

土砂・洪水一体型モデル

大井川上流域の土砂動態
モデルの構築について

土木研究所ICHARM

原田大輔

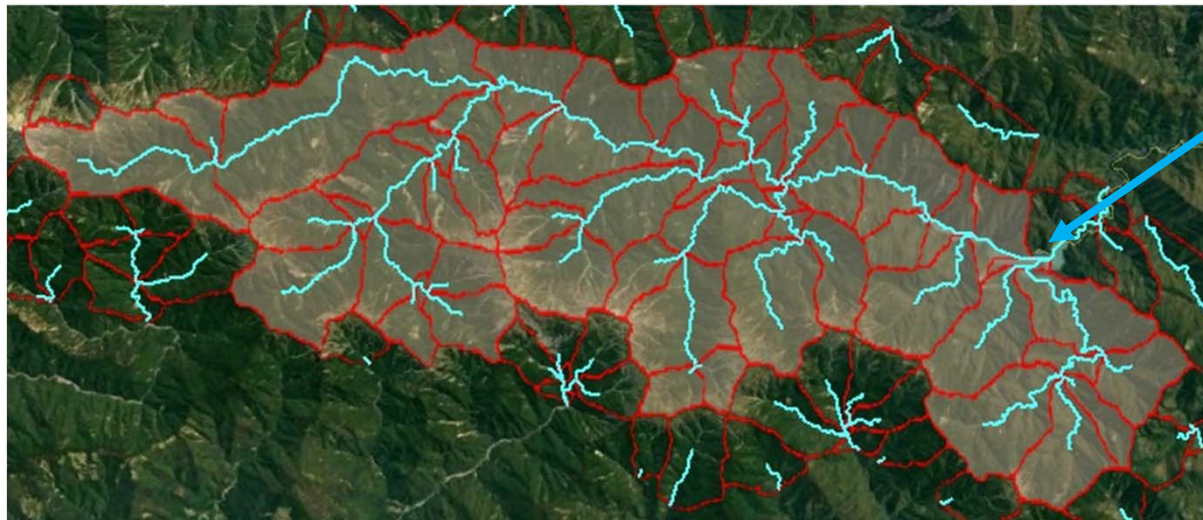
江頭進治

2018/03/09

流域土砂動態モデルの構築



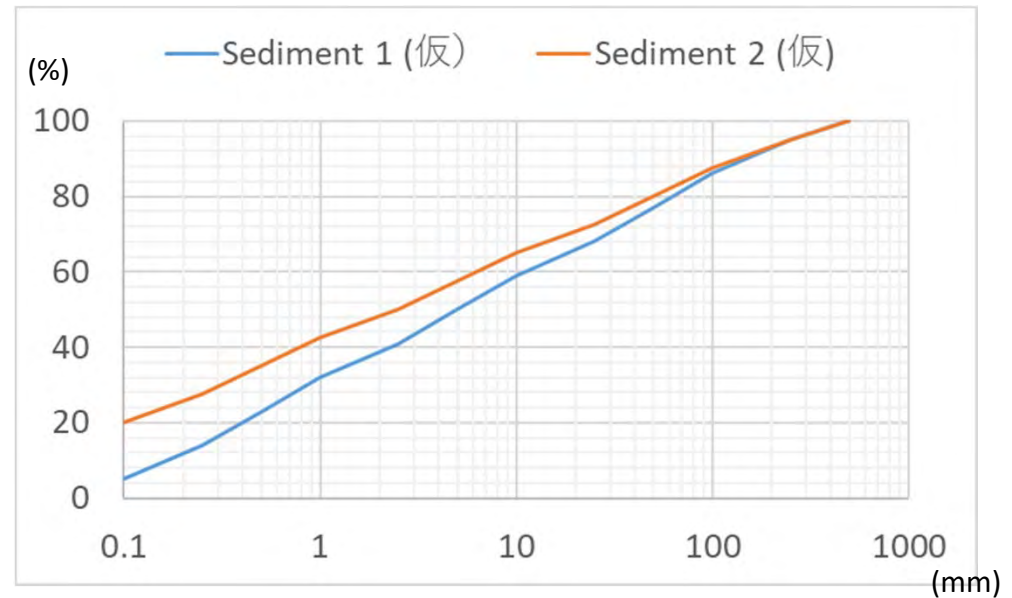
畑薙第一ダム流域を58の小流域に分割してモデル化



畑薙第一ダム
Hatanagi -
daiichi dam

土砂の条件設定と計算方法

→今回は仮の粒度分布を全流域一律で設定



掃流砂量 : $Q_{b*i} = \frac{4}{15} \frac{K_1 K_2}{\sqrt{f_d + f_f}} \tau_{*i}^{5/2}$ (江頭らの式)

浮遊砂量 : $Q_{s*i} = \int_a^h u(z)C(z)dz$ $\frac{C}{C_a} = \exp \left\{ -\frac{6}{\kappa} \left(\frac{z-a}{h} \right) \frac{w_0}{u_*} \right\}$

$\frac{\partial c_{si}}{\partial t} = \frac{1}{BLh} \{ \gamma_{ai} c_{si}(x_i) Q(x_i) - \gamma_{ai} c_{si}(x_{i+1}) Q(x_{i+1}) \} + E_{si} - D_{si}$ $C_a = K \left(\alpha_* \frac{1}{\tau_*} \frac{\rho w_0}{\sigma u_*} \Omega - 1 \right)$ (板倉・岸の式)

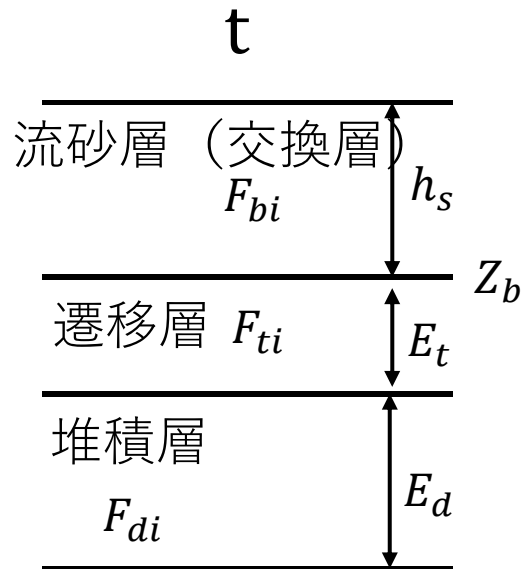
ウォッシュロード : 河床低下時のみ生産されると考える

$Q_w = (1 - \lambda) p_w \frac{\partial z}{\partial t} \quad \left(\frac{\partial z}{\partial t} < 0 \right)$ $\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{BLh} (Q_w + c(x_i)Q(x_i) + c(y_i)Q(y_i) - c(x_{i+1})Q(x_{i+1})) - \frac{c(x_{i+1})}{h} \frac{\partial h}{\partial t}$
 (途中河道には取り込まれない)

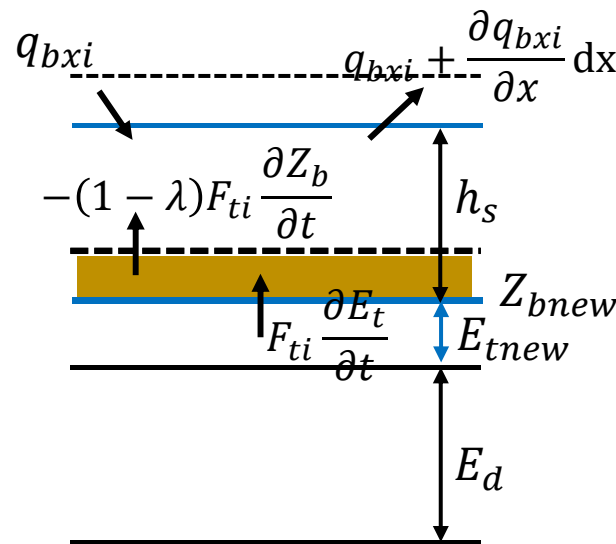
全ての土砂はダムで堆積させる

河床変動に伴う河床材料粒度分布の評価

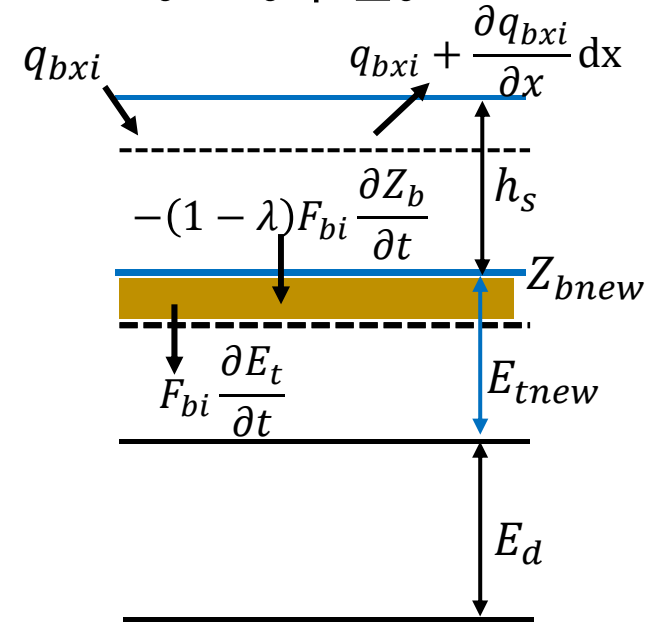
$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{\bar{c}_s \cos \theta} \frac{1}{\tan \phi_s - \tan \theta} \tau_*$$



河床低下時
 $t = t + \Delta t$



河床上昇時
 $t = t + \Delta t$



F_{bi} : 流砂層内の*i*粒
径階の存在率

流砂層内の粒度分布変化 :

$$c_b E_b \frac{\partial F_{bi}}{\partial t} = -(1 - \lambda) F_{ti} \frac{\partial Z_b}{\partial t} - \frac{\partial q_{bxi}}{\partial x}$$

遷移層内の粒度分布変化 :

$$\frac{\partial (E_t F_{ti})}{\partial t} = F_{ti} \frac{\partial E_t}{\partial t}$$

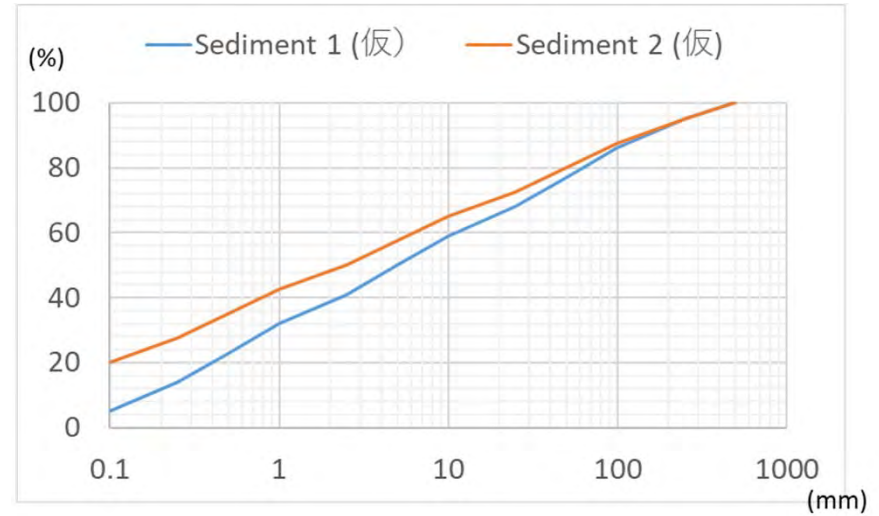
流砂層内の粒度分布変化 :

$$c_b E_b \frac{\partial F_{bi}}{\partial t} = -(1 - \lambda) F_{bi} \frac{\partial Z_b}{\partial t} - \frac{\partial q_{bxi}}{\partial x}$$

遷移層内の粒度分布変化 :

$$\frac{\partial (E_t F_{ti})}{\partial t} = F_{bi} \frac{\partial E_t}{\partial t}$$

計算結果 ダム堆砂量



Sediment 1 (m³)

掃流砂	1469
浮遊砂	90141
ウォッシュロード	5634
合計	97244

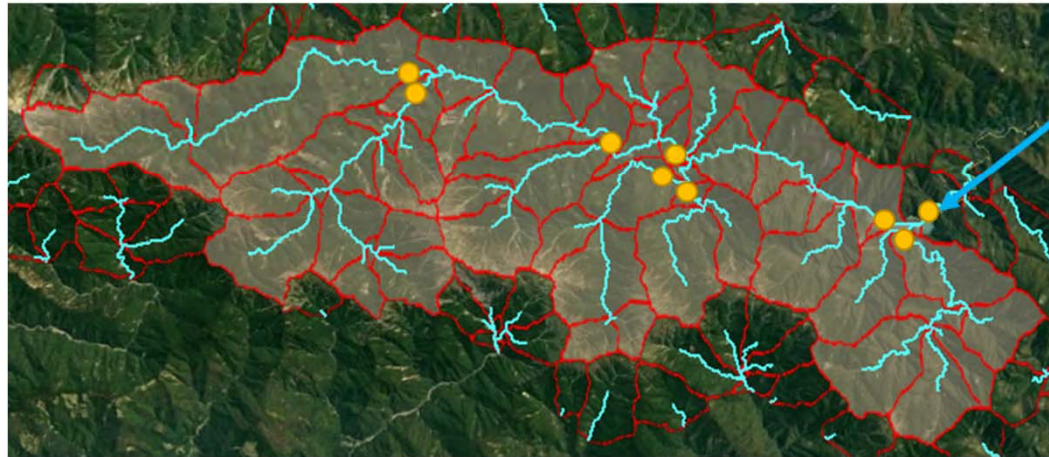
Sediment 2 (m³)

掃流砂	1274
浮遊砂	89630
ウォッシュロード	25338
合計	116242

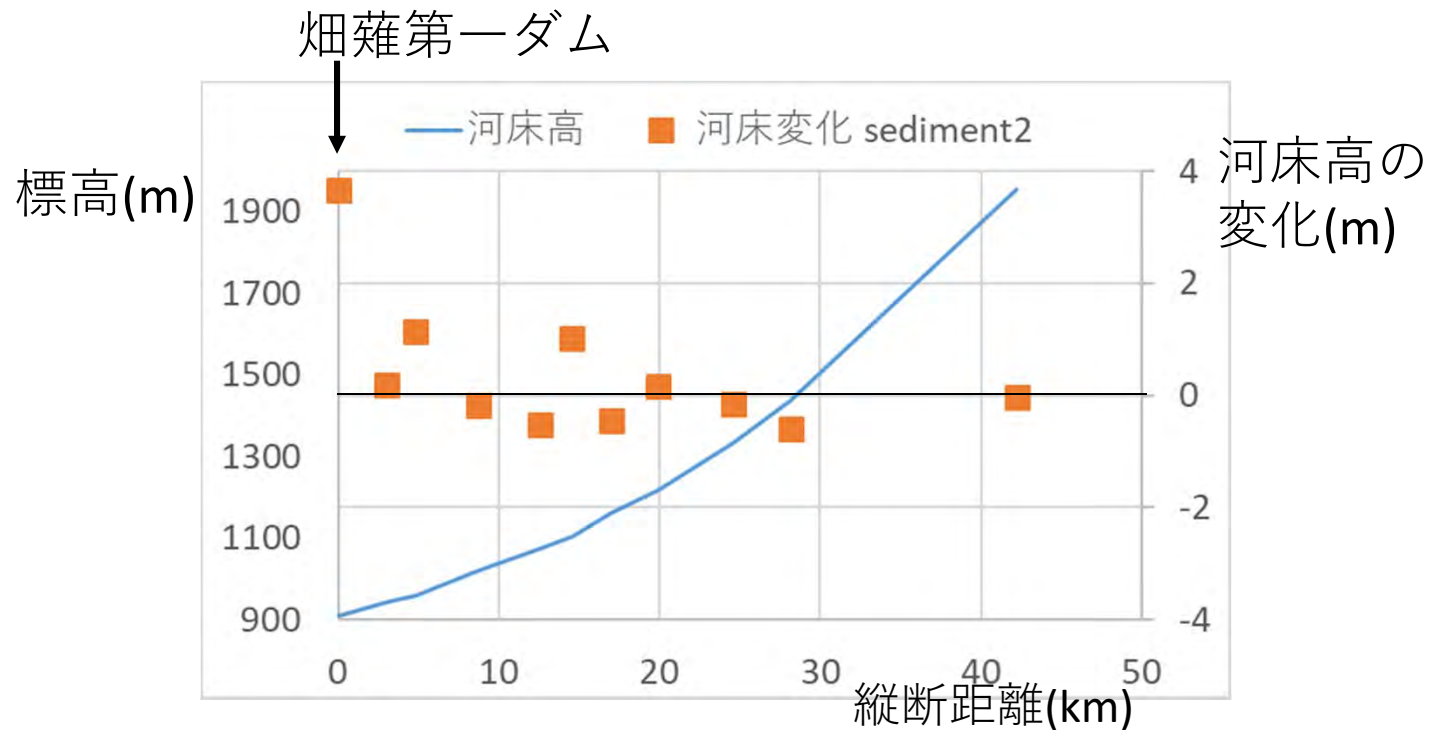
(値は仮の結果)

計算結果 河床高の変化

- WEB-DHMで算出した流量がある地点



畑薙第一ダム
Hatanagi -
daiichi dam



今後の予定



- ・ 現地調査で得た河床材料をモデルに組み込んで計算
- ・ 崩壊/土石流起源の土砂流入を考慮した計算

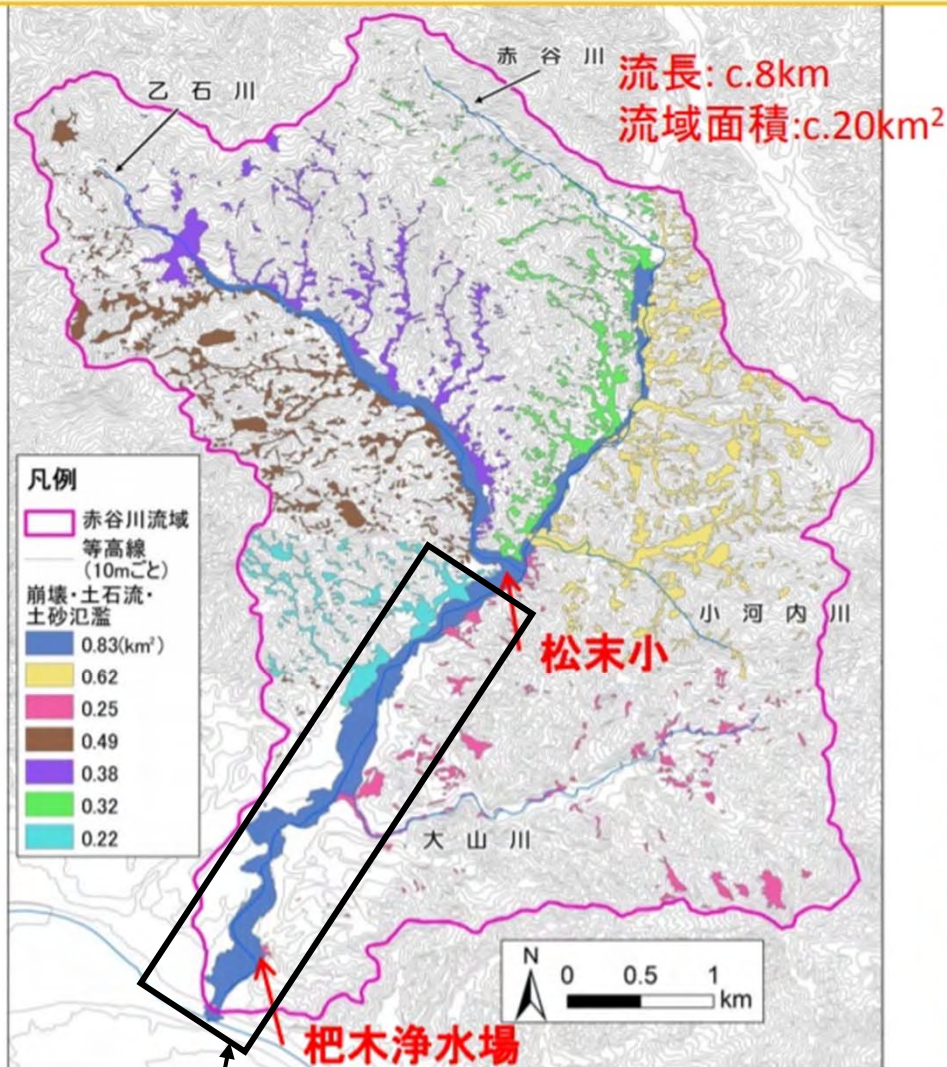
- ・ 大井川のダム堆砂量データと長期の気象データを用いて、ダム堆砂量の経年変化の再現計算を行う。

流砂・流木を伴う平面二次元洪水流解析 —2017年7月九州北部豪雨による赤谷川洪水を対象として—



崩壊・土石流・土砂氾濫

赤谷川・乙石川本川:0.83km²、その他支谷:2.27km²



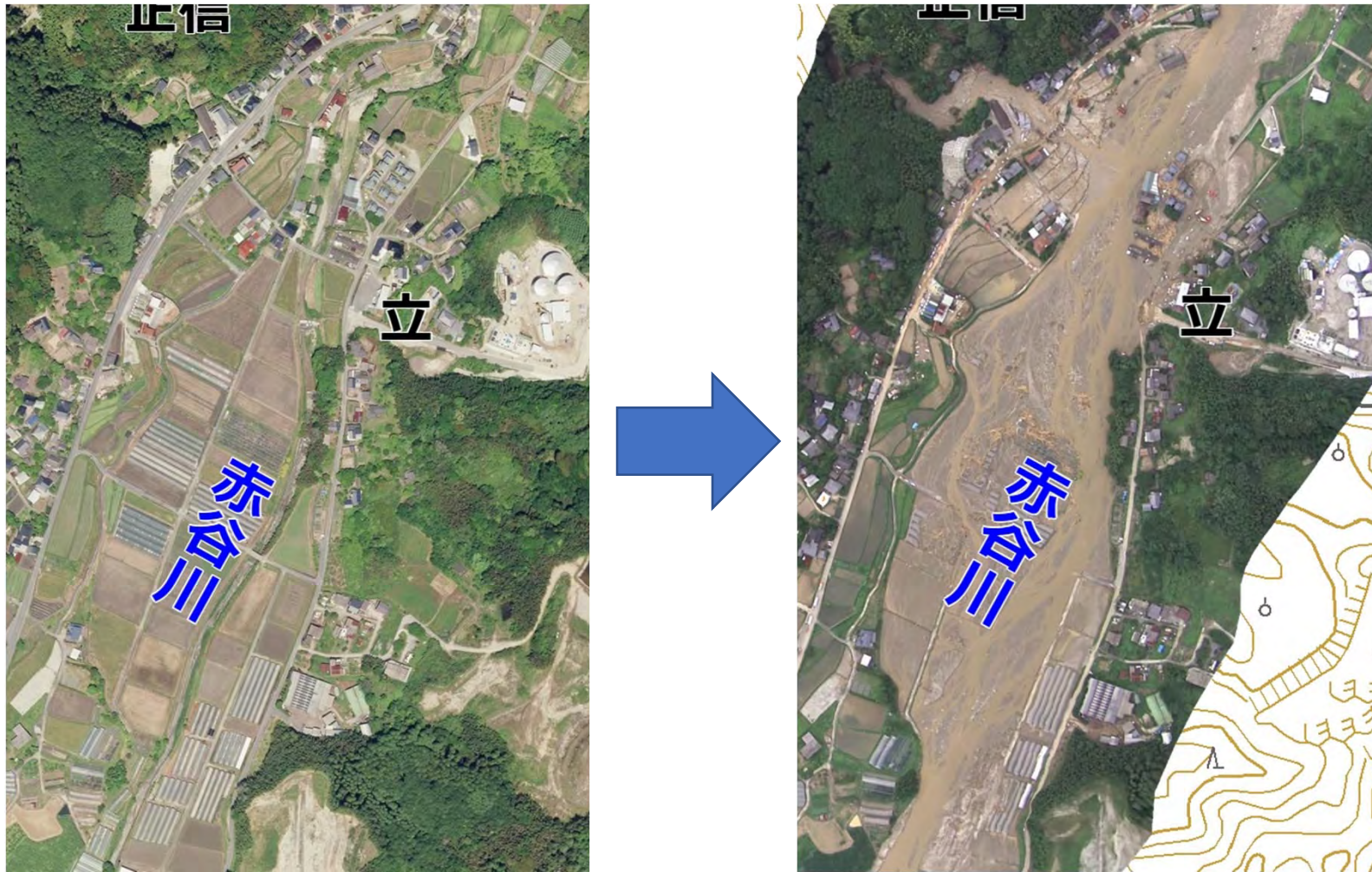
解析対象区間



(7月8日撮影。アジア航測提供)

土木研究所ICHARM 南雲研究員作成

被災前後の変化



2017年九州北部豪雨 赤谷川

写真は国土地理院HPより

- 多量の土砂流入による流路そのものの変化
- 大量の流木が流入し、流れに影響

流木の影響が顕著



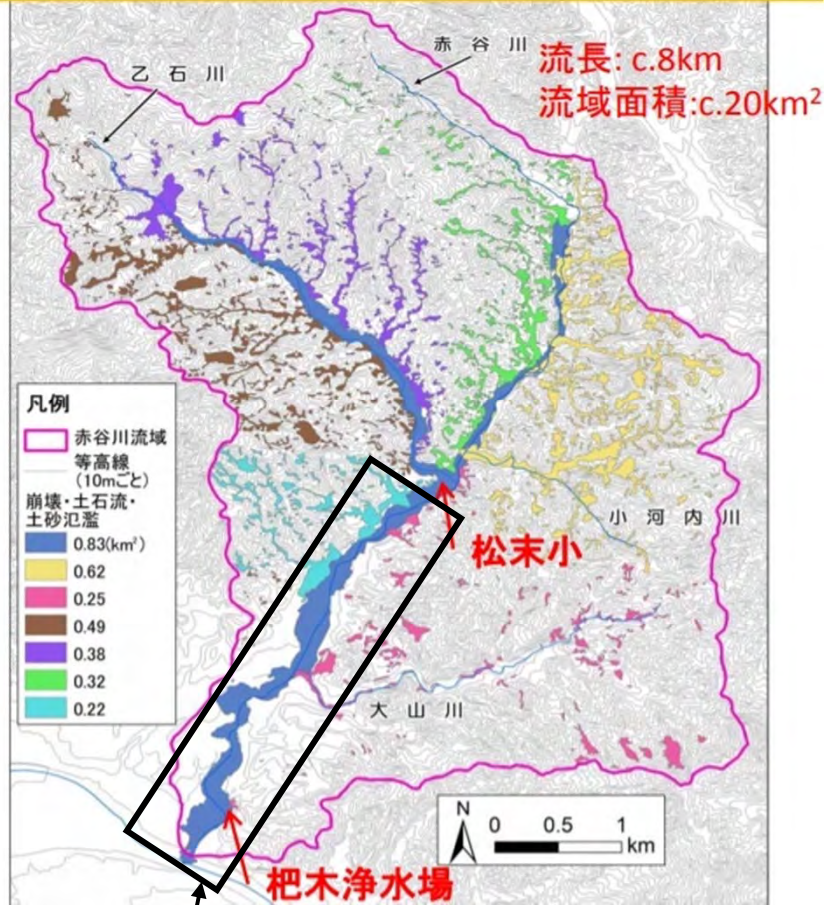
赤松良久・小室隆・乾隆帝：平成29年福岡・大分 豪雨災害の先遣調査， 2017

- 細粒土砂が多量に供給された場合の洪水流
- 流木を伴う洪水流の挙動
→移流拡散方程式に基づいた流木モデルを提案

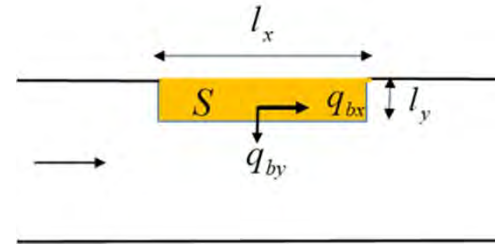
微細砂の供給条件の設定

崩壊・土石流・土砂氾濫

赤谷川・乙石川本川:0.83km²、その他支谷:2.27km²



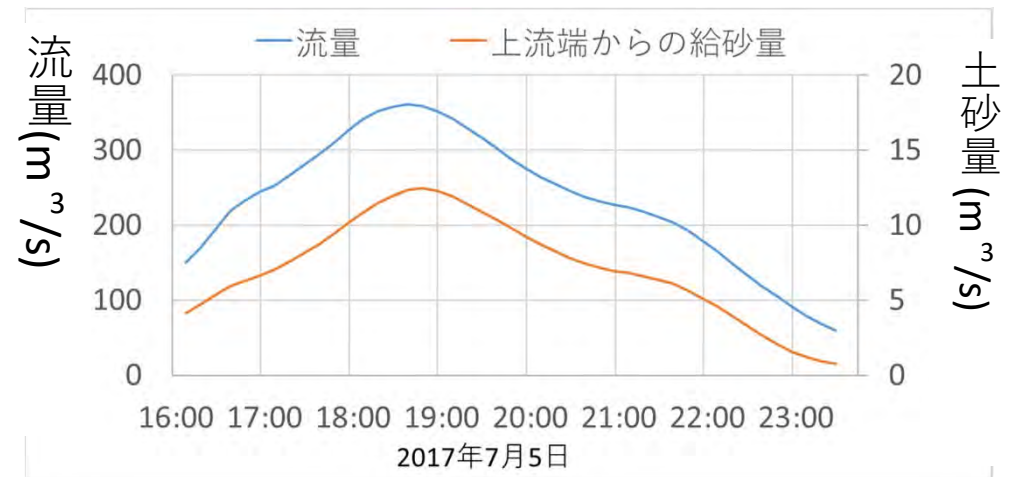
河岸沿いに堆積した土砂から流出する微細砂量を算出



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

l_x について、左の図より算出

→微細砂を上流端から供給



流木モデルについて 既存の解析法

Nakagawa et.al.(1994) 粒子法

$$x \text{ 方向運動方程式: } m_k(1 + C_M)du_k/dt = C_M dU_k/dt - m_k g \partial H_k / \partial x - 1/2 \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \quad (5)$$

$$y \text{ 方向運動方程式: } m_k(1 + C_M)dv_k/dt = C_M dV_k/dt - m_k g \partial H_k / \partial y - 1/2 \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \quad (6)$$

ここに、 u_k, v_k はそれぞれ第 k 番目の流木の x および y 方向流速、 $W_k = \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2}$ 、 u_k, v_k は

$$dX_k/dt = u_k, \quad dY_k/dt = v_k \quad (7)$$

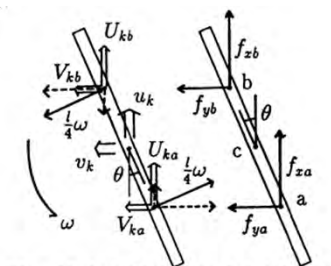


図-1 流木の回転に関する定義図

Gotoh et.al.(2001) Lagrangian particle method (MPS method)

成粒子の角速度ベクトル \mathbf{R}_k

$$\mathbf{T}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{u}_{ki} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_k = \frac{1}{I_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{u}_{ki} \times (\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}) \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_{kg} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{r}_{ki}; \quad I_k = \sum_{i=1}^{N_k} |\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}|^2 \quad (11)$$

速度ベクトル、角速度ベクトルを用いて、剛体的挙動を満足するための流木 k の構成粒子 i の移動速度は

$$\tilde{\mathbf{u}}_{ki} = \mathbf{T}_k + (\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}) \times \mathbf{R}_k \quad (12)$$

と記述され、これを用いて構成粒子 i の座標は、

$$\mathbf{r}_{ki}(t + \Delta t) = \mathbf{r}_{ki}(t) + \tilde{\mathbf{u}}_{ki} \Delta t \quad (13)$$

と修正される。

MPS法による粒子の座標の更新が行われる度に、流木構成粒子に対してのみ上記の座標修正を施すことにより、水流中の流木の運動が追跡できる。

Shimizu et.al.(2007) Distinct element method (個別要素法)

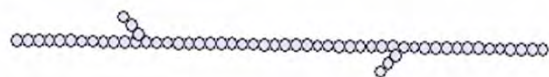


図-1 個別要素をつなげて構成した流木 (2本の枝付きの場合)

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{du_{pi}}{dt} \\ & = \sum_j [-f_n \cos \alpha_{ij} + f_s \sin \alpha_{ij}]_j \\ & + \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 \sqrt{(u - u_{pi})^2 + (v - v_{pi})^2} (u - u_{pi}) \end{aligned}$$

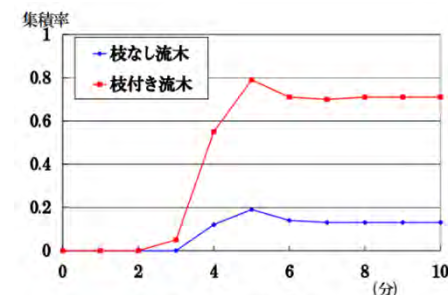


図-5 集積率の時間変化

移流拡散方程式に基づく流木解析モデル

C_{drf} : 流木の濃度

S : 単位面積あたりの流木存在量(m^3/m^2)

$\partial z/\partial t > 0$ (河床上昇時)

橋梁等の障害物による
流木の捕捉

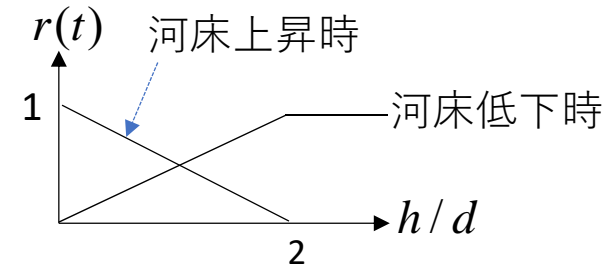
$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf} u h}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf} v h}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) - c_* \frac{\partial z}{\partial t} C_{drf} r(t, x, y) - \underline{v_n C_{drf} \delta(x - x_i, y - y_i)} \end{aligned}$$

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

$\partial z/\partial t < 0$ (河床低下時)

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf} u h}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf} v h}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) - c_* \frac{\partial z}{\partial t} \frac{S}{D} r(t, x, y) - \underline{v_n C_{drf} \delta(x - x_i, y - y_i)} \end{aligned}$$

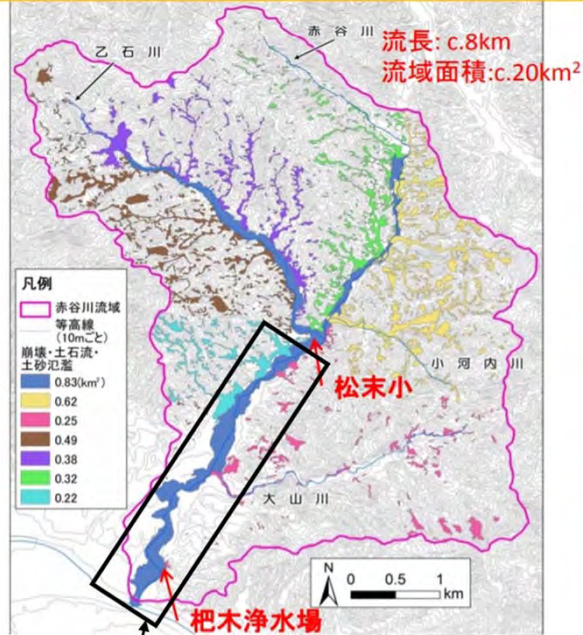
$$\frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial z}{\partial t} \frac{S}{D} r(t, x, y) + \underline{v_n C_{drf} \delta(x - x_i, y - y_i)}$$



h : 水深

d : Diameter of Drift woods(0.4m)

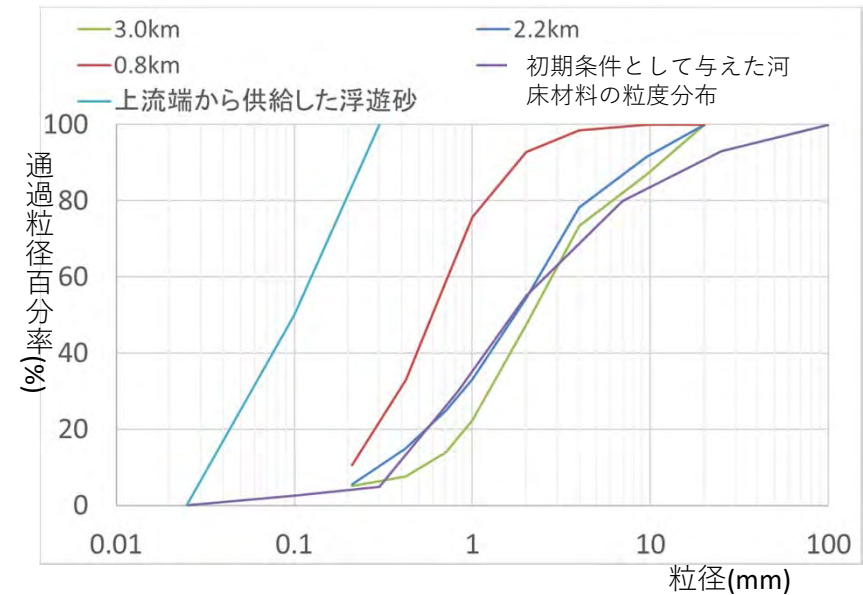
崩壊・土石流・土砂氾濫
赤谷川・乙石川本川:0.83km²、その他支谷:2.27km²



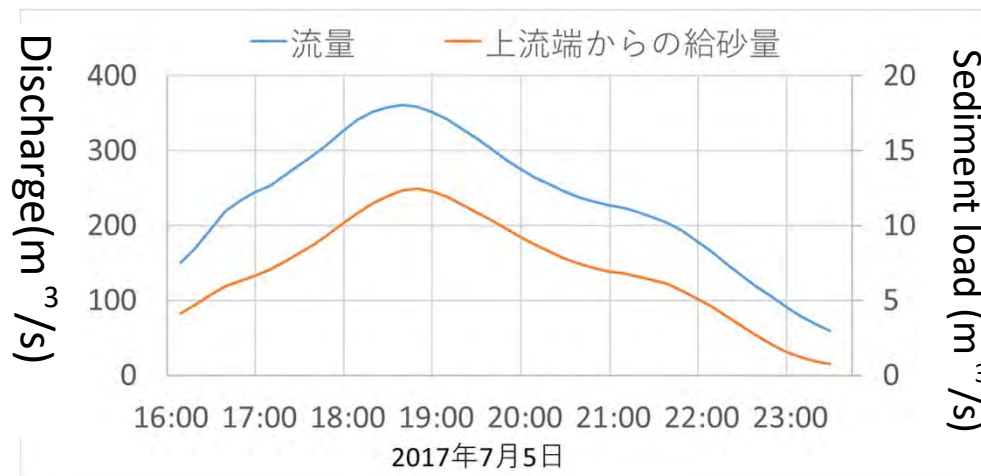
解析対象区間

計算条件

初期河床材料粒度分布



流量/上流からの土砂供給



上流からの流木の供給条件

$C_{drf}=0.1$:一律

→1グリッド(10m×10m)に
1本の流木に相当

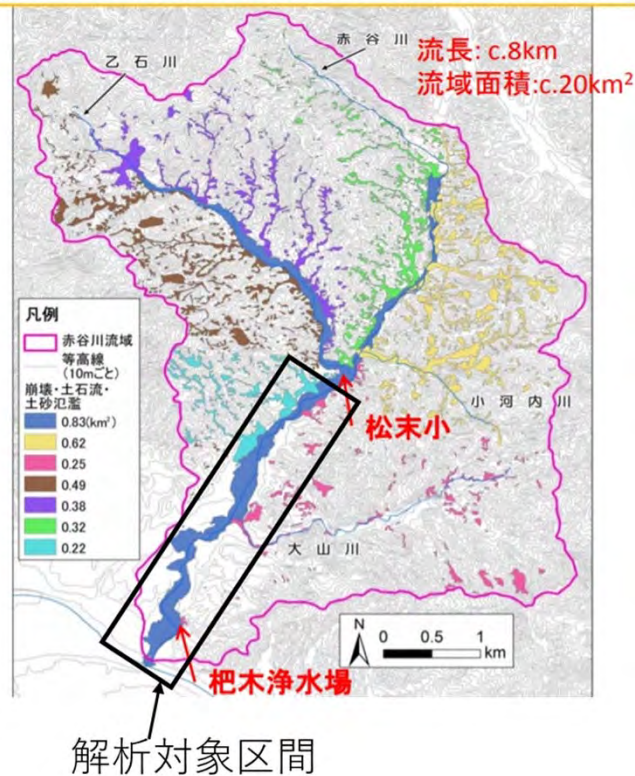
マンニング粗度係数: 0.05

勾配: 1/45 (上流側)

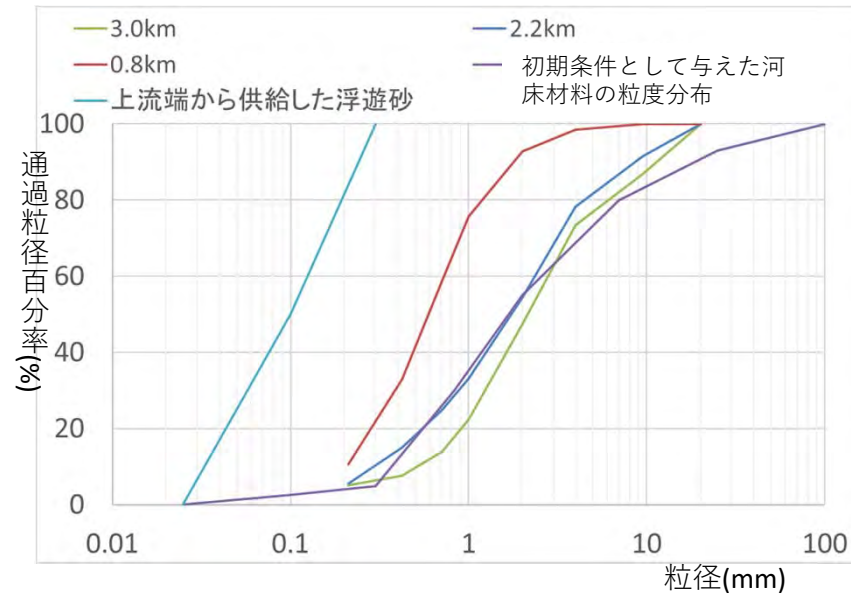
1/90 (下流側)

崩壊・土石流・土砂氾濫

赤谷川・乙石川本川:0.83km²、その他支谷:2.27km²



初期河床材料粒度分布



掃流砂と浮遊砂の計算

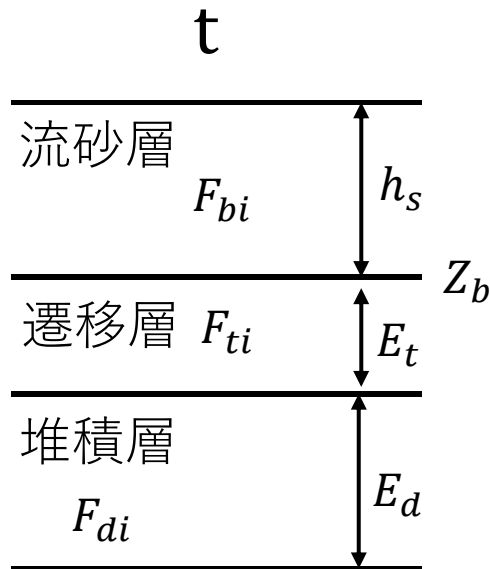
掃流砂：
$$Q_{b*i} = \frac{4}{15} \frac{K_1 K_2}{\sqrt{f_d + f_f}} \tau_{*i}^{5/2} \quad (\text{江頭らの式})$$

浮遊砂：
$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_1 u Ch}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_1 v Ch}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E - D$$

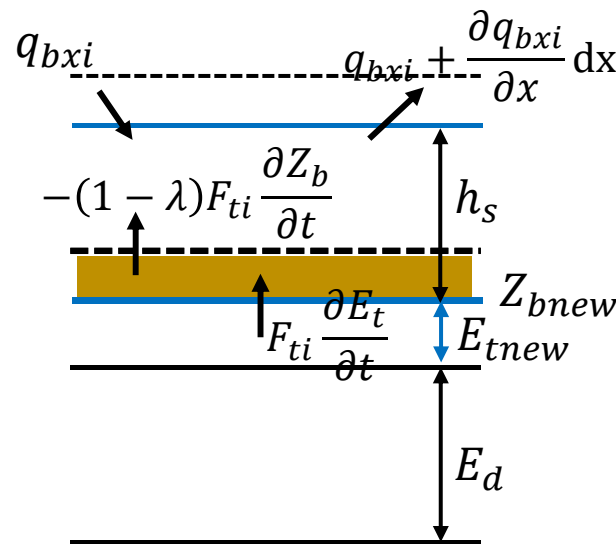
$$\frac{C}{C_a} = \exp \left\{ -\frac{6}{\kappa} \left(\frac{z-a}{h} \right) \frac{w_0}{u_*} \right\} \quad C_a = K \left(\alpha_* \frac{1}{\tau_* \sigma} \frac{\rho w_0}{u_*} \Omega - 1 \right) \quad (\text{板倉・岸の式})$$

河床変動に伴う河床材料粒度分布の評価

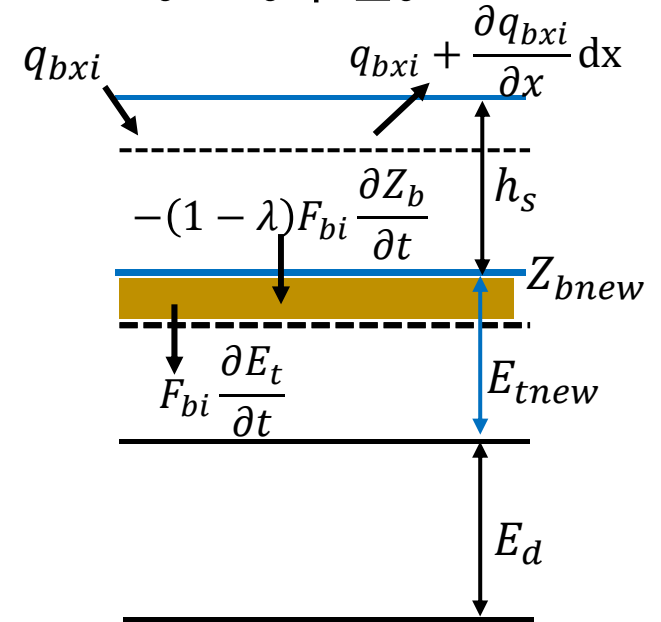
$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{\bar{c}_s \cos \theta} \frac{1}{\tan \phi_s - \tan \theta} \tau_*$$



河床低下時
t = t + Δt



河床上昇時
t = t + Δt



F_{bi} : 流砂層内の*i*粒
径階の存在率

流砂層内の粒度分布変化 :

$$c_b E_b \frac{\partial F_{bi}}{\partial t} = -(1 - \lambda) F_{ti} \frac{\partial Z_b}{\partial t} - \frac{\partial q_{bxi}}{\partial x}$$

遷移層内の粒度分布変化 :

$$\frac{\partial (E_t F_{ti})}{\partial t} = F_{bi} \frac{\partial E_t}{\partial t}$$

流砂層内の粒度分布変化 :

$$c_b E_b \frac{\partial F_{bi}}{\partial t} = -(1 - \lambda) F_{bi} \frac{\partial Z_b}{\partial t} - \frac{\partial q_{bxi}}{\partial x}$$

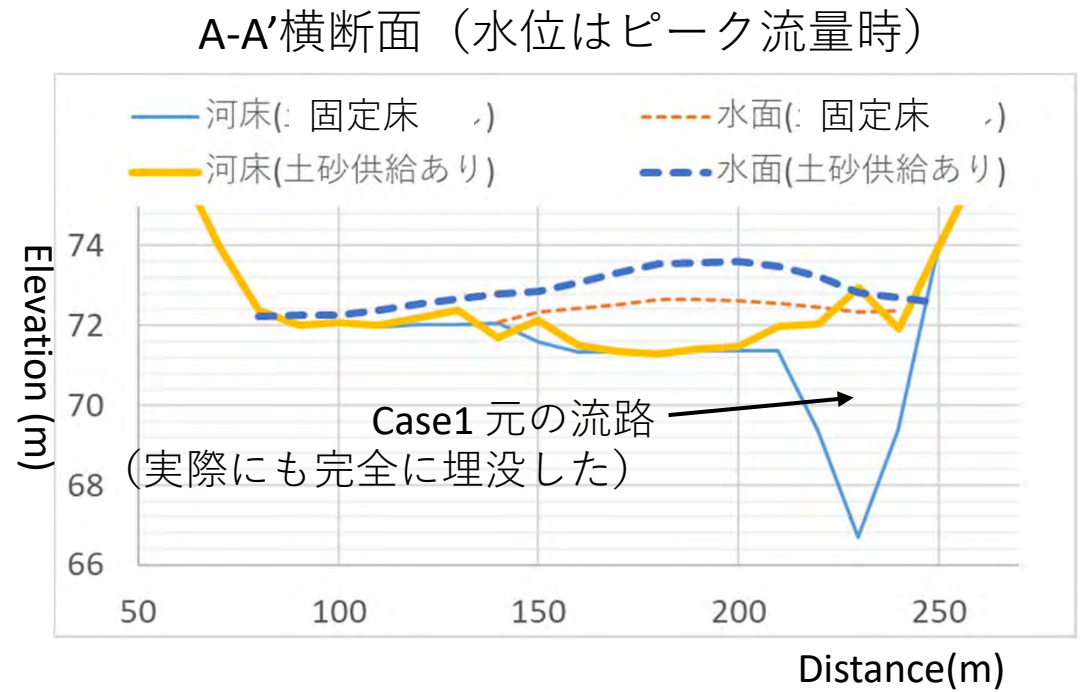
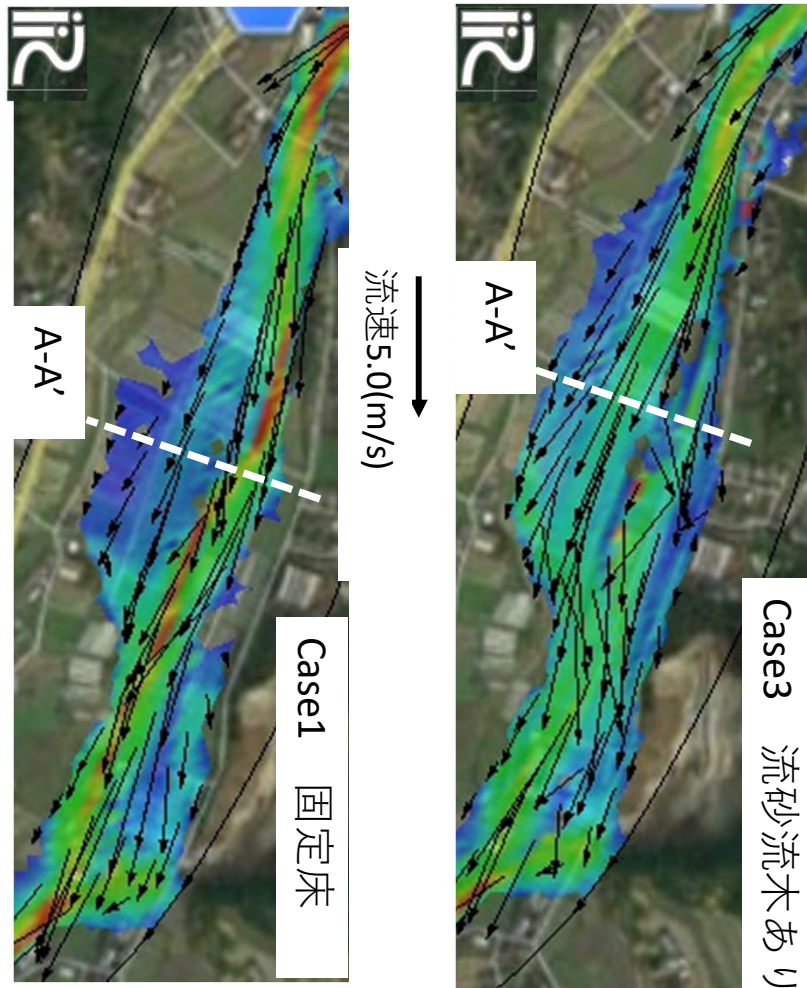
遷移層内の粒度分布変化 :

$$\frac{\partial (E_t F_{ti})}{\partial t} = F_{bi} \frac{\partial E_t}{\partial t}$$

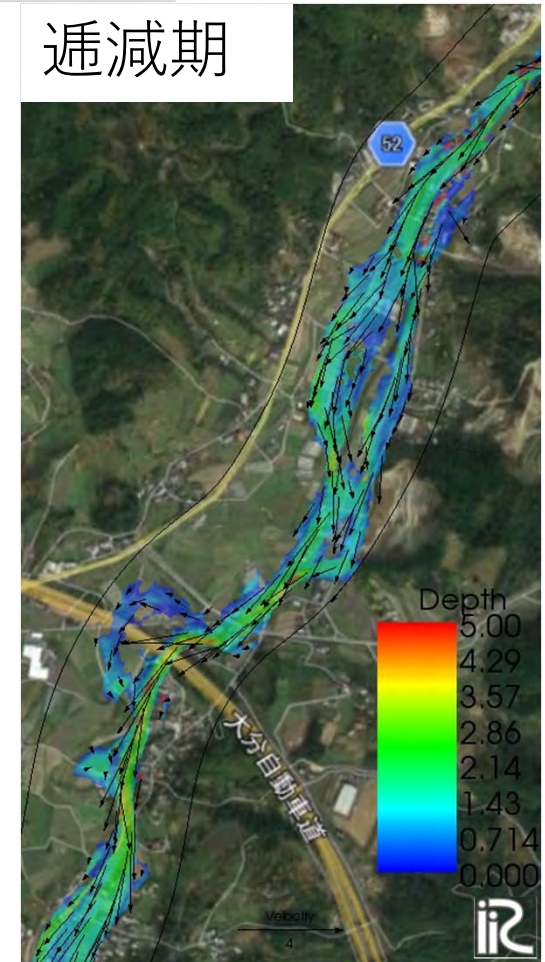
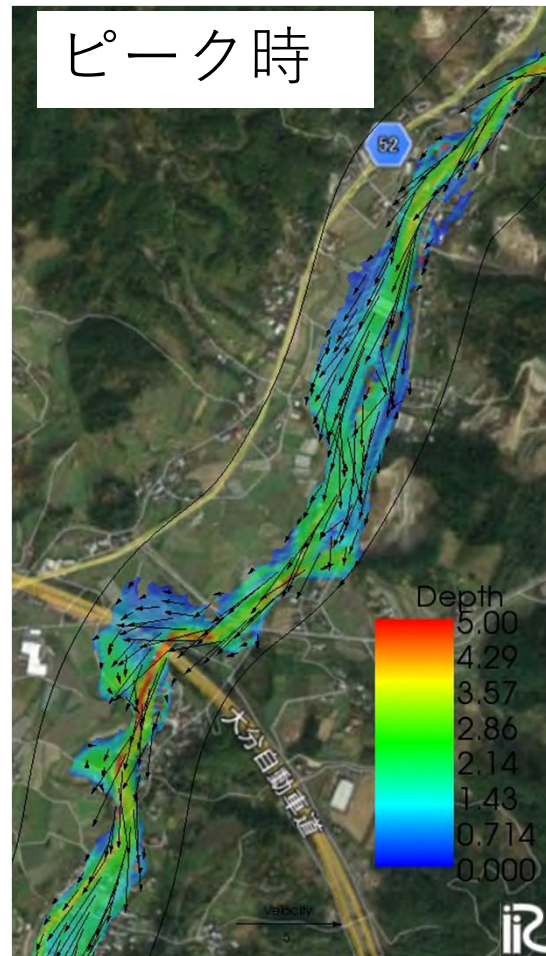
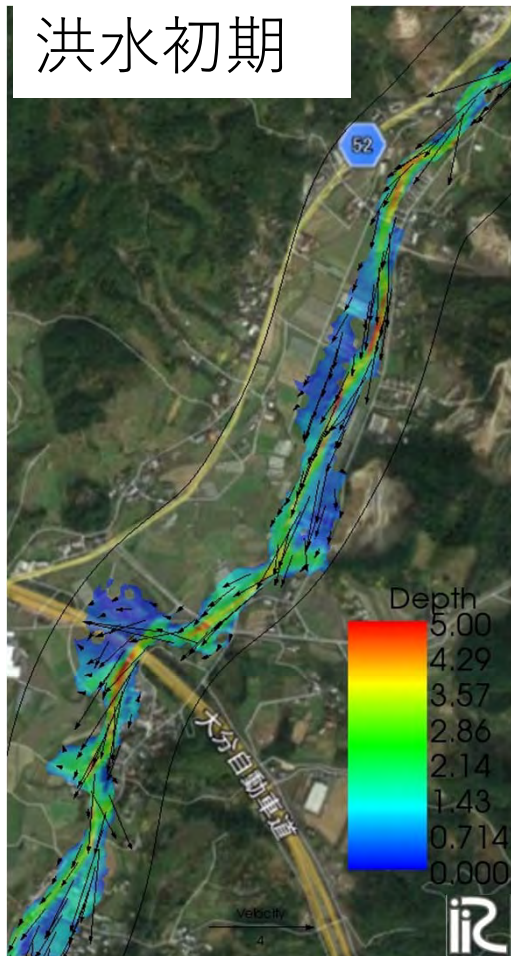
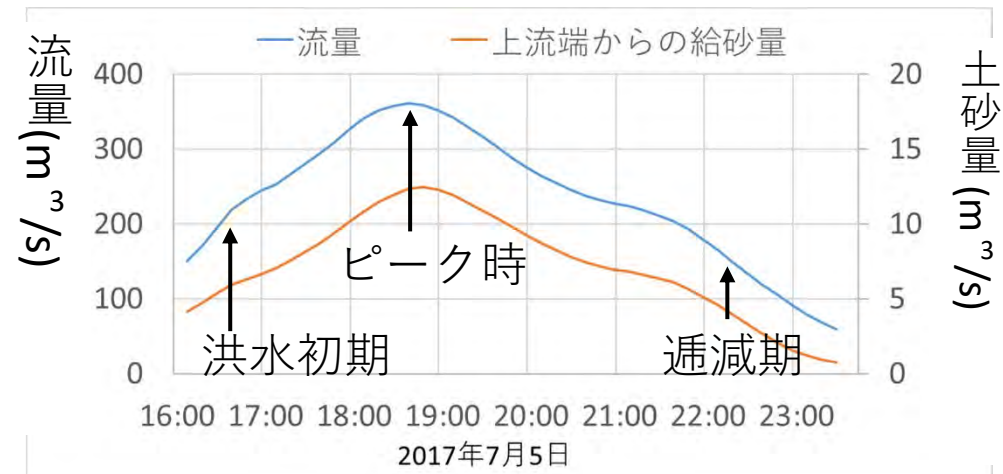


解析結果

Case1、Case3の比較 (横断面)



解析結果



解析ケース

ピーク時流況の違い (水深コンター図)

河床変動計算なし
(洪水流のみ)

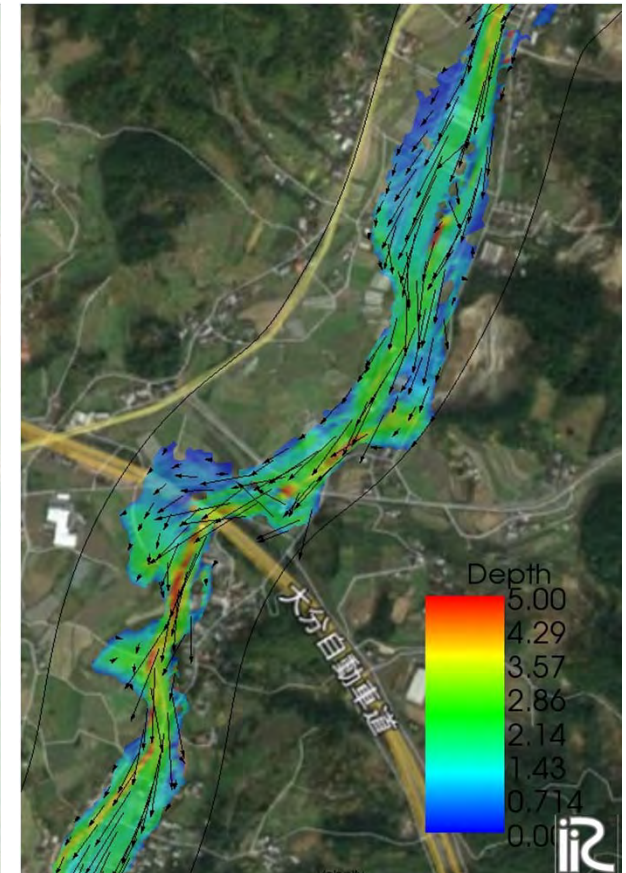
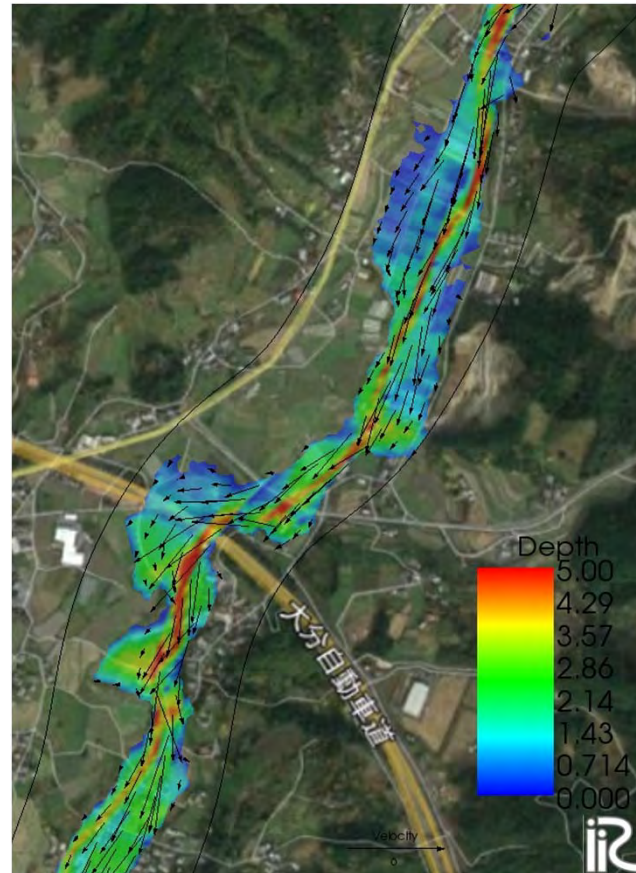
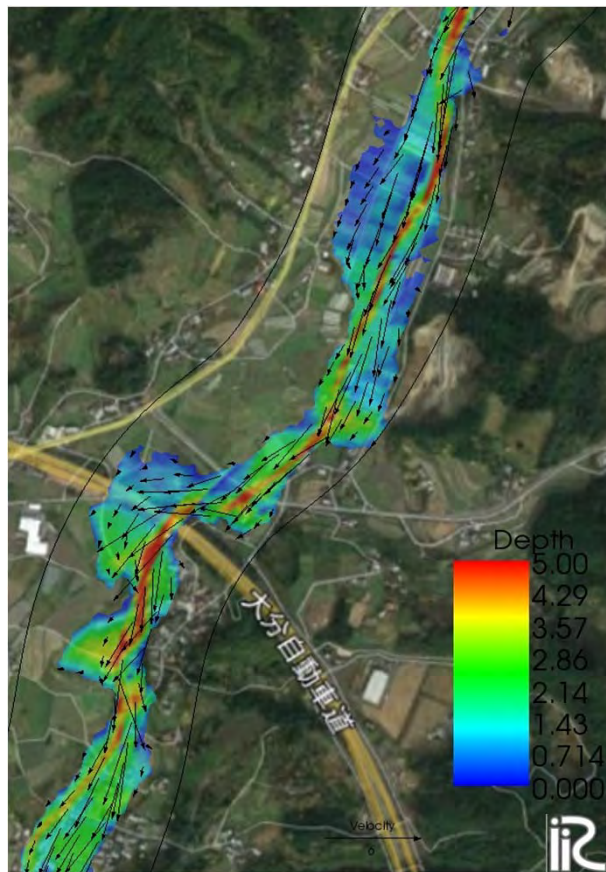
Case1

細粒分の供給なし
流木なし

Case2

細粒分の供給あり
流木あり

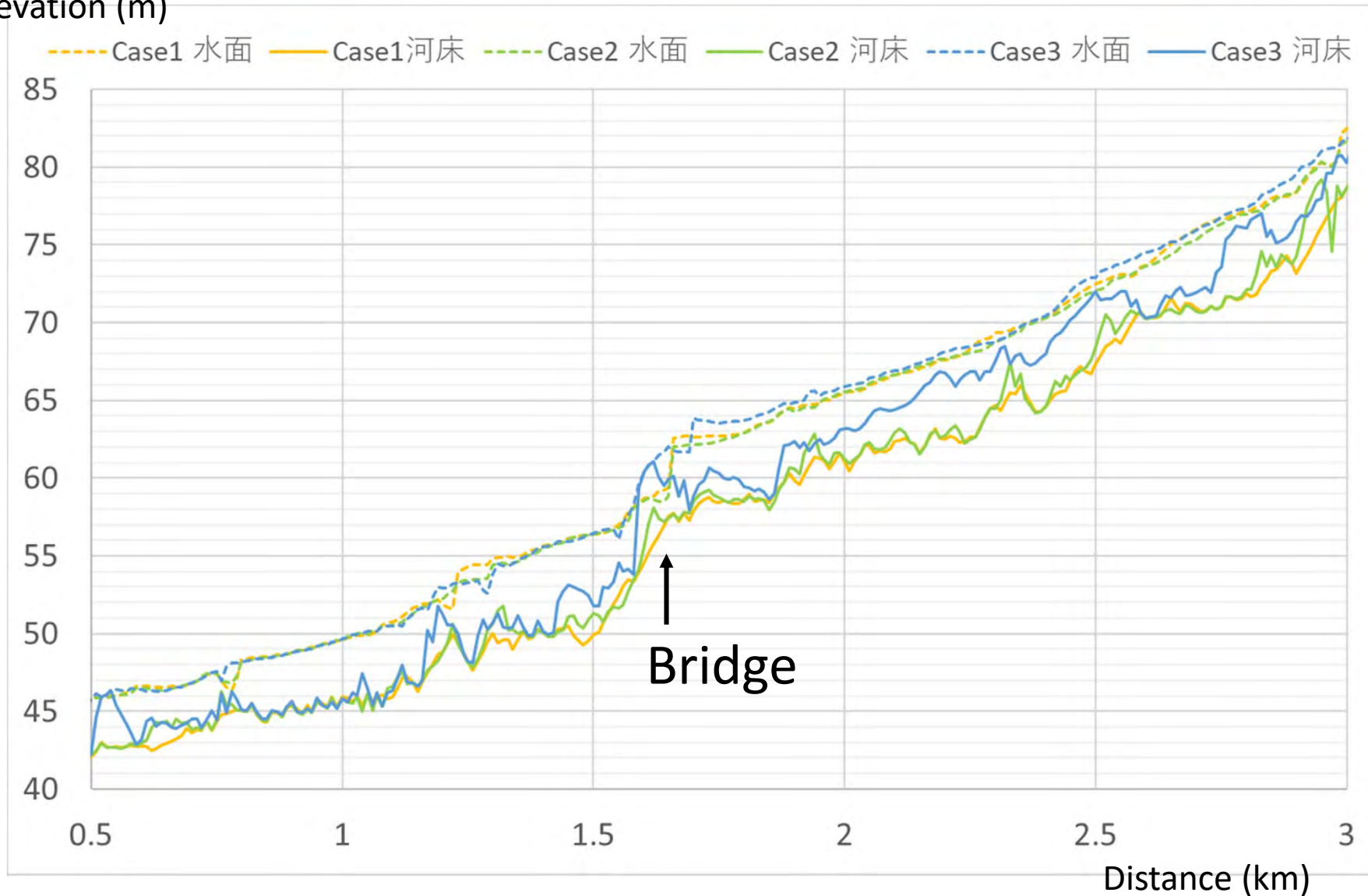
Case3



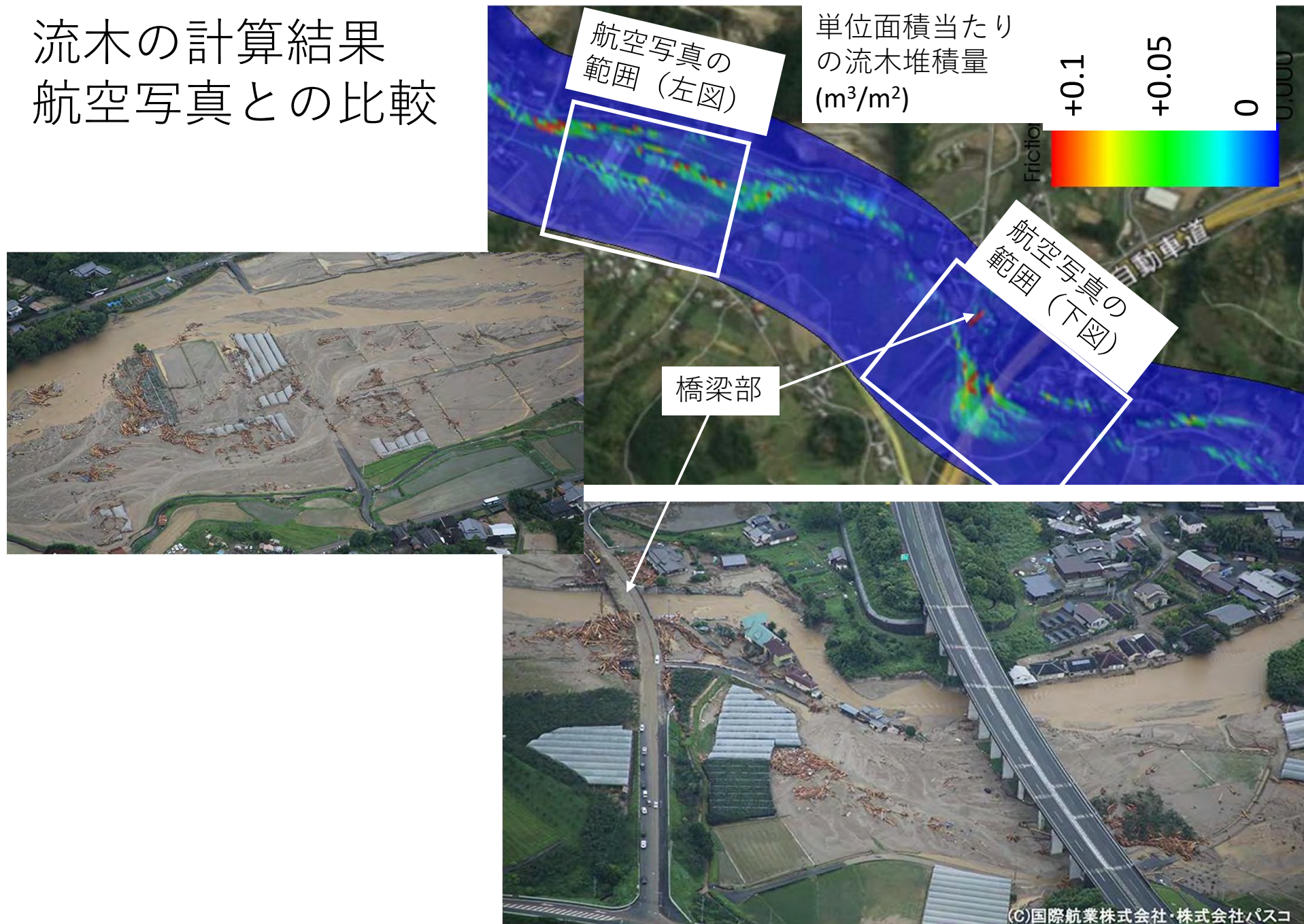
縦断面図
(ピーク流量時)

- Case1 : 固定床
- Case2 : 移動床、微細砂・流木の供給なし
- Case3 : 移動床、微細砂・流木の供給あり

Elevation (m)



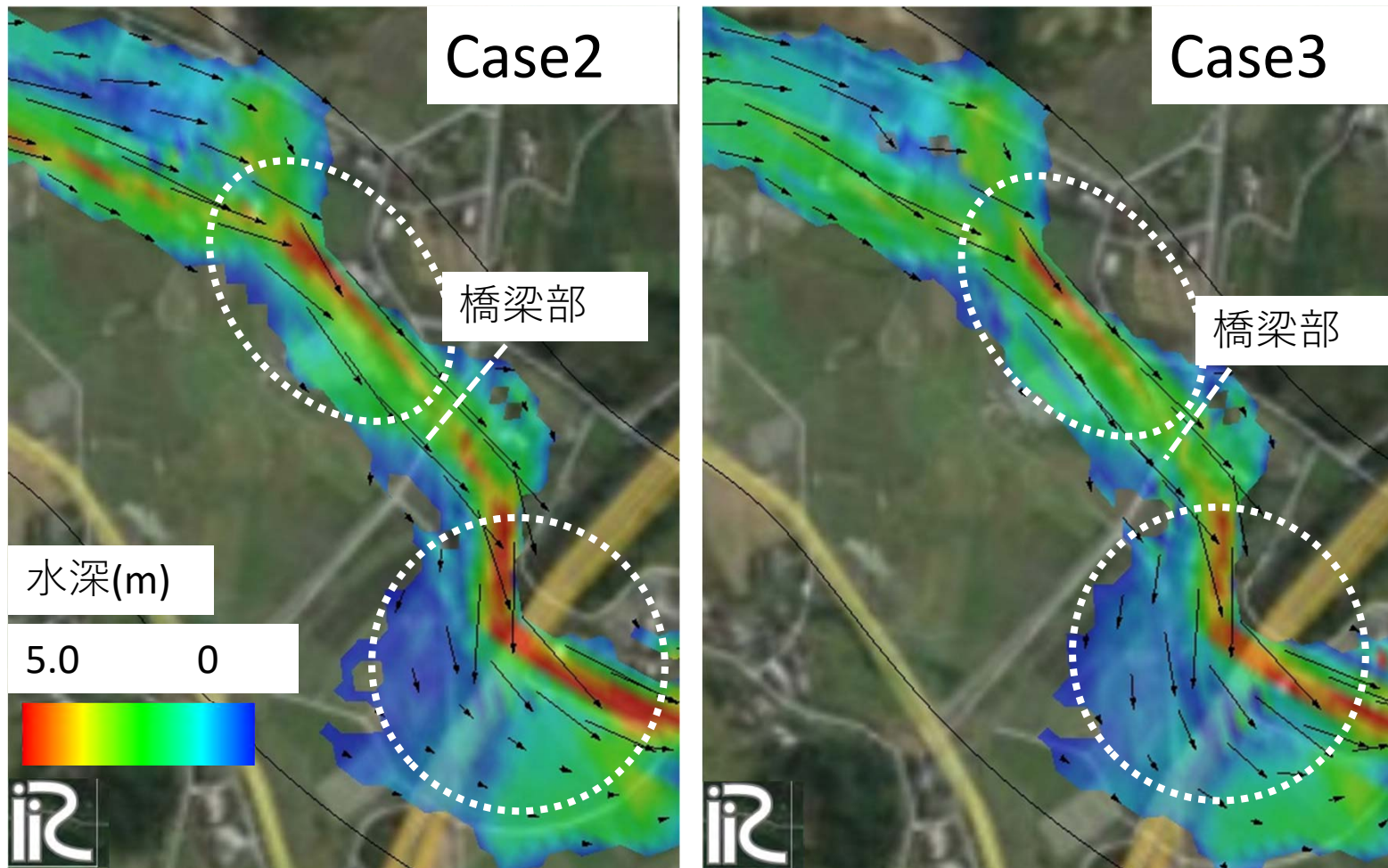
流木の計算結果 航空写真との比較



橋梁部付近の流況の違い

土砂供給なし・流木なし

土砂供給あり・流木あり



→ 流速5.0(m/s)

結論

- ・ 移流・拡散方程式に基づく流木モデルを提案
- ・ 上流端における流砂・流木の供給に対する下流の応答を解析

- ・ 赤谷川における河床変動及び洪水流の計算では、上流側からの浮遊砂の流入を考慮する場合に顕著な流路・河床変動が生じ、洪水流に大きな影響を及ぼしている。

- ・ 流木の流入量やその堆積過程については今後詳細に検討する必要があるが、これを考慮した場合には橋梁部への流木の集積が生じることによって、上下流の洪水流に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。