



土石流解析の最新事例紹介

- 家屋や地形の設定方法を変えた検討 -

京都大学大学院 農学研究科
森林科学専攻 山地保全学分野
中谷加奈 (Kana Nakatani)

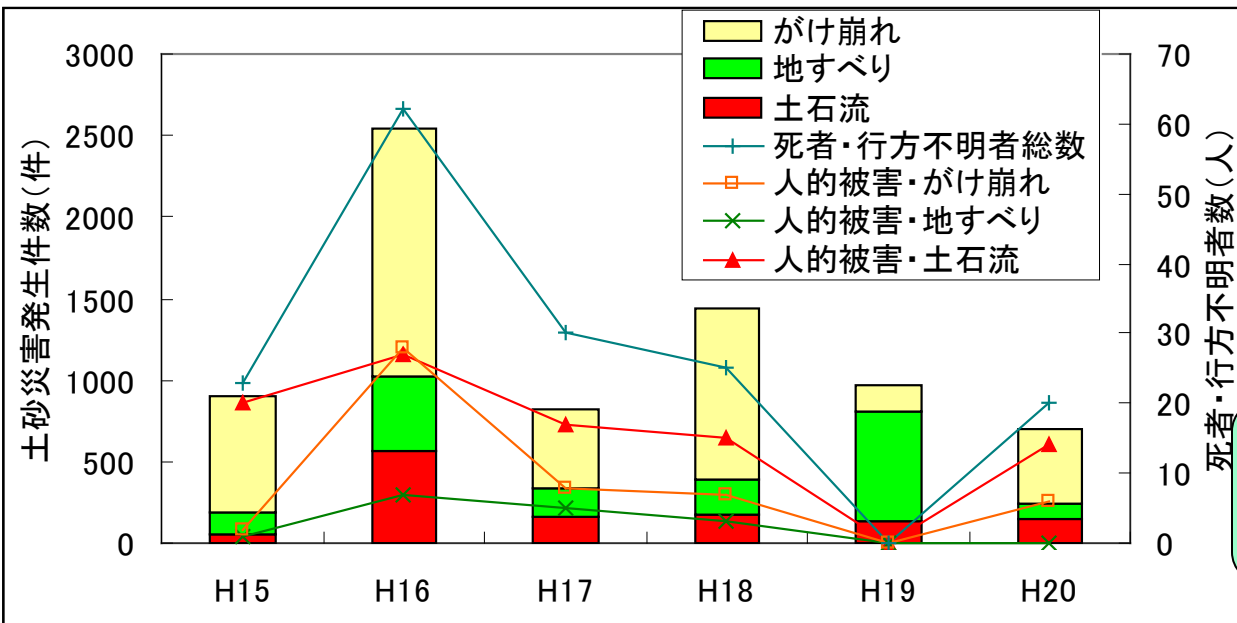


Outline

- 汎用土石流シミュレータKanakano
 - 研究の背景・目的
 - 土石流数値シミュレーション
 - システムの概要
- 土石流解析の最新事例 - 家屋や地形の設定方法を変えた検討 -
 - 事例1 ～家屋の設定方法を変えた検討～
「土石流の氾濫・堆積に及ぼす家屋の影響ー平成24年7月熊本県阿蘇市土井川で発生した土石流を対象としてー」
 - 事例2～地形の設定方法を変えた検討～
「土石流数値シミュレーションの一次元計算領域と二次元計算領域の設定方法の検討」

はじめに

日本は急峻な地形にあり、世界的にみても多雨地帯に属するため、土石流災害が毎年のように発生する。



※平成21年
国土交通省砂防部調べ

土石流災害は、
発生件数に対する
被害の甚大度が最も高い

土石流災害を防止し、軽減する
ための研究がこれまでに多
くなされてきた。

土石流の防止・軽減のための手法

対策

ハード対策

構造物による方法

Ex. 砂防堰堤(不透過型・透過型)



(土石流到達前)

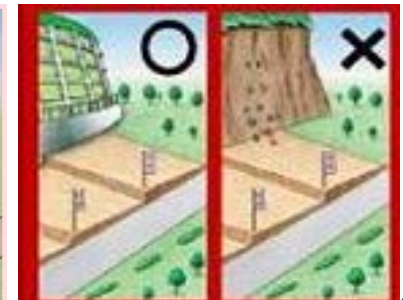


(土石流到達後)

ソフト対策

構造物によらない方法

・ ハザードマップ作成



・被害領域や規模を高精度で予測することが重要

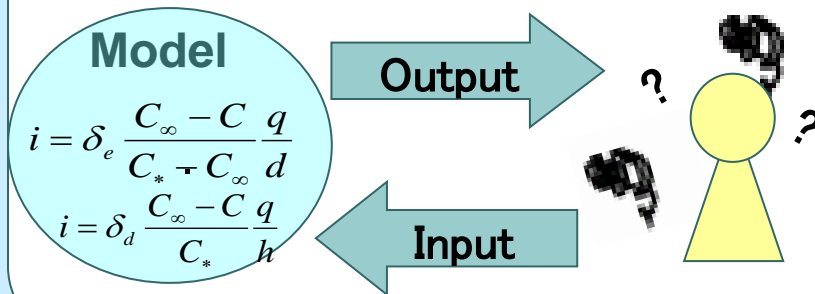
・予測には、**土石流数値シミュレーション**が有効なツール

土石流数値シミュレーションの現状

現状の課題

利便性

- ・既存の土石流シミュレータにはGUIの実装されたものが少ない。
- ・高度な知識・技術を持つ一部の専門家以外が手軽に計算を実施することは困難。



モデル・プログラムの適用

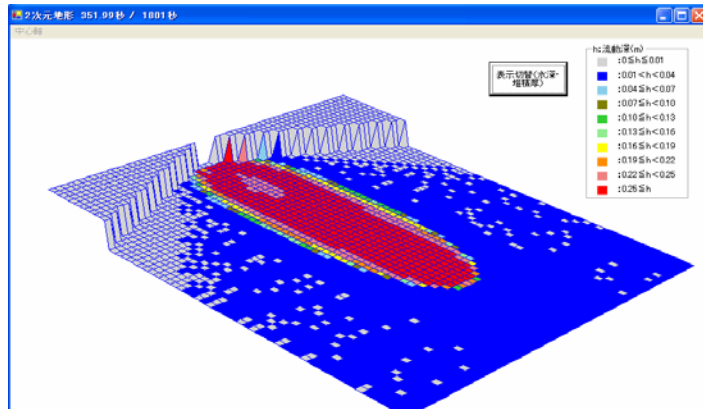
- 初期条件によって、別個のモデル・プログラムを準備する必要。
- ・多様な砂防堰堤を設置した条件
 - ・急勾配から緩勾配に至る
遷移過程
 - ・一様粒径と混合粒径
- 専門家にとっても、煩雑な作業

GUI: システムにおける情報の入出力方法

●●● | 目的

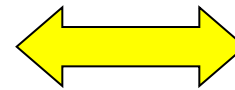
- **汎用土石流シミュレーションシステム**を開発
 - 扱いやすいGUIを実装
 - 既存のプログラムに改良を加え、複数のプログラムを効率的に統合・集約

GUIを実装した汎用土石流シミュレーションシステム

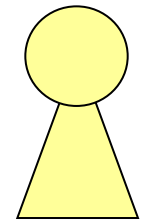


出力画面例
(水深)

入力が容易



結果を直感的
に理解できる



User

条件に応じた
モデルが適用

高度な計算が
手軽に実行可能

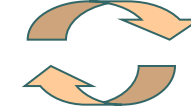
開発環境: MS Visual Basic.NET

利点: 統合・改良がおこないやすい、GUI実装が容易

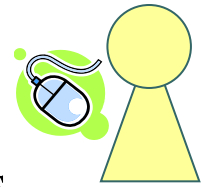
GUI (Graphical User Interface)



Graphics



Events

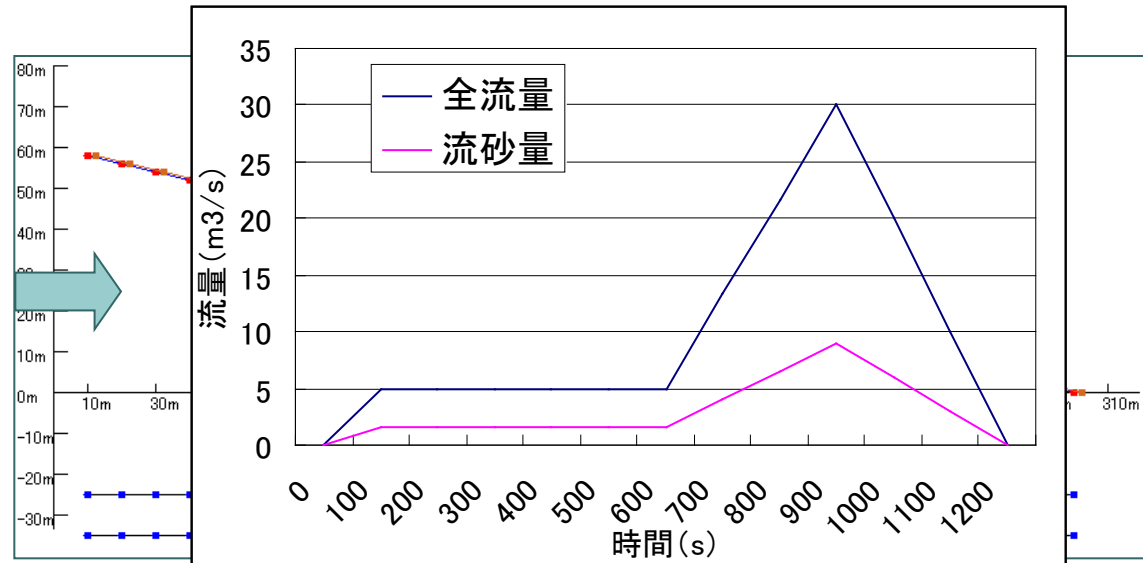


情報を視覚化し、インタラクティブな操作を可能とする**GUI**を実装することで、システムの使いやすさを格段に向上させることができる。

情報の視覚化

	A	B	C
1	0	0	0
2	100	5	1.5
3	200	5	1.5
4	300	5	1.5
5	400	5	1.5
6	500	5	1.5
7	600	5	1.5
8	700	13.3	3.99
9	800	21.6	6.48
10	900	30	9
11	1000	20	6
12	1100	10	3
13	1200	0	0

6.00,	6.00,	10.00
4.00,	4.00,	10.00
2.00,	2.00,	10.00

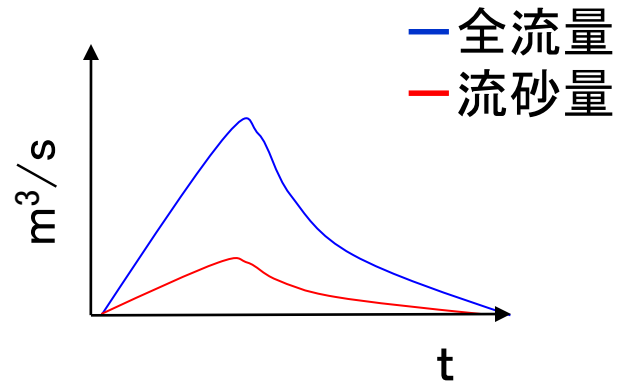
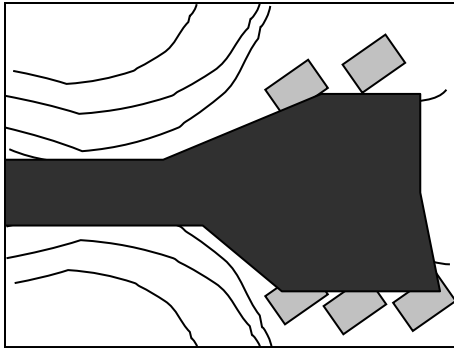


河 流量データ

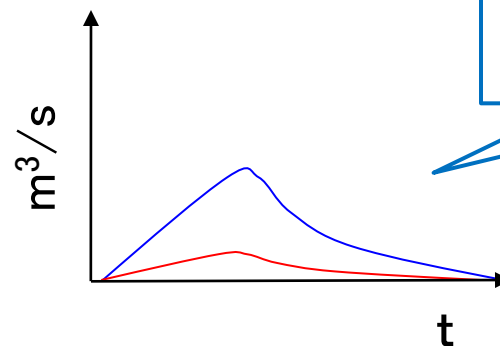
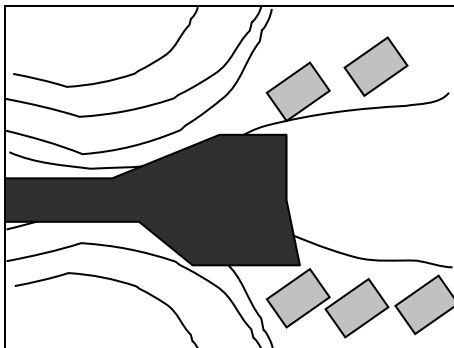
GUIの実装によって (出力)

Graphical results; 理解が容易

施設無し



施設有り





土石流数値シミュレーション

- 設定された初期条件上での土石流の挙動を追跡・表現
- 被害に関わる土石流の影響範囲や程度を知る
 - 物理的諸量：流動深、堆積深、速度、氾濫範囲、到達時刻、流体力、など
- 提案されているモデル、プログラムは多数存在
 - 対象領域や事象により、適するモデル・プログラムが異なる
 - 研究者ごとに異なったアプローチで構築されている
 - Ex:江頭モデル、高橋モデル、椿モデル
 - 最近では高濱らの二層流モデル、鈴木モデル



流れと底面の
摩擦が支配的

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

(運動方程式)

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

(全容積の保存則)
質量保存則

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

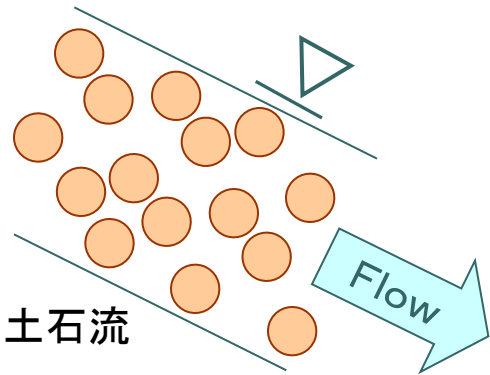
(流水中の土砂の保存則)
質量保存則

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

(河床の連続式)
河床位方程式

土石流計算において、求めるべきは

- 河床の抵抗 τ
- 侵食・堆積速度 i



- 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 : 土石流の密度
- i : 侵食・堆積速度
- τ : 河床面せん断力

研究者の間で統一的な見解がなされていない
→ 江頭らのモデル、中川・高橋らのモデル

●●● | 河床せん断力 τ

・ $C \geq 0.4C_*$ (土石流) のとき

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{u|u|d^2}{8h^3 \left\{ C + (1-C) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \left[\left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right]^2}$$

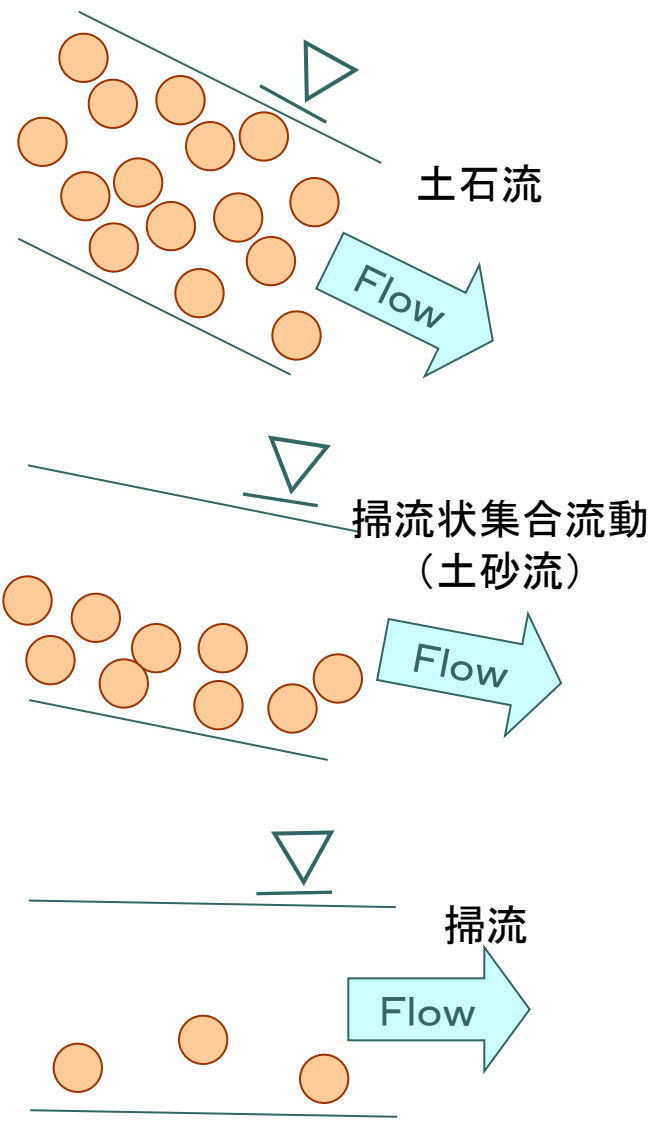
・ $0.01 < C < 0.4C_*$ (掃流状集合流動) のとき

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{1}{0.49} \frac{u|u|d^2}{h^3}$$

・ $C \leq 0.01$ (掃流砂) または $h/d \geq 30$ (泥流状乱流土石流) のとき

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{gn_m^2 u|u|}{h^{4/3}}$$

- u : 流速
- ρ : 間隙流体密度
- σ : 砂礫密度
- d : 粒径
- C : 土砂濃度
- C_* : 河床の容積濃度
- σ : 砂粒子密度
- n_m : マニングの粗度係数





侵食堆積速度式 i

勾配 θ \Leftrightarrow 濃度 C

- 河床の侵食・堆積は、平衡土砂濃度 C_∞ と実際の土砂濃度 C の差に起因。

・侵食 ($C_\infty \geq C$) のとき

$$i = \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{q}{d}$$

q : 土石流の単位幅流量

d : 平均粒径

C_∞ : 平衡土砂濃度

δ_e : 侵食速度係数

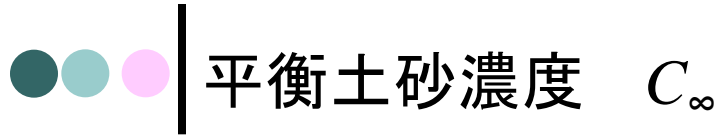
0.0007がよく使われる

・堆積 ($C_\infty < C$) のとき、

$$i = \delta_d \frac{C_\infty - C}{C_*} \frac{q}{h}$$

δ_d : 堆積速度係数

0.05がよく使われる



平衡土砂濃度 C_∞

$\tan \theta_w > \tan \phi$ のとき

$$C_\infty = C_{\max} = 0.9C_*$$

ϕ : 砂礫の内部摩擦角
 θ_w : 水面勾配

$\tan \theta_w > 0.138$ (土石流) のとき

$$C_\infty = \frac{\rho \tan \theta_w}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_w)}$$

$0.138 \geq \tan \theta_w > 0.03$

(掃流状集合流動) のとき

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan \theta_w}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \right\}^2$$

$\tan \theta_w \leq 0.03$ (掃流砂) のとき

$$C_\infty = \frac{(1 + 5 \tan \theta_w) \tan \theta_w}{\frac{\sigma}{\rho} - 1} (1 - \alpha_c^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}) (1 - \alpha_c \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}})$$

$$\alpha_c^2 = \frac{2(0.425 - \frac{\sigma \tan \theta_w}{\sigma - \rho})}{1 - \frac{\sigma \tan \theta_w}{\sigma - \rho}}$$

$$\tau_{*c} = 0.04 \times 10^{1.72 \tan \theta_w}$$

ただし $\tau_* = \frac{\rho}{\sigma - \rho} \frac{h \tan \theta_w}{d}$ であり

$\tau_* \leq \tau_{*c}$ のとき, $C_\infty = 0$

τ_* : 無次元掃流力

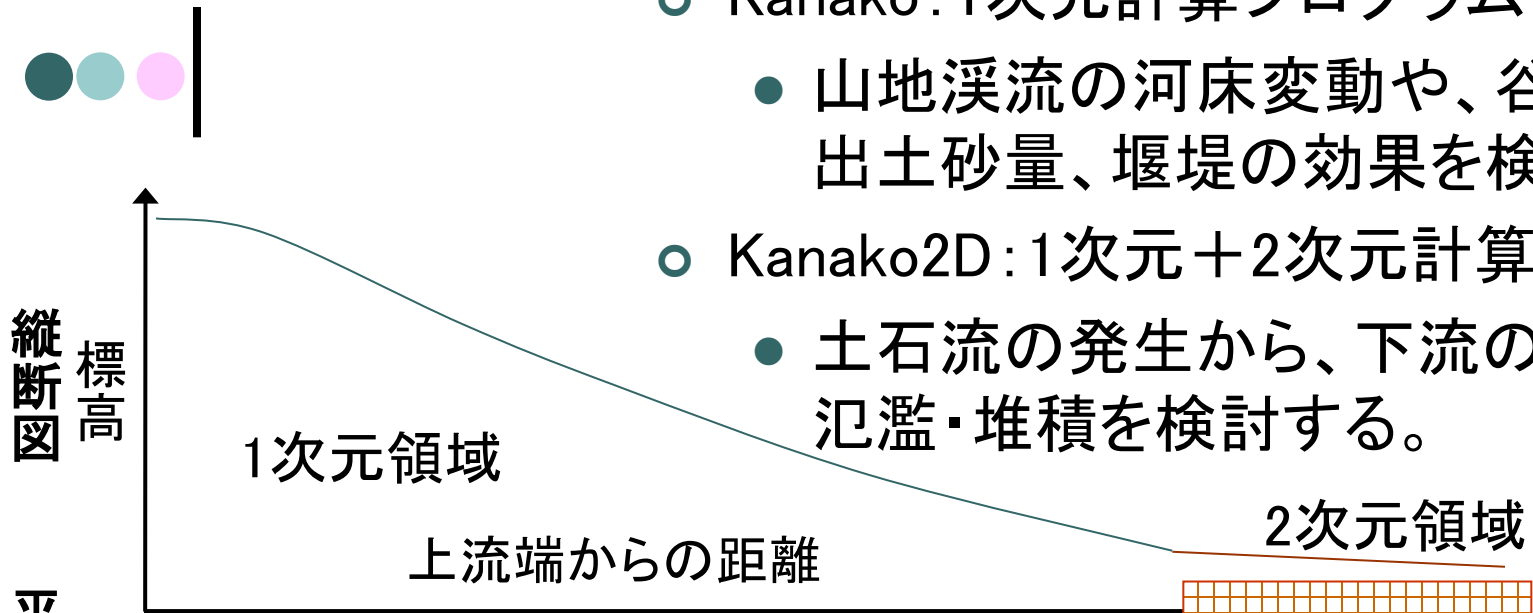
(その粒子スケールの動きやすさを示す指標)

τ_{*c} : 無次元限界掃流力

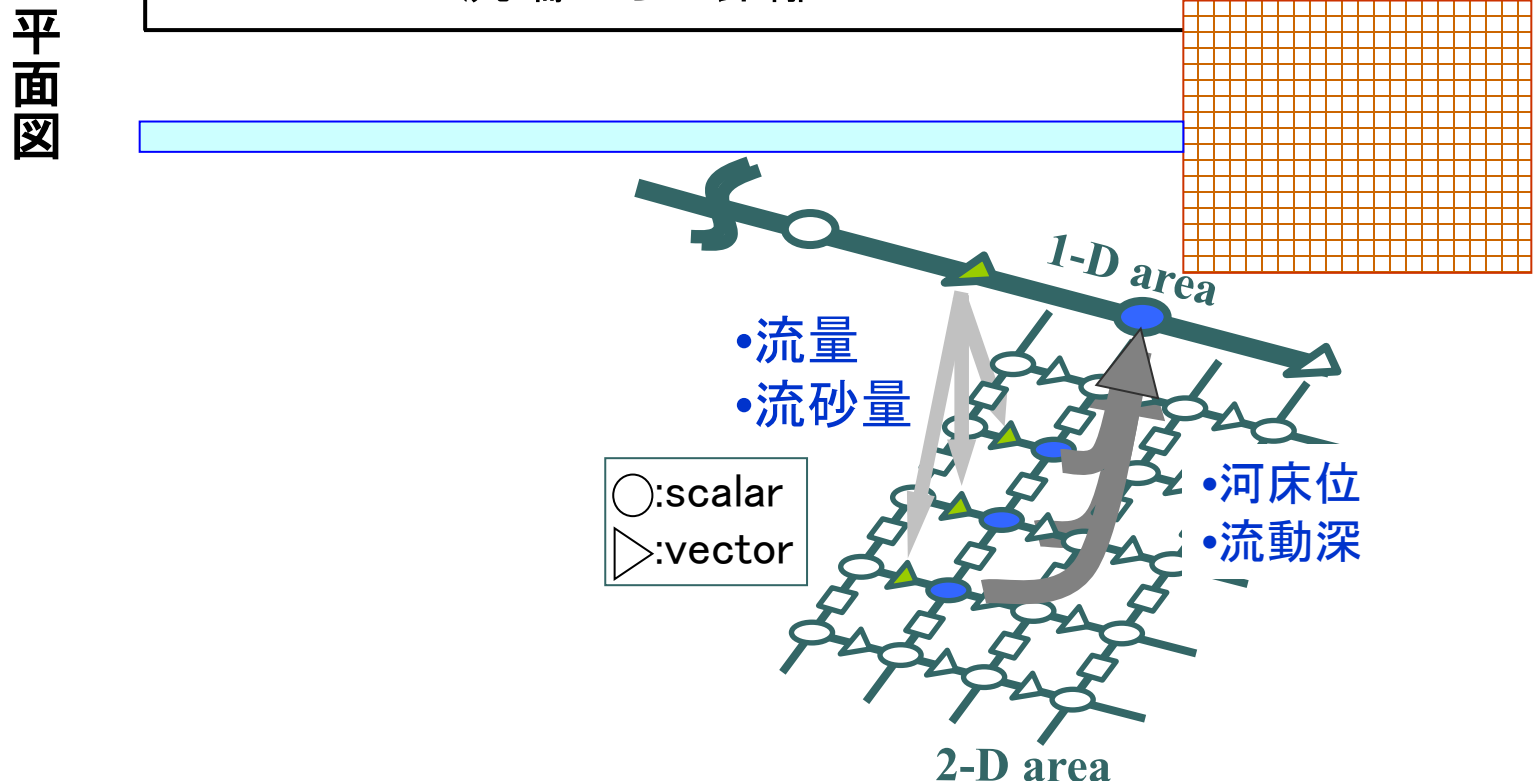
(土砂が動き出すときの流れの指標)

●●● | Kanako、Kanako2Dの紹介

- GUIを実装
- モデルの集約・統合・改良を実施
- 砂防・地すべり技術センターのWebsiteから無料でプログラム、マニュアルがDL可能(日本語版、英語版)
<http://www.stc.or.jp/10soft/003frame.html>
- Windows XP、Vista、7 (32bit、64bit)、8で動く
 - XPが相性がいい(VB.NETで開発しているため?)
 - 特に7で動かしたとき、2D計算になると描画が遅かったり、主画面で行った設定が画面上にすぐに反映されないことも



- Kanako: 1次元計算プログラム
 - 山地溪流の河床変動や、谷出口での流出土砂量、堰堤の効果を検討。
- Kanako2D: 1次元+2次元計算プログラム
 - 土石流の発生から、下流の扇状地での氾濫・堆積を検討する。



1次元+2次元

1次元

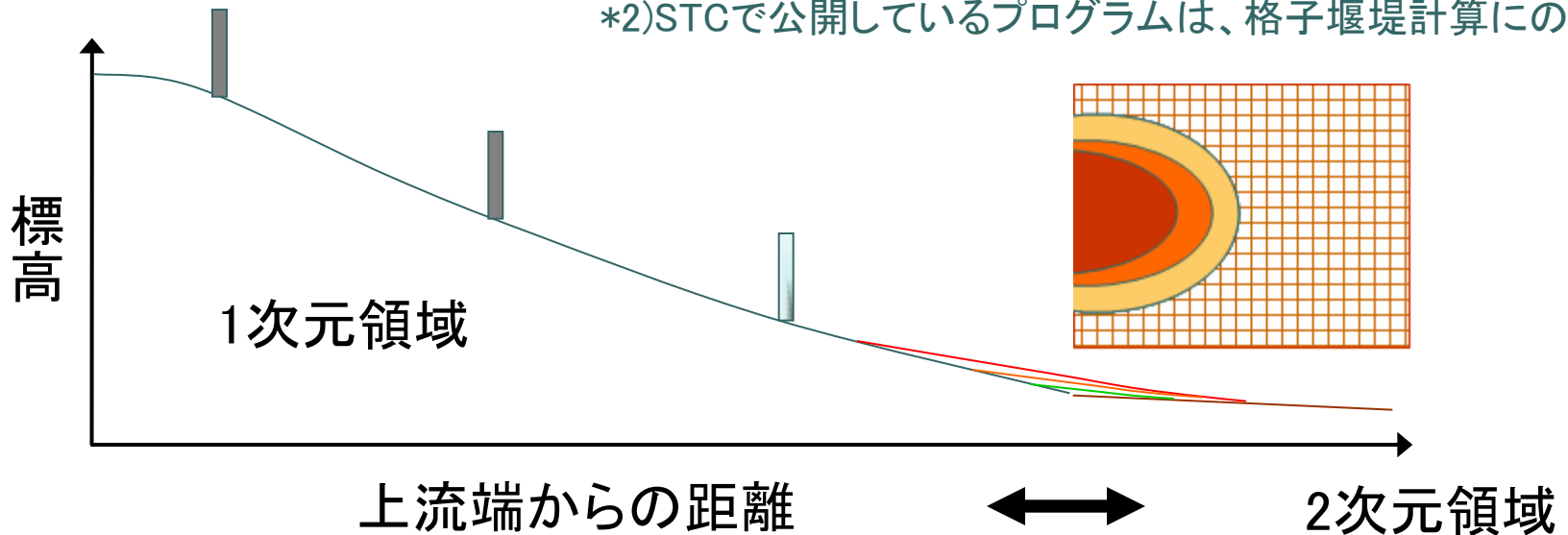
- ・砂防堰堤: 不透過型、スリット、格子型*1)
- ・複数基、異なる種類の組み合わせも可能
- ・対象領域: 土石流、土砂流、掃流砂
- ・(混合粒径に対応)*2)
- ・1次元+2次元のシステム上では、2次元領域の上流部の流動・堆積過程もフィードバック

2次元

- ・1次元領域と連動
- ・構造物の設置が可能

集約・統合したシステム

*1) Kanakoではスリット、格子が計算可能。Kanako2Dはスリットのみ。
*2) STCで公開しているプログラムは、格子堰堤計算にのみ対応。



システム概要

ユーザーインターフェイス部

初期条件 入力

- ・供給ハイドログラフ
- ・地形条件
(標高・川幅・移動床)
- ・砂防堰堤 etc...



結果 出力

- ・流動深
- ・堆積厚
- ・流量
- ・流砂量 etc...



- ・入力が容易
- ・結果を直観的に理解

・経過を確認しながら
計算できる

土石流シミュレーションモデル

粒径

- ・一様
- ・混合*2)

移動形態

- ・土石流
- ・土砂流
- ・掃流砂

堰堤

- ・無し
- ・不透過
- ・透過*1)

領域

- ・1次元
- ・2次元
- ・境界部

・初期条件に応じてエリアごとに、
適切な式、条件を選択して計算
を実施

・ユーザーはこのような処理が
背後で行われていることを意識
することはない

シミュレーション部



Kanako 2D GUI諸機能

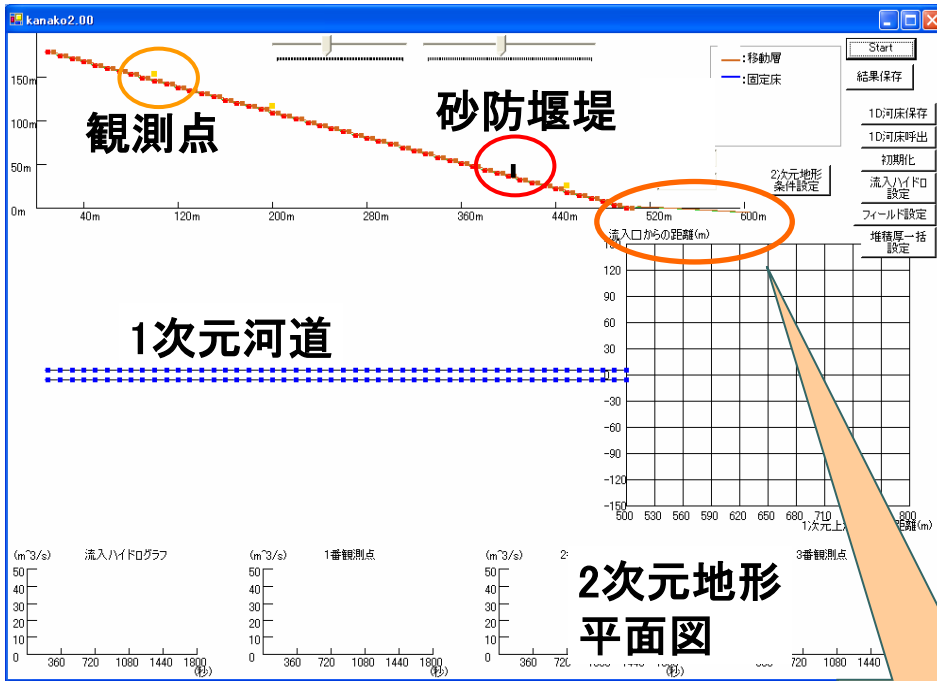
主機能	機能詳細	説明
入力	河床形状	1次元領域の縦断形状・川幅
		2次元領域の地形条件
	砂防構造物	砂防堰堤(1次元): 種類{不透過、スリット}・高さ・設置位置・基数
		導流工(2次元):設置領域・高さ
	流量観測点	数・設置位置 (1次元)
	供給ハイドログラフ	上流端から供給する土石流の流量
	堆積厚	計算開始前の堆積厚(移動床)設定
	フィールド	計算点数
出力	計算実行中 リアルタイムアニメーション 表示	画面の地形上に流動深・堆積厚を表示 2D画面で、流動深・堆積厚を表示
		流量観測点における流量、流砂量の表示 (1次元)

Kanako 2D入力(1)

パラメータは基本的にマウスで設定し、設定した値は画面上で確認できる。

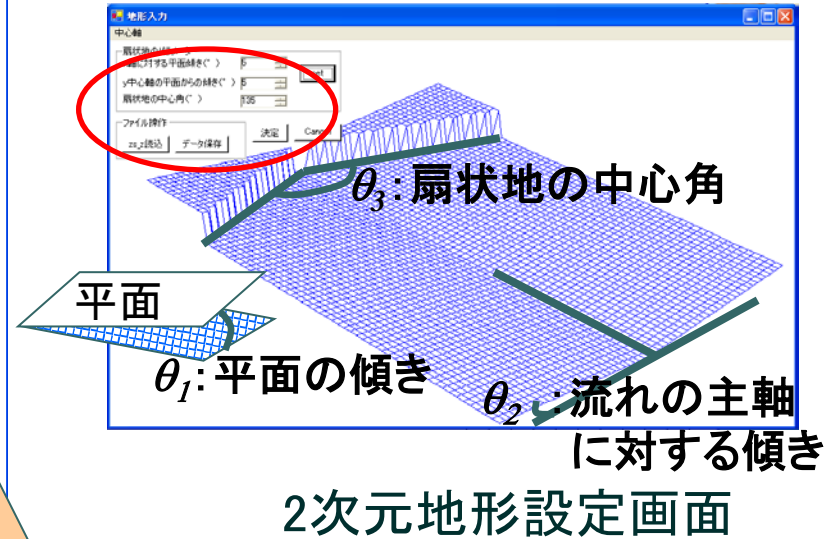
縦断面図

平面図

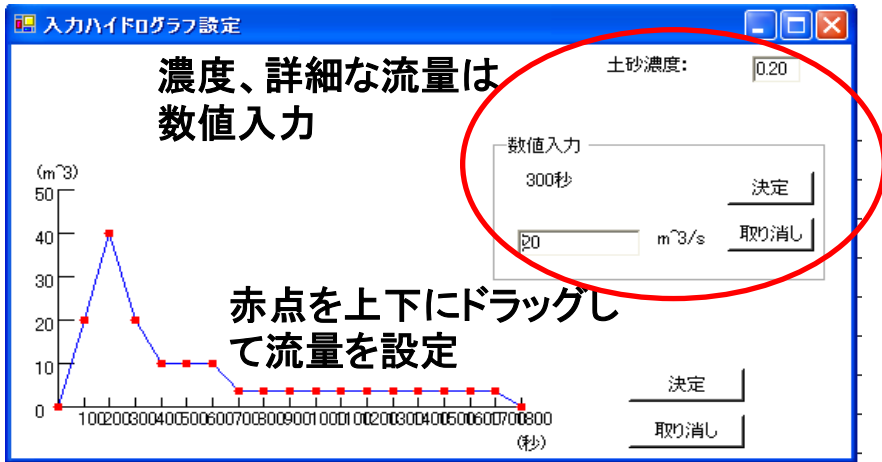


起動画面(1次元河床設定)

2次元地形の
縦断形状の一
部が表示



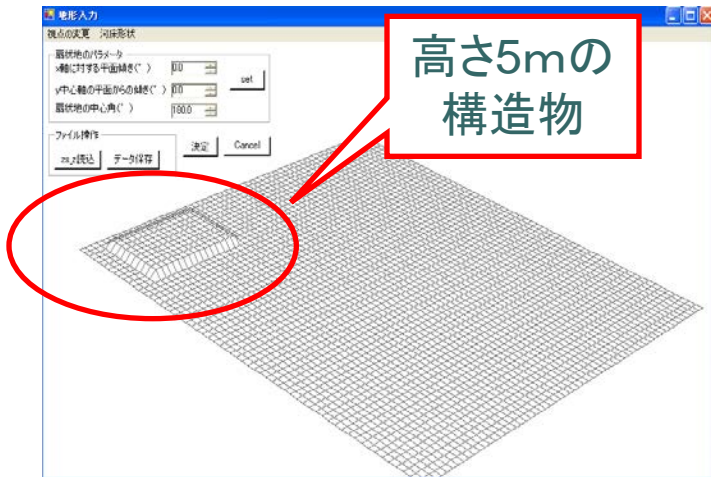
Kanako 2D入力(2)



入力ハイドログラフ

種類はラジオボタンで選択

堰堤詳細 (Ver.2.0_)

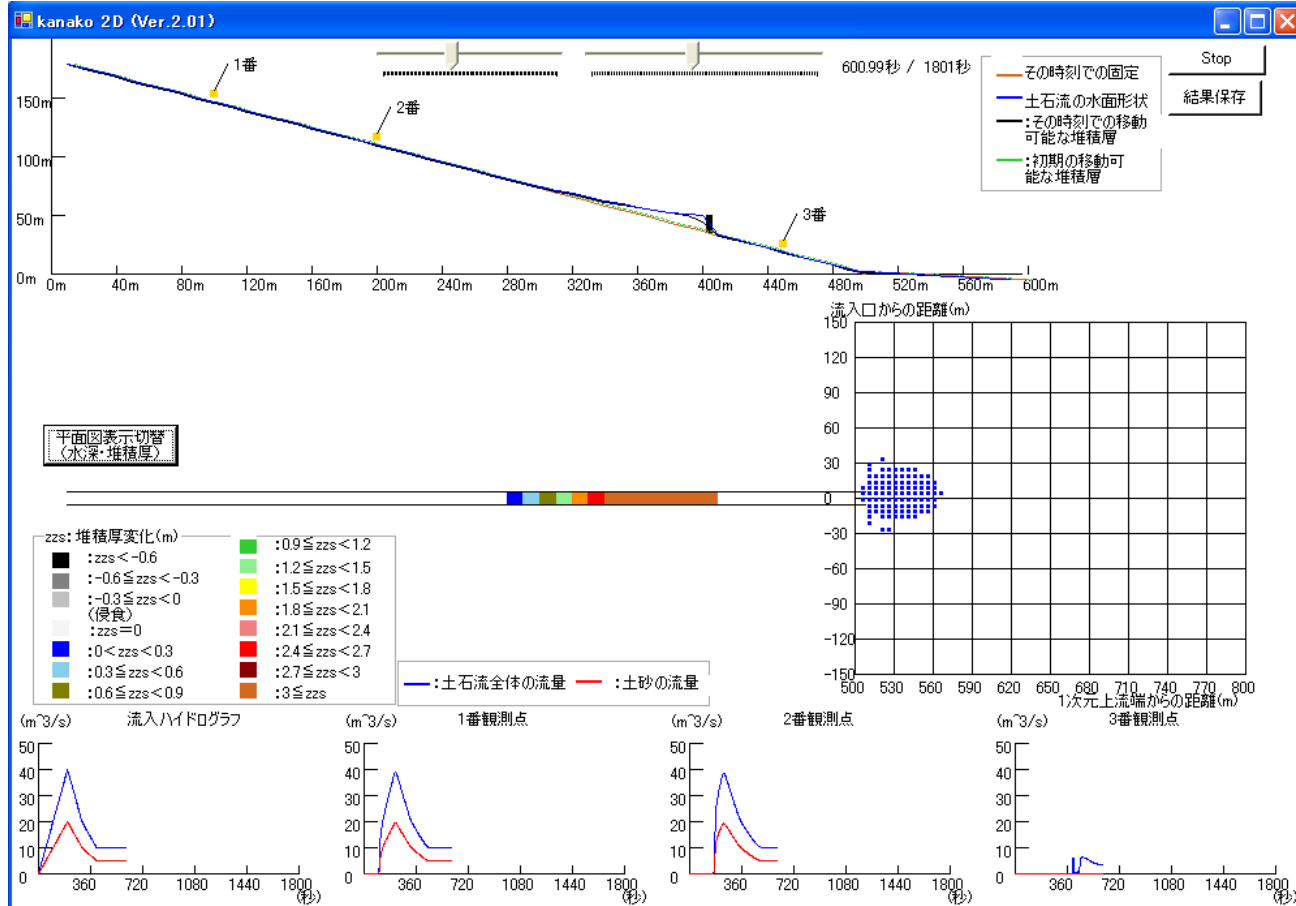


構造物 (Ver.2.0_)

数値入力

出力(1)

計算を開始すると、2つの画面上でアニメーションが表示される。



水面・
河床形状

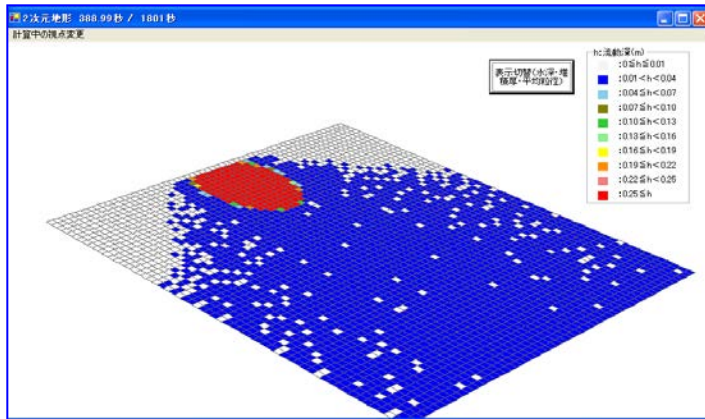
流動深・
堆積厚

各観測点での
流量・
流砂量

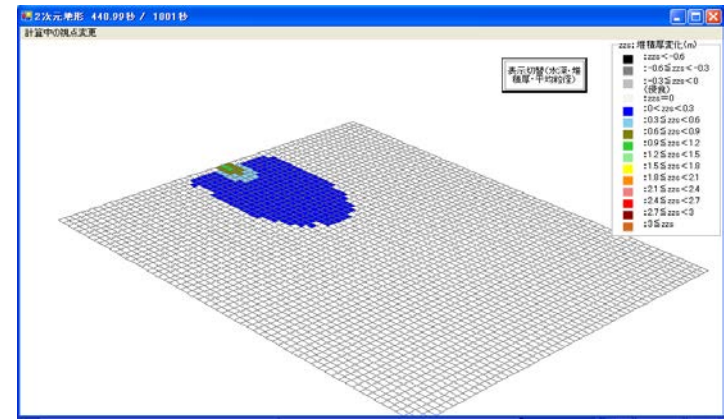
主画面(平面図・堆積厚変化表示)

出力(2)

主画面の平面図と2次元地形画面は表示を切り替え可能。



2次元地形画面
(水深表示)

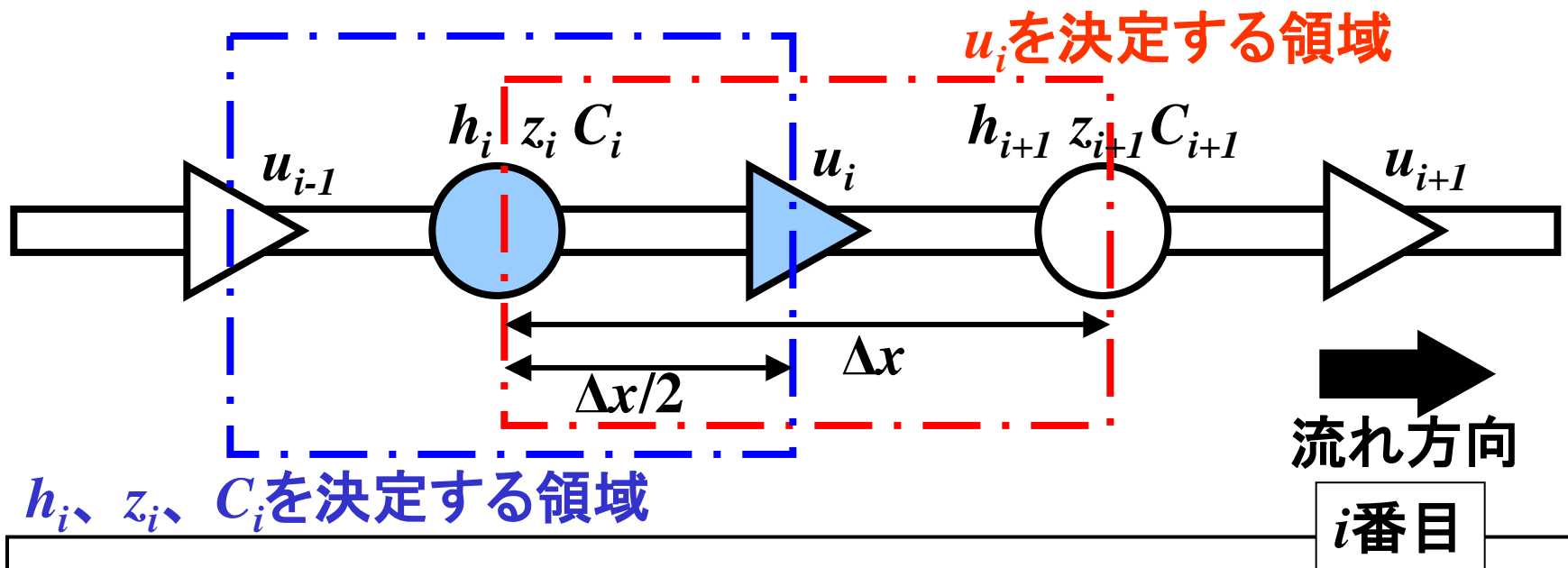


(堆積厚変化表示)

- GUI実装によって、簡単に入力ができ、出力を確認できるのが Kanakoの利点。
- しかし、実際の地形を入力したり、計算結果に影響する土石流のハイドログラフ、その他パラメータ等を設定するためには、ノウハウが必要。

●●● | 砂防堰堤の扱い方

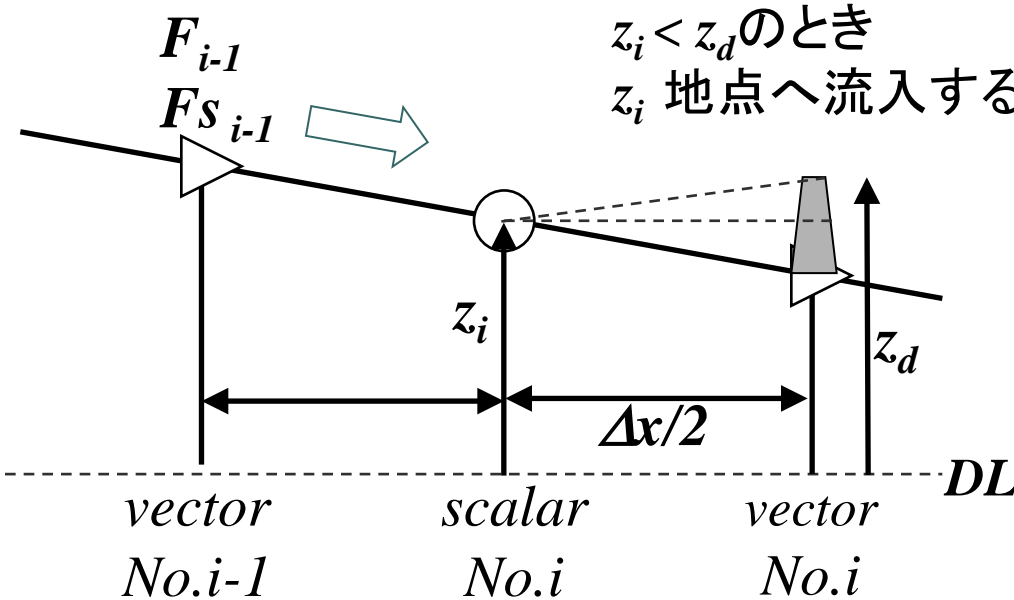
- Kanakoでの計算には、スタaggerドスキームを採用
- 1次元計算では、不透過型、スリット型、格子型堰堤が設置可能。
- 砂防堰堤は、ベクトル計算点に設置。
 - 通常は、河床位はスカラー計算点で計算する。



○ : スカラー量 (h (水深)、 z (河床位)、 C (土砂濃度)) を表す
 ▷ : ベクトル量 (u (流速)) を表す

各種砂防堰堤の計算(不透過型)

- 不透過型堰堤は、堰堤の天端高と直上のスカラ一点の河床位を比較して、堆積過程を計算する。
 - 堰堤上流側に土砂を堆積させて、満砂状態で計算することも可能



F_{i-1} : (i-1)点のフラックス
 Fs_{i-1} : (i-1)点の土砂フラックス
 $F_i = u_i h_i B_i$
 $Fs_i = F_i C_i$

各種砂防堰堤の計算(透過型:スリット型)

- スリット堰堤は川幅の急縮によるせき上げ効果を考慮。
 - スリットでの土砂閉塞は考慮しない⇒閉塞は格子型計算のみ
 - 急縮によるエネルギー損失は考慮しない
 - スリットは一本だけしか考えない。
 - 複数スリットや、I型のような場合は透過型的一种として計算することは可能



スリット(一本)



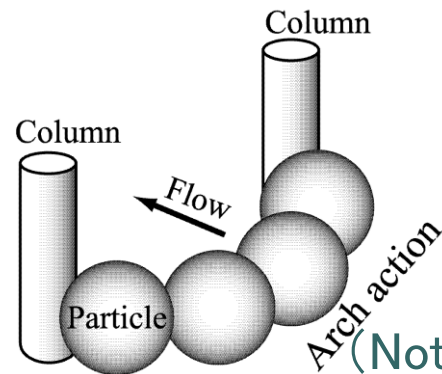
スリット(複数)



I型スリット

●●● 各種砂防堰堤の計算(透過型:格子型)


- 格子型堰堤は、格子間が下から上へと閉塞する過程を、**堰堤の天端高さの時間的に増大に相当する**と考える
 - 格子間の閉塞後は、その高さまでの不透過型堰堤と同様に扱う
 - 閉塞過程を考慮するモデルが、高濃度の土石流について扱ったものであるため、緩勾配(掃流域)に設置した場合には、上手くその閉塞過程を考慮できない



格子型

(Notice) 格子型堰堤は、
Kanakano(1D)のみ設定可能

KanakanoやKanakano2Dから当研究室で混合粒径や細粒土砂への対応や、GIS連携等のアドバンスト版を開発
⇒本発表ではGISと連携したシステム(一様粒径)を適用



土石流の氾濫・堆積に及ぼす家屋の 影響－平成24年7月熊本県阿蘇市土井川で 発生した土石流を対象として－

Study on Debris Flow Flooding and Deposition
Considering the Houses Influence:
Debris Flow Occurred in Doi River, Aso City,
Kumamoto Prefecture in July 2012

京都大学大学院農学研究科 ○中谷加奈
小杉 恵
水山高久
国土技術政策総合研究所 内田太郎
立命館大学理工学部 里深好文

●●● Outline

- はじめに
- 平成24年7月熊本県阿蘇市土井川で発生した土石流
 - 流域の概要
 - 家屋の被害状況
- 土井川を対象とした土石流数値シミュレーション
 - 計算条件(地形・供給ハイドログラフ・家屋)
 - 計算結果
- おわりに

●●● はじめに

- 土石流による災害を防止・軽減する方法
 - ハード対策: 砂防堰堤など構造物を用いて土砂移動を抑制
 - ソフト対策: **ハザードマップ**に基づく警戒・避難や宅地規制
- 土石流危険渓流(全国で十数万)にハード対策を施すには長い時間と多額の経費を要する
- 危険箇所を把握し氾濫・堆積範囲を予測する**ソフト対策**が重要
- 扇状地は土石流の氾濫・堆積で形成された領域 住宅地が存在
 - 家屋が存在すると氾濫・堆積過程に影響すると考えられる
 - これまで家屋を考慮した検討は少ない(計算コスト、データ不足など)
 - 中谷らは、数値シミュレーションで家屋の地盤高を補正する手法で実験、実災害事例との検証を実施

平成24年7月熊本県阿蘇市土井川で発生した土石流災害

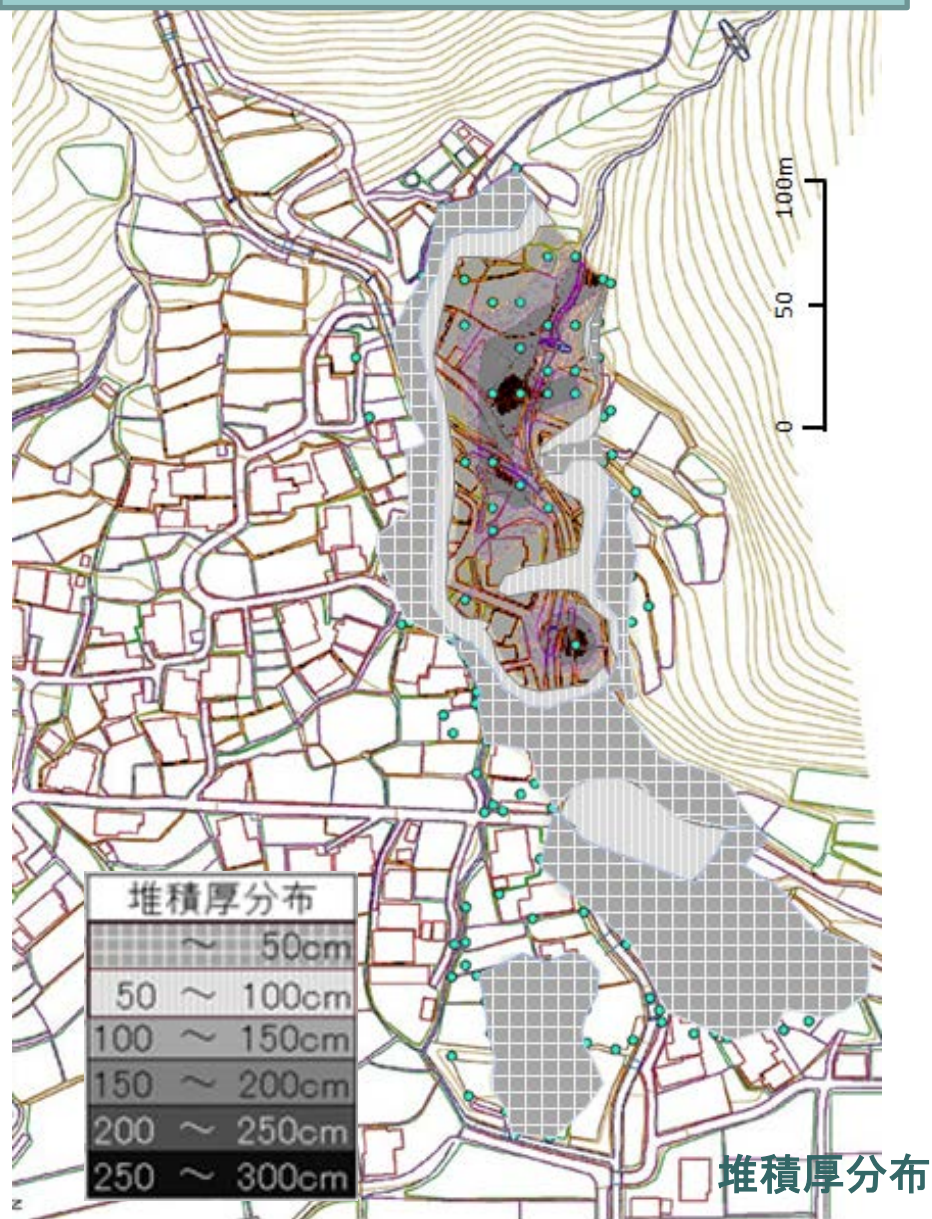
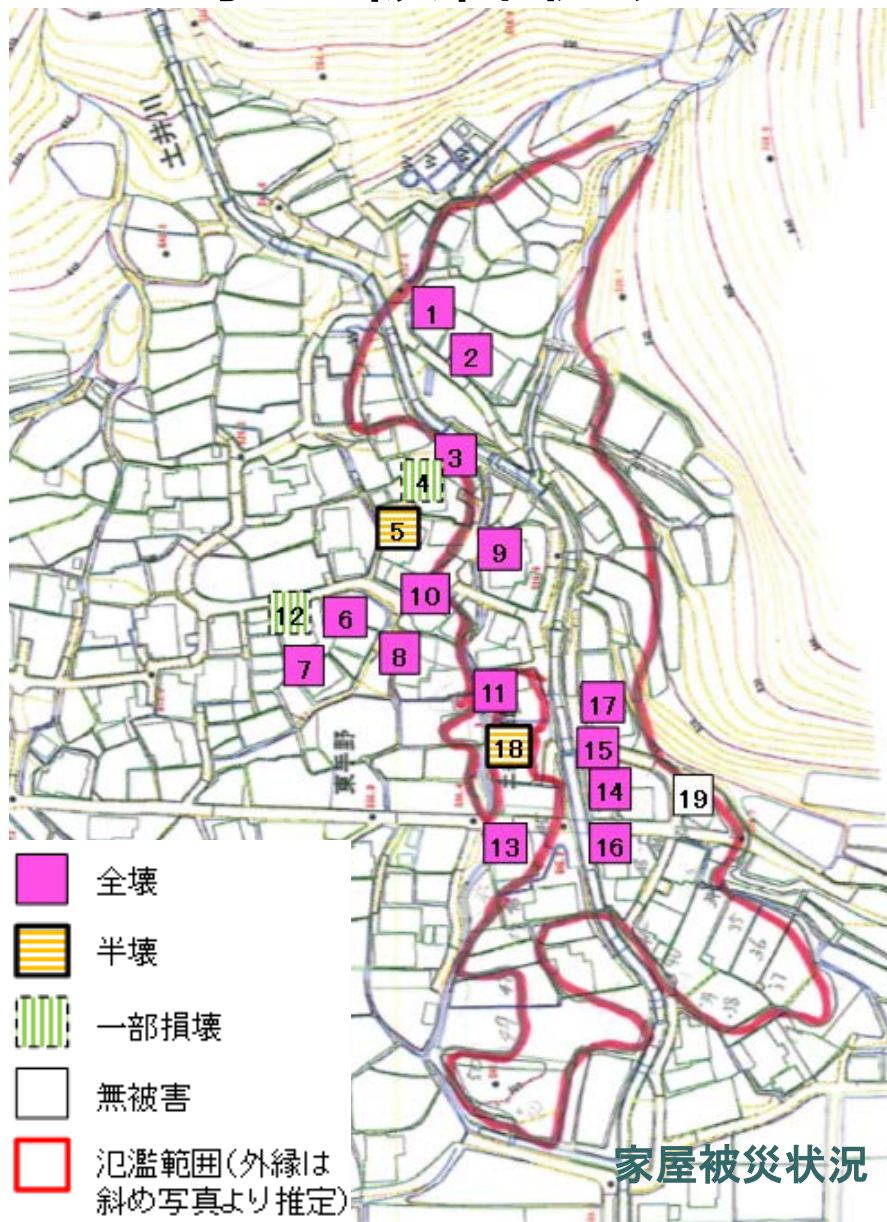


- 平成24年7月、九州北部豪雨で九州各地で豪雨が発生
- 阿蘇城山雨量観測所（平成24年7月12日）
 - 最大1hr雨量 105mm
 - 最大24hr雨量 449mm

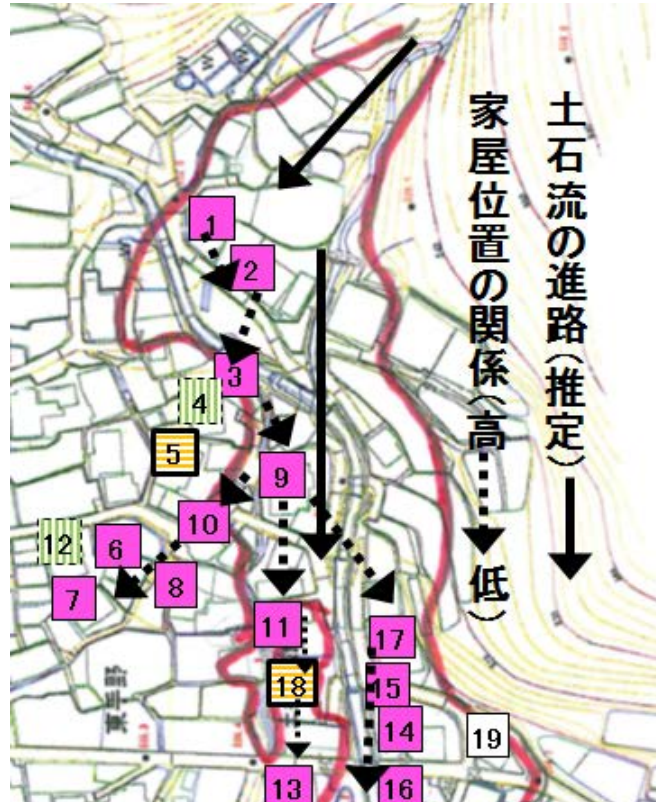
- 熊本県阿蘇市一の宮町の土井川（観測所に近接）では、人家裏の溪流より土石流が発生
- 死者1名、全壊12件（人家9件、非住家2件、公共施設1件）

土井川の 家屋被害状況

土石流危険渓流に指定、流域面積
0.3km²。災害後、侵食の著しい区間で
幅10-20m、高さ8-10mが確認



土井川の家屋被害状況②



家屋 No.	相対標高(m)	被害状況	備考(被害原因等)
1	27.0	全壊	土石流の直撃による被害. 上流側は1F埋没, 土砂・流木3m堆積. 柱が一部倒れる. 構造は残るが左右岸, 下流側の壁が抜ける.
2	25.8	全壊	土石流の直撃による被害. 柱や構造が残っていない.
3	18.0	全壊	土石流の直撃による被害. 柱が倒れている. (納屋)
4	18.3	一部損壊	左岸側の一部, 壁が破壊.
5	14.9	半壊	浸水深0.3mの痕跡.
6	11.1	全壊	堆積による被害, 柱や壁は残る.
7	7.7	全壊	(納屋)
8	9.0	全壊	柱・壁は残っている.
9	12.2	全壊	柱が倒れている.
10	11.4	全壊	壁は抜けているが, 構造は残る.
11	6.1	全壊	土砂堆積. 上流側の壁破壊, 構造は残る. (公民館)
12	11.1	一部損壊	壁が抜けている, 構造は残る.
13	1.5	全壊	流木の直撃. 構造は残る. 左岸側の被害大きい.
14	1.9	全壊	流木・土砂の直撃. 右岸側の被害大.
15	1.6	全壊	流木・土砂の直撃. (倉庫)
16	0	全壊	右岸側は壁が抜けている.
17	4.4	全壊	(納屋)
18	5.0	半壊	流木の堆積, 集積.
19	0.7	無被害	

- 全壊
- 半壊
- 一部損壊
- 無被害
- 氾濫範囲(外縁は斜め写真より推定)

土井川の家屋 被害状況ーまとめー

- 氾濫範囲、顕著な堆積範囲が大よそ被害の大きい(全壊)家屋位置の外縁となっている。
 - この枠より外側で全壊なのは、家屋6~8、13だけであり、家屋6~8は構造や壁などは残っており上流側の1~3と比べるとそのダメージは幾分少ないようである。
 - 13は流木の直撃による被害で、土石流本体とは異なる。
- 概ね、低い方に向かって流路沿いに流れているが、被害を受けた家屋の上流側で顕著な堆積が見られる点は、家屋の影響と考えられる。
- 家屋位置は、同じ標高であれば谷や流れ方向から離れている方が、また谷(溪流)側に別の家屋が存在する方が、被害度や堆積が小さい。
- 家屋の位置や周囲の家屋配置が被害状況に影響すると考えられる。

土井川を対象とした土石流数値シミュレーション



- GISと連携した土石流シミュレーションのシステムを適用
- 家屋の存在による影響を検証
 - 地盤高を補正する手法
 - 谷出口の家屋1~19を考慮
- 地形条件は災害前に計測されたDEMデータを利用
- 谷出口付近に存在した古い粗石堰堤や谷止工は、破壊されて下流へ土砂・水を通過させているため、考慮しない

1D area: 5m間隔、32点、
河道幅15m、侵食可能深10m

- 河道幅・侵食可能深は災害後報告による流出土砂量(22,590m³)から設定

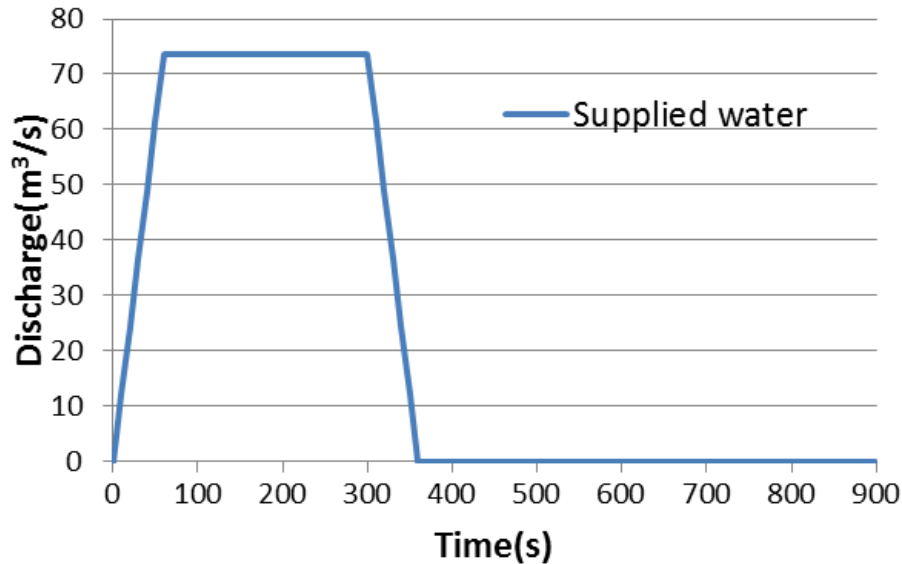
2D area: 5m × 5mメッシュ
流下方向 × 横断方向 141 × 84

計算に用いたパラメータ

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(mm)	30
砂礫の密度(kg/m^3) σ	2650
流体相の密度(kg/m^3) ρ	1200
河床の容積濃度	0.6
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

検討ケース

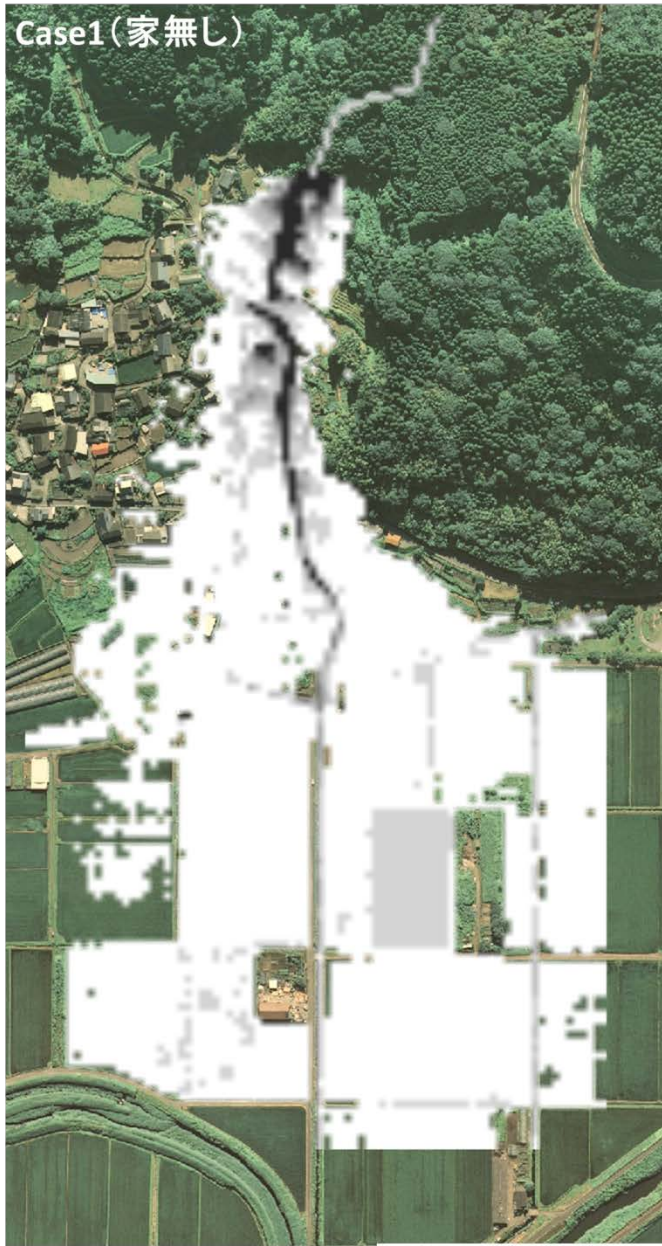
Case	
Case1	家屋なし
Case2	家屋を考慮(地盤高を6m上げる)



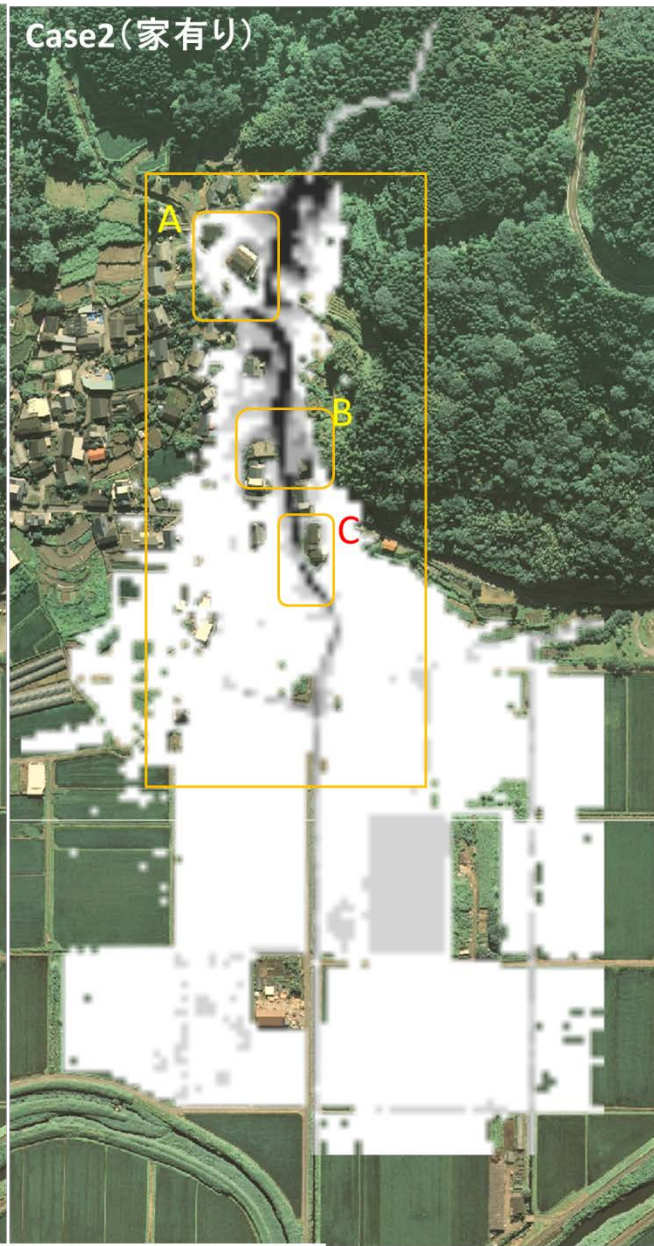
供給ハイドログラフ

- 流域 (0.3km^2) に降った最大1hr雨量105mmが流出係数0.7(山地)で流出したと仮定⇒総流量 $22,050\text{m}^3$
- 過去の土石流発生事例を元にピーク継続時間を300sと推定
- 上流端から水のみを供給して、土石流は河道上の土砂を侵食して発達・流動したものとする

Case1(家無し)



Case2(家有り)



痕跡: (水深 + 堆積厚) の最大値

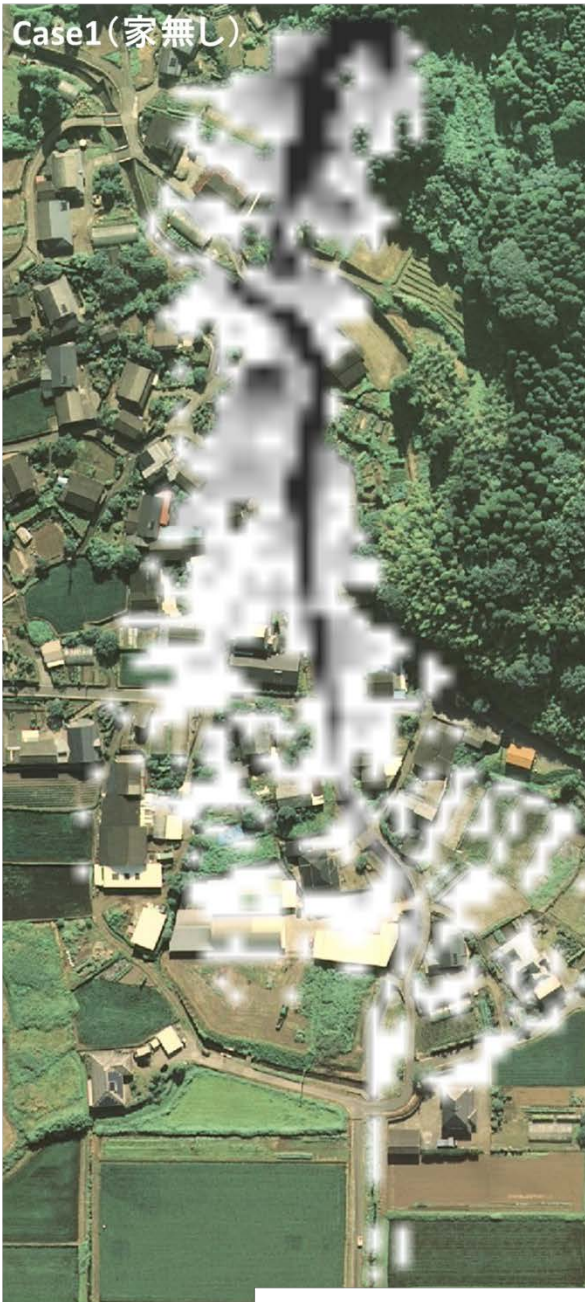
計算結果(痕跡)

- 大きな違いは見られない
- 痕跡の大きいエリアが流路で、周辺で局部的に大きな値が見られるが、横方向や下流側で小さな痕跡が広く見られる
- 下流側では田のあぜ道沿いの流れも確認
- 右岸側への広がりや数値は、若干Case1の方が大きい箇所も見られる

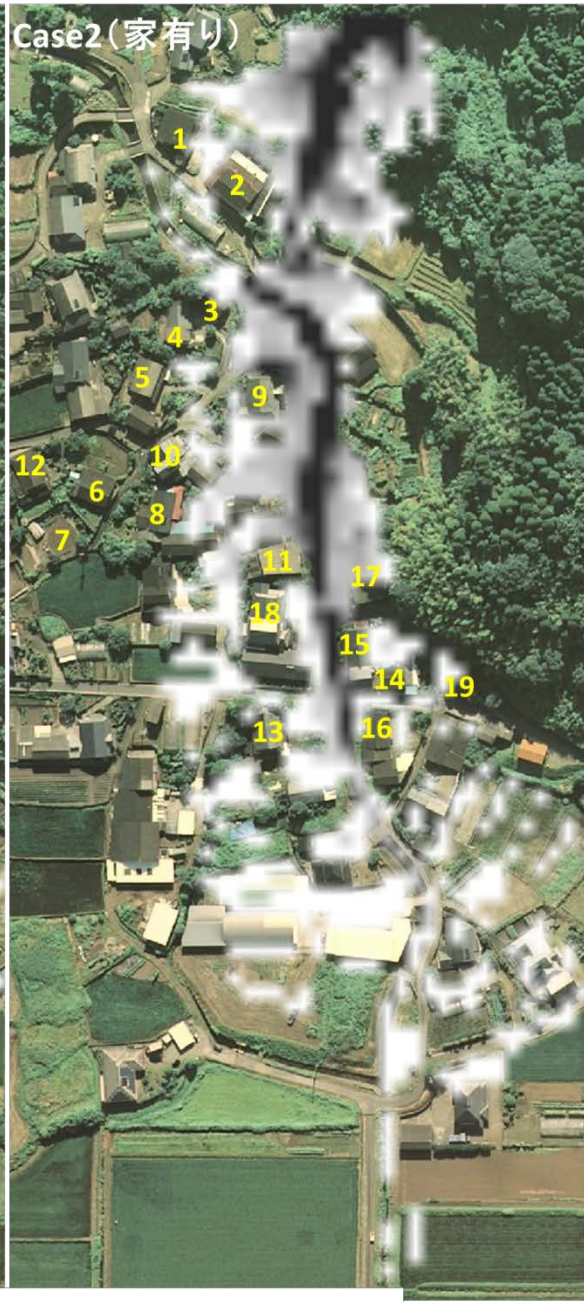
家屋が存在する領域(オレンジ)の家屋の影響

- 家屋の上流側及び下流側で家屋を回り込むように大きな痕跡(A)
- 家屋位置は痕跡が見られず、その周囲で高い痕跡(B)
- 流路付近に家屋が存在することで、家屋よりも流路付近は高い痕跡を示すが離れたエリアは小さな痕跡しか示さないエリア(C)

Case1(家無し)



Case2(家有り)



計算結果(堆積厚)

- 堆積厚も流路を中心として広がる
- Case2の方が若干範囲が狭く、上流側などで局所的に大きな堆積
- 特に家屋9の上流側(流路沿い)～家屋11、18、15、17の間で3m以上や場所によっては5mを越える顕著な堆積
- 家屋11や18よりも流路の右岸側にあまり堆積が広がらない傾向


⇒災害後の堆積厚の傾向と対応



●●● | おわりに(家屋の設定方法の検討)

- 平成24年に熊本県阿蘇市土井川で発生した土石流について、災害後の家屋被害の状況を整理
- 土井川で発生した土石流について、当分野で開発したシステムを適用して家屋の有無を考慮して数値シミュレーションを実施
- 結果から、家屋を考慮したケースの方が、家屋周辺での顕著な堆積など実際の災害状況に近い
 - 本検討は、家屋高さを標準的な二階建と仮定して一律6m上げた
 - 今後、詳細な建物高さの情報を考慮して検証することが望ましい
- 今後も家屋等の構造物が土石流に及ぼす影響の情報を収集
- 本研究で検討しなかった項目の検証、考慮できる手法の提案
 - 家屋周りの生垣や植込、塀などが存在する場合の影響
 - 家屋の破壊や部分的な破壊による土石流挙動の変化

謝辞: 国土交通省九州地方整備局にはDEMやオルソ画像を提供して頂いた。一般財団法人砂防・地すべり技術センターには土井川の土石流災害調査のデータを提供して頂いた。ここに記して感謝致します。また、本研究はJSPS科研費24710206の助成を受けて実施した。



土石流数値シミュレーションの 一次元計算領域と二次元計算領域の 設定方法の検討

Setting method of 1-D area and 2-D area
boundaries in debris flow numerical simulation

京都大学大学院農学研究科 ○中谷加奈

水山高久

株式会社パスコ 美土路哲也

堀内成郎

立命館大学理工学部 里深好文

●●● Outline

- はじめに
- 既往の土石流数値シミュレーション(一次元領域と二次元領域の境界の設定方法)
- 平成25年に伊豆大島で発生した土石流を対象とした数値シミュレーション←谷が明瞭でなく起伏が小さい
- 揖斐川を対象とした計算←谷が明瞭で起伏が大きい
- おわりに

●●● はじめに

- 土石流数値シミュレーションとは
 - 入力：地形・供給ハイドログラフ・砂防施設など
 - 出力：流動・侵食/堆積・氾濫・施設効果など
 - **多様な条件下で容易に実施できる利点を持ち、国内外で多数のモデルやプログラムが提案・利用**
 - 格子法←土石流を混合流体として、運動を固定した計算点上に配置した物理量の変化で表現
 - ・ 実務・研究での利用が多い
 - ・ 発生・流動から下流への氾濫・堆積の一連の挙動を容易に表現
 - 粒子法・個別要素法など(MPS、SPH、DEM)
 - ・ 透過型堰堤の捕捉など解析に有効、時間・空間的な制約がある

既往の土石流数値シミュレーション

- 格子法の境界の設定方法 -

- 1-D 領域 + 2-D 領域 ← 対象領域によって異なる
 - 1-D: 急勾配の谷・山地溪流
 - 2-D: 氾濫・堆積領域、扇状地や住宅地
 - 境界: 氾濫開始点、砂防基準点等



上流の急勾配域から横断的に広がる。
境界は?
⇒2D 領域を
上流から設定する
手法を検討



2013年に発生した伊豆大島土砂災害

●●● これまでの計算・計測における課題と進展

○ 計算時間

- 1D領域と比べて2D領域の計算には時間がかかる(Ex.計算の領域や計間が大きいと一つの計算に要する時間が数日であることも)
- 計算機の精度向上によって数～数十分までに短縮(計算機や対象とするエリアにもよる)

○ 計測技術の発展(航空レーダ・斜め写真等)

- これまで山間部のデータ計測には、下流のエリアと比較して、植生の影響等による精度に課題があった
- 技術の発展により山間部でも詳細な地形データが入手可能

以上より、

- 2D領域を上流から設定することが可能!
- これまでの設定方法との違いは?

●●● 検討対象

○ 2013年に発生した伊豆大島土砂災害

- 急勾配領域から起伏が小さく谷が明瞭でない
- 供給ハイドログラフを二種類(規模:大・小)設定

○ 揖斐川

- 起伏が大きく谷が明瞭
- 砂防施設の有無

地形、土石流規模、砂防堰堤などの設定条件による1Dと2Dの領域設定方法による違いを検証

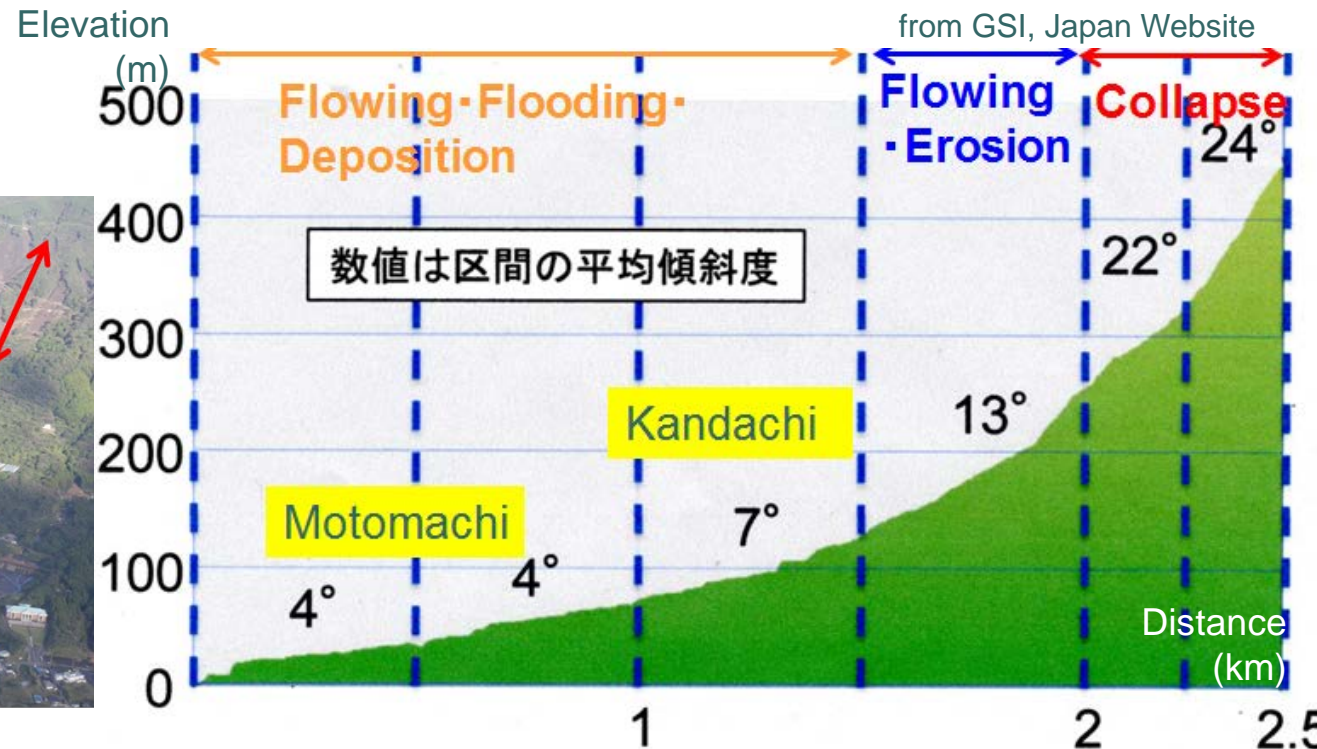
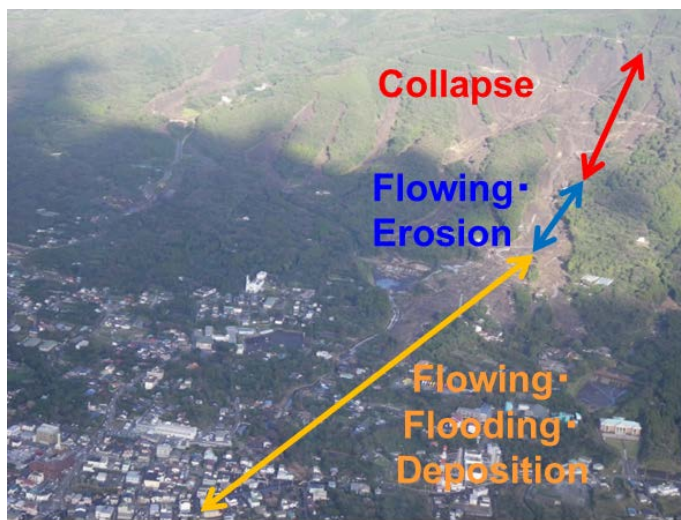


平成25年10月16日台風26号で発生した 伊豆大島土砂災害

- ● ●
- 崩壊・土石流などの土砂災害が発生し、死者36人、行方不明者3人(平成26年1月31日時点)にのぼる甚大な土砂災害
- 流域面積:1.7km²、平均勾配:10.7、流下距離:約2.5km
- 崩壊が広範囲で発生。崩壊深は浅い(-1m)
- 神達は土石流の直撃により大きな被害
- 元町は氾濫や、流木の橋梁への閉塞などによる被害

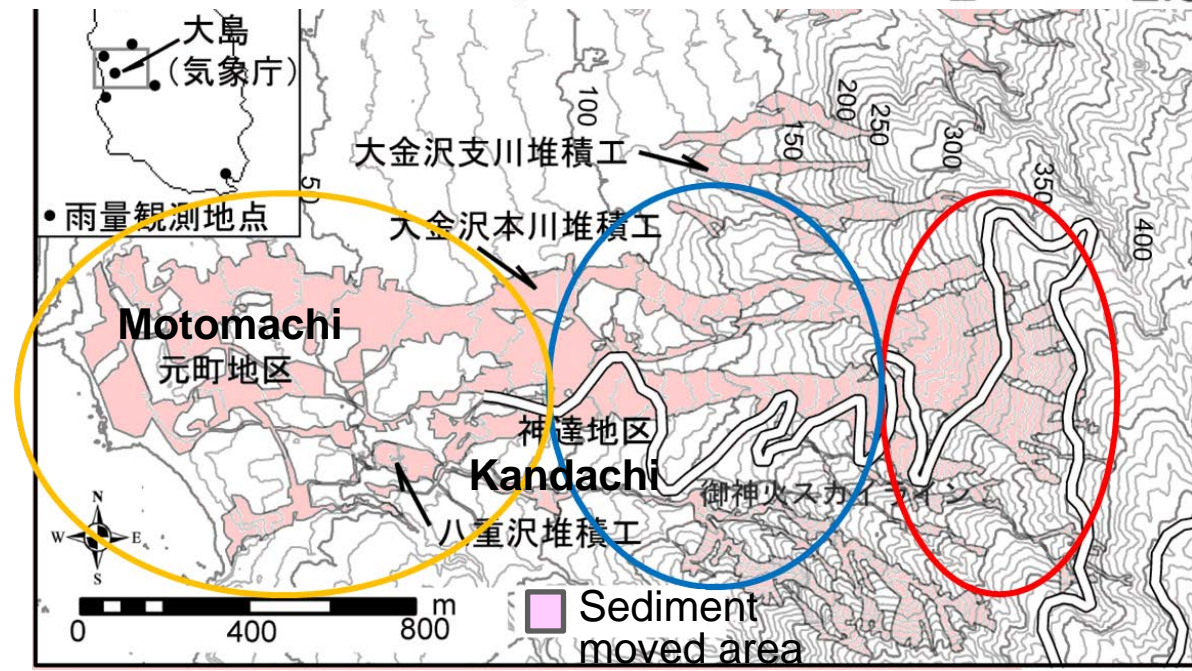


●●● 土砂移動



推定値

土砂量: 175,000m³
 流木量: 13,600m³

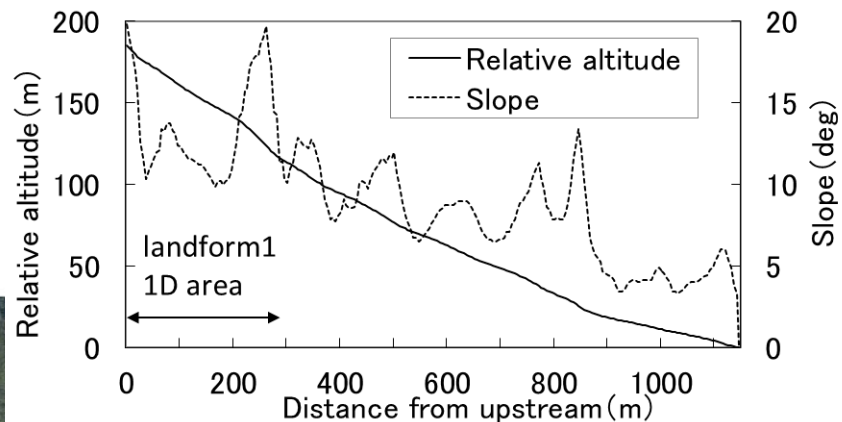
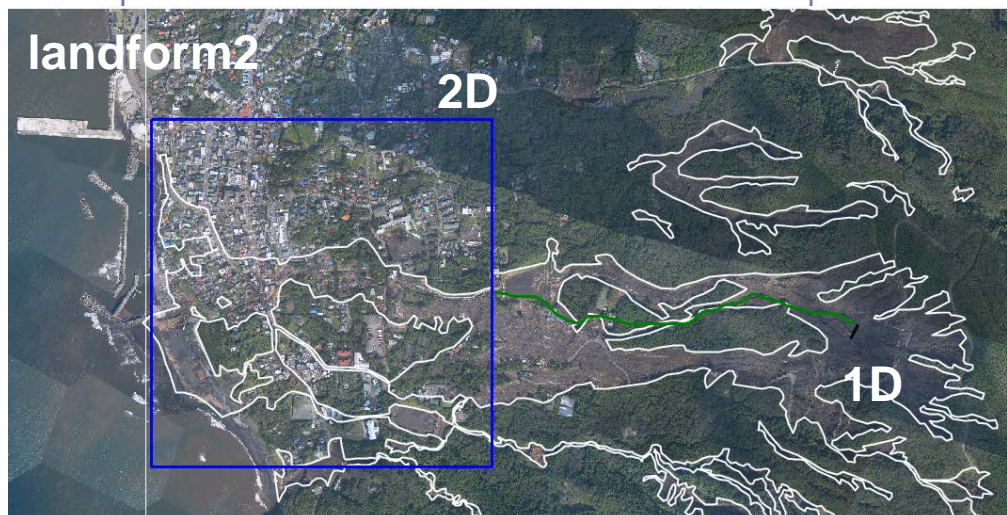


伊豆大島を対象とした土石流シミュレーション

- 当分野で開発したGISと連携した土石流シミュレーションシステムを適用し、国土地理院が提供する災害前の地形を入力条件とした
- 2つの手法で地形を設定（1D、2D、境界）
 - 通常の設定方法（基準点を境界とする）
 - 新しい方法：2D領域を上流から設定

パラメータ	値	単位
計算時間	1200	s
計算の時間間隔	0.01	s
粒径	0.2	m
砂礫の密度	2650	kg/m ³
流体相の密度	1200	kg/m ³
河床の容積濃度	0.6	
内部摩擦角	35	deg
重力加速度	9.8	m/s ²
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	0.03	s/m ^{1/3}

●●● 地形の設定方法



landform1 (2D領域を上流から設定)

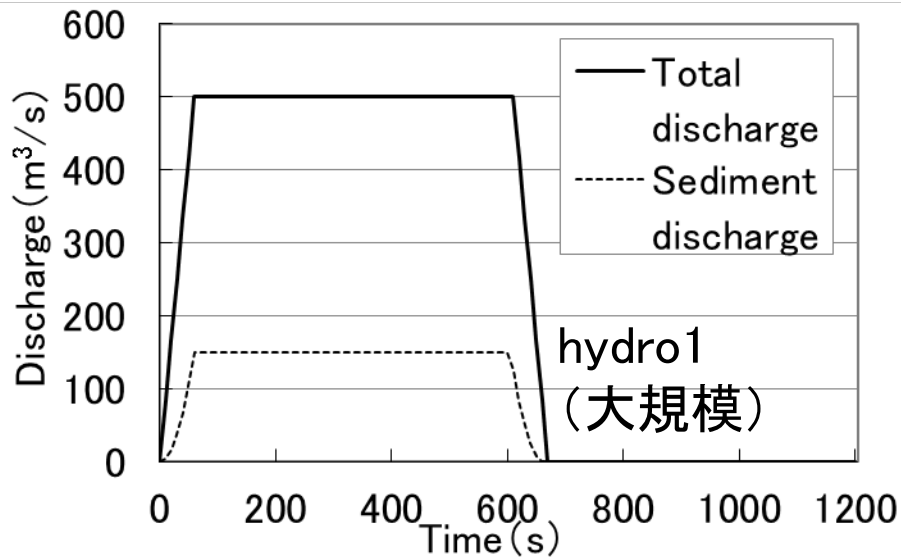
- 1D 領域: 計算点間隔 5m、51 点、河道幅10m
- 2D 領域: 10m × 10m (流動方向 × 横断方向) 202 × 204

landform2 (通常の設定方法)

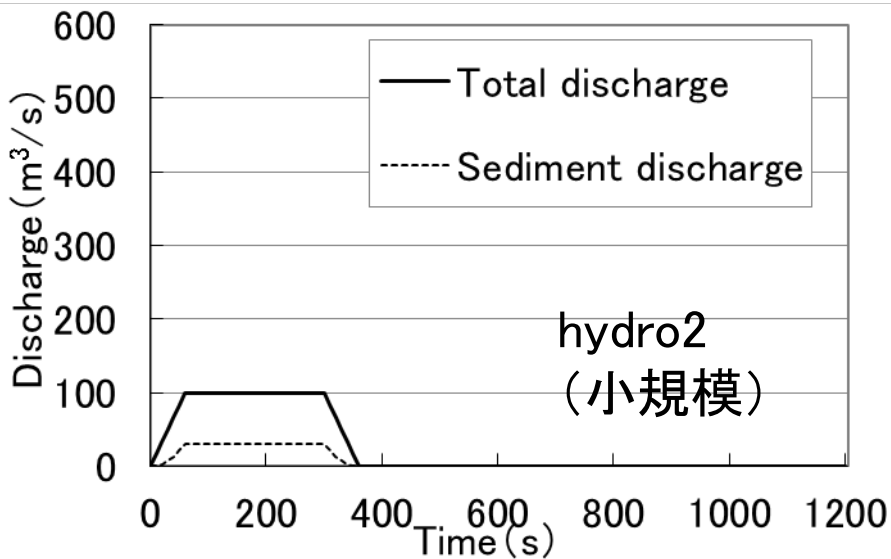
- 1D 領域: 計算点間隔 5m、230 点、河道幅10m
- 2D 領域: 10m × 10m (流動方向 × 横断方向) 102 × 204

白枠: 土木研究所による流下範囲
背景: 災害後のオルソ

供給ハイドログラフ



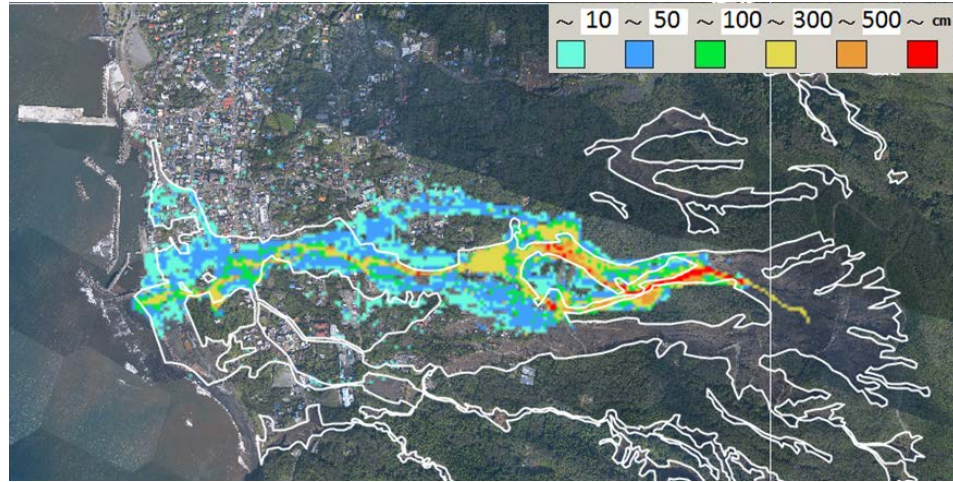
- 土砂濃度:30%
- 総流量、総土砂量:
hydro1=hydro2 × 10



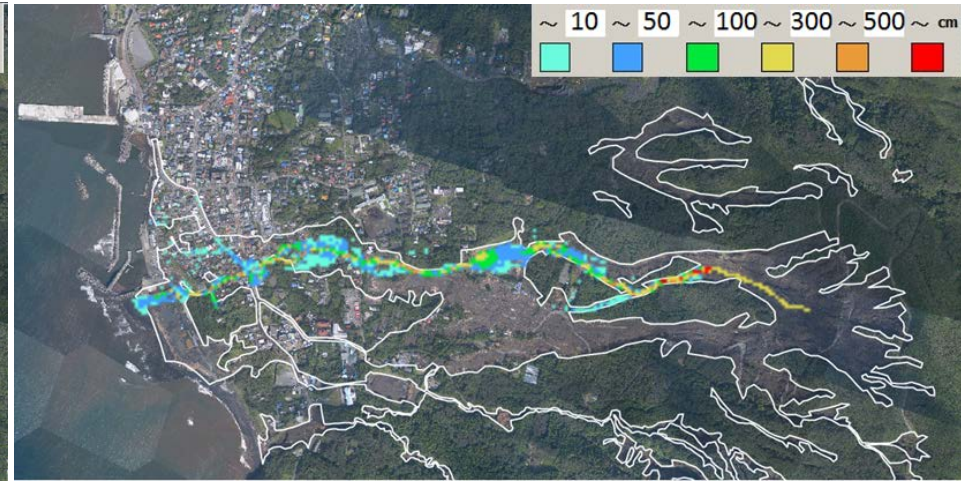
計算ケース

Case	地形	ハイドロ
1	landform1 (2D領域を上流から設定)	hydro1
2	landform2 (これまでの方法)	hydro1
3	landform1	hydro2
4	landform2	hydro2

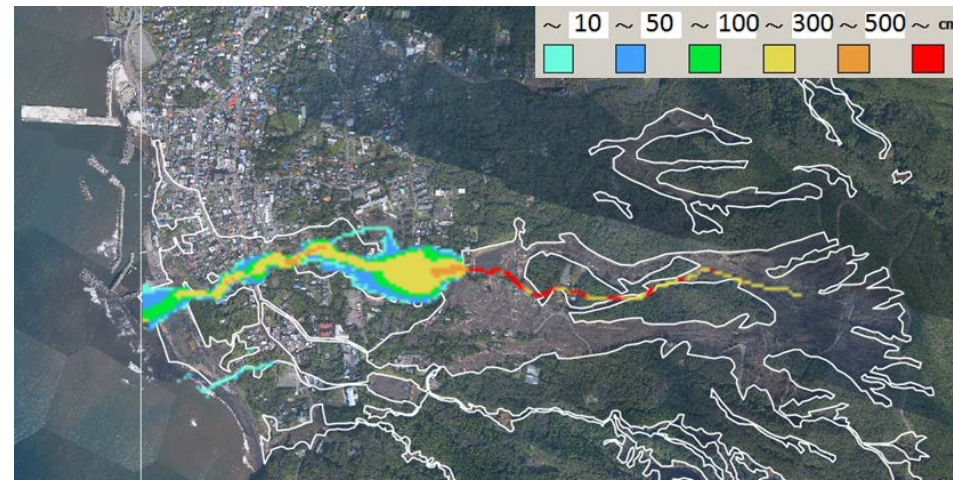
●●● 計算結果(痕跡)



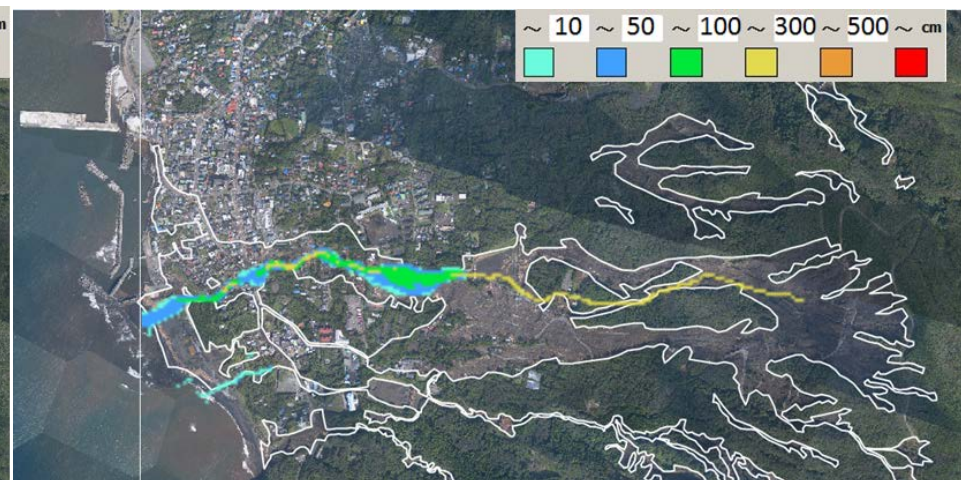
Case1(landform1, hydro1)



Case3(landform1, hydro2)



Case2(landform2, hydro1)



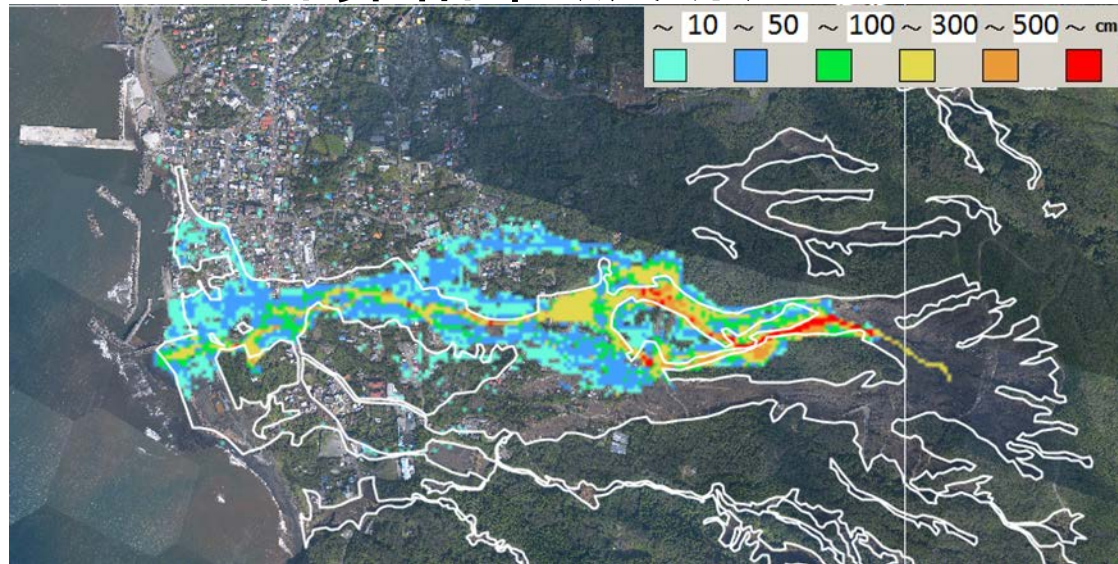
Case4(landform2, hydro2)

痕跡:水深+堆積厚の最大値、白枠は土木研究所報告による流下範囲

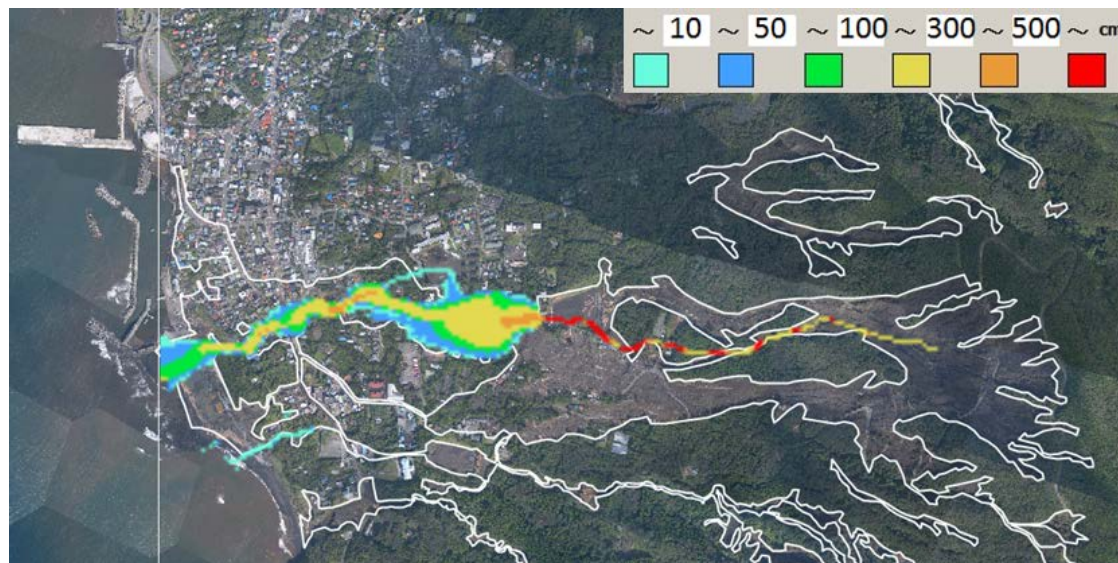
Case1&2

土石流(大)で地形条件による違いをみると

●●● 計算結果(痕跡)



Case1(landform1, hydro1)



Case2(landform2, hydro1)

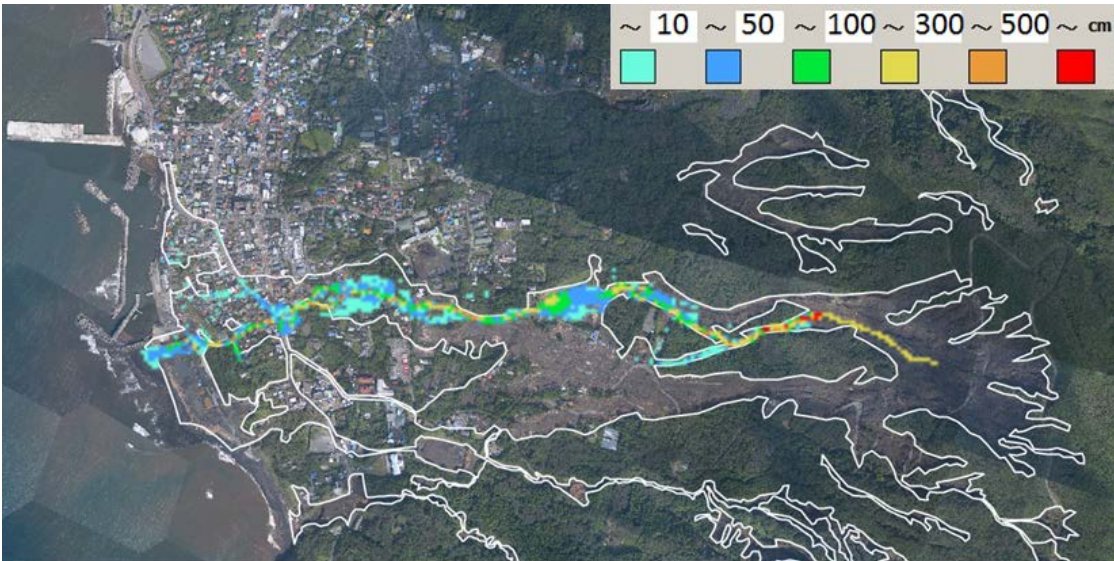
● Case1が、災害状況とよく対応

- 堆積工での堆積や、上流での5mを越えるような痕跡
- 元町での氾濫状況
- 神達はあまり大きな痕跡が見られない
- 計算では本川を対象としているため
 - 神達の被害が拡大したのは左支川の土石流の直撃による(本川からも一部影響)

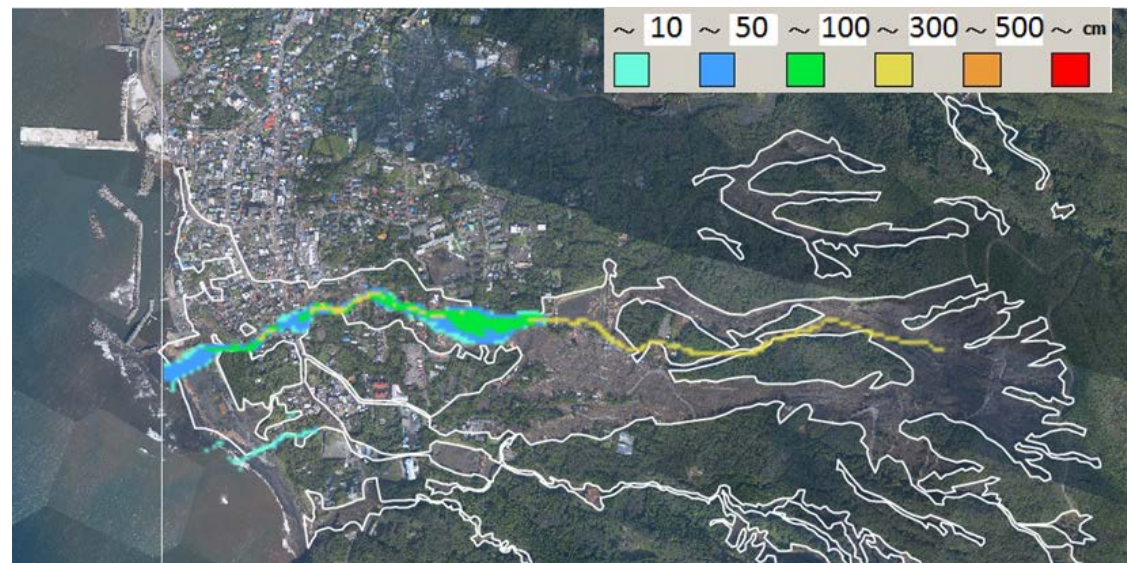
Case3&4

土石流(小)で地形条件による違いをみると

●●● 計算結果(痕跡)



Case3(landform1, hydro2)

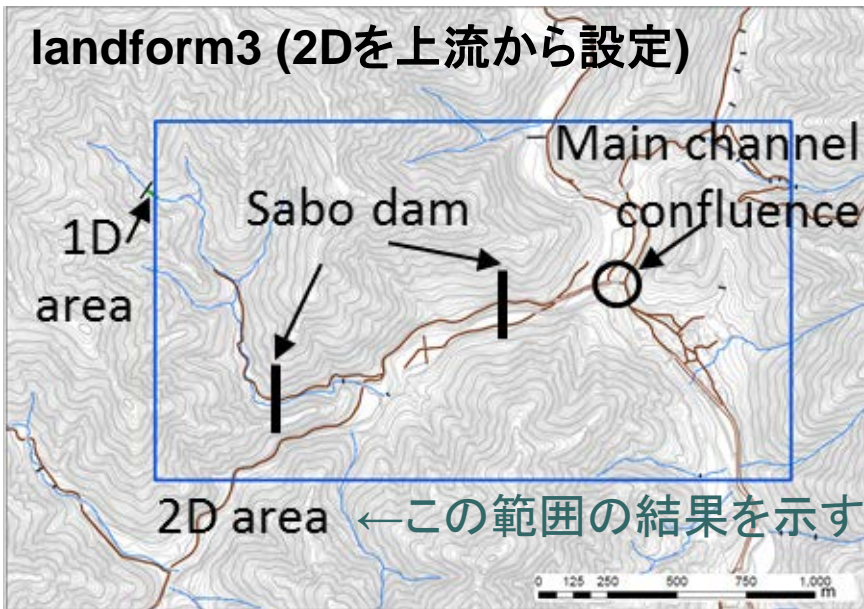


Case4(landform2, hydro2)

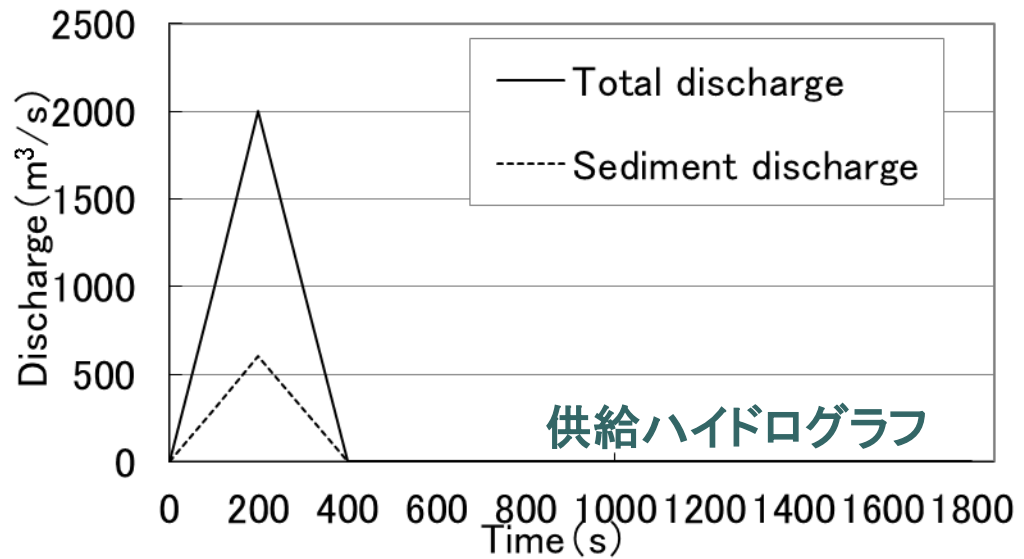
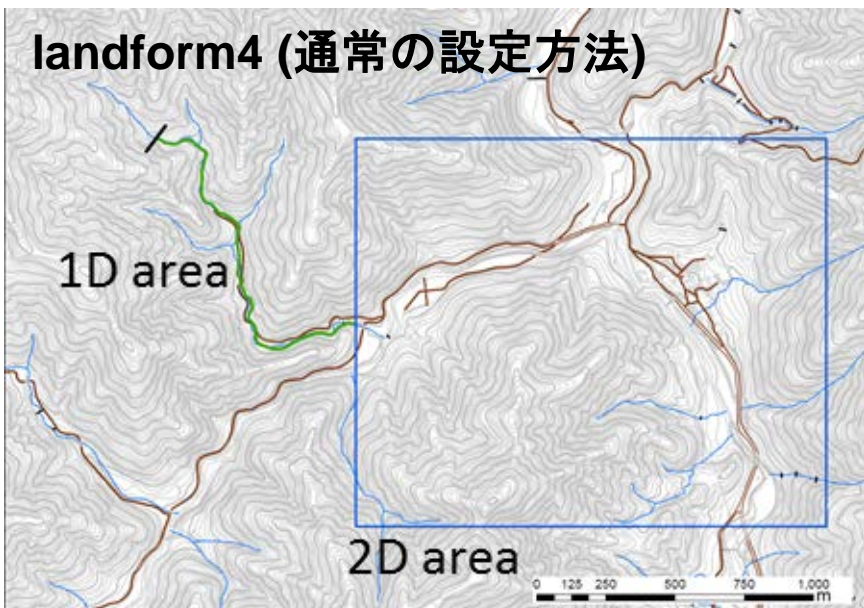
- どちらのケースも流路沿いに流れている
- Case1、2と比べると結果の違いは小さい
 - 土石流の規模が小さい場合には、領域の設定方法は谷が明瞭でない地形についても大きく影響しない

揖斐川

landform3 (2Dを上流から設定)



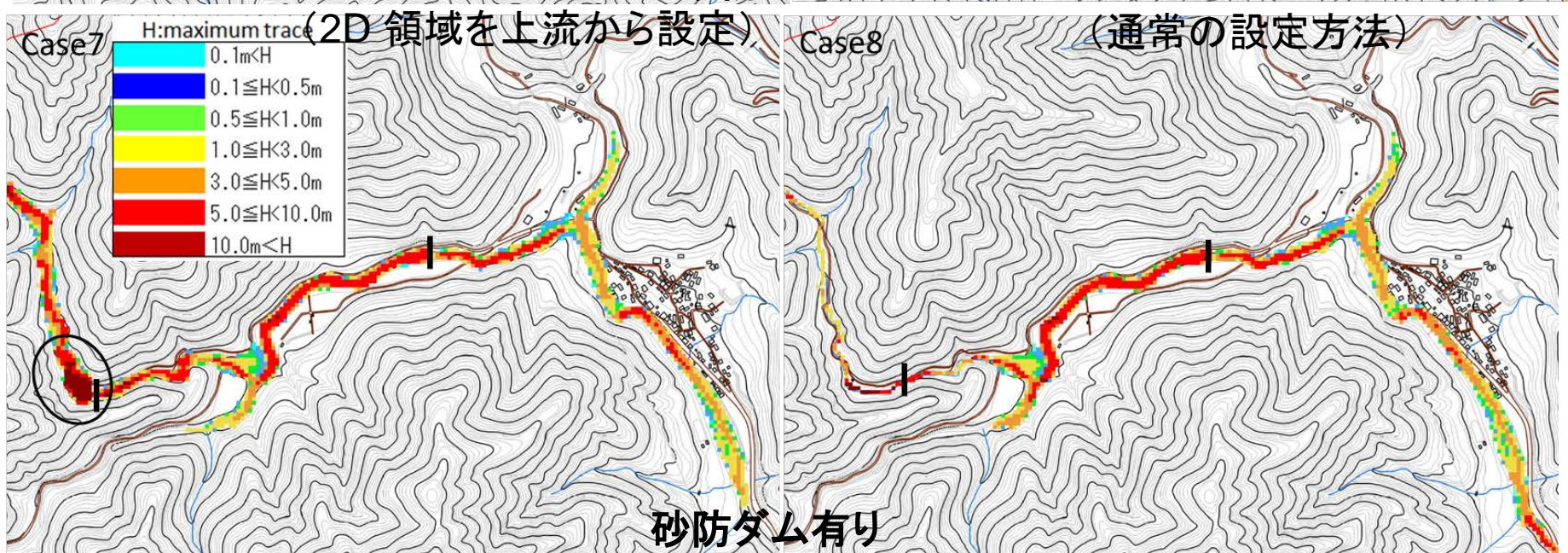
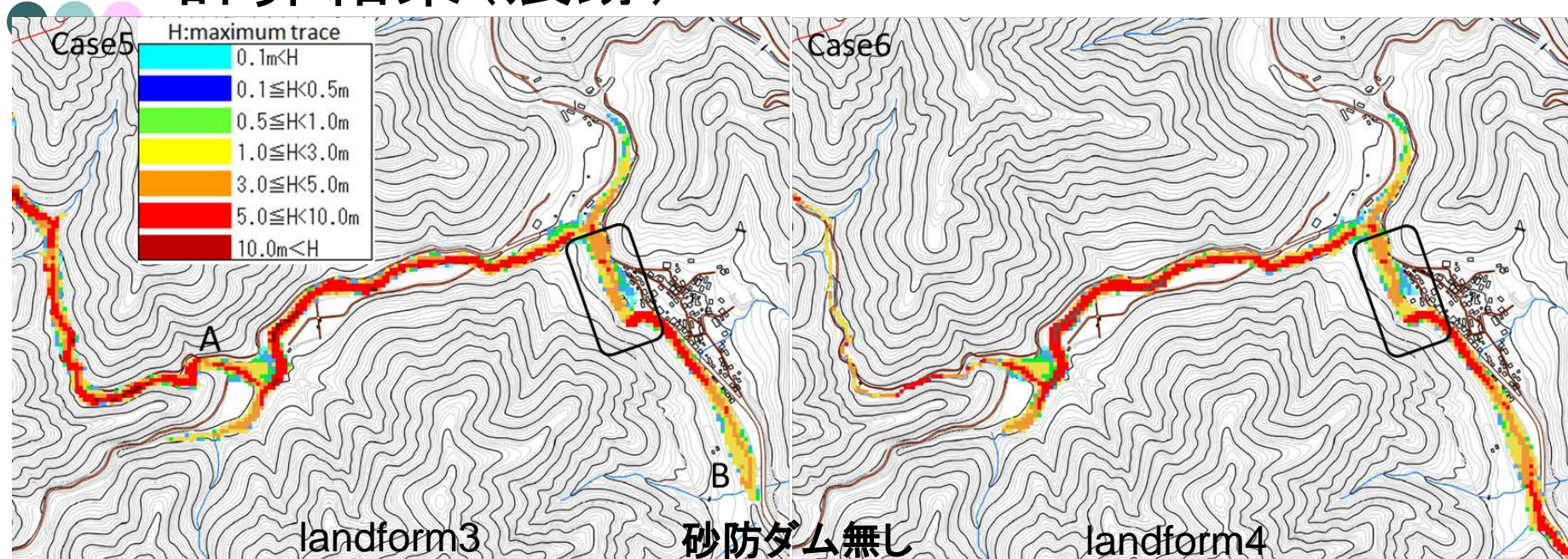
landform4 (通常の設定方法)



パラメータ	値	単位
計算時間	1800	s
計算の時間間隔	0.01	s
粒径	0.015	m
砂礫の密度	2600	kg/m ³
流体相の密度	1000	kg/m ³
河床の容積濃度	0.6	
内部摩擦角	35	deg
重力加速度	9.8	m/s ²
侵食速度係数	0.0007	
堆積速度係数	0.05	
マンングの粗度係数	0.03	s/m ^{1/3}

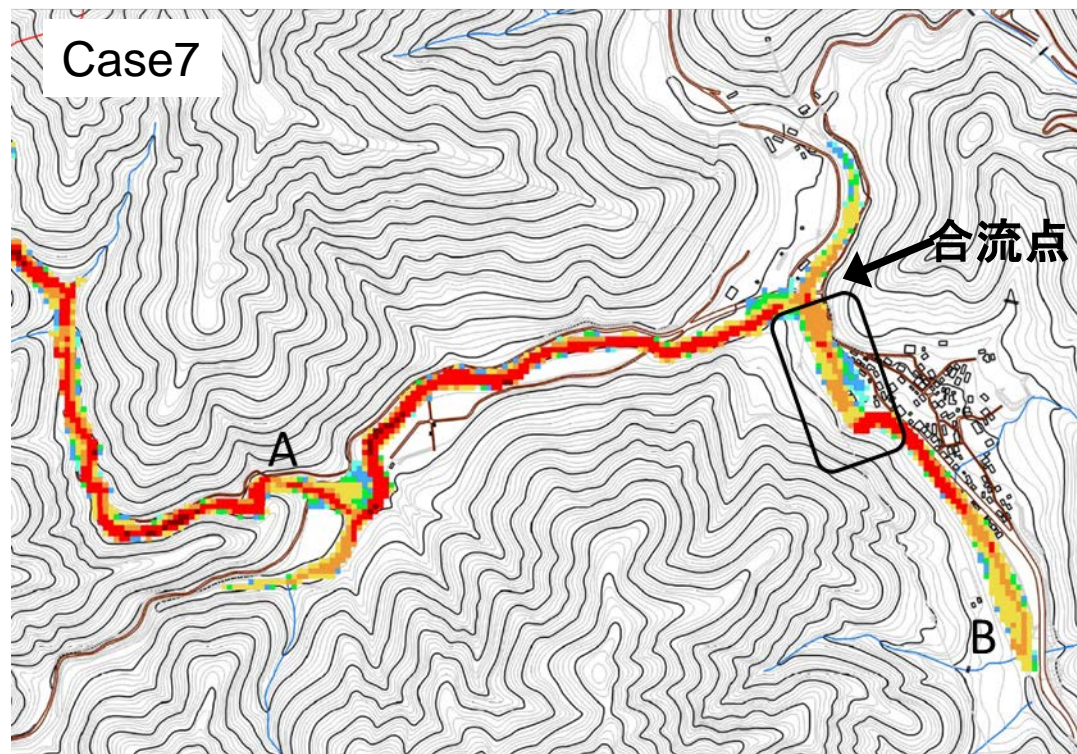
Case	地形	砂防堰堤
5	landform3	×
6	landform4	×
7	landform3	○ (2基とも2D)
8	landform4	○ (上流:1D,下流:2D)

計算結果(痕跡)



●●● Arrival time

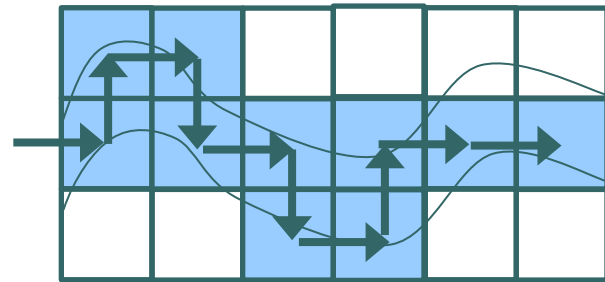
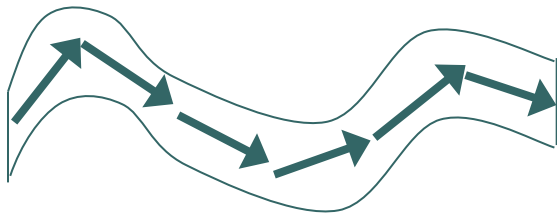
Case	A点	合流点
5	240s	590s
6	180s	490s
7	340s	720s
8	220s	600s



- どちらの点でも2D領域を上流から設定したCase 5 と7 (landform3)で、下流から2D領域を設定したCase 6と8 (landform4)よりも、到達時間が遅かった。
- 合流点では、砂防ダムを設定したCase 7 は設定しないCase5よりも130s遅く(landform3)、Case 8 では設定しないCase6より(landform4) 110s遅かったが、A点ほど大きな違いは見られない。
- この違いは、A点より下流ではどちらの地形でも2D領域と設定していることや、A点と合流点の間の砂防ダムがどちらも効いていることによる。

●●● 地形条件の設定方法の違いの影響は？

- 急勾配の谷部を2D領域で設定すると、流れ方向だけでなく横断方向についても計算される
- 流れが直進せずに曲がるような場合
 - 1Dで計算するときは、流れ方向に沿って計算点を設定するため、最短ルートで流れが移動する
 - 2Dで計算する場合は、区分されたメッシュ沿いに流れ方向と横断方向で階段状のルートを経由して移動するので、(計算点間隔にもよるが)移動距離が長くなる



- また、谷地形が1D領域では単純化した矩形断面で設定されるが、2D領域では横断形状を考慮する影響が出てくる

●●● おわりに①(地形の設定方法の検討)

- 土石流の数値シミュレーションにおいて、これまでの設定方法、新しい方法(上流から2D領域設定)で計算を実施
- 上流から2D領域を設定する方法は、起伏が明瞭でない地形(伊豆大島)で大規模な土石流を検討する際に有効
 - 谷が明瞭な地域(揖斐川)では違いが大きくない。谷が明瞭でない地域でも土石流規模が小さい場合それほど差が見られない。
- 谷が明瞭であり起伏が大きいのか、そして規模の大きな土石流が発生するかどうか、この二つの要因が領域の設定方法を変えた場合に影響することが本検討から示唆された

●●● おわりに②(地形の設定方法の検討)

- 領域の境界を設定する際、計測データ等が揃っていれば、これまでのように1D領域を谷出口に設定するよりも、谷の上流から2D領域を設定する方が、伊豆大島災害のような現象を表現することができる
- 一方で、揖斐川のように谷が明瞭な地域でも両者で大きな違いは見られなかったことから、2D領域を上流から設定しても到達範囲や流動深・堆積の大きな箇所を推定することは可能
- 今後は、谷地形が明瞭な場合について設定領域を変えた場合の到達範囲や到達時刻、砂防堰堤の効果について、現地の情報を収集して、更なる検討を進めていきたい

謝辞:本研究は、一般財団法人 砂防・地すべり技術センター受託研究「大規模土砂移動の影響範囲の予測とその対応手法の整理」の助成を受けたものです。また、本研究の一部はJSPS科研費24710206の助成を受けて実施した。伊豆大島土砂災害の土石流の流下範囲や流下痕跡について独立行政法人土木研究所 火山・土石流チームから、貴重なデータを提供頂いた。中部地方整備局越 美山系砂防事務所から、揖斐川について貴重なデータを提供頂いた。ここに記して感謝致します。

●●● 今後の土石流シミュレーションの課題

- 供給ハイドログラフの設定手法
- 構造物(砂防施設だけでなく、下流の住宅地における家屋や道路、橋など)の存在、破壊による影響
- 境界の設定方法の検証
- 混合粒径(巨礫、細粒土砂)の影響

- 数値シミュレーションの活用
 - 災害を想定した複数シナリオの検討、きめ細かなハザードマップの作成と周知、ソフト対策(垂直避難などを含めた)の提案
 - 可視化によるリアルな土石流シミュレーションの実現
 - これは、大学等の研究機関だけでは難しく、Forum8による土石流プラグインの活用・更なる発展を期待