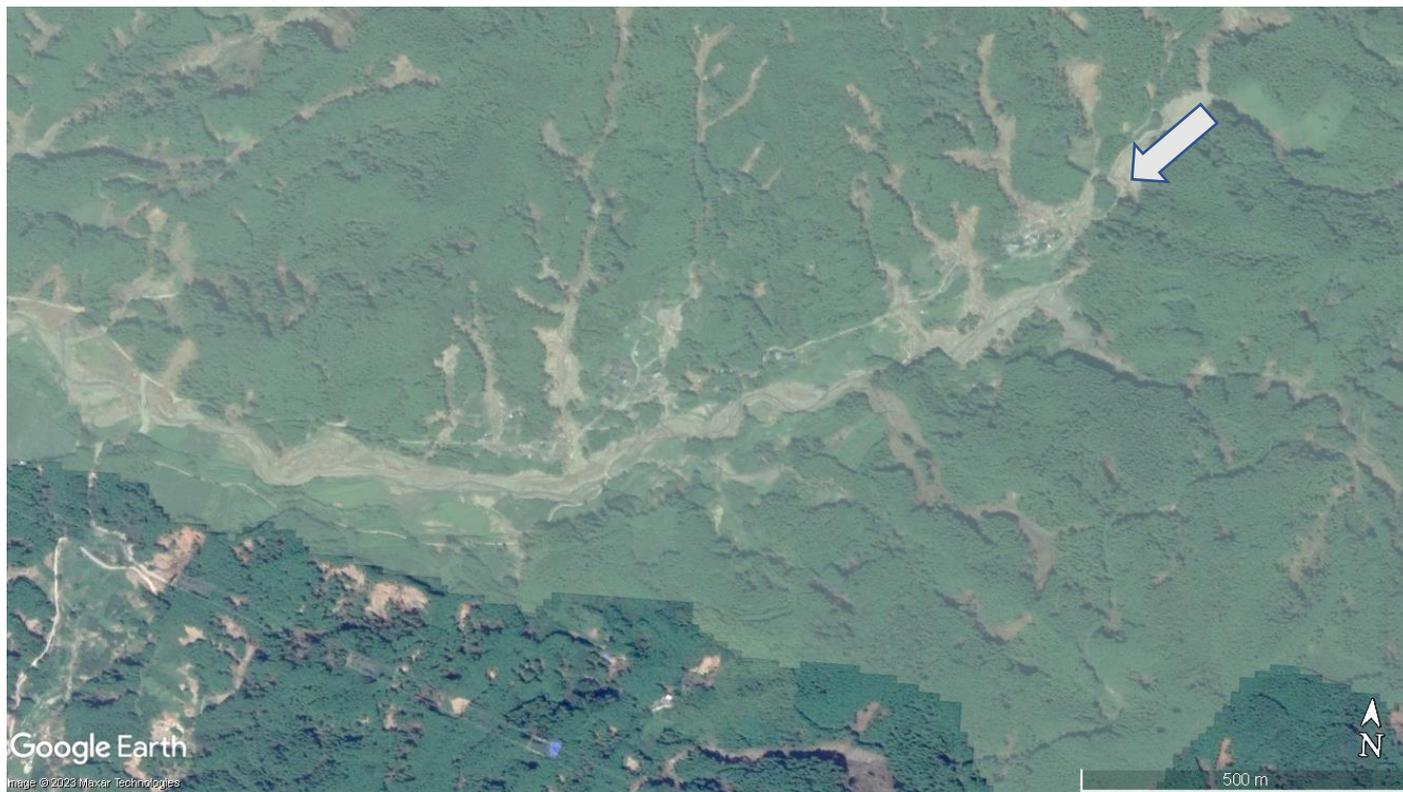


降雨-土砂・流木流出モデルに基づく ハザード予測に関する研究



原田大輔・江頭進治

国立研究開発法人土木研究所
水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



International Centre for
Water Hazard and Risk Management
under the auspices of UNESCO



1. はじめに

- ・多量の土砂・流木を含む洪水氾濫が頻発する中、流域から流出する土砂・流木の量と質を推定できる手法が求められている。
- ・著者らはこれまで、降雨流出解析と同時に、斜面安定解析、質点系方程式による崩土の追跡、単位河道モデルによる土砂・流木の流出解析を組み合わせ、流域からの水・土砂・流木の流出を評価する手法の開発に取り組んできた。
- ・一方で、これらを用いてハザードマップの作成といった予測を行うためには、単にパラメータを合わせるだけでは不十分で、モデルの素過程を明らかにしつつ、予測結果を左右する要素に対して適切な条件設定法を検討する必要がある。
- ・本研究では、降雨-土砂・流木流出モデルを2017年の九州北部豪雨で被害を受けた寺内ダム流域に適用し、これを豪雨時の河川流域のハザード予測に用いるために、予測結果に影響を及ぼす要素の設定法について検討する。

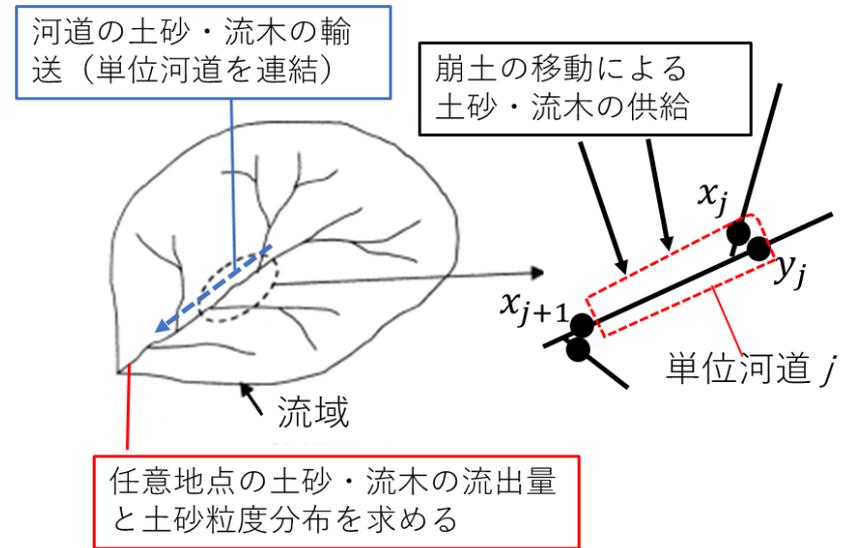
2. 手法

— Rainfall-Sediment runoff (RSR) model —

- ・斜面安定・不安定解析を行い、崩壊の発生、及び崩壊土砂・流木の移動を求める（山崎ら²⁾を参照）。

- ・崩土が移動して河道に到達すれば、土砂・流木は図のように合流点間を1単位とする河道（単位河道）に流入する。

- ・単位河道を直列及び並列に配置することによって流域全体の土砂・流木の流出計算を行う。



単位河道の河床位の変化：

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \sum_i \frac{1}{(1-\lambda)B_jL_j} \{Q_{bi}(x_j) + Q_{bi}(y_j) - Q_{bi}(x_{j+1}) + \underbrace{Vp_{vi}}_{\text{崩土の移動による土砂の流入}}\} - E_i + D_i \quad (1)$$

崩土の移動による土砂の流入

- ・一連の計算法を、土木研究所が開発した降雨流出モデル（RRIモデル）に組み込んだ。Rainfall-Sediment runoff (RSR) model

2. 手法

一移流方程式による流木の解析モデル

$\partial z_b / \partial t > 0$ の場合 (河床上昇時)

c_{drf} : 流木の濃度

S : 河床に堆積している流木

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c_{drf} h}{\partial t} \\ &= \frac{1}{B_j L_j} \{ c_{drf}(x_j) Q(x_j) + c_{drf}(y_j) Q(y_j) - c_{drf}(x_{j+1}) Q(x_{j+1}) \} - c_* \frac{\partial z_b}{\partial t} c_{drf} r(t, x, y) \\ & - v_n c_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \end{aligned}$$

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

$\partial z_b / \partial t < 0$ の場合 (河床低下時)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} \\ &= \frac{1}{B_j L_j} \{ c_{drf}(x_j) Q(x_j) + c_{drf}(y_j) Q(y_j) - c_{drf}(x_{j+1}) Q(x_{j+1}) \} - c_* \frac{\partial z_b}{\partial t} \frac{S}{D} r(t, x, y) \\ & - v_n c_{drf} p_b \delta(x' - x_i, y - y_i) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial z_b}{\partial t} \frac{S}{D} r(t, x, y) + v_n c_{drf} p_b \delta(x' - x_i, y - y_i) + V_{drf}$$

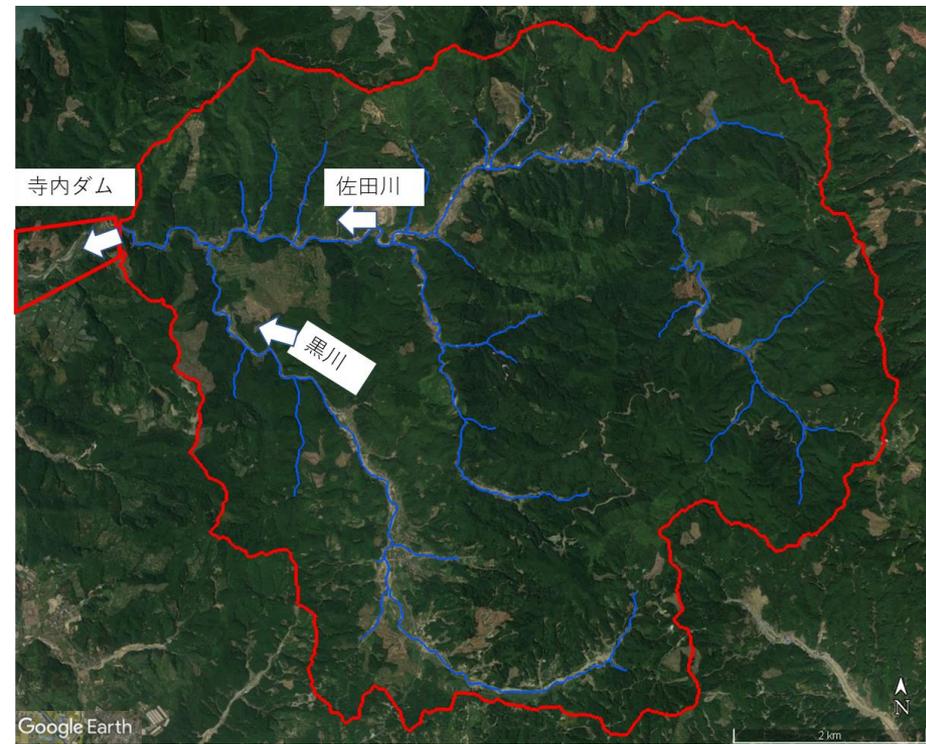
3. 寺内ダム流域への適用

(1) 九州北部豪雨時の寺内ダム流域の状況

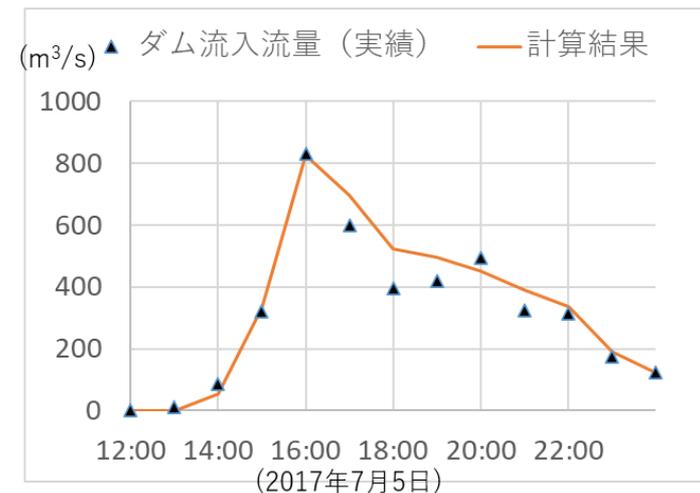
- ・ 7月5日7時～7月6日4時：約426mm
- ・ 南側の黒川流域では12時間雨量が600mm超
- ・ 土砂発生量：約173万m³
- ・ ダムの土砂堆積量：約111万m³
- ・ ダムに流入した流木量：約10,000m³（速報値）
- ・ ダムでの流木処理量：約8510m³

(2) 計算条件

項目	値
メッシュサイズ (m)	10×10
土層厚 (m)	0.7
N: 等価粗度係数/ n: 河道の粗度係数	0.4 /0.03
λ：空隙率	0.475
φ：内部摩擦角(度)	35
崩土の移動幅(m)	10
ρ _f ：微細土砂含有率	0.3
c：粘着力 (kN/m ²)	2.0
σ：土粒子質量密度 (kg/m ³)	2650
ρ _w ：水質量密度 (kg/m ³)	1000
立木の密度(m ³ /m ²)	0.01

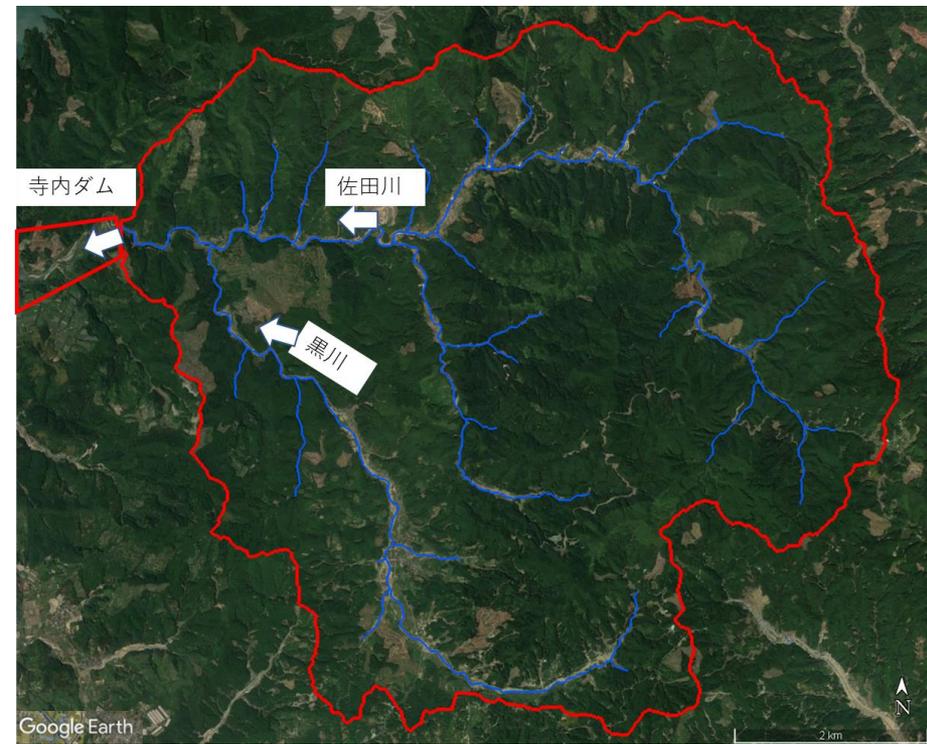
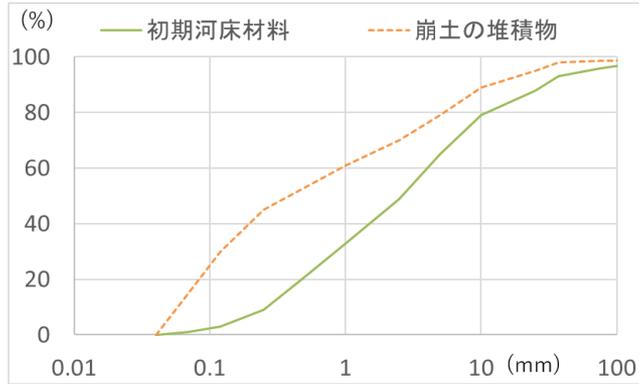


・ ダム流入流量のキャリブレーション



3. 寺内ダム流域への適用

- 初期河床材料の粒度分布



(3) 最上流の単位河道の勾配設定

- 単位河道での土砂輸送は掃流砂・浮遊砂
 - 河道への横流入は崩壊・土石流
- 上流端のどこまでを単位河道として設定するかが解析結果に影響を及ぼす
(単位河道として定義されたメッシュより上流側の溪流では、土石流が発生しない限り土砂・流木の輸送が計算されないため)
- 最上流の単位河道の勾配を3° ~ 15° の範囲で変化させ、その影響をみる。

(4) 流木の条件

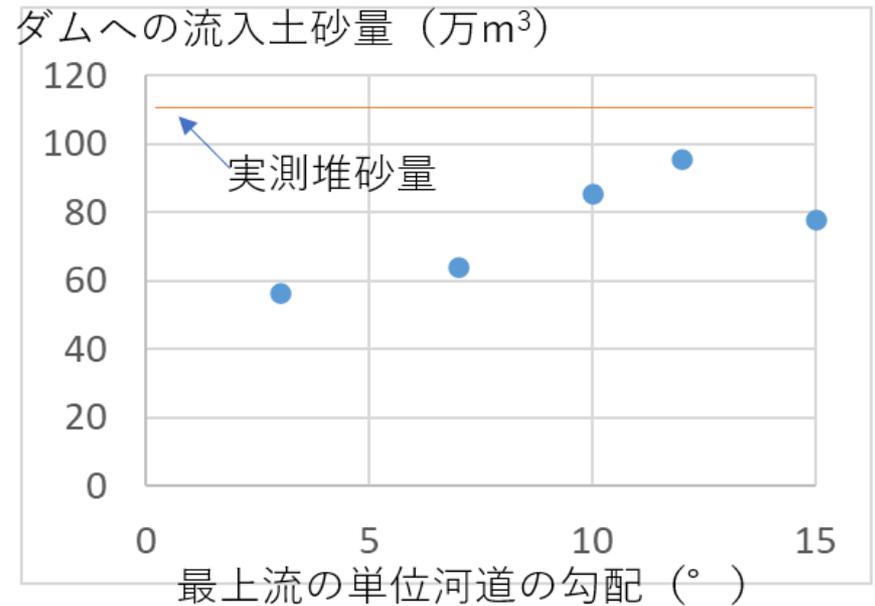
- 山地の立木密度を0.01(m³/m²)とする
- 単位河道に初期に堆積している流木は0とする
(流木供給は全て斜面から)

4. 結果と考察

寺内ダムへの実測堆砂量と計算結果の比較

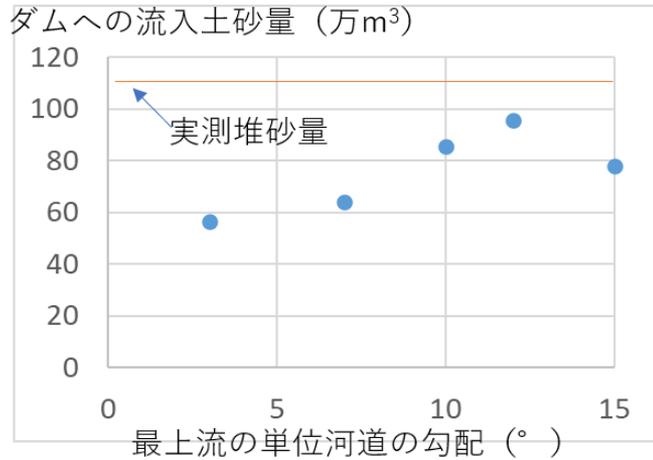
(1) 最上流の単位河道の勾配の影響

	計算条件		計算結果	
	最上流の単位河道の勾配 (°)	ダムに流入する土砂量 (万m ³)	単位河道に横流入する土砂量 (万m ³)	ダムに流入する流量 (m ³)
Case1	3	57	106	15055
Case2	7	64	116	14359
Case3	10	86	149	12279
Case4	12	96	143	10064
Case5	15	78	117	4539
Case3-2 (Q _{deb} 1.2倍)	10	91	178	13528
Case3-3 (Q _{deb} 1.5倍)	10	100	223	17020
Case3-4 (Q _{deb} 2倍)	10	110	297	27802
実測値		111	(173)	8510~10000



- ・ 最上流の単位河道の勾配は計算結果に少なからず影響
- ・ 特に3° や7° と設定した場合の結果は10° や12° と設定した場合に比べて小さい。
- ・ 15° と設定した場合も、やや小さい

4. 結果と考察



土石流の侵食・堆積速度E:

$$\frac{E}{v} = c_* \tan(\theta - \theta_e)$$

崩土の平衡勾配 θ_e :

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

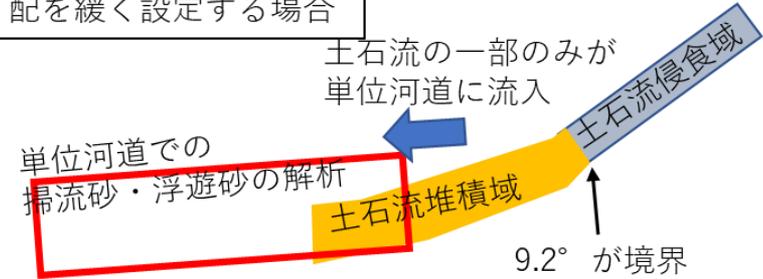


$\theta_e < \theta$ のとき: 土石流発達

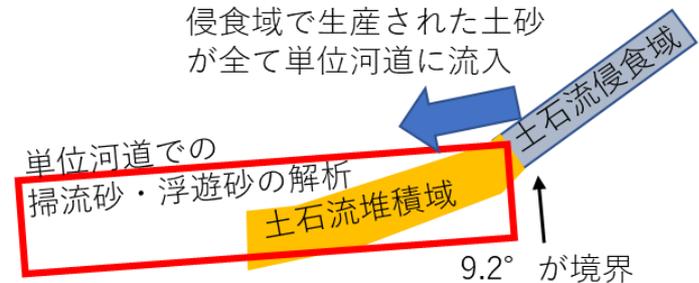
$\theta_e > \theta$ のとき: 土石流堆積

→ 今回の計算条件で、 θ_e は凡そ 9.2°

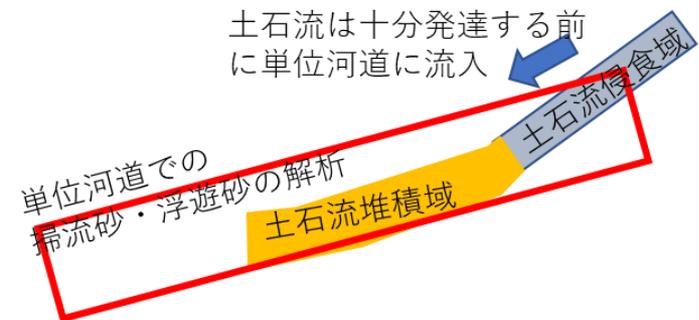
最上流の単位河道の勾配を緩く設定する場合



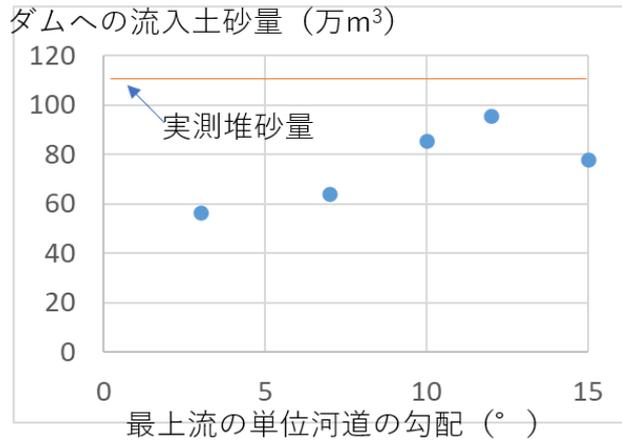
最上流の単位河道の勾配を 9.2° に設定する場合



最上流の単位河道が土石流侵食域を含む場合



4. 結果と考察

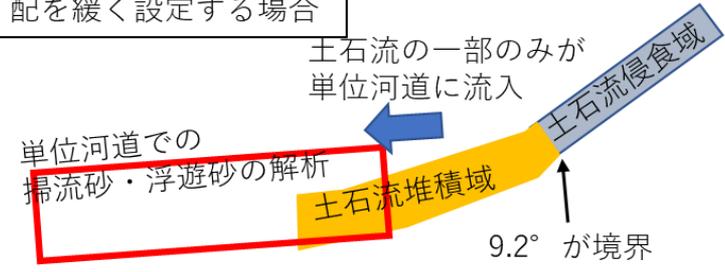


・最上流の単位河道の勾配を 3° や 7° と緩く設定する場合、土石流の一部は単位河道に流入する前に斜面に堆積
→単位河道に横流入する土砂を少なく評価

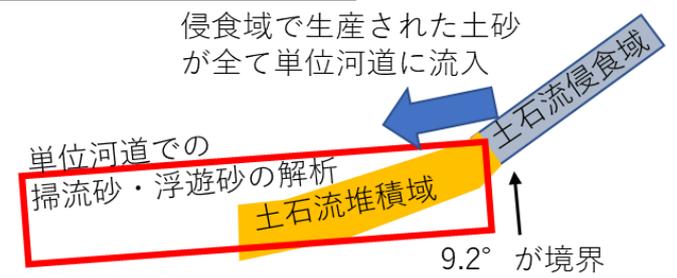
・土石流堆積域を単位河道が含むように設定する場合、侵食された崩土は全て単位河道に流入。
→ダム地点では解析土砂流入量と実測ダム堆砂とが近い値を示す。

・土石流の侵食域を含む急勾配な領域まで河道として設定すれば、土石流が十分に発達する前に単位河道に流入。
→単位河道に横流入する土砂を少なく評価

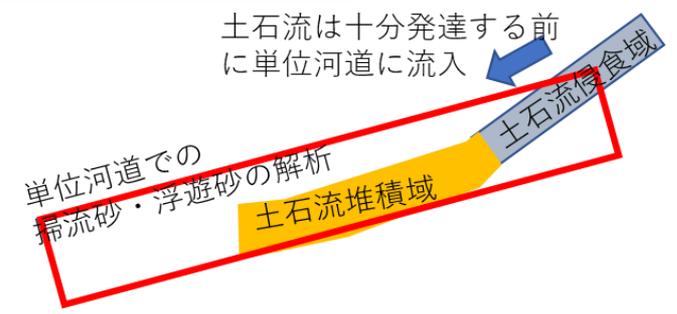
最上流の単位河道の勾配を緩く設定する場合



最上流の単位河道の勾配を 9.2° に設定する場合



最上流の単位河道が土石流侵食域を含む場合



土石流と掃流砂・浮遊砂の境界領域の設定法が重要

4. 結果と考察

(2) 流木について

・ 最上流の単位河道の勾配が急なほど流木流入量が少ない

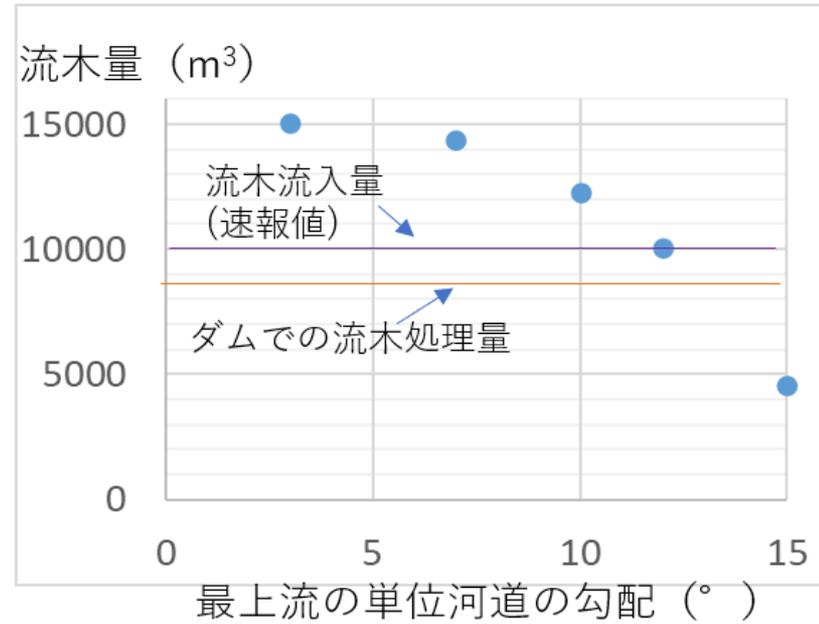
→土砂の結果と逆の傾向

→急勾配（例えば 15° ）地点の流域面積は小さいので、雨量強度が大きくても流量は小さい。

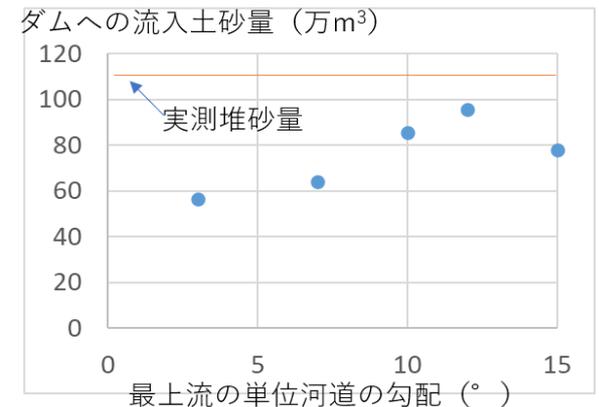
→水深が小さいために流木が流出しない条件になりやすい。

→土砂は水深が小さくても掃流力に応じて輸送されるが、流木は十分な水深がなければ輸送されない。

ダムへの流木の流入量と最上流の単位河道の勾配の関係



ダムへの土砂流入量と最上流の単位河道の勾配の関係



4. 結果と考察

(3) 横流入する土砂量の影響

	計算条件		計算結果	
	最上流の 単位河道 の勾配 (°)	ダムに流入 する土砂量 (万m ³)	単位河道に 横流入する 土砂量 (万m ³)	ダムに流 入する流 木量 (m ³)
Case1	3	57	106	15055
Case2	7	64	116	14359
Case3	10	86	149	12279
Case4	12	96	143	10064
Case5	15	78	117	4539
Case3-2 (Q _{deb} 1.2倍)	10	91	178	13528
Case3-3 (Q _{deb} 1.5倍)	10	100	223	17020
Case3-4 (Q _{deb} 2倍)	10	110	297	27802
実測値		111	(173)	8510~ 10000

・ Case3を基準に、土石流の体積をそれぞれ1.2倍、1.5倍、2倍とした計算を実施。

・ 結果、ダムに流入する土砂量は単位河道に横流入する土砂量に比例して増加してはならず、頭打ちに近い。

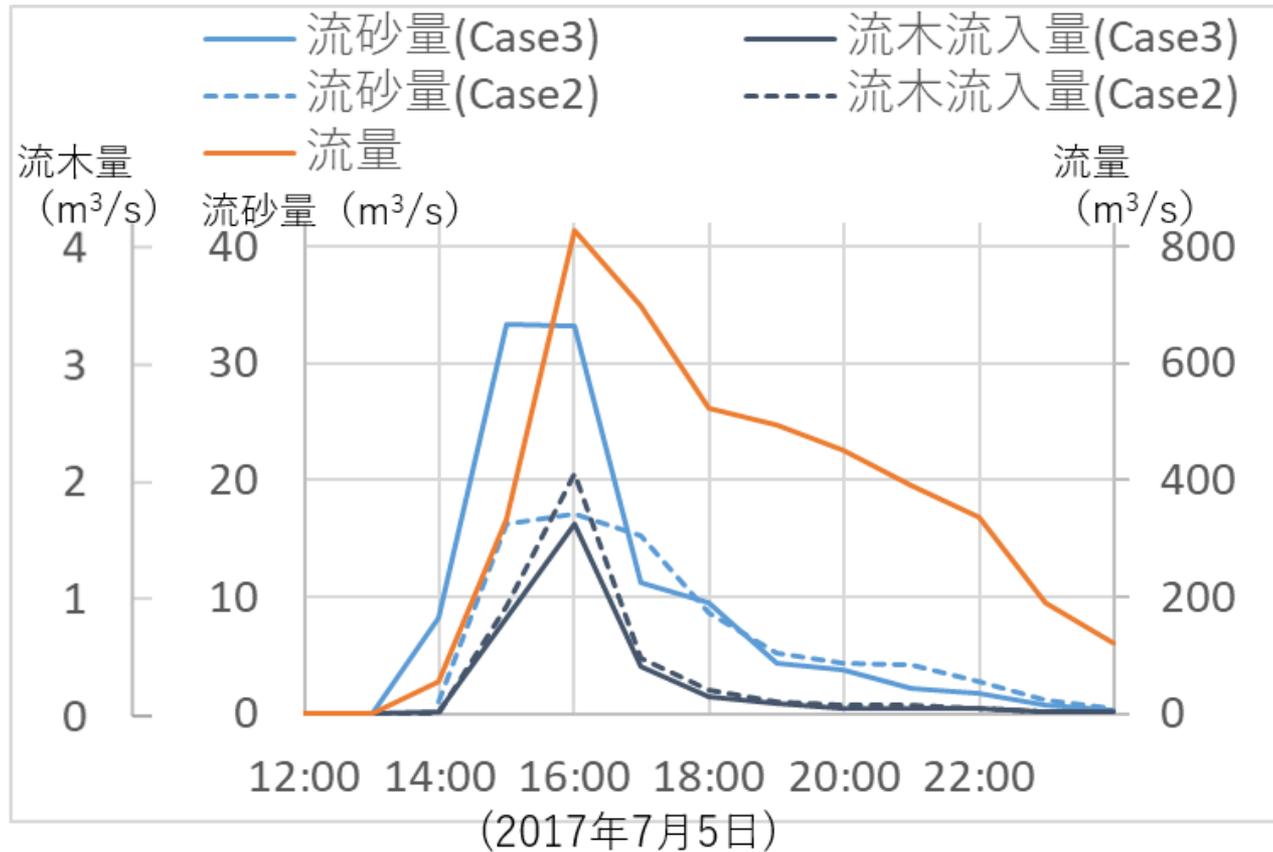
→河道が輸送しうる量・質の土砂が十分に土石流によって供給されており、それ以上に横流入量が増えても流出土砂の総量あまり増加しない。

・ 一方、ダムに流入する流木は横流入する土砂量に比例するように増加。

→分級を伴う土砂輸送とは異なり、流木の濃度に上限がないため。

4. 結果と考察

(4)ダムに流入する土砂・流木の時系列データ



- ・ Case2とCase3の結果を比較。
- ・ 土石流の影響がより顕著なCase3では、土砂流入のピークが流量ピークより少し早い
→崩壊・土石流が発生する主な時間が水の流出のピークよりも早いため
- ・ 流木の流出ピークは水の流出と対応
→土砂とは異なり水深がある程度なければ流木が輸送されないため

5. 結論

- ・ 豪雨時の土砂・流木の生産，輸送過程について，降雨-土砂・流木流出モデル(RSR model)を用いて求める手法を示した。
- ・ この手法をハザード予測に用いるために，予測結果を左右する要素に対して適切な条件設定法を検討した。

- ・ 最上流の単位河道の勾配を，土石流の堆積勾配の上限値に近い10度程度を含むようにこれを設定すれば，単位河道への土石流の横流入と，単位河道での土砂輸送過程を適切に評価できる。
- ・ 単位河道での土砂・流木の輸送過程に関して，土砂は水深が浅くとも掃流力に応じて輸送されるが，流木は水深が浅ければあまり輸送されないため，土砂の流出が流木の流出よりも早い。

- ・ 流域内の任意地点における流砂・流木の通過量を時系列で求めることができ，ハザードマップや避難計画を作成する上で有用。
- ・ 一方で、上記の要素以外にも、土砂の粒度分布や川幅の設定法にも影響を受けるため、ハザード予測にあたってはパラメータを現実的な値の中で変化させつつ，ある程度の幅をもって予測結果を示すことも有用と考える。