

移流拡散方程式に基づく流木の解析



(C)国際航業株式会社・株式会社パスコ

土木研究所 ICHARM 原田大輔・江頭進治

2018/6/13 河川技術シンポジウム OPS2

流木の影響が顕著

橋梁付近に堆積した流木
赤谷川、2017

構造物の上流側に堆積した流木
小本川、2016

赤谷川(No.1)



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

- ・ 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

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

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

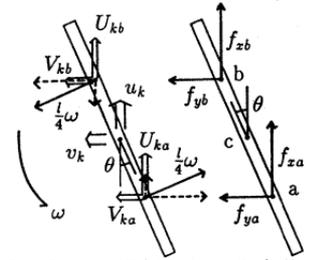


図-1 流木の回転に関する定義図

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)

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

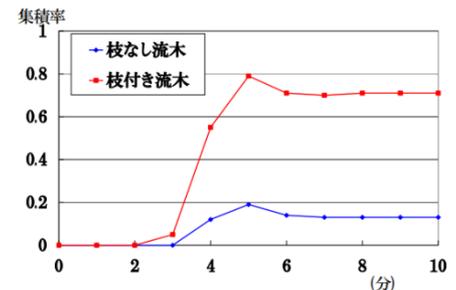


図-5 集積率の時間変化

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)

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

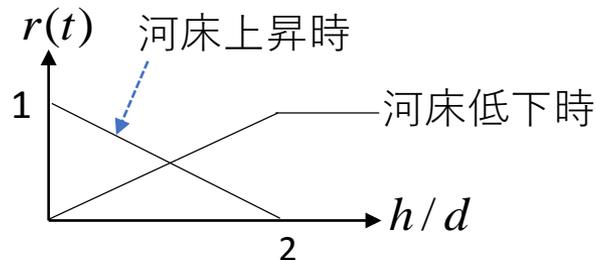
$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} C_{drf} r(t, x, y) + \underline{v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i)}$$

$\partial z / \partial t < 0$ (河床低下時)

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

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

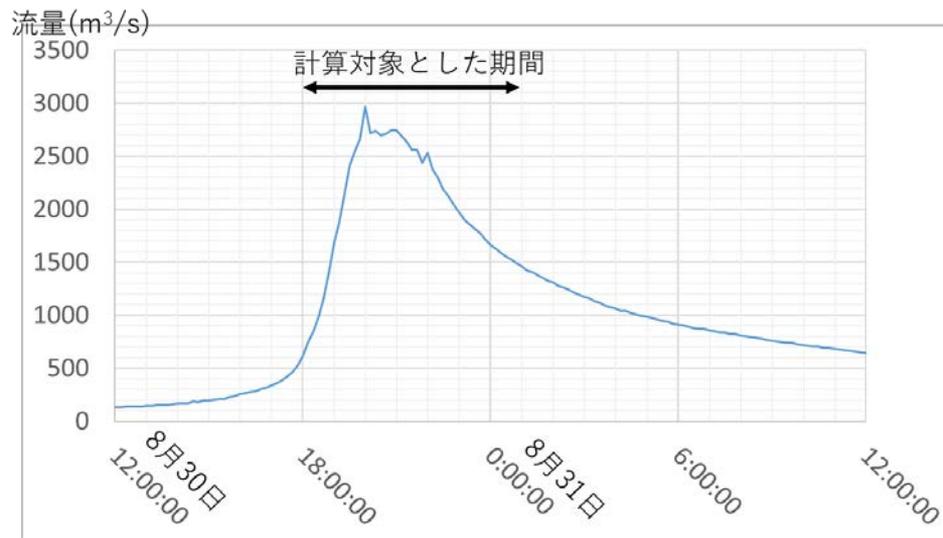
橋梁・構造物等の
障害物による流木の捕捉



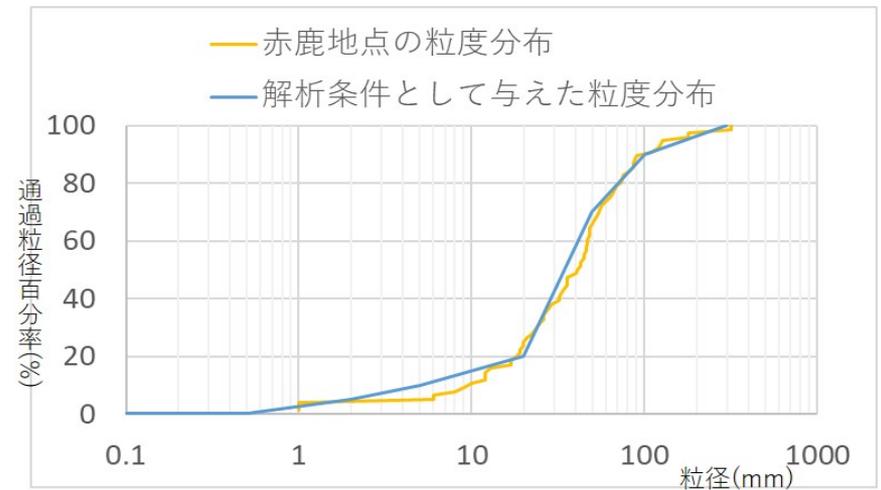
h : 水深

d : Diameter of Drift woods(0.4m)

解析条件 小本川



現地の河床材料の粒径



解析条件

$$\partial z / \partial t > 0 \text{ (河床上昇時)}$$

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

構造物への流木の捕捉：
構造物の上流側では $P_b = 1$

橋梁への流木の捕捉：
橋梁部では $P_b = 1$
(ただし桁下クリアランス2m以上、流木長が径間より小さい場合、 $P_b = 0$)

捕捉量の上限：

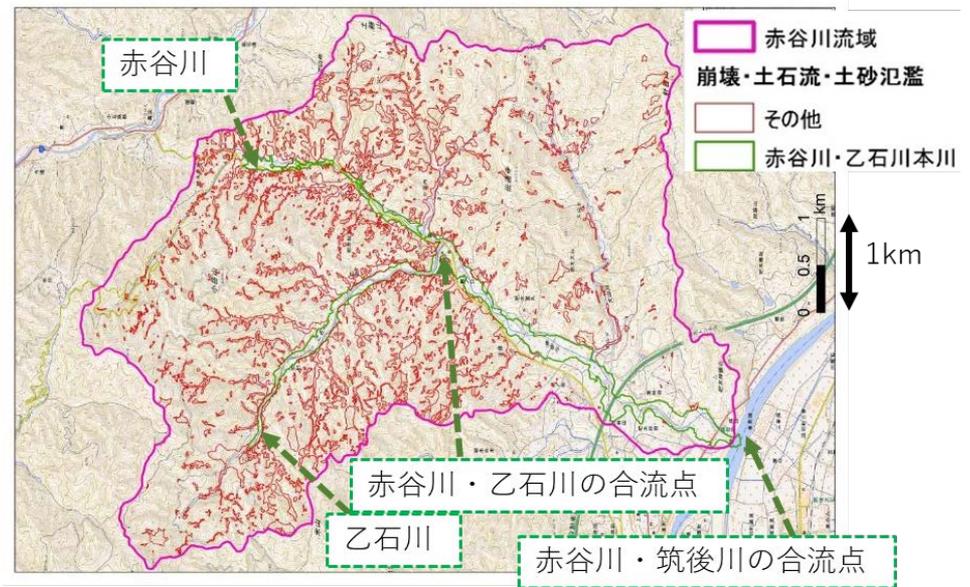
流木の堆積高さが3mを超えた場合、それ以上の堆積が生じないよう $P_b = 0$



流木供給量の条件：

崩壊地の面積から流木生産量を推定

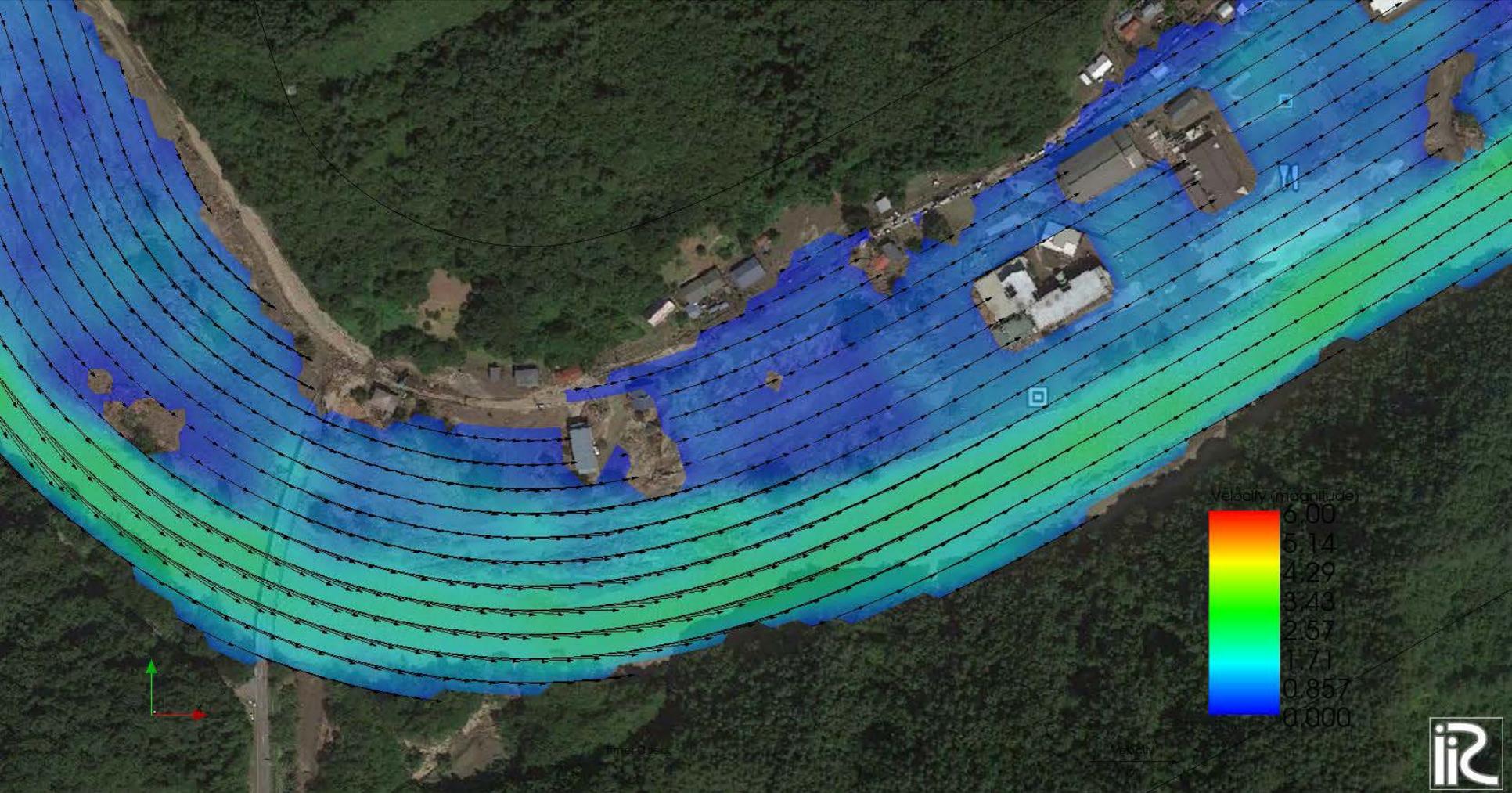
上流端で $C_{drf}=0.01$



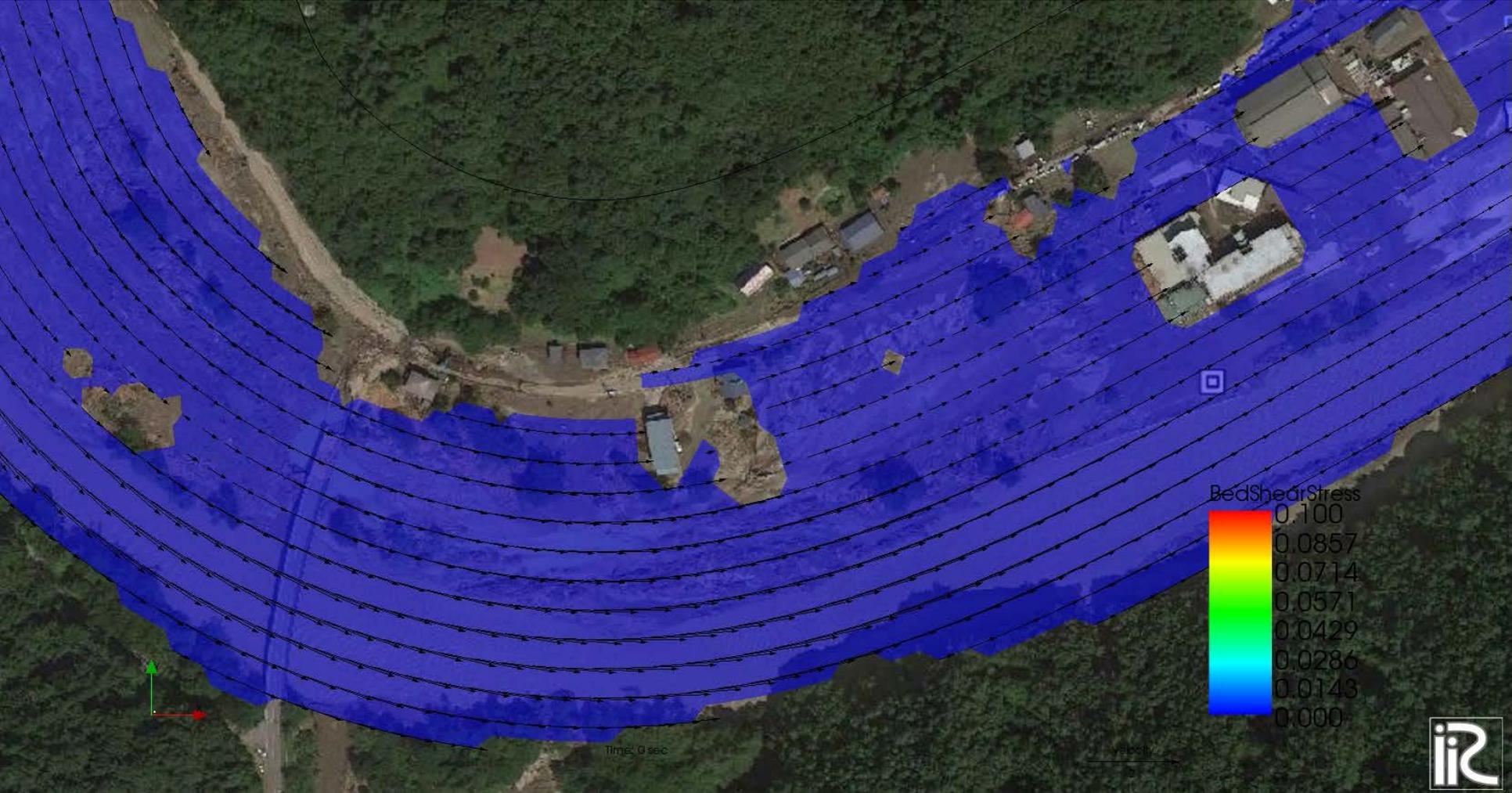
解析ケース：

Case1	固定床（河床変動なし）
Case2	移動床・流木なし
Case3	移動床・流木あり（上流端 $C_{drf}=0.01$ ）
Case4	移動床・流木あり（流木の供給量はCase3の20%）

小本川の解析結果：流れの計算

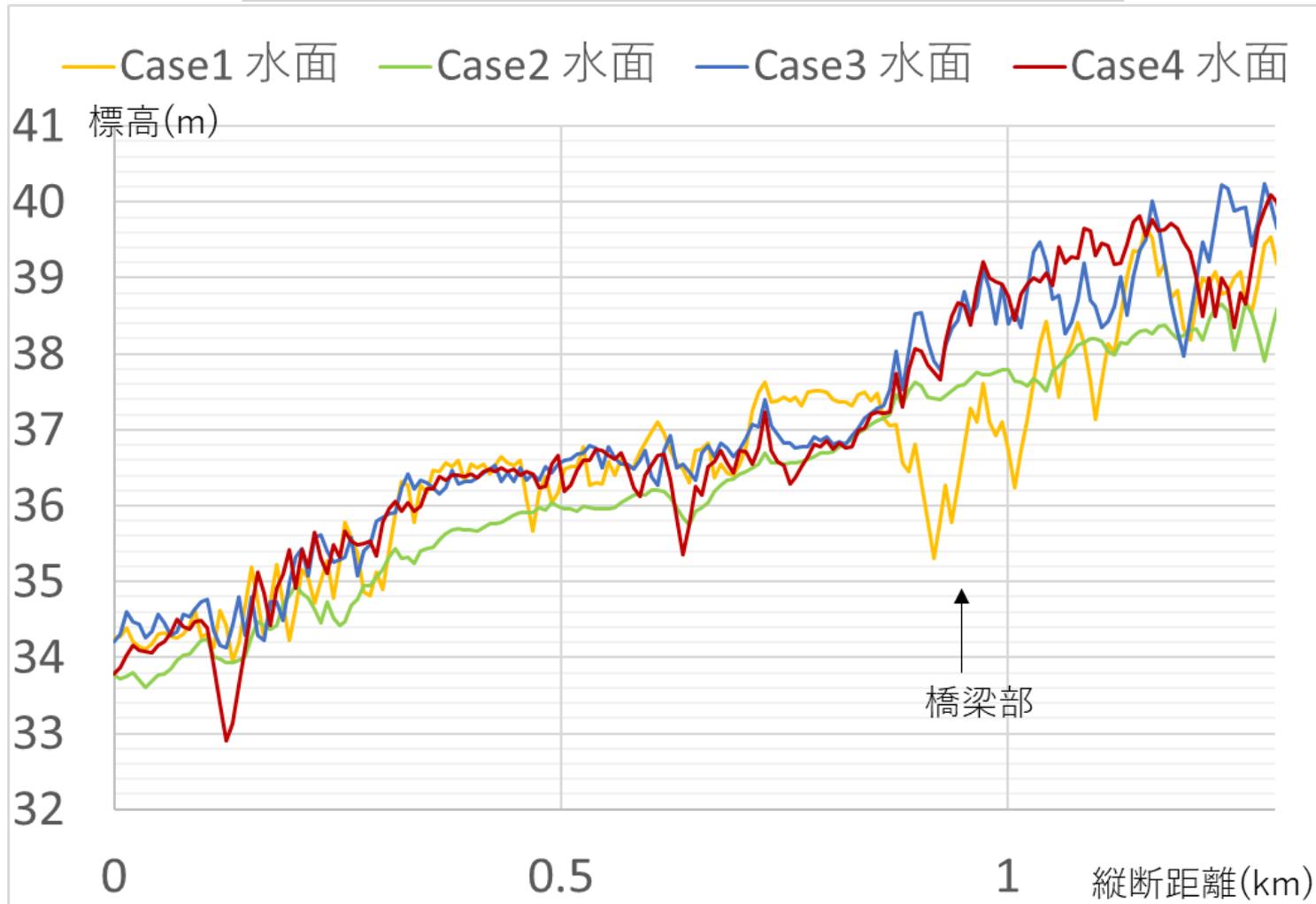


小本川の解析結果：流木の濃度



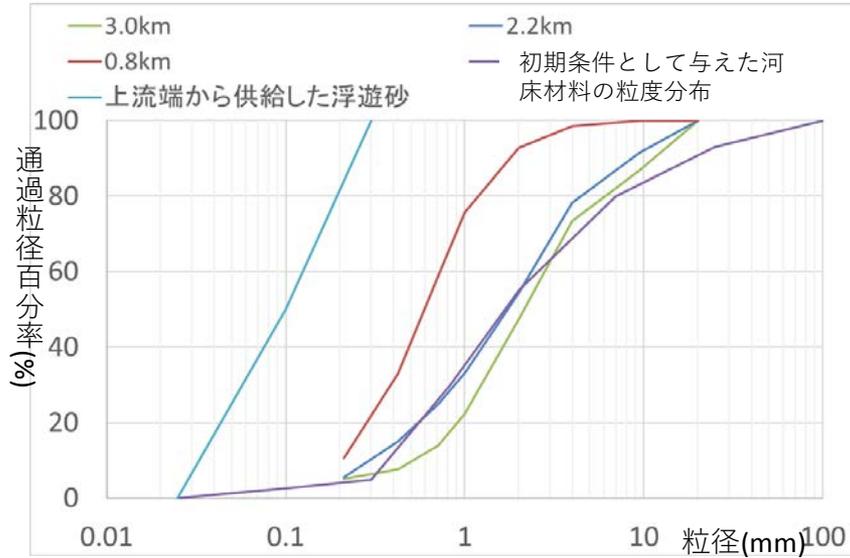
小本川の解析結果：水位の縦断比較

Case1	固定床（河床変動なし）
Case2	移動床・流木なし
Case3	移動床・流木あり（上流端 $C_{drf}=0.01$ ）
Case4	移動床・流木あり（流木の供給量はCase3の20%）

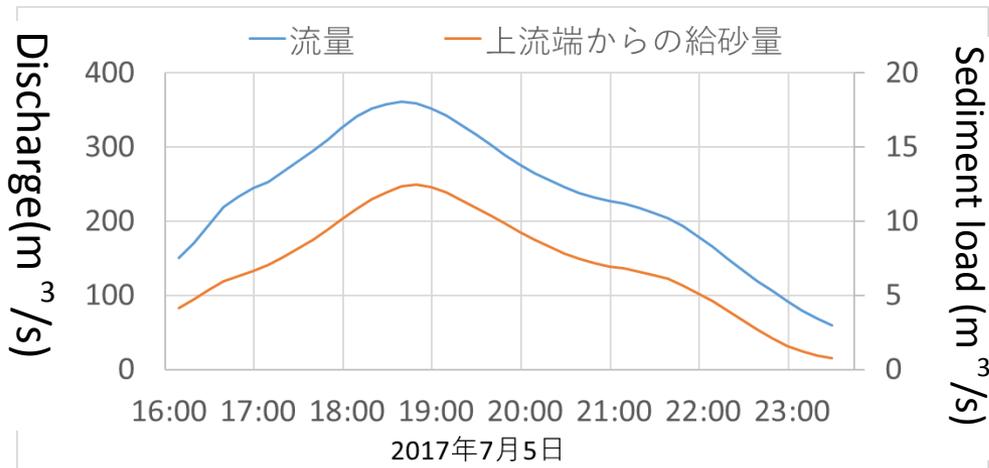


解析条件 赤谷川

初期河床材料粒度分布

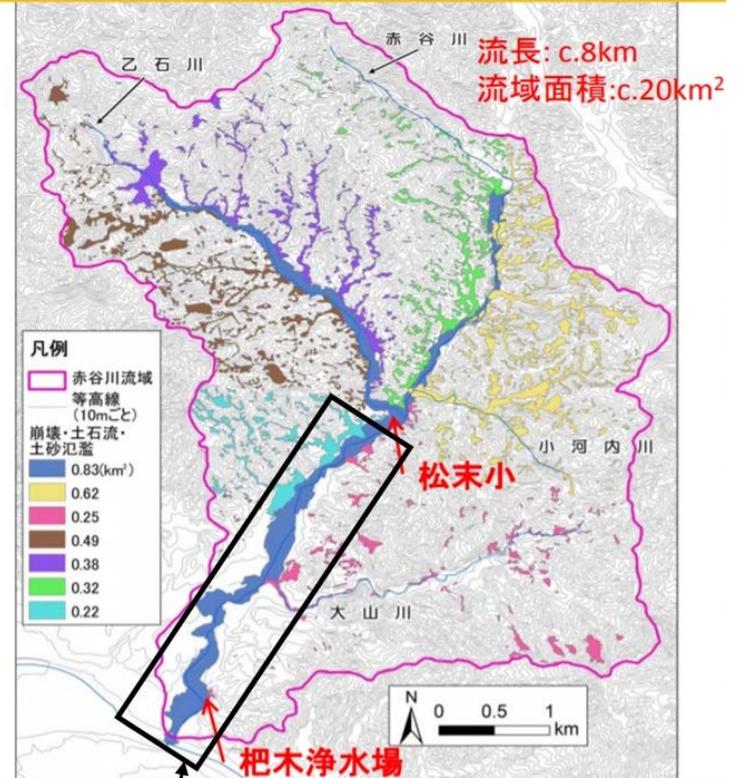


流量/上流からの土砂供給



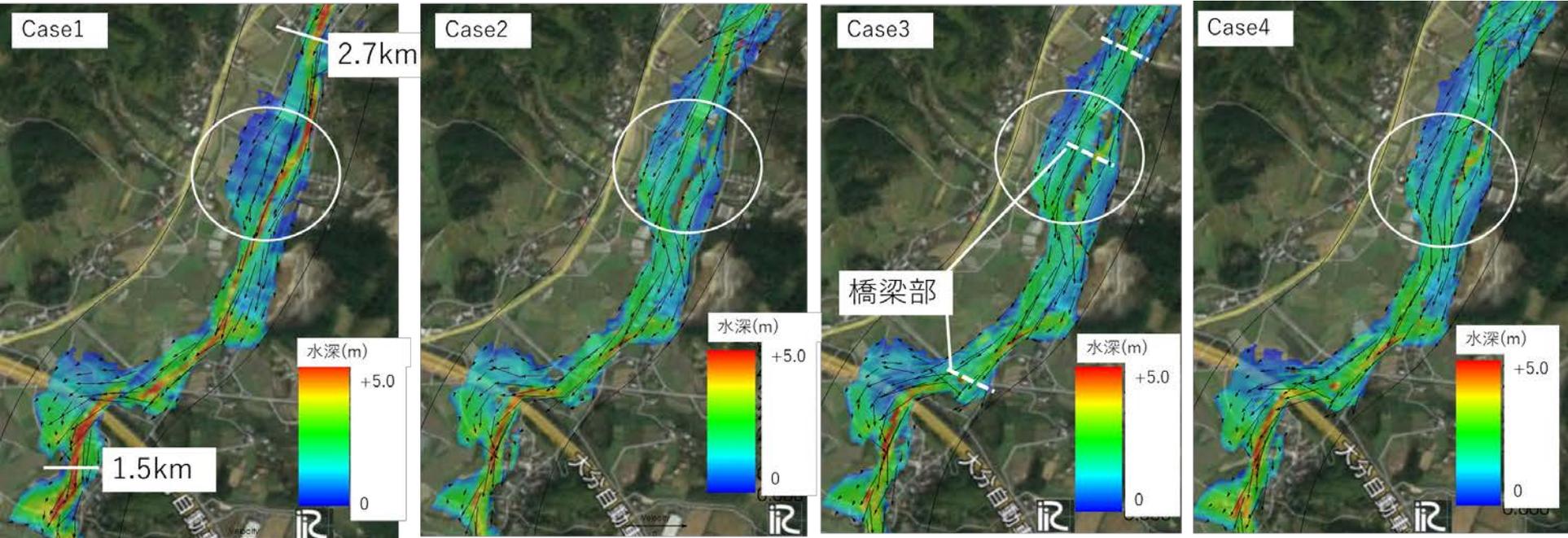
崩壊・土石流・土砂氾濫

赤谷川・乙石川本川: 0.83km²、その他支谷: 2.27km²



解析対象区間

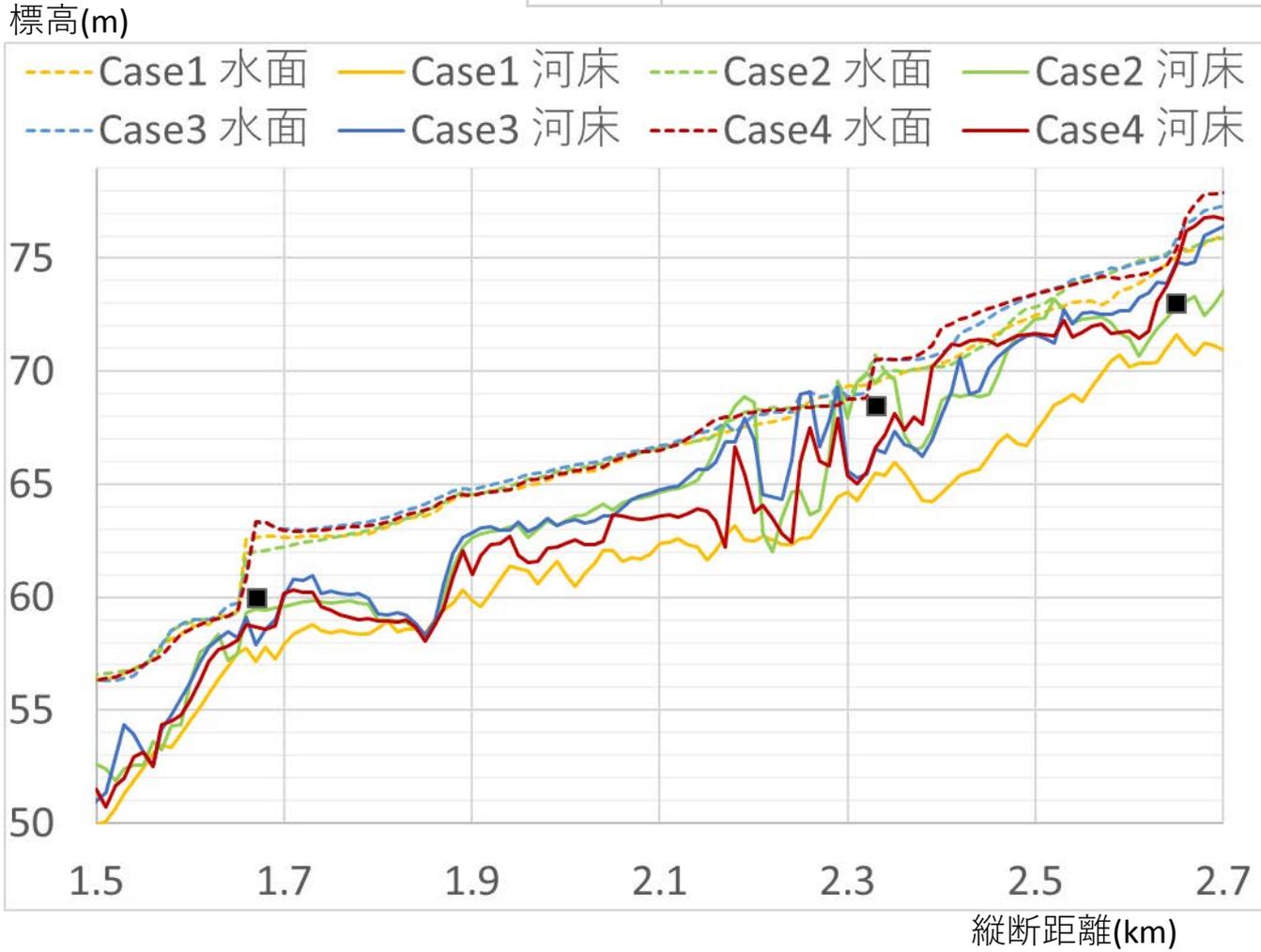
赤谷川解析結果：流れの比較



Case1	固定床 (河床変動なし)
Case2	移動床・流木なし
Case3	移動床・流木あり(上流端 $C_{drf}=0.01$)
Case4	移動床・流木あり(流木の供給量はCase3の20%)

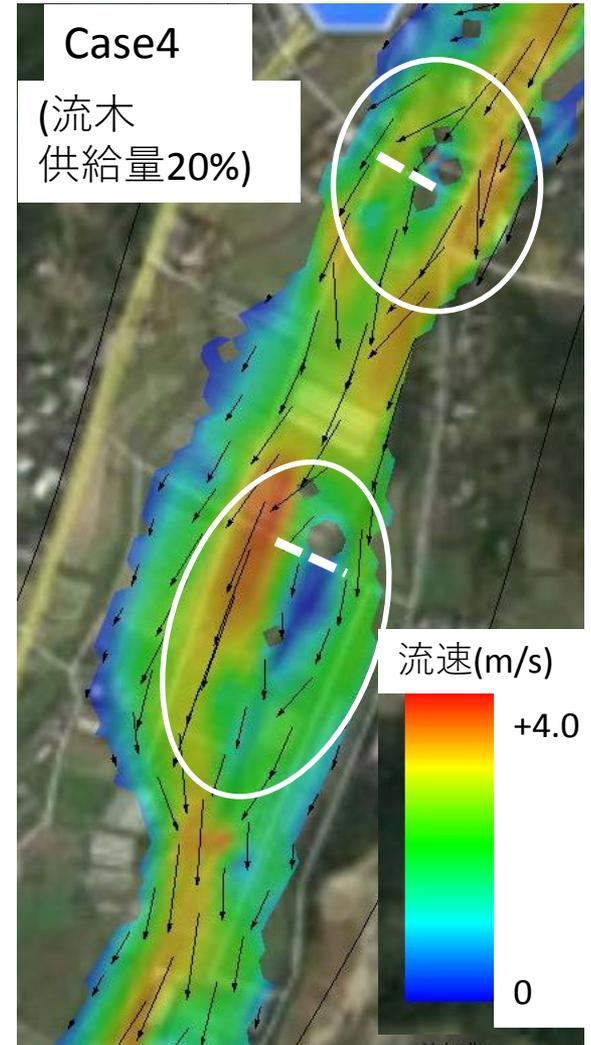
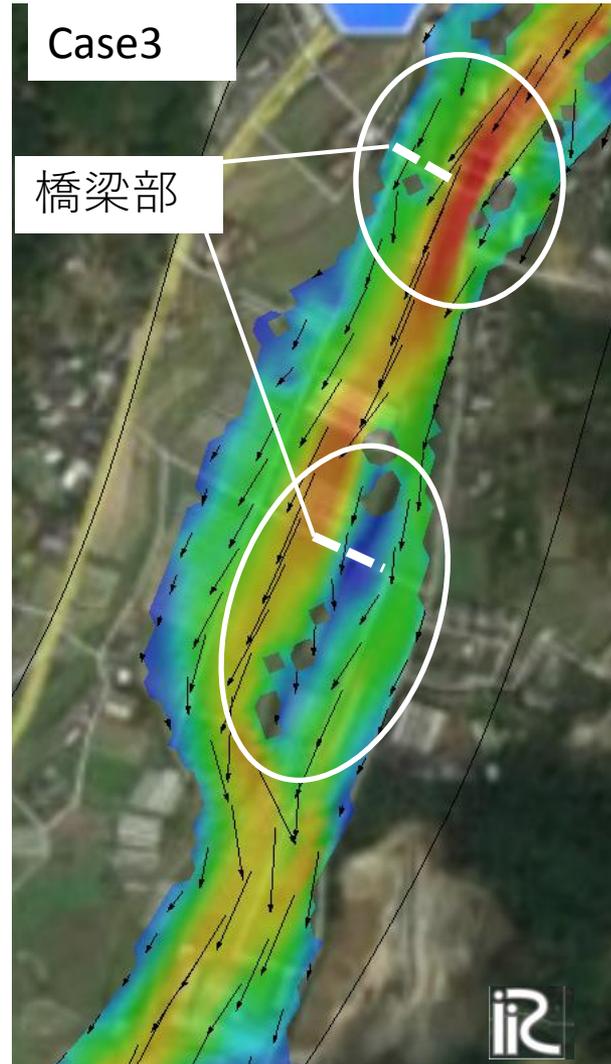
赤谷川解析結果：縦断水位の比較

Case1	固定床（河床変動なし）
Case2	移動床・流木なし
Case3	移動床・流木あり(上流端 $C_{drf}=0.01$)
Case4	移動床・流木あり(流木の供給量はCase3の20%)



赤谷川解析結果： 流木供給量の違いによる 流速コンターの比較

Case1	固定床（河床変動なし）
Case2	移動床・流木なし
Case3	移動床・流木あり(上流端 $C_{drf}=0.01$)
Case4	移動床・流木あり(流木の供給量はCase3の20%)



豪雨に伴う土砂・流木生産と 流下過程に関する研究

土木研究所 ICHARM 山崎祐介・江頭進治

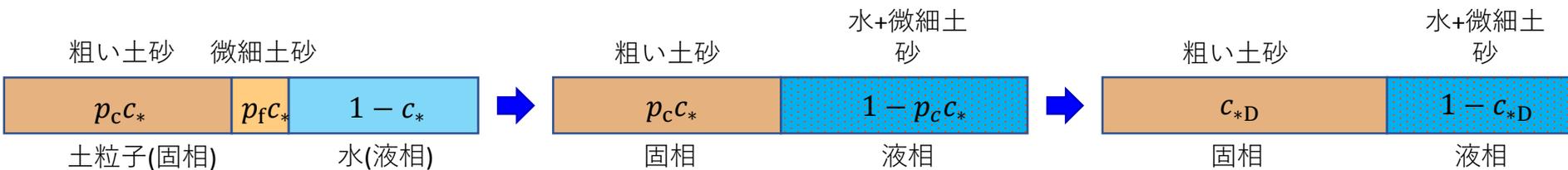
2018/6/13 河川技術シンポジウム OPS2

土石流の質量保存則

静止状態

流動化状態

堆積状態



侵食過

程

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

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial c_c uh}{\partial x} + \frac{\partial c_c vh}{\partial y} = p_c E$$

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

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

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

堆積過

程

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

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

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

土石流の運動方程式

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial \beta uuh}{\partial x} + \frac{\partial \beta vuh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad \tau_{bx} = \tau_b u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial \beta uvh}{\partial x} + \frac{\partial \beta vvh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad \tau_{by} = \tau_b v \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_b = \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2)$$

$$f_d = k_d (\sigma / \rho) (1 - e^2) c_c^{(1/3)}$$

$$\tau_y = \left(\frac{c_c}{c_*} \right)^{1/5} (\sigma - \rho) c_c g h \cos \theta \tan \phi$$

$$f_f = k_f (1 - c_c)^{5/3} c_c^{(-2/3)}$$

τ_y : クーロン型の降伏応力

$$f_b = \frac{25}{4} (f_d + f_f) \left(\frac{h}{d} \right)^{-2}$$

$$k_d = 0.0828$$

f_b : 流動抵抗係数

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

$$k_f = 0.16$$

e : 砂礫同士における反発係数

$$\rho_m = (\sigma - \rho) c_c + \rho$$

流木の質量保存則

侵食過程

$$\frac{\partial c_{\text{drf}}h}{\partial t} + \frac{\partial c_{\text{drf}}uh}{\partial x} + \frac{\partial c_{\text{drf}}vh}{\partial y} = E \frac{S}{D} r$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -E \frac{S}{D} r$$

c_{drf} : 土石流の流れにおける流木の体積濃度

S : 山腹・河床に存在している流木の体積

D : 侵食可能深

r : 流木の侵食時の係数で $r = 1$

$$S = 0.07 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$d = 0.3 \text{ m} \quad l = 30 \text{ m}$$

堆積過程

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

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -E c_{\text{drf}} r$$

堆積過程においては、土石流の水深がある値以上の時には、流木は浮遊して堆積しないものとする。

$$h_{\text{drf}} < d_{\text{drf}} : r = 0$$

$$h_{\text{drf}} \geq d_{\text{drf}} : r = 1$$

h_{drf} : 堆積が生じる限界の水深

d_{drf} : 流木の直径

土石流に伴う流木の挙動

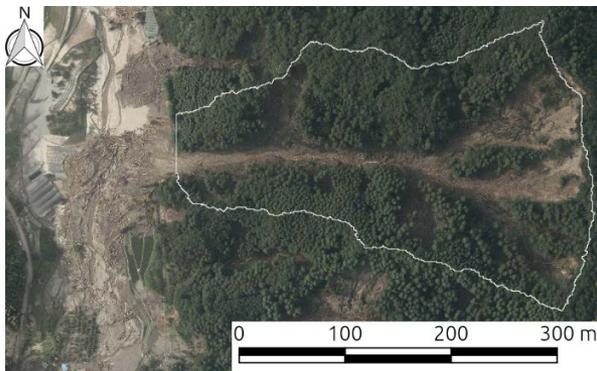
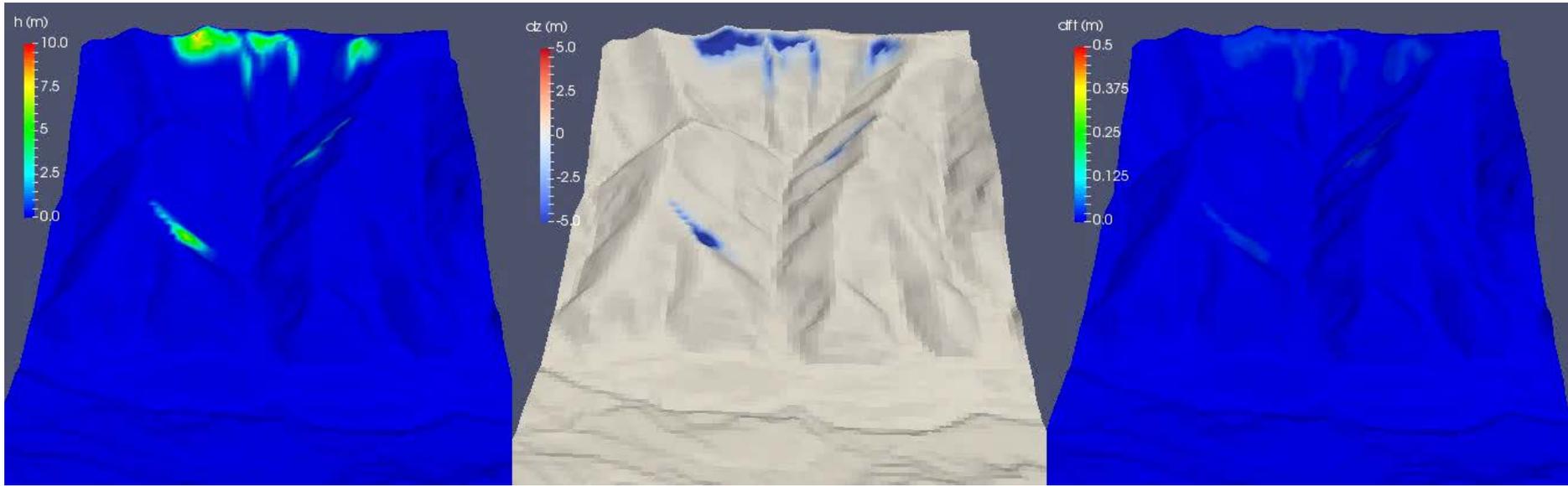
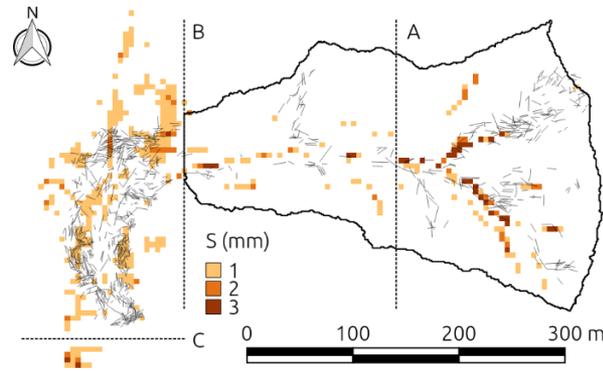
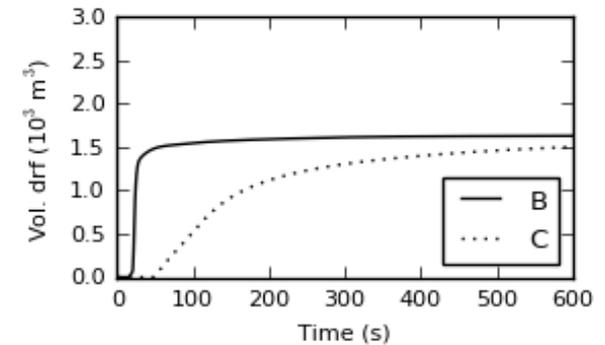


Photo of the basin



Obs. & sim. driftwood dep.



Flux of driftwood

結論

総合討議にて