

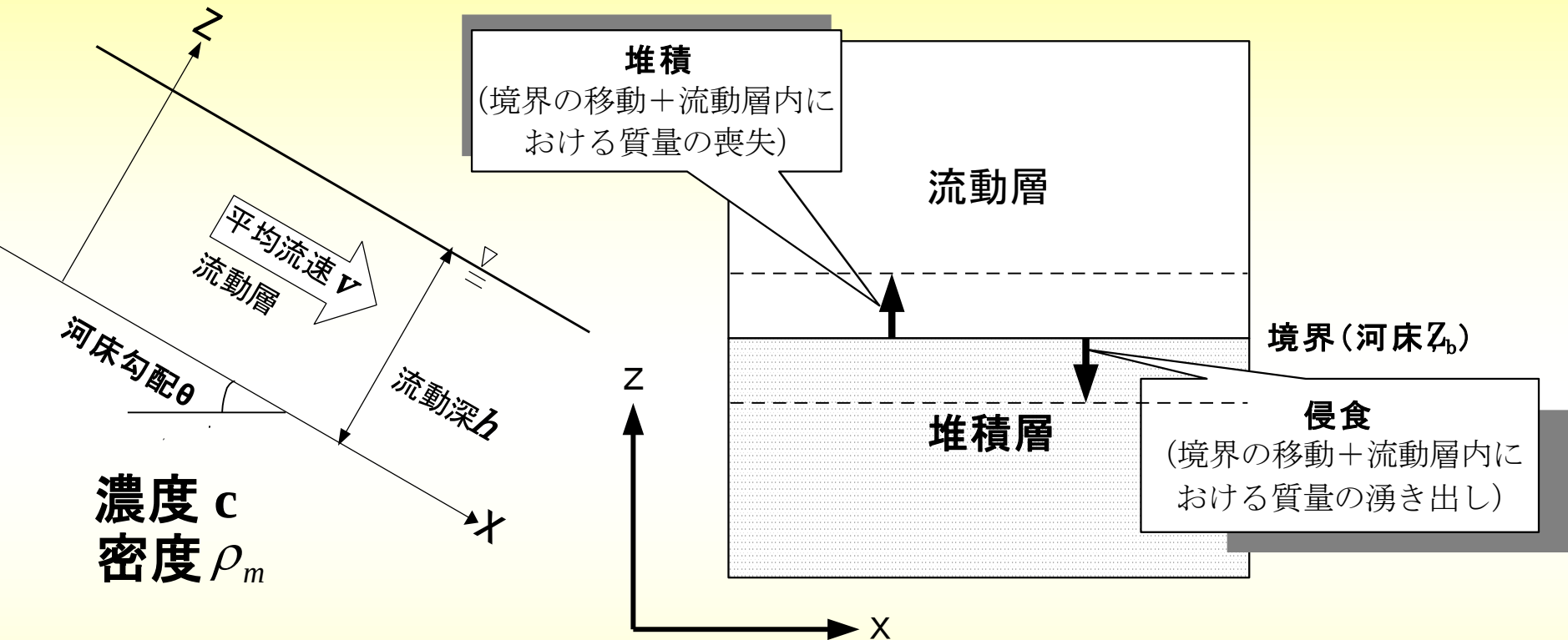
土石流のシミュレーションと 災害の防止軽減

高濱淳一郎

京都府立大学

1. 土石流シミュレーションの基礎式の特徴
2. 土石流から掃流状集合流動へ遷移する流れの解析法
3. 土石流の堆積侵食に関する水路実験とシミュレーションとの比較
4. 二層流モデルによる二次元氾濫シミュレーション
5. 流路急変部における土石流の挙動に関する水路実験と侵食堆積速度の評価式の改良
6. 現地における土石流の発生事例と再現計算結果
7. 天然ダムの侵食

1. 土石流シミュレーションの基礎式の特徴



土石流の流下に伴う侵食・堆積と土石流流動層の質量変化

土石流の支配方程式

体積保存則 $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial x} = \underline{s_T}$

砂礫部分の体積保存則 $\frac{\partial(\bar{c}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma' \bar{c}vh)}{\partial x} = \underline{c_* s_T}$

河床位方程式 $= -\frac{\partial z_b}{\partial t} / \cos \theta \quad m_T = \rho_{m*} \left(-\frac{\partial z_b}{\partial t} / \cos \theta \right)$

運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma'' \bar{\rho}_m v h) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta \bar{\rho}_m v^2 h) = \bar{\rho}_m g h \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial x} - \underline{\tau_b}$$

開水路シミュレーションの基礎式との違い

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2 h)}{\partial x} \right\} + \boxed{(m_T - \rho_m s_T) v} = \rho_m g h \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial x} - \tau_b$$

土石流シミュレーションに用いられる基礎式の特徴

連続式

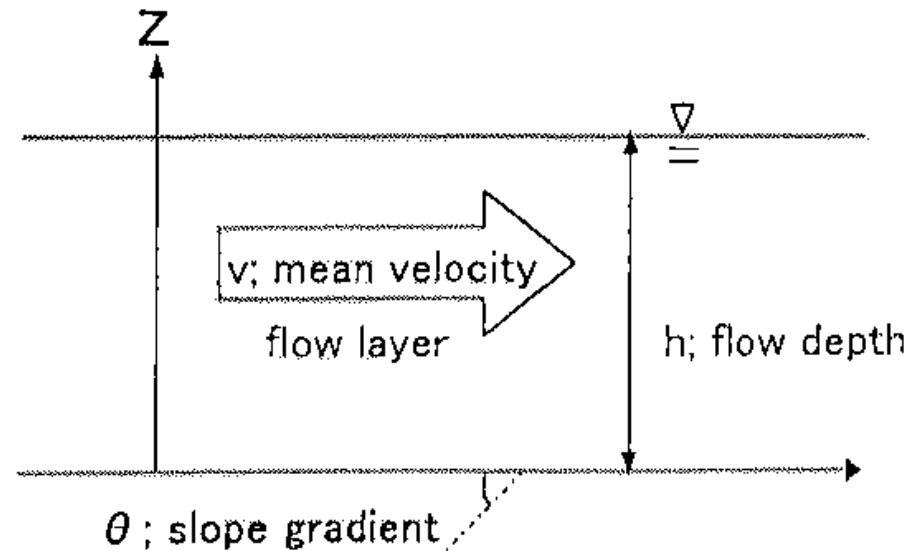
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial x} = \underline{s_T}$$

$$\frac{\partial(\bar{c}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma' \bar{c}vh)}{\partial x} = \underline{c_* s_T}$$

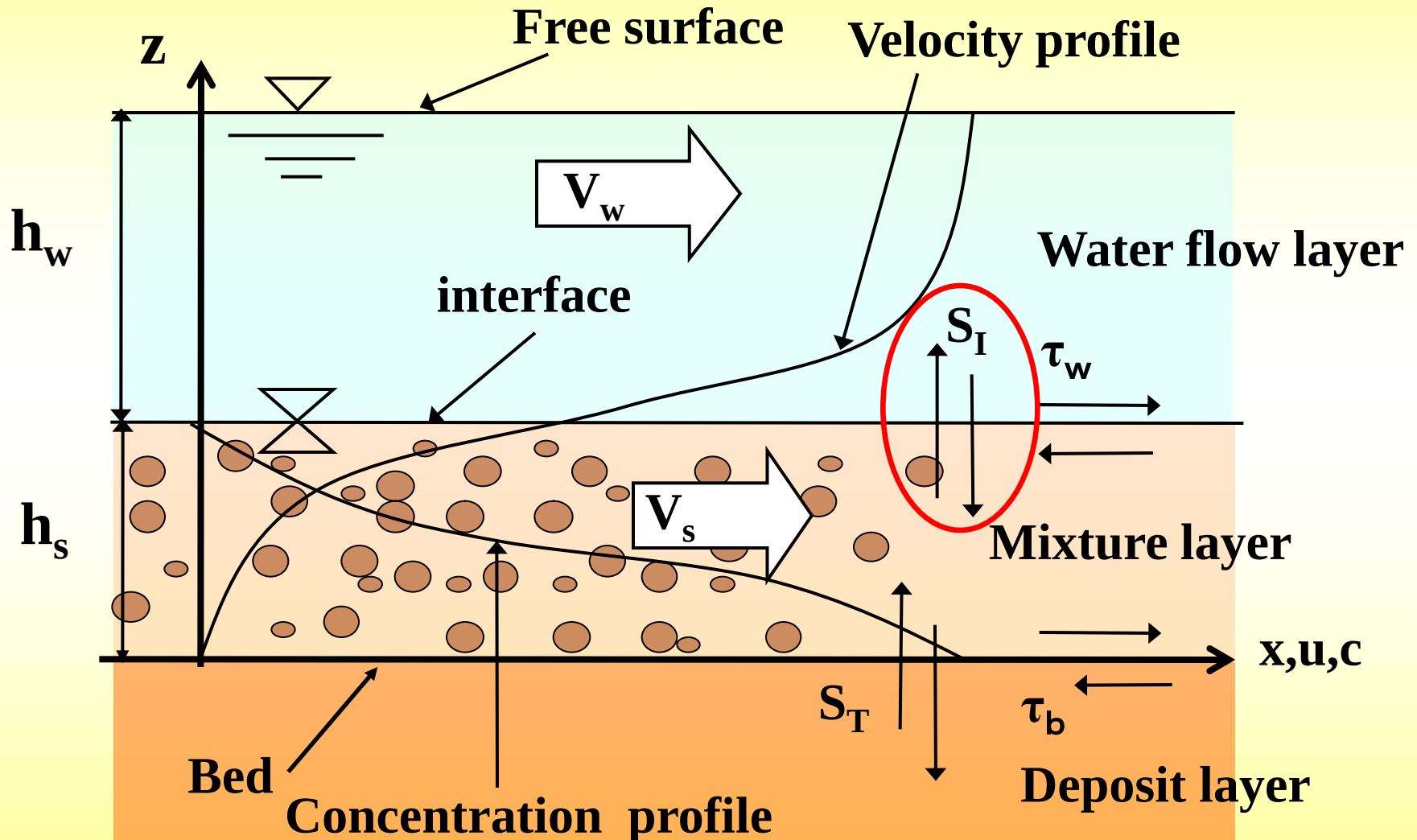
s_T : 侵食速度

γ' : 流速と濃度の鉛直分布に起因する形状係数

$$\gamma' = \frac{\int_0^h cu \, dz}{cvh}$$



2. 土石流から掃流状集合流動へ遷移する流れの解析法



二層流モデルの模式図

二層流モデルの基礎式

連続式

(水流層)

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial (v_w h_w)}{\partial x} = S_I$$

(砂礫層)

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial (v_s h_s)}{\partial x} = S_T - S_I$$

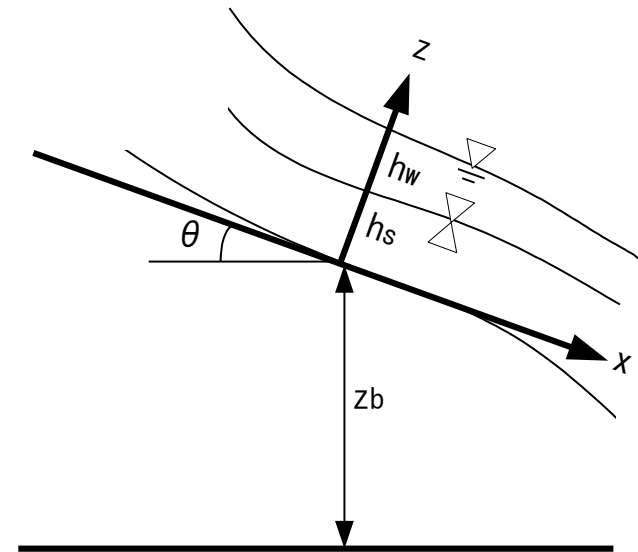
(砂礫の連続式)

$$\frac{\partial (c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma_s v_s h_s)}{\partial x} = c_* S_T$$

(河床位方程式)

$$\partial z_b / \partial t = -S_T / \cos \theta$$

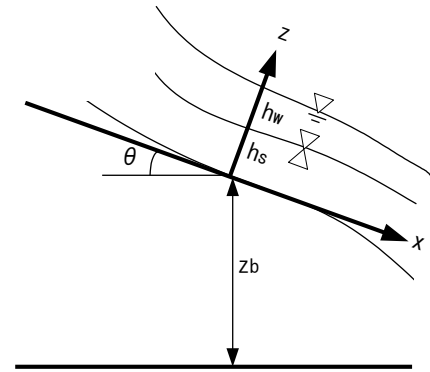
$$\gamma = \int_0^{h_s} c u dz / c_s v_s h_s$$



支配方程式の座標系

二層流モデルの基礎式

運動方程式



(水流層)

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w \beta_w v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w S_I u_I$$

$$= \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - p_I \frac{\partial h_s}{\partial x} - \tau_w$$

(砂礫移動層)

$$\frac{\partial(\rho_s \gamma v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \beta_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w S_I u_I$$

$$= \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + p_I \frac{\partial h_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b$$

$$\gamma = \frac{\int_0^{h_s} \rho_s u dz}{\rho_s v_s h_s}$$

$$\beta_s = \int_0^{h_s} \rho_s u^2 dz / \rho_s v_s^2 h_s$$

$$\beta_w = \int_0^{h_w} u^2 dz / v_w^2 h_w$$

抵抗則と侵食堆積速度式

支配方程式を閉じるために江頭らの構成則と侵食堆積速度式を用いる.

interfaceのせん断応力を求めるための流速分布式(江頭ら)

$$\frac{u(z)}{u_{*w}} = \frac{u_I}{u_{*w}} + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - h_s + \eta_0}{\eta_0} \right)$$
$$\eta_0 = \sqrt{k_f} \left(\frac{1 - c_s}{c_s} \right)^{1/3} d$$

砂礫移動層の抵抗則

せん断応力 $\tau = \tau_y + \tau_d$

$$\tau_y = p_s \tan \phi_s$$

$$\tau_d = \rho_w f(c) d^2 (\partial u / \partial z)^2$$

τ_y 降伏応力

τ_d 粒子の非弾性衝突と間隙水の乱れによるせん断応力

圧力 $p = p_w + p_s + p_d$

p_w 間隙水圧（静水圧）.

p_s 粒子骨格による静的な圧力

p_d 粒子衝突の際に保存されるエネルギーに対応する圧力

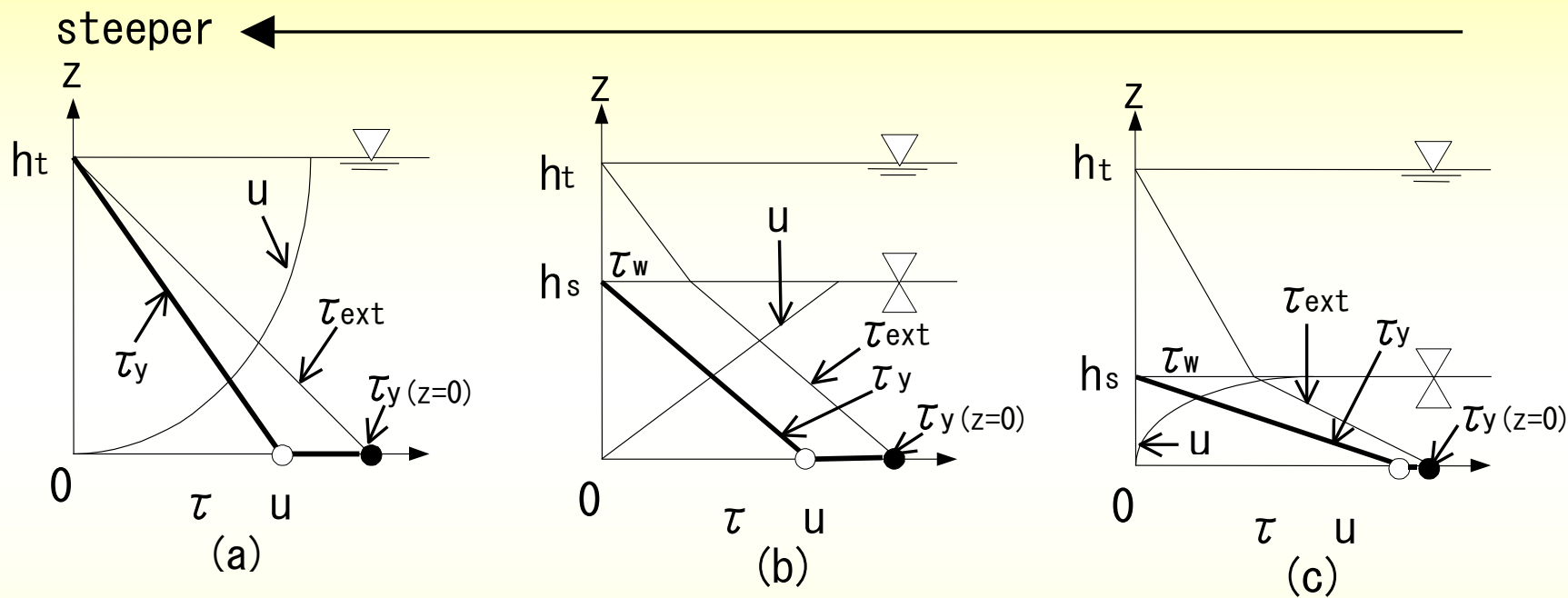
導入した近似と仮定

(1) 砂礫移動層の濃度は一様とし、全層濃度が $c_*/2$ 未満のときは二層流として取り扱い、その時の砂礫層濃度は $c_s = c_*/2$ なる。

(2) 全層濃度が $c_*/2$ 以上のときは、全層を砂礫層とする。

(3) 粒子骨格による静的な圧力と動的な圧力との比は江頭の構成則に導入された関数を用いて評価する

$$p_s / (p_s + p_d) = (c/c_*)^{1/5}$$



せん断応力と流速の鉛直分布

interfaceと河床面におけるせん断応力

河床面せん断応力

$$\tau_b = (\sigma - \rho_w) c_s g h_s \left(\frac{c_s}{c_*} \right)^{1/5} \cos \theta \tan \phi_s + \rho_w f_s |v_s| v_s$$

Interfaceにおけるせん断応力

$$\tau_w = \rho_w f_w |v_w - u_I| (v_w - u_I)$$

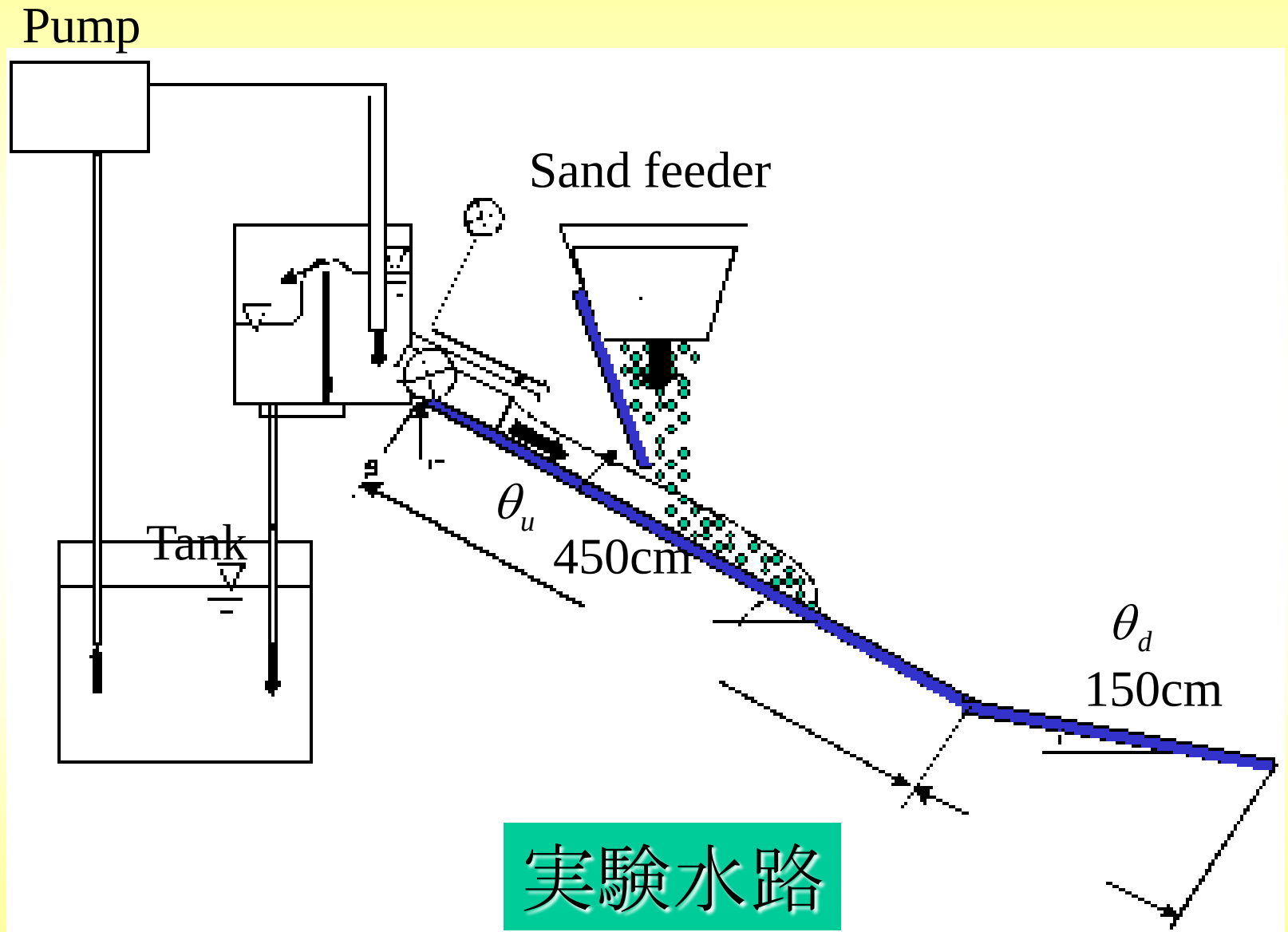
二層流における侵食速度式
(江頭らの侵食速度式を適用.)

$$s_T = v_t \tan(\theta - \theta_e)$$

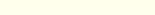
$$v_t = (v_w h_w + v_s h_s) / h_t$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma / \rho_w - 1) c_t}{(\sigma / \rho_w - 1) c_t + 1} \tan \phi_s$$

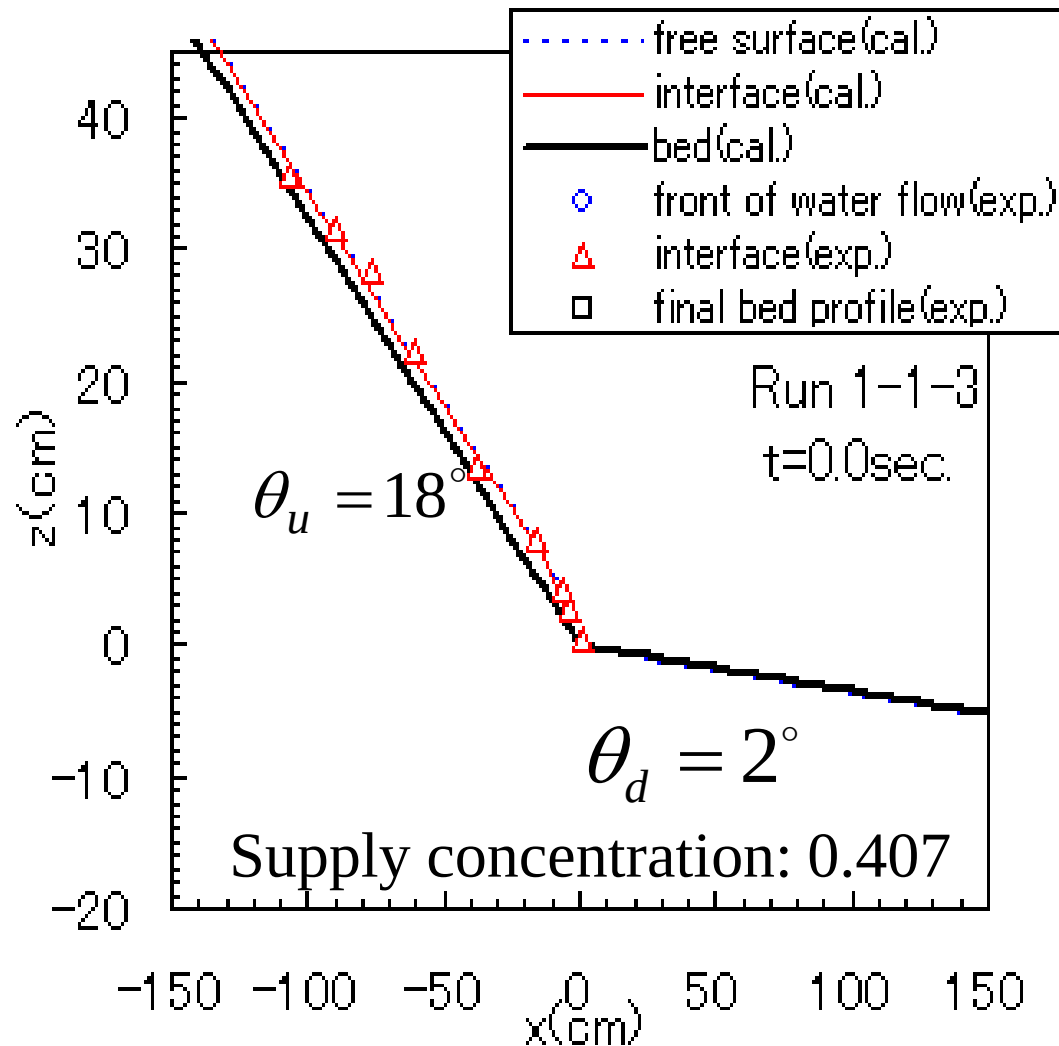
3. 土石流の堆積侵食に関する水路実験とシミュレーションとの比較



実験条件

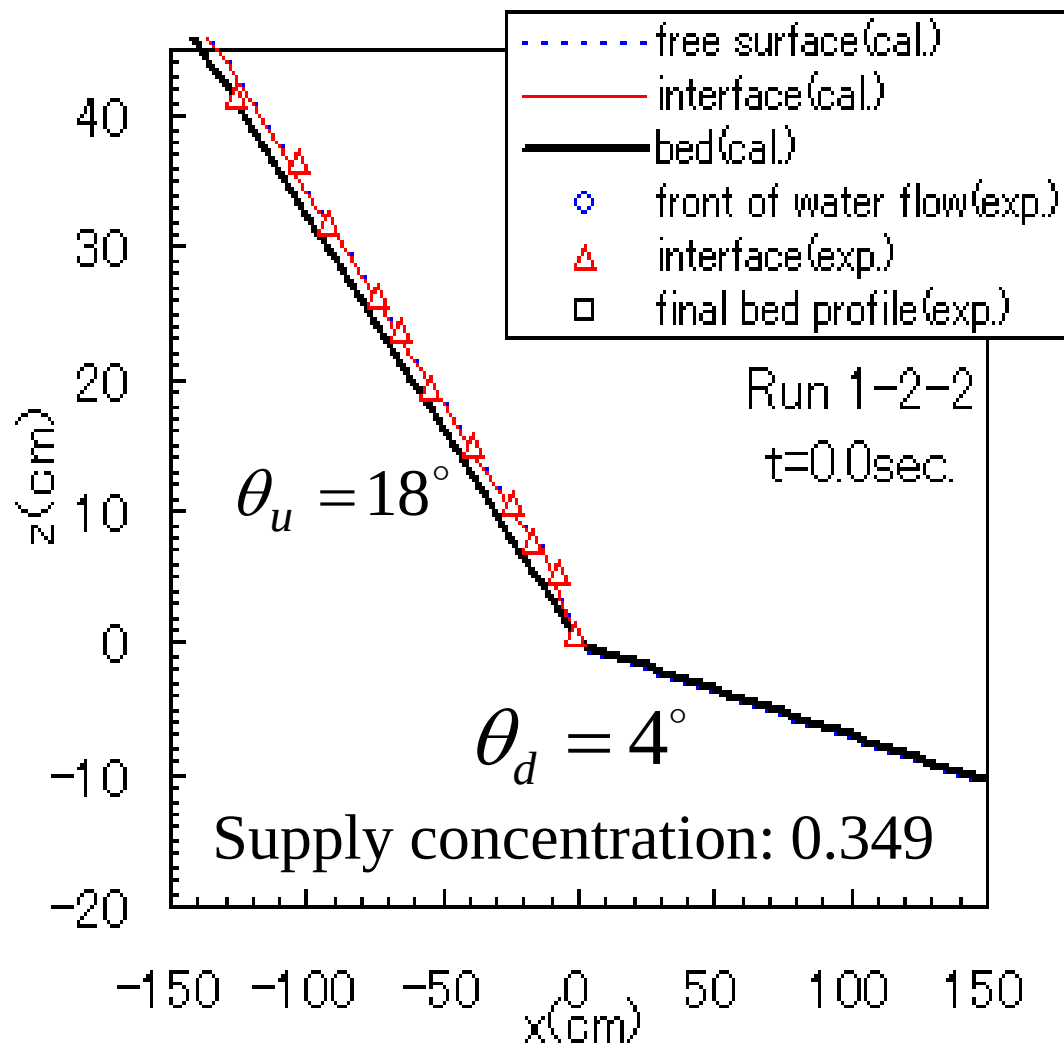
Run No.	Upstream	Downstream	Inflow rate at the upper reach		Supply concentration	Supply duration time
	bed condition	bed condition	gradient	sediment (cm ² /s) water (cm ² /s)		
1-1-1	Rigid	Rigid	2°	39.2 89.7	0.304 	5.3
1-1-2	Rigid	Rigid	2°	46.8 88.4	0.346 	6.02
1-1-3	Rigid	Rigid	2°	55.5 80.7	0.407 	6.15
1-1-4	Rigid	Rigid	2°	55.5 81.6	0.405 	7.11
1-2-1	Rigid	Rigid	4°	39.2 88.8	0.306 	5.9
1-2-2	Rigid	Rigid	4°	44.4 82.9	0.349 	10.88
1-2-3	Rigid	Rigid	4°	55.5 84.2	0.397 	11.41
1-2-4	Rigid	Rigid	4°	55.5 84.6	0.396 	5.81
1-3-1	Rigid	Rigid	8°	35.6 82.3	0.302 	10.86
1-3-2	Rigid	Rigid	8°	44.4 82.4	0.350 	5.68
1-3-3	Rigid	Rigid	8°	55.5 81.7	0.405 	6.68
2-1-1	Rigid	Movable	2°	37.7 88.1	0.300 	10.49
2-1-2	Rigid	Movable	4°	51.5 76.2	0.403 	10.42
2-2-1	Rigid	Movable	2°	37 85.6	0.302 	10.85
2-2-2	Rigid	Movable	4°	54.6 84.7	0.392 	11.24
3-1-1	Movable	Movable	2°	40.6 93.3	0.303 	10.26
3-1-2	Movable	Movable	4°	38.6 90.2	0.300 	10.71

土石流の堆積過程に関する水路実験と数値計算結果との比較



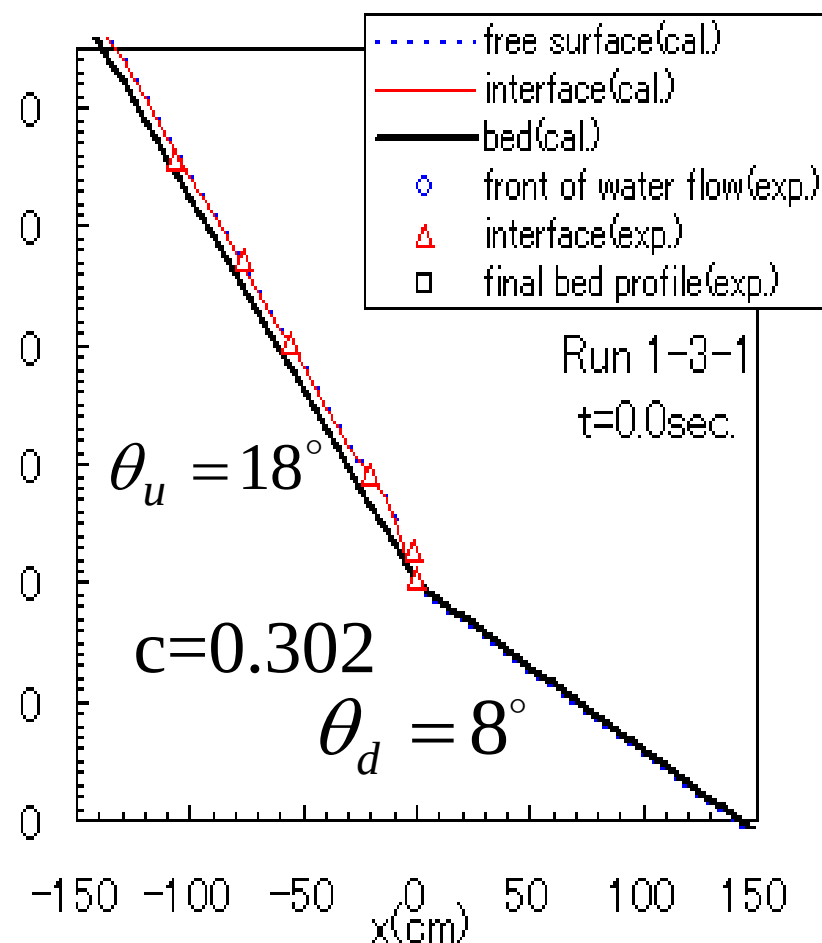
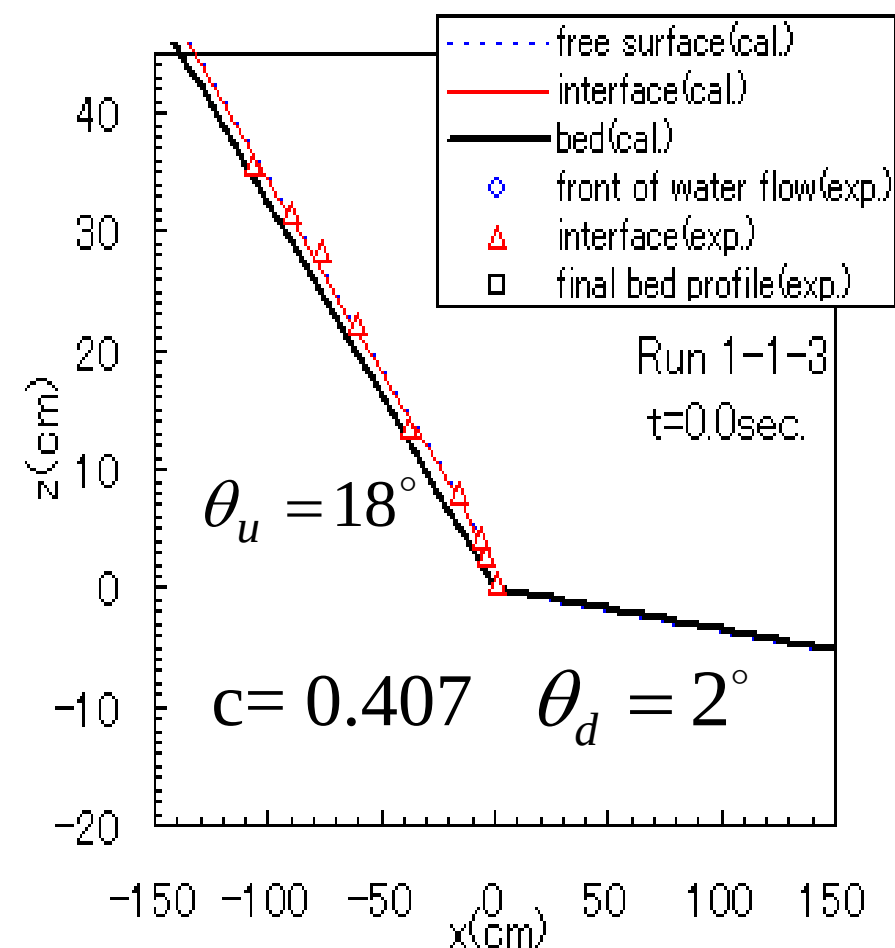
堆積が生じるとともに水流層が出現し、流れの先頭部を形成する。

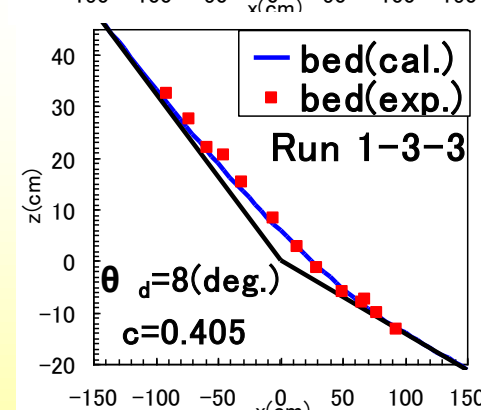
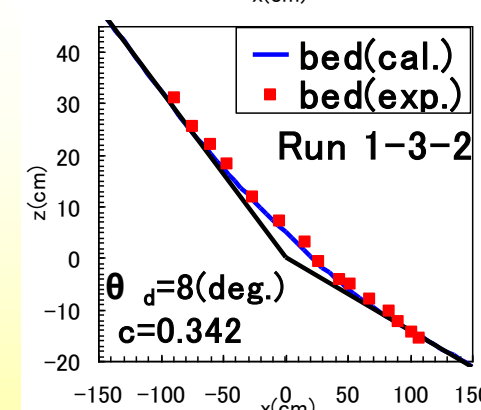
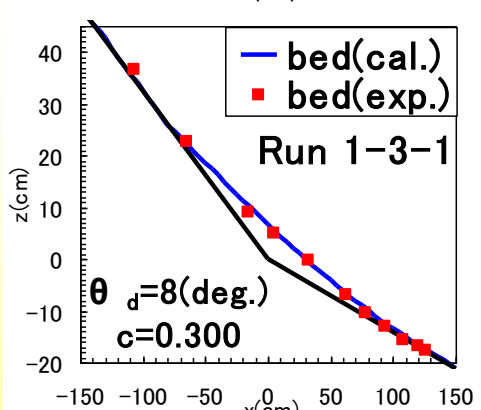
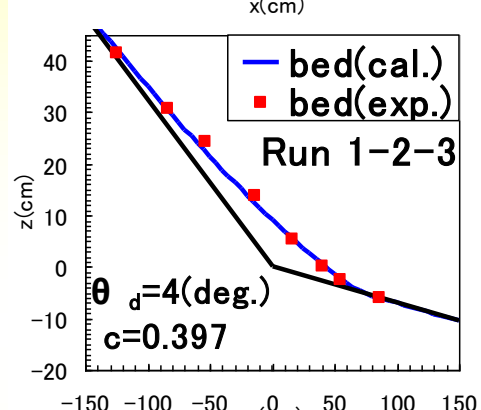
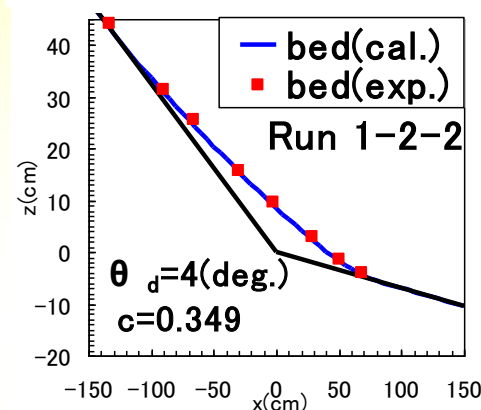
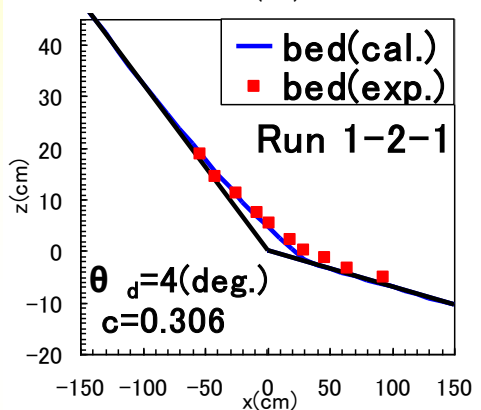
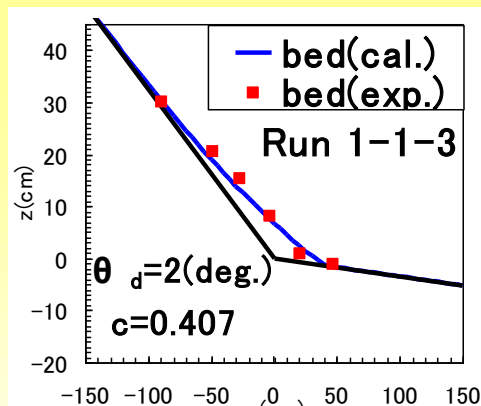
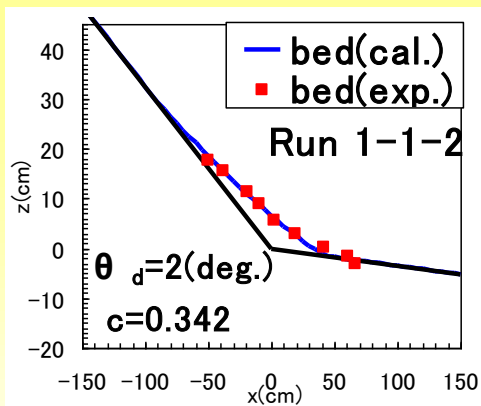
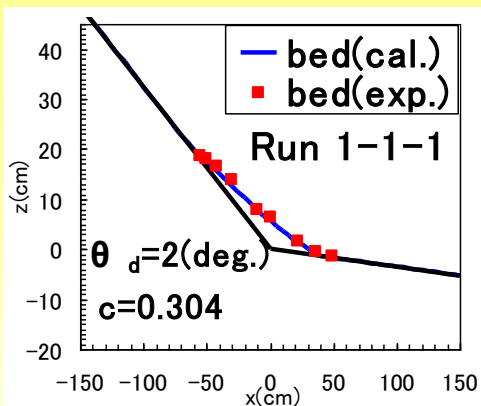
土石流の堆積過程に関する実験と数値計算結果との比較



下流側勾配 4 度
供給濃度約 35 %

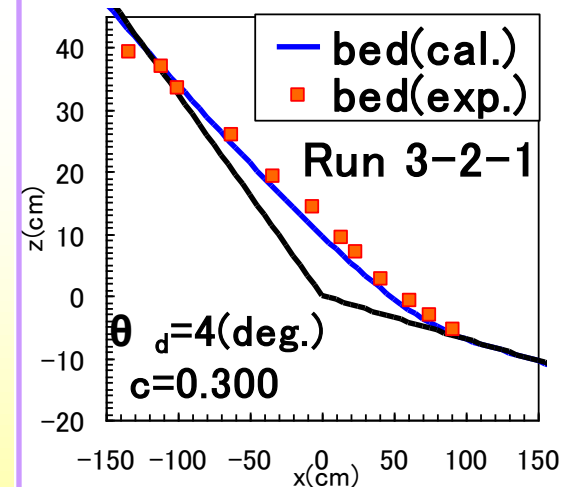
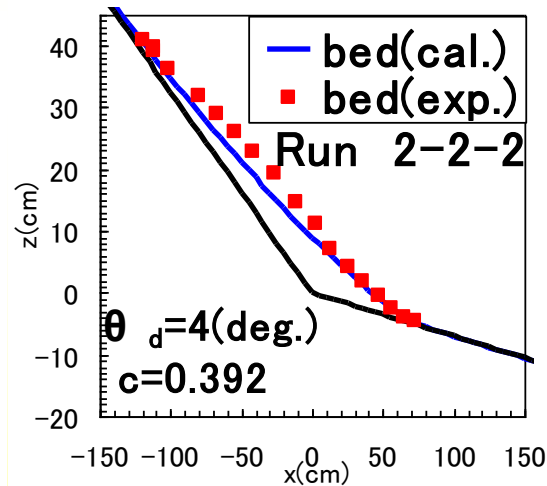
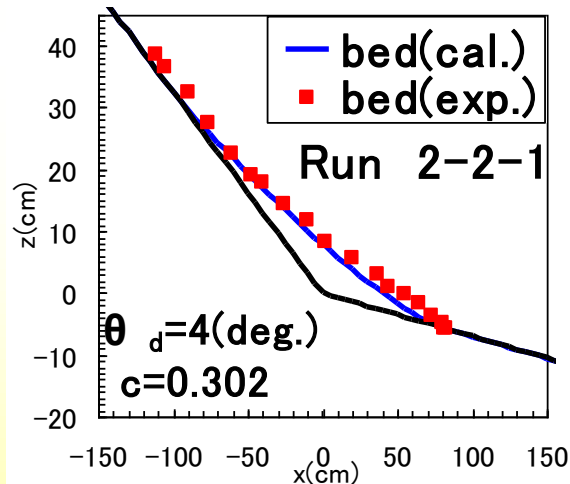
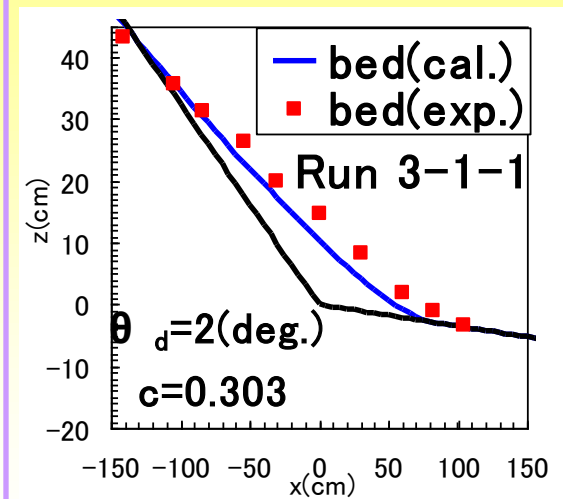
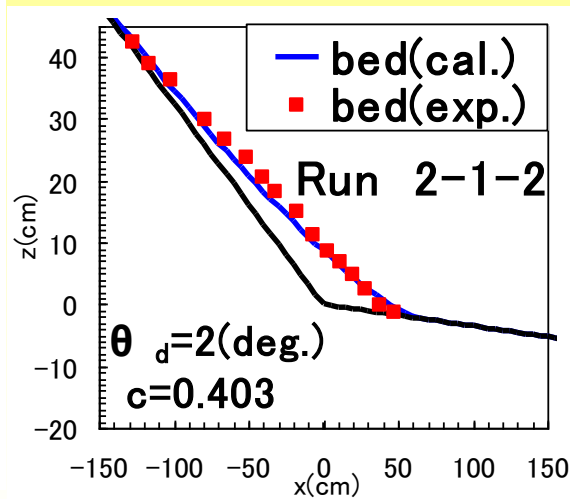
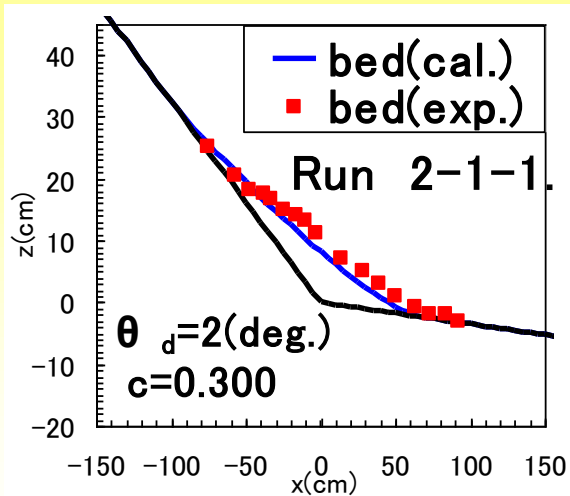
土石流の堆積過程における水路実験と数値計算結果との比較





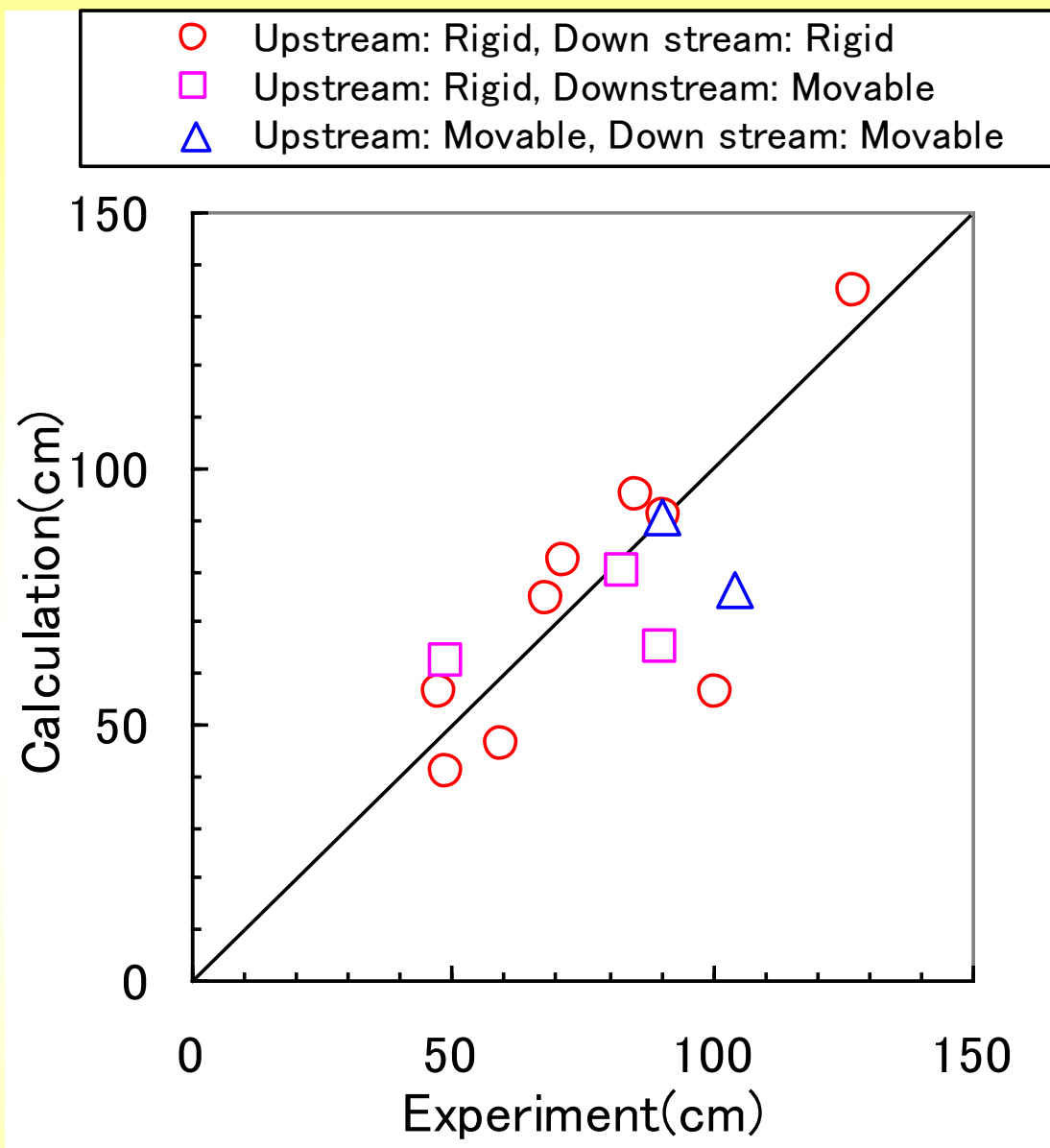
固定床上における土石流の最終堆積形状に関する実験と計算結果との比較

上流側：固定床 下流側：移動床

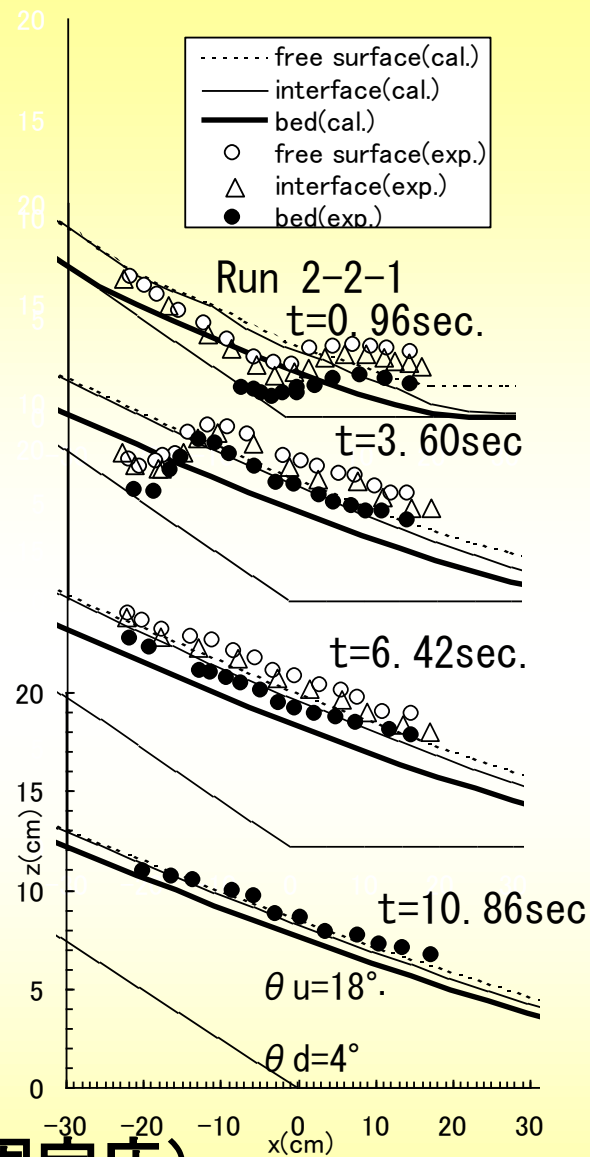
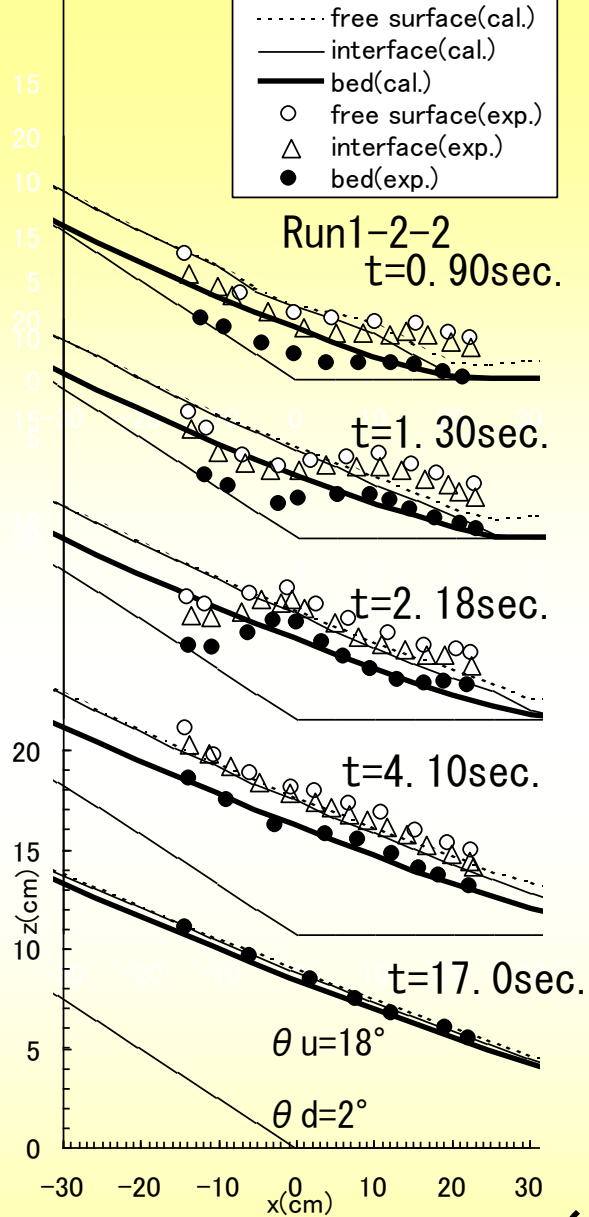


全区間移動床

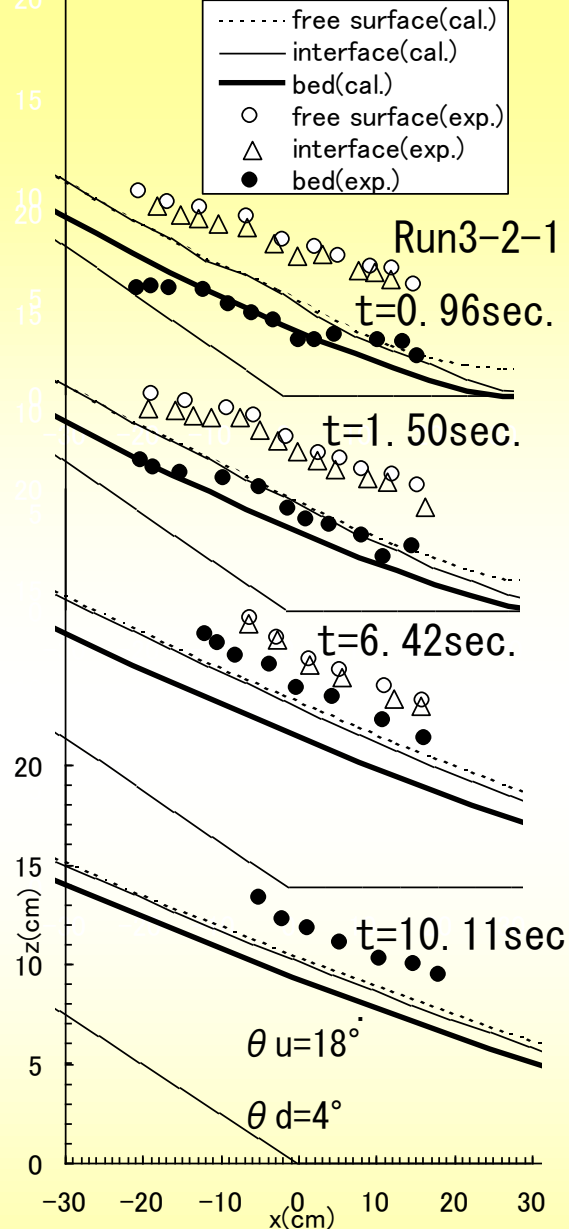
土石流の最終堆積形状に関する実験と計算結果との比較



土石流の到達距離に関する実験値と数値計算結果との比較.



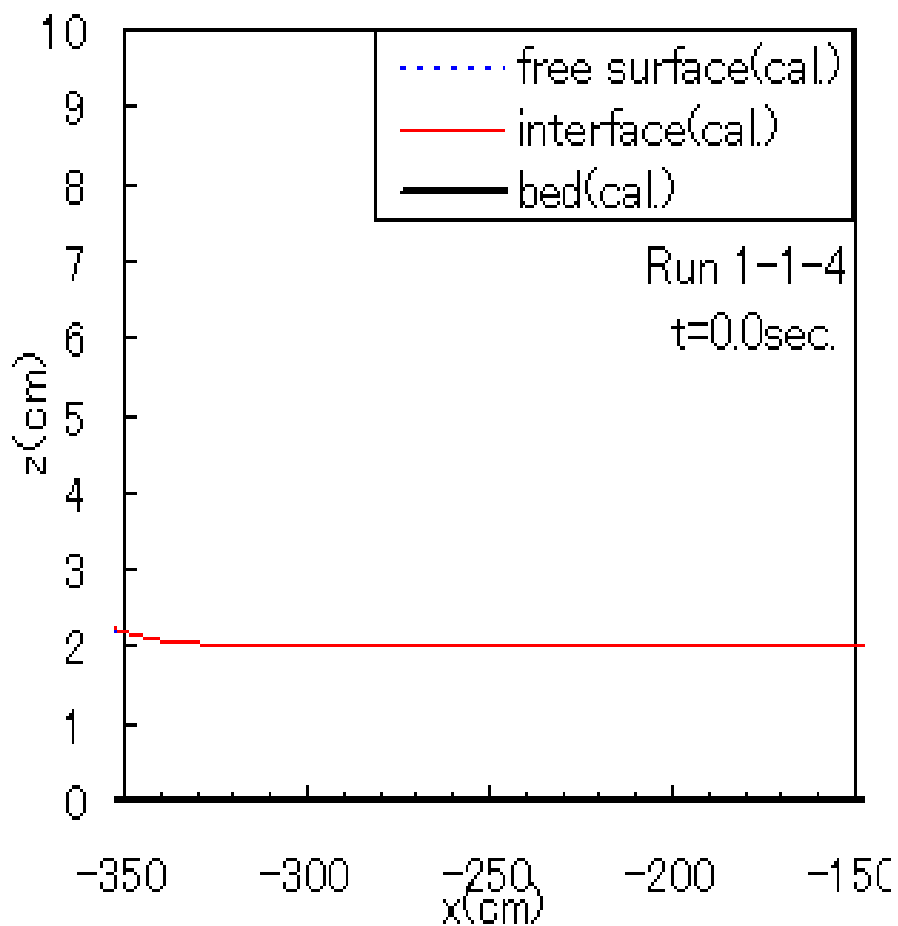
(固定床)



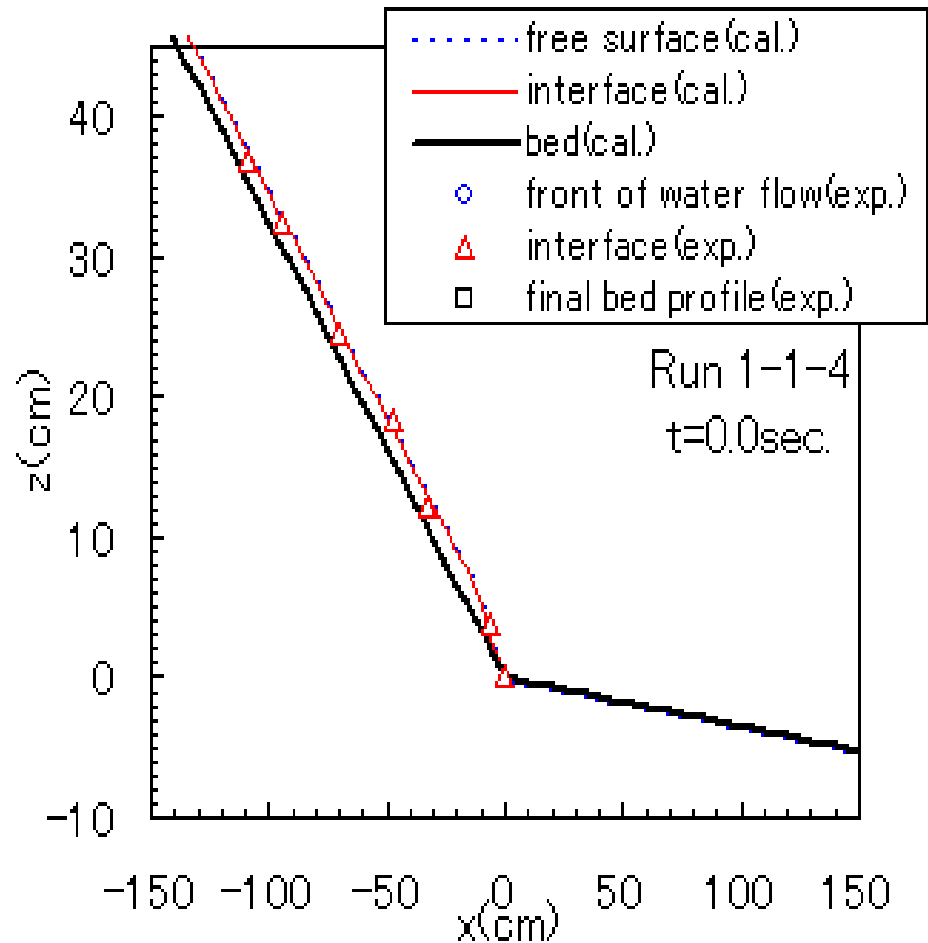
移動床

勾配急減点近傍の詳細図

土石流の再侵食過程に関する実験結果と計算結果との比較



(a) 上流側区間



(b) 下流側区間

土石流の支配方程式と分布補正係数

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial(v_w h_w)}{\partial x} = s_I$$

$$\frac{\partial(c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma c_s v_s h_s)}{\partial x} = c_* s_T$$

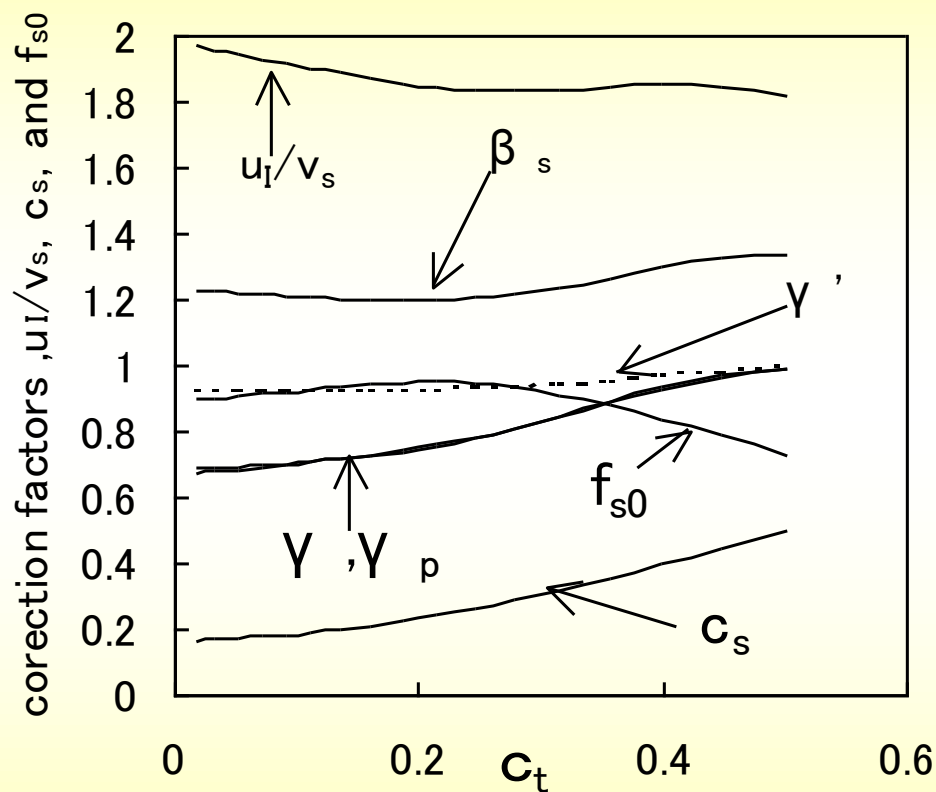
$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial(v_s h_s)}{\partial x} = s_T - s_I$$

$$\partial z_b / \partial t = -s_T / \cos \theta$$

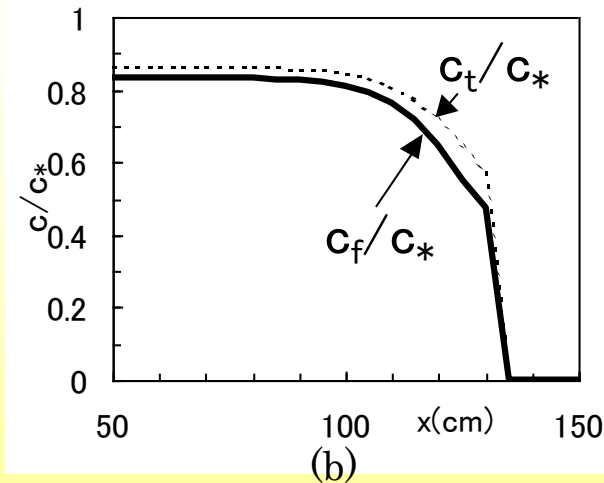
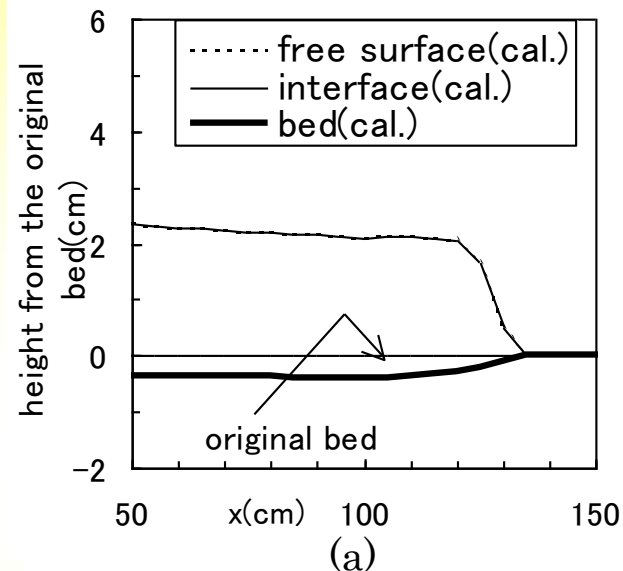
$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w \beta_w v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w s_I u_I = \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - p_I \frac{\partial h_s}{\partial x} - \tau_w$$

$$\frac{\partial(\rho_s \gamma v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \beta_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w s_I u_I = \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + p_I \frac{\partial h_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b$$

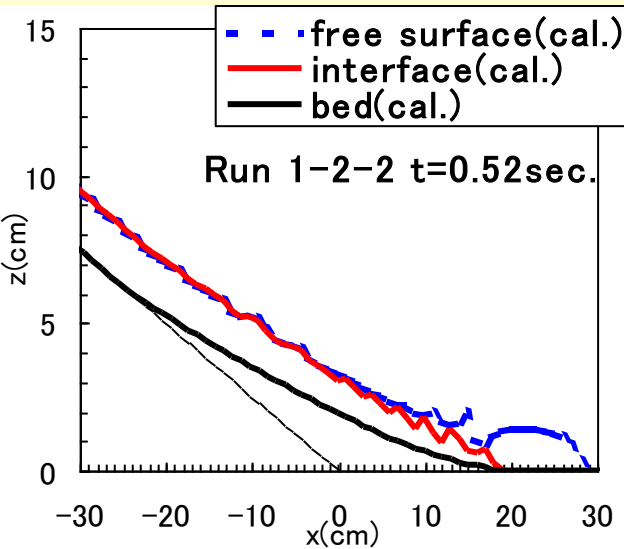
平衡解に基づく分布補正係数の算出と数値計算への導入



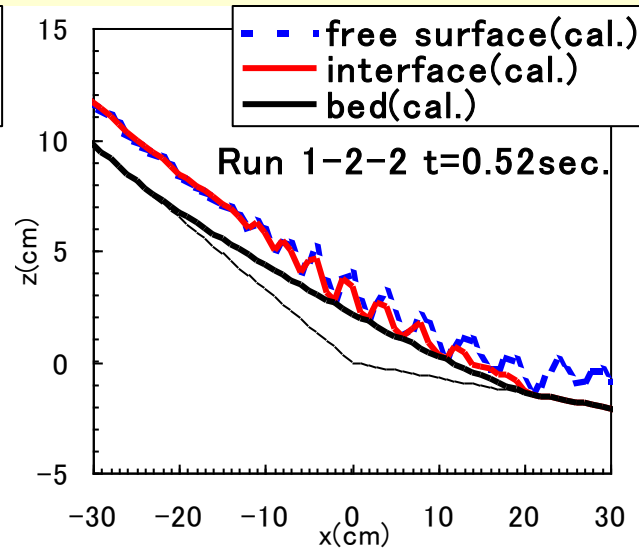
全層濃度と分布補正係数との関係



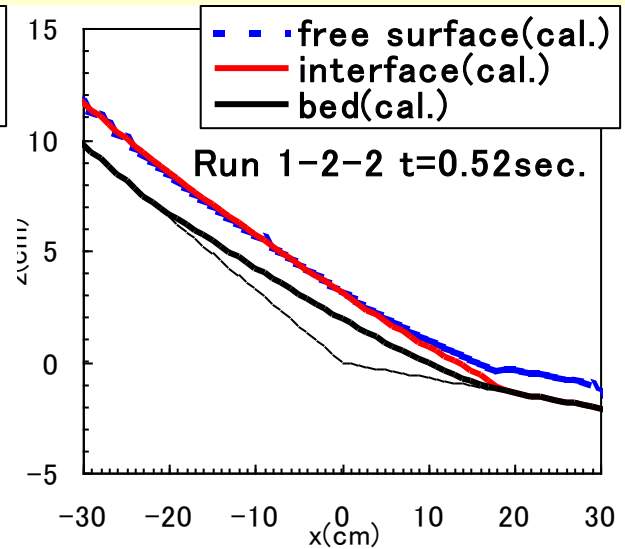
MacCormack Scheme による数値計算



Leap-Frog

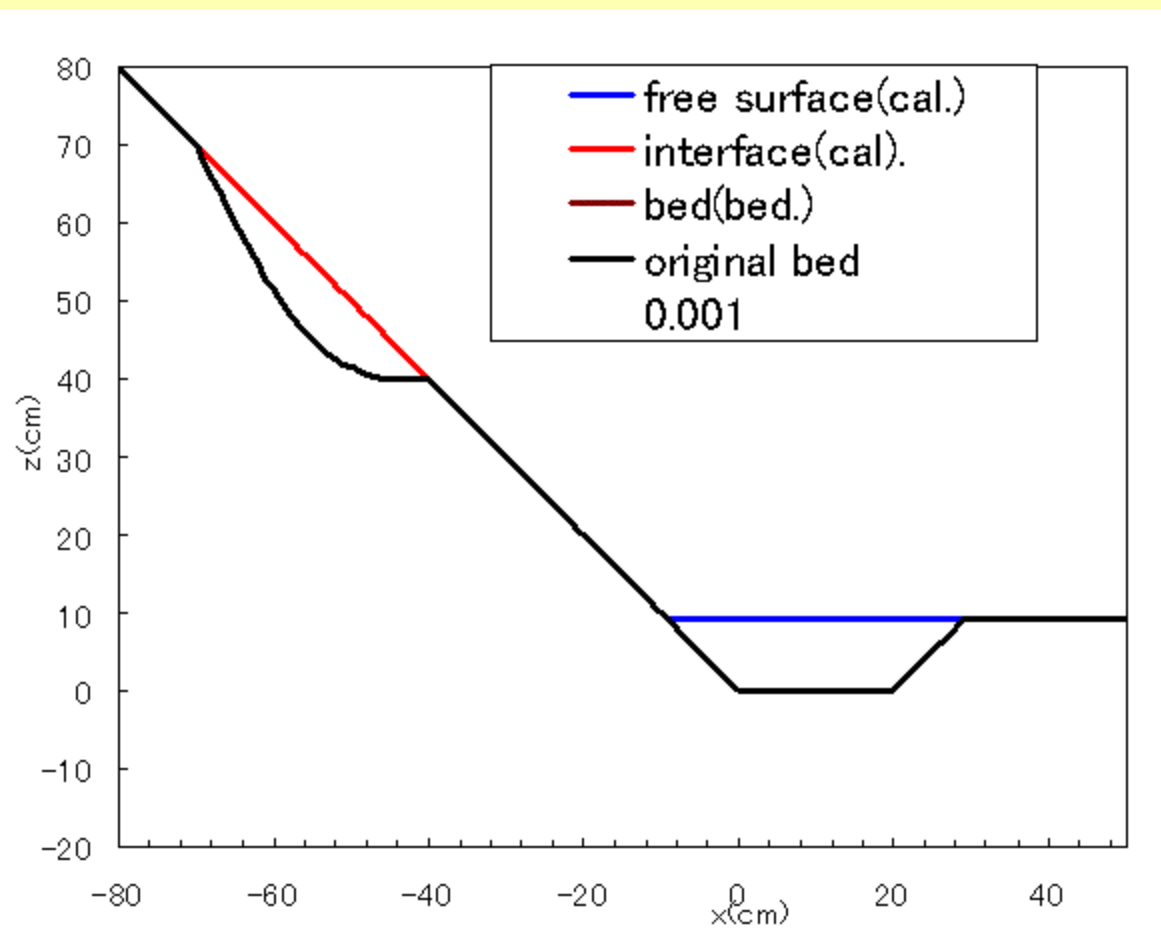


MacCormack

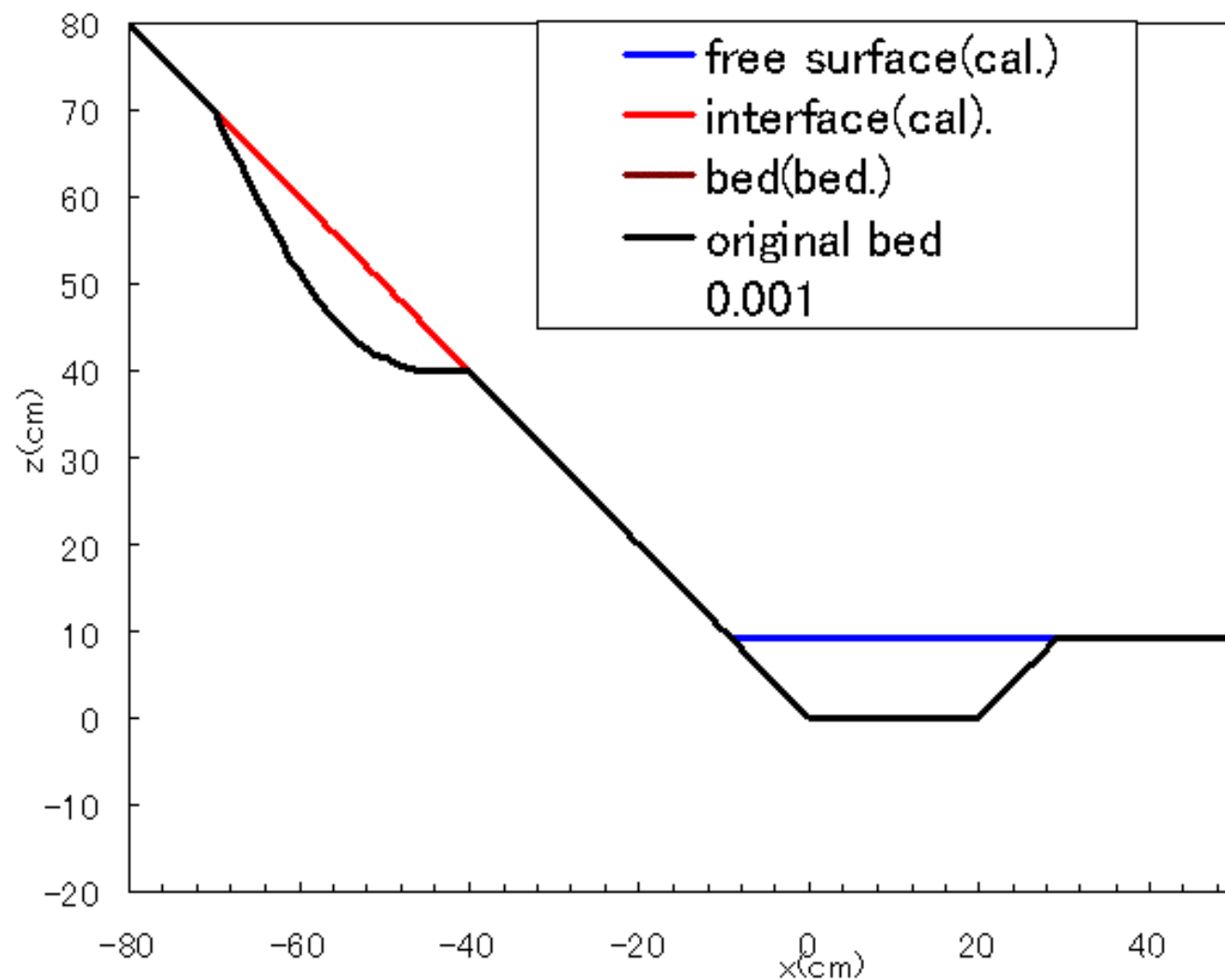


TVD-MacCormack

$$\Delta x = 1 \text{ cm}$$

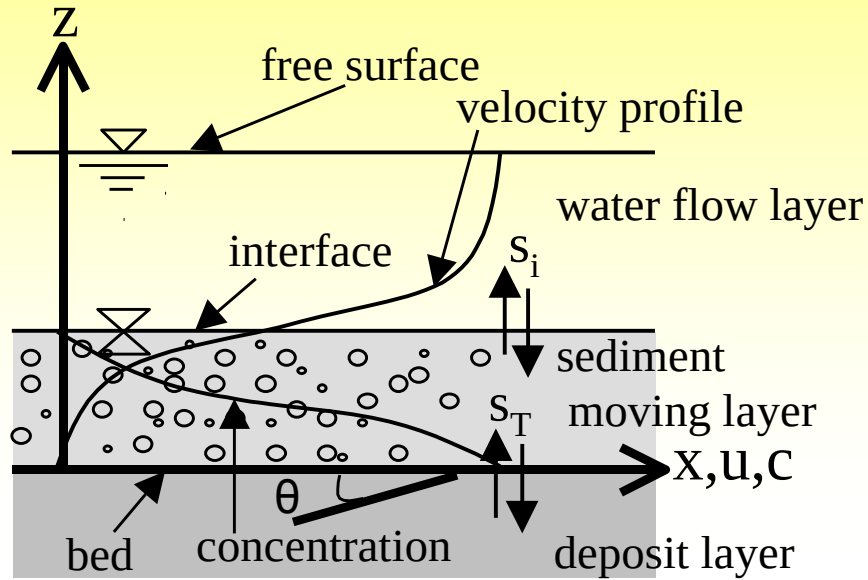


堰水域に流入する土石流に関する数値計算



堰水域に流入する土石流に関する数値計算

4. 二層流モデルによる二次元氾濫シミュレーション



二層流モデルの模式図

支配方程式の座標系は
水平二次元としている

連続式と河床位方程式

水流層

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial M_w}{\partial x} + \frac{\partial N_w}{\partial y} = S_I$$

砂礫層

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial M_s}{\partial x} + \frac{\partial N_s}{\partial y} = S_T - S_I$$

砂礫体積

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -S_T$$

河床位方程式

$$\frac{\partial (c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma_x c_s M_s)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_y c_s N_s)}{\partial y} = c_* S_T$$

二層流モデルによる二次元汜濫シミュレーションの支配方程式

運動方程式(x方向)

水流層

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M_w}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{wxx} u_w M_w)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{wxy} v_w M_w)}{\partial y} - S_I u_I \\ &= \frac{1}{\rho_w} \left\{ -p_I \frac{\partial(h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_w}{\partial x} - \tau_{wx} \right\} \end{aligned}$$

砂礫層

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\gamma' \rho_s M_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{sxx} \rho_s u_s M_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{sxy} \rho_s v_s M_s)}{\partial y} + \rho_w S_I u_I \\ &= -p_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + p_I \frac{\partial(h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial(\gamma_p P_s)}{\partial x} + \tau_{wx} - \tau_{bx} \end{aligned}$$

抵抗則と侵食堆積速度式

(江頭らの構成則と侵食堆積速度式を一様濃度の仮定のもとで適用)

河床面せん断応力(x方向)

$$\tau_{bx} = \tau_y \frac{u_s}{\sqrt{u_s^2 + v_s^2}} + \rho_w f_s u_s \sqrt{u_s^2 + v_s^2}$$

interfaceのせん断応力(x方向)

$$\tau_{wx} = \rho_w f_w (u_w - u_I) \sqrt{(u_w - u_I)^2 + (v_w - v_I)^2}$$

侵食堆積速度式

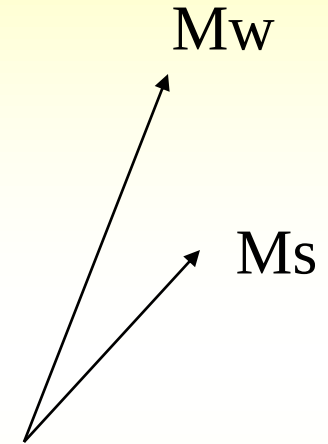
$$s_T = v_t \tan(\theta_{fd} - \theta_e)$$

θ_{fd} は v_t の方向に見た河床勾配

v_t は水流層のフラックスの砂礫層流向成分と砂礫層フラックスの和を全流動層厚で除して与えた.

$$v_t = \frac{\left(\overrightarrow{M_w} \cdot \overrightarrow{e_s} + \left| \overrightarrow{M_s} \right| \right)}{h_t}$$

$\overrightarrow{e_s}$ は砂礫層の平均流速方向の単位ベクトルである.

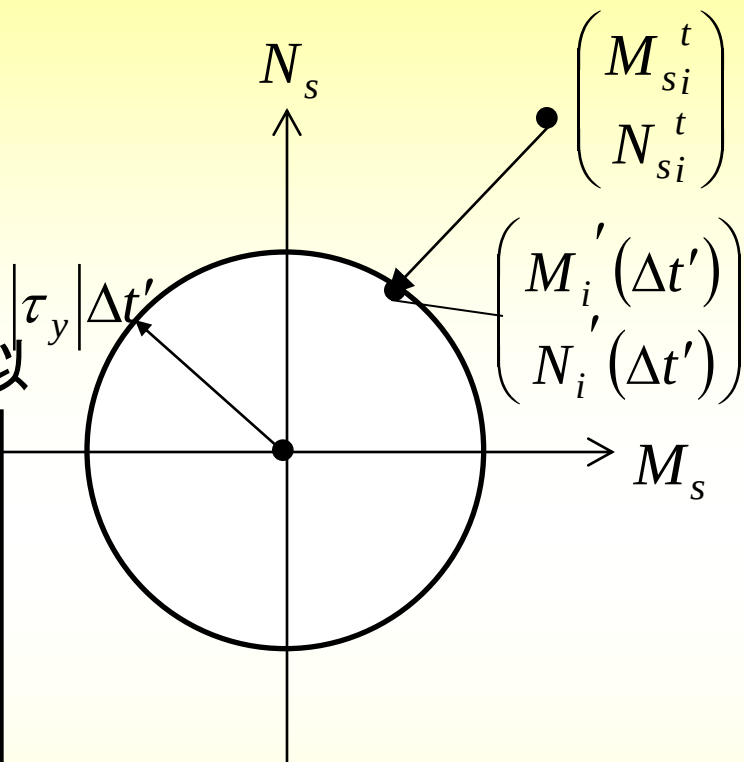


停止と再移動の評価(宮本の方法を準用)

$$\begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^{t+\Delta t} \\ (\rho_s N_s)_i^{t+\Delta t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^t \\ (\rho_s N_s)_i^t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \Delta t - \begin{pmatrix} \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \end{pmatrix} \Delta t$$

停止の条件 ($0 < \Delta t' < \Delta t$) 宮本による近似

$$\begin{aligned} \left| \begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^{t+\Delta t'} \\ (\rho_s N_s)_i^{t+\Delta t'} \end{pmatrix} \right| &= \left| \begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^t \\ (\rho_s N_s)_i^t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \Delta t' \right| - |\tau_y| \Delta t' \\ &\equiv \left| \begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^{t+\Delta t} \\ (\rho_s N_s)_i^{t+\Delta t} \end{pmatrix} \right| - |\tau_y| \Delta t' = 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} F_x = & -\frac{\partial \rho_s u_s M_s}{\partial x} - \frac{\partial \rho_s v_s M_s}{\partial y} - \rho_w s_I u_I \\ & - p_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + p_I \frac{\partial (h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_{wx} - \tau_{bDx} \end{aligned}$$

再移動の条件

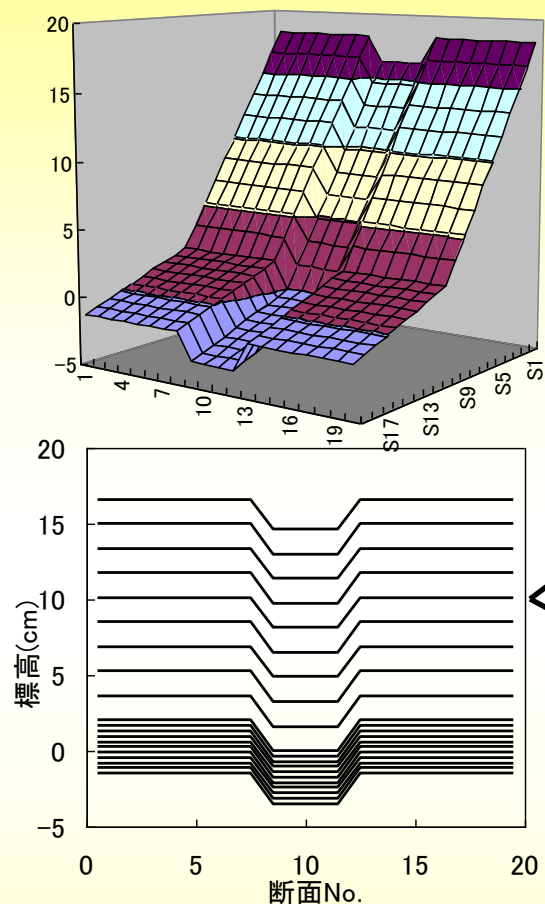
$$\left| \begin{pmatrix} F_{0x} \\ F_{0y} \end{pmatrix} \right| > |\tau_y|$$

$$\begin{aligned} F_{0x} &= -\frac{\partial \rho_s u_s M_s}{\partial x} - \frac{\partial \rho_s v_s M_s}{\partial y} \\ &\quad - p_b \frac{\partial z_b}{\partial x} + p_I \frac{\partial (h_s + z_b)}{\partial x} - \frac{\partial P_s}{\partial x} + \tau_{wx} \\ F_{0y} &= -\frac{\partial \rho_s u_s N_s}{\partial x} - \frac{\partial \rho_s v_s N_s}{\partial y} \\ &\quad - p_b \frac{\partial z_b}{\partial y} + p_I \frac{\partial (h_s + z_b)}{\partial y} - \frac{\partial P_s}{\partial y} + \tau_{wy} \end{aligned}$$

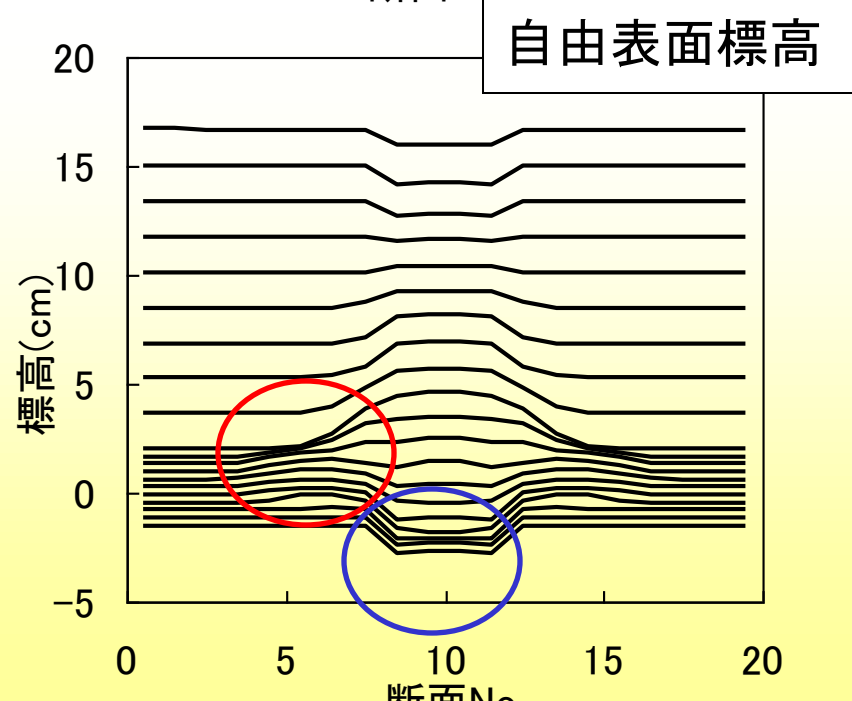
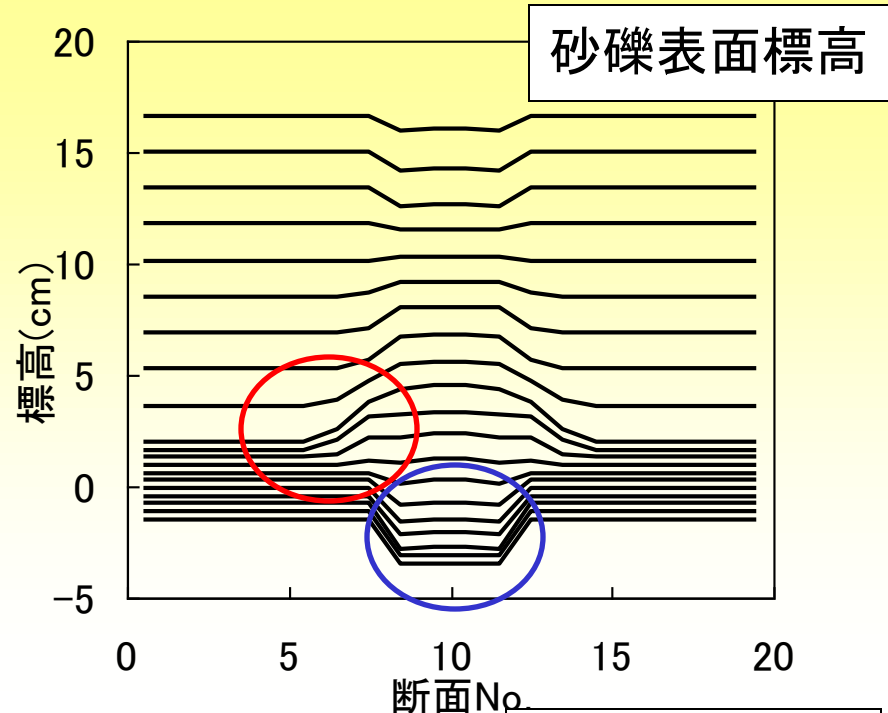
$$\begin{pmatrix} (\rho_s M_s)_i^{t+\Delta t} \\ (\rho_s N_s)_i^{t+\Delta t} \end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix} F_{0x} \\ F_{0y} \end{pmatrix} - |\tau_y| \begin{pmatrix} e_{sx} \\ e_{sy} \end{pmatrix} \right] \Delta t$$

$$\mathbf{e}_s = \begin{pmatrix} e_{sx} \\ e_{sy} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{F_{0x}^2 + F_{0y}^2}} \begin{pmatrix} F_{0x} \\ F_{0y} \end{pmatrix}$$

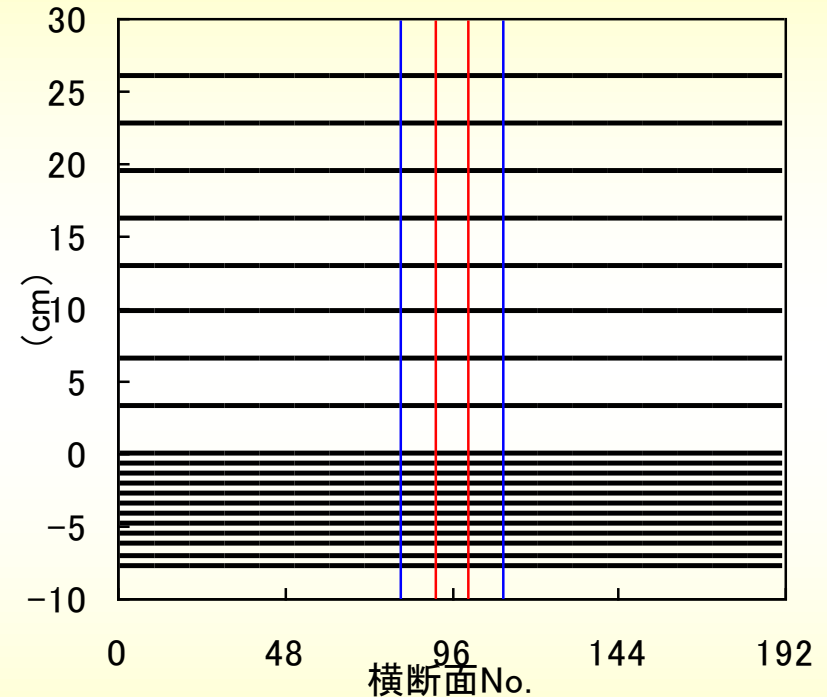
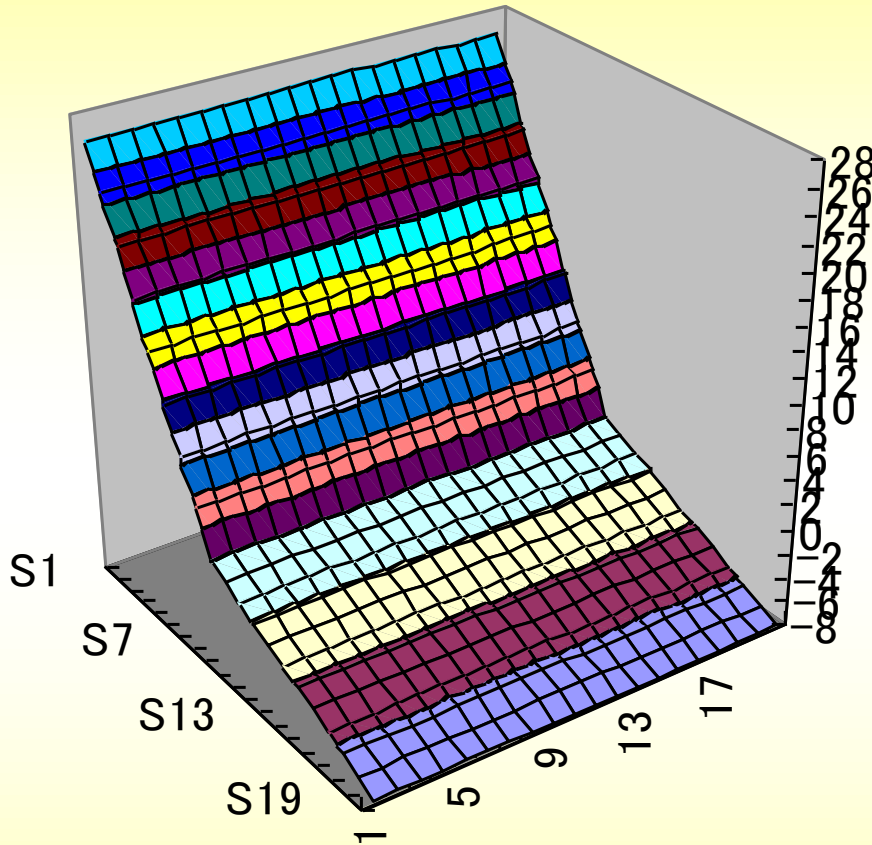
計算例(1)



二つ折れの固定床斜面（上流側 18° ，下流側 4° ）の上流端中央部から一定濃度・一定量の土石流を定常供給

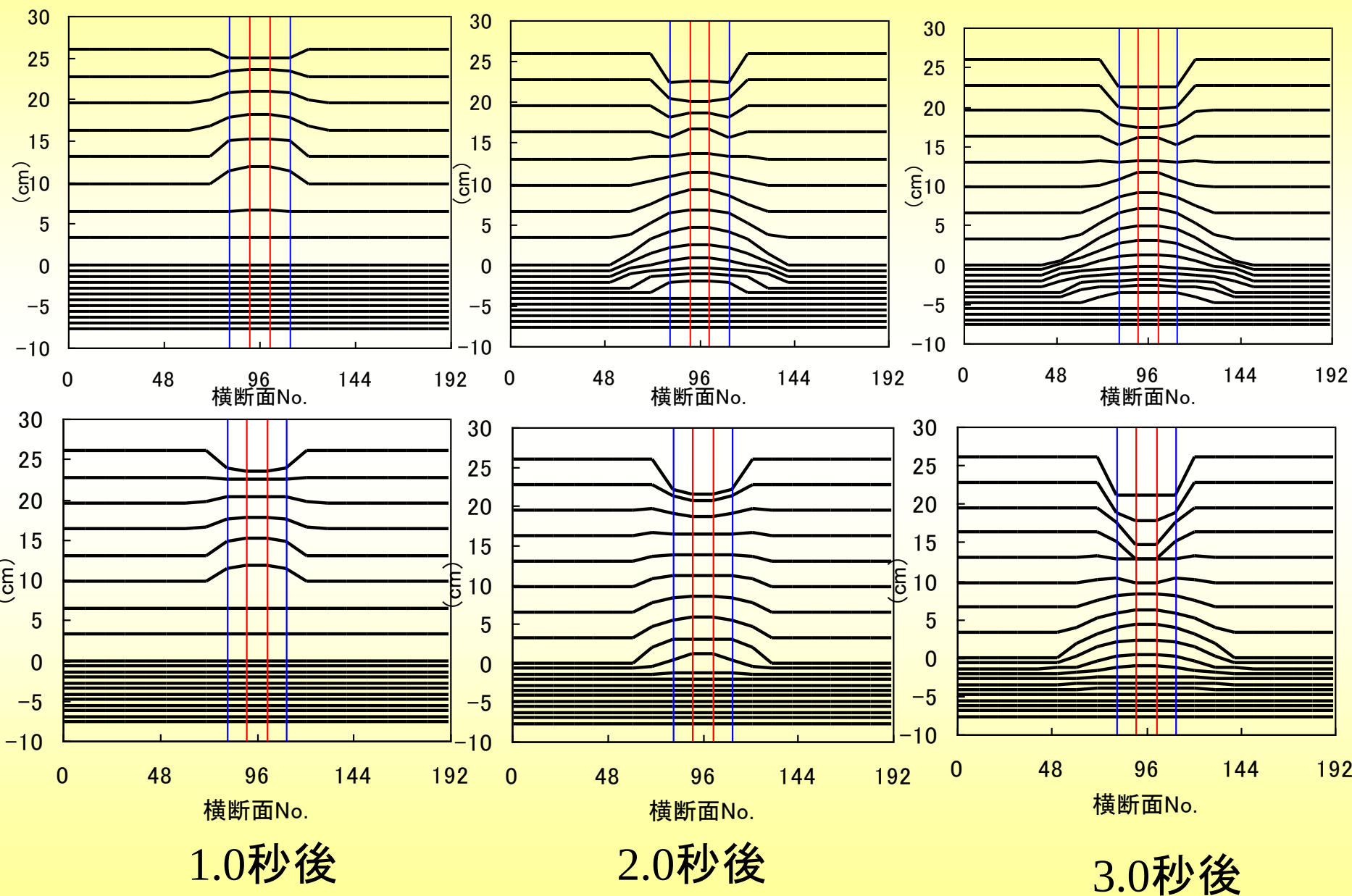


計算例(2)

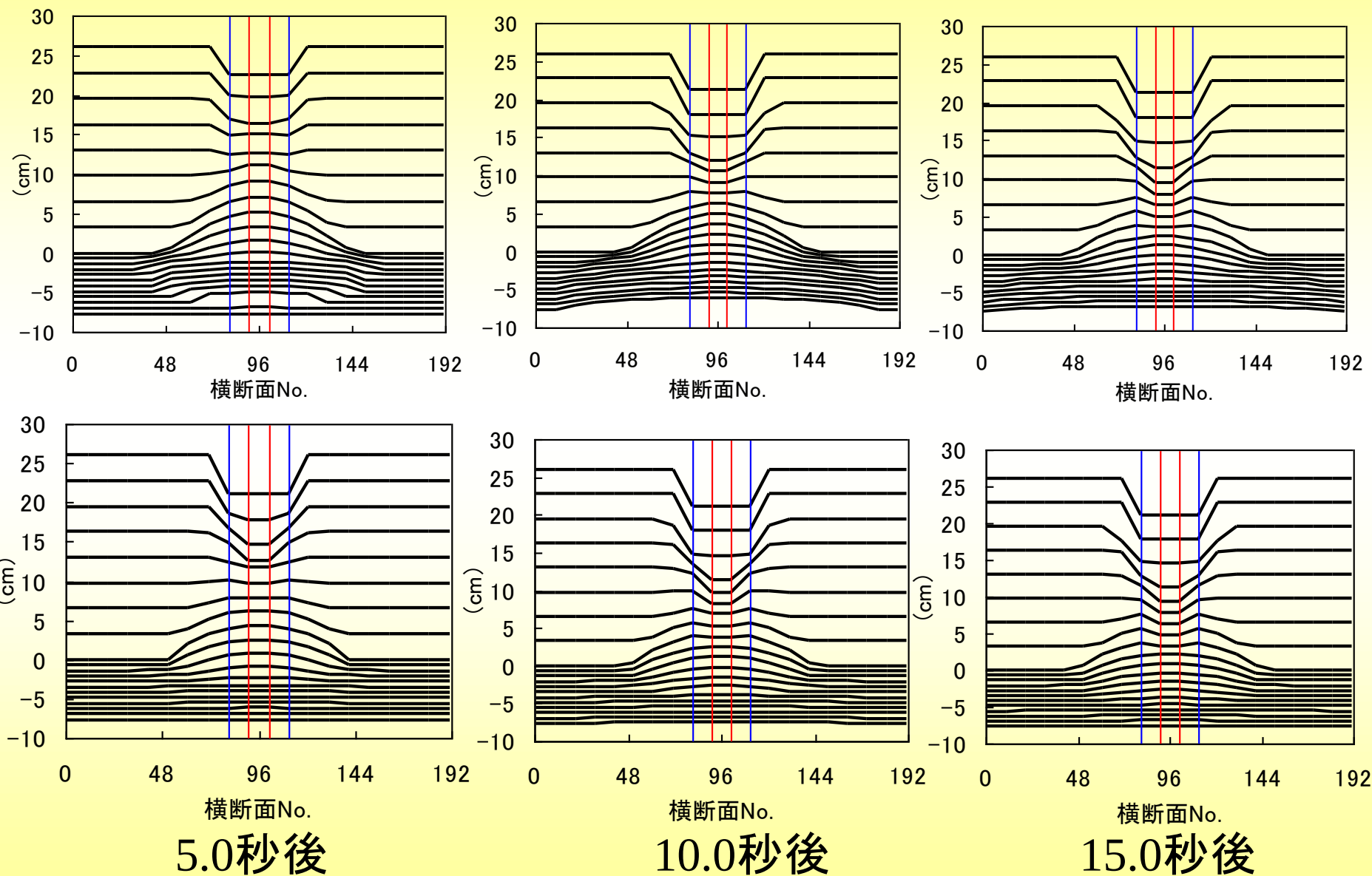


二つ折れの飽和移動床斜面（上流側 18° ，下流側 4° ）の上流端中央部から一定流量の清水を一定時間給
水

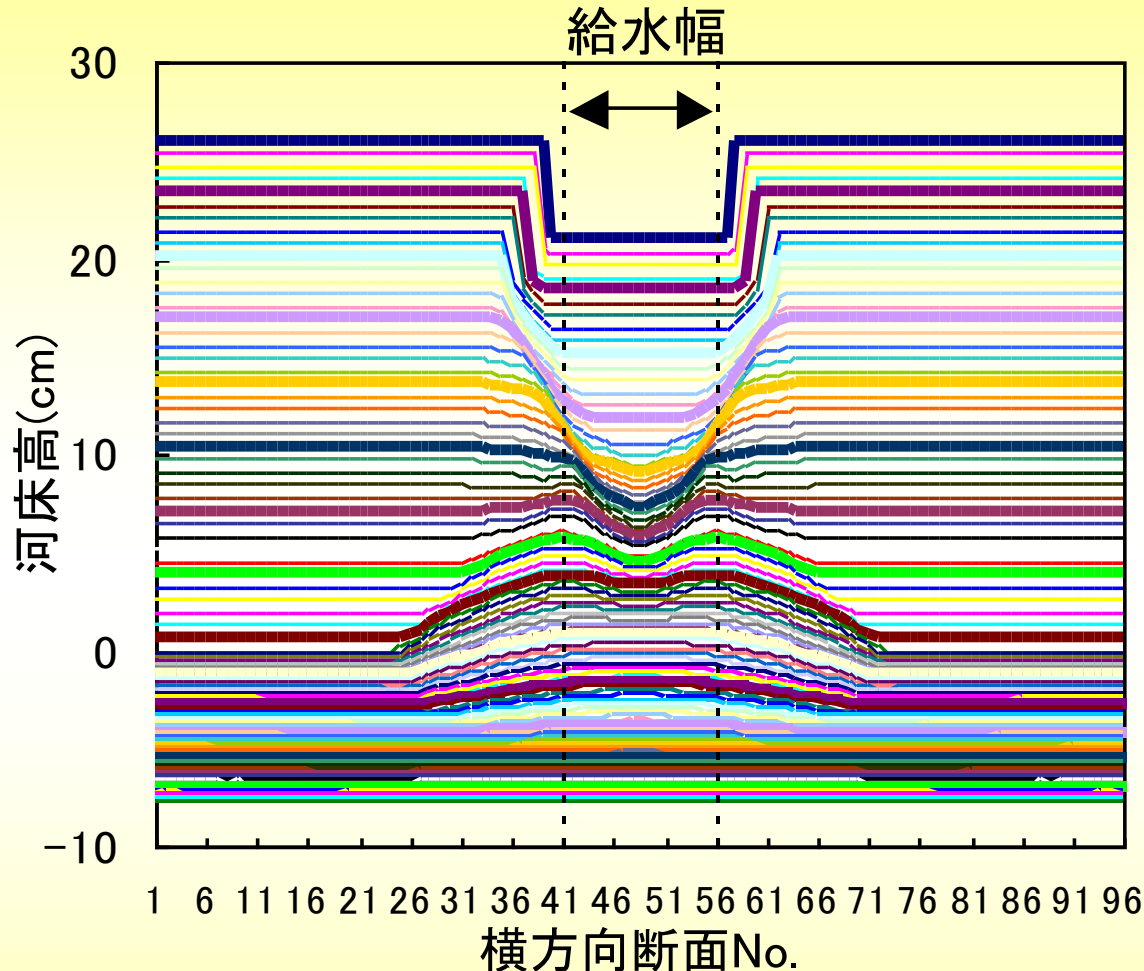
計算例(2)-1 上段が自由表面標高、下段が砂礫層表面標高



計算例(2)-2 上段が自由表面標高、下段が砂礫層表面標高



計算例(2)-2



最終河床形状(横断面図)

二つ折れの飽和移動床斜面（上流側 18° ，下流側 4° ）の上流端中央部から一定流量の清水を一定時間給水

流水による斜面侵食による土石流の発生と堆積に関する数値実験結果

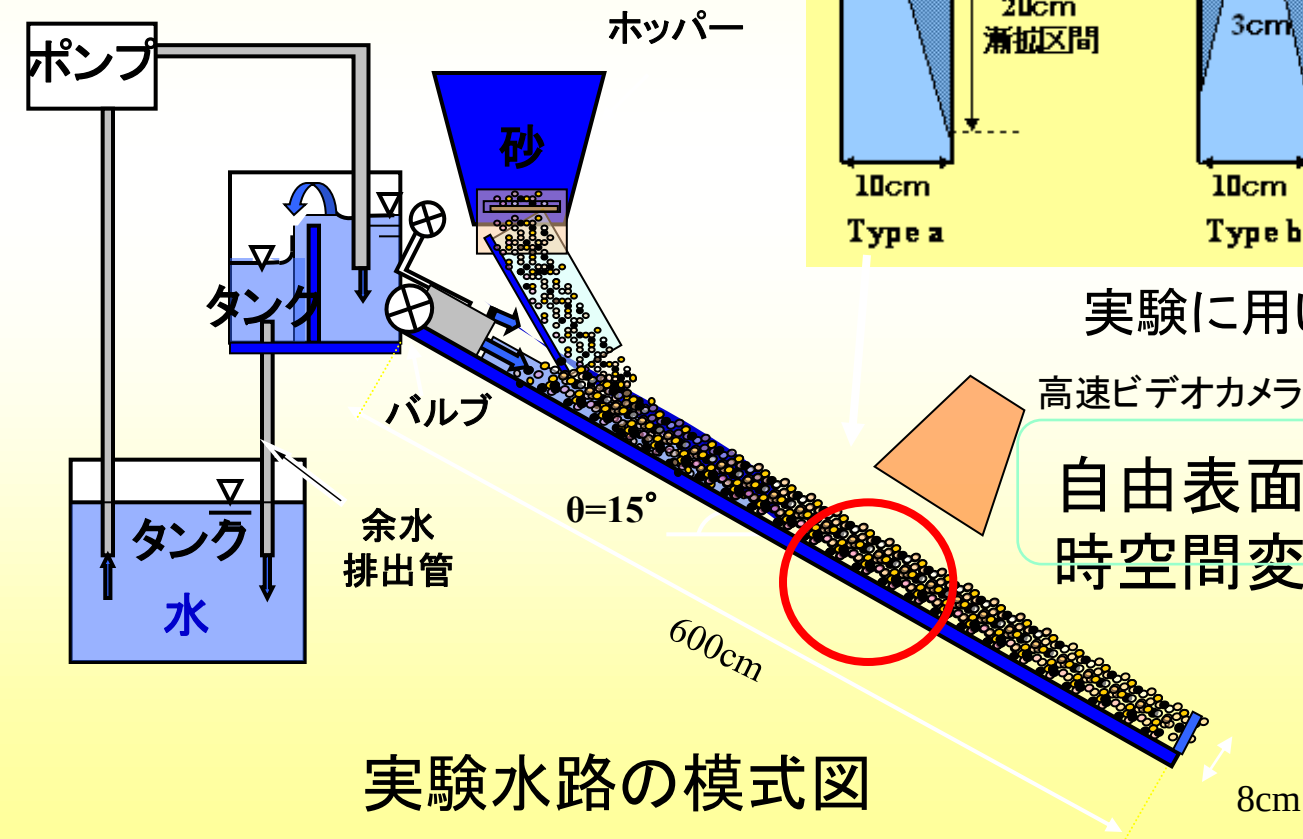
5. 流路急変部における土石流の挙動に関する水路実験と侵食堆積速度の評価式の改良

渓谷に見られる狭窄部のような地形が急激に変化する場所では、土石流の流動の変化が大きくなることが予測される。しかし、このような領域における土石流の挙動を詳細に調べられた事例はあまりない。また、土石流の侵食堆積現象の評価は運動方程式中の重力項と河床面せん断応力（降伏応力）の大小関係で議論されることが多く、このような流路の急変部を対象にした議論には至っていない。そこで、ここでは、著者らによって行われた狭窄部を通過する土石流による不等流状態に関する実験結果を紹介し、侵食堆積現象の評価に流れの急変部の効果を導入した解析法とその適用結果について示す。

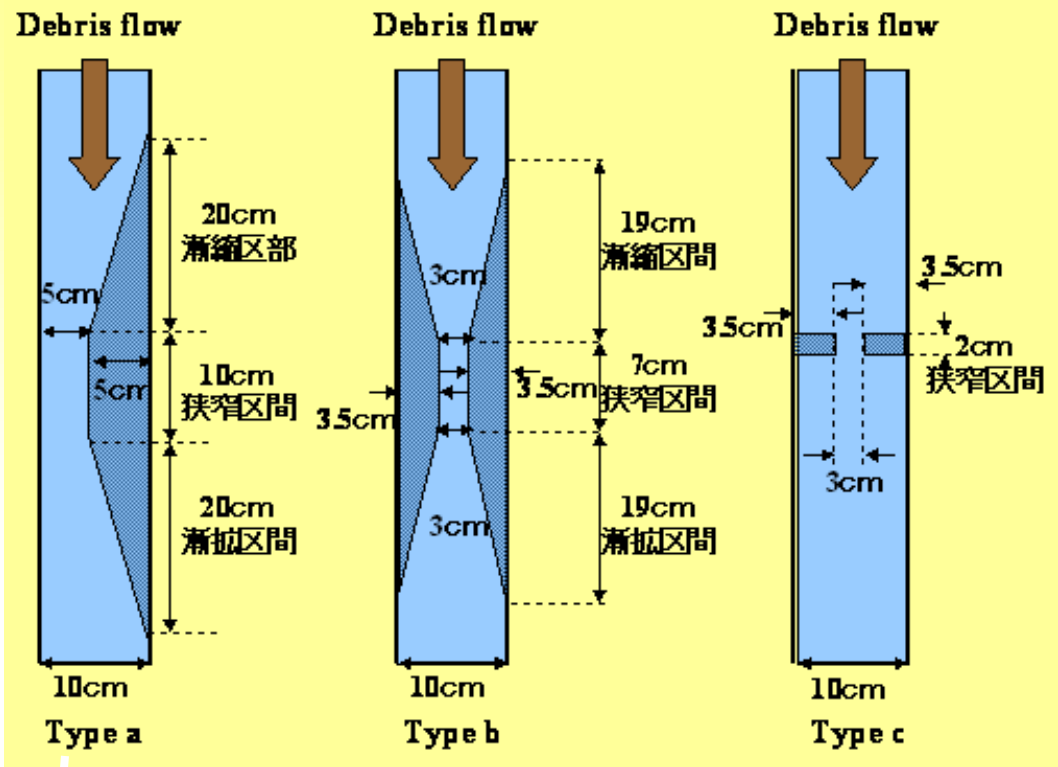
実験水路

実験条件

- ・3タイプの急縮部を有する区間を作成
- ・河床は飽和移動床とした
- ・60秒に渡って30%の輸送濃度で土石流を定常供給



実験水路の模式図



実験に用いた急縮区間

自由表面および河床面の
時空間変化を記録

侵食速度

圧力勾配を平衡勾配の評価式に導入

水流層の
運動方程式

$$\frac{\partial(\rho_w v_w B h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w \beta_w v_w^2 B h_w)}{\partial x} - \rho_w B s_I u_I = \rho_w g B h_w \sin \theta - B \frac{\partial P_w}{\partial x} - B \tau_w \quad (2.4)$$

混合層の
運動方程式

$$\frac{\partial(\gamma' \rho_s v_s B h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \beta_s v_s^2 B h_s)}{\partial x} + \rho_w B s_I u_I = \rho_s g B h_s \sin \theta - B \frac{\partial P_s}{\partial x} + B \tau_w - B \tau_b \quad (2.5)$$

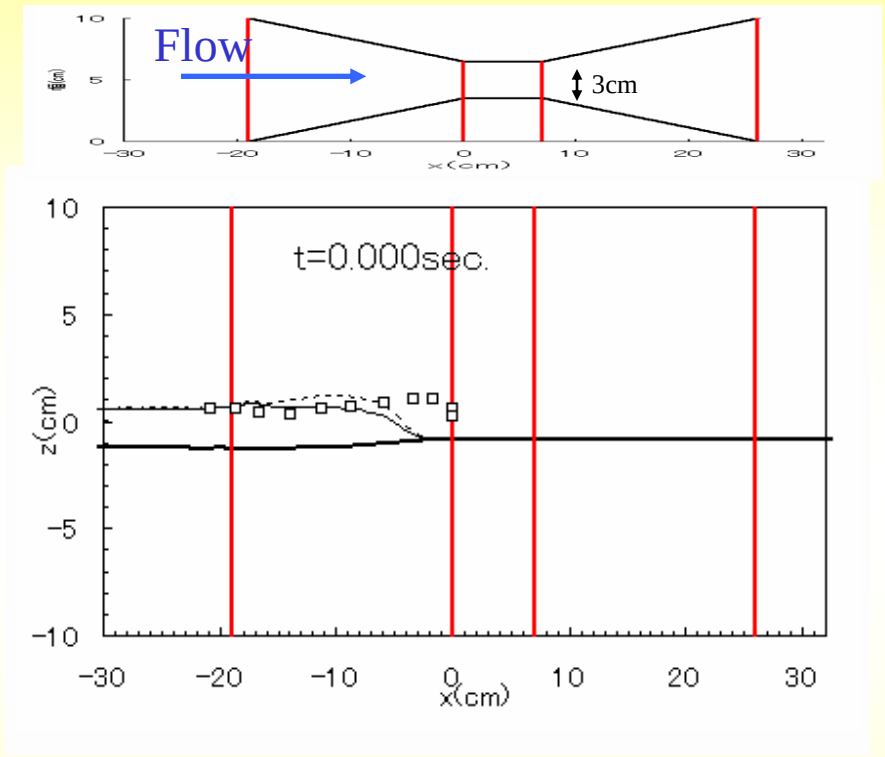
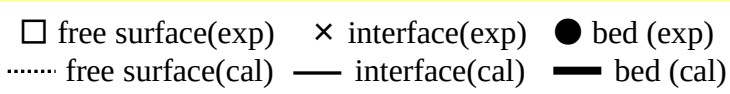
$$\underbrace{\{(\sigma - \rho)c_t + \rho\} g h_t \sin \theta_{ep}}_{\text{物体力}} - \underbrace{\cos \theta_{ep} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x}}_{\text{圧力勾配}} - \underbrace{(\sigma - \rho)c_t g h_t \cos \theta_{ep} \tan \phi}_{\text{降伏応力}} = 0 \quad (2.6)$$

$$\tan \theta_{ep} = \tan \theta_{e0} + \frac{1}{\rho g h_t} \frac{\partial(P_{w0} + P_{s0})}{\partial x} \bigg/ \{(\sigma/\rho - 1)c_t + 1\} \quad (2.7)$$

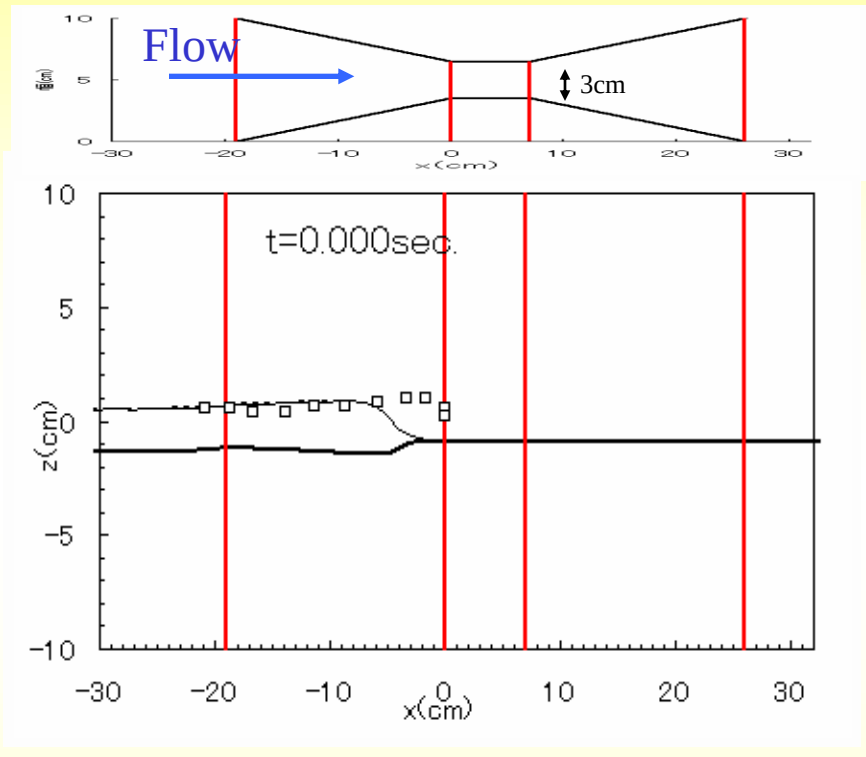
$$P_{w0} = P_w / \cos \theta_{ep}, P_{s0} = P_s / \cos \theta_{ep}$$

t : 時間, x : 流下方向の座標, h_w : 水流層厚, h_s : 砂礫移動層厚, ρ_w : 水流層密度, ρ_s : 砂礫層密度
 v_w : 水流層の平均流速, v_s : 砂礫層の平均流速, P_w : 水流層に作用する圧力, P_s : 砂礫層に作用する圧力
 g : 重力加速度, u_I : *interface* の位置における速度, s_I : *interface* を通じた水の上向きの *flux*
 τ_w : *interface* におけるせん断力, τ_b : 河床面せん断力

実験結果【移動床】と計算結果との比較

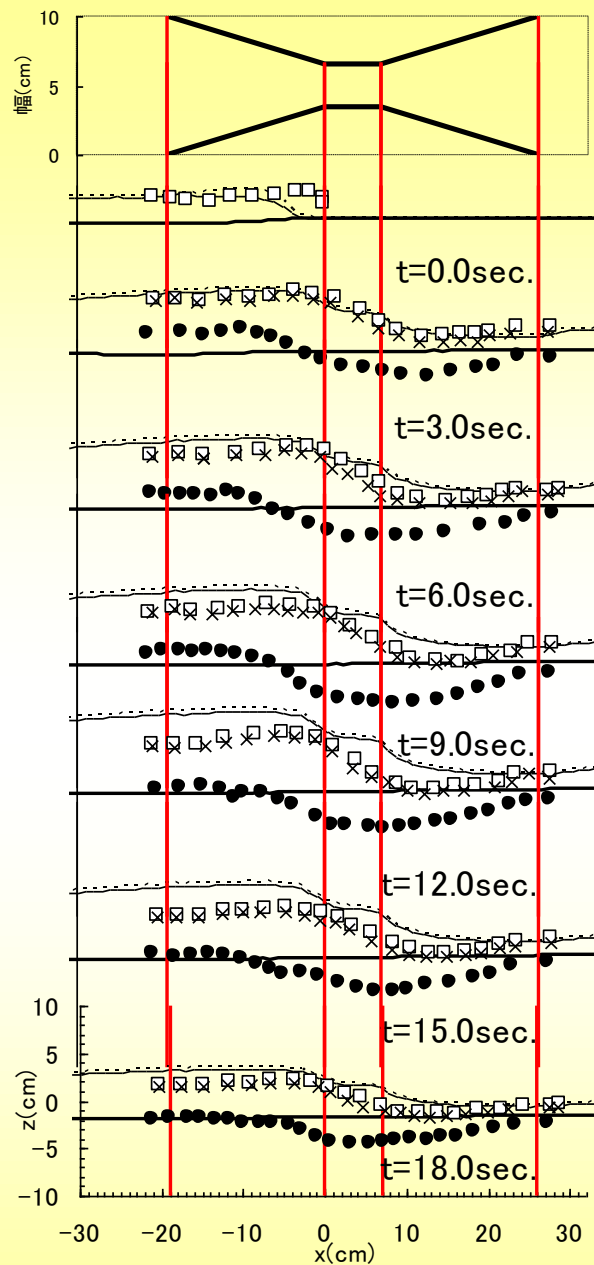


従来の方法

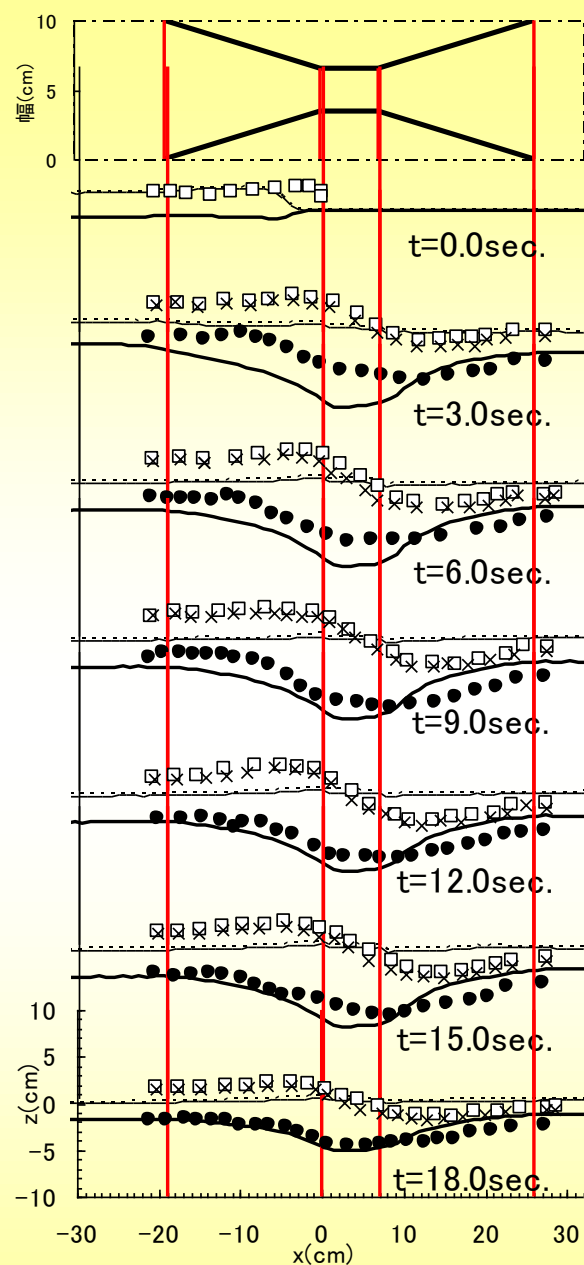


圧力勾配を考慮

従来の方法:自由表面を表現するが,河床の侵食現象を表現できない
圧力勾配を考慮:河床の侵食現象を表現するが,自由表面を表現し

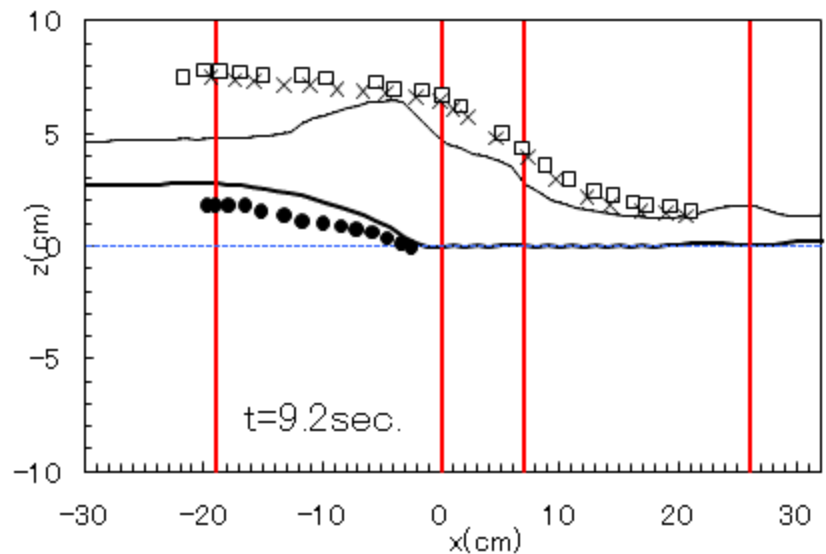
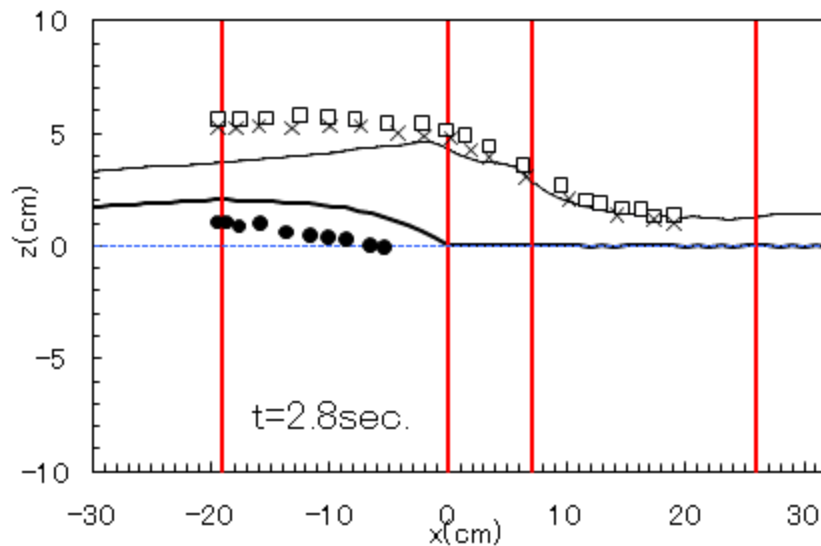
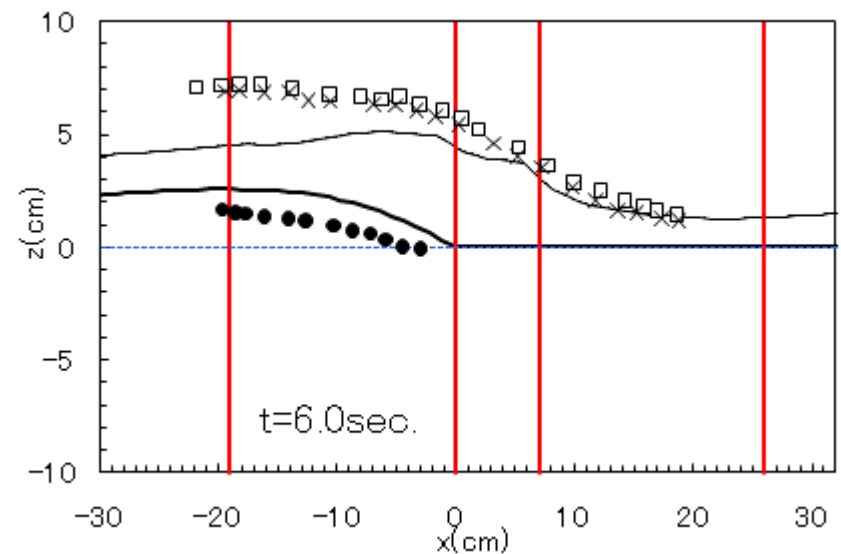
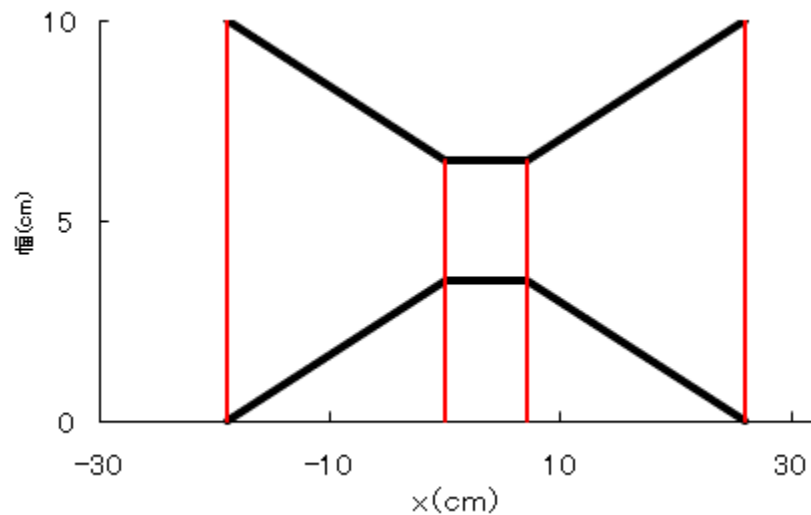


圧力項なし



圧力項あり

固定床上における実験結果と圧力勾配を考慮した 計算結果との比較



まとめ

流路の急変部における土石流の流動状況を水路実験により紹介し、流路急変による影響を流れの圧力勾配を平衡勾配に導入することで考慮する方法について説明し、水路実験に適用した結果を示した。

飽和移動床上の実験では、河床が下に凸の形状を示し、圧力勾配を考慮した数値計算によってこの形状を評価することができた。一方、流れの自由表面部の形状は評価できなかった。また、固定床上における実験では、急縮部上流側で堆積が生じ、計算によってもこのことが表現できることが分かった。

6. 現地における土石流の発生事例と再現計算結果

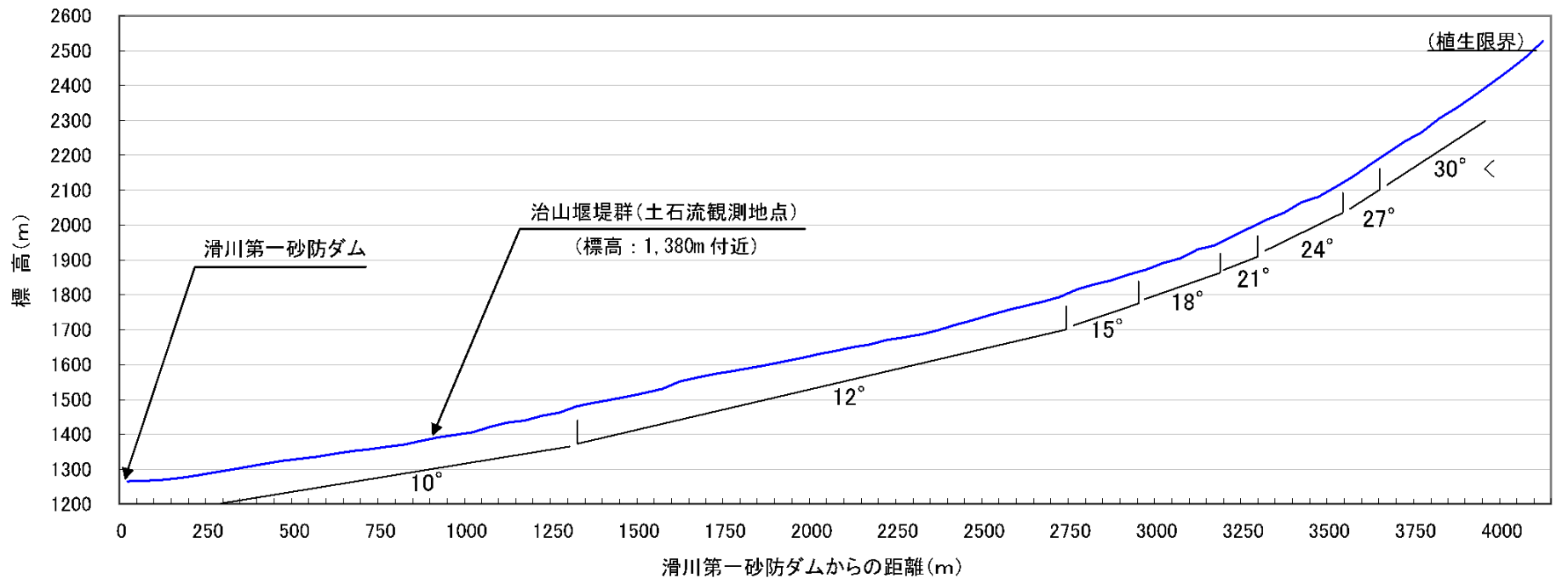
土石流の二層流モデルの現地への適用性を明らかにするために、最近土石流の発生した現地地形を対象として土石流による土砂流出解析を実施し、検討を加える。対象としたのは、平成11年6月に滑川北俣沢で発生した土石流ある。

この土石流では、土石流発生前に天然ダムが形成されていて、上流からの土石流到達時にこの天然ダムが破壊されたと推察されており、天然ダムの一部が残存している。

実際の渓流での土石流発生・流出過程

■滑川北股沢

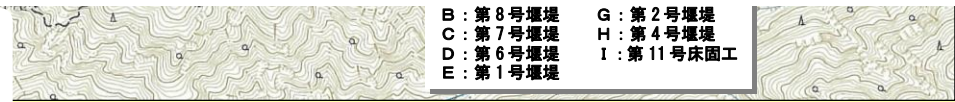
➤滑川北股沢は流域面積6.23km²，平均溪床勾配1／5.4の急流渓流で基盤岩は花崗岩である。1982(昭和57)年から197年間に10回の土石流が確認されている。



■滑川第一砂防ダム

H=22m, L=200m, 貯砂量=309,000m³

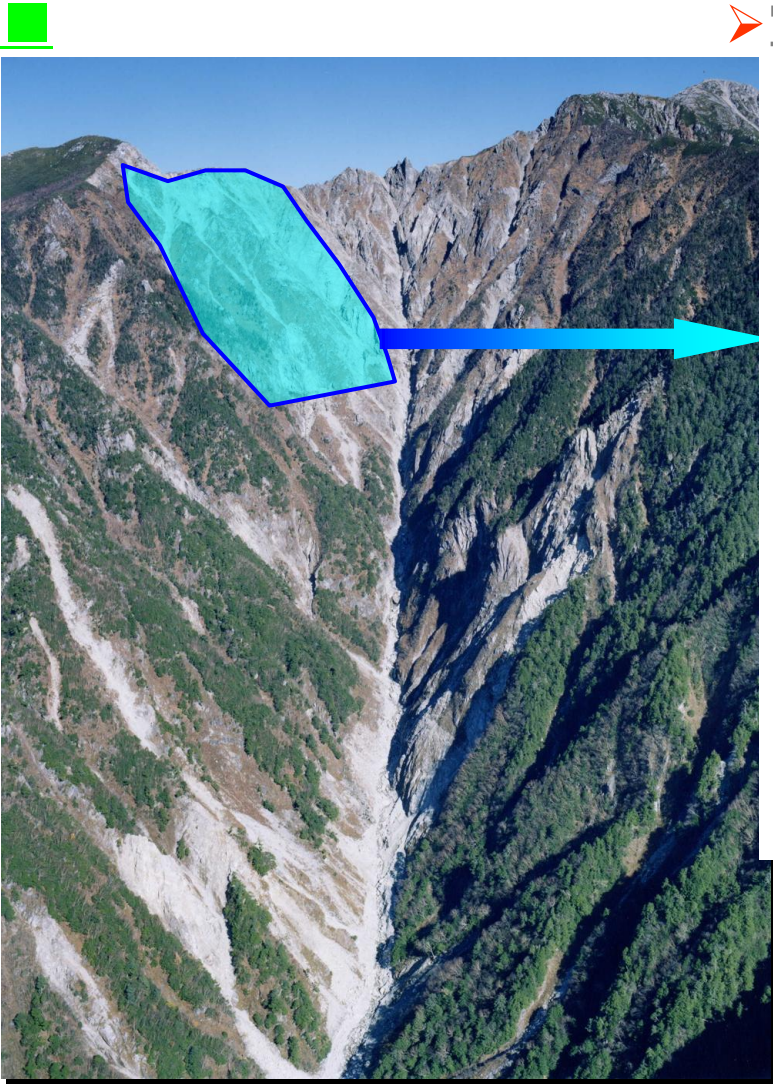
1989年6月竣工。その翌月、1989年7月9日土石流でほぼ満砂



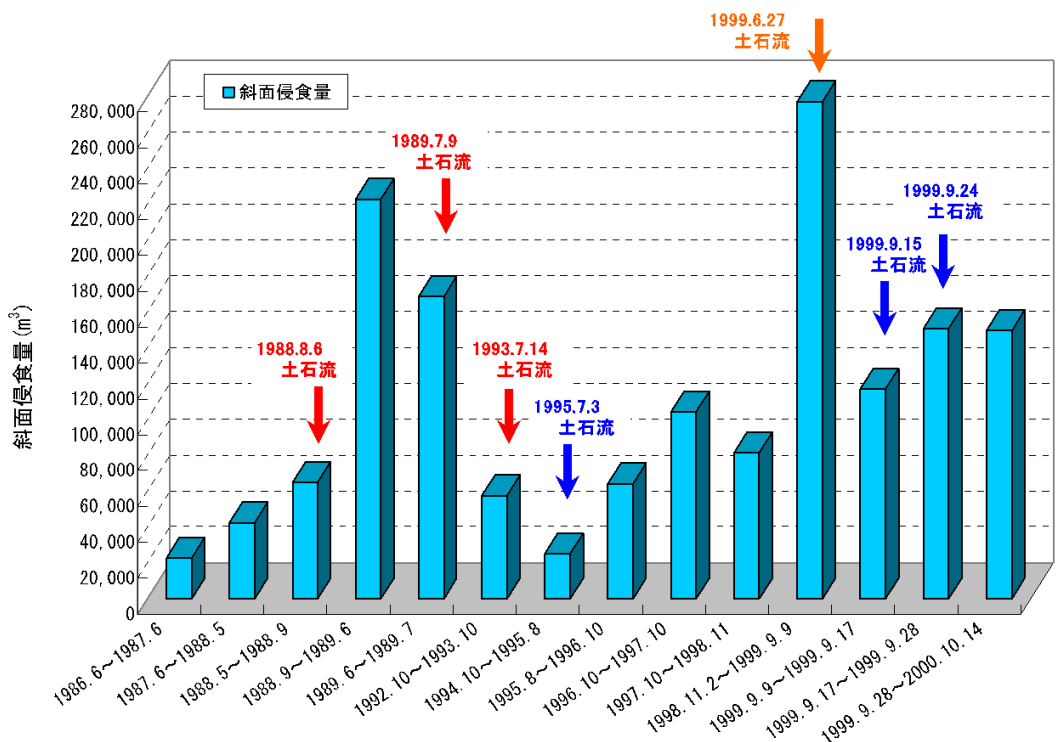
2. 実際の渓流での土石流発生・流出過程

滑川北股沢

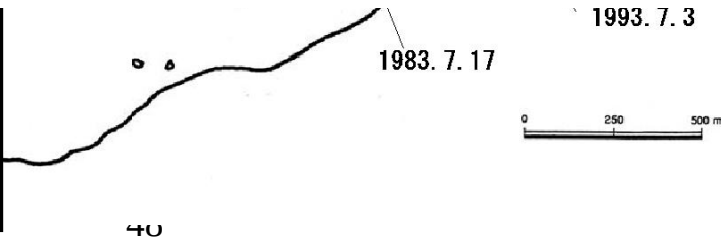
の実態に関する事例分析



➤ 空中写真判読結果から、土石流の発生源は標



← 崩壊発生型 ← 渓床土砂移動型 ← 天然ダム決壊型



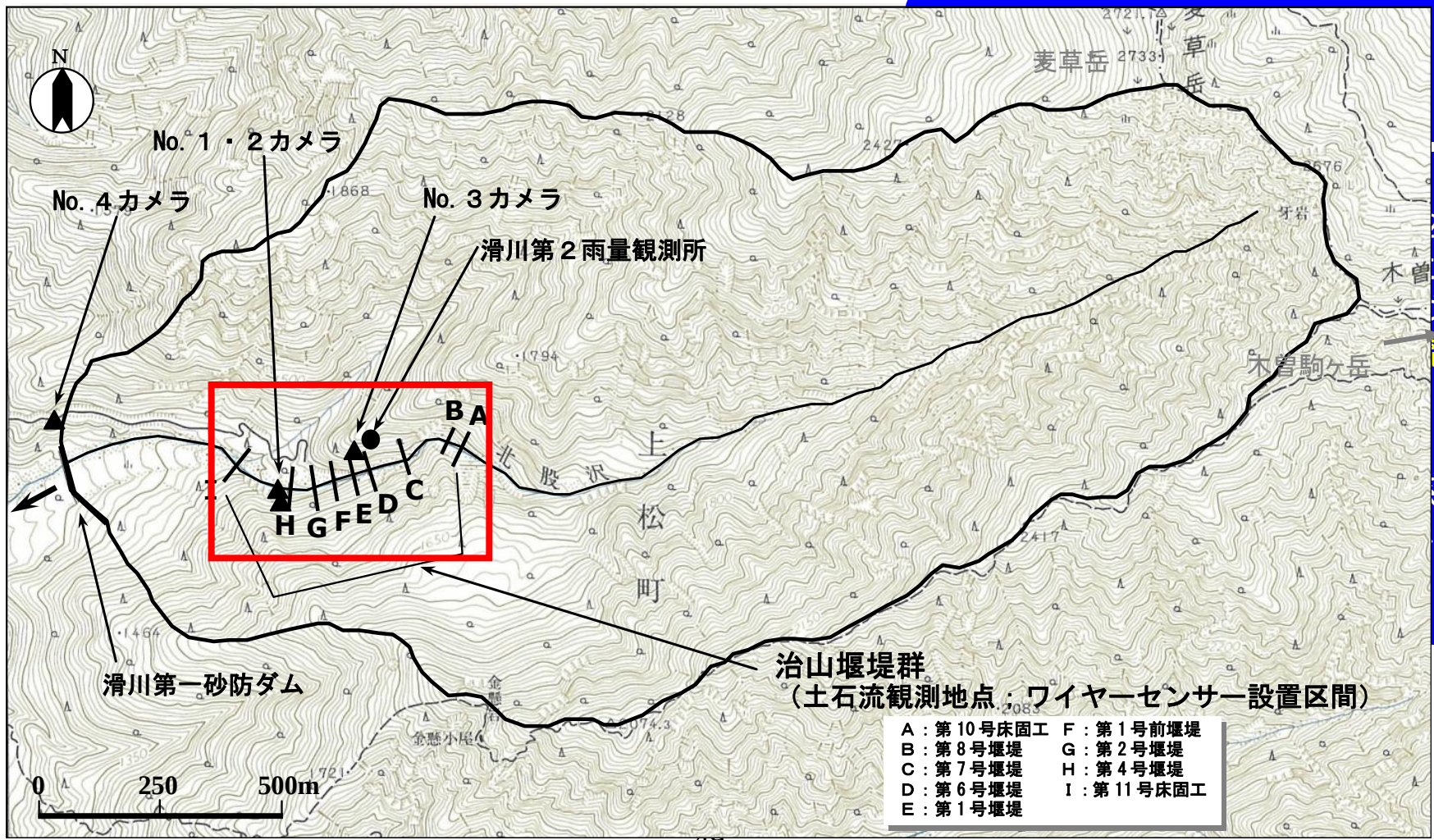
実際の渓流での土石流発生・流出過程

滑川北股沢

の実態に関する事例分析

■

流速



実際の渓流での土石流発生・流出過程

■滑川北股沢

の実態に関する事例分析

■土石流の発生形態と発生頻度



滑川北股沢では、両岸斜面からの土砂供給によって崖錐が形成され、河道が閉塞されて天然ダム

実際の渓流での土石流発生・流出過程

■滑川北股沢

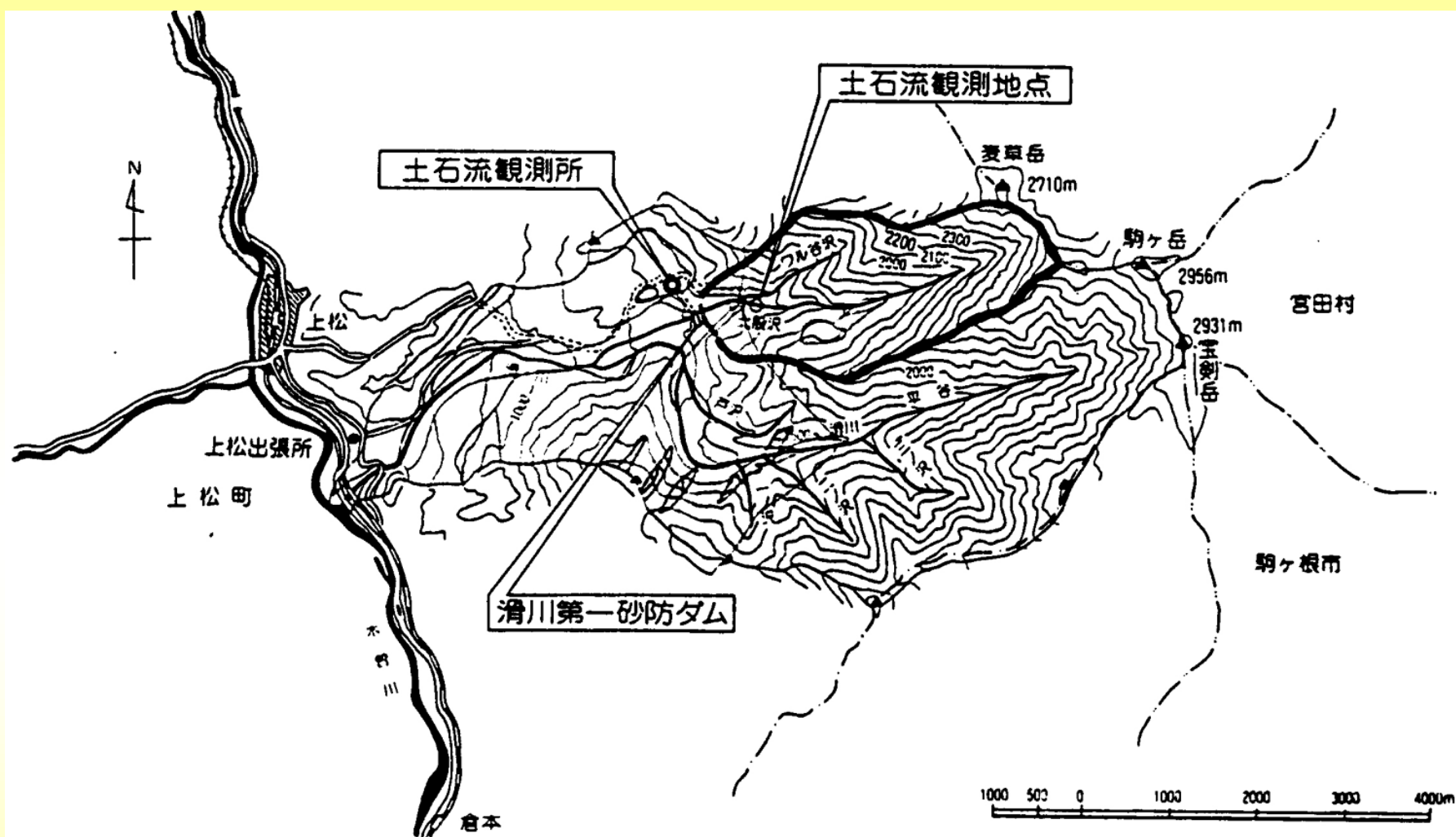
の実態に関する事例分析

■土石流の流下・堆積状況

1999年6月27日土石流



撮影)国土交通省多治見砂防国道事務所



滑川北俣沢流域の概要

流域諸元

中央アルプスの木曽駒ヶ岳(標高2,956m)と木曽前岳(標高2826m)の西斜面に源頭部を発する流域面積6.2km², 流路延長5.2km, 平均河床勾配1/3.2の急勾配荒廃溪流であり, 河道の横断形状はV字型で流路はほぼ直線状である.

地質と土砂生産状況

地質は大部分を木曽駒花崗岩が占めるため, 表層部は花崗岩特有の著しい風化作用によって極めて脆弱なものとなっている. さらに, 地形が急峻であり, 気象条件の厳しい植生限界付近の高標高地(2,500~2,700m)であるため, 上流域では崩壊地が広く分布し, 降雨時には土石流が頻発している. また, 河道内や支溪(ガリー)には多量の土砂が堆積していて, 狭窄部では巨礫が河道を閉塞して土砂を堆積させている箇所も見られる

現地観測状況

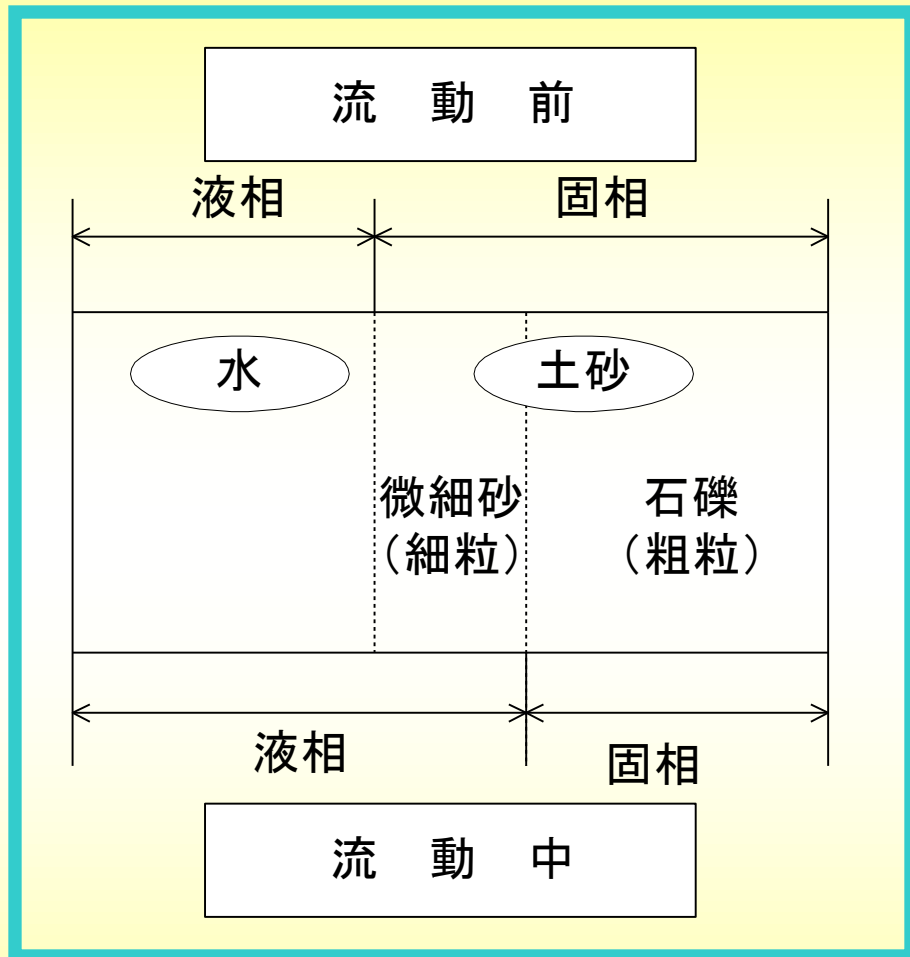
この滑川右支北股沢では、国土交通省多治見工事事務所により1982年から継続的に土石流の観測が行われており、土石流の流下状況の撮影や流量・流速・波高の計測、雨量データの計測、ならびに空中写真を用いた土石流の発生形態を推測するなどの調査が続けられている。

解析に用いる支配方程式

二層流モデルを幅の変わる一次元流れ場に適用

$$\begin{aligned}\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial \tilde{M}_w}{\partial x} &= s_I & \frac{\partial c_s h_s}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial c_s \tilde{M}_s}{\partial x} &= c_* s_T & \frac{\partial z_b}{\partial t} &= -\frac{s_T}{\cos \theta} \\ \frac{1}{B} \left(\frac{\partial \tilde{M}_w}{\partial t} + \frac{\partial v_w \tilde{M}_w}{\partial x} \right) - s_I u_I &= gh_w \sin \theta - gh_w \cos \theta \frac{\partial h_w}{\partial x} - gh_w \cos \theta \frac{\partial h_s}{\partial x} - \frac{\tau_w}{\rho_w} \\ \frac{1}{B} \left(\frac{\partial \tilde{M}_s}{\partial t} + \frac{\partial v_s \tilde{M}_s}{\partial x} \right) + \left\{ \left(\frac{\rho_{s^*}}{\rho_s} - 1 \right) s_T + \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) s_I \right\} v_s &+ \frac{\rho_w}{\rho_s} s_I u_I \\ &= gh_s \sin \theta - \frac{\rho_w}{\rho_s} gh_s \cos \theta \frac{\partial h_w}{\partial x} - gh_s \cos \theta \frac{\partial h_s}{\partial x} + \frac{1}{2\rho_s} gh_s \cos \theta \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + \frac{1}{\rho_s} (\tau_w - \tau_b) \\ \tilde{M}_s &= v_s B h_s & \tilde{M}_w &= v_w B h_w\end{aligned}$$

微細砂の取り扱い



C_* : 初期河床中の全土砂濃度

C_{L*} : 初期河床中の粗粒分濃度

C_{F*} : 初期河床中の細粒分濃度

流動中の液相の密度

$$\rho_w = \frac{\sigma c_{f*} + \rho(1 - c_*)}{1 - C_{L*}}$$

再堆積時には、粗粒分が骨格を形成して C_* で堆積する。細粒分を含む液相はその間隙に取り込まれる

粘着力の取り扱い

平衡勾配を定義する河床面における力の釣り合い式に粘着力 C_{oh} を導入する.

$$\{(\sigma - \rho_w)c_t + \rho_w\}gh_t \sin \theta_{ec} - (\sigma - \rho_w)c_t gh_t \cos \theta_{ec} \tan \phi - C_{oh} = 0$$

粘着力を導入した場合の平衡勾配 θ_{ec} は次式で与えられる.

$$\theta_{ec} = \arctan \left\{ \frac{(\sigma/\rho_w - 1)c_t \tan \phi}{(\sigma/\rho_w - 1)c_t + 1} \right\} + \arcsin \left(\frac{C_{oh}}{\rho_w gh_t \sqrt{A}} \right)$$
$$A = \{(\sigma/\rho_w - 1)c_t + 1\}^2 + \{(\sigma/\rho_w - 1)c_t \tan \phi\}^2$$

粘着力を導入しない状態で侵食が生じると判断された場合は
上式の平衡勾配で再度侵食するか否かを判断する.

粘着力により侵食が生じない場合は, 侵食も堆積もさせない.
また, 新たに堆積した層には粘着力を与えない.

解析条件

$$c_* = 0.6 \quad c_{L*}/c_* = 0.7 \quad \rho_w = \frac{\sigma_{f*} + \rho(1 - c_*)}{1 - c_{L*}} = 1.512 \text{ g/cm}^3$$

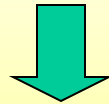
x=2,500mより下流は堆積区間とし、粗粒分が c_* で堆積しているものとする。ただし、間隙流体の密度は全区間で一定とする。

侵食可能深: 2m 粒径: $d=40\text{cm}$

粘着力 $C_{oh} = 9.8 \text{ kN/m}^2$ 摩擦角 $\phi = 33^\circ$

発生時の 10 分間雨量 11.0mm に対して

源頭部の崩壊地に対応する集水面積 0.267km^2 を乗じた $4.9 \text{ m}^3/\text{sec.}$ を 10 分間定常供給



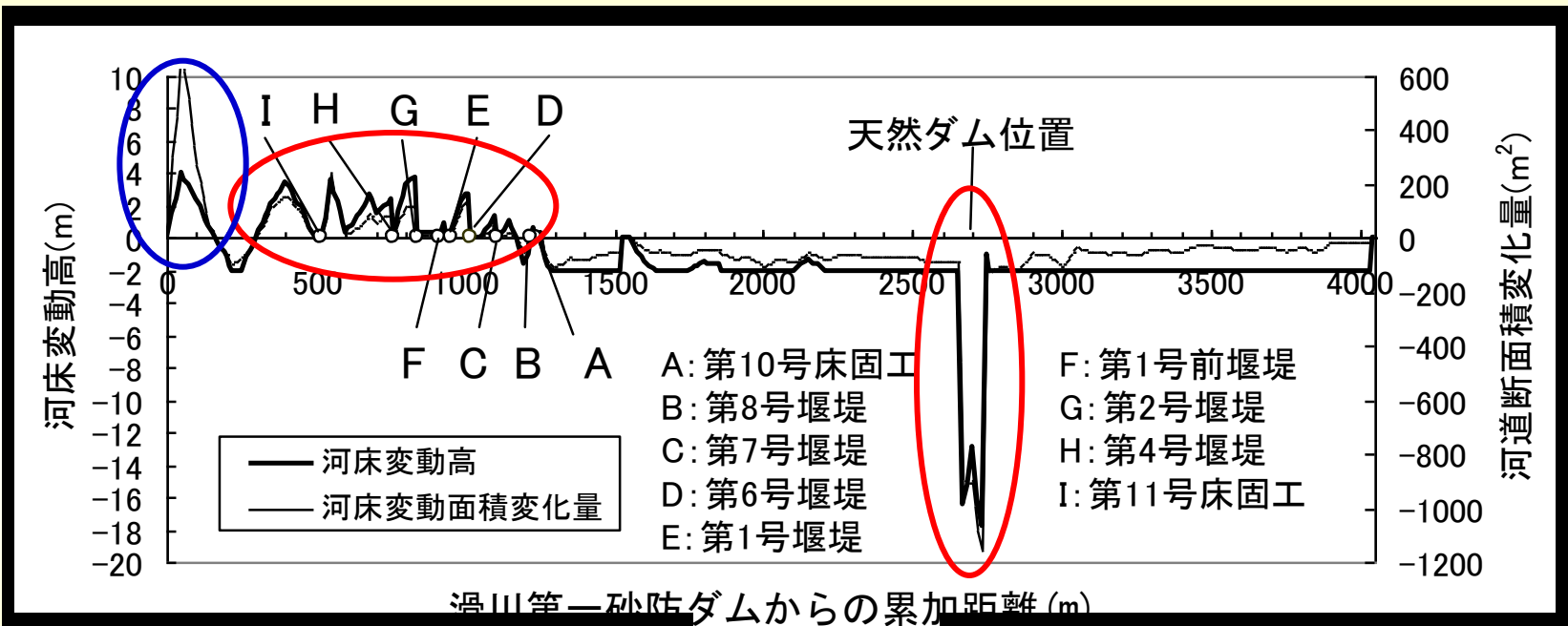
天然ダムの有無による違いを調べる

実際に発生している土石流の発生・流出過程

1999年6月27日土石流の発生・流下実態

に関する数値シミュレーション

■ 計算結果



実際に発生している土石流の発生・流出過程

1999年6月27日土石流の発生・流下実態

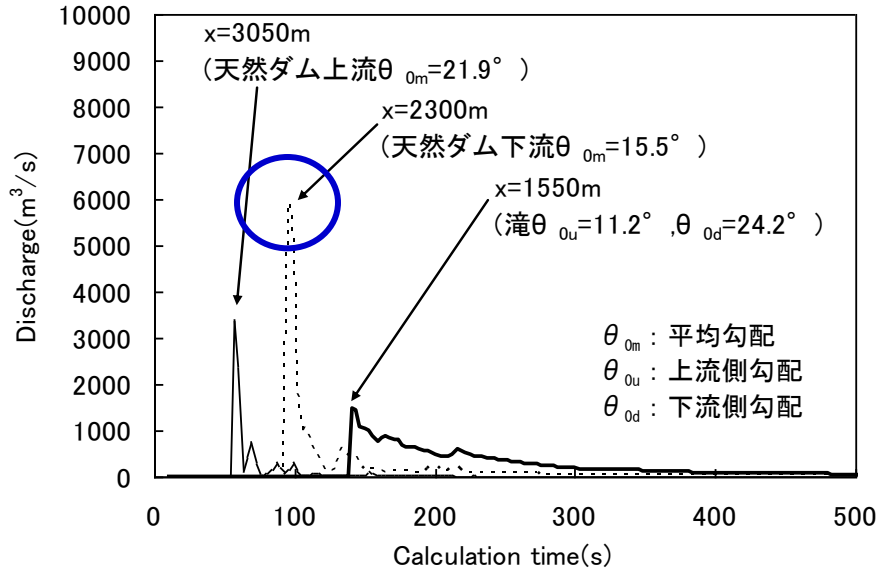
に関する数値シミュレーション

計算結果

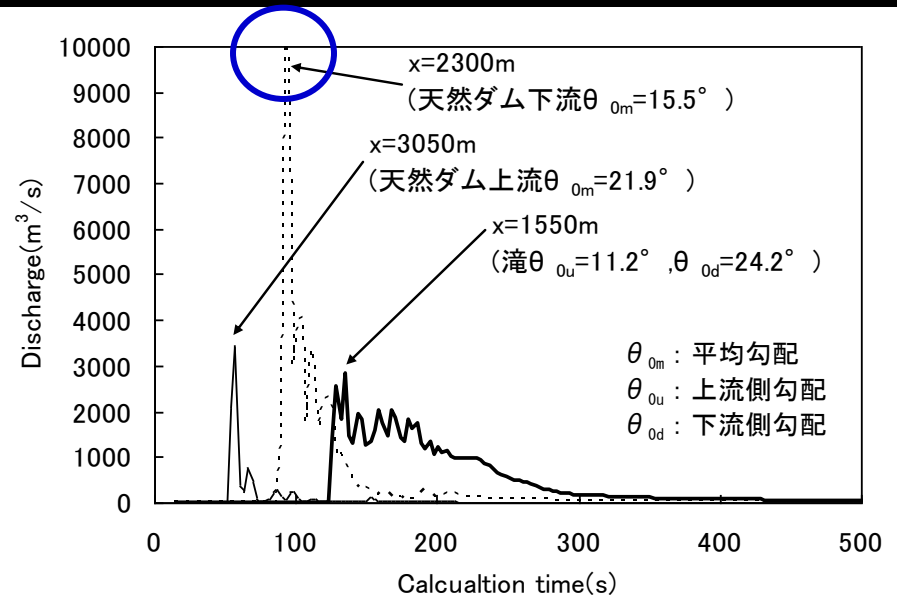
6,000m³/sec



10,000m³/sec



ア) 天然ダムがない場合



イ) 天然ダムがある場合

実際に発生している土石流の発生・流出過程

1999年6月27日土石流の発生・流下実態

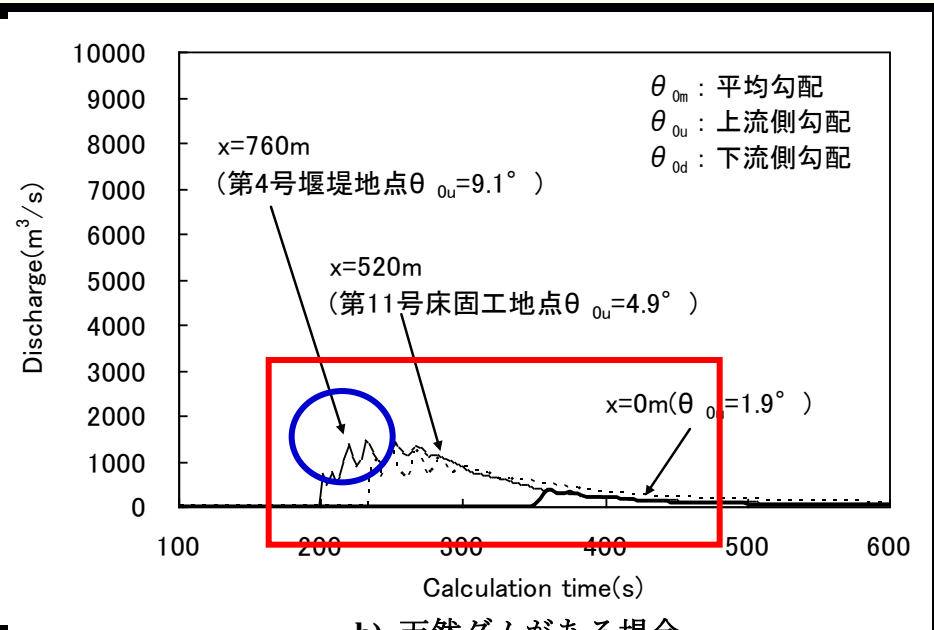
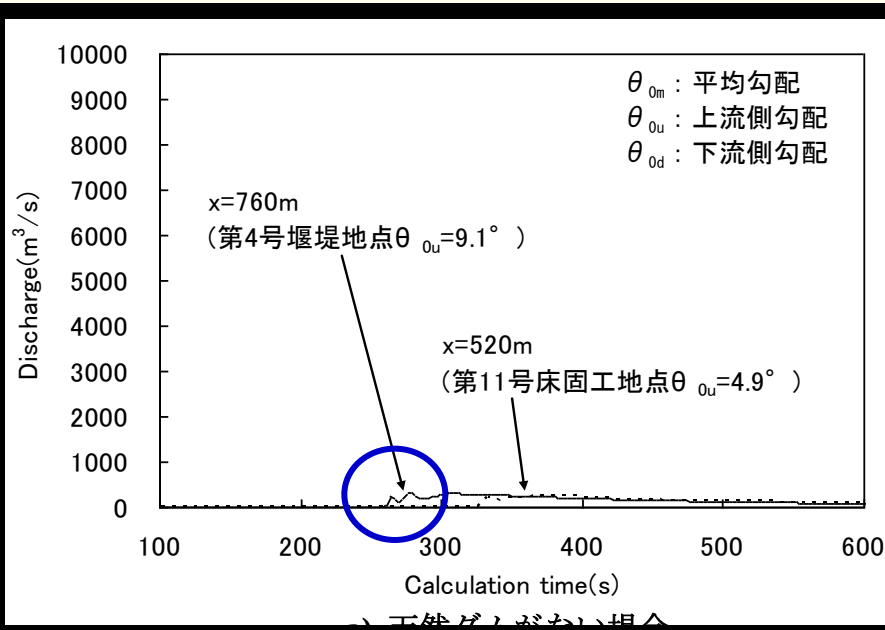
に関する数値シミュレーション

■ 計算結果

340m³/sec



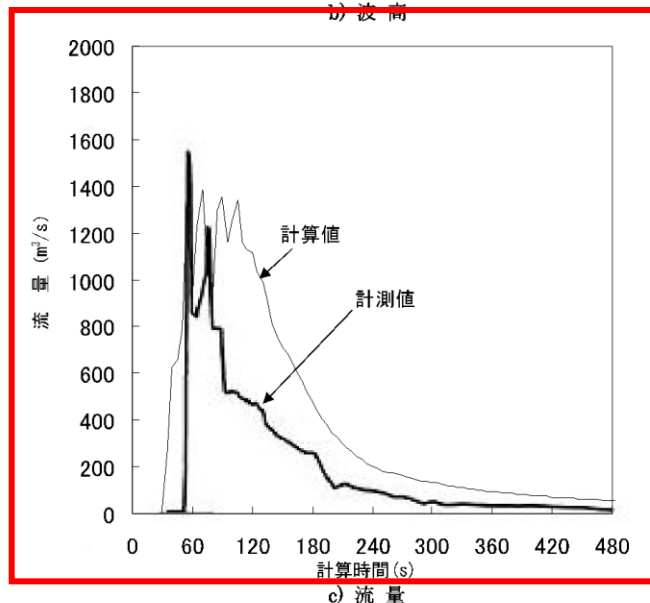
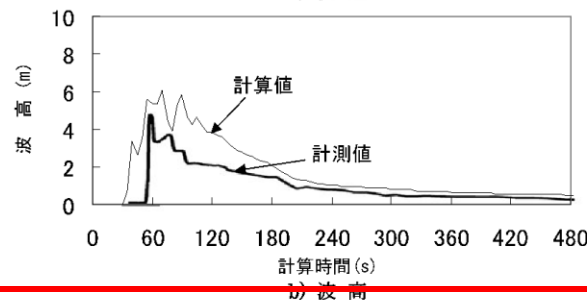
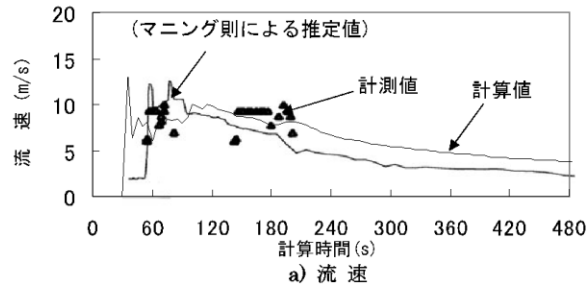
1,500m³/sec ≒ 推定値: 1,556m³/sec



実際に発生している土石流の発生・流出過程

1999年6月27日土石流の発生・流下実態

に関する数値シミュレーション



二層流モデルによって1999年6月27日土石流の実態が表現できた.

土砂の供給条件によって, 下流域への影響が全く異なることが確認できた.

まとめ

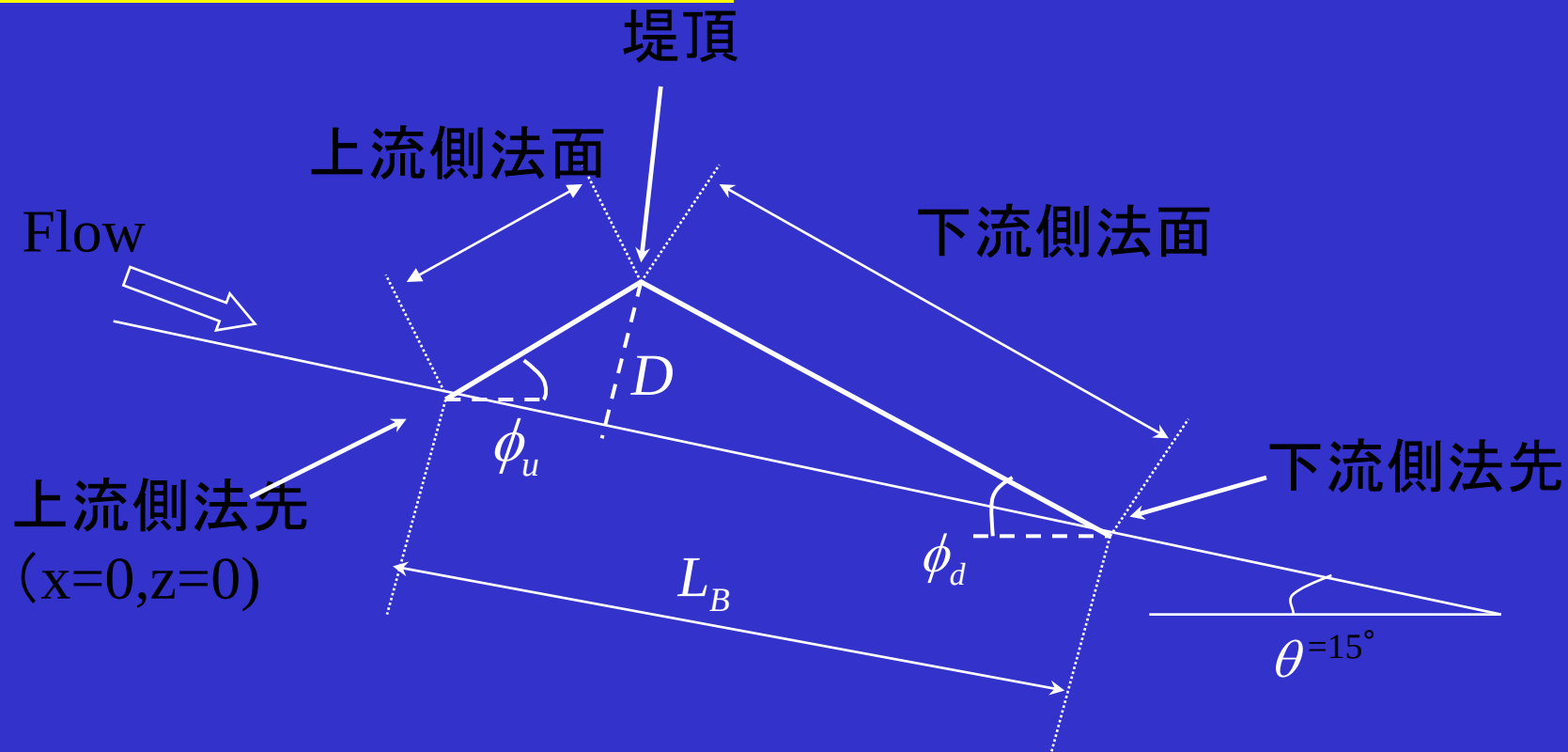
二層流モデルを現地で発生した土石流とに適用し、その適合性を検証するとともに、導入仮定に応じた解析モデルの特性変化について示した。

微細砂の取り扱い

溪床堆積層中の堆積土砂を流動中は間隙流体の一部と見なしうる微細砂成分と土石流の構成則に係わる粗粒分とに分けて取り扱い、土石流の堆積領域では粗粒分が骨格を形成して微細砂成分をその中に閉じ込めて堆積するものと考えて基礎式を整理し、現地を対象とした計算における条件設定の中で粒度構成がとくに考慮すべき項目であること示した。

7. 天然ダムの侵食

対象とした天然ダムの形状



天然ダムの侵食実験

～実験結果～

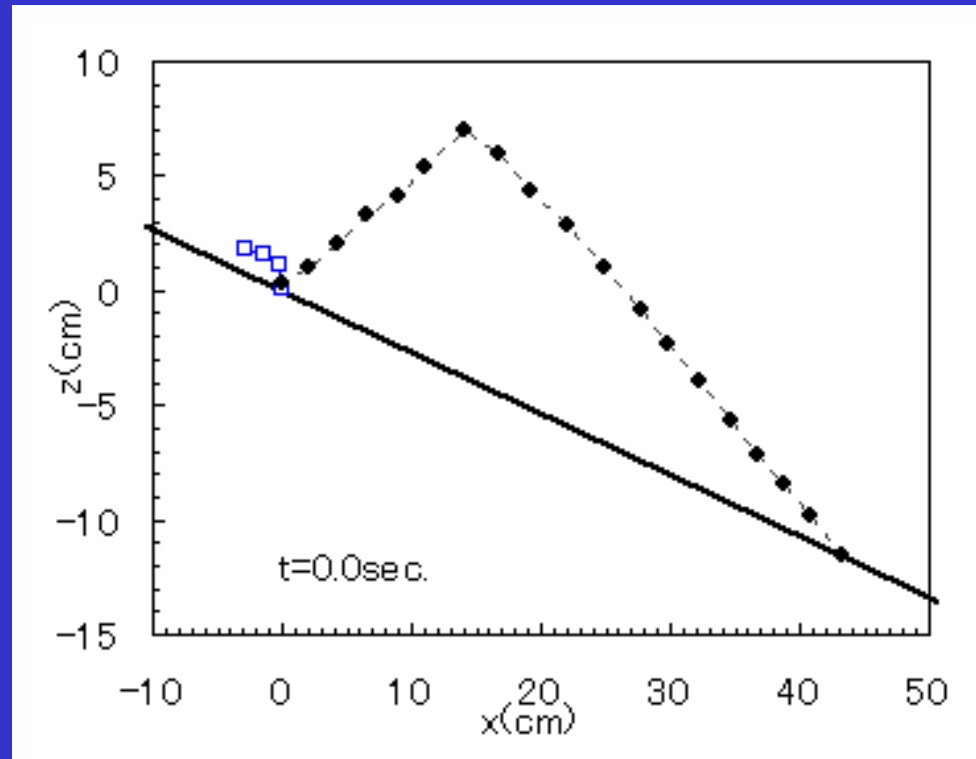


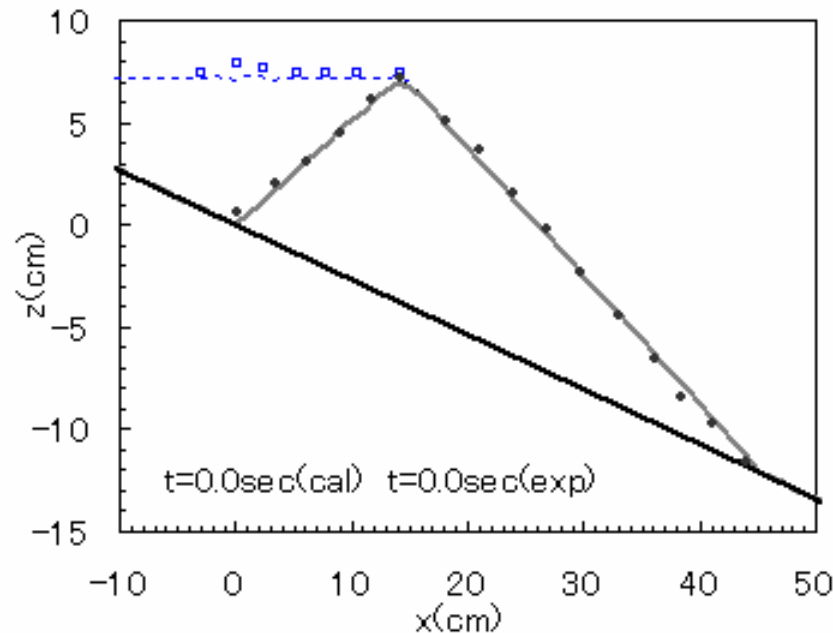
図-3.5 実験結果の一例(三角形状, 水供給20秒)

- ・徐々に水が貯まり,越流を開始する. その間湿润線は堤体内を前進する.
- ・越流開始後,水が下流側法面を侵食しながら徐々に土石流となる.
- ・完全に堤体が飽和してからは,下流側法面を下に凸となるように侵食し, 固定床河床に堆積することなく流下する.
- ・この間の土石流は越流地点では, 水流層とそれにより侵食されている砂礫層の二層で流下し, 徐々に砂礫が全層(一層)に渡って分散する土石流となる.

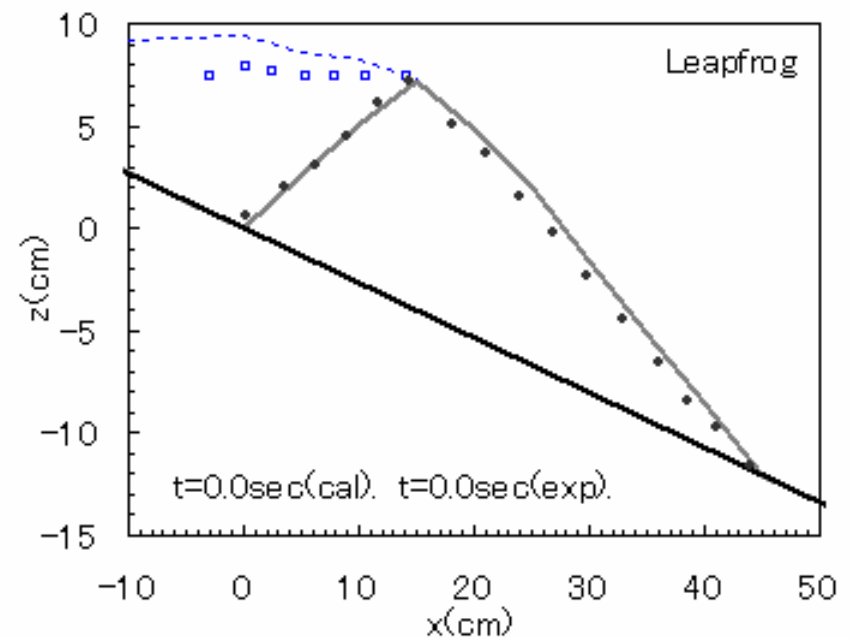
天然ダムの侵食計算結果と実験値との比較

～数値シミュレーション～

□ free surface(exp) × interface(exp) ● bed (exp) △ wetting front(exp)
..... free surface(cal) — interface(cal) — bed (cal)



MacCormack



Leapfrog

図-3.6 計算結果と実験結果の比較 ②

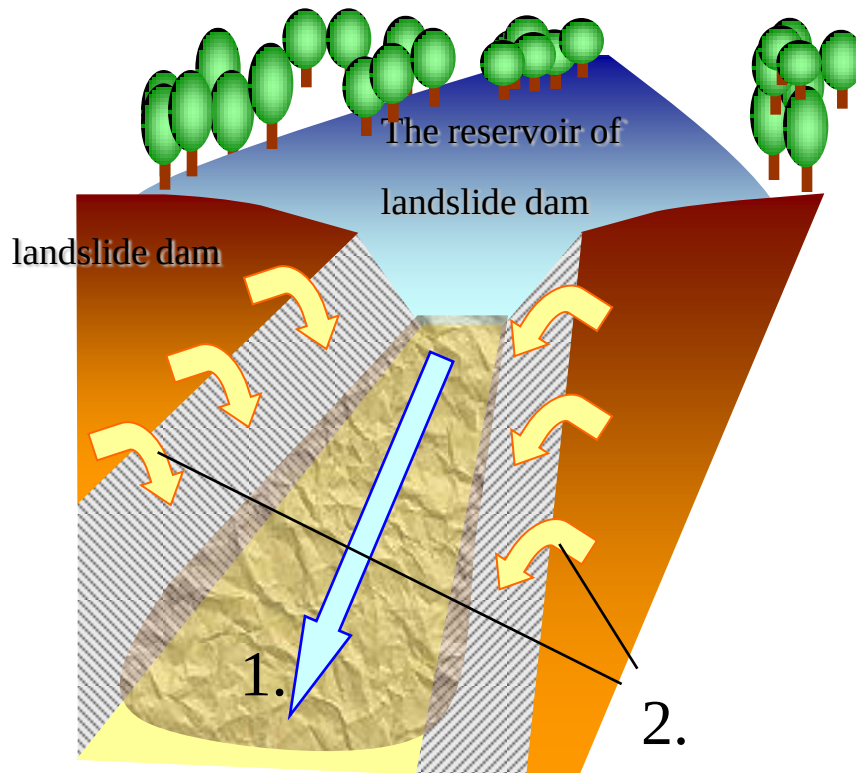
Leapfrog, MacCormackとも、実験値、同様、越流開始地点では水流層と砂礫層の二層で流下し、徐々に砂礫層一層の流下になっていくことが表現できている。



流下時間に誤差があるものの、計算値は実験値に見られる土石流の発生から流下に至る過程を概ね表現できている。

二次元二層流モデルによる天然ダムの侵食計算

- Two Models



We combined two models

1. Two-layer model

To analyze complex flow behavior

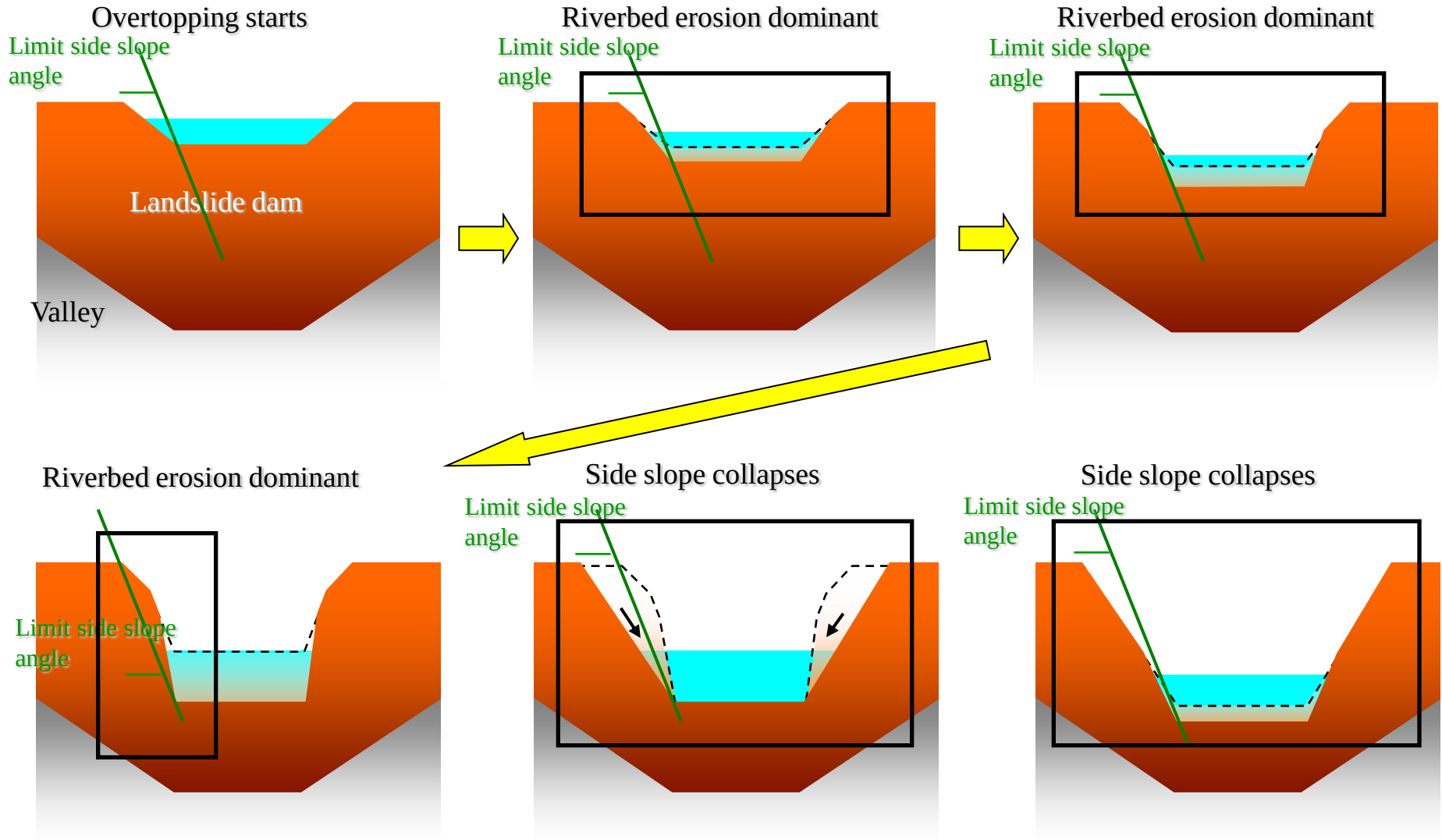
+

2. Slope collapse model

To analyze the sediment taken into the flow from side slope

斜面侵食モデル

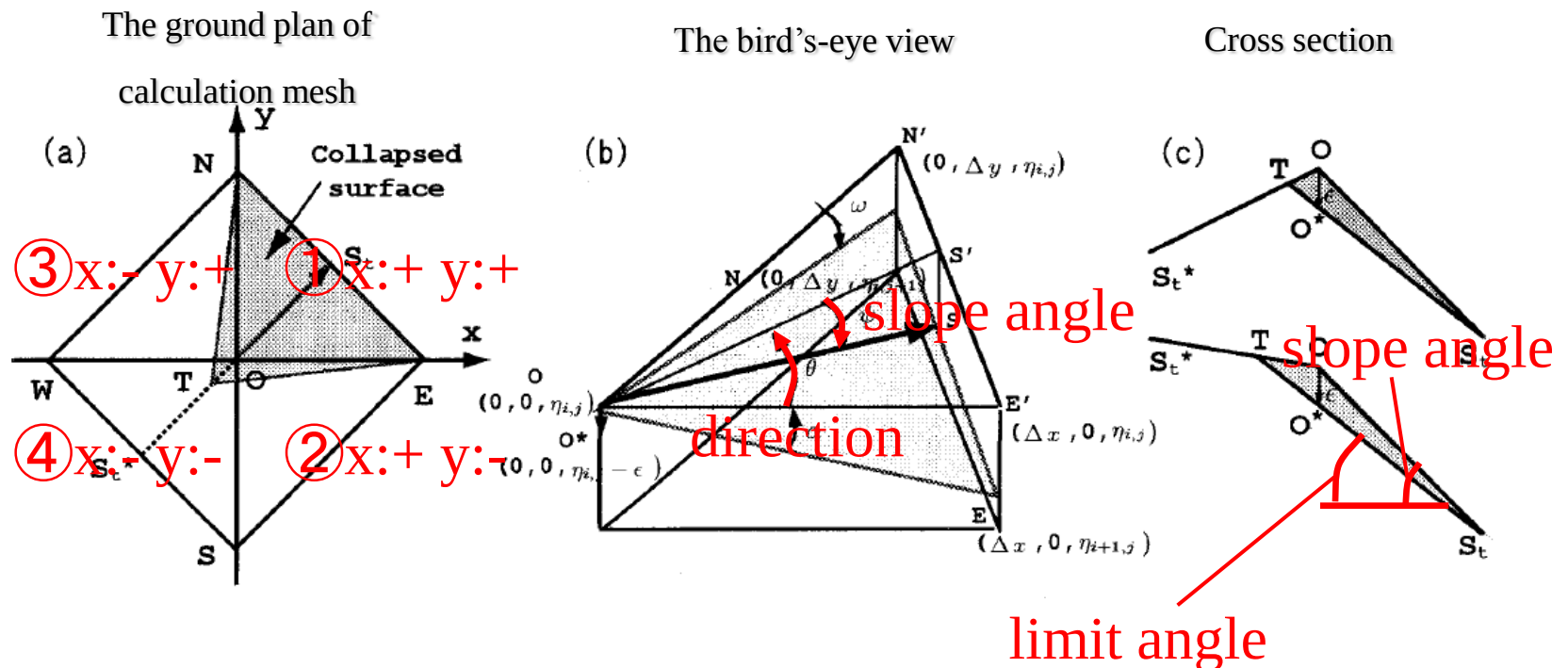
関根先生のモデルを使用



Cross-section profile of the landslide

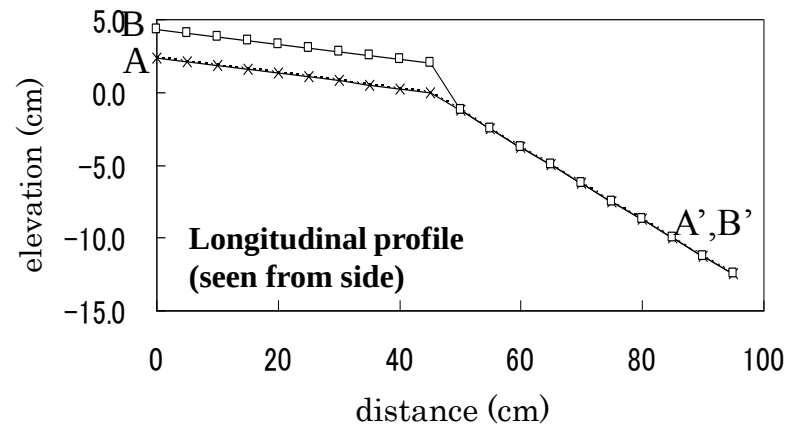
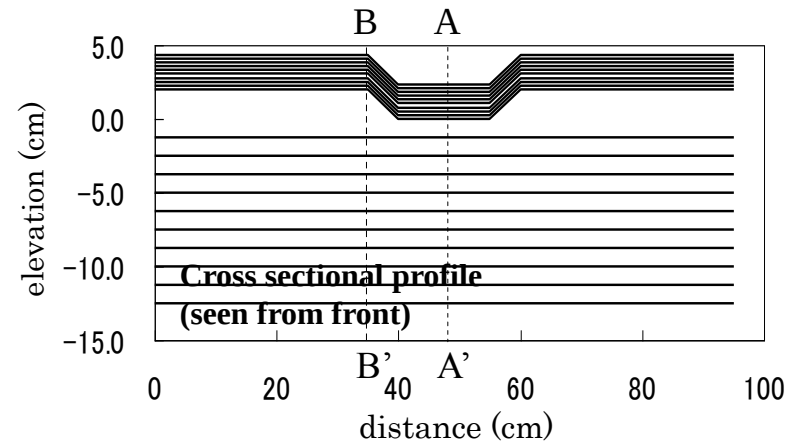
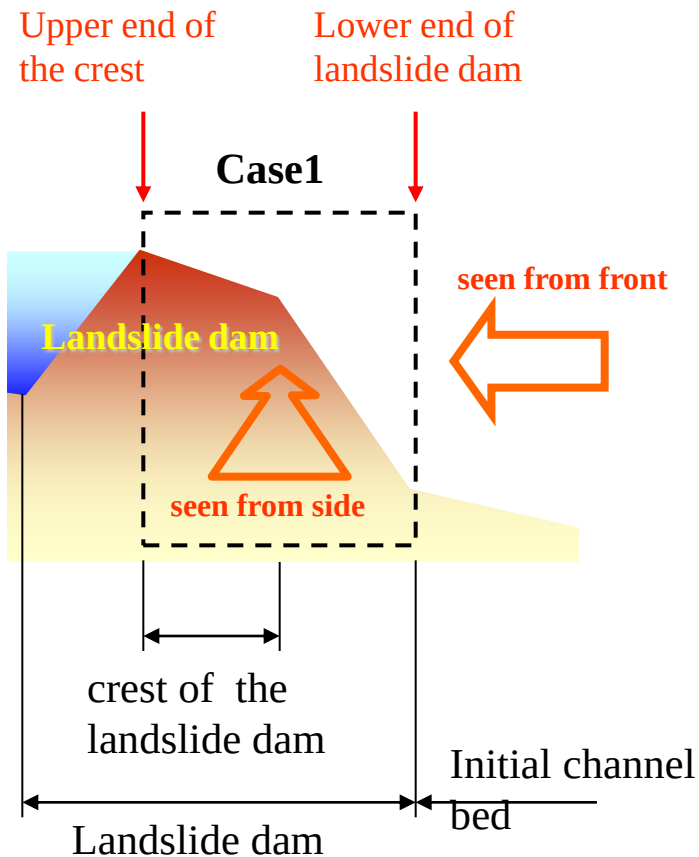
関根先生の斜面侵食モデル

- Conceptual Diagram for Slope Collapse Model (Sekine, 2003)



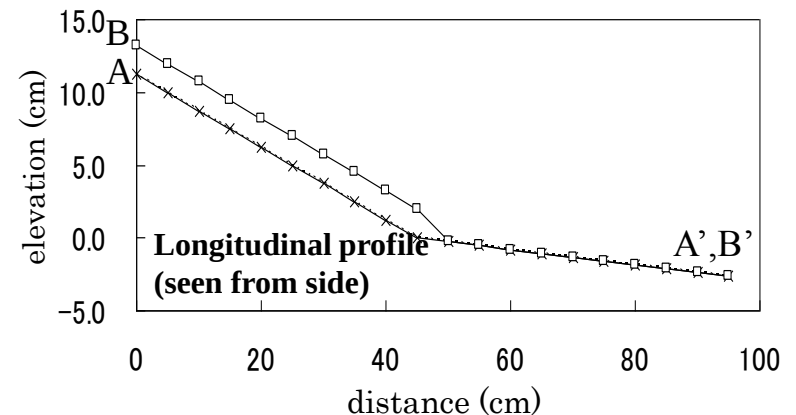
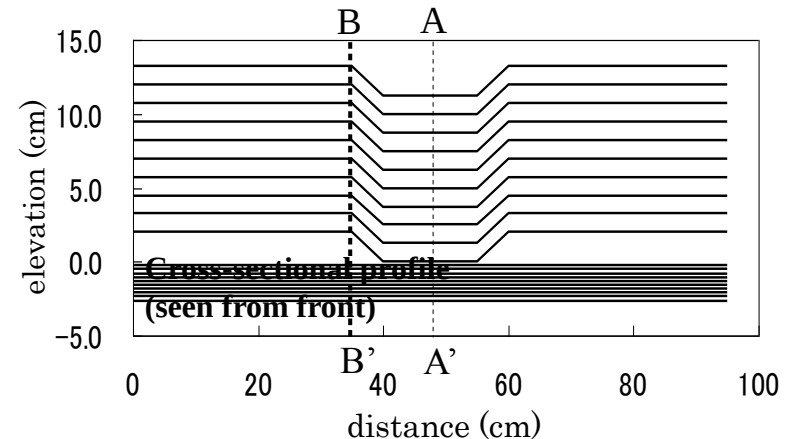
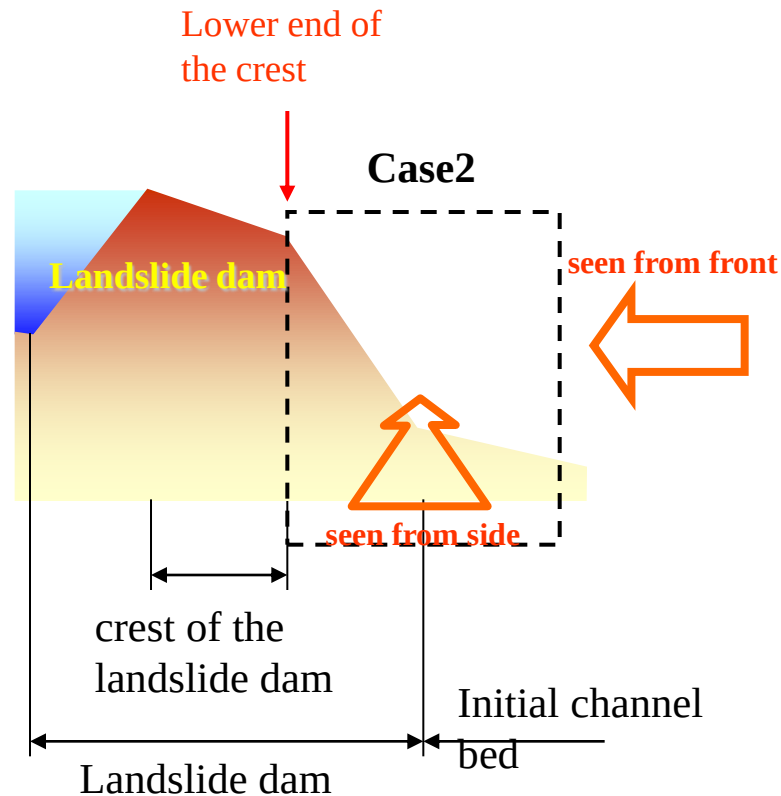
両モデルを組み合わせた数値計算(その1)

- Cases for Calculation



両モデルを組み合わせた数値計算(その2)

- Cases for Calculation

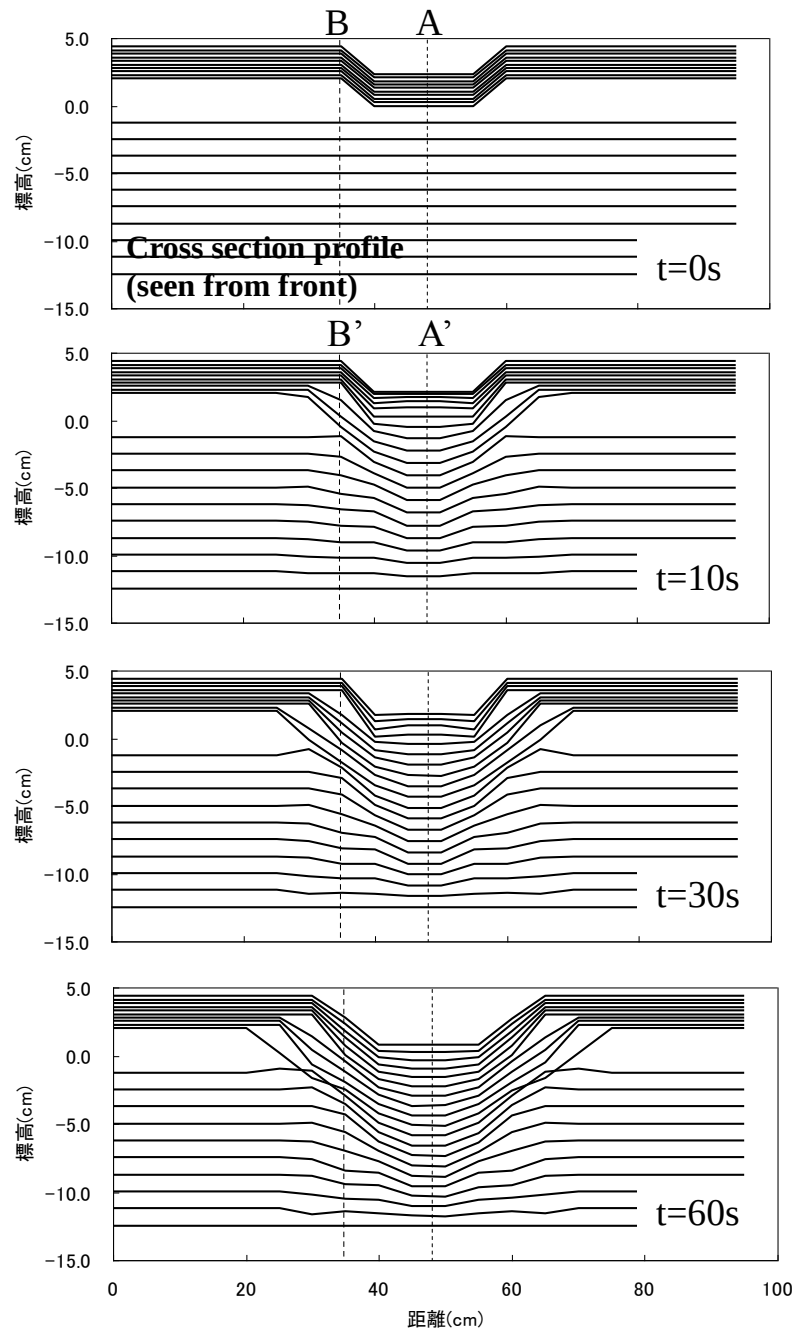


計算条件

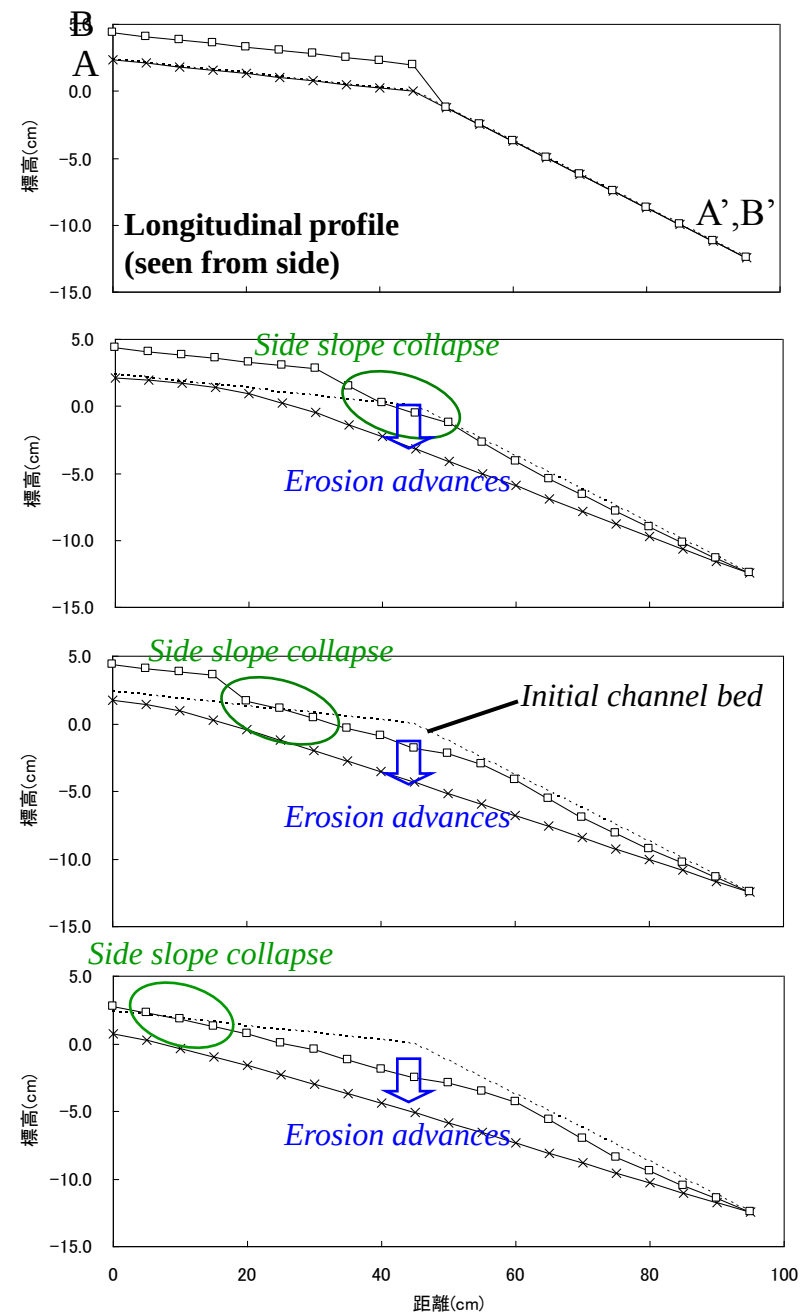
- Calculation Conditions

Parameter	Value	Explanation
dx, dy	5 cm	Mesh size
dt	0.001 s	Calculation pitch time
ρ	1.0 g/cm ³	Density of spacing fluid
σ	2.65 g/cm ³	Sediment density
d_m	0.2 cm	Average particle diameter
c_*	0.6	Sediment layer concentration
ϕ_s	38°	Internal friction angle
ϕ_c	36°	Side bank angle
q_{in}	100 cm ³ /s	Inflow rate
T	120 s	Total calculation time

計算結果 その1

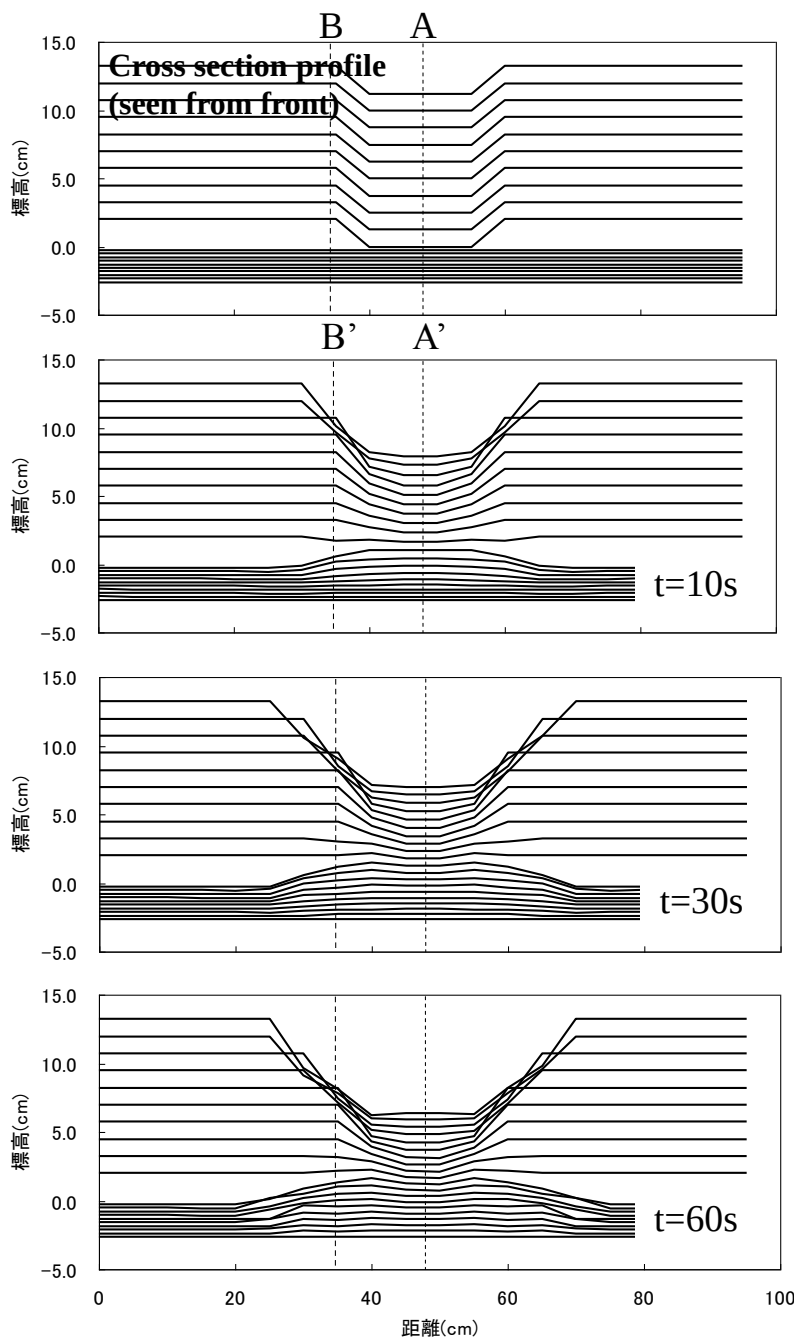


Cross sectional profile

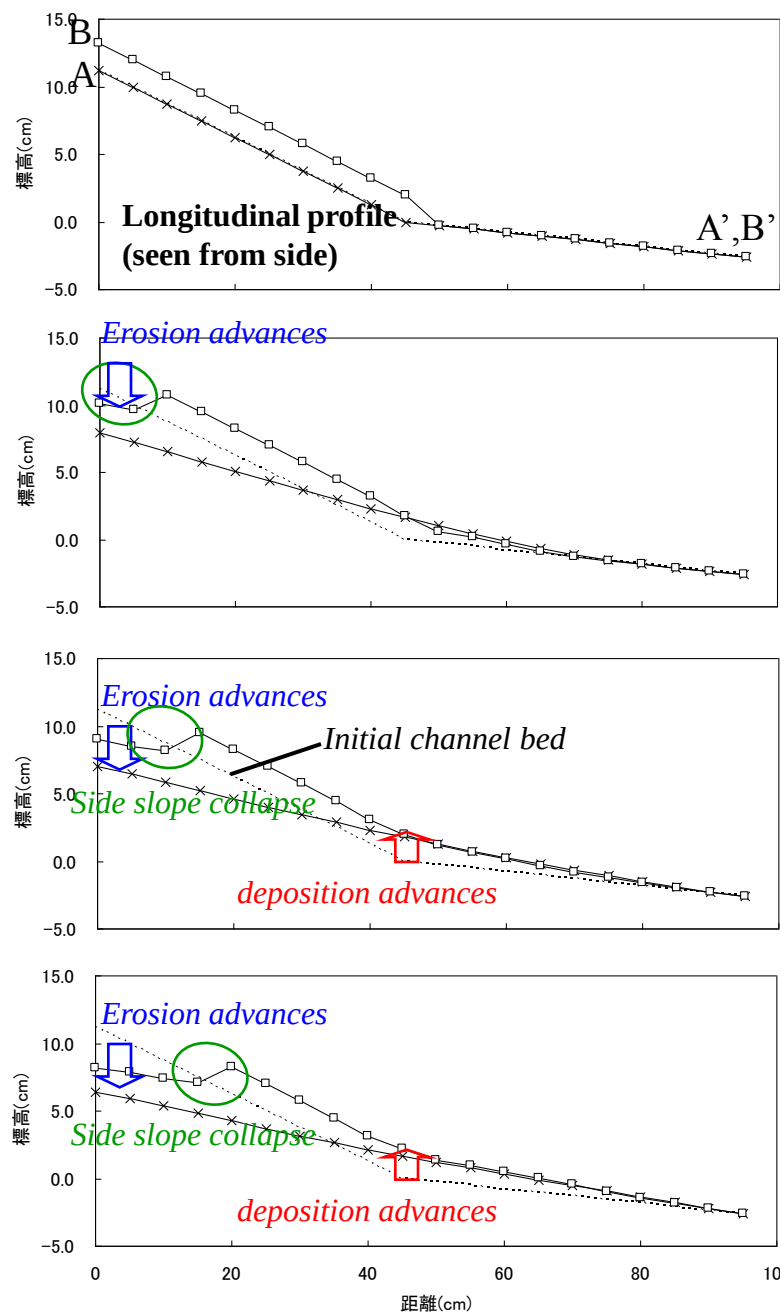


Longitudinal profile

計算結果 その2



Cross sectional profile



Longitudinal profile

おわりに

本話題提供では、土砂災害の最大原因といって過言でない土石流について、流動機構の根幹である構成方程式に考察を加え、ついで、予測モデルを一次元、二次元で提案した。

一次元モデルを水路実験に適用して妥当性を検証するとともに、現地を対象として実際に発生した溪流土石流の流下過程を解析し、それが高い適用性を有していることを明らかにした。

流路の急変部における土石流の流動状況を水路実験により紹介し、流路急変による影響を流れの圧力勾配を平衡勾配に導入することで考慮する方法について説明し、水路実験に適用した結果を示した。

さらに、天然ダムの侵食過程について簡単な数値計算を実施した。今後は、狭窄部区間を種々変えた水路実験や、特殊な物性を持つ材料による水路実験などを実施していきたい。