

**オーガナイザー：東京建設コンサルタント 渡邊明英，
進行：名古屋大学 椿涼太**

趣旨説明（東京建設コンサルタント 渡邊明英）

河川部会は他の部会との連携を図るものであるが、水文、特に砂防分野との技術交流はあまりなかったことから、今回の OS を企画した。

直近 20 年で名前のついた水害を挙げると、明らかに増加傾向にあり、この 10 年ではほぼ毎年のように起きている。豪雨、土砂災害の名前の付いた災害がかなり多い。雨の降り方、災害の起きる形態の頻度のようなものが変わってきている可能性がある。

1999 年 6 月の広島土砂災害を契機に土砂災害防止法ができ、今年で 20 年が経つ。しかし、雨の降り方、災害形態が変わってきているため、対応が間に合わず、なかなか実効性のある対策ができていないのが実情である。近年は線状降水帯等の一部地域の集中豪雨や、同時多発的な豪雨が発生する傾向にある。斜面崩壊による急激な土砂生産イベントは、山地河川や上流河川へのインパクトが非常に大きい。山から川への土砂供給の実態を理解し、対策を考えていく必要がある。

土砂災害が起こる場所はだいたい決まって来るはずであり、一般的にはリスクマップ、ハザードマップの周知、砂防施設の整備が必要とされるが、これらだけでは十分でない可能性もある。河川への土砂供給については、どの場所から、どれくらいの量、どのような粒径の土砂が、いつ供給されるのかを知ることが重要となる。この条件に応じて河川側としてはどこまで対応できるのかを検討していくことになる。河川側の課題は、解析法の是非ではなく、従来の枠組みを超えた技術の構築であり、そのために砂防分野とどのようなことを情報交換していくべきかが重要となる。水文解析技術に関しては、雨量から流量への変換過程、流出モデルの精査が困難であり、水文分野との情報交換はしているが、それ以上は進んでいないのが実情である。現在取り扱っている降雨確率とは何なのか、雨の降り方が変わってきている中で、将来降雨の確率を今後どう考えていくのかについては、河川側にとって必要な情報となる。

これら課題について、砂防分野から江頭先生、水文分野から山田先生にご講演いただく。

1. 主旨説明

a) 背景 (名前付水災害の傾向)

1999年 6.29豪雨災害(広島土砂災害・福岡豪雨)

2000年 東海豪雨

2004年 7月新潟・福島豪雨, 福井豪雨

2008年 都賀川水難事故

2009年 中国・九州北部豪雨 ※

2011年 東日本大震災(津波災害)

7月新潟・福島豪雨, 台風12号紀伊半島豪雨 ※

2013年 伊豆大島土砂災害

2014年 広島市土砂災害

2015年 関東・東北豪雨

2016年 連続台風及び前線による北海道・東北豪雨水害

2017年 九州北部豪雨 ※

2018年 西日本豪雨災害 ※

(※豪雨に伴う顕著な土砂災害あり) 3

1. 主旨説明

b) 近年の災害の特徴

● 線状降水帯などの豪雨に特徴づけられる災害の増加

● 豪雨災害の特性

中規模豪雨・土砂災害の広域での多発型

土砂の生産流出・山地斜面崩壊のイベント

山間地河川・上流側支川・中小河川への影響

時間空間軸上で局所的にインパクト大

上流部河道内への一次堆積土砂

下流への流送 = 時間的・空間的に分級・分散

(徐々に平滑化される)

2. 課題と議論の対象について

c) 議論すべき点(河川側からどう考えるべきか?)

【一般的な課題】

- 山地から河口まで流域一体的な河川計画・管理のあり方？
今後どうすべきか？

【境界領域での他分野との連携】

- 何ができるのか？これまで十分に議論されてきたか？
境界領域における河川技術？

山地流域における土砂水理現象とこれらを解くための鍵

土木研究所 ICHARM 江頭進治

1. 豪雨に伴う山腹崩壊・土石流の発生と発達・減衰（堆積）過程

- 主として 2017 年九州北部豪雨, 2018 年西日本豪雨の広島災害の事例を用いて, これまで行ってきた災害調査や基礎研究を紹介し, どれくらい技術的に迫れるのかについて説明したい.
- 赤谷川の例: 山腹には崩壊が無数にある. 崩壊の移動過程で土石流が形成されている. このような移動痕跡が多く見られ, 土砂が洪水とともに暴れて流れていたことが分かった. また, 土石流堆積物には流木が多く含まれている箇所も見られる. こういったものが洪水時に流されることで, 河川の境界条件になる. また, 河床材料は縦断的に明らかに分級されていることが分かった. (p.3,4,6)
- 西日本豪雨の例 (広島県坂町, 総頭川): 山腹崩壊が起こって, それが流れ出した. 洪水によって流された. 河道を侵食して土石流堆積物と河道侵食物が流出し, 市街地に堆積した. (p.7)
- 急なところで山腹崩壊が起こって, それが流れ出して土石流を形成する. この時, 沢山の流路工を侵食して発生する土砂も併せて流下し, 概ね 4~8 度の区間で止まり, その一部は下流に流下する. 崩壊, 土石流の流下, 堆積までをきちんと評価できないと, 下流河道の洪水と土砂の輸送を適切に評価できないことになる. (p.8)
- 山腹崩壊発生の予測: 表面流, 浸透流に加えて表土層の安定・不安定解析モデルを入れることで, 降雨外力に対する山腹崩壊の時空間分布を推定できる. 崩壊土砂の流出: 崩壊土砂は, 移動過程で流動化し, 土石流を形成する. 流域全体で扱う場合には, 土石流を積分して質点系にして解く方法がある. また, ダイレクトに一つ一つ挙動を追う方法があるが, 溪流単位くらいしかできない (p.9)
- 抵抗則: 土石流の構成則と侵食堆積速度が重要となる. 水, 石礫, 微細砂の混合の程度によって構成則が違ってくるが, これを積分した形で抵抗則を作る. τ_y はクーロン摩擦で, 勾配が緩いところで止まるという機構をもつ. 勾配が急になると土砂が水面まで分散して流下し完全な土石流状態となる. 今回は, これに微細砂が加わり, 流動性が増したものを対象としている. (p.10)
- 侵食・堆積速度: 局所勾配と平衡勾配との大小関係によって侵食, 堆積が起こると考えられる. 平衡勾配は土石流の流動性を表すパラメータであり, 土石流の濃度を侵食も堆積も起こらず保ち得る勾配である. 粘着性があれば侵食が少し緩和されるという項も考慮している. (p.11)
- 土石流に微細砂が含まれることによる流動性増加: 微細砂が流体として挙動すると考えれば, 平衡勾配の減少と, 土砂濃度 c^* が流体に抜け粗い粒子の濃度が小さくなることの 2 つの効果により, 流動性が増すことになる. 例えば砂礫だけの場合では 20 度前後の区間までしか土砂は動かないが, 50%微細砂が含有する場合では 5~6 度まで土砂

が流れることになる。この概念が本当であれば、土石流、崩壊土砂の扱いが楽になる。
この点は議論の対象になると思われる。(p.12)

- 水と土砂の質量保存則：河川の流れの場合と同じである。ただし、骨格となる粗い粒子と、間隙に含まれる細粒分による構造を仮定しており、堆積・侵食によってそれぞれの質量保存則が異なることを考慮している。(p.13)
- 運動量保存則：河川の流れと同じである。河床材料の質量保存則：自分自身が質量を変え、地形を変えながら流れるので、瞬時の質量と河床高をきちっと与える必要がある。これと侵食速度式を与えれば、計算が可能となる。(p.14)
- 流木：移流方程式により扱う。単位面積あたりの流木堆積が分かれば、計算は可能である。(p.15)
- 質点系モデル：平衡勾配よりも急な区間では土砂は勝手に動くと考えれば、質量保存則だけから崩壊土砂がどこまで動くのかを推定できる。局所勾配と平衡勾配の関数で表される E を導入し、崩壊土砂の形状保存性が保たれるとすれば、単位幅あたりの体積変化が簡単に表現できる。崩壊点を決めれば、それが最急勾配方向に移動し、どの川筋に流入するのかが推定できる。(p.16)
- 以上をまとめると、降雨条件、流域表層地形、表土層モデル、水深平均 2 次元モデルによる流出解析、表土層の不安定解析（無限長斜面モデル）を用いれば、流域における表面流・浸透流の分布、崩壊・土石流の時空間分布を推定することができる。発生した土砂に対して質点系モデルを適用すれば、流域全体として流出土砂量や流木がどこまで到達するのかを概ね推定できる。また、ハザードマップ作成等のためには、水深平均二次元支配方程式を用いて、溪流部の土石流、流木の挙動を解析することが有効となる。(p.17)
- P.19 は赤谷川の山腹崩壊の時空間分布の算定例である。どういうところで崩壊が発生しやすいのかを推定でき、確からしい結果が得られている。
- また、p.20 は質点系モデルを用いて、山地流路網における土砂堆積量を算定した結果である。砂堆積分布を初期条件として洪水外力を与え、土砂輸送を解けば、下流河川への土砂供給条件を推定することが可能になる。(p.20)
- また、二次元モデルにより、土石流の流下に伴う流路の侵食・堆積や、流木堆積量を推定できることが確認された。(p.21, 22)

2. 流砂・河床変動を伴う洪水流

- 土石流や流木は 4~8 度のところに堆積している。これより下流では、流砂・流木を伴う洪水、激しい流路変動が起こる。また、掃流砂、浮遊砂が卓越し、あるところから浮遊砂、wash load がかなり氾濫する。この間で分級が起きていることになる。総頭川では、概ね 6 度のところで土石流が止まっていた。これが洪水侵食を受けて流出する過程で、土石流に加えて河道侵食によって生産された土砂が合わさって流れ、市街地に堆

積した。他の河川でも概ね同様の傾向が見られた。(p.29)

- 対象となる現象は、流路変動、流路閉塞であるが、赤谷川や総頭川（広島県坂地区）のような異常ともいえる大量土砂供給をどれだけ評価できるのかが重要なポイントとなる。このためには、モデルは最低でも 2 次元以上が必要となる。(p.30)
- 上流端条件：土石流は非常に不確定な現象で、一旦止まることから、連続的に洪水に移る可能性はほとんどないと思われる。そうすると、流れの上流端条件には洪水ハイドログラフを与え、掃流砂及び浮遊砂の比較的粗いものについては平衡給砂条件を与えればよい。ただし、wash-load（細かい浮遊砂も含む）は、河岸崩壊土砂および土石流堆積土砂が洪水流によって侵食されて細かい物が一気に洪水に取り込まれるという扱いをする。流木については、流木生産量と洪水総量の比により、平均的な流木濃度を与える。(p.31)
- 流水中の浮遊砂の質量保存則：Wash-load の扱いについて長年悩んできた結果として、Wash-load についても浮遊砂同様に非平衡性を考慮し、巻き上げ、沈降が生じるとしている。こうすることで、土砂の分級機構を表現できるようにしている。(p.33)
- 赤谷川での検討例を示す。平衡給砂以外に、微細量の供給条件 (p.37) を考え、これも追加した量を上流端から供給するようにしている。(p.38)
- 本解析モデルにより、全体の水面形や、土砂堆積、流木の堆積箇所が概ね説明できるようになってきた (p.40, p.42)。また、流木集積が流れ場に及ぼす影響についても表現可能となってきた。(p.43)

3. 遷移領域における河道設計の考え方

- 遷移領域の河道設計の考え方は次のとおりである。まず、想定する降雨に対して崩壊土石流の分布を計算する。これに流路網モデルを併せることで、上流域に土砂がどれだけ貯まっているのかを推定する。これに洪水を作用させることで対象河道への土砂供給条件を計算する。そして、河道の条件を与えることで、洪水と土砂の流れ方をするのかを調べる。この結果を踏まえ、河道で安全に洪水と土砂を流下できるような河道対策（河幅、掘削）または上流域対策（土砂供給条量の緩和）を検討する。(p.44)
- 河幅を広げて土砂を貯留させる対策が有効となる。しかし、河幅が広い箇所では土砂が堆積し河床が上昇することになるため留意が必要である。そこで、河幅変化量と河床上昇量の関係を表す式を提示した。この式は、水流の連続式、疑似等流の Manning 則、流砂の連続式、流砂量式の関数形、一次元のエネルギー保存則から導出されるものであり、設計のチェックには有用であると思われる。(p.45)



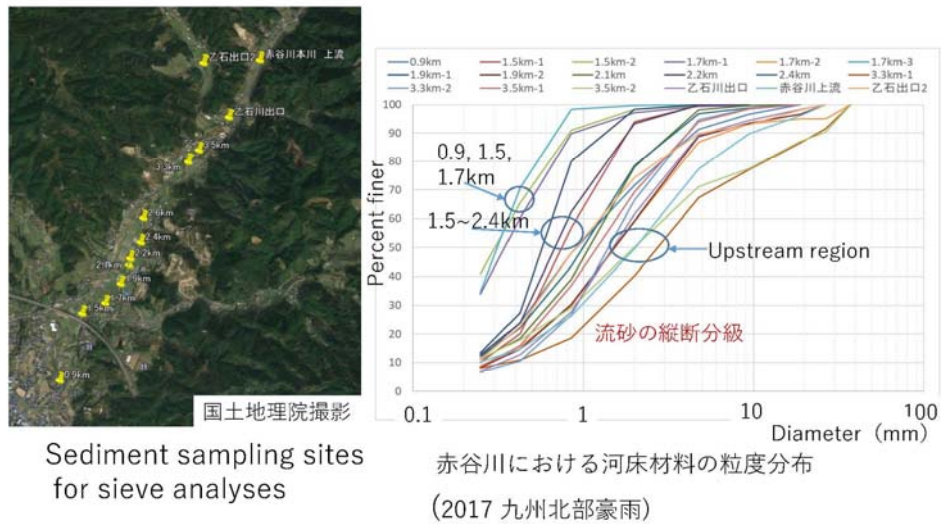
2017年7月九州北部豪に伴う土砂・洪水災害（赤谷川流域）

3



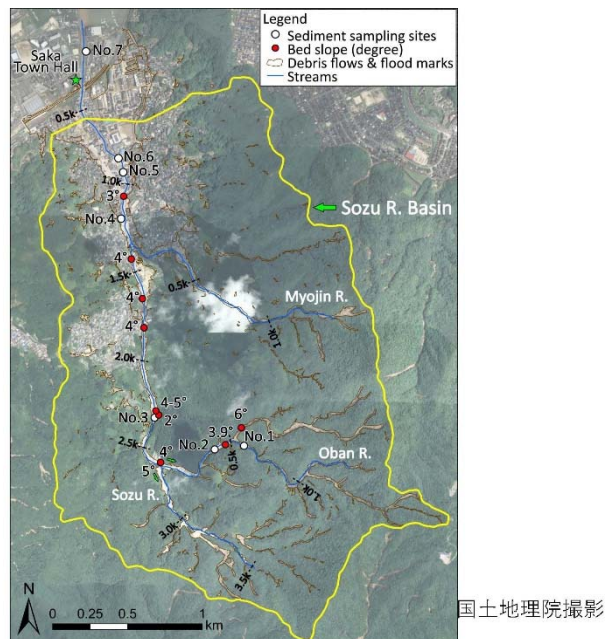
赤谷川上流域の小渓流における土石流堆積物
(2017 九州北部豪雨)

4

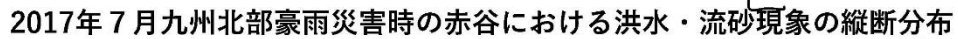


6

2018年西日本豪雨災害
総頭川
(広島県、坂町)

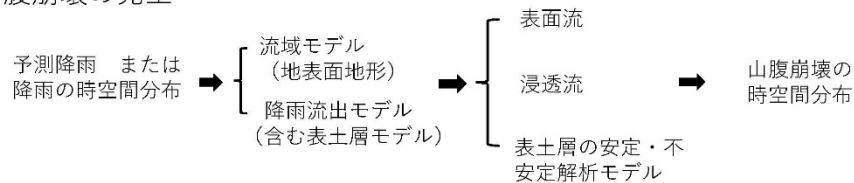


7



8

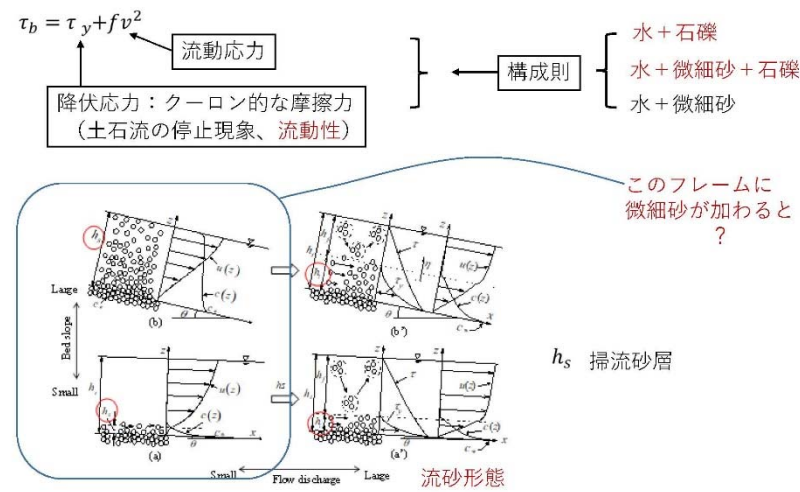
山腹崩壊の発生



山腹崩壊土砂	{	停止（移動経路の縦断形状、表土層の分布等）		
		土石流を形成 （流動化の条件）	{	流域規模での土砂流出 ----- 質点系支配方程式
			{	溪流における土石流の挙動 ----- 水深平均二次元 土砂流出過程 支配方程式

崩壊土砂の流出過程（土石流の過程）－抵抗則と侵食・堆積速度

抵抗則



10

侵食・堆積速度

$$E = E(\theta, \theta_e, -, -)$$

θ 斜面や溪床の局所勾配

θ_e 土石流を構成する石礫の土砂濃度 c_c に対応する平衡勾配

$\theta > \theta_e$ 侵食

$\theta < \theta_e$ 堆積

平衡勾配は

$$\tan \theta_e = \frac{1}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \left[\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_c \tan \phi + \frac{c_h}{\rho g h} \right]$$

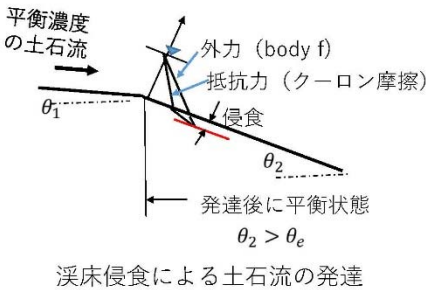
σ 土粒子の質量密度

ρ 流体層の質量密度

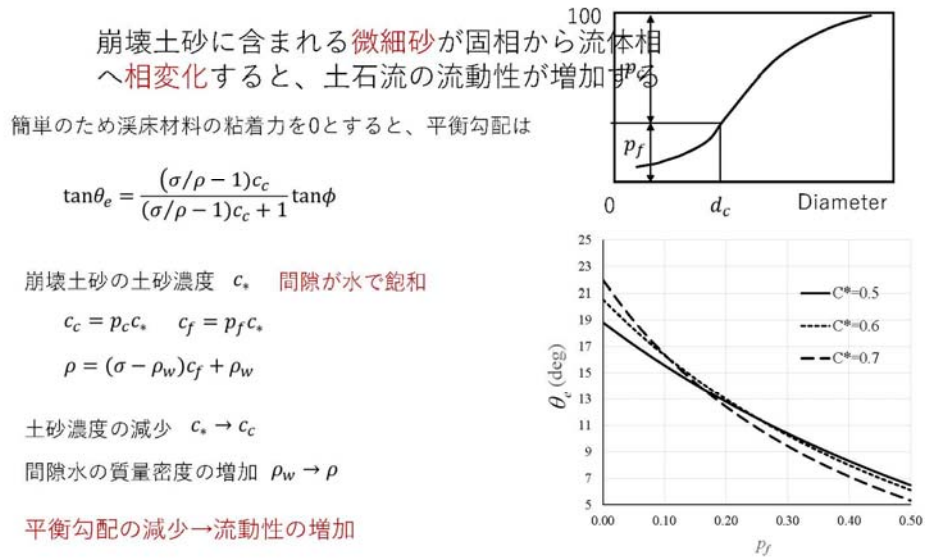
h 流動深

c_c 土石流を構成する石礫の土砂濃度

c_h 溪床材料の粘着力



11



12

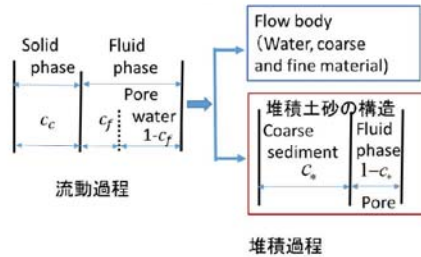
土石流・流木の支配方程式 (水深平均二次元モデル)

質量保存則

水と土砂 (粗い土砂 + 微細砂)

粗い砂礫について

流体相として振る舞う微細砂について

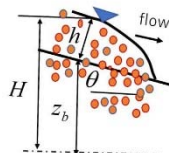
 E 侵食速度 ($E < 0$: 堆積) p_c 表層における粗い砂礫の含有率 c_c 流れ中の粗い砂礫の濃度 p_f 表層における細粒土砂の含有率 c_f 流体相における細粒土砂の濃度 c_* 静止堆積層の土砂濃度

13

運動量保存則

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial uuh}{\partial x} + \frac{\partial vuh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m}$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \frac{\partial vvh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m}$$



H 水表面の標高
 z_b 河床面の標高
 τ_b τ_{bx} , τ_{by} 河床せん断力
 h 流動深 u, v 流速

河床材料の質量保存則

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_s \cos \theta}$$

$\rho_m = (\sigma - \rho)c_c + \rho$ 土石流の質量密度

$\rho = (\sigma - \rho_w)c_f + \rho_w$ 土石流の流体相の質量密度

侵食速度式 ($E < 0$: 堆積速度)

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

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

θ 土砂濃度 c_c に対する平衡勾配

ϕ 砂礫の摩擦角

c_s 静止堆積層の土砂濃度

τ_b : 芦田・江頭・中川: 21世紀の河川学、京都大学出版会, 2008.

14

流木の質量保存則 (移流方程式) (土石流は層流だから拡散項を省略)

$$\partial z / \partial t < 0 \quad (E > 0)$$

$$\frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf} u h}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf} v h}{\partial y} = E \frac{S}{D} r(t, x, y)$$

流木 (立ち木) の取り込み

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -E \frac{S}{D} r(t, x, y)$$

$$\partial z / \partial t > 0 \quad (E < 0)$$

流木 (立ち木) の流出

$$\frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf} u h}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf} v h}{\partial y} = E C_{drf} r(t, x, y)$$

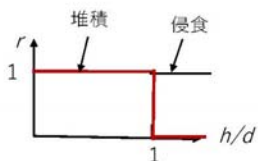
流木の堆積

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -E C_{drf} r(t, x, y)$$

流木の堆積

C_{drf} 土石流における流木濃度 D 流木の根茎深

S 単位面積当たりの流木(立木)の貯留量 (貯留高)



流木の離脱・補足率と相対水深

侵食速度式 ($E < 0$: 堆積速度)

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

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

θ 土砂濃度 c_c に対する平衡勾配

ϕ 砂礫の摩擦角

15

質点系モデル

侵食過程 ($0 < E$) において

崩土全体、粗い粒子及び微細砂の質量保存則は、それぞれ

$$v \frac{dA}{dx} = El \quad v \frac{dc_c A}{dx} = p_c El \quad v \frac{dc_f(1-c_c)A}{dx} = p_f El$$

 $l = \sqrt{A/\alpha}$ (形状の相似性) を仮定すると、上式は

$$\frac{dA}{dx} = \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2} \quad \frac{dc_c A}{dx} = p_c c_c \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2}$$

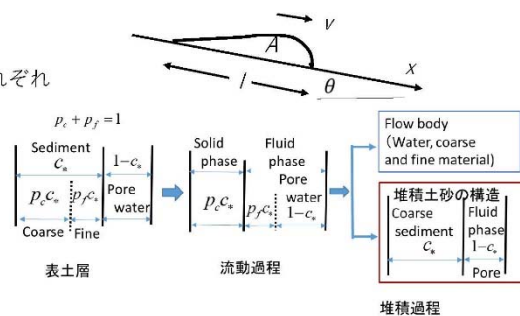
$$\frac{dc_f(1-c_c)A}{dx} = p_f c_f \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2}$$

堆積過程 ($E < 0$) において、同様に

$$\frac{dA}{dx} = \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2} \quad \frac{dc_c A}{dx} = c_c \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2}$$

$$\frac{dc_f(1-c_c)A}{dx} = c_f(1-c_c) \tan(\theta - \theta_e) \left(\frac{A}{\alpha}\right)^{1/2}$$

これらは、区分的に容易に解くことができるので、流域規模における土砂流出分布の議論に有効と思われる。



堆積過程において、粗い粒子が骨格を構成し、その間に流体相（水と微細砂）が取り込まれる仕組みで堆積が進む。

$$\frac{E}{v} = c_s \tan(\theta - \theta_e) \quad \tan \theta_e = \frac{(\sigma / \rho - 1)c_e}{(\sigma / \rho - 1)c_e + 1} \tan \phi$$

$$\rho = \frac{1}{1 - p_c c_s} \{ (1 - c_s) \rho_w + p_f c_s \sigma \} \quad c_c = p_c c_s$$

16

山腹崩壊・土石流の解析例

赤字：鍵となる現象及び現象のモデル化

降雨条件、流域表層地形、表土層モデル、水深平均2次元モデルによる流出解析、表土層の不安定解析（無限長斜面モデル）



流域における表面流・浸透流及び崩壊・土石流発生の時空間分布

微細砂の相変化、崩壊の時空間分布、崩壊土砂および流木の運動に関する質点系モデル



流域における流出土砂量および流木の時空間分布

水深平均平面2次元支配方程式

抵抗則

侵食速度式

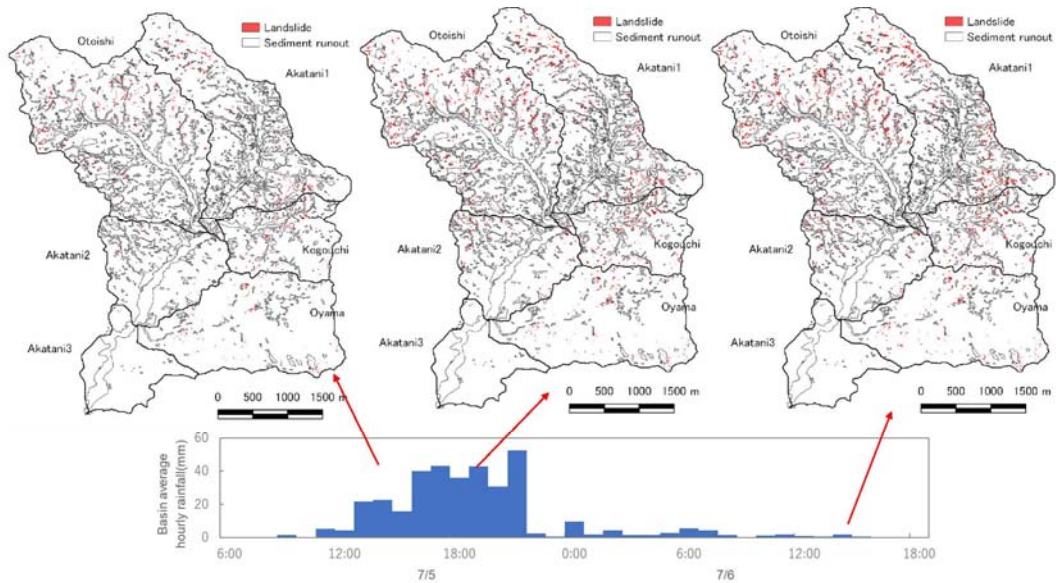
微細砂の相変化

流木の生成・輸送モデル



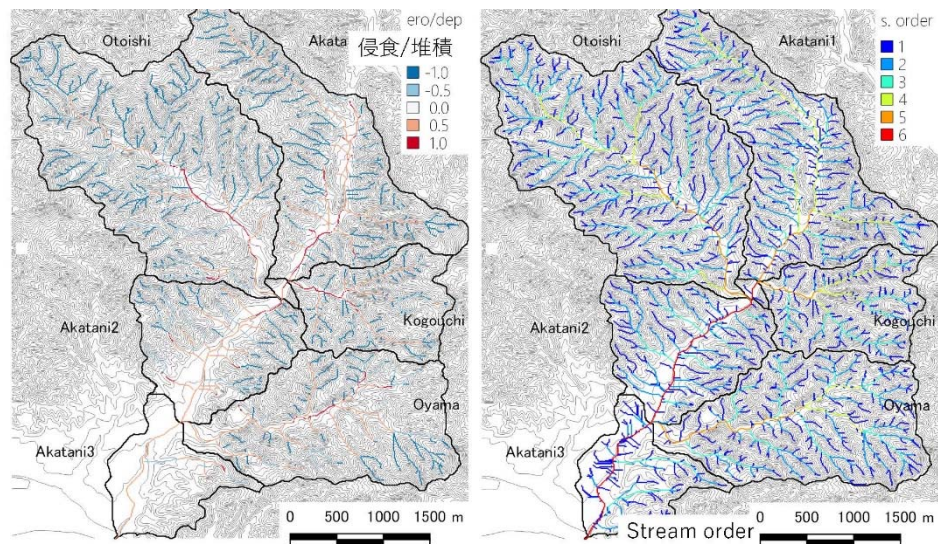
渓流における土石流の発達・減衰過程および流木の流出過程

17



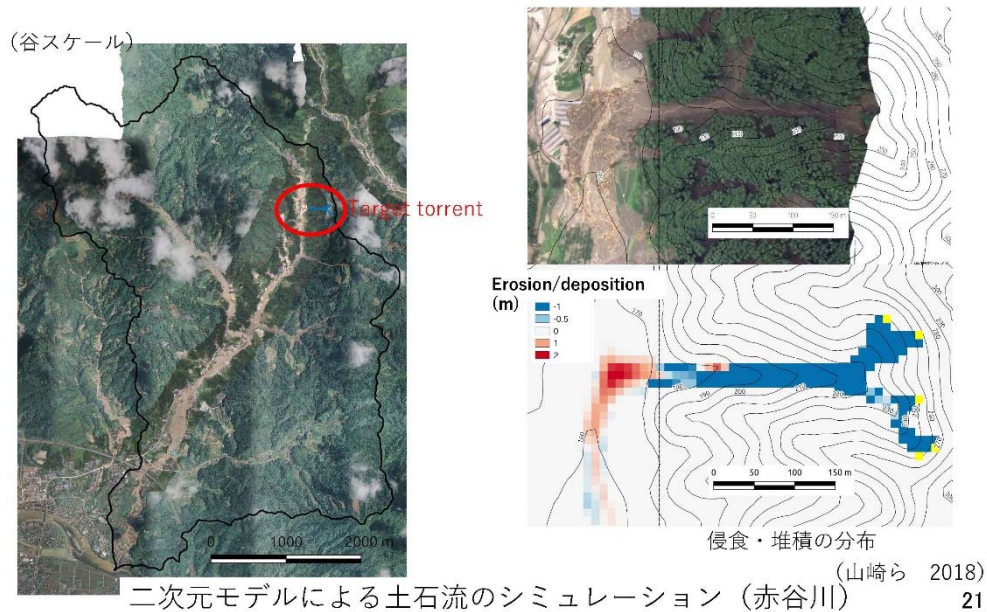
山腹崩壊の時空間分布 (2017年7月九州北部豪雨; 赤谷) (山崎ら 2018)

19

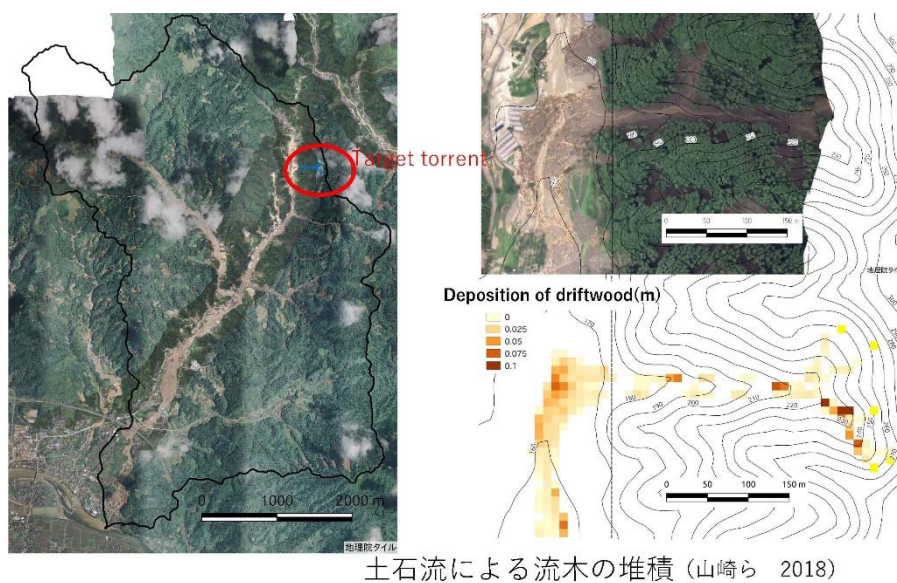


赤谷川における溪床の侵食・堆積の分布 (質点系モデルによるシミュレーション (山崎ら 2018))

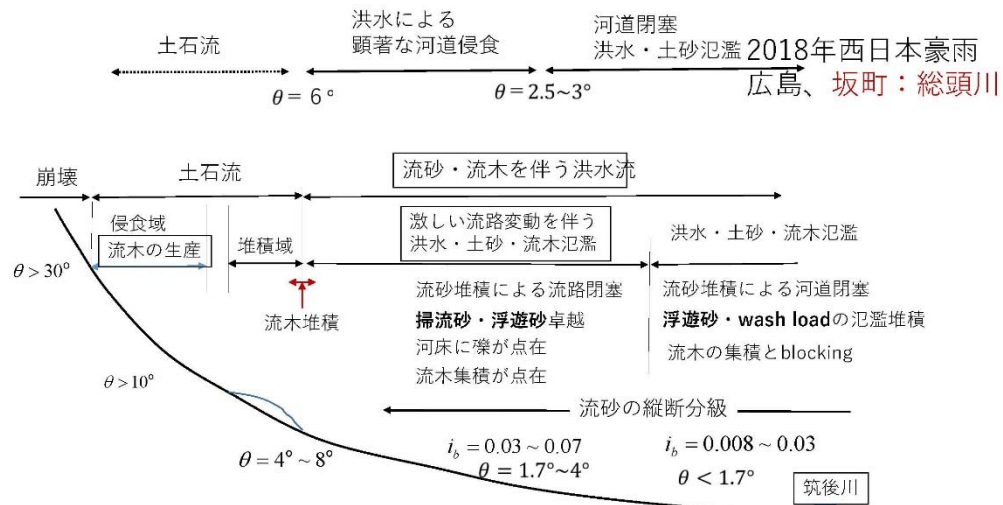
20



21



22



2017年7月九州北部豪雨災害時の赤谷における洪水・流砂現象の縦断分布

29

・解析法

対象となる現象：流路変動、流路の閉塞現象、**流砂の分級**、**流木**

解析モデル（例えば）

流れ：水深平均、時間平均2次元流れの質量保存則と運動量保存則

流砂：河床材料の質量保存則（粒径別）

流水中の流砂の質量保存則（粒径別） -- 浮遊砂、掃流砂

掃流砂量式（粒径別）、浮遊砂・wash-loadの侵食・堆積率

流木：流水中及び河床における質量保存則（中立粒子の移流拡散方程式）

生成率、捕捉率

異常とも言える
大量の土砂供給

30

上流端条件

洪水ハイドロ：土石流が連続的に洪水流に遷移する可能性はほとんどない。従って、上流端条件として降雨流出モデルによる洪水ハイドロを用いることができる。

流砂：掃流砂:平衡給砂

浮遊砂 { 比較的粗いものは平衡給砂
細かいものはWash-loadに含める

Wash-load：河岸崩壊土砂および土石流堆積土砂の洪水流による侵食

流木：流木濃度 = 上流域における流木生産量/洪水主要部の洪水総量

$$V_{drf} = v_{drf} A_e \quad v_{drf} \text{ 単位面積当たりの立木の体積}$$

$$A_e \text{ 崩壊・土石流による侵食面積}$$

31

-流水中の浮遊砂の質量保存則(粒径階級 d_i について)

$$\frac{\partial c_i h}{\partial t} + \frac{\partial r_1 u c_i h}{\partial x} + \frac{\partial r_1 v c_i h}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \epsilon_x \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \epsilon_y \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + E_i - D_i$$

-河床材料の質量保存則(粒径階級 d_j について)

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \sum_i \left(\frac{\partial q_{bix}}{\partial x} + \frac{\partial q_{biy}}{\partial y} + E_i - D_i \right) = 0$$

掃流砂の分級

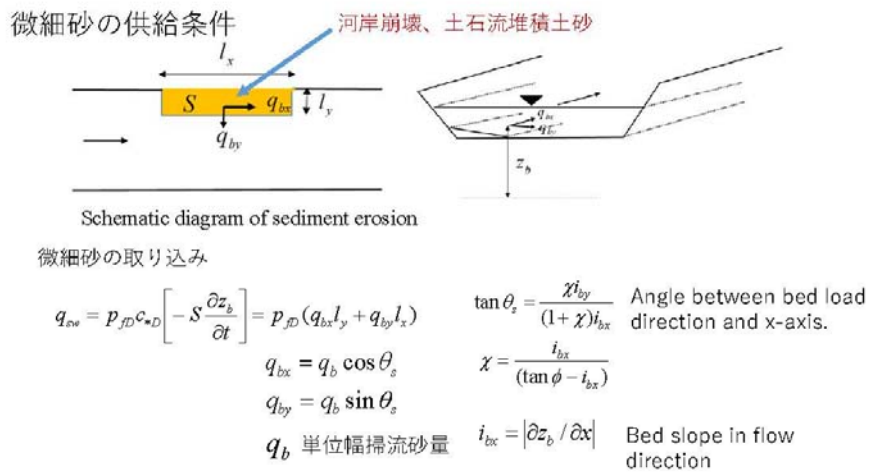
浮遊砂/wash-loadの非平衡性
流砂の分級

h :水深 z_b :河床高

E_i, D_i :浮遊砂/wash-loadの侵食率、堆積率(粒径階級 d_i について)

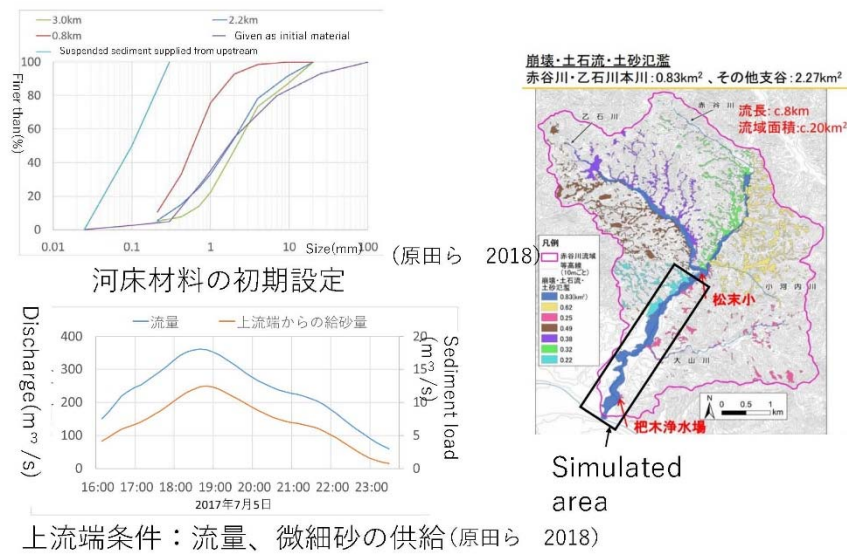
q_{bi} :単位幅掃流砂量 d_i

33

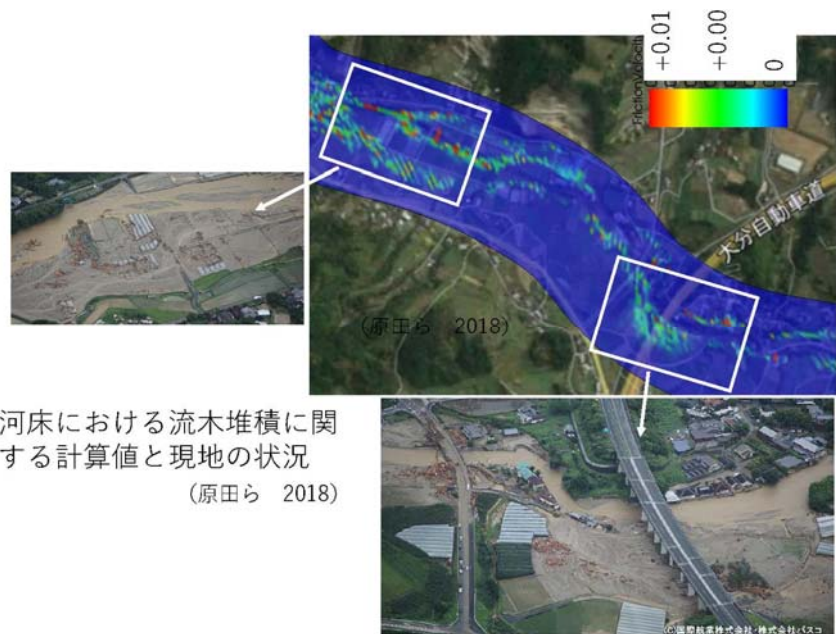


37

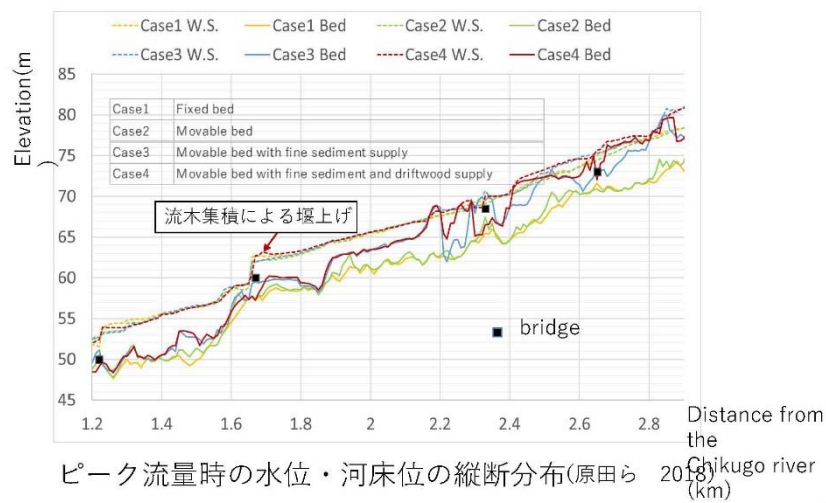
Discharge/ Sediment supply



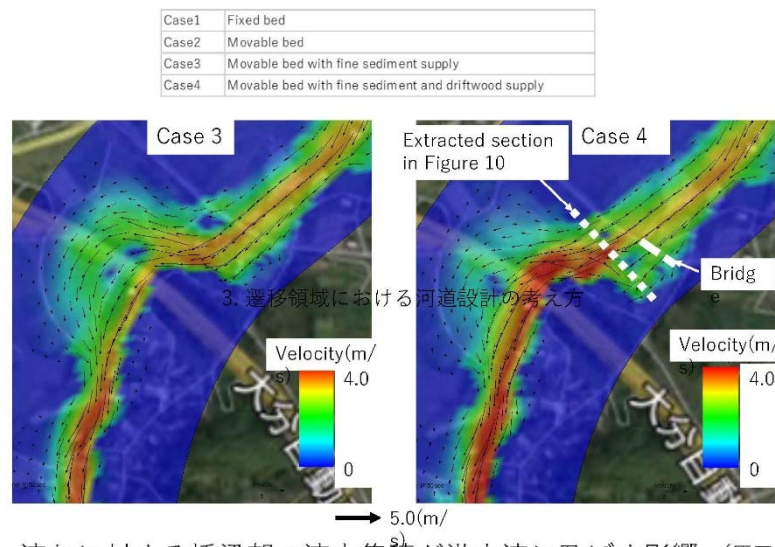
38



40



42

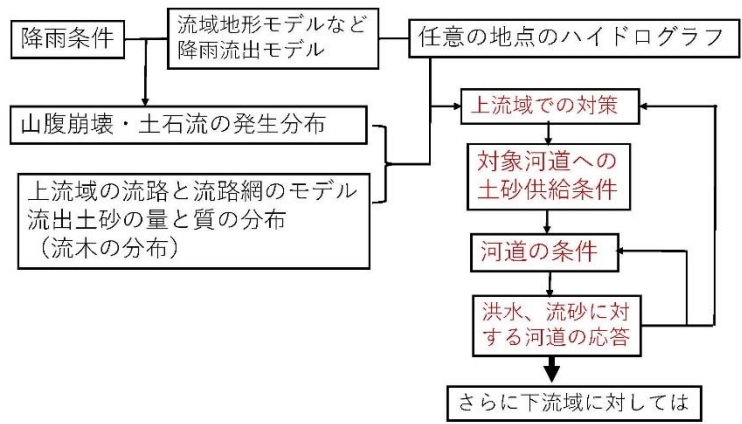


流れに対する橋梁部の流木集積が洪水流に及ぼす影響（原田ら 2018）

43

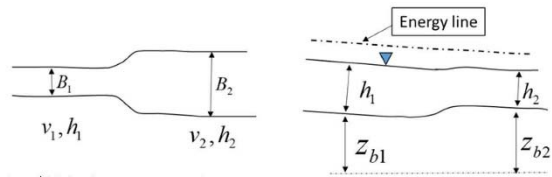
3. 遷移領域における河道設計の考え方

・計画規模の降雨条件、あるいは気候変動下において想定される降雨条件



44

河道設計時の留意点
川幅の設定は慎重に



河床は、次式からわかるように、必ず拡幅部において上昇する。

$$\frac{z_{b2} - z_{b1}}{h_1} = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{6/7} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{\frac{3(2m-1)}{7m}} + \frac{1}{2} F_{r1}^2 \left\{ 1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{\frac{12}{7}} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{\frac{2(2m+3)}{7m}} \right\} - \frac{i\Delta x}{h_1}$$

上式は、水流の連続式、疑似等流のMannig則、流砂の連続式、流砂量式の関数形、エネルギー保存式を用いて求められる。

$$\text{メモ} \left[\begin{array}{lll} v_1 h_1 B_1 = v_2 h_2 B_2 & v_1 = \frac{1}{n_1} i_1^{1/2} h_1^{2/3} & v_2 = \frac{1}{n_2} i_2^{1/2} h_2^{2/3} \\ q_{b1} B_1 = q_{b2} B_2 & q_{b1} \sim (\tau_1)^m \sim (h_1 i_1)^m & q_{b2} \sim (\tau_2)^m \sim (h_2 i_2)^m \\ \frac{v_1^2}{2g} + h_1 + z_{b1} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + z_{b2} + i\Delta x \end{array} \right]$$

45

会場からの質問 (司会：名古屋大学 椿涼太)

中央大学 福岡先生：

後半の遷移部分をどう扱うのかは、我々にとって大事になる。砂防と河川、共有し合う土砂量、洪水を考えると、砂防領域から河川に移る箇所で、貯砂或いは水を遊ばせることのできる箇所があれば、そこを結節点として考えるのはどうか。それより下流の河川領域では、起こった洪水を計測し、どの程度説明できるのかを調べる。一方、上流の砂防領域では、生産土砂と貯砂量との関係を調べ、お互いが情報共有し合う場を設けることが必要となる。計画論だけでなく、現実問題を考える上では、このような観点も重要となるのではないかな。

江頭：

ご指摘のとおりで、今後の遷移領域の河道設計を考えていくためには、砂防、河川の両方からの意見をかみ合わせないといけない。これまで河川と砂防が議論する機会が非常に少なかったので、今後は議論の機会を積極的に設けていくことに努めたい。

中央大学 山田先生：

赤谷川の被災を受けた箇所は、どう対策するのか。もとの河幅、河床高に戻すのが本当に良いのか。崩壊土砂の全部が川に流出したのではなく、溪流に残っているものもある。この後また豪雨が発生した場合、同じ規模の土砂流出が起こり得るのか。どのような状況を想定して河道設計を考えていけばよいのか。また、2009 年に台湾で 3 日雨量 3000mm 規模の豪雨が発生し、大規模な土砂崩壊によって河床が数 10m も上昇した例がある。このようなケースであっても、元河床まで掘削するのが本当によいのか。これらの事例は、今後予想される大規模降雨による土砂災害に対して、どのような対策を考えていくのかについての良い参考例になるのではないかな。

江頭：

赤谷川の場合は、同じような雨が降って、同じ土砂生産はないと思われるが、インパクトアセスメントをきちんと検討する必要がある。

台湾の例のように何 10m も土砂が堆積した場合、それを放置した場合に下流にどのような土砂が流出するのかを予測することがまず大事になる。また、その土砂をうまく使うことも含めた合理的な河川整備を考えていくべきである。

土砂・洪水氾濫対策に向けた技術的な検討状況

国土交通省砂防部砂防計画課 國友 優

- 砂防に関わる行政課題は多い。土石流対策、崖崩れ対策はどういったところにハザードが分布するかについて全国調査を進めており今年度中にひととおり終える予定である。土砂・洪水氾濫については、計画論も含めて新たな行政課題として取り組まなければならない。
- 土砂と洪水が氾濫する事例は、最近顕著にみられる。平成 30 年 7 月豪雨では、広島県市天応西条地区で洪水とともに多量の土砂が氾濫した。家屋等について土石流ほどの激しい損壊は無いが、じわじわと氾濫し、市街地で 2m の土砂堆積が生じた。
- 豪雨により上流域から流出した多量の土砂が谷出口より下流の河道で堆積することにより、河床上昇・河道埋塞が引き起こされ、土砂と泥水が氾濫する現象を「土砂・洪水氾濫」と呼ぶ。土砂とともに上流域から流出した流木が氾濫する場合もある。(p.3)
- 「実効性のある避難を確保するための土砂災害対策検討委員会」では、生産土砂量の推定手法の高度化の必要性が指摘された。「気候変動適応計画」では、気候変動に伴う土砂や流木の流出量の変化等について検討することが記載されている。「国土強靱化基本計画」では、土砂災害だけでなく、土砂・洪水氾濫についても位置付けられた。(p.4,5)
- 「河川砂防技術基準計画編」では、砂防(土砂災害等対策)計画に、新たに土砂・洪水氾濫対策計画を位置付け、短期、中期、長期の土砂流出対策計画を明記した。(p.6)
- 1 回のイベントで大量の土砂が出てくる状況を扱うものを短期、その後流域に残っている土砂が数年かけて特に活発に流出してくるものに対応するのが中期、主たる土砂供給源が解消されるまでの長い間、短期のイベント前のレベルを上回って活発に土砂供給され続ける状況に対応するのが長期というように概念を整理している。(p.7)
- 具体例(短期): 土石流対策として透過構造の砂防堰堤が主力になっている。容量を確保し土石流を捕捉する。捕捉した土砂は速やかに撤去をする必要がある。これだけでは全ての土砂を止められないため、主要な保全対象の上流側には、しっかりと土砂を貯めこむための施設として遊砂地をつくることも考える。(p.8)
- 具体例(中期): 例えば赤谷川ではブロック積み仮設の遊砂地を整備している。また、堰堤の除石により次の出水に対応できるようにしている。(p.9)
- 具体例(長期): 流域の中の巨大な土砂生産源がずっと存在した状況に対応する。立山砂防の例では、土砂生産が通常レベルになるように、山腹工を行っている(p.10)。ただし、今後新たな巨大土砂生産源が出来た場合には、上でもとから絶つのか、下で継続的に除石管理をすべきなのか、C/C 評価のようなものが必要になる。
- 土砂・洪水氾濫対策における計画策定手法については、まずは対象降雨波形を決め、想定されている土砂生産パターンを重ね合わせ評価する。その後、土砂がどのように出てくるのかについては、河床変動計算で推定する。ただし、どのくらいの土砂生産があるのかについては、解析的、経験的手法を組み合わせるものとしている。(p.13)

- 計画論を立てる上で、どの程度の土砂を対象とするのかが非常に難しいとともに、生産土砂量の推定法が鍵となる。昨年度から土砂・洪水氾濫対策ワーキンググループを立ち上げ、生産土砂量の推定法をメインテーマとして検討を進めている。(p.14)
- 流域面積と比生産土砂量の関係にはかなりばらつきがある。土砂・洪水氾濫を起こした河川では概ね最大レベルの土砂が出た箇所であったが、最大レベルの土砂生産があった箇所で必ずしも土砂・洪水氾濫が生じているわけではなく、この点をどう評価するのが課題である。また、計画で用いている生産土砂量は今回の災害の実績をカバーできていることは確認できたが、小さい流域でも土砂が多く出ているケースもあるので、この点をどう考えるのかもポイントとなる。(p.15)
- 計画論に落とし込むにあたっては、どの斜面で崩壊が起きやすいのかを推定する必要がある。シミュレーションにより流域の土層厚の面的な分布を推定する手法も考案されている(京都大学 松四先生)。(p.16)
- 土砂生産量と地質の関係についても調べている(国総研)。同じ地域で同じ地質であっても、流域によっては 1~2 オーダーも比生産土砂量が変わってくる場合があることが分かってきた。将来、不確実性を見込む際には重要な要素となる。(p.18)
- 土砂・洪水氾濫対策としては、砂防と河川の結節点で土砂を一旦止めることが重要である。そのためには、遊砂地整備を推進していく必要がある。しかし、すでに土地利用されている場合もあるので、地域とのコンセンサスをどう得るのか、施設の規模についても十分検討していく必要がある。(p.19)

平成30年7月豪雨で発生した土砂・洪水氾濫

広島県呉市天応西条地区

- 平成30年7月豪雨により発生した土砂が、
県道等に2m以上堆積



被災前イメージ



被災後状況写真

土砂・洪水氾濫とは？

- 土砂・洪水氾濫とは・・・豪雨により上流域から流出した多量の土砂が谷出口より下流の河道で堆積することにより、河床上昇・河道埋塞が引き起こされ、土砂と泥水が氾濫する現象
土砂とともに上流域から流出した流木が氾濫する場合もある。



平成 3 0 年 7 月豪雨における土砂・洪水氾濫の発生状況（広島県呉市天応西条地区）₃

土砂・洪水氾濫に関する各種計画・委員会等での記載内容

実効性のある確保するための土砂災害対策検討委員会 報告書概要 (R1.5)

○平成30年7月豪雨による土砂災害の検証結果

結果Ⅳ その他の平成30年7月豪雨の土砂災害の特徴

- ▶ 土砂・洪水氾濫により、下流の市街地に広範囲に土砂が堆積し、救助活動、復旧活動の妨げになったほか、地域の社会経済にも長期間影響を与えた。

○ 実効性のある避難を確保するために取り組むべき施策

⑥ その他の平成30年7月豪雨の土砂災害の特徴を踏まえた対策のあり方

- ▶ 気候変動による集中豪雨の増加に伴い、土砂・洪水氾濫が起きやすい条件の設定手法、生産土砂量が増大する素因環境を有する地域の把握等、生産土砂量の推定手法や影響範囲の推定手法の高度化を図るため、WGの意見を踏まえ引き続き検討を深めるべき。

4

土砂・洪水氾濫に関する各種計画・委員会等での記載内容

気候変動適応計画【分野別施策：自然災害・沿岸域】 (H30.11 閣議決定)

- 海面水位の上昇、土砂や流木の影響検討 ～（略）～、また、気候変動に伴う土砂や流木の流出量の変化等について検討する。

国土強靱化計画【個別施策分野の推進方針】 (H30.12 閣議決定)

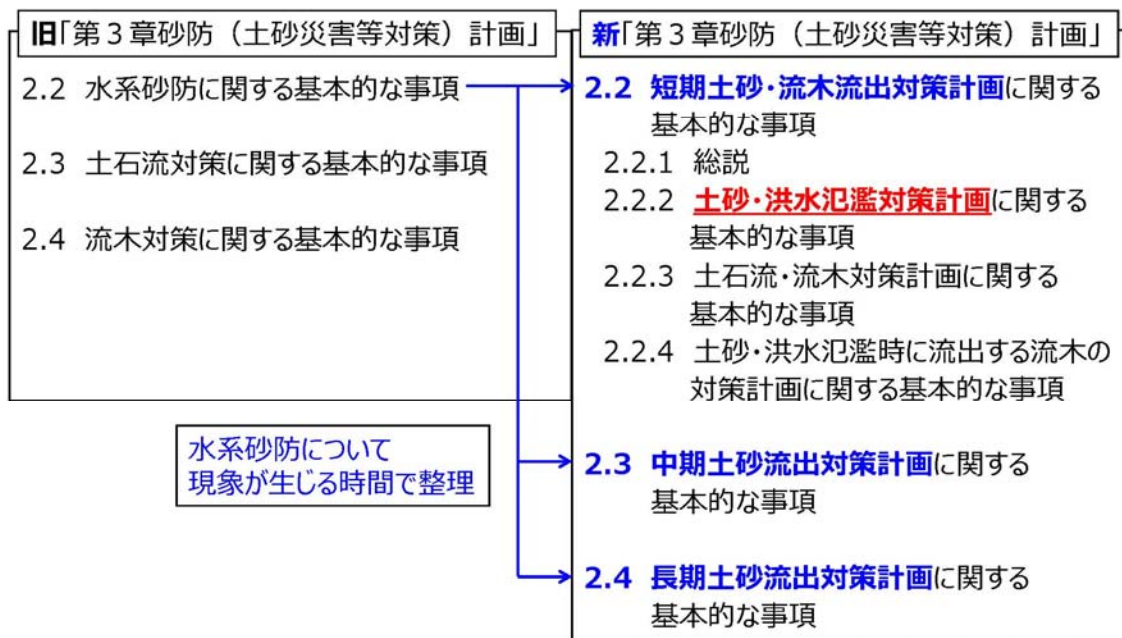
(10) 国土保全

- ～（略）～、土砂災害、土砂・洪水氾濫などの自然災害に対して、～（略）～砂防設備などのハード対策を進めるとともに、～（略）～ソフト対策を効率的・効果的に組み合わせた総合的な対策を、地方公共団体を適切に支援しつつ、強力に実施する。

5

河川砂防技術基準計画編における土砂・洪水氾濫対策の記載

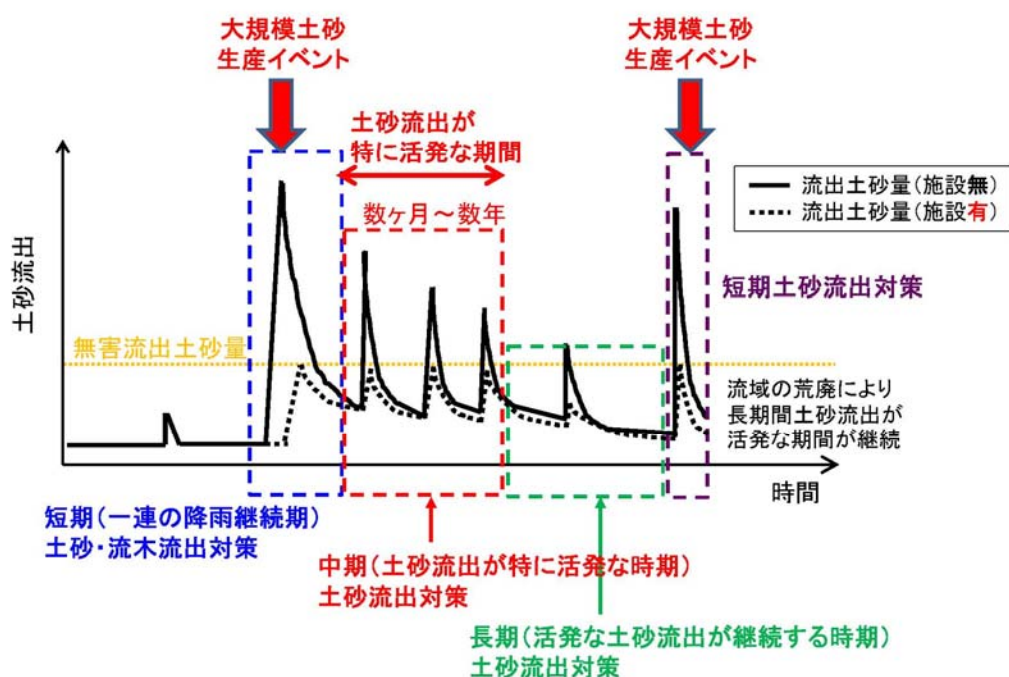
○新旧目次構成



6

河川砂防技術基準計画編における土砂・洪水氾濫対策の記載

○短期・中期・長期土砂流出対策



7

河川砂防技術基準計画編における土砂・洪水氾濫対策の記載

○短期土砂流出対策



遊砂地



透過型砂防堰堤

8

河川砂防技術基準計画編における土砂・洪水氾濫対策の記載

○中期土砂流出対策



除石

9

河川砂防技術基準計画編における土砂・洪水氾濫対策の記載

○長期土砂流出対策



常願寺川流域

工事前



工事後

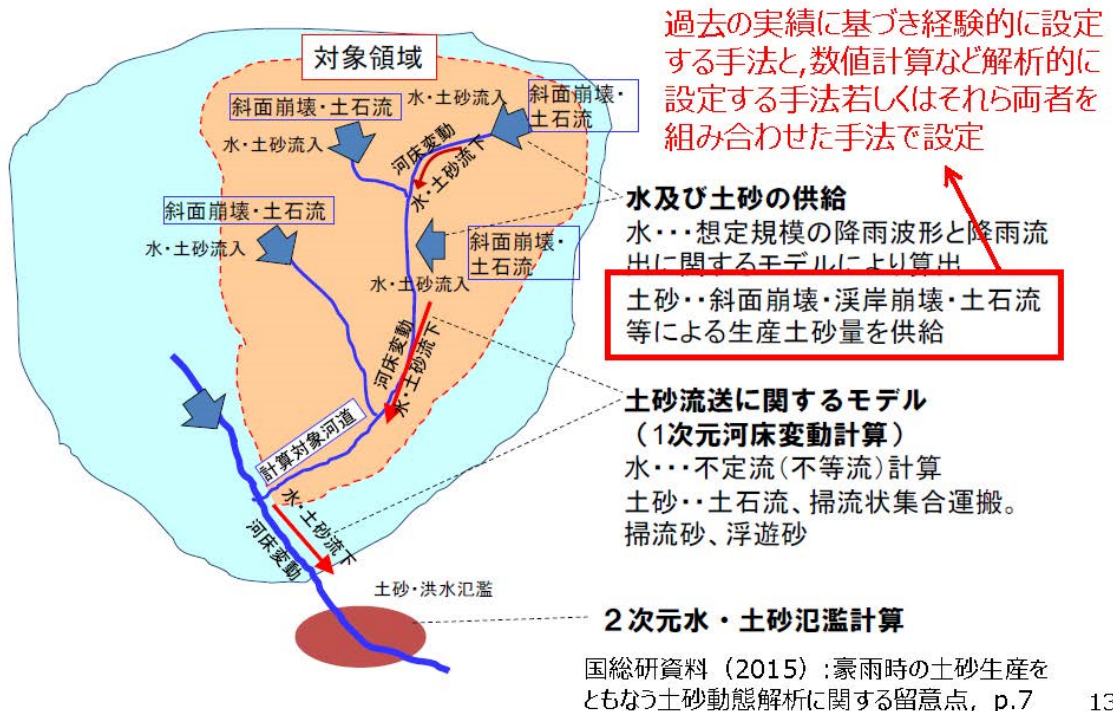


山腹工

10

土砂・洪水氾濫対策における計画策定手法について

○河床変動計算等に基づいた対策計画策定の手法の概要



13

土砂・洪水氾濫対策ワーキンググループ

課題

- 土砂・洪水氾濫対策の必要性がより高い流域を絞り込むため、どのようなことに着目して調査・研究を進めていくべきか
- 豪雨による生産土砂量の推定手法を発展させるため、どのようなことに着目して調査・研究を進めていくべきか

内容

- ①平成30年7月豪雨における生産土砂量の分析(速報)
- ②米国西海岸における土砂マネジメントの調査報告
- ③山地流域における水文地形プロセスのモデリングにもとづく土砂災害予測

委員

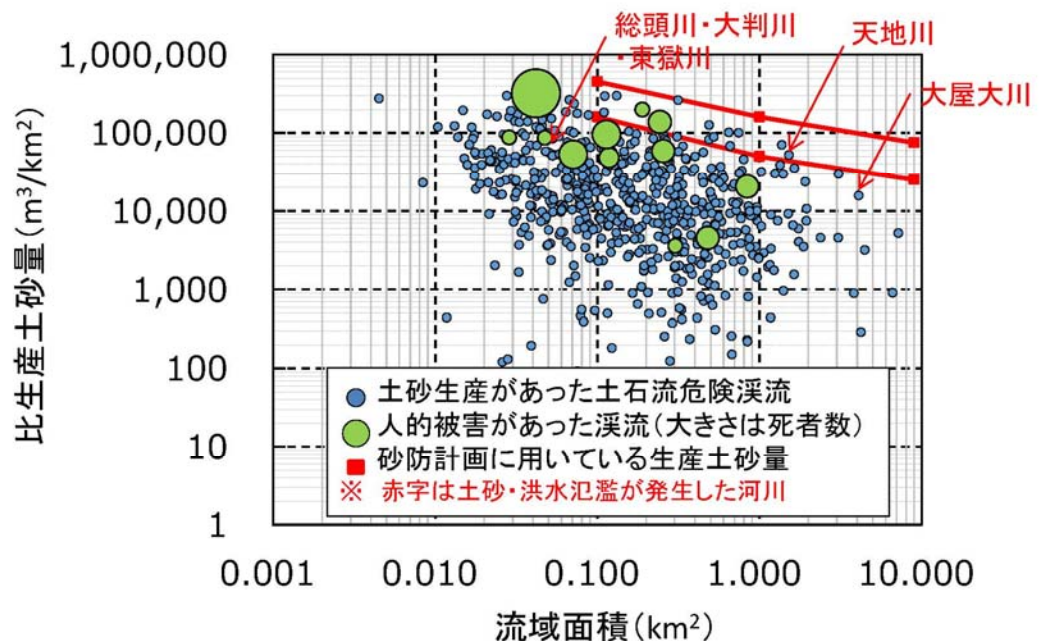
藤田 正治	京都大学防災研究所 教授
松四 雄騎	京都大学防災研究所 准教授
内田 太郎	国土技術政策総合研究所 砂防研究室長



検討委員会の実施状況

14

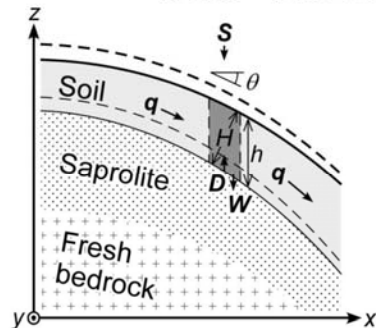
平成30年7月豪雨における生産土砂量の分析(速報)



15

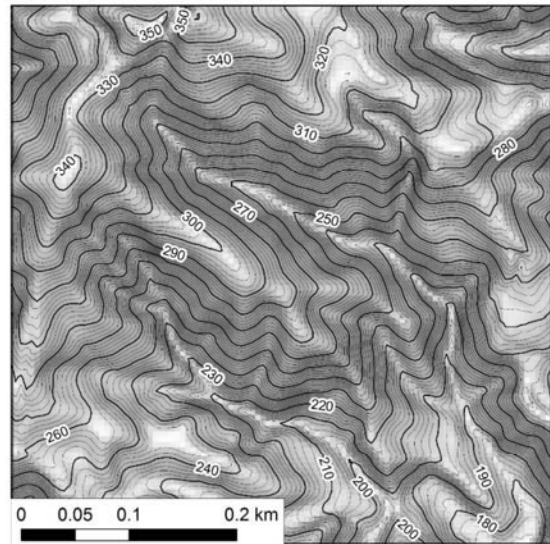
流域からの生産土砂量を推定する手法について

シミュレーションにより、流域の土層厚の分布を推定



$$\frac{\partial h}{\partial t} = K \nabla^2 z + \frac{D_0}{\rho_{\text{soil}}} e^{-\alpha h \cos \theta}$$

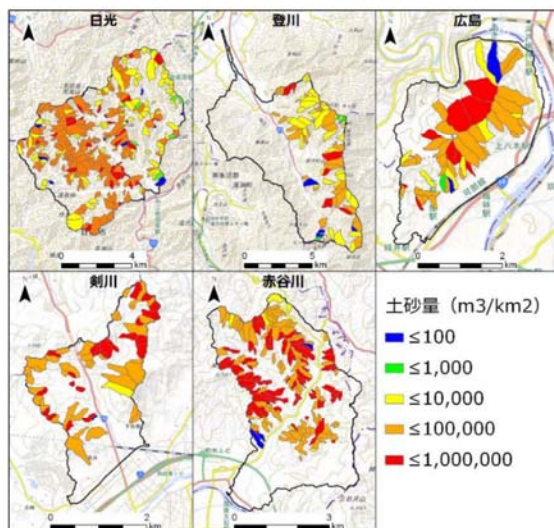
Soil production function:
 $D_0 = 1 \times 10^3 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$; $\alpha = 1 \text{ m}^{-1}$
 Soil transport: $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ yr}^{-1}$
 Initial condition: $h = 0.5 \text{ m}$
 Spatio-temporal resolution:
 5 m-mesh, 1yr-timestep



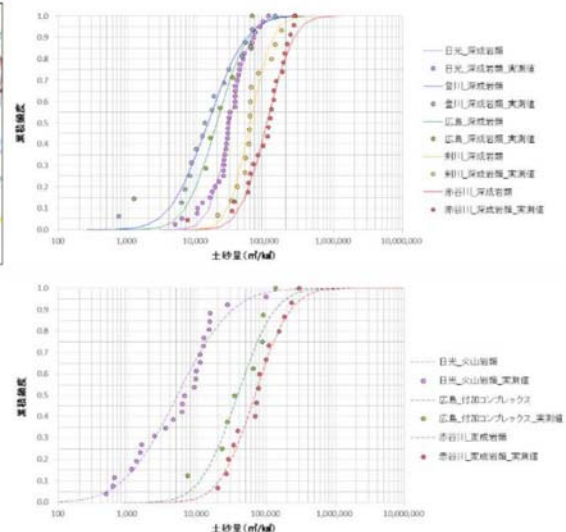
土砂・洪水氾濫対策ワーキンググループ
 松四委員研究紹介資料より

16

生産土砂量の実態把握に関する研究



比生産土砂量の空間分布



比生産土砂量の累積頻度分布

對馬・内田 (2019) : 土木技術資料

18

土砂・洪水氾濫対策

○土砂・洪水氾濫により被災する危険性が高い箇所等において、砂防堰堤、遊砂地等の整備を推進

遊砂地 整備例



四ツ目遊砂地
岐阜県中津川市
最大幅 約190m
延長 約1,500m



【土砂・洪水氾濫対策】イメージ

会場からの質問 (司会：名古屋大学 椿涼太)

東北大学 小森先生：

今年 6 月に国有林改正法が成立し、今後森林面積が変わることが予想される。これに伴い、土砂や流木の発生条件が変わる可能性がある。この点について、国交省としてどのようにアプローチとしていくのか。

國友：

具体的なとり決めはないが、一般には皆伐から 20 年くらいで根が完全に腐った後に、崩壊が増えるということが過去から言われている。皆伐地については将来の土砂生産源になり得るため、危惧はしている。

群馬大学 清水先生：

中山間地域のつなぎのところで、今後土砂を考えた河道計画を考えていくにあたって、溪流砂防にどの程度期待できるのか、どの程度の規模の遊砂地が必要になるのかが重要になってくる。例えば赤谷川の事例では、従来の溪流砂防によってどの程度土砂を止められるのか。

國友：

実際に災害が起きてしまった赤谷川の場合は、各溪流で土石流対策として 1/100 規模の外力に対応できる容量の施設を整備することになる。ただし、土石流対策を整備する箇所は、直下に人家があるところに限定される。何もないところについては、下流への供給土砂量見合いで遊砂地を整備することになる。

気候変動に伴う洪水外力の変化

北海道大学工学研究院 山田朋人

- 主に雨に関して紹介。この議論の中では、よく不確実性という言葉が出てくる。
- 北海道では 3 年前に 4 つの台風があり、多くの地域で年間降雨量並みの雨を記録した。このパターンはほとんど過去に存在しないが、昭和 56 年 8 月石狩川流域の大雨のパターンと似ているところがある。
- まず、現在の観測値にどれくらいの振れ幅、不確実性があるのかを説明する。例えば空知川上流域では、平均累積量が 230mm とされているが、地上雨量計の場所を移した場合、100mm, 350mm 以上ということになる。日本では概ね 10km² に 1 地点の雨量計があるが、その計測値はこの程度の不確実性を伴う情報である。
- 例えば降雨流出式の降雨に不確実性を考慮すれば、確率微分方程式に対応した式が得られる。更に、前の降雨を今の降雨とは別の独立事象として考えると、二重拡散確率微分方程式の形状になることが認められる。全国のダム流域で解析してみた結果、今の観測降雨データには概ね 10~15% の揺らぎがある。このような揺らぎの中で、例えば避難のタイミング等を判断するということになる。
- 現在までの観測データに基づけば、ぼやっとしていても大体どんなものかを把握することはできるが、将来これらの情報がどう変化するのかということが大事になる。
- d4PDF に基づいて過去 60 年間、計 50 通りの初期条件を想定し、合計 3000 年分のデータについて気象庁の現業モデルにより降雨量を計算した。北海道、九州、西日本を対象とし、5km スケールまで力学的ダウンスケールを行い、側方境界条件として地球全体の計算結果を与えている。
- 十勝川流域、常呂川流域、石狩川、豊平川で見ると、気候変動により 4 度気温が上昇した場合、降雨量は 1.3 倍程度、石狩川は集水域において危険となる雨量パターンが異なり、全体では 1.16 倍、豊平川では 1.34 倍となる。2 度上昇では 1.1 倍となる。
- 短時間雨量について見ると、十勝川流域では 100mm/hr の降雨の可能性があることがわかった。
- 十勝川流域では、2500km² で 72 時間では中央値については将来 1.2 倍増加、内訳の流域面積が半分くらいになる。1 日降雨量は 1.2~1.3 倍程度増えることになる。時空間的に異なるハイトグラフが存在することになる。石狩川流域等、いろいろな流域で見ても似たような特性があることが確認された。
- また、同じ 200mm 降雨量でも、降雨パターンによっては流量が 2000~4000m³/s の幅をもつ可能性がある。時空間的にどの部分に集中して議論すべきなのかが重要となる。
- 情報量というのは増加すると、外れ辛さが向上すると考えられている。場が定常的でない中で、次の何十年に対して決定論と確率論の混在する新しい考え方が必要となる。

全体討議 (司会：東京建設コンサルタント 渡邊明英)

北海道大学 泉先生：

北海道豪雨の例では、直轄区間ではレーザープロファイラがとられていたので、かなり正確に土砂の生産量が把握できた。しかし、このようなデータが無い場合には、上流側の供給土砂量を見積もることは相当難しいと思われるが、どうなのか。

江頭：

崩壊した土砂が一旦堆積して、その後土砂が流れ出すプロセスを考える上では、崩壊そのものの大小は直接関係なくなる。そういう意味では、ポテンシャルエロージョンデプスだけしっかり把握できればよい。表層崩壊に限れば倍半分くらいの議論はできると思われる。

河川財団 藤田氏：

土砂生産量が分からないと下流の政策が進まない、気候変動で雨がどう増えるのかが分からないと治水計画の見直しができないので、上流域をちゃんと意識する必要がある。一方で、生産土砂量が正確に分からないと計画は進まないとか、気候変動の精緻な計算ができない限り治水の進化は無い等という状況は避けるべきである。むしろ、下流側の河川サイドからするとこういう情報がほしいということについても、同時並行でやりとりしないと上手くいかない。具体的な議論を、砂防や水文分野に投げかける必要がある。

江頭：

土石の貯まり方というのは、そんなにバラエティのあるものではない。どれだけ水を含んでいて、どのような材料かで堆積勾配は決まってくる。そういう条件を上流で設定し、洪水を与えれば検討は可能となる。そう単純ではないが。

中央大学 福岡先生：

土砂・洪水氾濫については、そろそろ土地利用の問題として具体的にトレーニングしていただき、その取り組みや成果を我々に見せていただきたい。やがてそれは都市部の水害対策にも生きてくると思われる。

國友：

赤谷川の災害を踏まえて、国総研では水害研と砂防研とで土砂・洪水氾濫のリスク情報の出し方に関する研究を進めている状況にある。赤谷川の災害は、砂防と河川が一緒になって計画を立てた事例で、お互いがそのイメージを少しずつではあるが共有、理解できるようになってきた。今後更に議論を深めていきたい。

2019 年度河川技術に関するシンポジウム OS1 (特定課題 1)

「河川管理や河川計画のための水文・河川・海岸分野の境界領域に関する河川技術」

平成 31 年 6 月 12 日(水) 15:10～17:10

東京大学 池内先生：

リスク情報の改善だけでなく，都市計画や，建築技術との関係についても議論していったほしい。

國友：

今まさに，都市局が立地適正化の審議会の中でそういったことを検討しており，そこに水局も加わって議論している。今後も引き続き取り組んでいきたい。

以上