

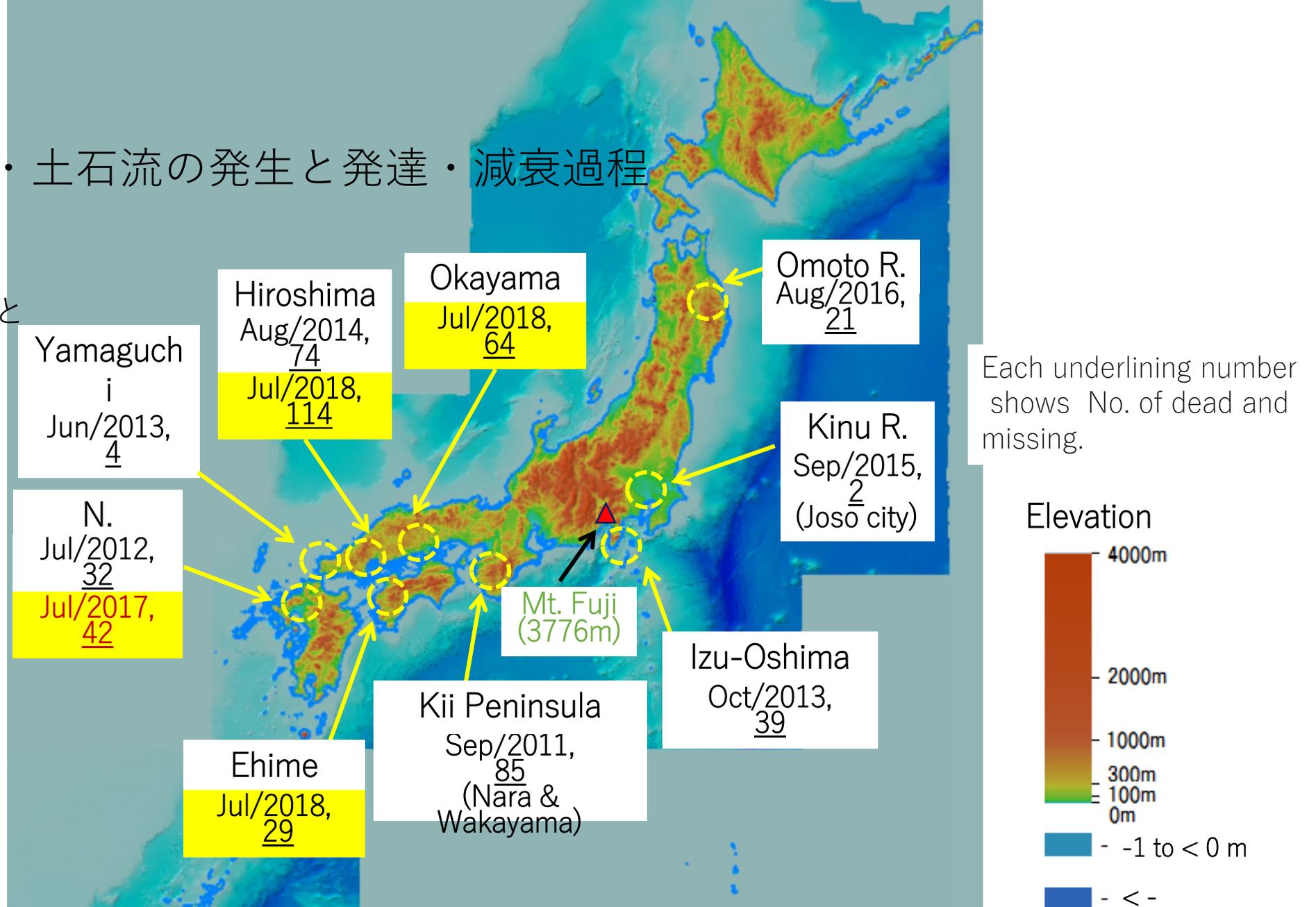
# 山地流域における土砂水理現象とこれらを解くための鍵

江頭進治 土木研究所 ICHARM  
s-egashira77@pwri.go.jp

1. 豪雨に伴う山腹崩壊・土石流の発生と発達・減衰（堆積）過程
2. 流砂・河床変動を伴う洪水流
3. 遷移領域における河道設計の考え方

# 1. 豪雨に伴う崩壊・土石流の発生と発達・減衰過程

- ・ 豪雨災害調査や基礎研究から学んだこと



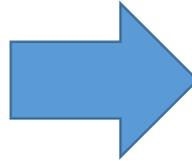
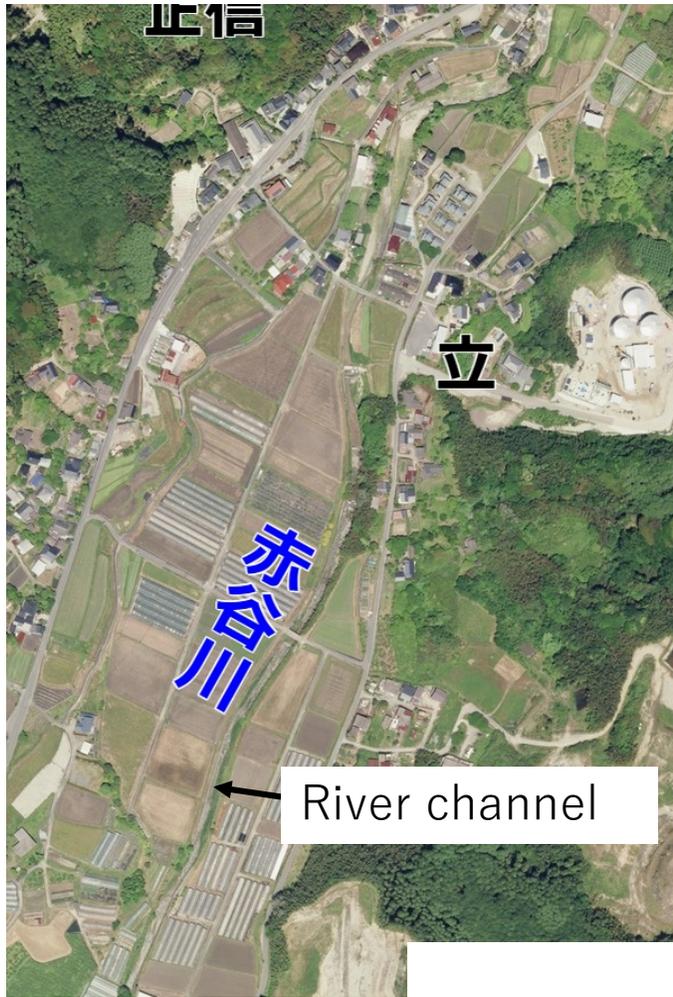
最近の土砂・洪水災害



2017年7月九州北部豪に伴う土砂・洪水災害（赤谷川流域）



赤谷川上流域の小溪流における土石流堆積物  
(2017 九州北部豪雨)



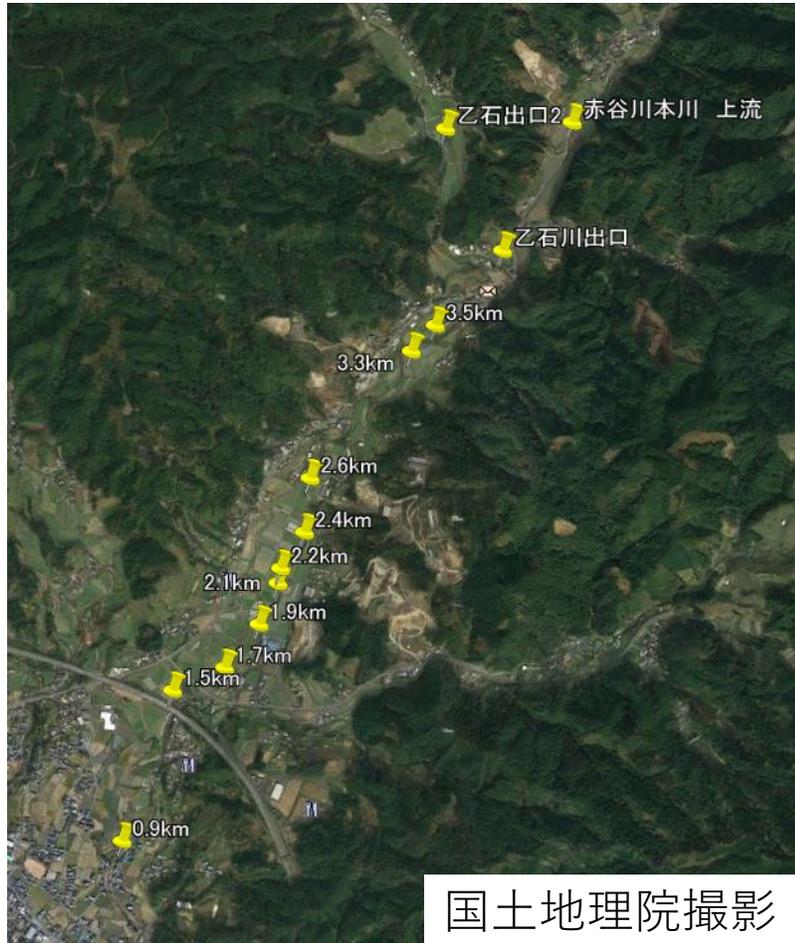
洪水前

洪水直後

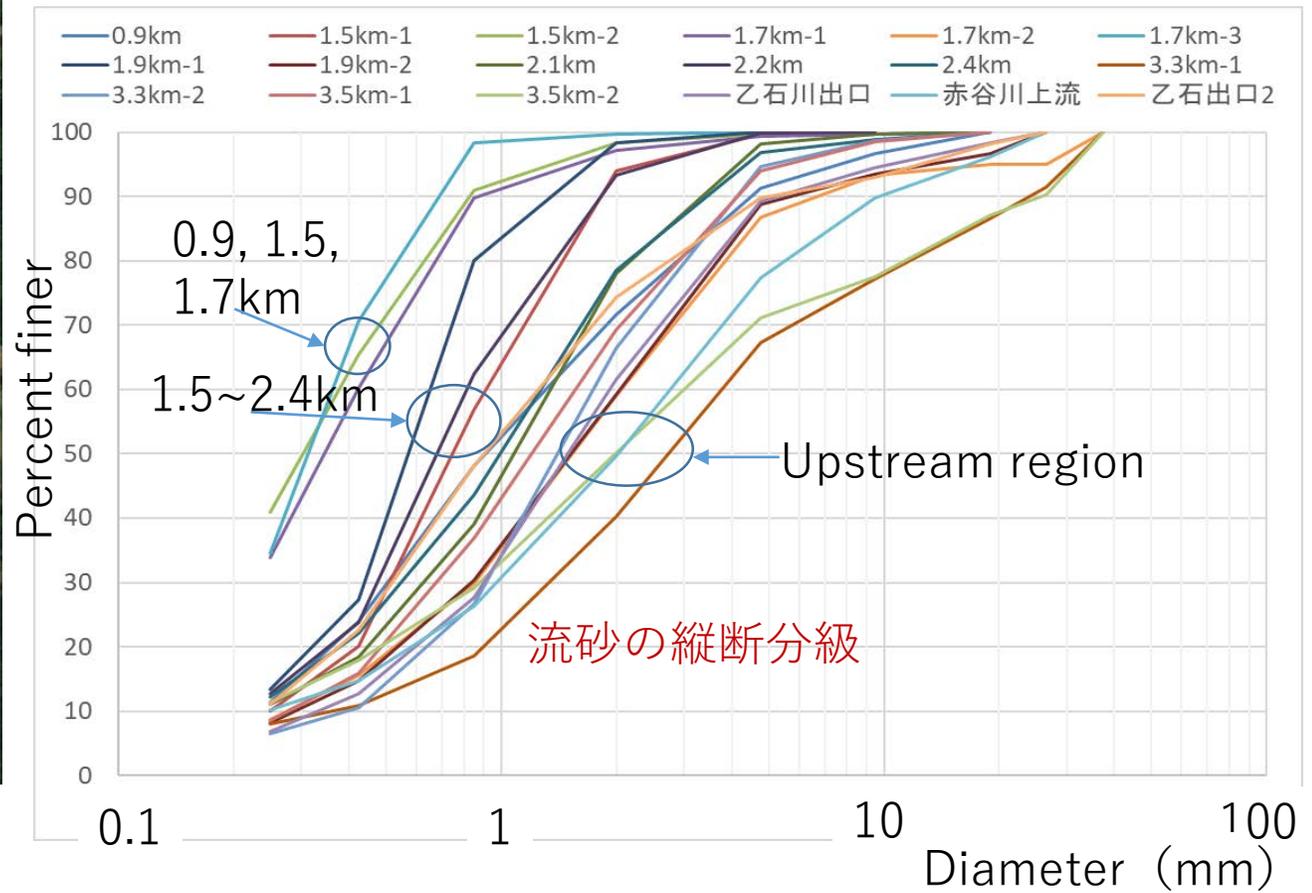
赤谷川における洪水前後の流路の状態

(2017年九州北部豪雨)

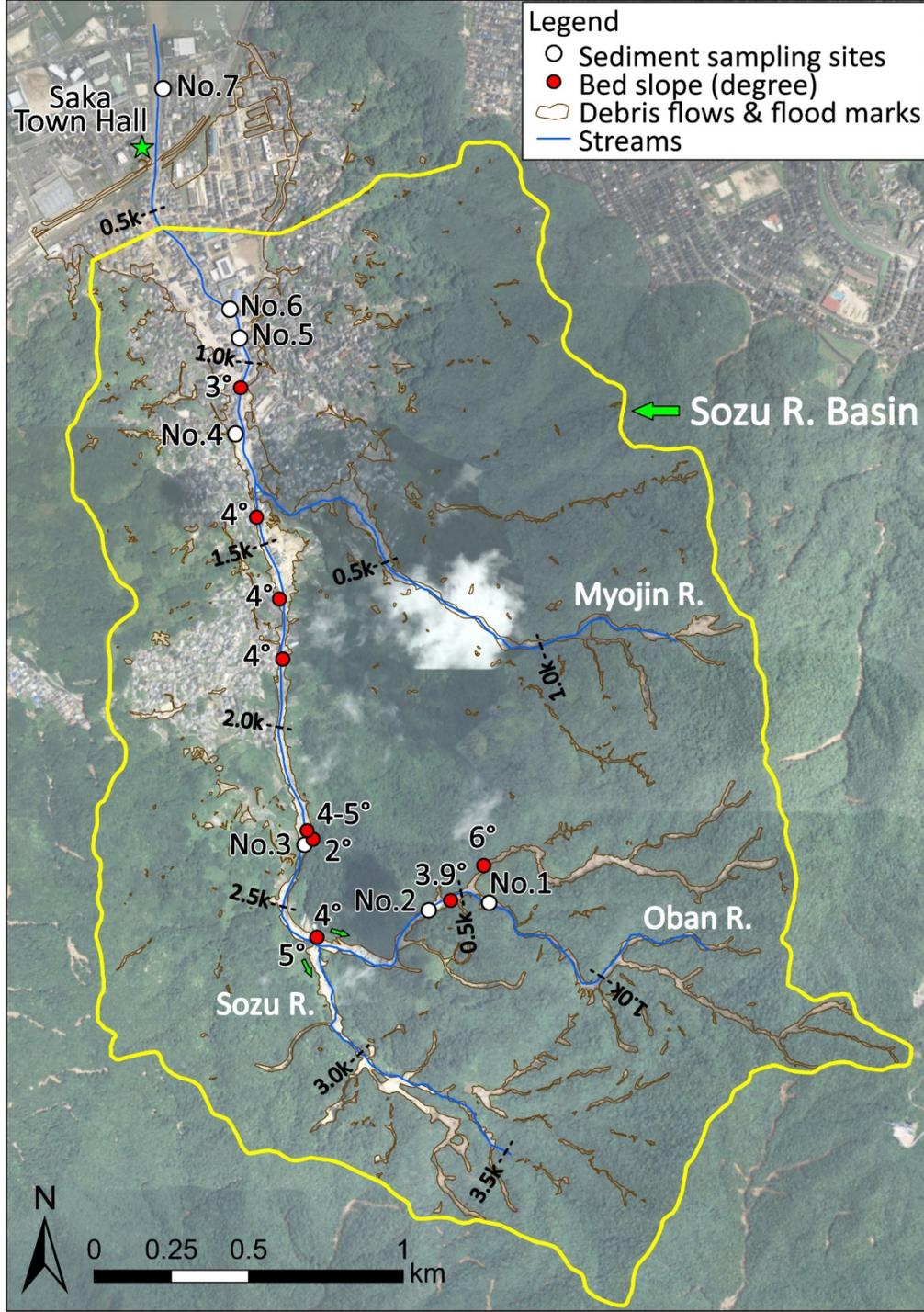
国土地理院撮影



Sediment sampling sites for sieve analyses

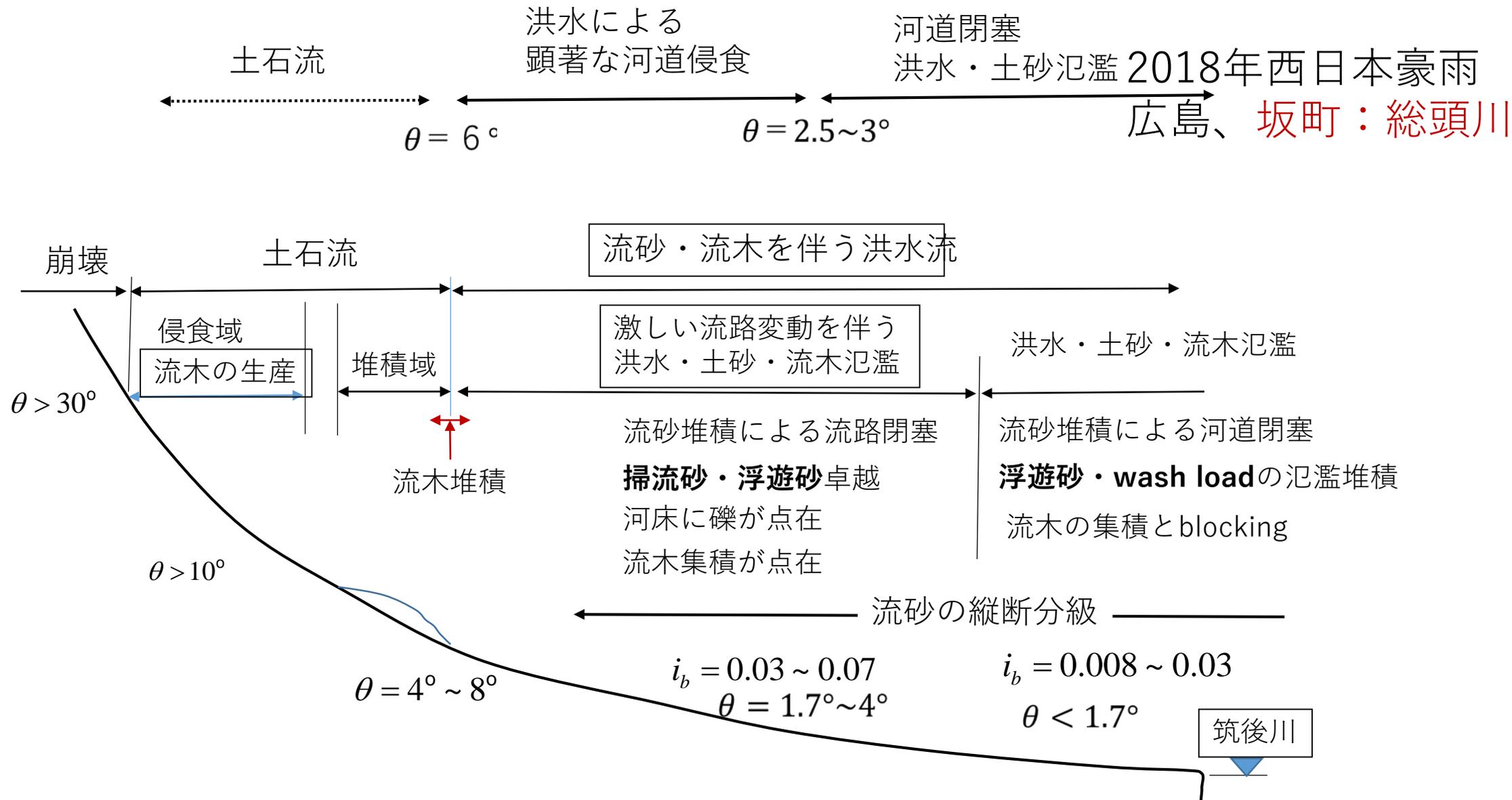


赤谷川における河床材料の粒度分布  
(2017 九州北部豪雨)



2018年西日本豪雨災害  
 総頭川  
 (広島県、坂町)

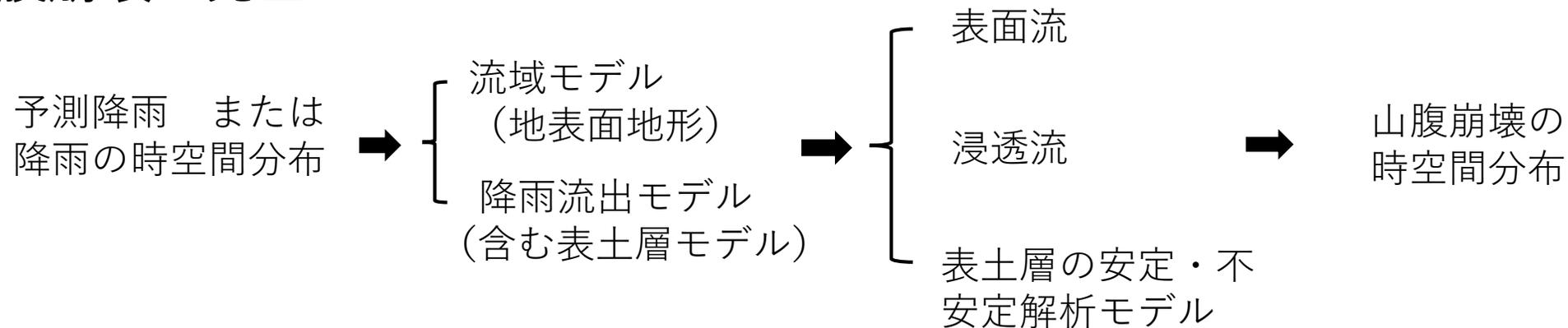
国土地理院撮影



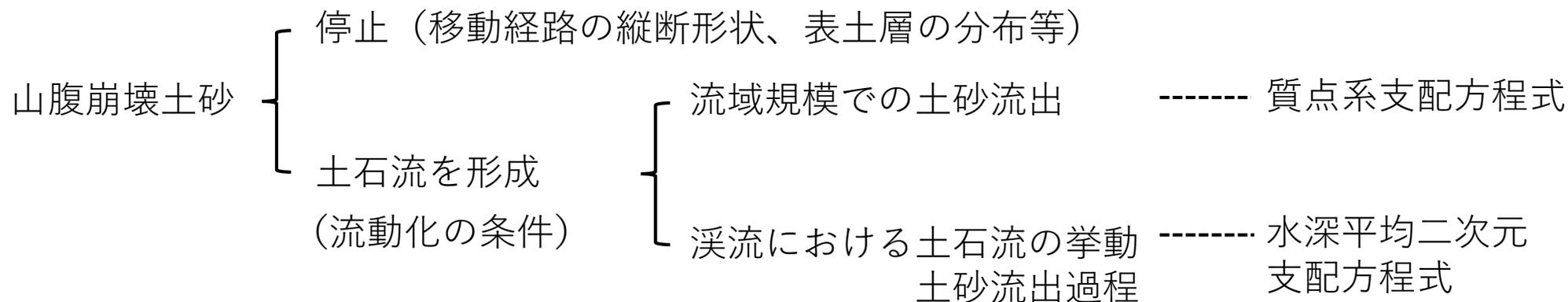
2017年7月九州北部豪雨災害時の赤谷における洪水・流砂現象の縦断分布

# ・山腹崩壊・土石流

## 山腹崩壊の発生



## 崩壊土砂の流出過程



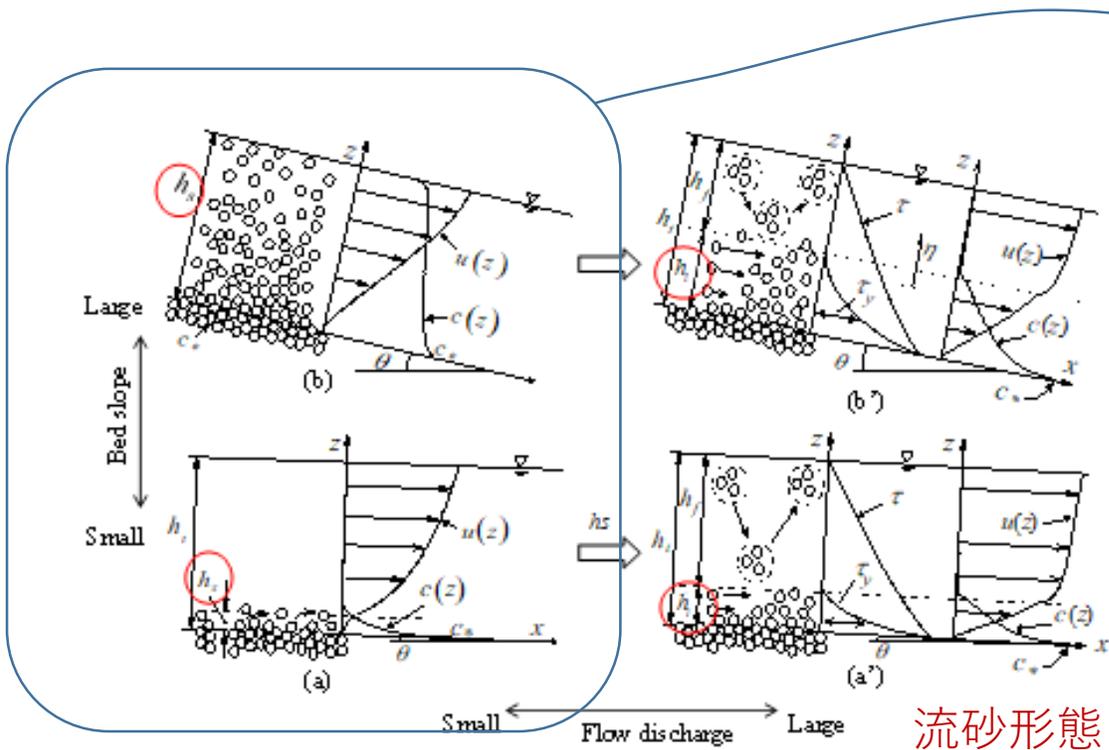
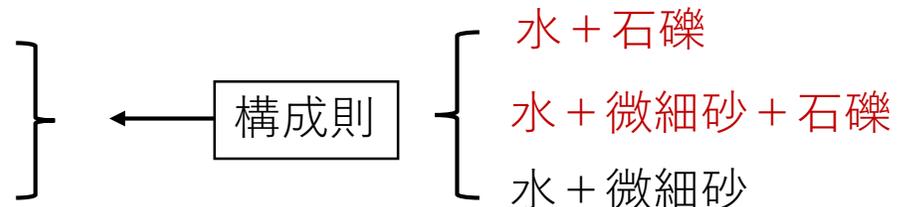
# 崩壊土砂の流出過程（土石流の過程）－抵抗則と侵食・堆積速度

## 抵抗則

$$\tau_b = \tau_y + f v^2$$

流動応力

降伏応力：クーロンの摩擦係数  
(土石流の停止現象、流動性)



このフレームに  
微細砂が加わると  
？

$h_s$  掃流砂層

流砂形態

# 侵食・堆積速度

$$E = E(\theta, \theta_e, -, -)$$

$\theta$  斜面や溪床の局所勾配

$\theta_e$  土石流を構成する石礫の土砂濃度  $c_c$  に対応する平衡勾配

$\theta > \theta_e$  侵食

$\theta < \theta_e$  堆積

平衡勾配は

$$\tan\theta_e = \frac{1}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \left[ \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_c \tan\phi + \frac{c_h}{\rho g h} \right]$$

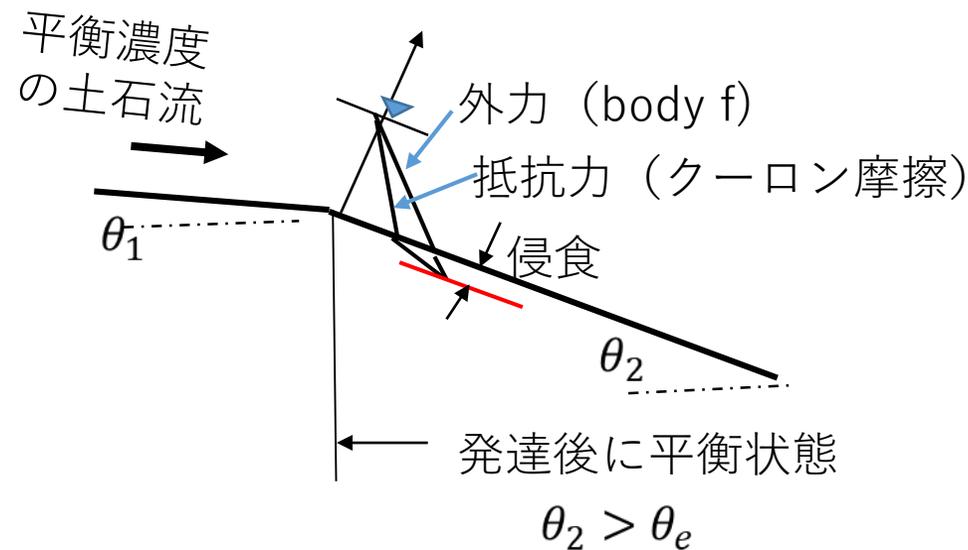
$\sigma$  土粒子の質量密度

$\rho$  流体層の質量密度

$h$  流動深

$c_c$  土石流を構成する石礫の土砂濃度

$c_h$  溪床材料の粘着力



溪床侵食による土石流の発達

崩壊土砂に含まれる微細砂が固相から流体相  
 へ相変化すると、土石流の流動性が増加する

簡単のため溪床材料の粘着力を0とすると、平衡勾配は

$$\tan\theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_c}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \tan\phi$$

崩壊土砂の土砂濃度  $c_*$  間隙が水で飽和

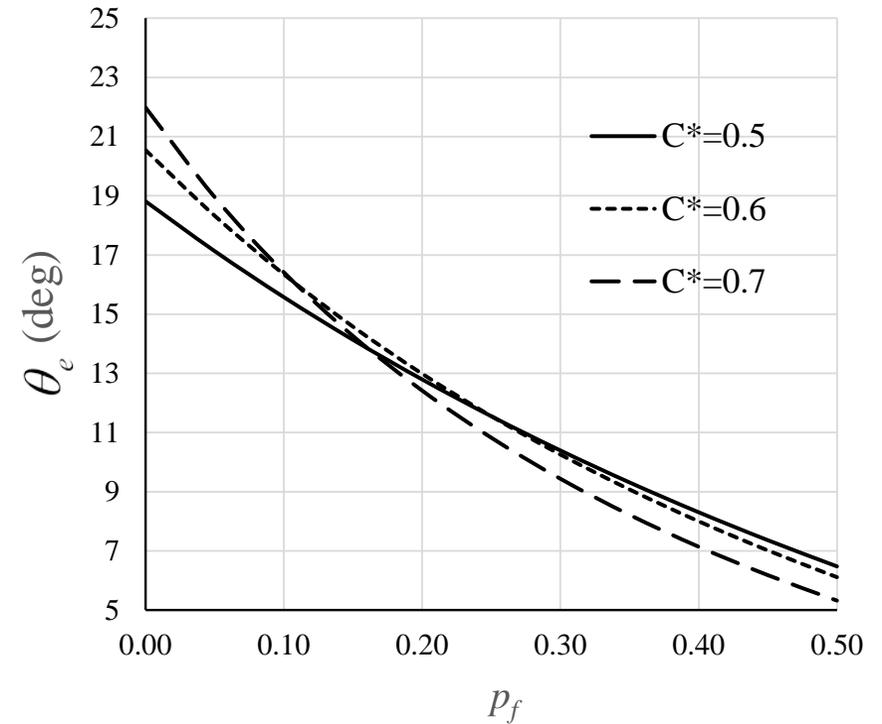
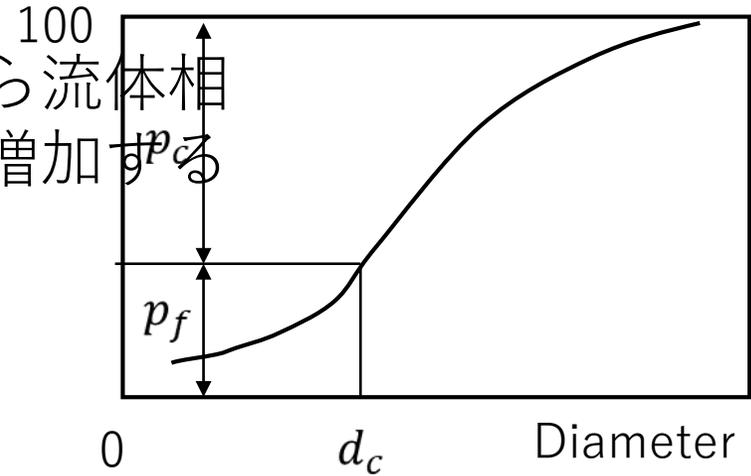
$$c_c = p_c c_* \quad c_f = p_f c_*$$

$$\rho = (\sigma - \rho_w)c_f + \rho_w$$

土砂濃度の減少  $c_* \rightarrow c_c$

間隙水の質量密度の増加  $\rho_w \rightarrow \rho$

平衡勾配の減少 → 流動性の増加



# 土石流・流木の支配方程式 (水深平均二次元モデル)

質量保存則

水と土砂 (粗い土砂 + 微細砂)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_*}$$

粗い砂礫について

$$(0 < E) \quad \frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_c uh}{\partial x} + \frac{\partial \gamma c_c vh}{\partial y} = p_c E$$

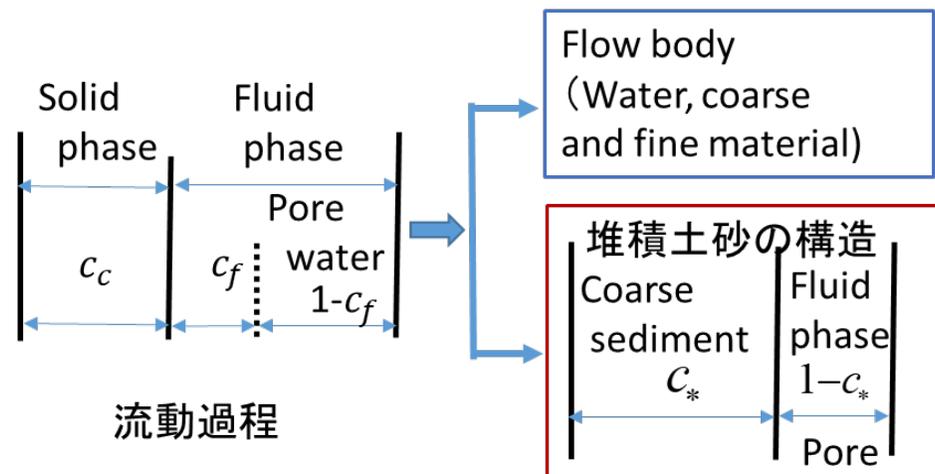
$$(E < 0) \quad \frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_c uh}{\partial x} + \frac{\partial \gamma c_c vh}{\partial y} = E$$

流体相として振る舞う微細砂について

$$(0 < E) \quad \frac{\partial (1 - c_c) c_f h}{\partial t} + \frac{\partial (1 - c_c) c_f uh}{\partial x} + \frac{\partial (1 - c_c) c_f vh}{\partial y} = p_f E$$

(E < 0)

$$\frac{\partial (1 - c_c) c_f h}{\partial t} + \frac{\partial (1 - c_c) c_f uh}{\partial x} + \frac{\partial (1 - c_c) c_c vh}{\partial y} = (1 - c_*) c_f E$$



Flow body  
(Water, coarse  
and fine material)

堆積土砂の構造  
Coarse  
sediment  
 $c_*$   
Fluid  
phase  
 $1 - c_*$   
Pore

堆積過程

$E$  侵食速度 ( $E < 0$ : 堆積)

$\rho_c$  表層における粗い砂礫の含有率

$c_c$  流れ中の粗い砂礫の濃度

$\rho_f$  表層における細粒土砂の含有率

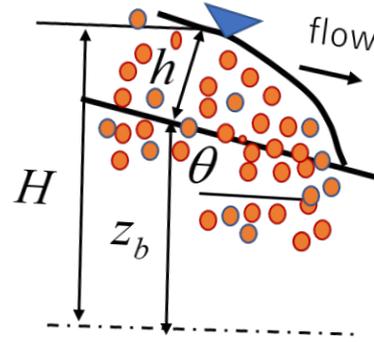
$c_f$  流体相における細粒土砂の濃度

$c_*$  静止堆積層の土砂濃度

## 運動量保存則

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial uuh}{\partial x} + \frac{\partial vuh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m}$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \frac{\partial vvh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m}$$



$H$  水表面の標高

$z_b$  河床面の標高

$\tau_b$   $\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$  河床せん断力

$h$  流動深  $u, v$  流速

## 河床材料の質量保存則

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_* \cos \theta}$$

$\rho_m = (\sigma - \rho)c_c + \rho$  土石流の質量密度

$\rho = (\sigma - \rho_w)c_f + \rho_w$  土石流の流体相の質量密度

## 侵食速度式 ( $E < 0$ : 堆積速度)

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

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma / \rho - 1)c_c}{(\sigma / \rho - 1)c_c + 1} \tan \phi$$

$\theta$  土砂濃度  $c_c$  に対する平衡勾配

$\phi$  砂礫の摩擦角

$c_*$  静止堆積層の土砂濃度

$\tau_b$  : 芦田・江頭・中川: 21世紀の河川学、京都大学出版会, 2008.

# 流木の質量保存則（移流方程式）（土石流は層流だから拡散項を省略）

$$\partial z / \partial t < 0 \quad (E > 0)$$

$$\frac{\partial C_{drfh}}{\partial t} + \frac{\partial C_{drfuh}}{\partial x} + \frac{\partial C_{drfvh}}{\partial y} = E \frac{S}{D} r(t, x, y)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -E \frac{S}{D} r(t, x, y)$$

.....  
流木（立ち木）の取り込み

$$\partial z / \partial t > 0 \quad (E < 0)$$

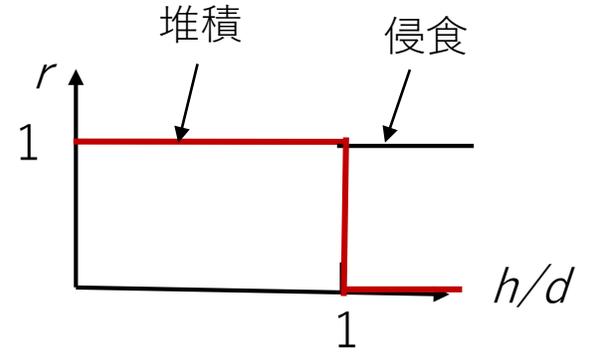
.....  
流木（立ち木）の流出

$$\frac{\partial C_{drfh}}{\partial t} + \frac{\partial C_{drfuh}}{\partial x} + \frac{\partial C_{drfvh}}{\partial y} = EC_{drf} r(t, x, y)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -EC_{drf} r(t, x, y)$$

.....  
流木の堆積

$C_{drf}$  土石流における流木濃度     $D$  流木の根茎深  
 $S$  単位面積当たりの流木(立木)の貯留量（貯留高）



流木の離脱・補足率と相対水深

侵食速度式（ $E < 0$ : 堆積速度）

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

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma / \rho - 1)c_c}{(\sigma / \rho - 1)c_c + 1} \tan \phi$$

$\theta$  土砂濃度  $c_c$  に対する平衡勾配

$\phi$  砂礫の摩擦角

# 質点系モデル

## 侵食過程 ( $0 < E$ ) において

崩土全体、粗い粒子及び微細砂の質量保存則は、それぞれ

$$v \frac{dA}{dx} = \frac{El}{c_*} \quad v \frac{dc_c A}{dx} = p_c El \quad v \frac{dc_f(1-c_c)A}{dx} = p_f El$$

$l = \sqrt{A/\alpha}$  (形状の相似性) を仮定すると、上式は

$$\frac{dA}{dx} = \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2} \quad \frac{dc_c A}{dx} = p_c c_* \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2}$$

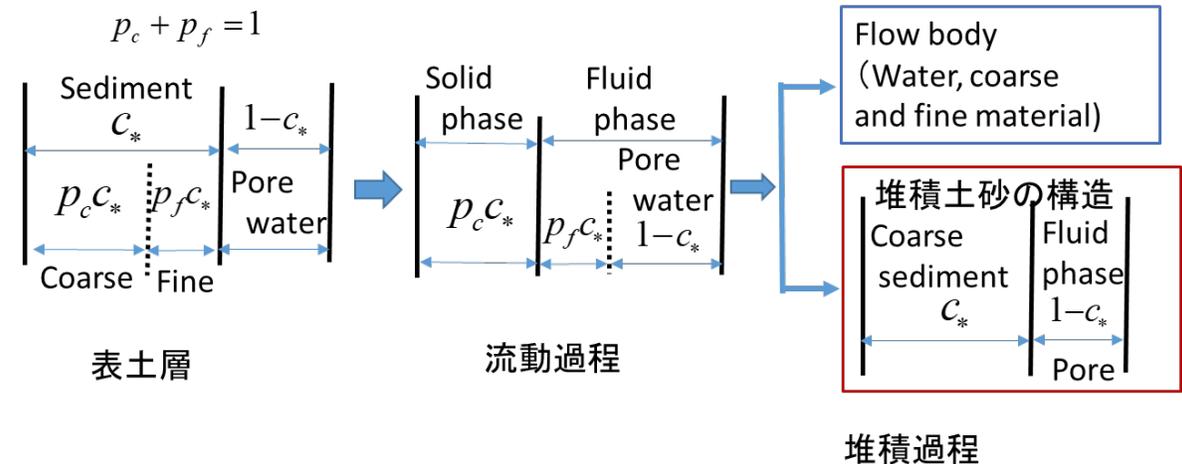
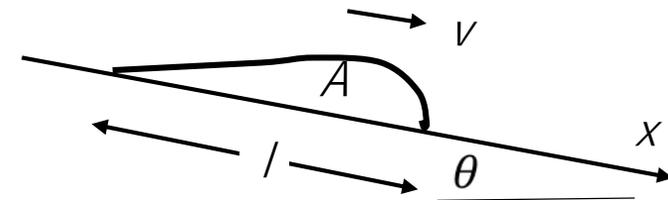
$$\frac{dc_f(1-c_c)A}{dx} = p_f c_* \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2}$$

## 堆積過程 ( $E < 0$ ) において、同様に

$$\frac{dA}{dx} = \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2} \quad \frac{dc_c A}{dx} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2}$$

$$\frac{dc_f(1-c_c)A}{dx} = c_f(1-c_*) \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2}$$

これらは、区分的に容易に解くことができるので、流域規模における土砂流出分布の議論に有効と思われる。



堆積過程において、粗い粒子が骨格を構成し、その間隙に流体相（水と微細砂）が取り込まれる仕組みで堆積が進む。

$$\frac{E}{v} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad \tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_c}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \tan \phi$$

$$\rho = \frac{1}{1 - p_c c_*} \{ (1 - c_*) \rho_w + p_f c_* \sigma \} \quad c_c = p_c c_*$$

# 山腹崩壊・土石流の解析例

赤字：鍵となる現象及び現象のモデル化

降雨条件、流域表層地形、**表土層モデル**、  
水深平均2次元モデルによる流出解析、  
**表土層の不安定解析（無限長斜面モデル）**



流域における表面流・浸透流及び  
**崩壊・土石流発生**の時空間分布

**微細砂の相変化**、崩壊の時空間分布、  
崩壊土砂および流木の運動に関する  
質点系モデル



流域における**流出土砂量**および**流木**  
の時空間分布

水深平均平面2次元支配方程式

**抵抗則**

**侵食速度式**

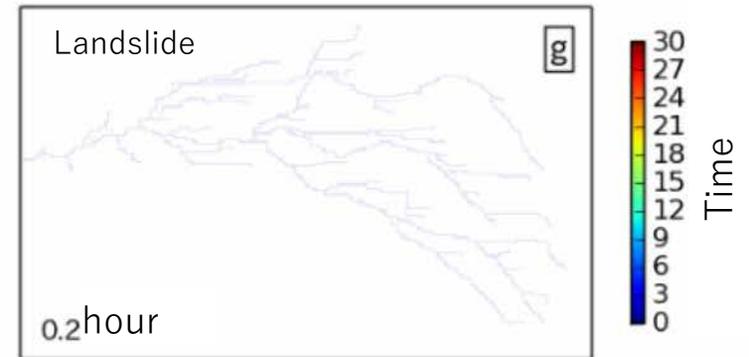
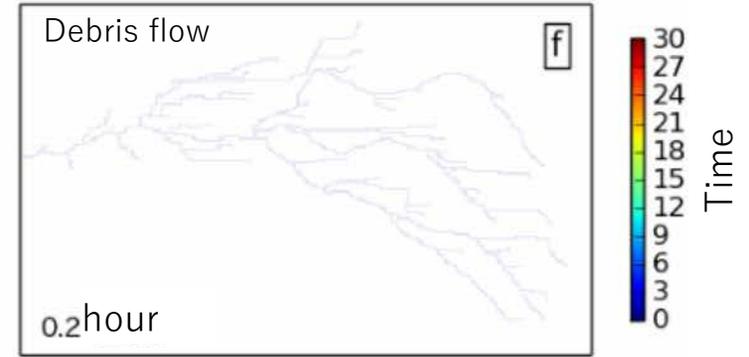
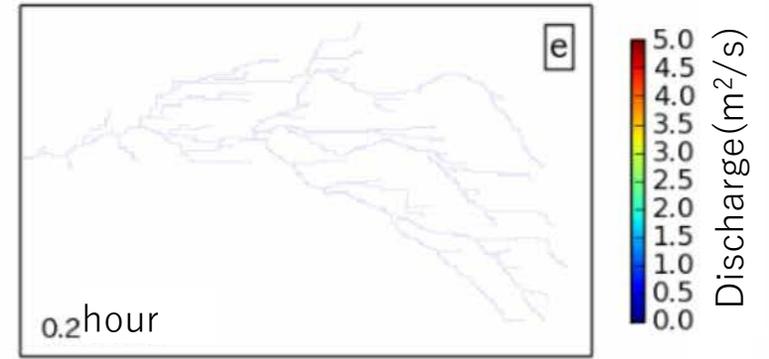
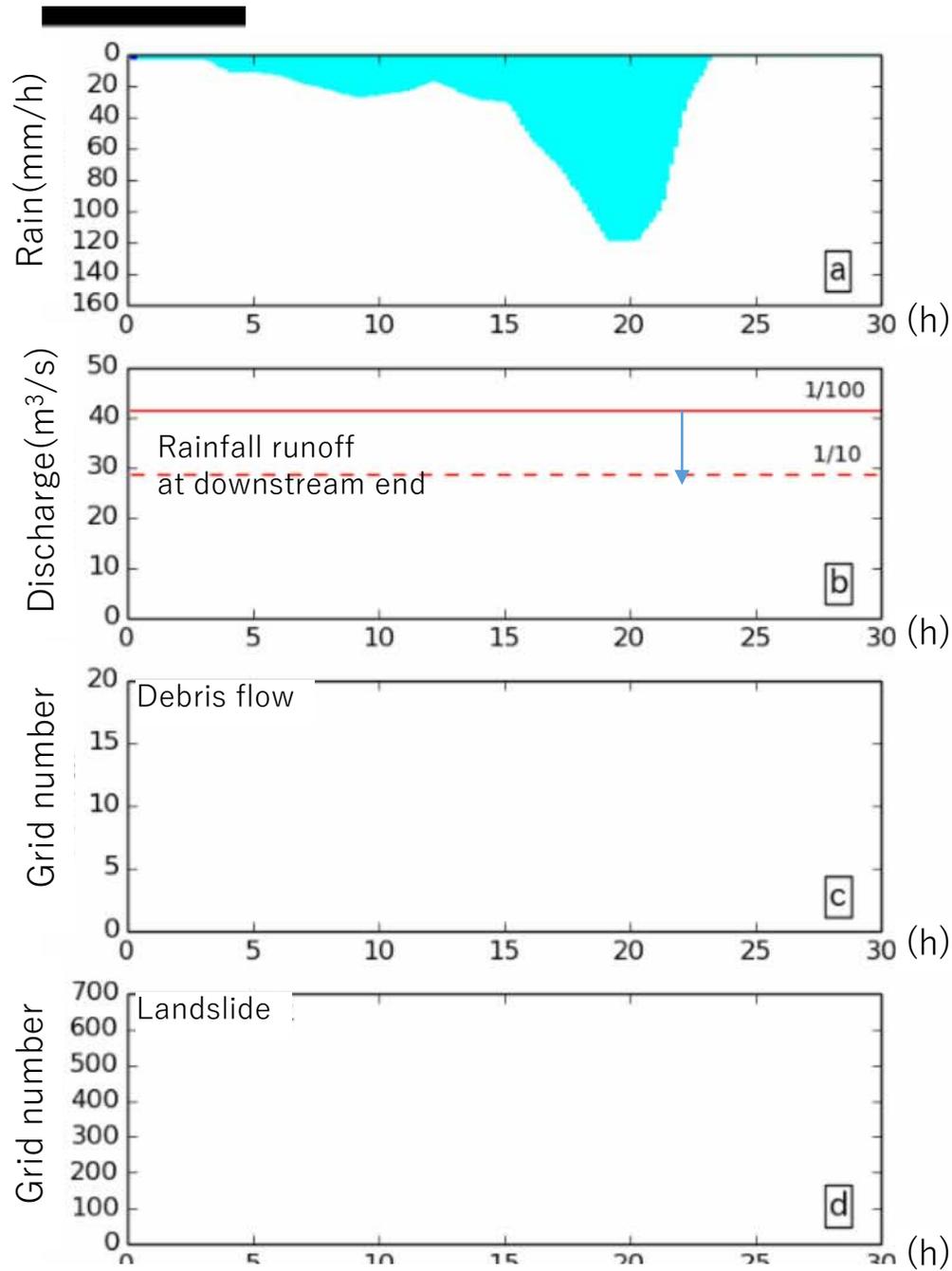
**微細砂の相変化**

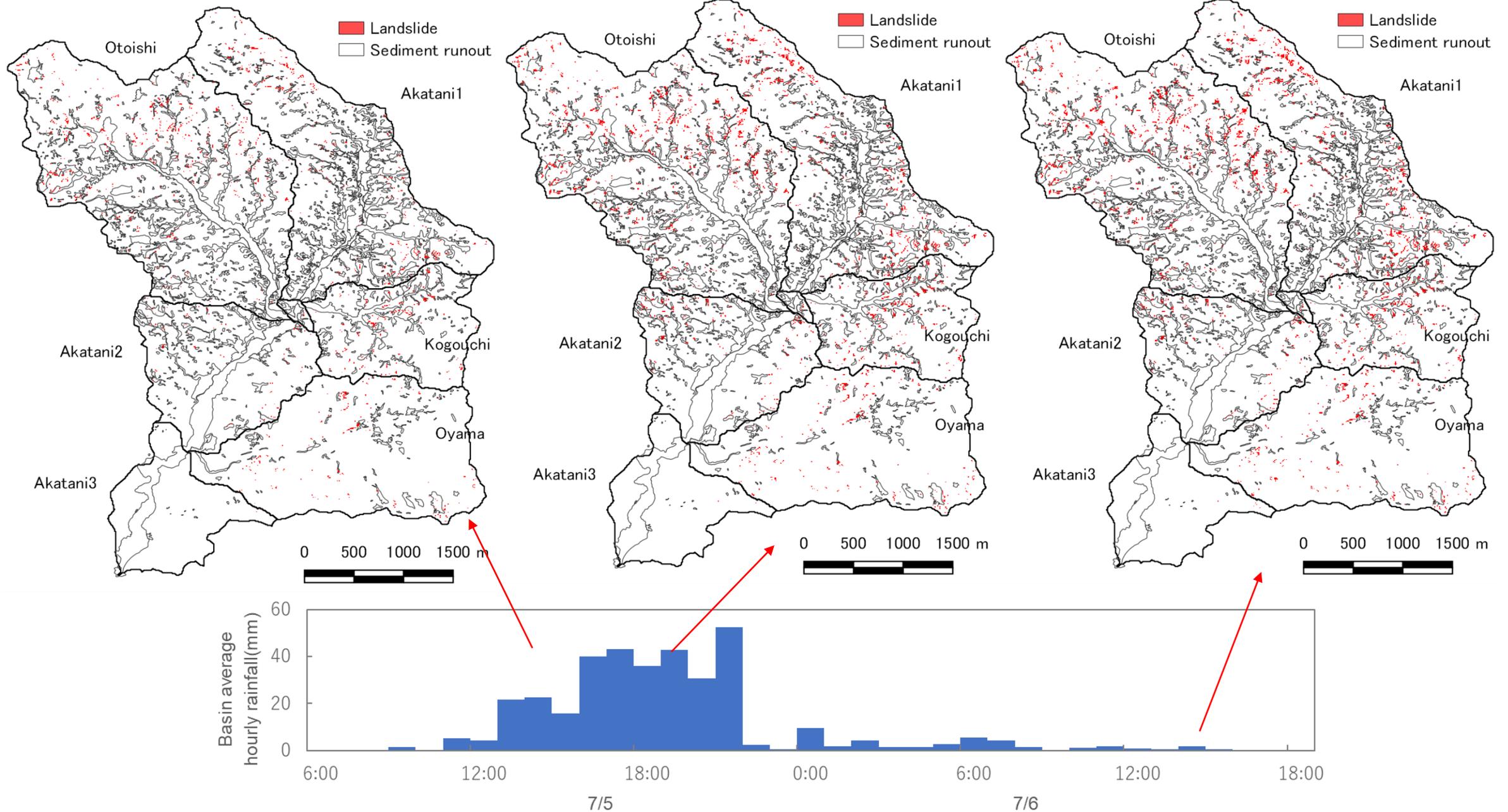
**流木の生成・輸送モデル**



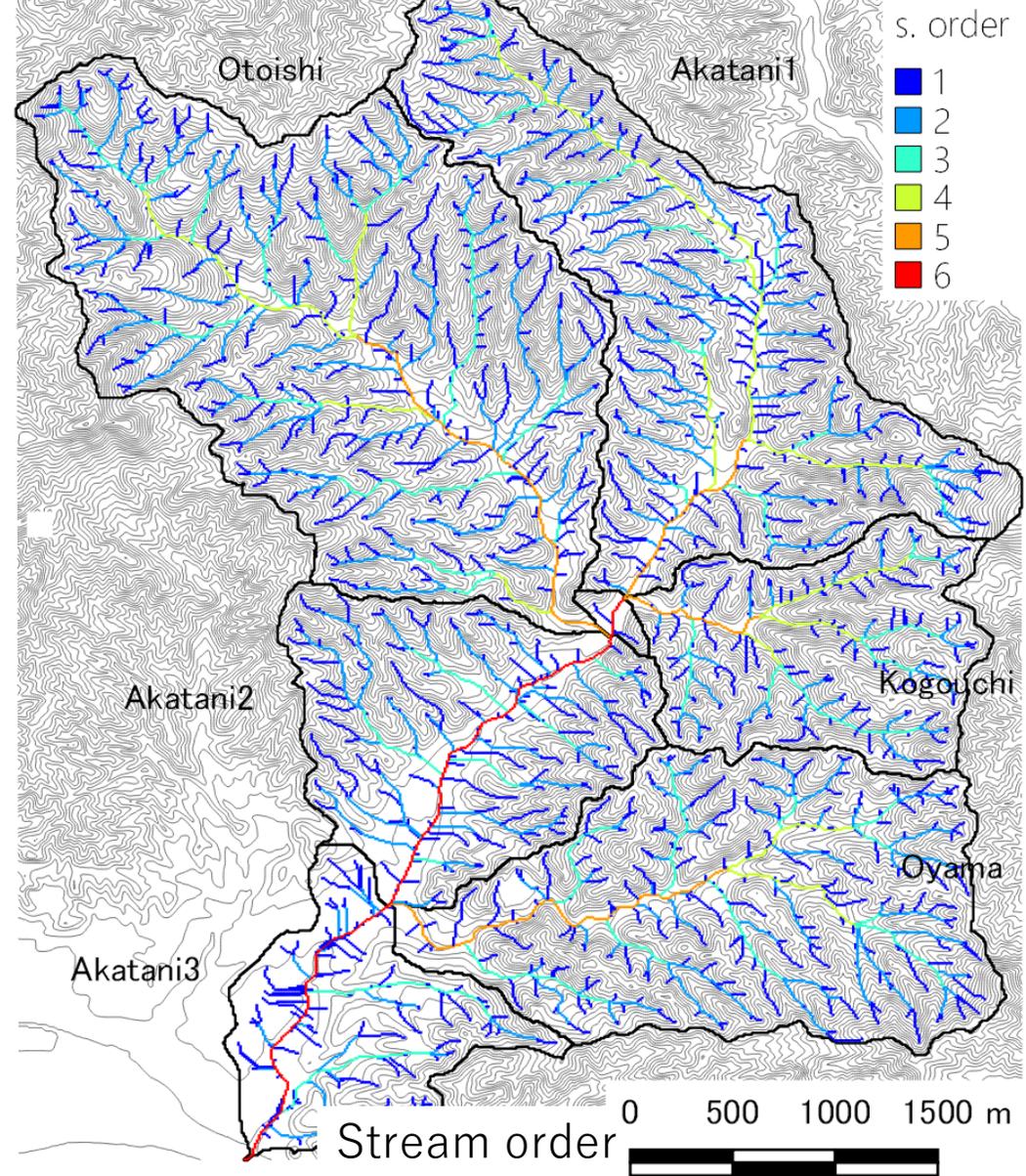
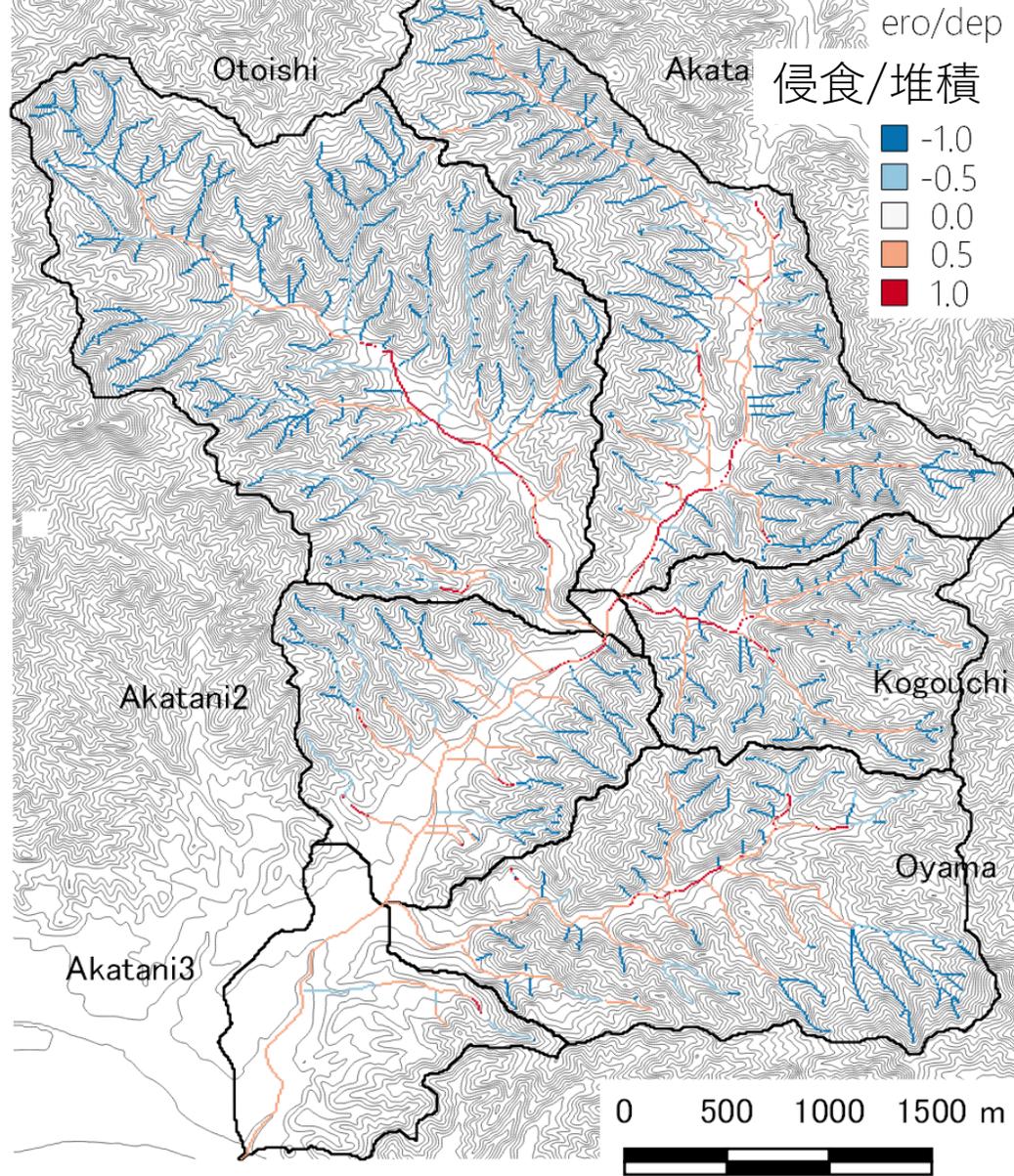
溪流における**土石流の発達・減衰過程**  
および**流木の流出過程**

Izu-oshima  
event  
2013



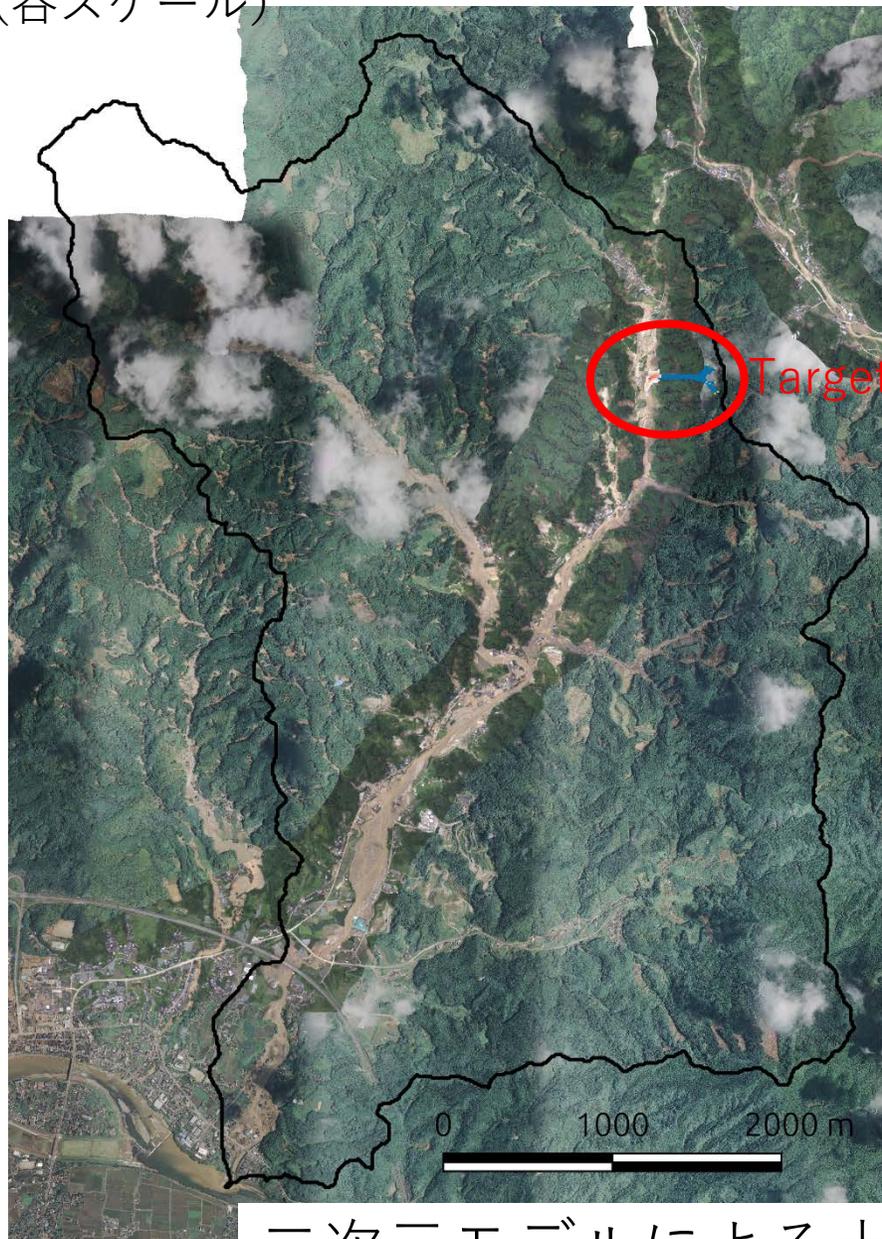


山腹崩壊の時空間分布 (2017年7月九州北部豪雨；赤谷) (山崎ら 2018)

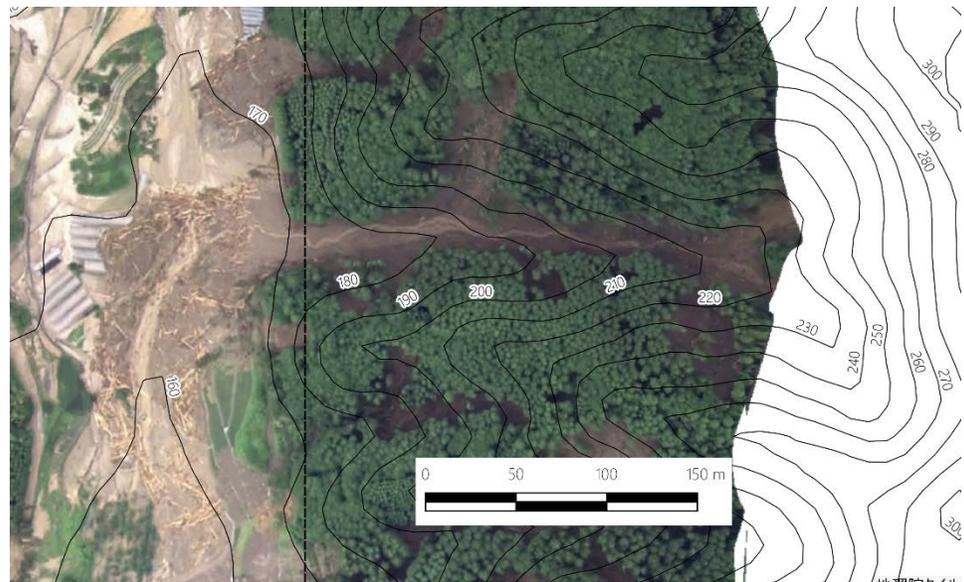


赤谷川における溪床の侵食・堆積の分布（質点系モデルによるシミュレーション  
（山崎ら 2018）

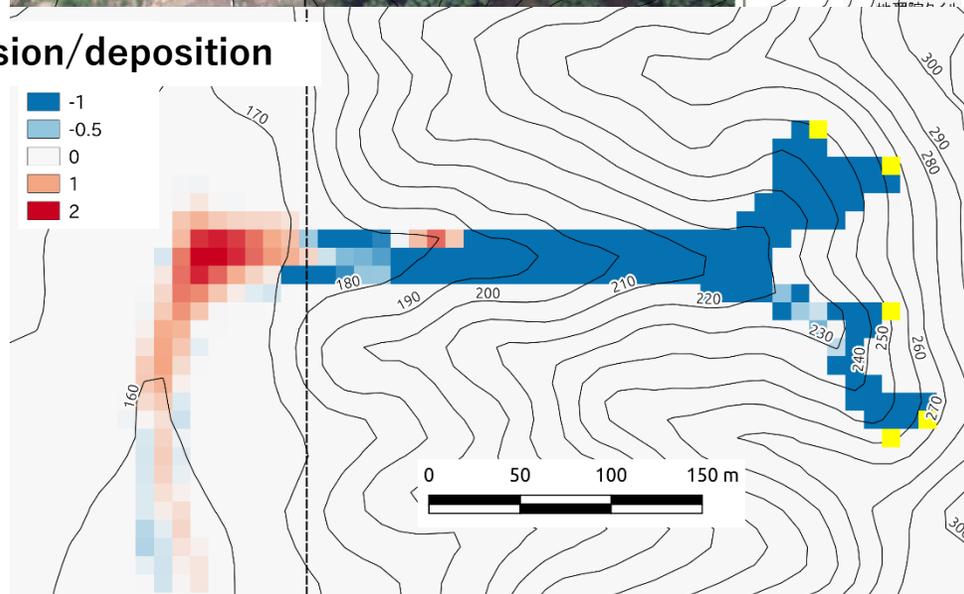
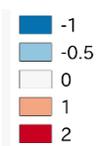
(谷スケール)



Target torrent



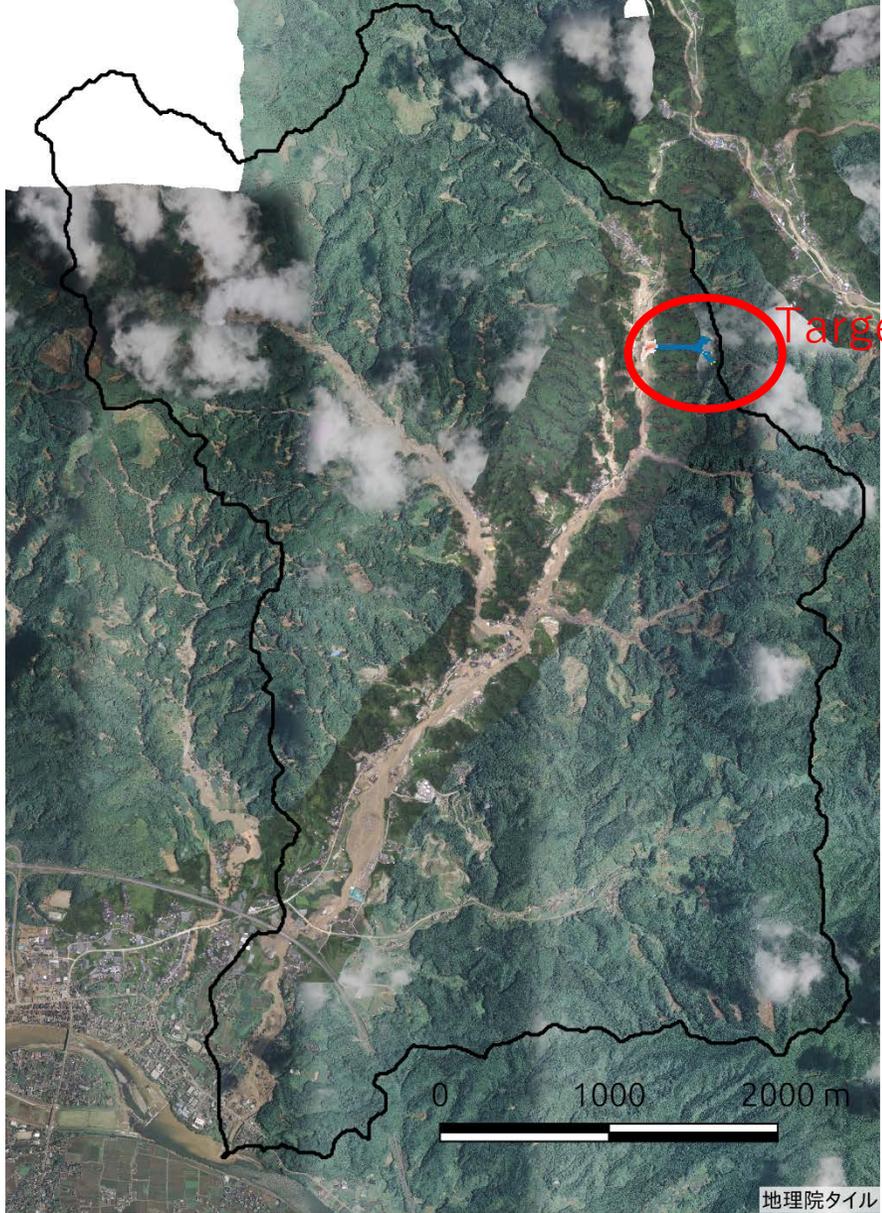
Erosion/deposition  
(m)



侵食・堆積の分布

(山崎ら 2018)

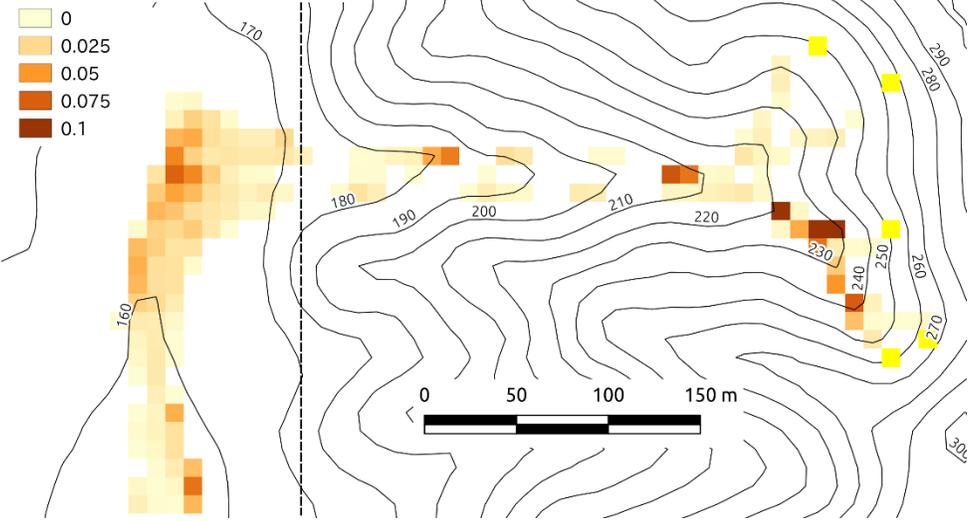
二次元モデルによる土石流のシミュレーション (赤谷川)



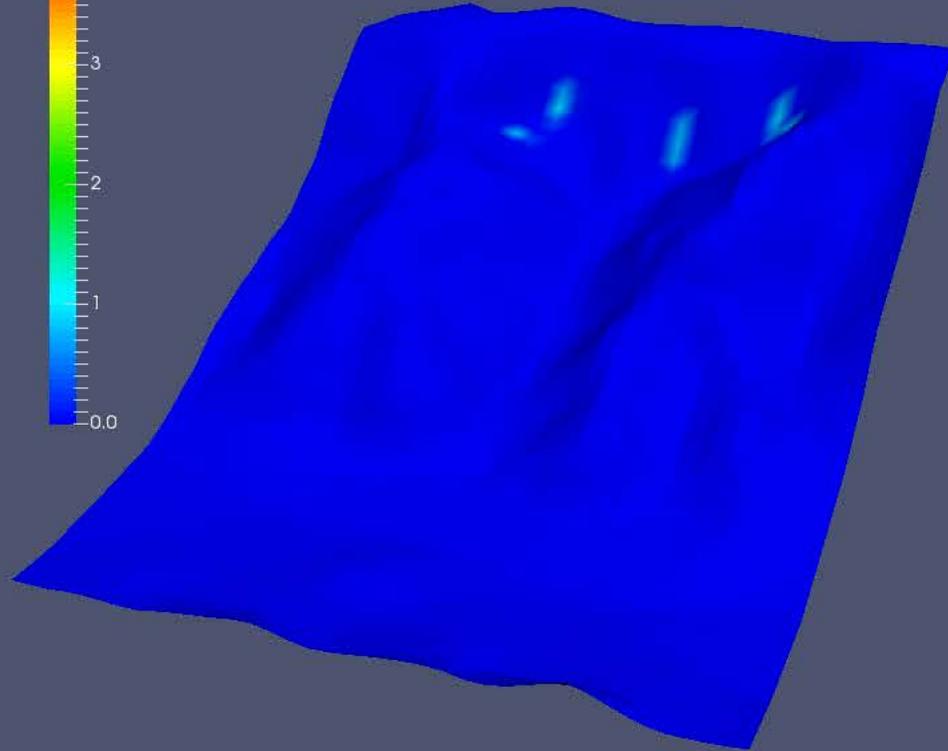
Target torrent



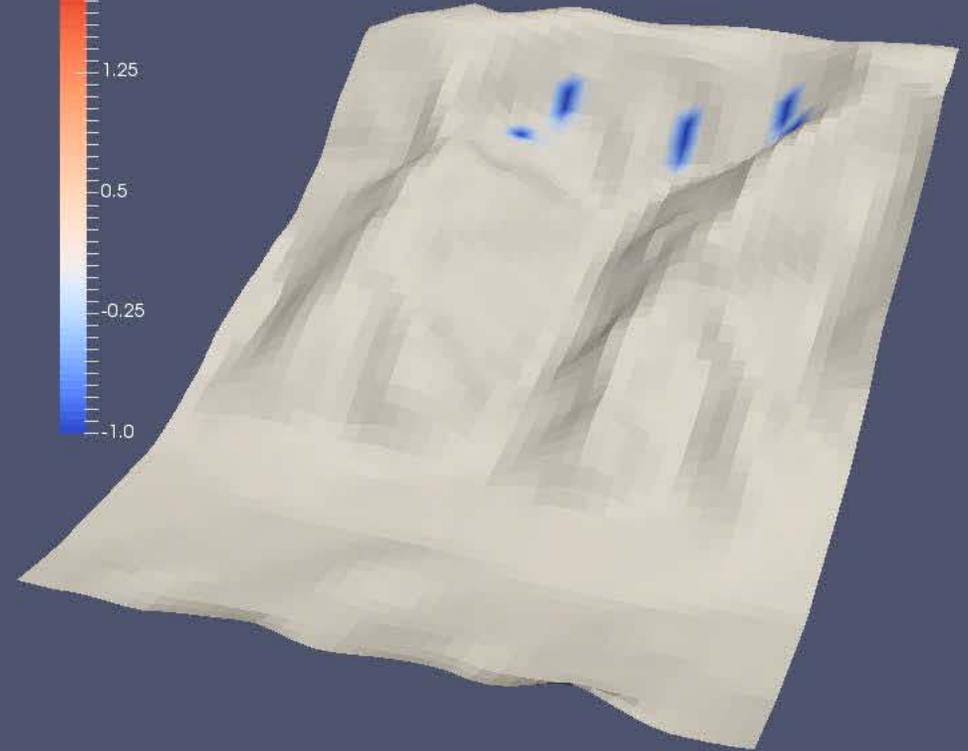
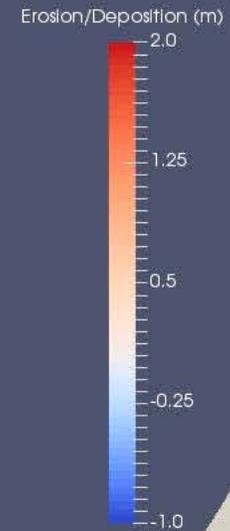
Deposition of driftwood (m)



土石流による流木の堆積 (山崎ら 2018)



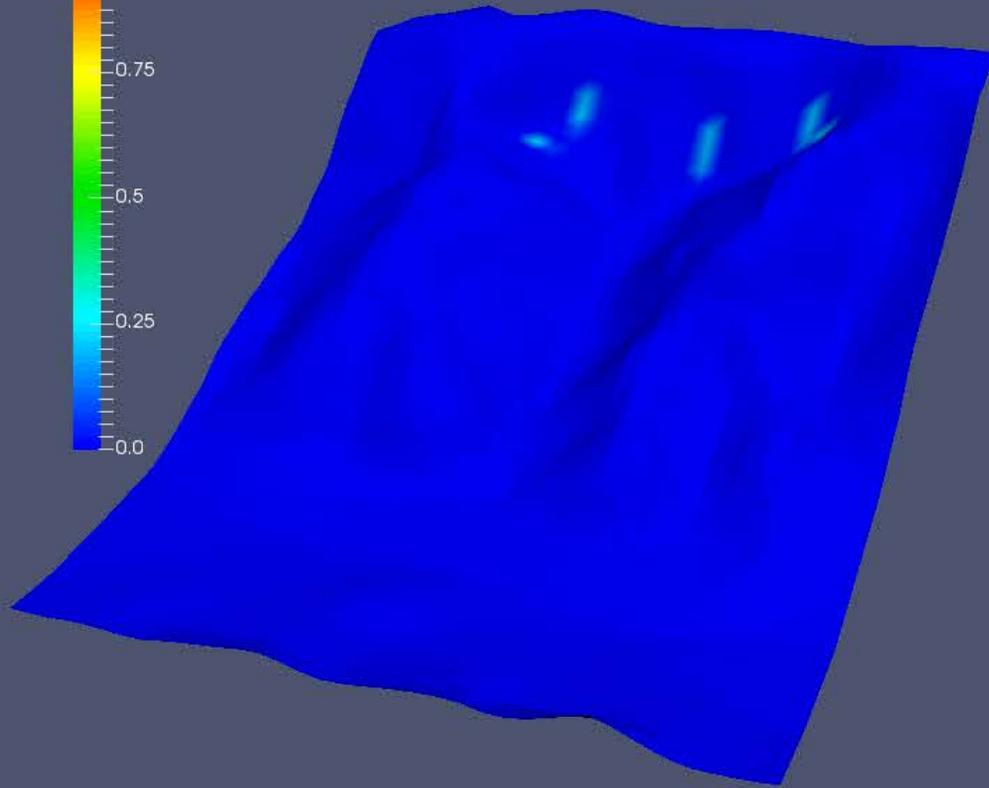
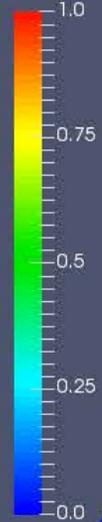
Flow depth (m)



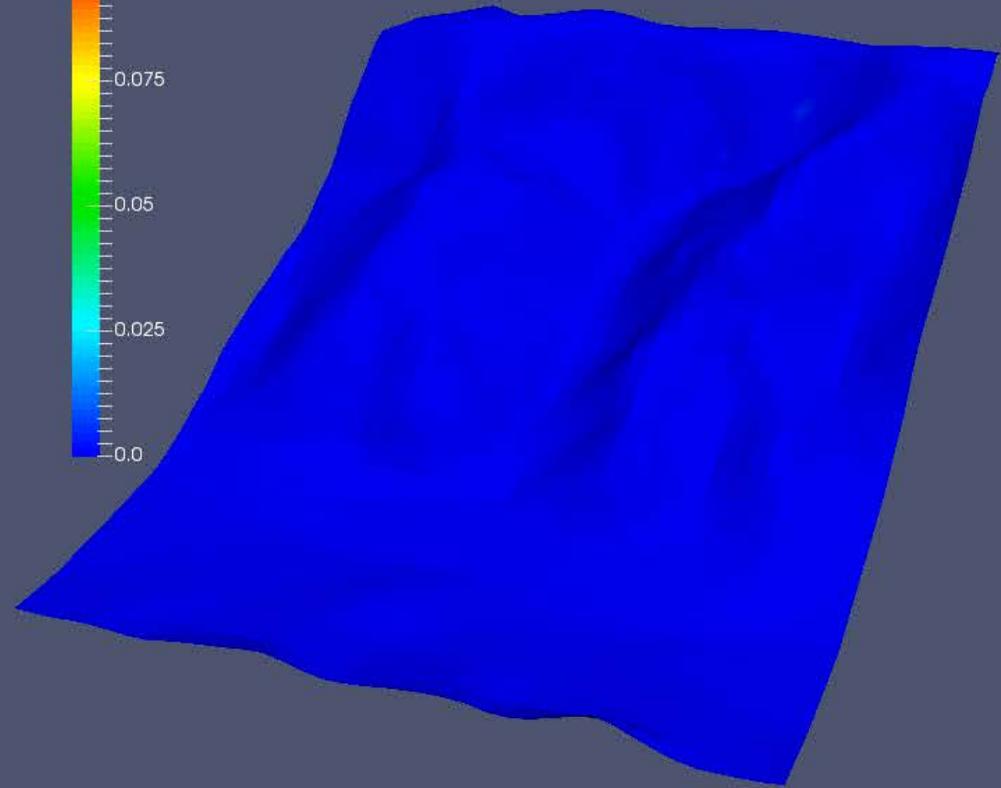
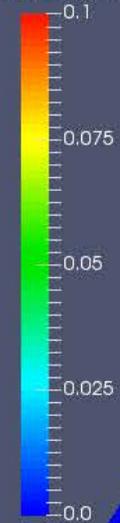
Erosion/deposition depth of  
torrent bed (m)

(山崎ら 2018)

DW vol in flow (m)



DW vol in bed (m)



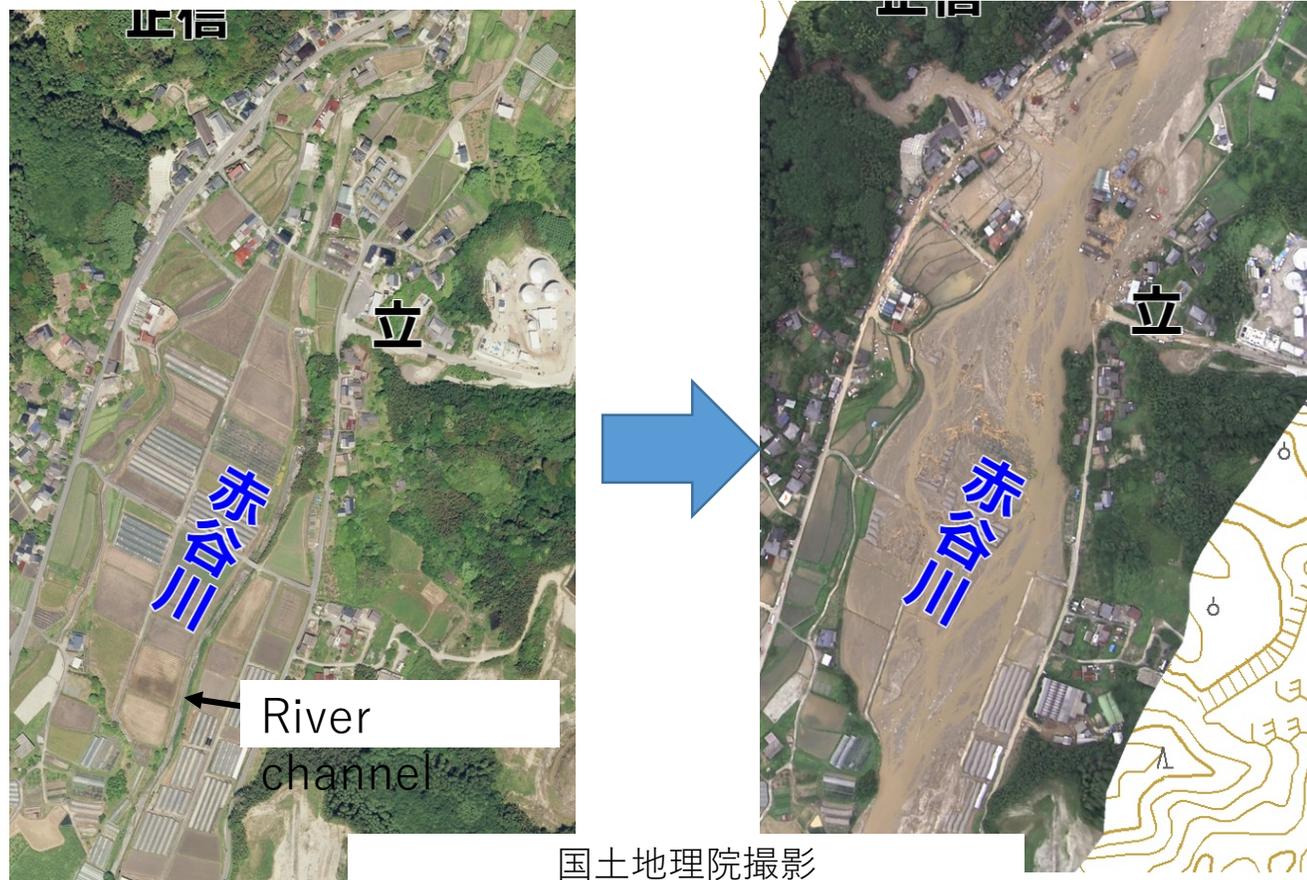
Driftwood volume in unit area of flow body (m)  
(Concentration  $\times$  Flow depth)

Driftwood volume deposited in unit  
of river bed (m)

(山崎ら 2018)

## 2. 流砂・河床変動を伴う洪水流

- ・ 評価の対象となる現象



洪水前

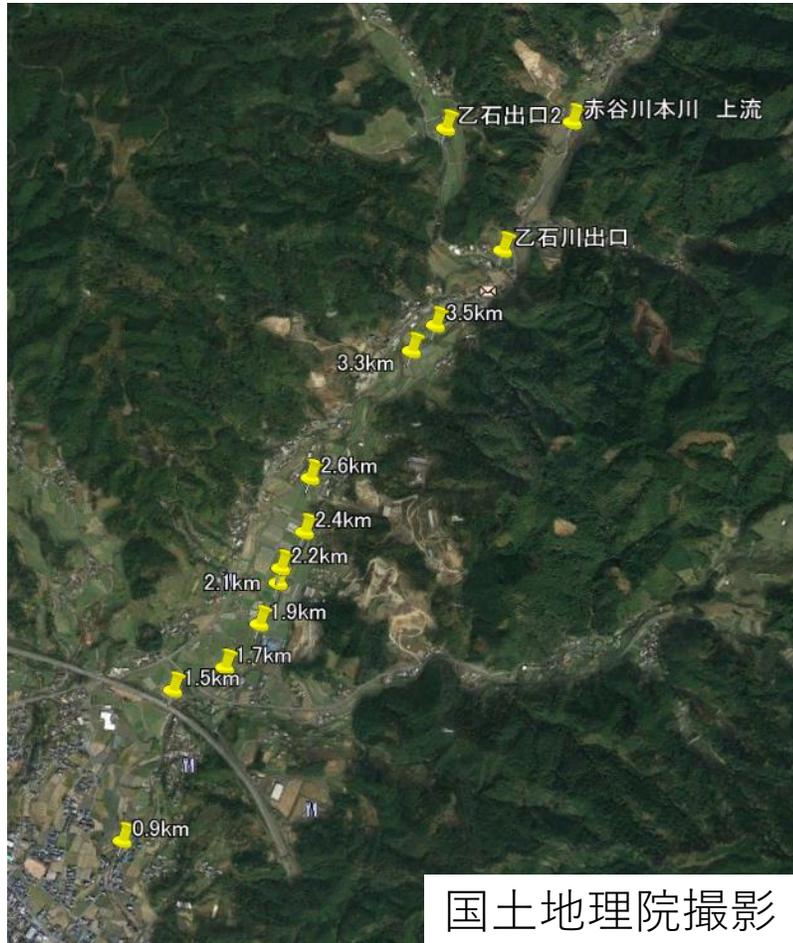
洪水直後

赤谷川における洪水前後の流路の状態

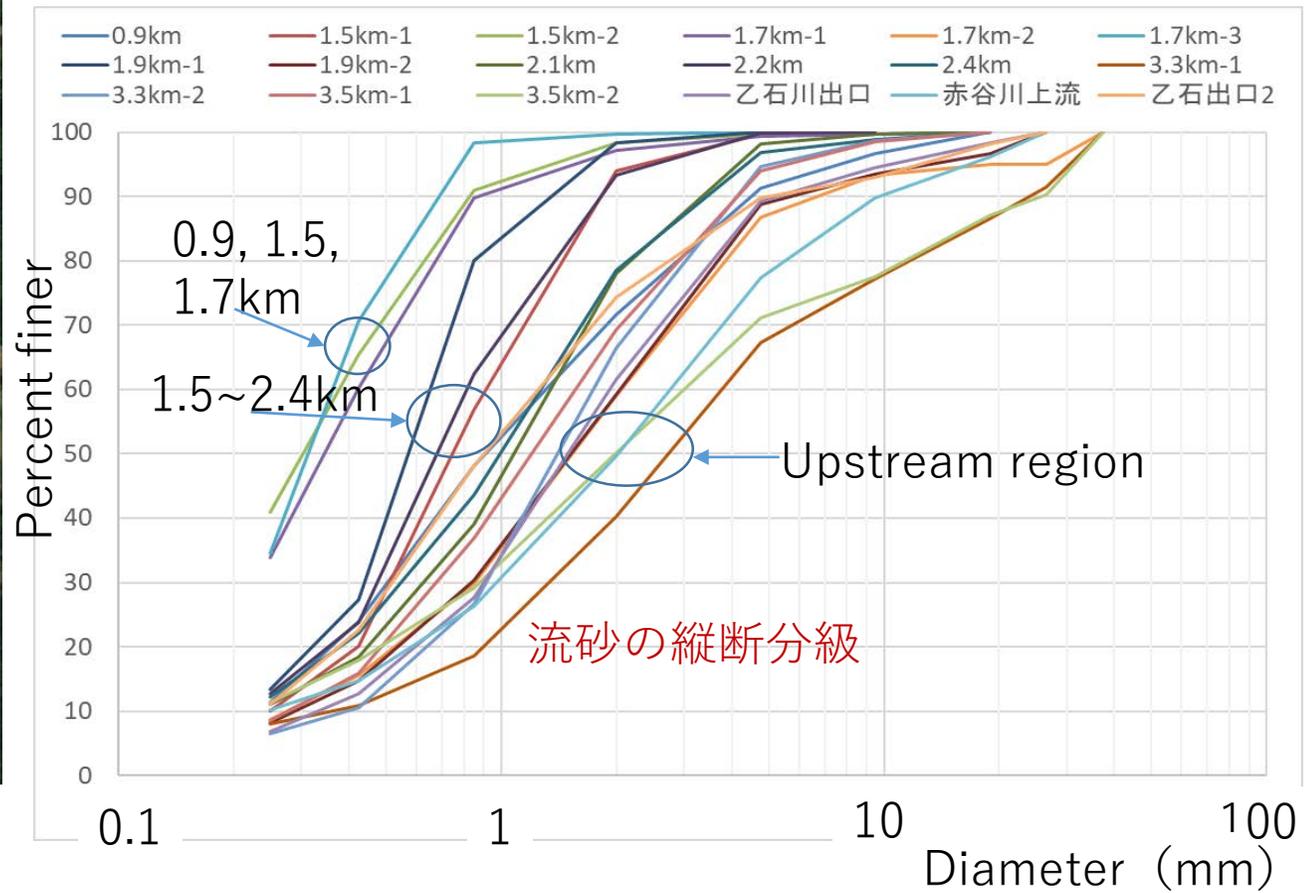


微細砂の供給源  
(土石流堆積土砂)

上流域の河道には土石流堆積土砂が洪水によって浸食されている（乙石川、2017年九州北部豪雨）



Sediment sampling sites for sieve analyses



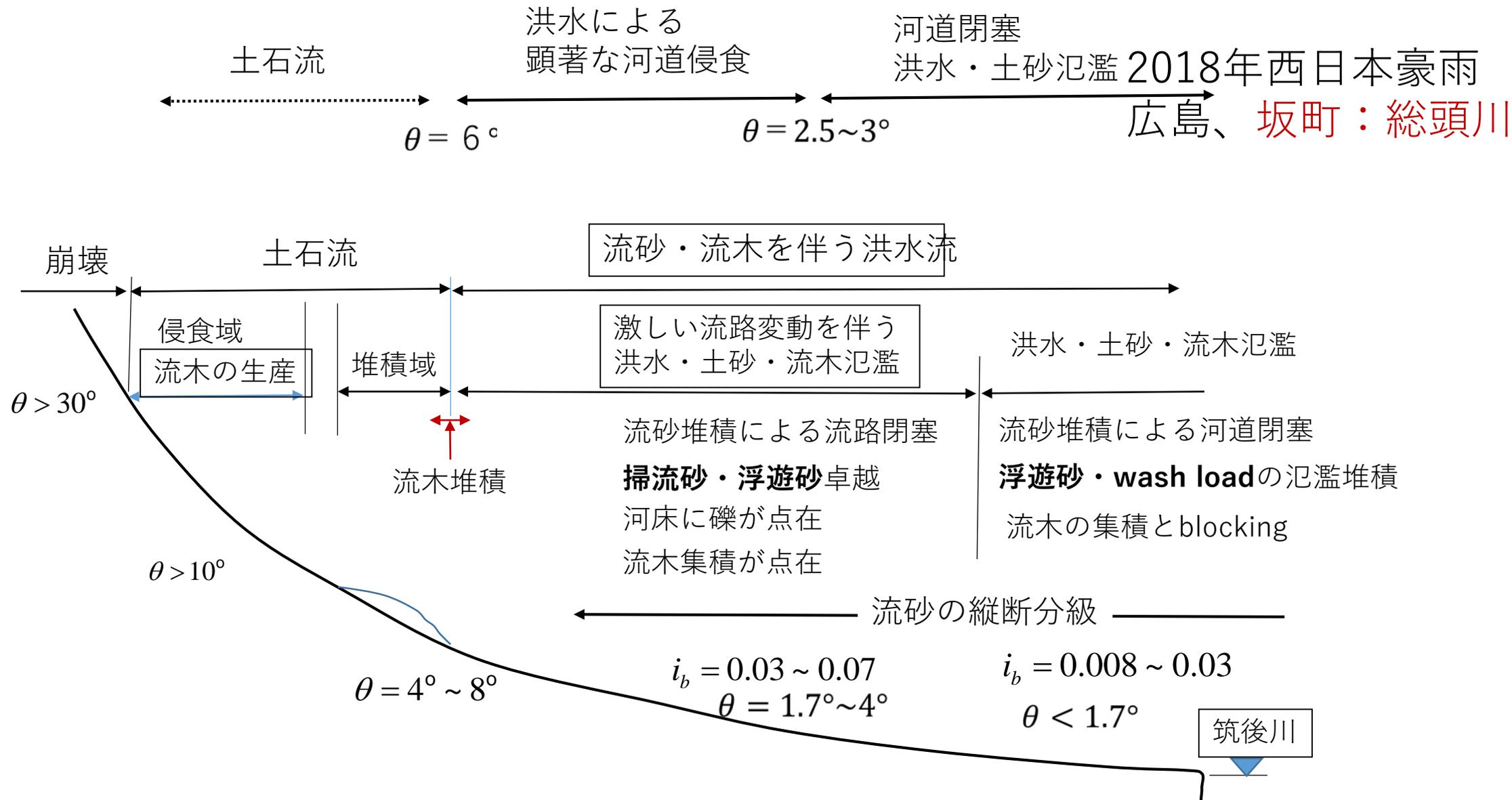
赤谷川における河床材料の粒度分布  
(2017 九州北部豪雨)



赤谷川下流の流路閉塞（2017年九州北部豪雨）



広島県、総頭川市街地部の流路閉塞  
（2018年西日本豪雨）



2017年7月九州北部豪雨災害時の赤谷における洪水・流砂現象の縦断分布

・ 解析法

異常とも言える  
大量の土砂供給

対象となる現象：流路変動、流路の閉塞現象、流砂の分級、流木

解析モデル（例えば）

流れ：水深平均,時間平均2次元流れの質量保存則と運動量保存則

流砂：河床材料の質量保存則（粒径別）

流水中の流砂の質量保存則（粒径別） -- 浮遊砂、掃流砂

掃流砂量式（粒径別）、浮遊砂・wash-loadの侵食・堆積率

流木：流水中及び河床における質量保存則（中立粒子の移流拡散方程式）

生成率、捕捉率

## 上流端条件

洪水ハイドロ：土石流が連続的に洪水流に遷移する可能性はほとんどない。従って、上流端条件として降雨流出モデルによる洪水ハイドロを用いることができる。

流砂： 掃流砂:平衡給砂

浮遊砂 { 比較的粗いものは平衡給砂  
細かいものはWash-loadに含める

Wash-load：河岸崩壊土砂および土石流堆積土砂の洪水流による侵食

流木：流木濃度 = 上流域における流木生産量/洪水主要部の洪水総量

$$V_{drf} = v_{drf} A_e$$

$v_{drf}$  単位面積当たりの立木の体積

$A_e$  崩壊・土石流による侵食面積

# 洪水流・流砂・流木の支配方程式

-質量保存則 (連続式)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0$$

-運動量保存則

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial uuh}{\partial x} + \frac{\partial vuh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial y} - \tau_{bx} \right)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \frac{\partial vvh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} - \tau_{by} \right)$$

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{u^2 + v^2}{[6.0 + 2.51 \ln(h/k_s)]^2} \quad \frac{\tau_{xx}}{\rho} = 2\nu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} k_t$$

$$\frac{\tau_{yy}}{\rho} = 2\nu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} k_t \quad \frac{\tau_{xy}}{\rho} = \frac{\tau_{yx}}{\rho} = \nu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$H$ : 水位

$h$ : 水深

$u, v$ : 流速のx, y成分

$\tau_b$ : 河床せん断力

$$\tau_{bx} = \tau_b \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}$$

$$\tau_{by} = \tau_b \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}$$

$\nu = \frac{\kappa}{6} u_* h$  渦動粘性係数

$$k_t = 2.07 u_*^2$$

乱れの運動エネルギー

$u_*$ : 摩擦速度

# 流砂に関する支配方程式

-流水中の浮遊砂の質量保存則(粒径階級  $d_i$ について)

$$\frac{\partial c_i h}{\partial t} + \frac{\partial r_1 u c_i h}{\partial x} + \frac{\partial r_1 v c_i h}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( h \epsilon_x \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \epsilon_y \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \overset{\text{---}}{E_i - D_i}$$

-河床材料の質量保存則(粒径階級  $d_i$ について)

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \sum_i \left( \frac{\partial q_{bix}}{\partial x} + \frac{\partial q_{biy}}{\partial y} + \overset{\text{---}}{E_i - D_i} \right) = 0$$

掃流砂の分級

浮遊砂/wash-loadの非平衡性  
流砂の分級

$h$ :水深  $z_b$ :河床高

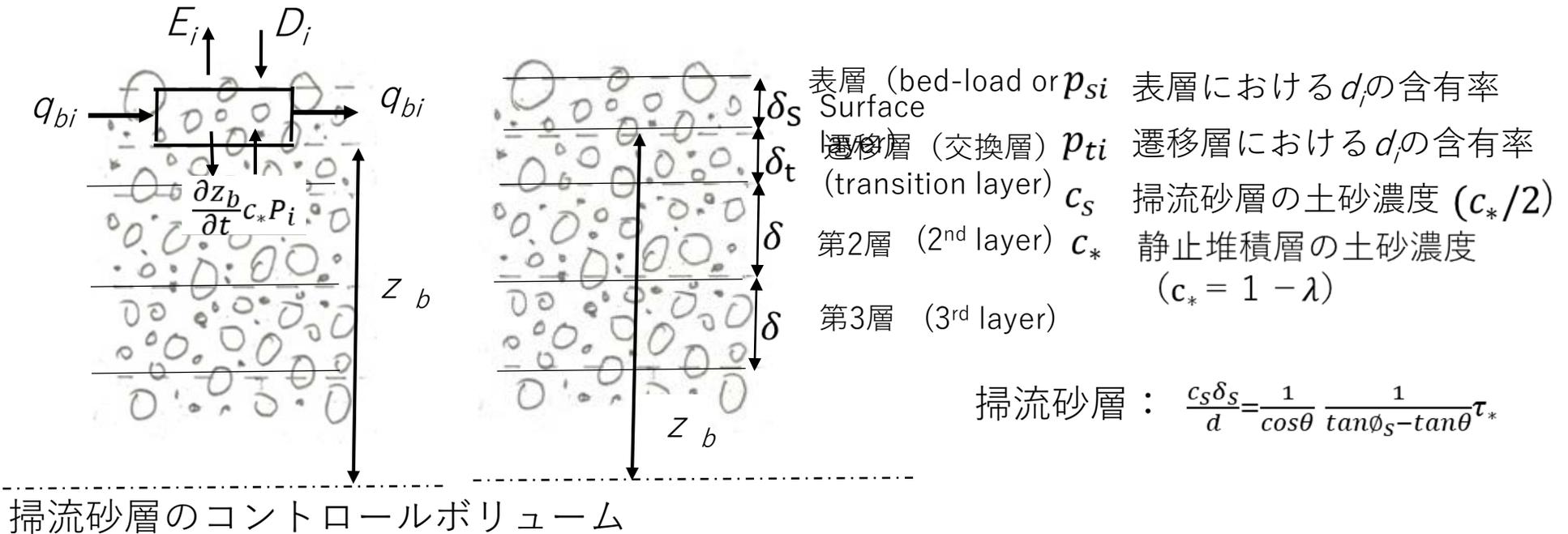
$E_i, D_i$ :浮遊砂/wash-loadの侵食率、堆積率(粒径階級  $d_i$ について)

$q_{bi}$ :単位幅掃流砂量  $d_i$

# 掃流砂層および遷移層における粒度分布式（粒径別質量保存則）

表層 (掃流砂層)  $\frac{\partial p_{si}}{\partial t} + \frac{1}{c_s \delta_s} \left( \frac{\partial q_{bi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bi}}{\partial y} + E_i - D_i \right) + \frac{c_*}{c_s \delta_s} \frac{\partial z_b}{\partial t} P_i = 0, \begin{cases} P_i = p_{ti} & (z_b/\partial t < 0) \\ P_i = p_{si} & (\partial z_b/\partial t \geq 0) \end{cases}$

遷移層  $\frac{\partial p_{ti}}{\partial t} = 0, (z_b/\partial t < 0); \quad \frac{\partial p_{ti}}{\partial t} + \frac{1}{\delta_t} (p_{ti} - p_{si}) \frac{\partial z_b}{\partial t} = 0, (\partial z_b/\partial t \geq 0)$



掃流砂層モデル（流砂の分級モデル）（竹林 2005）

# 流木の質量保存則（中立粒子として）

$$\frac{\partial z}{\partial t} < 0 \quad \frac{\partial C_{drf}h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf}uh}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf}vh}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) - c_* \frac{\partial z}{\partial t} \frac{S}{D} r(t, x, y) - v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i)$$

流木の生産（侵食）

$$\frac{\partial S}{\partial t} = c_* \frac{\partial z}{\partial t} \frac{S}{D} r(t, x, y) + v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i)$$

（強い流れ→河床侵食→流木の生産）

流木の生産（侵食）

$$\frac{\partial z}{\partial t} > 0 \quad \frac{\partial C_{drf}h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf}uh}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf}vh}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) - c_* \frac{\partial z}{\partial t} C_{drf} r(t, x, y) - v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i)$$

流木の堆積

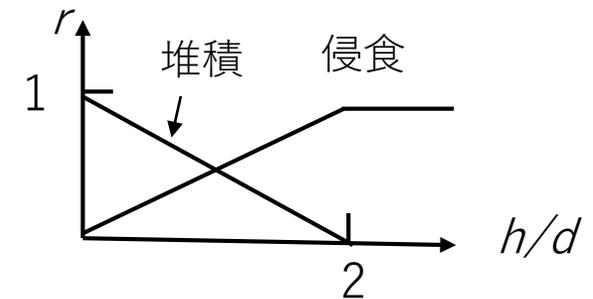
$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} C_{drf} r(t, x, y) + v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i)$$

流木の堆積

$C_{drf}$  流水中の流木濃度  $S$  単位面積当たりの流木貯留量（貯留高）

$v_n$  補足構造物に対する流速  $D$  流木の根茎深

$(x_i, y_i)$  補足構造物の位置  $\delta$  ディラックのデルタ関数



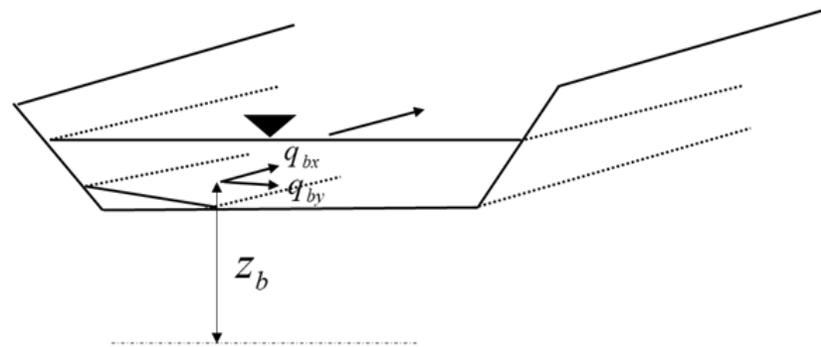
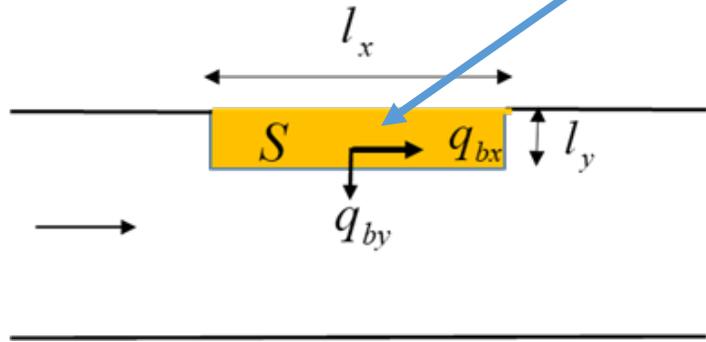
流木の離脱・補足率と相対水深

# 解析例

解析に際して、北海道大学 清水先生のグループで開発されたソフト、  
京都大学 竹林先生のグループが開発されたソフトを活用させていただいている。

## 微細砂の供給条件

河岸崩壊、土石流堆積土砂



Schematic diagram of sediment erosion

## 微細砂の取り込み

$$q_{sw} = p_{fD} c_{*D} \left[ -S \frac{\partial z_b}{\partial t} \right] = p_{fD} (q_{bx} l_y + q_{by} l_x)$$

$$q_{bx} = q_b \cos \theta_s$$

$$q_{by} = q_b \sin \theta_s$$

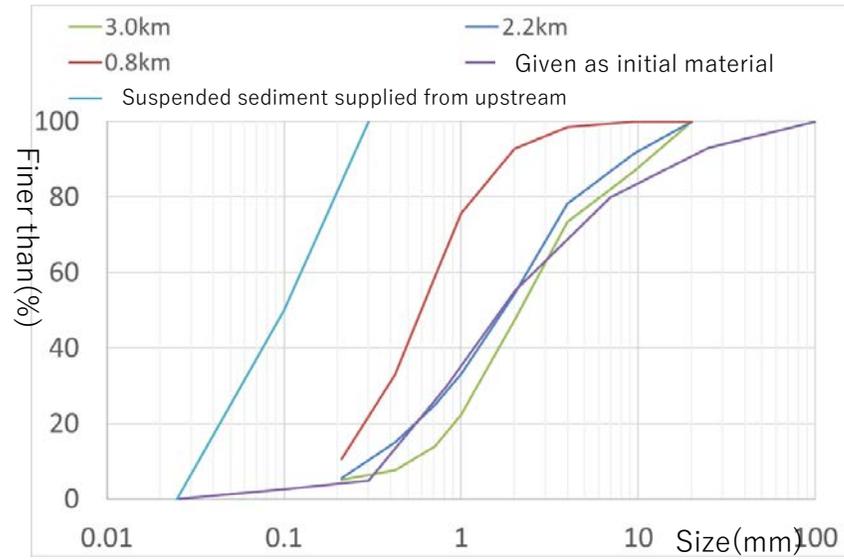
$$q_b \text{ 単位幅掃流砂量}$$

$$\tan \theta_s = \frac{\chi i_{by}}{(1 + \chi) i_{bx}} \quad \text{Angle between bed load direction and x-axis.}$$

$$\chi = \frac{i_{bx}}{(\tan \phi - i_{bx})}$$

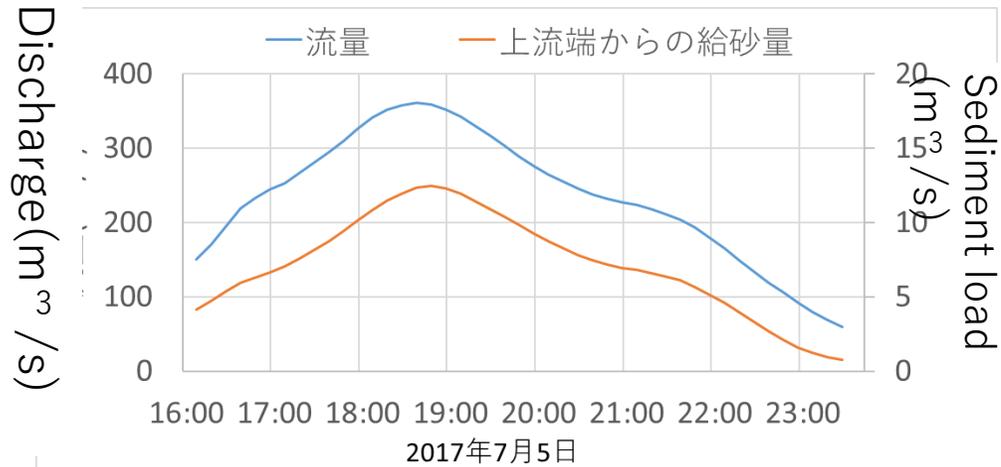
$$i_{bx} = \left| \partial z_b / \partial x \right| \quad \text{Bed slope in flow direction}$$

# Discharge/ Sediment supply



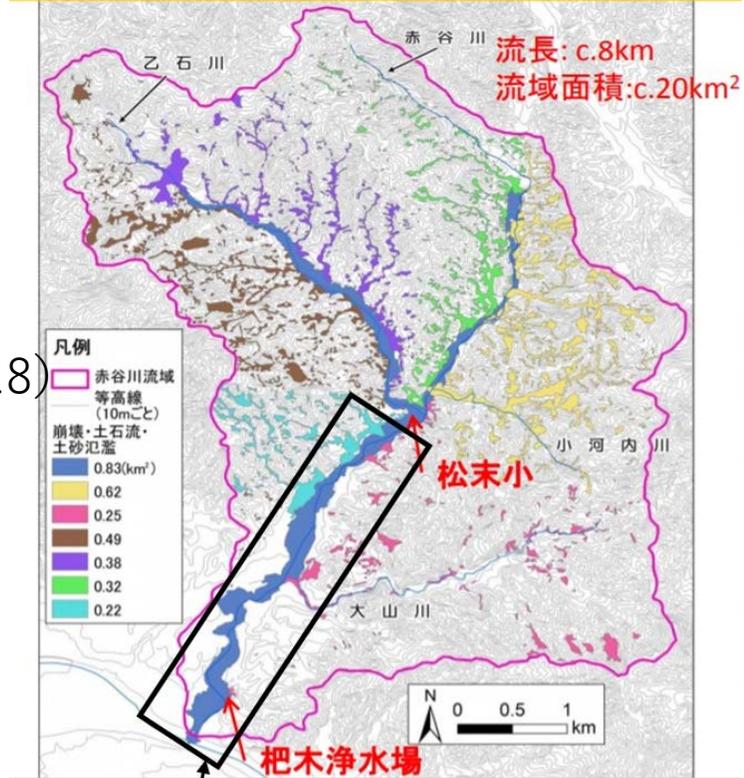
河床材料の初期設定

(原田ら 2018)



上流端条件：流量、微細砂の供給 (原田ら 2018)

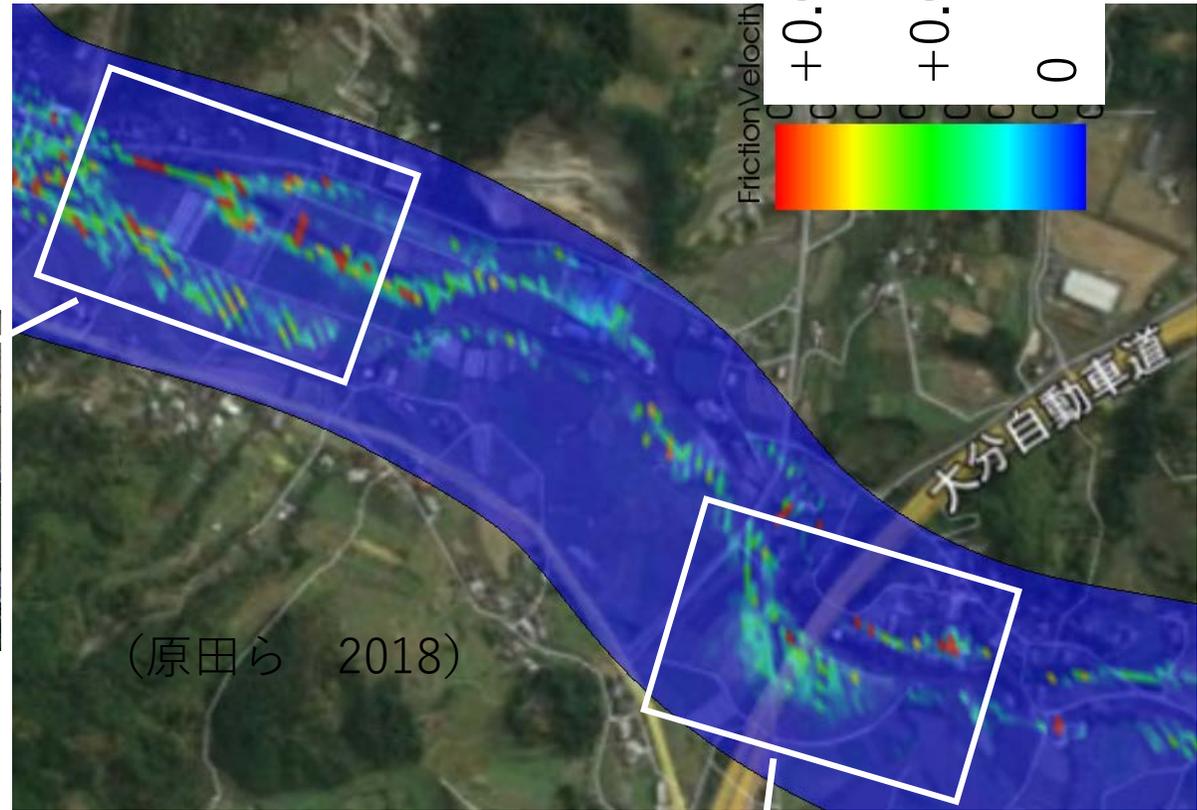
崩壊・土石流・土砂氾濫  
 赤谷川・乙石川本川:0.83 $km^2$ 、その他支谷:2.27 $km^2$



Simulated area

# Case4 (移動床、微細砂供給、流木)

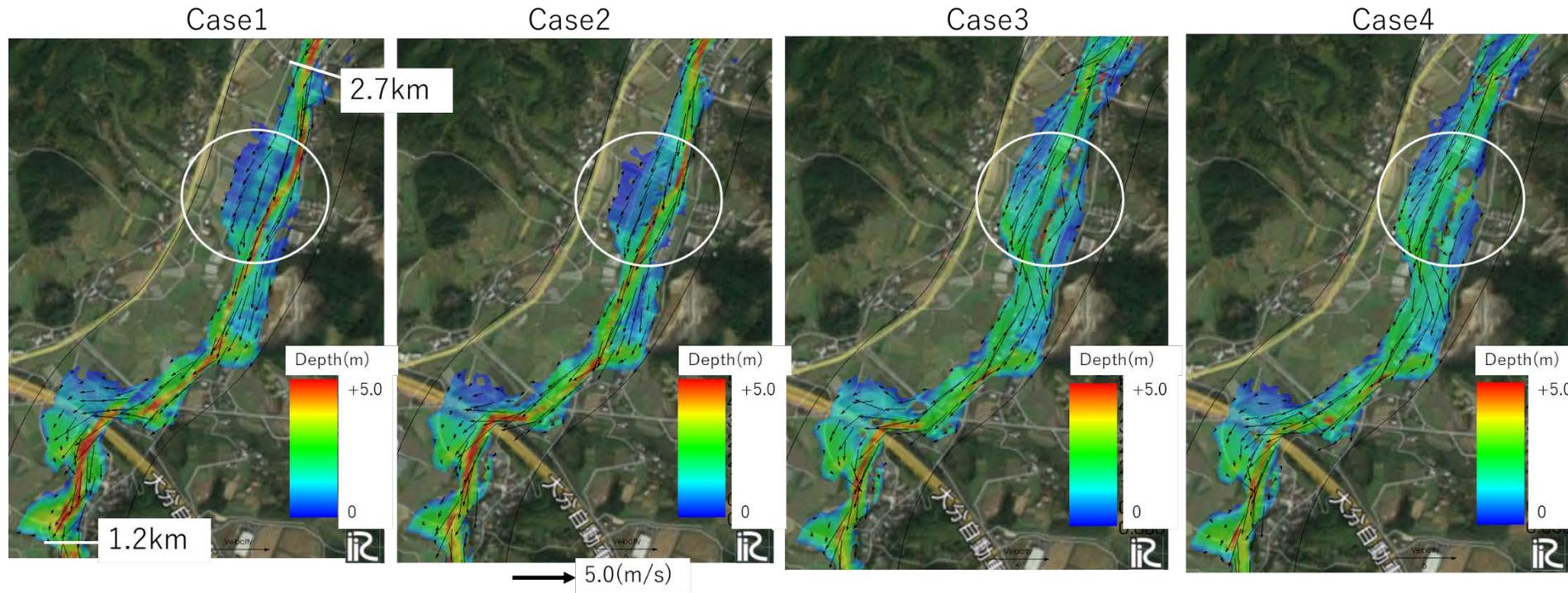




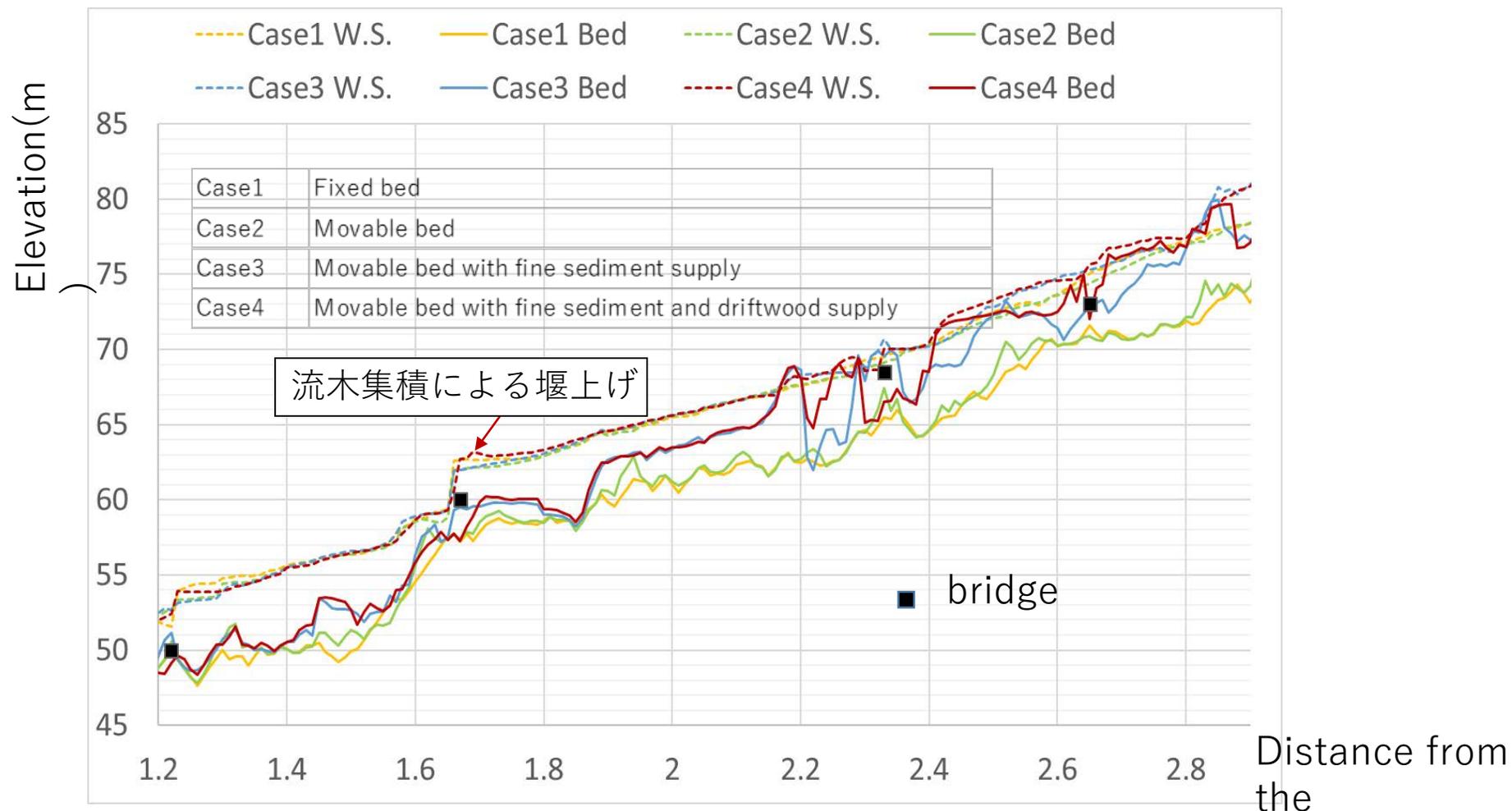
河床における流木堆積に関する計算値と現地状況  
(原田ら 2018)



Case1	Fixed bed
Case2	Movable bed
Case3	Movable bed with fine sediment supply
Case4	Movable bed with fine sediment and driftwood supply



ピーク流量時における洪水流 (原田ら 2018)

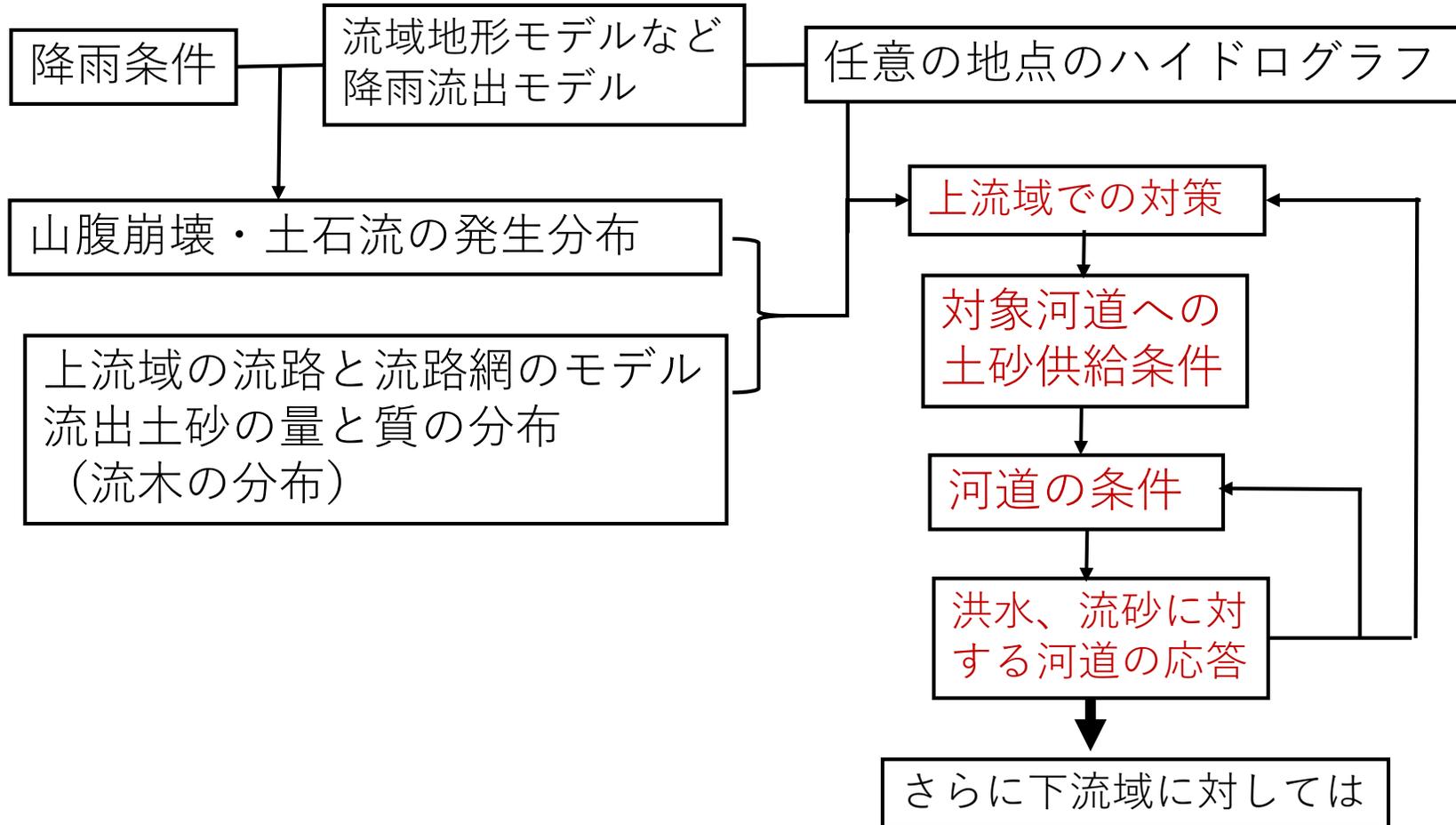


ピーク流量時の水位・河床位の縦断分布(原田ら 2018) Chikugo river (km)

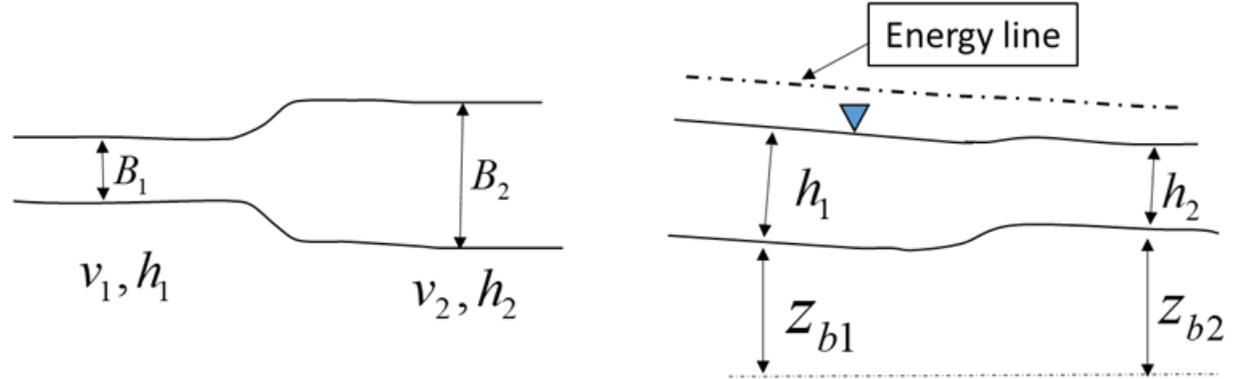


### 3. 遷移領域における河道設計の考え方

- ・ 計画規模の降雨条件、あるいは気候変動下において想定される降雨条件



河道設計時の留意点  
 川幅の設定は慎重に



河床は、次式からわかるように、必ず拡幅部において上昇する。

$$\frac{z_{b2} - z_{b1}}{h_1} = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{6/7} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{\frac{3(2m-1)}{7m}} + \frac{1}{2} F_{r1}^2 \left\{ 1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{\frac{12}{7}} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{\frac{2(m+3)}{7m}} \right\} - \frac{i\Delta x}{h_1}$$

上式は、水流の連続式、疑似等流のMannig則、流砂の連続式、流砂量式の関数形、エネルギー保存式を用いて求められる。

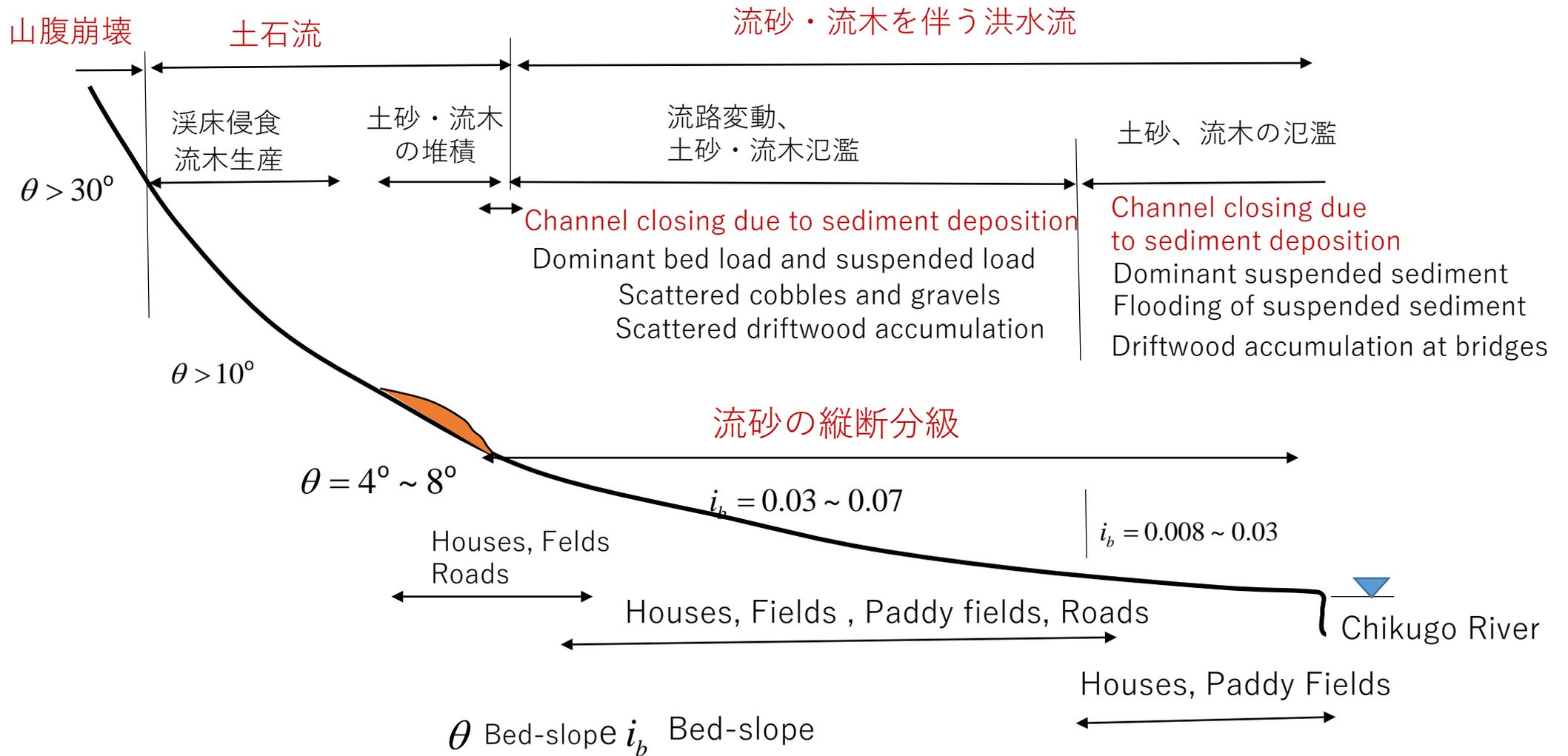
$$\times \text{モ} \left[ \begin{array}{l} v_1 h_1 B_1 = v_2 h_2 B_2 \quad v_1 = \frac{1}{n_1} i_1^{1/2} h_1^{2/3} \quad v_2 = \frac{1}{n_2} i_2^{1/2} h_2^{2/3} \\ q_{b1} B_1 = q_{b2} B_2 \quad q_{b1} \sim (\tau_1)^m \sim (h_1 i_1)^m \quad q_{b2} \sim (\tau_2)^m \sim (h_2 i_2)^m \\ \frac{v_1^2}{2g} + h_1 + z_{b1} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + z_{b2} + i\Delta x \end{array} \right]$$

仲間とともに、流域における流砂問題にかかわる研究を進めておりますが、その際、私が気にしていることを鍵として話題提供をいたしました

ご議論、コメントをいただければありがたく存じます

長時間ありがとうございました





2017年九州北部豪雨におけるハザードの特徴

