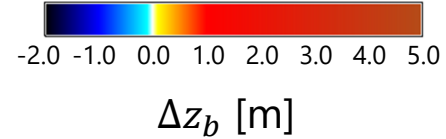
T=10



T=10

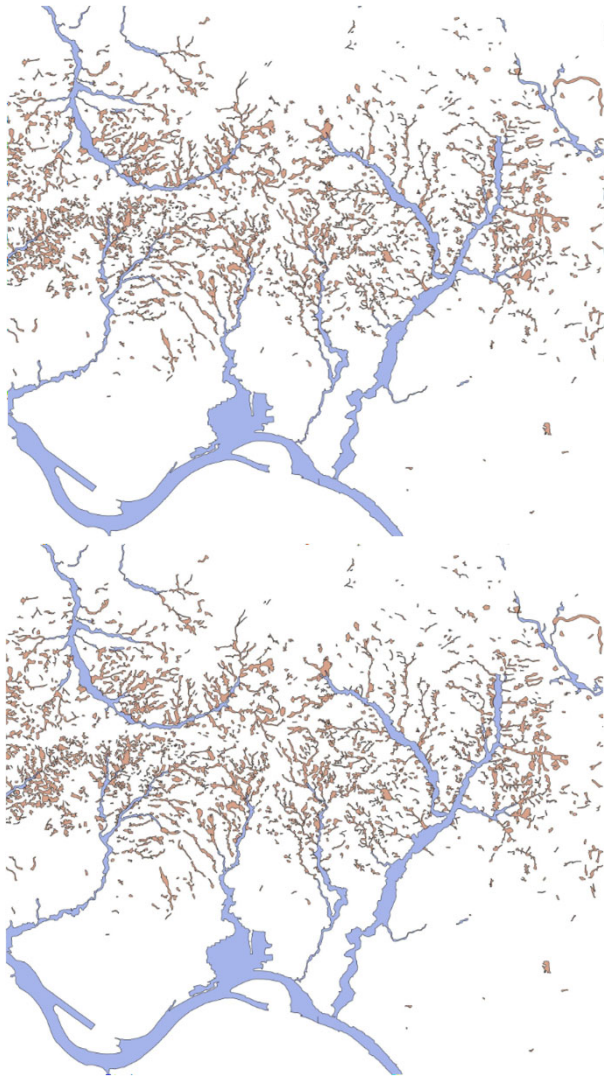


Water depth



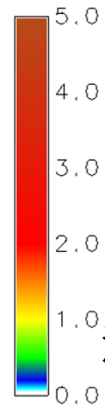
Terrain deformation

再現計算：検証



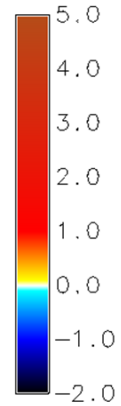
崩壊痕跡 VS |地形変化|>0.01m

wl_{max} [m]

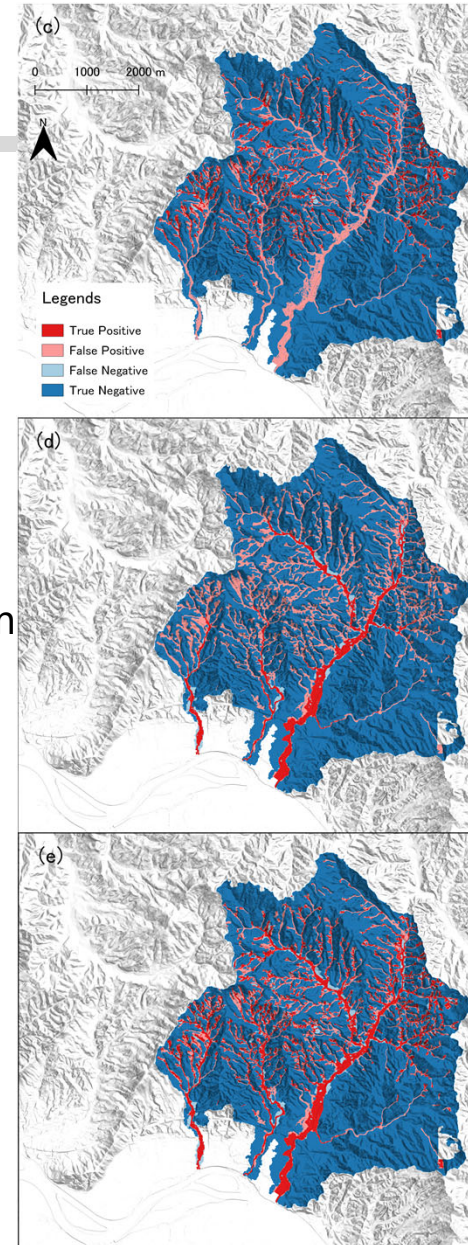


氾濫痕跡 VS 最大水深 > 0.01m

Δz_b [m]



全痕跡 VS |地形変化|>0

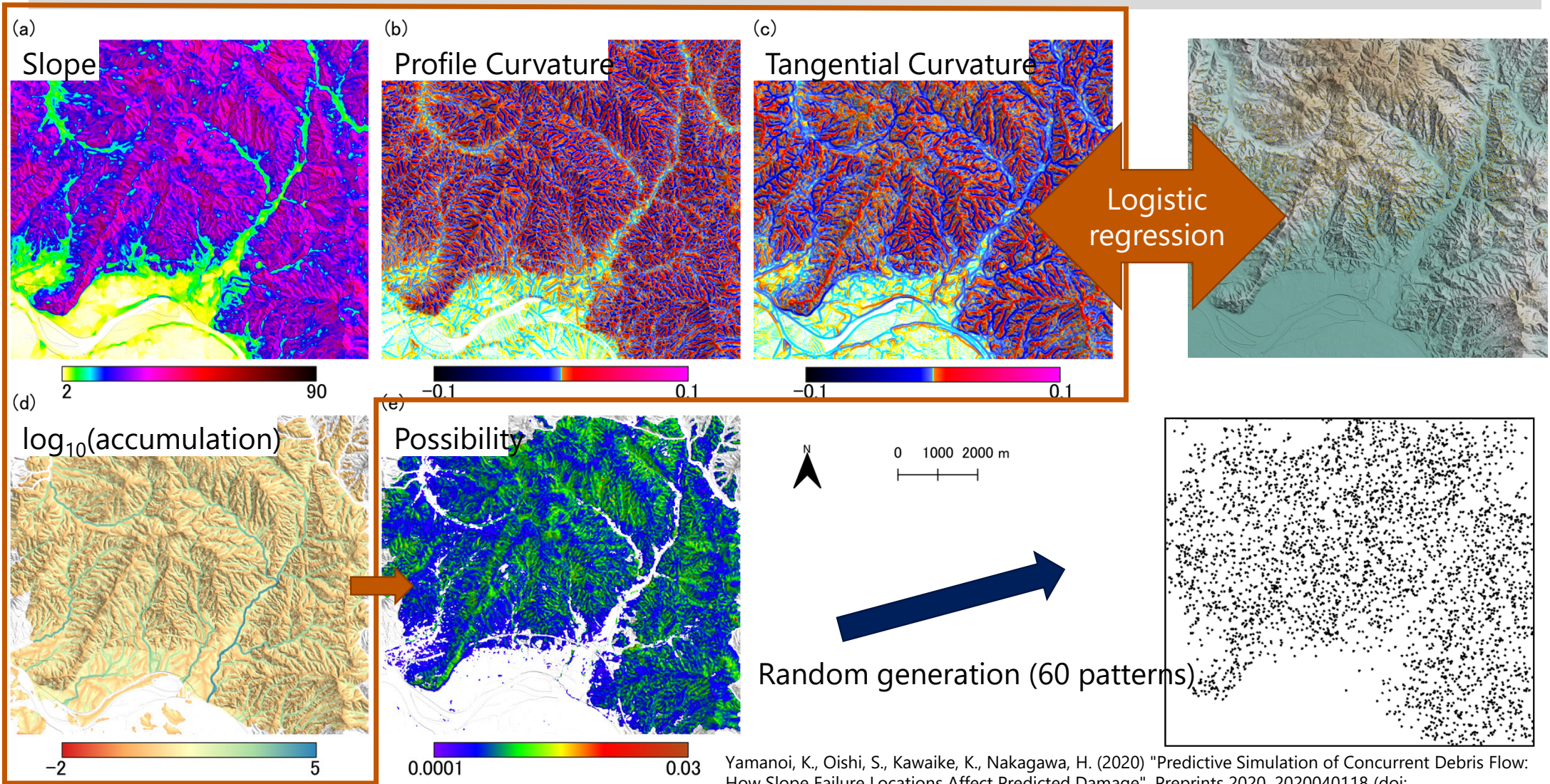


Accuracy = 0.867
Recall = 0.744
Precision = 0.341

Accuracy = 0.835
Recall = 0.747
Precision = 0.234

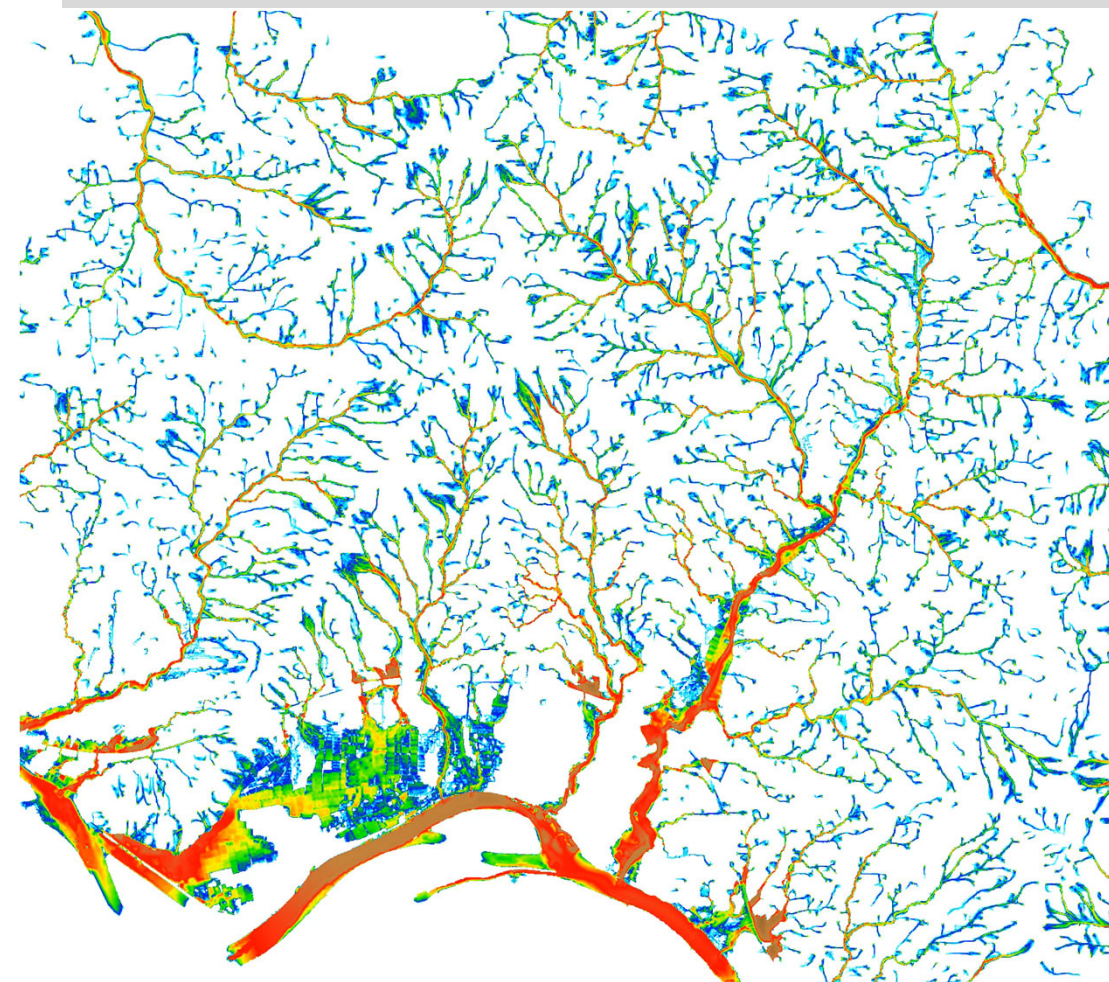
Accuracy = 0.881
Recall = 0.794
Precision = 0.553

Logistic regressionと疑似崩壊データ生成



Yamanoi, K., Oishi, S., Kawaike, K., Nakagawa, H. (2020) "Predictive Simulation of Concurrent Debris Flow: How Slope Failure Locations Affect Predicted Damage", Preprints 2020, 2020040118 (doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1000000/v1>)

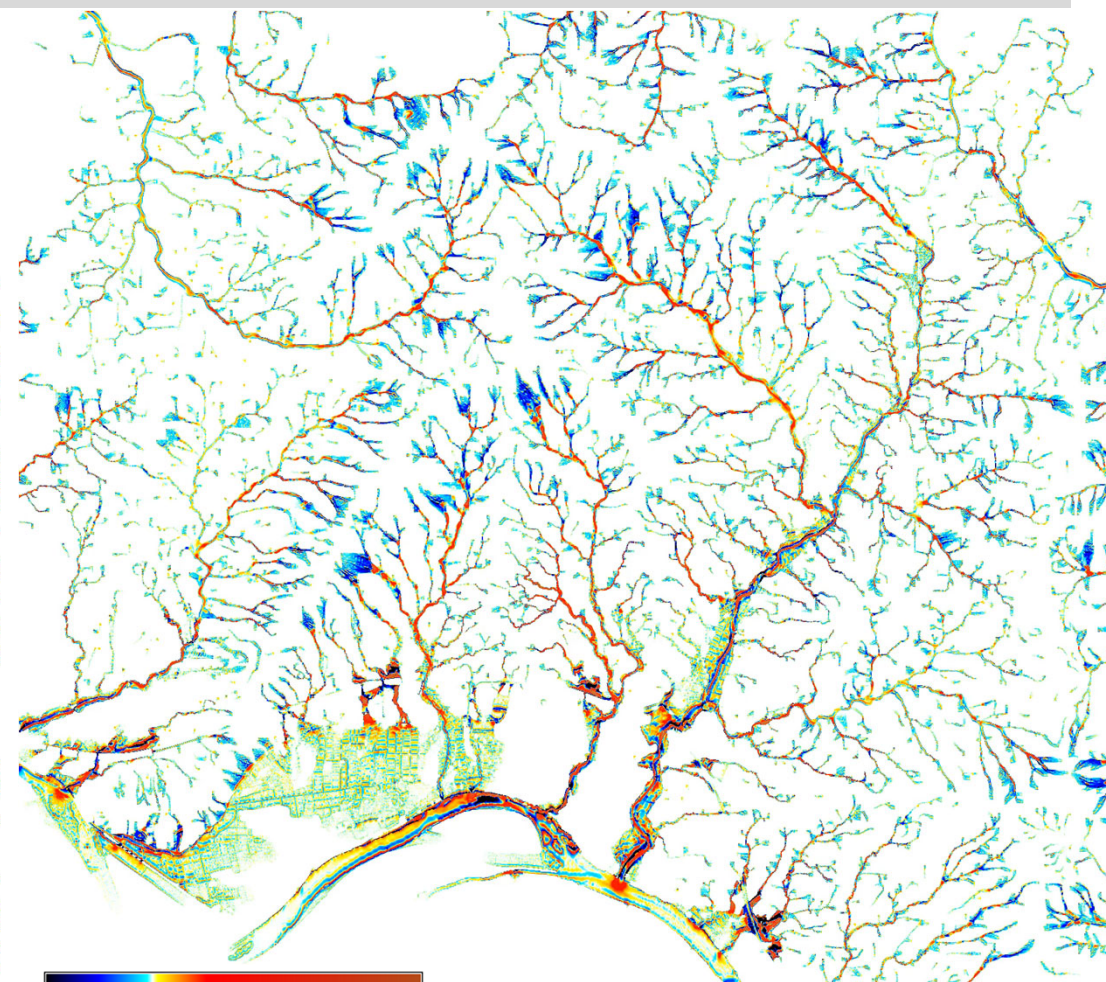
60casesの計算結果



0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0

wl_{max} [m]

Maximum water level

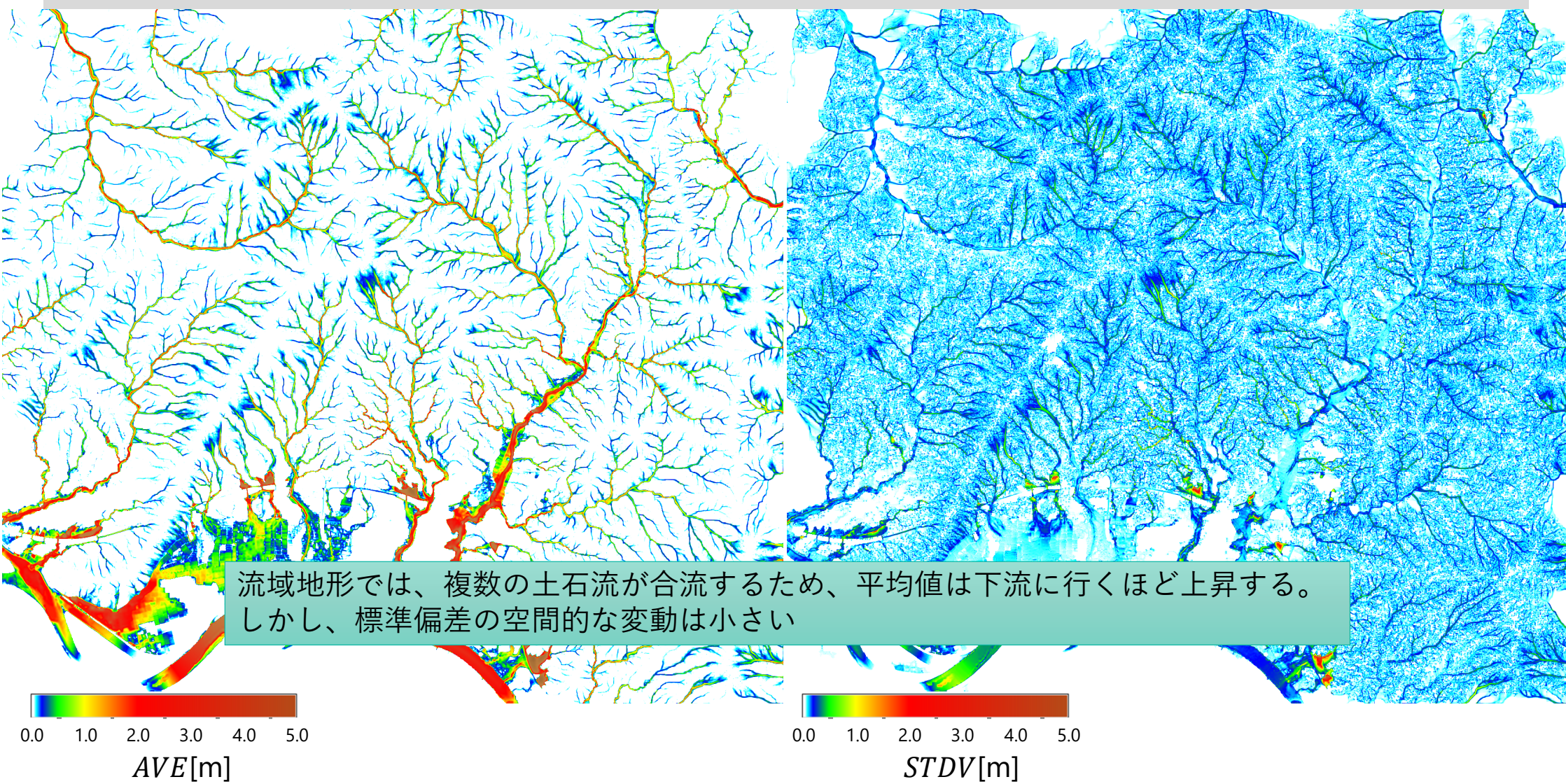


-2.0 -1.0 0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0

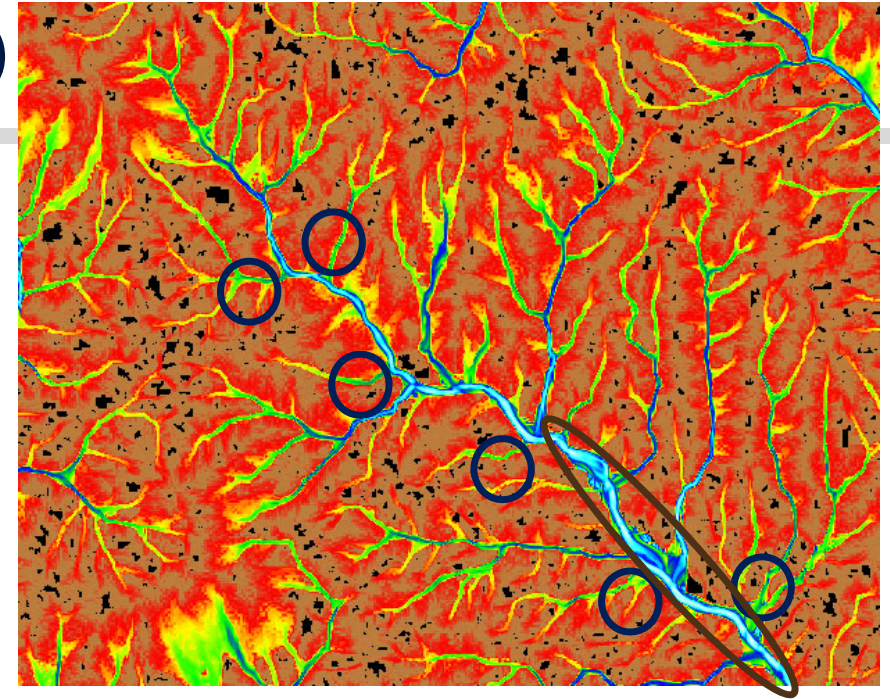
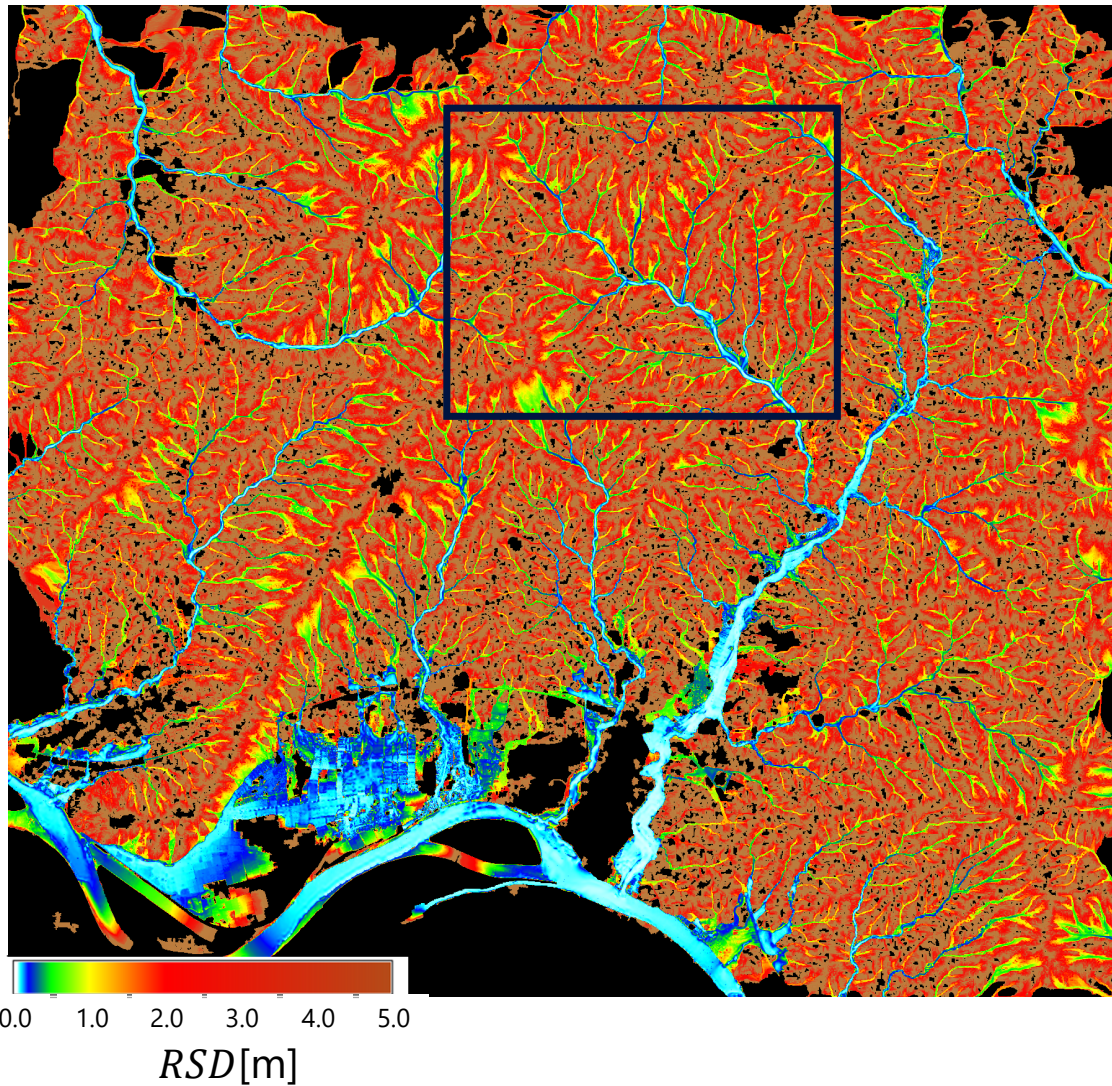
Δz_b [m]

Terrain deformation

最大水位の平均値と標準偏差



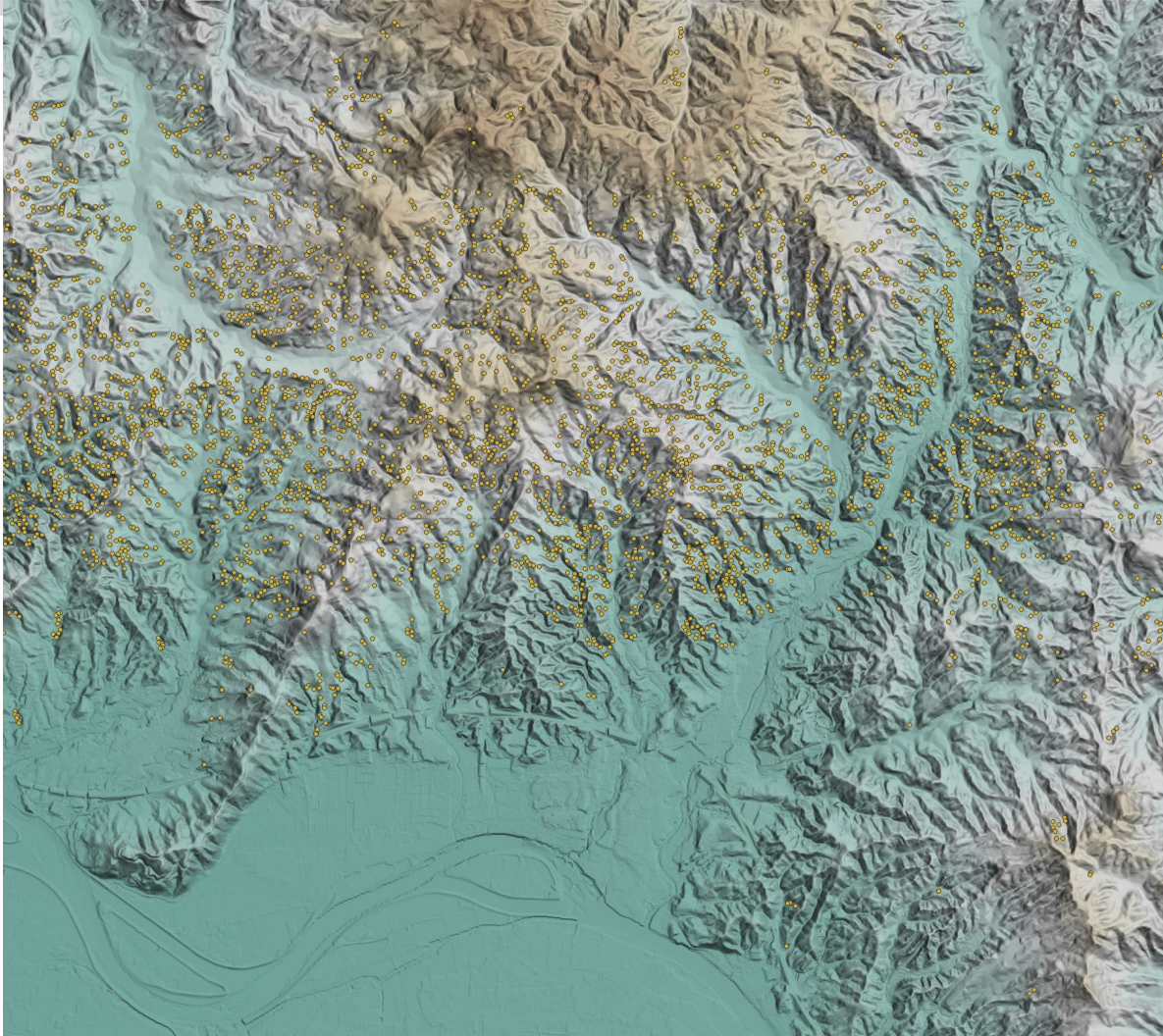
最大水位のRSD（相対標準偏差）



土石流が発生する溪流の出口では、 $RSD=0.5 \sim 1$ 。
すなわち、このような箇所では、斜面崩壊発生位置
による影響が大きい。

対して、下流の居住域では、RSDは0.1程度となる。
つまり、崩壊位置に関わらずほとんど同程度の最大
水深が生じることになる。すなわち、この付近の予
測性は高いと言える。

流域地形による不確実性低減



流域地形は一般的に収束型の凹地形を呈する。

このため、個々の土石流の位置に関わらず、下流では近い規模の被害が生じうる。

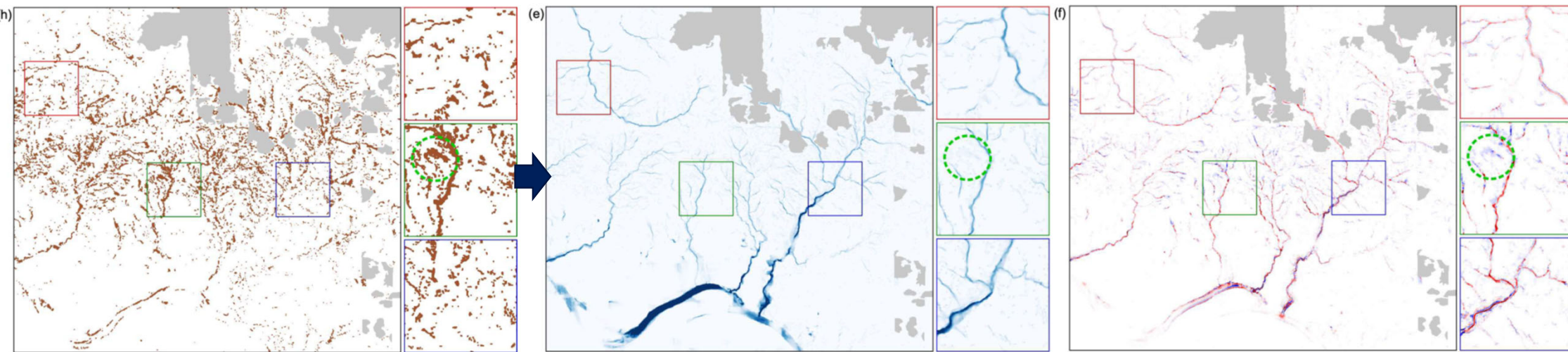
すなわち、個々の発生位置を精度よく予測しなくても、下流の被害は予測できると考えられる。

結論

- Logistic-regressionで得られる斜面崩壊の発生確率分布から擬似崩壊データを生成し、これを元にした予測型シミュレーションが実行できた。
- 土石流の発生部近傍の不確実性は大きいですが、流域地形では合流を重ねることで不確実性が相対的に低減することが明らかになった。
 - 従来より感覚的には知られていることだが、本シミュレーションで定量化された。
- 地質依存性、規模依存性、土石流生起タイミングの影響等については検討が必要
- 大規模な計算資源を利用することで、斜面崩壊の発生位置が被害に及ぼす影響が定量化できた。
- 一方で、土砂動態モデルのように“物理的な”崩壊予測や、降雨の流出プロセスとの統合は実現できていない。地形モデルを方法も、現状では大きな意味がある。

今後の展望など

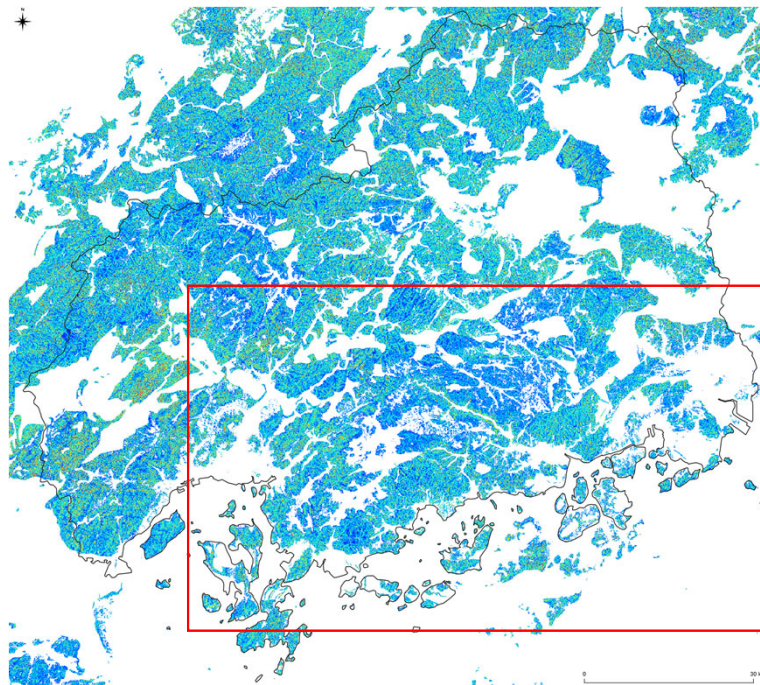
- 以上の手法により、過去の土石流・斜面崩壊のデータから得られる統計データを基に、類似した**疑似被害データ**を作る技術が開発された。
- 機械学習の**訓練データへの応用**が考えられる。
 - 特に災害は稀な現象であることから、観測ベースでは訓練に十分なデータが得られない。疑似災害シミュレーションは、この問題を解決できる。
- 例：衛星画像からの被害抽出に、疑似被害データで訓練したAIを用いる。



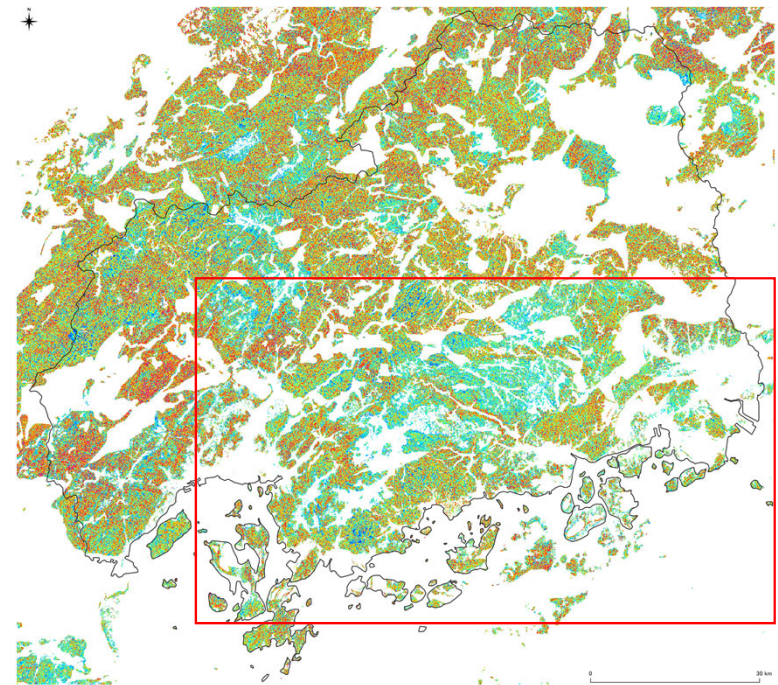
N. Yokoya et al., "Breaking Limits of Remote Sensing by Deep Learning From Simulated Data for Flood and Debris-Flow Mapping," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, doi: 10.1109/TGRS.2020.3035469.

今後の展望など

- 富岳（全体の1/414）を用いれば、解像度10mの広島県南部全域のシミュレーションを1時間程度で実行できる。
- 仮想的な降雨条件から疑似的な斜面崩壊を発生させることで、不確実性を含めて、雨から定量的に被害を推定できる。



Max-SWI: 240 [mm]



Max-SWI: 260 [mm]

