

土石流～掃流まで連続して解析可能な河床変動計算モデル

山地流域の土砂移動の特徴

- 河床勾配が大きく変化する⇒流砂形態も変化

緩勾配

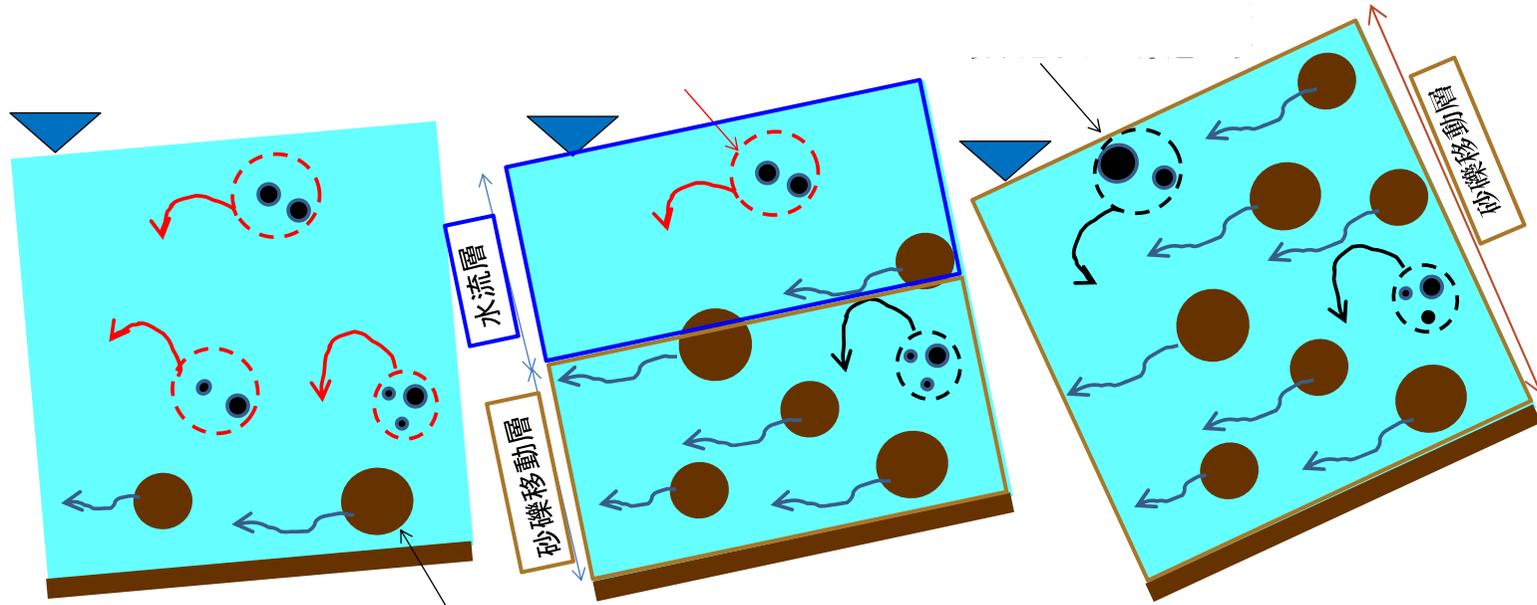
急勾配

流砂
形態

掃流砂・浮遊砂

掃流状集合流動

土石流



山地流域の土砂移動の特徴～土石流～

- 流れ全体が水と土砂が一体となる**砂礫移動層**となる¹⁾
- 粗粒土砂は層流状態で移動する¹⁾
- 細粒土砂は乱流状態となって砂礫移動層中の間隙流体に取り込まれて移動する（**フェーズシフト**）²⁾

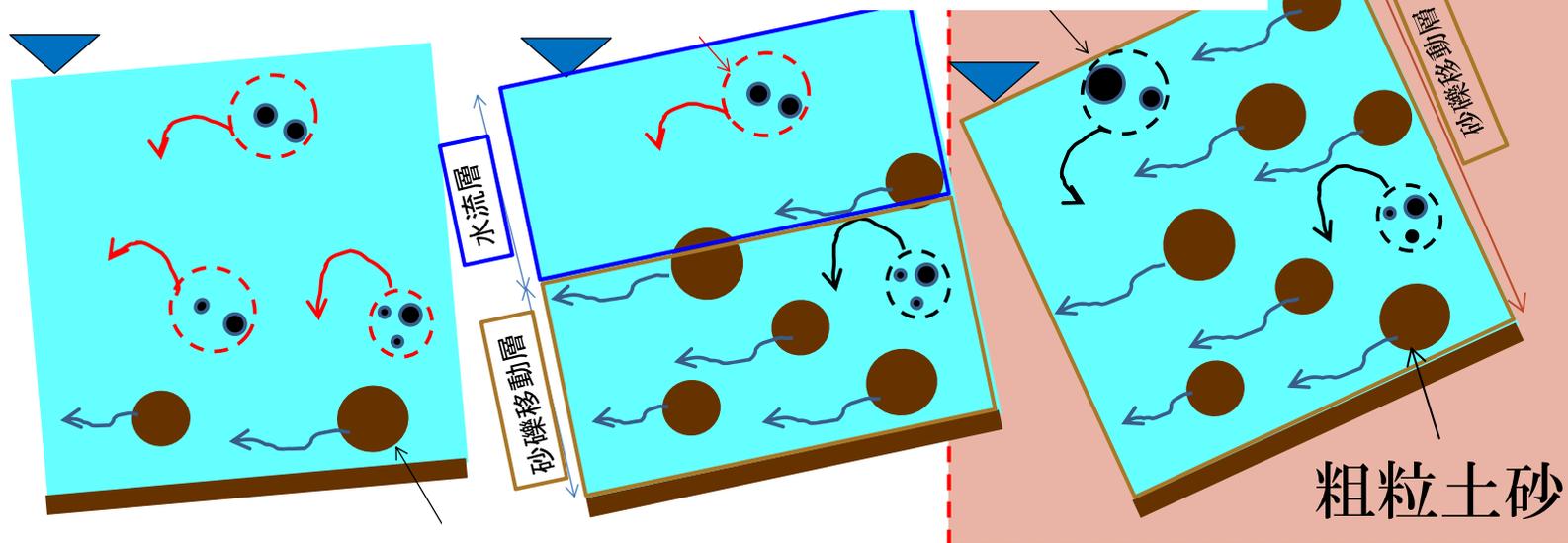
[¹⁾高橋,2004²⁾ 芦田ほか,1985]

掃流砂・浮遊砂

掃流状集合流動

土石流

フェーズシフトした細粒土砂



山地流域の土砂移動の特徴～掃流状集合流動～

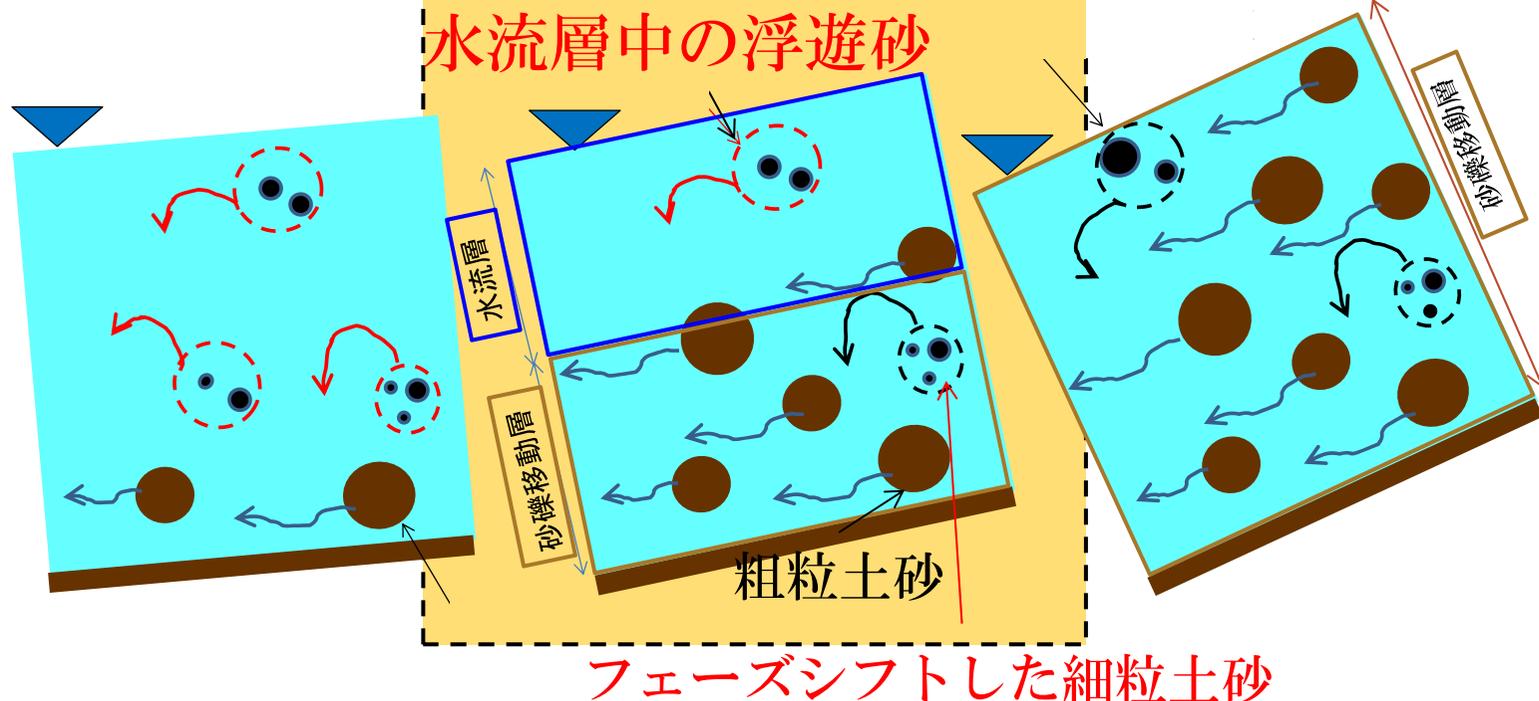
- 流れの上部に流水が流れる層（**水流層**）が生じる³⁾
- 砂礫移動層中には粗粒土砂および**フェーズシフト**した細粒土砂が存在する
- **水流層には細粒土砂の一部が浮遊する（仮定）**

[³⁾高濱ほか,2002]

掃流砂・浮遊砂

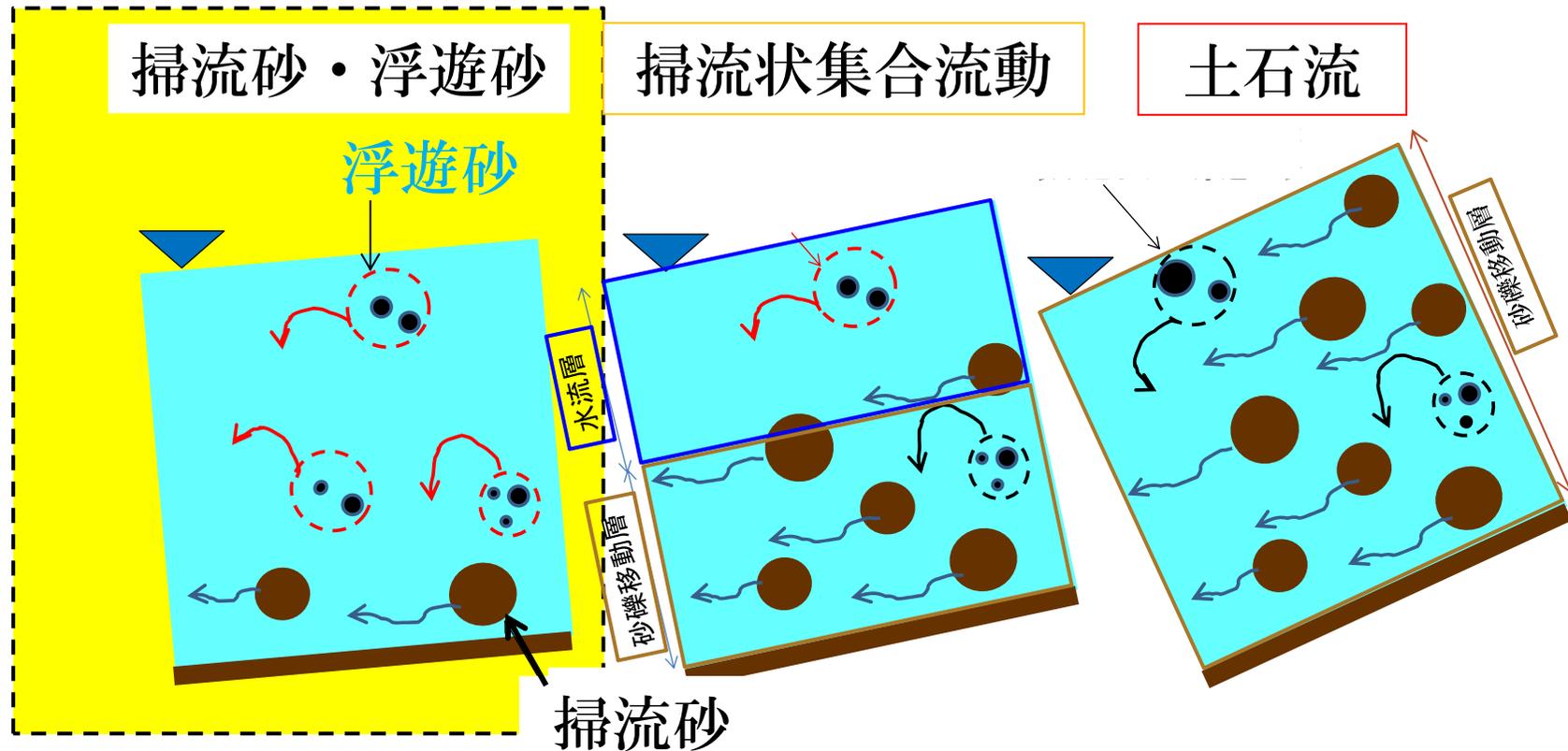
掃流状集合流動

土石流



山地流域の土砂移動の特徴～掃流砂・浮遊砂～

- 河床付近で掃流砂が移動する
- 水中には土砂の一部が浮遊する（浮遊砂）



従来のモデルの課題

土石流モデル

- 土石流や集合流動での高濃度の土砂流出が計算可能
- 単一粒径、又は河床変動に寄与しない細粒土砂の2粒径モデル
- 掃流区間まで計算可能であるが、浮遊砂が考慮されておらず、混合粒径ではないため、緩勾配区間での河床変動の再現性に限界がある

掃流モデル

- 流砂量式を用いるため、土石流や集合流動での高濃度での土砂流出の再現には限界がある。

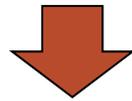
土石流～掃流区間までの数値計算の試み

- 急勾配・緩勾配河床変動モデルの接続⁴⁾ [4)村上ほか, 2014]



土石流モデル(単一粒径) → 掃流モデル(混合粒径)

⇒モデルの接続点と受け渡す粒径組成の設定が課題

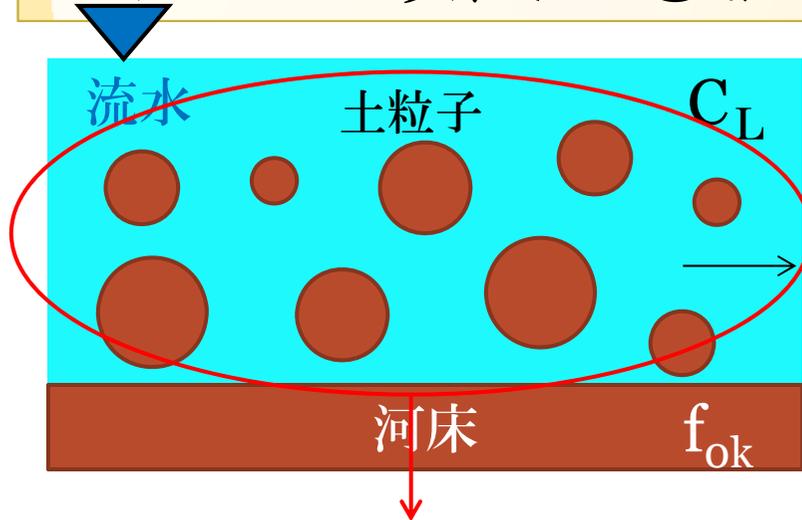


従来の土石流モデル(単一粒径)を混合粒径化し、かつ浮遊砂を考慮したモデルの開発

モデルの改良

- ①全区間で混合粒径の計算を可能にし、河床変動に応じて河床の粒度分布が時系列変化する
- ②細粒土砂のフェーズシフトを考慮し、水理条件に応じてフェーズシフトする土砂の粒径が変化する
- ③水流層が連続的に遷移するようにモデル化し、既往の浮遊砂理論から浮遊砂量を算定

モデルの改良～①混合粒径化～



混合粒径の平均粒径

平衡濃度式

【土石流の場合： $\tan \theta \geq \tan \phi$ 】

$$C_\infty = 0.9C_*$$

【土石流の場合： $\tan \phi > \tan \theta > \frac{(\sigma - \rho_m) \tan \phi}{5.7\rho_m + \sigma}$ 】

$$C_\infty = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)}$$

土石流

掃流状集合流動

河床の侵食・堆積量は**混合粒径の平均粒径**に対して算定

掃流砂・浮遊砂

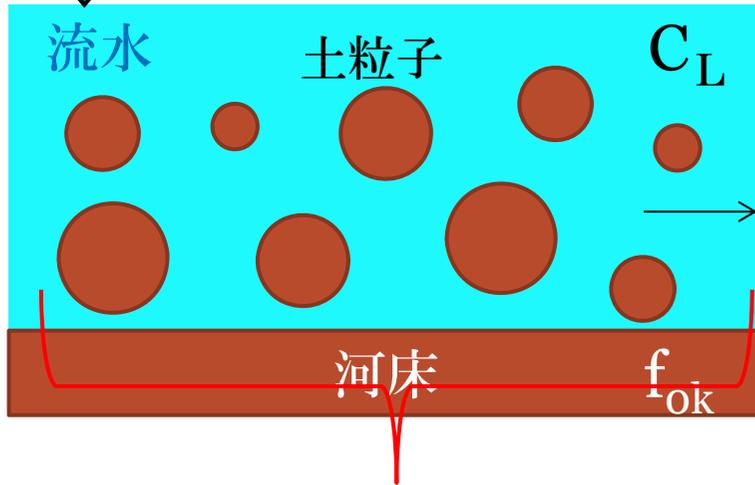
粒径別の平衡土砂濃度 ($C_{\infty k}$) を算出し、**粒径別に**算定

【掃流状集合流動の場合

$$\frac{(\sigma - \rho_m) \tan \phi}{5.7\rho_m + \sigma} \geq \tan \theta > 0.03】$$

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

モデルの改良～①混合粒径化～



土石流

掃流状集合流動

河床の侵食・堆積量は**混合粒径**
の**平均粒径**に対して算定

掃流砂・浮遊砂

粒径別の平衡土砂濃度 ($C_{\infty k}$) を
算出し、**粒径別に**算定

粒径別の平衡土砂濃度 ($C_{\infty k}$)
粒径別の土砂濃度 (C_k)

平衡濃度式

掃流区間では**移動限界**を考慮する
必要があると考え...

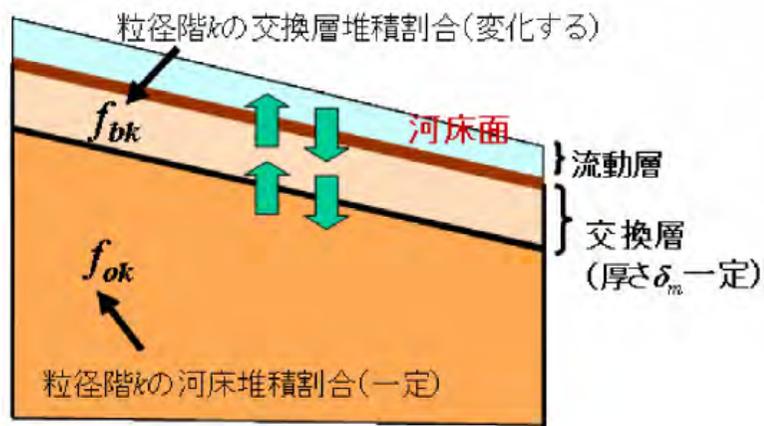
【掃流砂・浮遊砂の場合： $\tan \theta \leq 0.03$ 】

$$C_{\infty k} = \frac{(1 + 5 \tan \theta) \tan \theta}{\frac{\sigma}{\rho} - 1} \left(1 - \alpha_c^2 \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \alpha_c \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right)$$

$$\alpha_c^2 = \frac{2 \left(0.425 - \frac{\sigma \tan \theta}{\sigma - \rho_m} \right)}{1 - \frac{\sigma \tan \theta}{\sigma - \rho_m}}$$

モデルの改良～①混合粒径化～

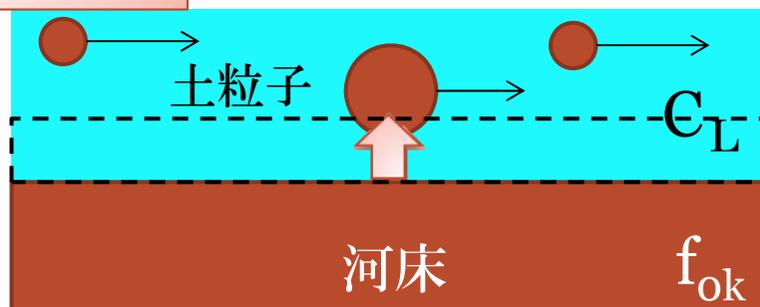
河床粒径の時系列変化



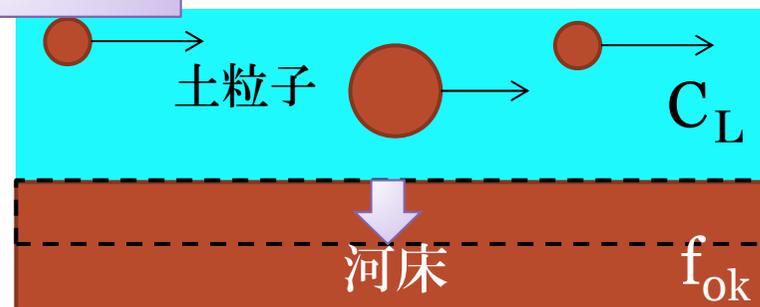
$$\frac{\partial f_{bk}}{\partial t} = \begin{cases} \frac{-E_k + \frac{q_{sk} - q_{dk}}{C_*} + E_b f_{0k}}{\delta_m} & (E_m \geq 0 : \text{侵食}) \\ \frac{-E_k + \frac{q_{sk} - q_{dk}}{C_*} + E_b f_{bk}}{\delta_m} & (E_m < 0 : \text{堆積}) \end{cases}$$

δ_m : 交換層厚 f_{0k} : 河床における k 番目の粒径階の存在割合
 f_{bk} : 河床表面(交換層内)における k 番目の粒径階の存在割合
 q_{dk} : 粒径 d_k の浮遊砂沈降フラックス
 q_{sk} : 粒径 d_k の浮遊砂浮上フラックス

堆積時



侵食時



- 堆積量を流水中の土砂濃度比で粒径別に割り振る
- 侵食量を河床材料の存在比率で粒径別に割り振る

モデルの改良

- ①全区間で混合粒径の計算を可能にし、河床変動に応じて河床の粒度分布が時系列変化する
- ②細粒土砂のフェーズシフトを考慮し、水理条件に応じてフェーズシフトする土砂の粒径が変化する
- ③水流層が連続的に遷移するようにモデル化し、既往の浮遊砂理論から浮遊砂量を算定

モデルの改良～②フェーズシフトの導入～

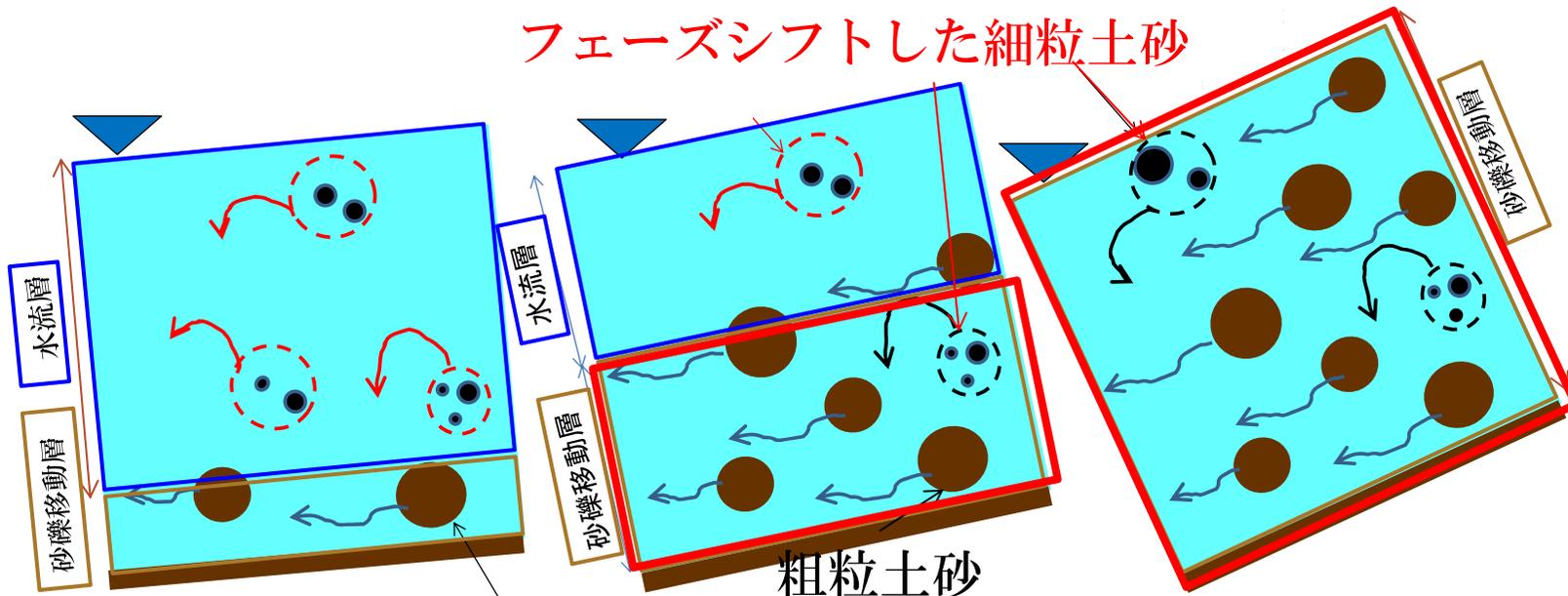
- 砂礫移動層にフェーズシフトを導入
- 西口(2014)の手法に基づき、フェーズシフトする細粒土砂を摩擦速度 (u_*) と沈降速度 (w_k) の比に応じて時空間的に変化させた

$$u_* / w_k \geq \alpha \quad * \alpha : \text{フェーズシフト係数} \quad \text{既往研究によると } 3 \leq \alpha \leq 21$$

掃流砂・浮遊砂

掃流状集合流動

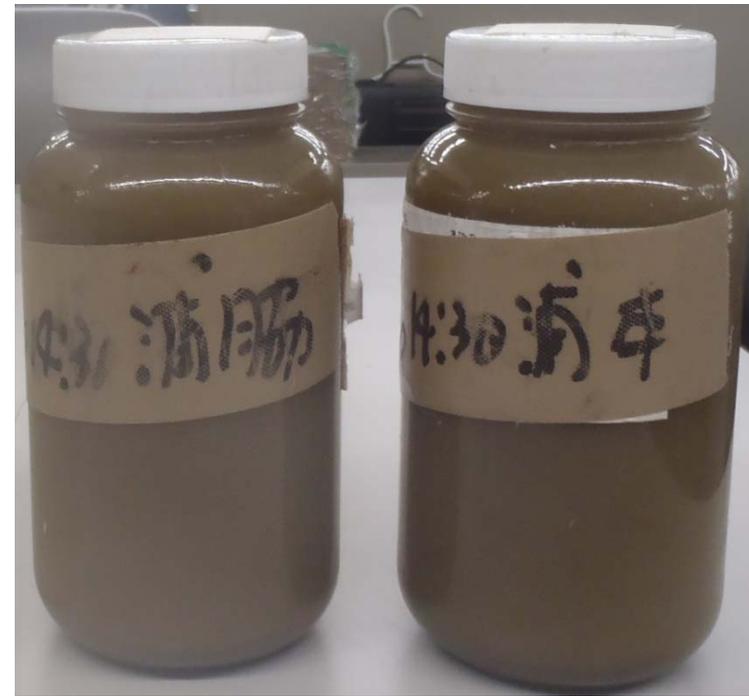
土石流



フェーズシフト：砂礫移動層中の細粒土砂の一部が乱流状態となり間隙流体に取り込まれる現象

モデルの改良

- ①全区間で混合粒径の計算を可能にし、河床変動に応じて河床の粒度分布が時系列変化する
- ②細粒土砂のフェーズシフトを考慮し、水理条件に応じてフェーズシフトする土砂の粒径が変化する
- ③水流層が連続的に遷移するようにモデル化し、既往の浮遊砂理論から浮遊砂量を算定



モデルの改良～③浮遊砂の導入～

- 浮遊砂を導入するために**水流層をモデル化（二層流モデル）**
- 水流層が連続的に遷移するように、砂礫移動層の土砂濃度を一定として**流体の土砂濃度から砂礫移動層の厚さを算定**
- 既往の浮遊砂理論に基づき、粒径別の**浮上量と沈降量により非平衡の浮遊砂量を算定**

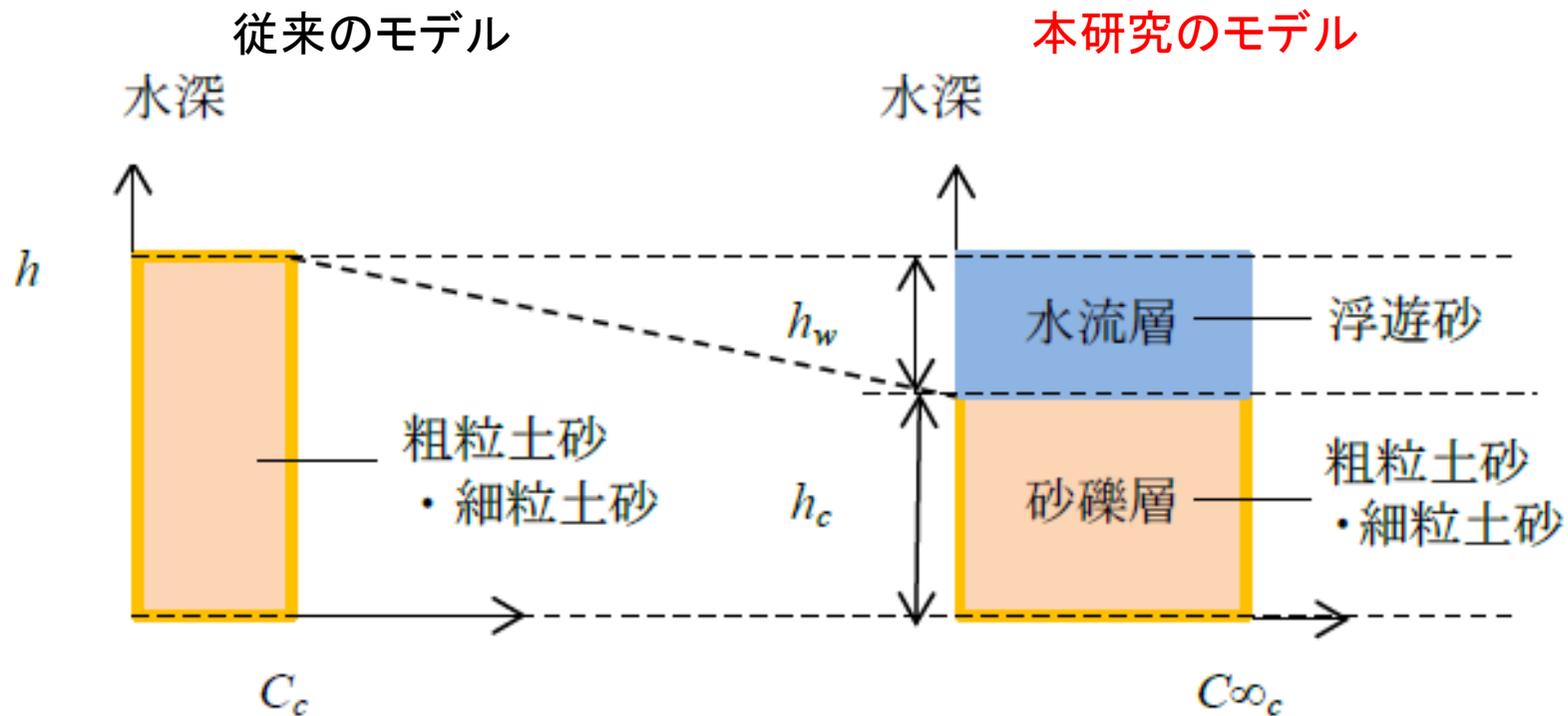
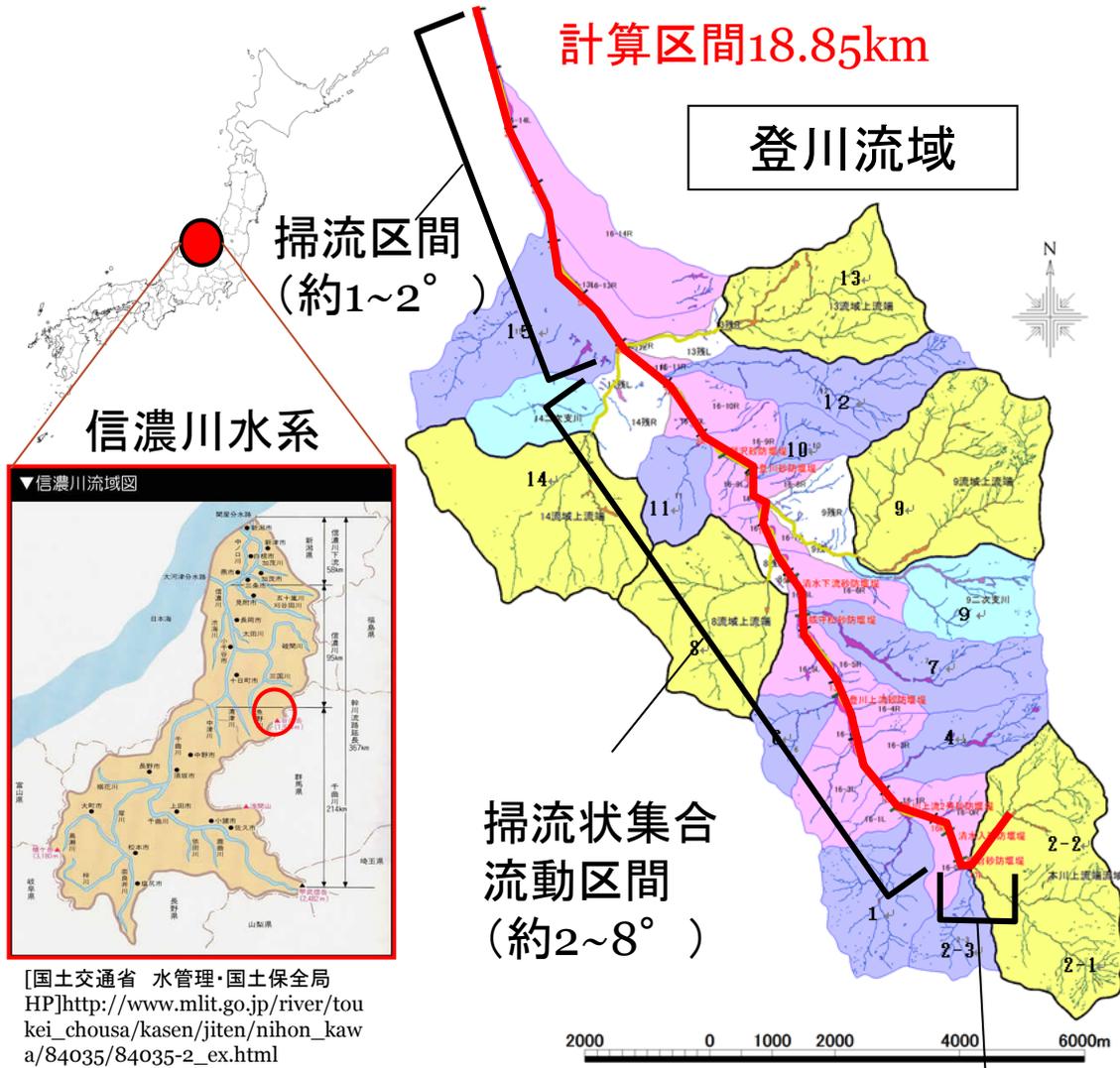


図 水流層のモデル化のイメージ(掃流状集合流動区間)

再現計算～再現対象～

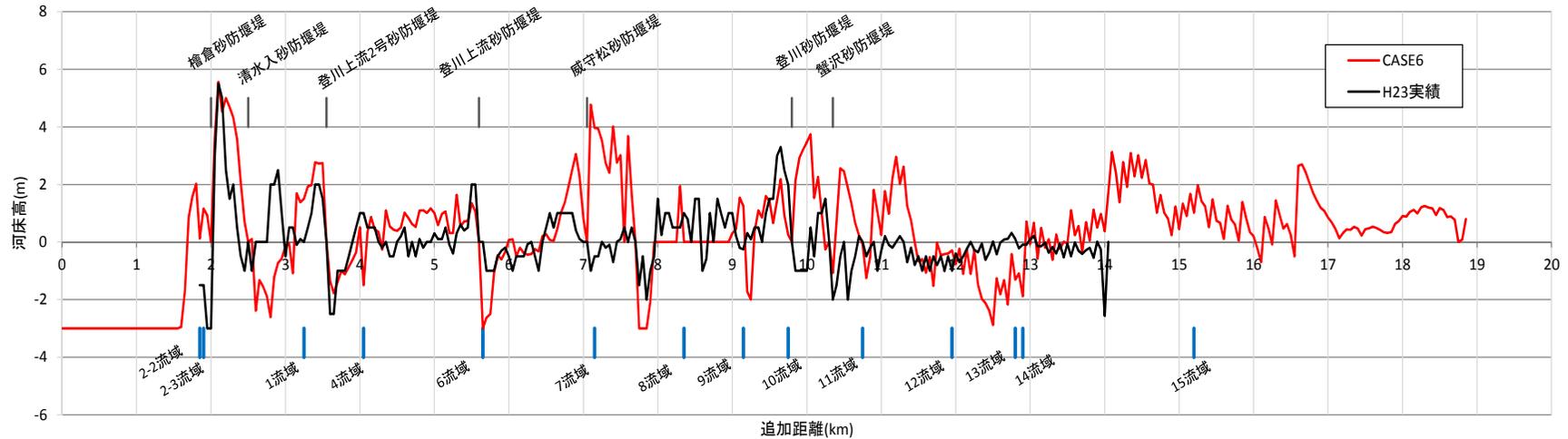
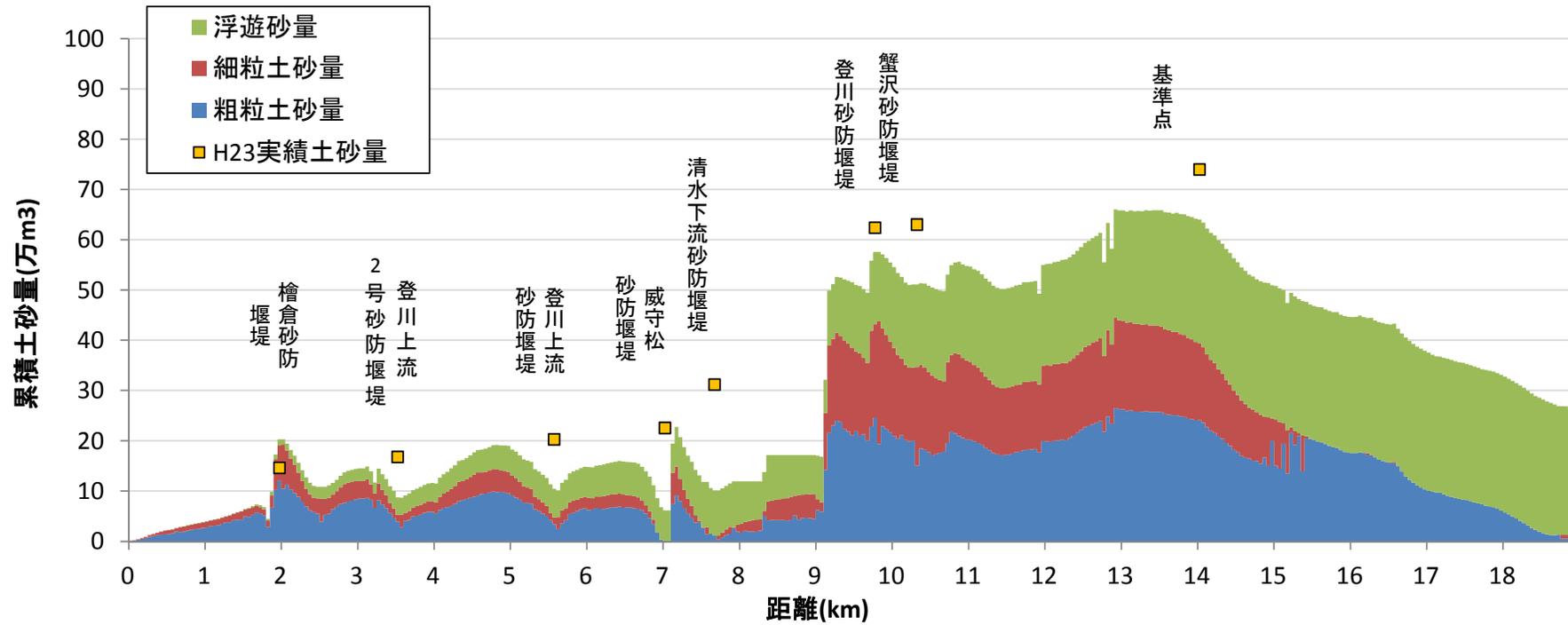


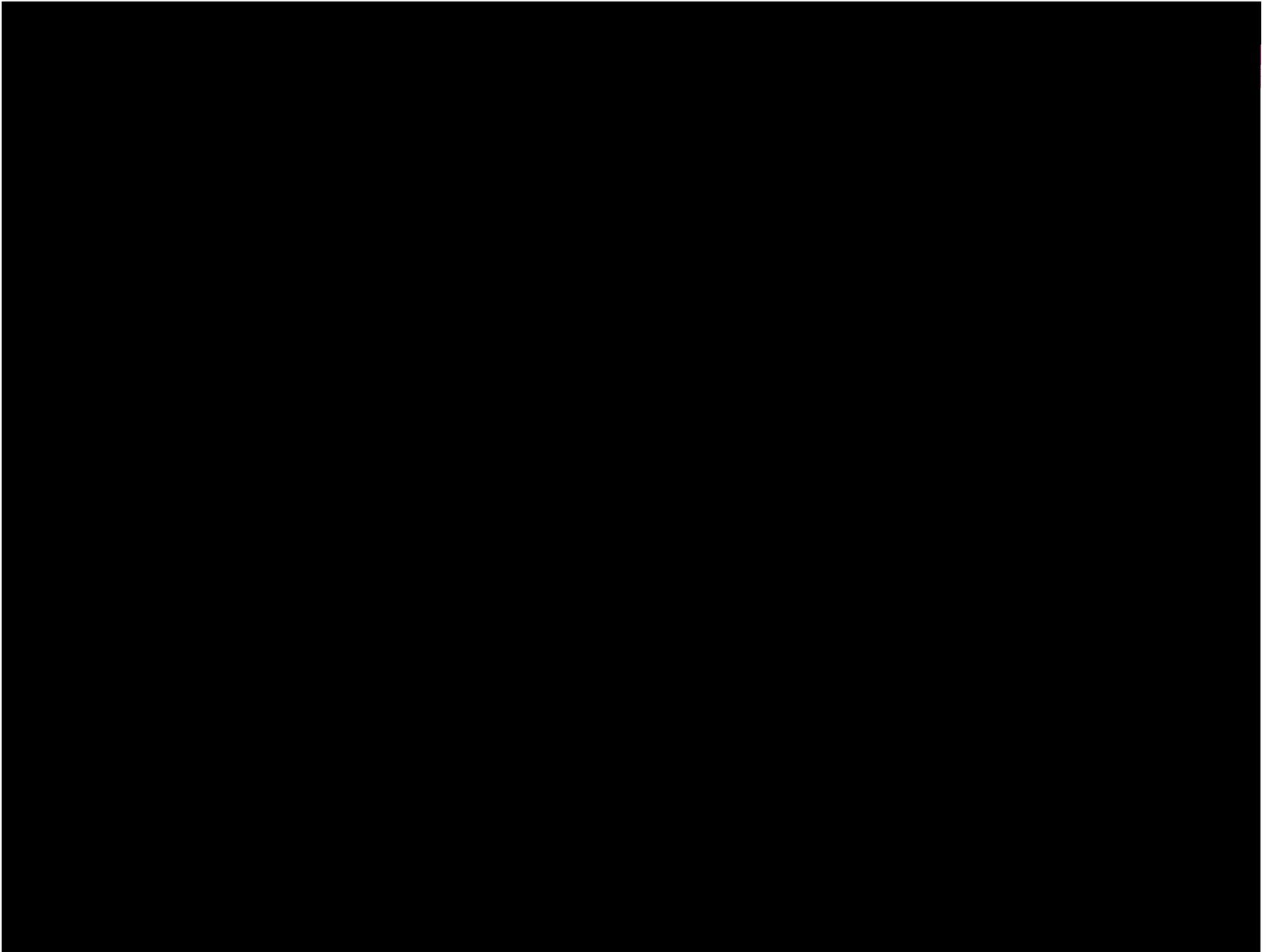
- 平成23年新潟福島豪雨
- 信濃川水系魚野川支川 登川流域
- 最大日雨量172mm、総雨量550mm (清水観測所)
- 登川流域内で発生した土砂量218万m³
- 魚野川に流出した土砂量68万m³
- 合流点付近の2箇所破堤

再現計算～計算条件～

計算条件		【単一粒径モデル】	【作成モデル】
流入ハイドロ		流出計算結果のハイドログラフ	
供給土砂	上流端	平衡給砂	
	支川	総量が実績と合うように供給	
粒径	河床	河床材料調査結果の平均粒径 (70.4mm)	河床材料調査結果
	上流端 支川		崩壊土砂調査結果
粒径階		1 (単一粒径)	10 (混合粒径)
粗度係数		0.08 (0-7.05km), 0.045 (7.1-18.85km)	
侵食(堆積)速度係数		7.0×10^{-4} (5.0×10^{-2})	

再現計算～計算結果～





参考文献

- 1) 高橋保(2004):土石流の機構と対策,近未来社
- 2) 芦田和夫・江頭進治(1985):長野県西部地震による御岳くずれの挙動,京都大学防災研究所年報, Vol.28, B-2, p.263-281
- 3) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘・蜂谷圭(2002):土石流の堆積侵食過程に関する実験と二層流モデルによる解析,水工学論文集, Vol.46, p.677-682
- 4) 村上ほか(2014):土石流から掃流砂及び浮遊砂までの連続的な数値計算の試み,平成26年砂防学会研究発表会概要集
- 5) 中谷加奈(2010):GUIを実装した汎用土石流数値シミュレーションシステムの開発と適用, 京都大学学位論文
- 6) Uchida, T., Nishiguchi, Y., Nakatani, K., Satofuka, Y., Yamakoshi, T., Okamoto, A. and Mizuyama, T(2013): New Numerical Simulation Procedure for Large-scale Debris Flows (Kanakano-LS), International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 6, No. 2, 2013, p.58-67
- 7) 西口幸希(2014):深層崩壊に起因する土石流の数値シミュレーション手法に関する研究, 京都大学学位論文
- 8) 鶴見ら(2014):高濃度化における土粒子の集団沈降に関する実験,平成26年砂防学会研究発表会概要集

再現計算～計算結果～

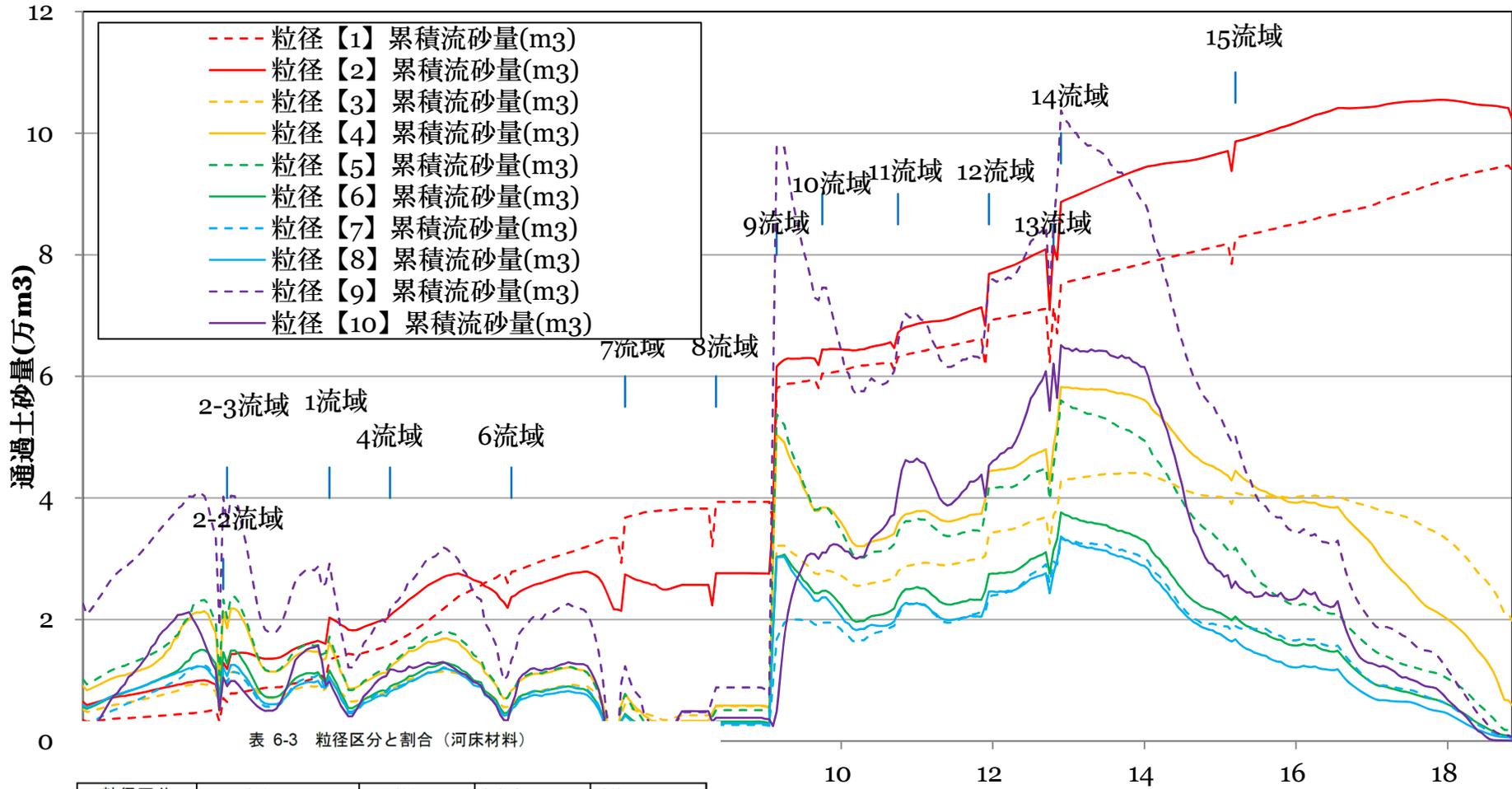


表 6-3 粒径区分と割合 (河床材料)

粒径区分	粒径(mm)	平均粒径(mm)	含有率(%)	計算ケース
粒径1	0 ~ 0.075	0.04	1.5	CASE2-10
粒径2	0.075 ~ 0.25	0.14	4.2	
粒径3	0.25 ~ 0.425	0.33	4.0	
粒径4	0.425 ~ 0.85	0.60	7.1	
粒径5	0.85 ~ 2	1.30	8.8	
粒径6	2 ~ 4.75	3.1	7.9	
粒径7	4.75 ~ 9.5	6.7	9.5	
粒径8	9.5 ~ 37.5	18.9	7.4	
粒径9	37.5 ~ 100	61.2	22.6	
粒径10	100 ~ 400	200.0	27.0	
平均粒径(mm)			70.4	CASE1

流れの基礎方程式

<流れ全体の連続式>

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = E_m B \quad (\text{式1})$$

<流れ全体の運動方程式>

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_T} B \quad (\text{式2})$$

ここに、 u は平均流速、 $H(=z_b+h)$ は水面標高、 z_b は河床標高、 h は水位、 A は流積、 Q は土石流の流量、 ρ は流れ全体の密度、 τ_b は河床せん断応力、 g は重力加速度、 B は河床幅、 E_m は全体の侵食(≥ 0)あるいは堆積(< 0)速度である。

土砂の連続式

$d_n \geq d_k \geq d_1$ の粒径の連続式

$$\frac{\partial((C_{fk} + C_{sk})A)}{\partial t} + \frac{\partial((C_{fk} + C_{sk})Q)}{\partial x} = B(E_k C_* + q_{sk} - q_{dk}) \quad (\text{式 12})$$

$d_T \geq d_k \geq d_{n+1}$ の粒径の連続式

$$\frac{\partial((C_{ck} + C_{sk})A)}{\partial t} + \frac{\partial((C_{ck} + C_{sk})Q)}{\partial x} = B(E_k C_* + q_{sk} - q_{dk}) \quad (\text{式 13})$$

ただし、土石流領域では、 $C_{sk}=0$ 、 $q_{sk}=q_{dk}=0$ 、掃流砂・浮遊砂領域では、式 12 の $C_{fk}=0$ とし、

$d_n \geq d_k \geq d_1$ の土砂濃度を C_{ck} として扱うため式 12 の C_{fk} を C_{ck} に置き換える。

侵食・堆積速度式

【土石流・掃流状集合流動】

$C_\infty \geq C_L$ (侵食のとき)

$$E_m = \delta_e \frac{C_\infty - C_L}{C_* - C_\infty} \frac{q}{d_{mbed}} \quad (\text{式20})$$

$$E_k = E_m f_{bk} \quad (\text{式21})$$

$C_\infty < C_L$ (堆積のとき)

$$E_m = \delta_d \frac{C_\infty - C_L}{C_*} \frac{q}{d_{mbed}} \quad (\text{式22})$$

$$E_k = E_m \frac{C_k}{C_L} \quad (\text{式23})$$

δ_e : 侵食速度係数、 δ_d : 堆積速度係数、 q : 流れ全体の単位幅流量、 d_{mbed} : 河床材料の平均粒径
 C_∞ : 平衡濃度 C_L : 粗粒土砂濃度 (層流運動した細粒土砂も含む) C_k : 粗粒土砂の粒径 k の土砂濃度

$$d_{mbed} = \frac{d_1 f_{b1} + d_2 f_{b2} + \cdots + d_{k_e-1} f_{bk_e-1} + d_{k_e} f_{bk_e}}{f_{b1} + f_{b2} + \cdots + f_{bk_e-1} + f_{bk_e}} \quad (\text{式24})$$

侵食・堆積速度式

【掃流砂】

$$C_{\infty k} \cdot f_{bk} \geq C_k \quad (\text{侵食のとき})$$

$$E_k = \delta_e \frac{C_{\infty k} \cdot f_{bk} - C_k}{C_* \cdot f_{bk} - C_{\infty k} \cdot f_{bk}} \frac{q}{d_k} f_{bk} \quad (\text{式 25})$$

$$C_{\infty k} \cdot f_{bk} < C_k \quad (\text{堆積のとき})$$

$$E_k = \delta_d \frac{C_{\infty k} \cdot \frac{C_k}{C_L} - C_k}{C_* \cdot \frac{C_k}{C_L}} \frac{q}{d_k} \frac{C_k}{C_L} \quad (\text{式 26})$$

$$\text{なお、} E_m = \sum E_k \quad (\text{式 27})$$

各土砂移動形態の判定は、相対水深(h/dL)と溪床勾配から計算される土砂濃度が連続的に接続するように各移動領域を区分し、土砂濃度を指標に閾値を設定する。また、全体の侵食・堆積速度 E_m 、粒径 dk の侵食・堆積速度 E_k は、土砂濃度と平衡土砂濃度の関係から、以下のように表される。なお、全領域において、粒径別の侵食速度は、各粒径の河床材料比、堆積速度は、各粒径の流動中の濃度比で割り振ることとする。

平衡濃度式

C_∞ は平衡土砂濃度で、次式で示される。

【土石流の場合： $\tan \theta \geq \tan \phi$ 】

$$C_\infty = 0.9C_* \quad (\text{式 28})$$

【土石流の場合： $\tan \phi > \tan \theta > \frac{(\sigma - \rho_m) \tan \phi}{5.7\rho_m + \sigma}$ 】

$$C_\infty = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (\text{式 29})$$

【掃流状集合流動の場合： $\frac{(\sigma - \rho_m) \tan \phi}{5.7\rho_m + \sigma} \geq \tan \theta > 0.03$ 】

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)} \right\}^2 \quad (\text{式 30})$$

【掃流砂・浮遊砂の場合： $\tan \theta \leq 0.03$ 】

$$C_{\infty_k} = \frac{(1 + 5 \tan \theta) \tan \theta}{\frac{\sigma}{\rho} - 1} \left(1 - \alpha_c^2 \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \alpha_c \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right) \quad (\text{式 31})$$