

ISSN 1346-7328  
国総研資料 第874号  
平成27年11月

# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.874

November 2015

豪雨時の土砂生産をともなう土砂動態解析に関する留意点

蒲原 潤一・内田 太郎・丹羽 諭・松本 直樹・桜井 亘

Key points for simulation methods for sediment dynamics due to  
sediment yield during heavy rainfall

Jun'ichi KAMBARA Taro UCHIDA Satoshi NIWA Naoki MATSUMOTO  
Wataru SAKURAI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

## 豪雨時の土砂生産をともなう土砂動態解析に関する留意点

蒲原潤一\* 内田太郎\*\* 丹羽 諭\*\* 松本直樹\*\*・桜井 亘\*\*\*

### Key points for simulation methods for sediment dynamics due to sediment yield during heavy rainfall

Jun'ichi KAMBARA\* Taro UCHIDA\*\* Satoshi NIWA\*\* Naoki MATSUMOTO\*\*  
Wataru SAKURAI\*\*\*

#### 概要

本資料は、山地流域の豪雨時の土砂動態の特徴、近年の調査・解析技術の進歩を踏まえ、河床上昇等により引き起こされる土砂・洪水氾濫による被害が想定される範囲・程度に関する解析を行う際の留意事項について示した。本資料は、特に、上流域で斜面崩壊や土石流などの土砂生産が生じるような豪雨時の土砂動態を対象とした。

キーワード 土砂生産, 土砂流出, 土砂・洪水氾濫, 土砂動態解析手法, 山地河川

#### Synopsis

Here we show key points of simulation for assessing the risk and hazard due to sediment and flood triggered by riverbed aggradation based on characteristics of sediment dynamics in mountain river and recent advances of research on sediment dynamics. We focus on the sediment dynamics during heavy rainfall induced sediment yield in upper catchments, such as landslide, debris flow and so on. .

Key Words; sediment yield, sediment discharge, sediment and flood damage, sediment dynamics analysis method, mountain river

---

\*前土砂災害研究部 砂防研究室長 Head, SABO Planning Division, SABO Department  
(現 長野県砂防課長)

\*\*土砂災害研究部 砂防研究室 SABO Planning Division, SABO Department

\*\*\*土砂災害研究部 砂防研究室長 Head, SABO Planning Division, SABO Department

# 豪雨時の土砂生産をともなう土砂動態解析に関する留意点

## 目 次

はじめに	1
1 概論	
1. 1 山地域の土砂生産・流送に起因する災害	2
1. 2 山地河川の特徴	4
1. 3 山地域の土砂生産・流送にともなう土砂・洪水による氾濫 区域解析に関する基本的事項	7
2 豪雨時の土砂動態解析に則した解析手法の留意点	
2. 1 生産域から下流域までの連続的評価	9
2. 2 土石流から掃流砂・浮遊砂までの土砂移動形態の変化	10
2. 3 細粒土砂の生産・流下	14
2. 4 流砂の非平衡過程	16
2. 5 河床材料の移動限界	18
2. 6 水面幅の時間変化	20
2. 7 合流点の影響	23
3 豪雨時の土砂動態に則した条件設定に関する留意点	
3. 1 土砂の供給条件	
3. 1. 1 土砂の供給量・供給地点	25
3. 1. 2 土砂の供給タイミング	28
3. 1. 3 粒径	30
3. 2 水の供給条件	
3. 2. 1 降雨条件	32
3. 2. 2 流出解析	33
3. 3 河床条件	35
4 施設等が被害範囲に及ぼす効果を直接的に評価するための留意点	
4. 1 対策の効果評価	36
4. 2 下流河道の条件	37
おわりに	38

参 1 富士川水系の支川の春木川の解析事例

参 2 本川水位の違いが支川下流部の水位・河床変動に及ぼす影響の  
解析例

## はじめに

土砂移動による災害を防止するためには、将来生じうる土砂移動現象を予測し、対策を進めることが重要である。しかしながら、山地流域内の豪雨時の土砂移動現象は、極めて複雑であり、実績データ（例えば、豪雨期間中の水位・流量、流砂量、河床変動高など）も十分に蓄積されているとは言い難いのが現状である。そのため、現時点においても、将来生じうる土砂移動現象を予測することは必ずしも容易ではない。

流域内の土砂移動現象に関する理論的研究、現地調査・観測、水路実験や数値解析など数多くの調査・研究が行われ、流域内の土砂移動現象の実態や機構は、明らかになりつつある。さらに、土砂移動現象の実態や機構に関する知見に基づき、数値解析手法も提案され、活用されてきている。数値解析は、将来生じうる土砂移動現象を予測するために極めて有効なツールであると考えられる。

一方、数値解析により、将来生じうる土砂移動現象を予測するためには、山地流域で生じうる水及び土砂移動現象の特徴を考慮し、解析手法の選定、解析条件の設定を行う必要がある。そこで、本資料では、豪雨によって生じた土砂移動による災害を解析・予測するための土砂動態の数値解析に関する留意点を取りまとめた。

## 1. 概論

### 1. 1 山地域の土砂生産・流送に起因する災害

山地域の土砂生産・流送に起因する災害は多岐にわたる。例えば、河川砂防技術基準(計画編)<sup>1)</sup>では、計画論の観点から以下のように分類されている(図 1.1)。

- ① 上流からの流出土砂に伴う河床上昇等により引き起こされる土砂・洪水氾濫(水系砂防)
- ② 土石流災害
- ③ 流木災害
- ④ 火山噴火にともなう災害
- ⑤ 深層崩壊・天然ダム等による異常土砂災害

一方、砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)<sup>2)</sup>において、土石流区間の土石流と流木は一体として取り扱われている。さらに、河川砂防技術基準(計画編)では、時間スケールは短期、中期、長期の 3 期間に区分して対象とする土砂移動現象を設定することとされ、各期間は以下のように整理されている。

- ・ 短期は、計画規模の現象が発生する一連の降雨継続時間を目安に設定する。
- ・ 中期は、短期の降雨により生産された土砂が移動する影響期間とし数年から数十年程度を目安に設定する。
- ・ 長期は、計画の対象とする必要がある短期・中期を含む数十年程度、またはそれ以上の期間を設定する。

以上を踏まえて、山地域の土砂生産・流送に起因する災害は、計画論、期間及び災害形態から図 1.1 のように分類できる。このように多岐にわたる災害を軽減するためには災害による被害範囲・程度を予測・解析することが重要となる。また、山地域の土砂生産・流送に起因する災害の被害範囲・程度を予測・解析するためには、災害の実態・機構に則した解析手法を用いることが重要である。

本資料では、図 1.1 に示した多岐にわたる災害形態のうち、図 1.1 において A-2 として整理した「短期の土砂流出」による現象のうちの上流からの流出土砂に伴う河床上昇等により引き起こされる土砂・洪水氾濫被害を主な対象とする(図 1.2)<sup>3)</sup>。

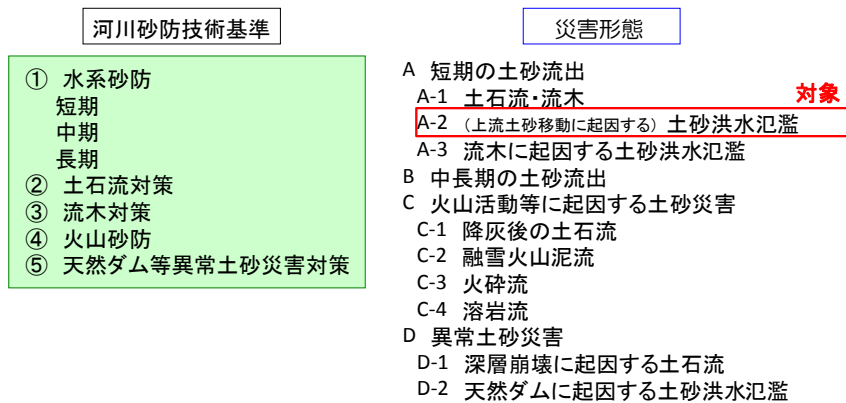


図 1.1 砂防基本計画と山地域の土砂災害形態（地すべり、急傾斜地崩壊は除く）

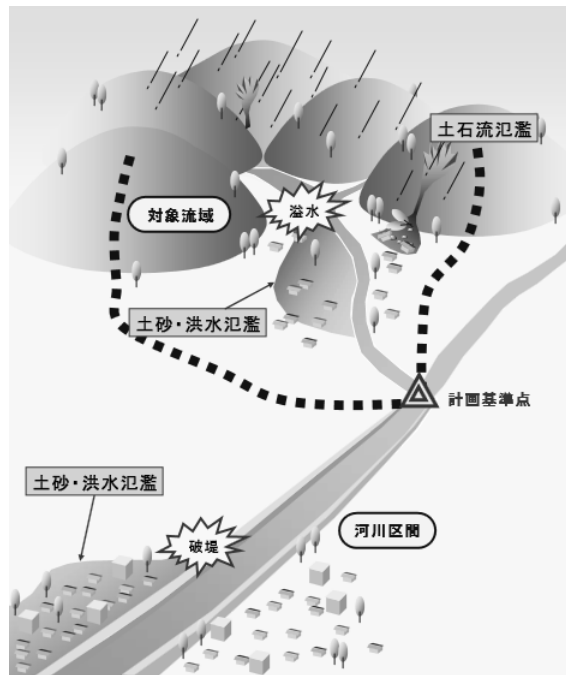


図 1.2 土砂・洪水氾濫のイメージ<sup>3)</sup>

【参考文献】

- 1) 河川砂防技術基準（計画編）
- 2) 国土技術政策総合研究所 砂防研究室（2007）：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）及び同解説，国土技術政策総合研究所資料，第 364 号.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部（2012）：砂防事業の費用便益分析マニュアル（案）

## 1. 2 山地河川の特徴

山地河川は平野部の下流河川と異なる特徴を有する。水山（2003）<sup>1), 2)</sup>では、山地河川の特徴を下流河川と比較して以下のようにまとめている。

- ① 急勾配である
- ② 流域面積が小さい・洪水到達時間が短い
- ③ 河床材料の粒径が大きく、水深が浅い
- ④ 河床変動が大きい

また、このほかにも多くの文献で山地河川の特徴について整理されている<sup>例えば、3)~5)</sup>。以下に多くの文献で触れられている代表的なものをあげる。

- (1) 山地河川の河床に流水による移動可能な土砂が十分になく、土砂供給制約（supply limit）の場合が多い。そのため、山地河川の土砂動態は土砂生産により強く影響を受ける場合が多い。
- (2) 斜面崩壊や土石流により、頻度が低い、極めて大きな（カタストロフィックな）土砂生産が生じることがある。
- (3) 河道形状（川幅、勾配、河床形態）や河床材料の粒径は時刻や場所によって大きく異なる場合がある。
- (4) 山地河川は岩盤により側刻、下刻、洗掘が制約され、下流河川のように氾濫原が発達することが少ない。
- (5) 山地流域内の土砂生産は地質や気候、テクトニカルな影響を強く受けている。
- (6) ①にも示したように勾配が急であるため、射流がしばしば生じる。

このように、下流河川と異なる特徴を有する山地河川の土砂動態を解析するにあたっては、山地河川の特徴に則した解析手法を用いることが重要である。

近年、国内外で山地河川においても多くの流砂観測が行われ、特に上記の(1)、(2)に関して、山地河川の流砂の実態の解明が進んできた<sup>6)</sup>。その結果、山地河川では局所的に露岩している箇所が見られたり、河床材料のアーモークコート化が進むなど河床等に十分な移動可能な土砂がない場合も多いため、中小出水時には流砂量が下流河川を主たる対象とした流砂理論から算出される値に比べて流砂量が少ない場合が多いことが報告されている<sup>7)</sup>。しかし、規模の大きい土砂生産があった後は河床に細粒土砂が供給されるなど河床の状況は時間とともに大きく変化する<sup>8)</sup>ため、土砂が移動し始める流量が出水によって異なる場合があり<sup>9)</sup>、土砂生産前に比べると同じ水理量であっても土砂生産後は流砂量が増加することがあることが報告されてきた<sup>10)</sup>。すなわち、流量と流砂量の関係は沖積河川では概ね安定的であるのに対し、山地河道では時間とともに大きく変化する可能性がある。



また、③にも示したように山地河道の河床には沖積河川の河床とは異なり、大きな礫から細かい砂まで幅広く存在する。さらに、形態的にも沖積河川とは異なり、ステップ・プール形状（階段状）など特徴的な形態を示す<sup>11)</sup>、このような河床の形態や河床の大きな礫は抵抗特性<sup>12)</sup>や流砂特性<sup>13)</sup>に大きな影響を及ぼすことが観測されてきた。さらに、ステップ・プール形状が破壊されると掃流砂量が増加することが報告されている<sup>15)</sup>。

以上より、中小出水時には、多くの場合、斜面崩壊や土石流の発生がないため、斜面からの表面侵食による土砂供給や河道内にある土砂の再移動により土砂流出が生じると考えられる。一方、豪雨時には、斜面崩壊や土石流などによって大量の土砂が生産される。豪雨時の土砂・洪水氾濫被害を推定・評価するためには、豪雨時の土砂動態に則した解析手法を用いるとともに、条件設定を行う必要がある。そこで、本資料においては豪雨時の山地流域の土砂動態の特徴を考慮し、豪雨時の土砂動態に関する数値解析の留意点をとりまとめた。

ただし、豪雨時の土砂動態に関する数値解析の実施にあたっては、目的、場の条件を考慮し、解析手法の選択、条件設定を行う必要がある。また、土砂生産・流出については、実態が不明な点もある。そこで、ここで示す留意点については、目的、場の条件、調査・観測などに基づき、適宜考慮することを推奨する。さらに、本資料で示した留意点以外であっても、適宜、調査・観測などに基づき当該流域の実態に則した解析を行うことが重要である。

#### 【参考文献】

- 1) 水山高久 (2003) : わかりやすい砂防技術 (1) 山地河川 (溪流) の特徴, 砂防と治水, 35(6), 52-53.
- 2) 水山高久 (2003) : わかりやすい砂防技術 (2) 山地河川 (溪流) の特徴 (続き), 砂防と治水, 36(1), 68-69.
- 3) 藤田光一・富田陽子・大沼克弘・小路剛志・伊藤嘉奈子・山原康嗣 (2008) : 日本におけるダムと下流河川の物理環境との関係についての整理・分析・ダムと下流河川の自然環境に関する議論の共通基盤づくりの一助として、国土技術政策総合研究所資料 第445号、40-44.
- 4) Wohl, E. (2010) Mountain Rivers Revisited, American Geophysical Union,
- 5) Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2011) Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. *Water Resources Research*, 47, W08513, doi:10.1029/2011WR010645
- 6) 例えば、田中健貴・内田太郎・蒲原潤一・桜井 亘(2015) : 近年の山地流域における流砂観測による成果と課題, 土木技術資料 57(7), 22-25

- 7) 例えば、Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams, *Water Resources Research*, 37(12), 3295-3305.
- 8) 例えば、丹羽 諭・内田太郎・蒲原潤一・守谷武史・光永健男・里深好文 (2016) 大規模崩壊地を有する溪流における豪雨時の土砂流出と河床変動の実態－富士川水系早川の春木川を例に一砂防学会誌 (印刷中)
- 9) 例えば、Turowski, J.M., Badoux, A., Rickenmann, D. (2011) Start and end of sediment transport in gravel-bed river, *Geophysical Research Letters*, 38, 10.1029/2010GL046558
- 10) 例えば、草野慎一・中島一郎・福本晃久・山下伸太郎・高橋健太・梅村裕也・江口友章 (2010) 天竜川水系与田切川流域における土砂動態観測, *砂防学会誌*, 63(6), 71-74.
- 11) 例えば、Montgomery, D.R., Buffington, J.M., (1997) Channel-reach morphology in mountain drainage basins, *Geological Society of America Bulletin*, 109, 596-611,]
- 12) 例えば、Asano Y., Uchida, T. (2013) Dynamic changes in water depth, velocity and resistance of flow during flood at steep mountain stream, 12th International Symposium on River Sedimentation, 737-742
- 14) 例えば、澤田豊明 (1985) 山地流域の土砂流出に関する研究, 京都大学博士論文,
- 15) 例えば、Turowski, J.M., Yager, E.M., Badoux, A., Rickenmann, D., Molnar, P. (2009) The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 1661–1673.

### 1. 3 山地域の土砂生産・流送にもなう土砂・洪水による氾濫区域解析に関する基本的事項

山地域の土砂生産・流送にもなう土砂・洪水による氾濫区域解析手法としては、

- ①降雨流出に関するモデル
- ②土砂流送に関するモデル
- ③氾濫に関するモデル

を組み合わせた解析手法が一般的である<sup>1)</sup>。

降雨流出に関するモデルは、貯留関数法、単位図法、タンクモデルなどの集中型のモデルと分布型の流出モデルがある。

土砂流送に関するモデルは、流域を斜面及び河道に分割し、河道内の土砂移動を主な対象とした1次元河床変動計算が一般的である。そのため、斜面からの河道に流入する土砂の流入量、流入するタイミング、流入地点は、土砂移動形態に合わせて別途設定する必要がある。

氾濫に関するモデルとしては一般的に水のみまたは水及び土砂の2次元氾濫計算が用いられる。

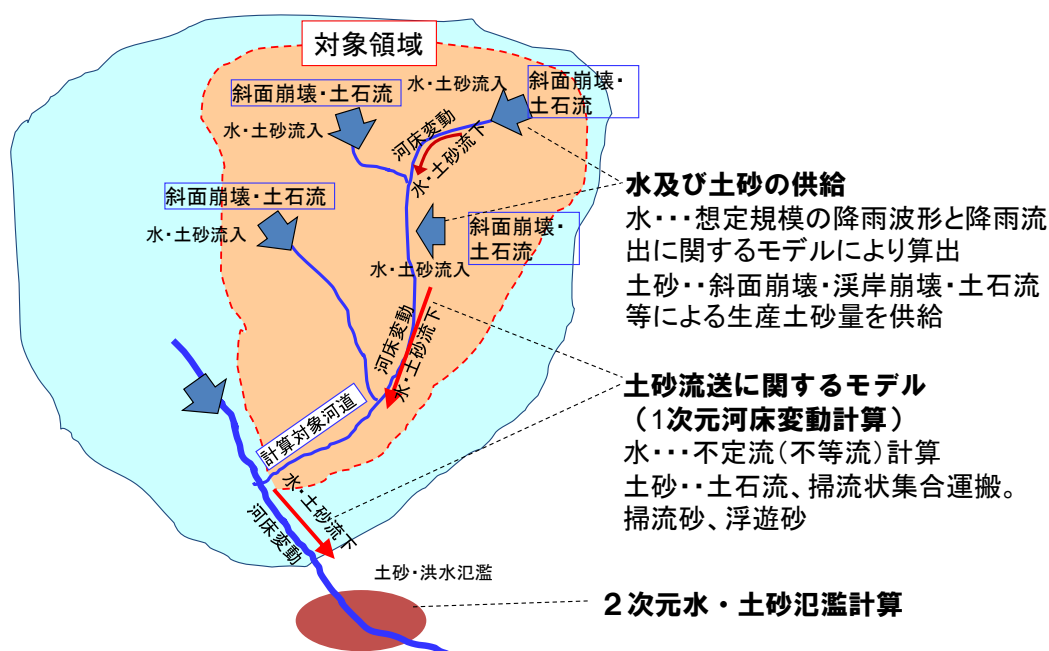


図 1.3 解析手法の概要

#### 【参考文献】

- 1) 例えば、中川一・戸田圭一・牛山素行・武藤裕則・戸床文彦 (2002) : 2001年7月台湾で発生した土砂災害, 京都大学防災研究所年報, 45(B), 407-422.

〔参考〕 山地流域の土砂流出解析における斜面部の取扱い

山地流域の土砂流出解析において用いられる「②土砂流送に関するモデル」は河道のみを対象とされている場合が多い。一方、近年、斜面や 0 次谷における土砂移動現象も考慮された解析手法も提案されてきている<sup>例えば、1)~3)</sup>。将来的には、河道のみならず、斜面や 0 次谷における土砂移動現象も解析に加えることにより、解析の不確実性の減少、計算結果の精度向上が期待される。しかし、現時点においては、多岐にわたる土砂生産現象（表面侵食、斜面崩壊、土石流、溪岸崩壊など）を全て表現することが難しく、現時点ではモデルの検証事例も必ずしも多くないことなどから、本資料では、従来多く用いられてきている「②土砂流送に関するモデル」として河道のみを対象とした解析手法を用いた場合の留意点について整理する。

【参考文献】

- 1) 平澤良輔・里深好文・水山高久・堤 大三（2011）：山地流域の雨水流出，土砂生産流出シミュレーター（SERMOW-II）の開発と適用，砂防学会誌，64（5），32-37
- 2) 山野井一輝・藤田正治（2014）：土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合型モデルの開発と山地流域への適用，土木学会論文集 B1, 70(4), I\_925-I\_930
- 3) 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武藏由育・鈴木伴征・水山高久（2014）；流域管理システム（WMS）のための土砂流出計算モデルと河床変動計算モデルの作成，砂防学会誌，66(5), 3-12.

## 2 豪雨時の土砂動態解析に則した解析手法の留意点

### 2. 1 生産域から下流域までの連続的評価

山地河道の流砂量は土砂生産源の有無・状況や土砂生産源との距離の影響を強く受ける<sup>1)</sup>。斜面崩壊や土石流による土砂生産は距離が離れた河道の河床変動や流砂量に影響を及ぼすことがある。例えば、土砂生産の有無によって同じ流量（または水深）であっても流砂量が異なることが観測されている<sup>2)</sup>。一方、上流域の土砂生産がどの程度の範囲にどの程度の影響を及ぼすかについては河道の形状、生産土砂量や生産土砂の粒径、対象期間、降雨条件など様々な要因の影響を受けるため、事前（解析実施前）に土砂生産の影響範囲を予測することは困難である。

そのため、下流域のみを対象として河床変動計算を行うなど、土砂生産源が計算区間に含まれない場合、計算の上流端の流砂量に大規模土砂生産の影響を考慮して設定することが難しい。そこで、極力、上流域（土砂生産域）を含むように解析領域を設定することが望ましい。

#### 【参考文献】

- 1) 例えば、Recking, A. (2012) Influence of sediment supply on mountain streams bedload transport, *Geomorphology* 175, 139-150.
- 2) 例えば、草野慎一・中島一郎・福本晃久・山下伸太郎・高橋健太・梅村裕也・江口友章 (2010) 天竜川水系与田切川流域における土砂動態観測, *砂防学会誌*, 63(6), 71-74.

## 2. 2 土石流から掃流砂・浮遊砂までの土砂移動形態の変化

山地域では、土石が水面付近まで層流状態を呈して土石流形態（石礫型土石流）で流下する急勾配な河道から、掃流砂・浮遊砂の形態で流下する緩勾配な河道までが連続・混在している<sup>1)</sup>。また、両者の中間的な勾配の領域では、河床近傍から流れのある高さまでは石礫型土石流同様、土石が層流状に流下する砂礫移動層が存在し、水面付近では主として水が流下する水流層が存在する掃流状集合運搬の形態で土砂は流下する。従って、解析手法においても、急勾配区間は土石流形態・掃流状集合運搬形態の土砂流送が解析可能な手法を用い、緩勾配区間は掃流砂・浮遊砂形態による土砂流送が解析可能な手法を用いた解析を行うことが重要である。

流れの抵抗・河床せん断力および輸送される土石の量・濃度に関する理論の構築、定式化は土砂移動形態ごとに行われてきている<sup>2)</sup>（例示参照）。また、土砂移動形態は、勾配、相対水深によって決まると考えられている<sup>3)</sup>。

これまで土石流、掃流状集合運搬、掃流砂を対象とした計算モデルとしては江頭の理論を基にした解析手法<sup>4)</sup>や高橋の理論を基にした解析手法<sup>5)</sup>、土石流及び掃流状集合流動を統一的に扱える解析手法<sup>6)</sup>が提案されてきた。また、高橋の理論を基にした解析手法については、汎用的な数値計算プログラムの構築<sup>7)</sup>や河床せん断力と土石の平衡濃度を連続的に評価する手法の提案<sup>8)</sup>、数値計算プログラム作成上の留意点<sup>9)</sup>が整理されている。

さらに、急勾配区間の土石流は相対水深によって流れの形態が異なることが指摘されてきている<sup>10)</sup>。すなわち、水深に対して土石の粒径が十分に小さい場合は、乱流（泥流）型の土石流になる<sup>11)</sup>。そこで、石礫型の土石流に加えて、乱流（泥流）型の土石流の数値解析を行う手法も提案されてきた<sup>12)</sup>。火山噴火後など、流域内に細粒の土砂が大量に存在する場合などは、乱流（泥流）型の土石流が生じる可能性考えられ、乱流（泥流）型の土石流による土砂流出についても適宜考慮する必要がある。

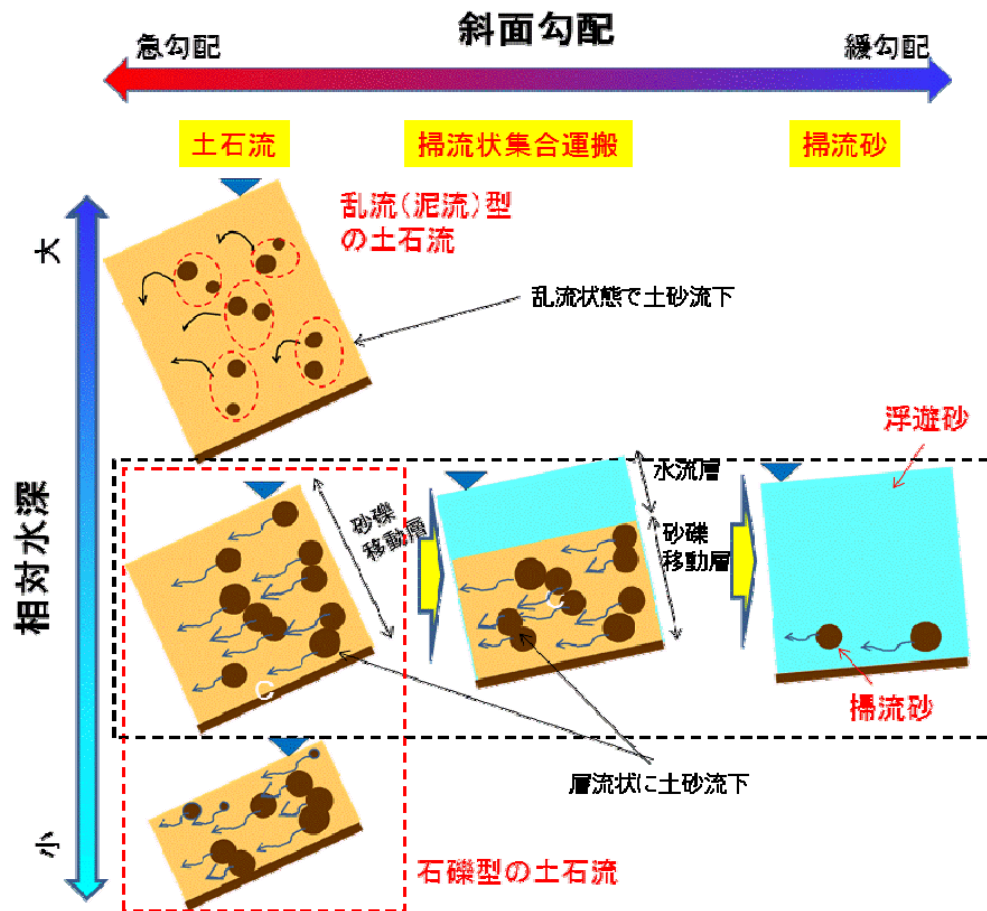


図 2.1 土石流から掃流砂まで土砂移動形態の変化のイメージ  
 (細粒土砂分については図化していない(2.3節参照)。図中の黒破線の枠は図 2.2 で図化した範囲)

【参考文献】

- 1) 例えば、芦田和男・江頭進治・中川 一 (2008) : 21 世紀の河川学, 京都大学出版会, 108-111.
- 2) 河川砂防技術基準 (調査編)
- 3) 例えば、高橋 保 (1982) ; 土石流の停止・堆積機構に関する研究(3), 京都大学防災研究所年報, 25(B-2), 327-348,
- 4) 宮本邦明・伊藤隆郭 (2002) : 支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法, 砂防学会誌, 55(2) , 24-35.
- 5) 中川一・高橋保・里深好文・川池健司 (2001) : 1999 年ベネズエラのカムリグランデ流域で発生した土砂災害について, 京都大学防災研究所年報, 44(B-2), 207-228.
- 6) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘 (2000) : 土石流から掃流状集合流動に遷移する流

- れの解析法に関する研究, 水工学論文集, 44, 683-686.
- 7) 中谷加奈・和田孝志・里深好文・水山高久 (2008) : GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 149-154.
  - 8) 鈴木拓郎・内田太郎・岡本敦 (2013) : 土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究, 砂防学会誌, 66(2), 21-30.
  - 9) 内田太郎・丹羽諭・西口幸希・村上正人・蒲原潤一・岡本敦 (2014) : 大規模な土石流の流下・堆積に関する数値計算プログラム作成の留意点, 土木技術資料, 56(9) , 22-25
  - 10) Hotta, N., Miyamoto, K. (2008) : Phase classification of laboratory debris flows over a rigid bed based on the relative flow depth and friction coefficients, *International Journal of Erosion Control Engineering*, 1, 54–61.
  - 11) 例えば、高橋保 (2004) : 土石流の機構と対策, 近未来社, 168-170, 236-238, 249-251, 276-279, 296-300, 316-319
  - 12) 高橋 保・里深好文 (2002) : 石礫型及び乱流型土石流の一般理論とその実用化モデル, 砂防学会誌, 55(3). 33-42



[例示] 山地河道における流砂の流出・変動特性を再現・予測するために用いる式(河川砂防技術基準(調査編)より引用)

山地河道における流砂の流出特性・変動特性を再現・予測するために用いる流砂量式等としては、以下の式がある。また、このほか、新しく提案される式などについても適用条件等に注意して使うことができる。

1) 掃流砂

a) 限界掃流力に関する式

岩垣公式、修正 Egiazaroff 式

b) 掃流砂量式

芦田・道上式、Meyer-Peter・Muller 式、芦田・高橋・水山式

2) 浮遊砂

a) 浮遊砂量式(流速分布と濃度分布の組合せ)

Lane-Kalinske の式、板倉・岸の式

b) 基準面濃度式

Lane-Kalinske の式、板倉・岸の式、芦田・岡部・藤田の式、芦田・道上の式

c) 濃度分布式

ラウス分布

3) 土石流

a) 土石流の抵抗則

高橋の式、江頭・宮本・伊藤の式

b) 土石流の濃度則

① 平衡濃度式

高橋の式

② 侵食・堆積速度式

高橋の式、江頭の式

4) 掃流状集合流動

a) 掃流状集合流動の抵抗則

高橋の式、江頭・宮本・伊藤の式

b) 掃流状集合流動の濃度則

① 平衡濃度式

高橋の式、水山の式

② 侵食・堆積速度式(土石流と同様)

高橋の式、江頭の式

## 2. 3 細粒土砂の生産・流下

豪雨時には、山腹崩壊が数多く発生し、細かい土砂が大量に供給される<sup>1)</sup>。このような細粒土砂は、急勾配区間では濁りの成分（ウォッシュロード）として通過する可能性も考えられるが、下流域の河床変動に影響を及ぼす可能性がある。また、急勾配区間では、緩勾配区間と比べて、比較的粗い粒径（数cm）まで、浮遊する可能性が考えられる<sup>2)</sup>。さらに、近年、急勾配領域の細粒土砂を取り扱う計算が実施され、大規模な土砂移動現象を記述するために、細粒土砂を含めて解析することは重要であることが確認されている<sup>3),4)</sup>。これらのことより、細粒土砂についても、急勾配領域から緩勾配領域まで連続的に評価する必要があると考えられる。

しかし、急勾配な山地流域の細粒土砂の挙動については不明な点が少なくない。従来、土石流、掃流状集合運搬領域の解析手法は、主として、粗礫の挙動に着目したものが多かった<sup>5)</sup>。一方、緩勾配な河道における土砂動態の解析は掃流砂のみならず、浮遊砂を含めた解析が一般的に実施されてきた。このため、土石流・掃流状集合運搬を対象とした解析手法と緩勾配領域の掃流砂を対象とした解析手法は連続的に解析可能であるものの、急勾配領域においては、細粒土砂が解析対象となっていない場合が多く<sup>3)</sup>、土石流・掃流状集合運搬を対象とした解析手法と緩勾配領域の掃流砂・浮遊砂を対象とした解析手法を単に接続しようとした場合、接続点で流砂量が不連続になる可能性が高い。

急勾配領域における石礫型土石流は、土石流の骨格を形成する石礫は層流上に流下しているものの、石礫間を埋める間隙流体は乱流状態である。そのため、土石流中の細粒土砂は石礫とともに骨格を形成するのではなく、間隙流体と一体となって流下すると考えられている。このような現象は細粒土砂のフェーズシフトと呼ばれ<sup>6)</sup>（図 2.2 の右図参照）、フェーズシフトを考慮した土石流の解析手法が提案されてきた<sup>5),6),7)</sup>。また、細粒土砂のフェーズシフトは掃流状集合形態における砂礫移動層中에서도生じていると考えられる。一方、掃流状集合運搬形態の水面付近のいわゆる水流層では、掃流域同様、細粒土砂が浮遊している可能性も高い（図 2.2 の中央図参照）。しかしながら、掃流状集合運搬形態のときの砂礫移動層内でフェーズシフトした細粒土砂と水流層内で浮遊している細粒土砂の挙動、粒径、濃度がどのように連続しているかについては現時点で十分に解明されているとは言い難い。

図 2.2 のような土石流形態から掃流砂・浮遊砂の形態まで連続的に細粒土砂を解析する試み<sup>7)</sup>が行われてきているものの、土石流や掃流状集合運搬の領域において、間隙流体に含まれる細粒土砂濃度の規定要因や挙動のモデル化については、今後のさらなる検討・検証が必要であると考えられる。

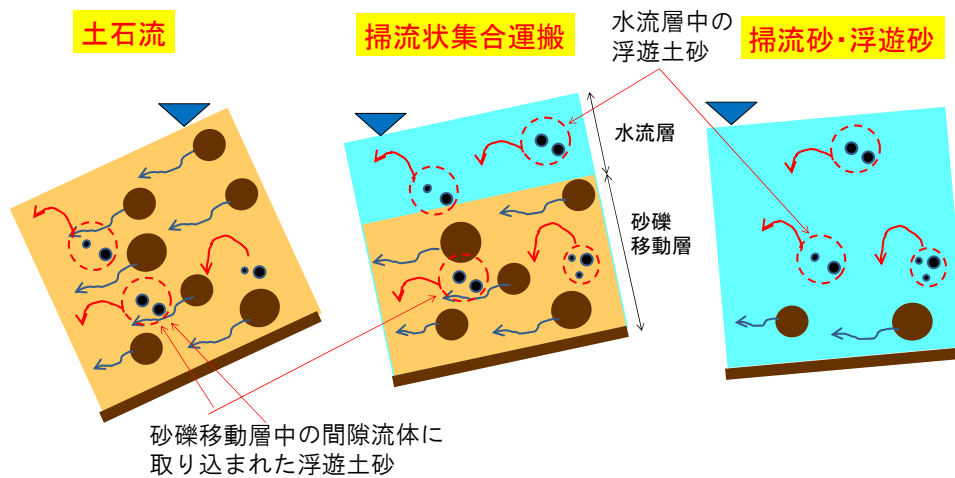


図 2.2 細粒土砂の流下のイメージ

【参考文献】

- 1) 水山高久 (2003) : わかりやすい砂防技術 (3) 土砂の生産, 砂防と治水, 36(2), 64-65.
- 2) 水山高久 (2003) : わかりやすい砂防技術 (4) 土砂の流出、堆積, 砂防と治水, 36(3), 74-75.
- 3) 例えば、中谷加奈・和田孝志・里深好文・水山高久 (2008) : GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 149-154.
- 4) Iverson, R.M. (1997) : The physics of debris flows, *Reviews of Geophysics*, 35, 245-296.
- 5) 江頭進治・佐藤隆宏・宮本邦明 (1998) : 姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション, *水工学論文集*, 42, 919-924
- 6) 西口幸希・内田太郎・石塚忠範・里深好文・中谷加奈 (2011) : 細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーションー深層崩壊に起因する土石流への適用ー, *砂防学会誌*, 64(3), 11-20.
- 7) 鈴木拓郎・道畑亮一・池田暁彦・内田太郎・岡本 敦・林真一郎・長谷川祐治・堀田紀文 (2013) : 土石流から掃流砂領域までを連続して取り扱う数値シミュレーション手法に関する検討, *砂防学会研究発表会概要集 B*, 114-115

## 2. 4 流砂の非平衡過程

山地流域においては、出水の継続時間が短く、流量の時間変動も大きい<sup>1)</sup>ため、土砂移動現象の時間変化が大きい。さらに、山地河道では勾配や川幅等の地形条件が短い区間であっても大きく異なる場合が多く、場所によって水理条件（水深、掃流力など）が大きく異なる場合が多い。そのため、山地河道においては、当該地点の水理条件が同じであってもある一定時間、一定区間水理条件が変化しない場合の流砂量（平衡状態の流砂量）と実際の流砂量が一致しない場合がある。このように流砂量が平衡状態の流砂量と一致しない状況を非平衡過程・非平衡状態と呼ばれる<sup>2)</sup>。さらに、豪雨時には山地河道に非平衡性が強い（浮遊が卓越するため平衡濃度に達するまでの距離が長い）と考えられる細粒土砂が崩壊等により供給される。そこで、豪雨時の山地河道の土砂流出解析にあたっては、流砂の非平衡過程を考慮した解析を行うことが重要である。

なお、平衡状態の流砂量はその場の水理条件、河床条件のみで決まり、基本的には前の時間や上流側の流砂量の影響を受けない（図 2.3 参照）。一方、非平衡状態の場合、ある地点の流砂量はその場の水理条件、河床条件のみならず、上流側の流砂量の影響を受ける。

粒径の小さい浮遊砂に関しては、平衡状態を仮定した解析<sup>3)</sup>に加えて、巻き上げ量と沈降量を逐次算出する非平衡性を考慮した解析<sup>4)</sup>も行われてきている。また、浮遊砂濃度が高くなった場合、通常用いられる沈降速度式（Rubey の式など）から算出される沈降速度より沈降速度が小さくなり、高い浮遊砂濃度が維持されやすい可能性も指摘され、土砂濃度が高い場合の沈降量を算出する式が提案されてきている<sup>5)</sup>。

緩勾配区間の掃流砂に関しては、既往の解析において、掃流砂の非平衡性を考慮した理論が提案されてきてはいるものの<sup>2)</sup>、緩勾配領域では非平衡の度合いが小さいとして、掃流砂は平衡状態を仮定した解析が多く用いられている。

急勾配区間を対象とした土石流や土砂流に関しては、流砂の非平衡性を表現する侵食堆積速度式が提案されてきた。侵食堆積速度式としては、高橋の式<sup>6)</sup>、江頭の式<sup>7)</sup>、鈴木らの式<sup>8)</sup>などが一般的に用いられる。また、高橋の式を用いた解析においては、現象の再現のために堆積速度係数が同定される場合もあり、対象現象や対象流域により異なる係数が用いられてきている<sup>9)</sup>。ただし、従来の高橋の式を用いた解析においては、代表粒径による単一粒径の解析モデルが多く適用され、2.3 で示した細粒土砂の流出の影響が明示的に解析されていない場合が多く、非平衡性の強い細粒土砂による土砂移動現象の影響の違いを再現するために、現象によって異なる堆積速度係数の同定が必要であった可能性が考えられる。そこで、2.3 の細粒土砂の生産・流下の影響と流砂の非平衡過程の影響はあわせて考慮することが望ましいと考えられる。



## 2. 5 河床材料の移動限界

山地河道では中小洪水時の流砂量は極めて小さく、河床が変形しないことが多い。一方、豪雨時には流砂量が急増し、河床に堆積した土砂が急激に流出することがしばしばある。このような現象は、流水が河床に与える外力がある限界値を超えた場合、侵食が開始するために生じると考えられる。このため、河床材料の移動限界を考慮しないと過大な土砂が下流に流出する等、土砂動態の実態にそぐわない解析結果となるおそれがあり、河床材料の移動限界を考慮した解析を行うことが重要である。

掃流砂を対象とした河床変動計算では一般的に河床材料の移動限界は考慮されており、移動限界の評価にあたっては、岩垣公式、修正 Egiazaroff 式が一般的に用いられる<sup>1)</sup>。一方、急勾配な領域の土石流を対象とした解析では、土石流流下時のみを対象としている場合が多く、河床材料の移動限界が考量されていない場合も多い。また、急勾配な領域を対象に河床内部のせん断力とせん断強度の比較により河床材料の移動限界を評価する手法が提案されている<sup>2)</sup>。その結果、河床材料の移動限界を考慮することにより、河床変動の時間変化の再現精度が向上することが報告されている<sup>3)</sup>。

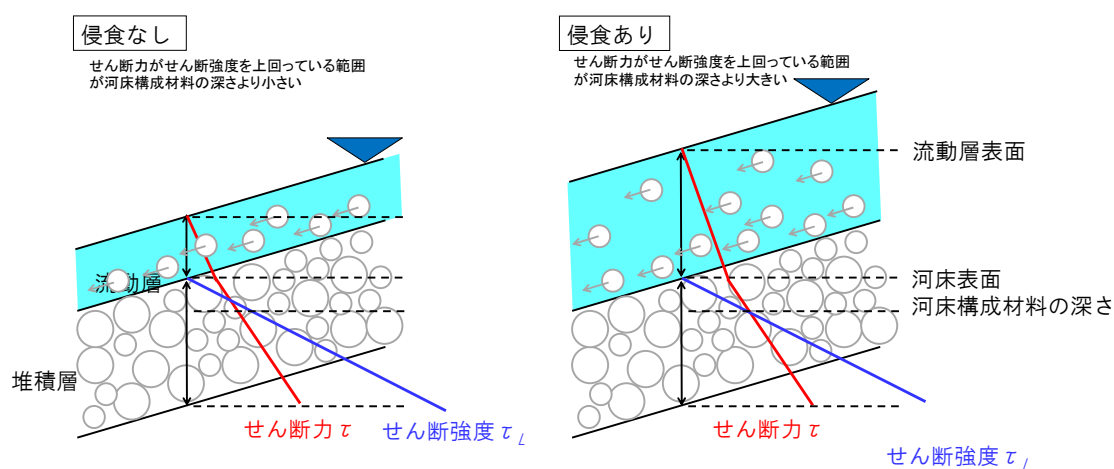


図 2.4 河床内部のせん断力とせん断強度の比較により河床材料の移動限界を評価する手法のイメージ

### 【参考文献】

- 1) 土木学会 (1999) : 水理公式集.
- 2) 高橋 保 (1977) : 土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 20(B-2), 405-435.
- 3) 丹羽 諭・内田太郎・蒲原潤一・里深好文 (2014) : 土砂生産のタイミングが河床変動に及ぼす影響に関する数値計算, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 181-186

〔例示〕 富士川水系春木川における河床変動の時間変化の観測事例

下記には、富士川水系の支川の春木川に設置された砂面計による河床変動計測結果を示す。降雨の前半は河床低下が生じる場合もあるものの、顕著な河床変動が見られない場合があることが分かる。砂面計による観測手法の詳細は林・衣笠 (2004) <sup>1)</sup> に詳しい。

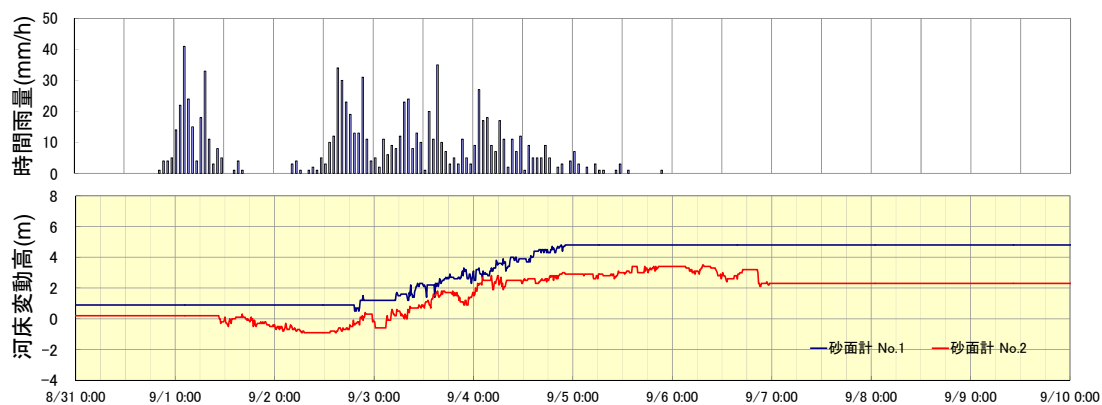


図 2.5 砂面計による河床変動の計測例 (丹羽ら (2014) <sup>2)</sup> を基に作成)

【参考文献】

- 1) 林 孝標・武笠裕美 (2004) : 総合土砂管理のための河床変動・土砂移動実態把握の試み, 砂防学会誌, 57(4), 68-73
- 2) 丹羽 諭・内田太郎・蒲原潤一・里深好文 (2014) : 土砂生産のタイミングが河床変動に及ぼす影響に関する数値計算, 第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 181-186



## 2. 6 水面幅の時間変化

山地河道においては、斜面崩壊や土石流によって生じた大量な土砂が堆積し、平水時や中小洪水時の流水の流下幅を大きく上回る堆積域が生じることがある。CCTV の画像等によると、大規模な洪水であっても、山地河道の流水の流下幅は最終的な土砂の堆積幅に比べると小さく、流れが左右に変動することにより広大な堆積域が生じる場合があることが確認されている（例示参照）。また、流水の流下幅は流量にともない変化することも確認されている。特に、河床低下時は堆積域の全幅の一部に流れが集中する場合が多い<sup>1)</sup>。これらのことは、解析に用いる流下幅として堆積域の全幅を用いると、同じ水量であっても、流下幅が実態より過大となり、掃流力、流砂量が過小に評価される可能性が考えられる。このため、流下幅及びその時間変化の実態について CCTV 画像などを用いた現地調査を行うとともに、流下幅及びその時間変化を考慮した解析を行うことが重要である。

一部に集中する流水の流下幅 ( $B$ ) は経験的に流量の  $1/2$  乗に比例するレジーム則 ( $B=\alpha Q^{1/2}$ ) で表現できることが知られている。また、レジーム則の係数  $\alpha$  は、経験的に  $3.5\sim 7$  程度になることが多いことが指摘されてきた<sup>2)</sup>。さらに、既往の解析においては流下幅を空中写真から読み取れる川幅や過去の災害時の土砂移動が生じたと考えられる全幅とし、時間変化がないと仮定して扱う場合も多いが、流下幅を逐次レジーム則に従って変化させる解析手法も行われてきた<sup>例</sup> (例えば<sup>3)~5)</sup>。



図 2.6 流水の流下幅と最終的な土砂の堆積幅（土砂移動が生じたと推定される幅）



【参考文献】

- 1) 水山高久 (1993) : 溪流での土砂移動現象, 山地保全学 (小橋澄治編 文永堂出版)
- 2) 水山高久 (1977) : 山地河川の掃流砂に関する研究, 京都大学学位論文
- 3) 栗原淳一・井戸清雄 (1993) : 常願寺川の河床変動とその制御に関する研究, 砂防学会誌, 45(5), 3-10
- 4) 藤田正治・水山高久・飯田猛行 (1997) : 床固め工群を有する河道の河床変動特性, 砂防学会誌, 50(3), 21-27
- 5) 福田克之・松本清則・谷口和哉・椿下康之・清水幹輝・水山高久 (2002) : 出水中におけるスリット砂防堰堤の土砂流出調節に関する研究—黒部川流域祖母谷支川を対象として—, 砂防学会誌, 54(6), 25-34

[例示] 富士川水系春木川における観察例

富士川水系春木川の大春木沢は源頭部に七面山崩れを抱えている。七面山崩れから約 2 km 下流の大春木砂防堰堤では、平成 23 年台風 12 号来襲時の CCTV 映像データが得られており（図 2.7）、このデータから土砂流出が激しい時間帯における堰堤水通しの越流範囲を判読した結果を示す。判読結果から、水通し幅 20 m いっぱいに流れている時間は少ないこと、10 分程度の間隔で越流位置が変化することがわかる（図 2.8）。



図 2.7 水通し越流範囲の判読方法

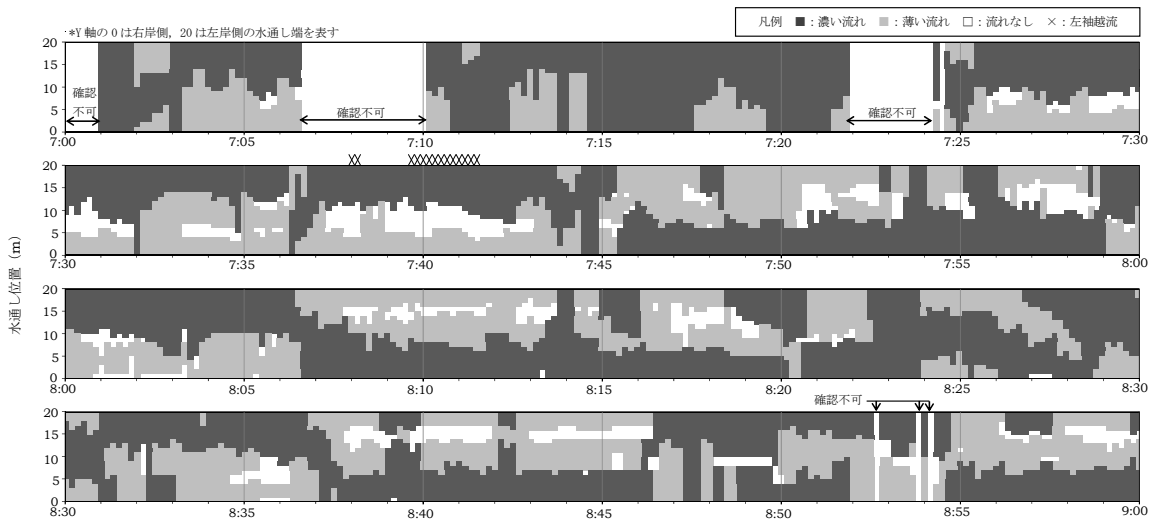


図 2.8 台風 12 号 9/3 の 7:00～9:00 における堰堤水通しの越流状況

\*黒色は流れの色が濃く、土砂が移動していると考えられる範囲

\*Y 軸の 0 が右岸側、20 が左岸側の水通し端を表す

(富士川砂防事務所取得データを基に国土技術政策総合研究所 砂防研究室作成)

## 2. 7 合流点の影響

急勾配溪流から大量な土砂が比較的勾配の緩い本川河道に流入すると、本川と支溪の合流点近傍では河道閉塞等の複雑な土砂移動現象が発生することがある<sup>1)</sup>。また、解析においても、合流点近傍で大量な土砂が異常堆積をおこす場合がある。このため、急勾配溪流と本川の接続点の土砂動態や急勾配溪流からの土砂供給については解析結果を確認し、解析が合流点特有の土砂動態を表現できているか確認する必要がある。

また、出水のタイミングの差異や流域面積の違いなどにより、合流点において本川水位が支川末端水位より高い場合には、支川末端における掃流力が減少し、本川に流入しようとした土砂が支川末端から堆積遡上することも考えられる<sup>2), 3)</sup>。そのため、合流点付近の土砂洪水氾濫被害の詳細を推定するにあたっては、合流点周辺の複雑な土砂動態を考慮した解析を行うことが重要である。計算対象の領域に含まれる全ての合流点における複雑な土砂の挙動を同時に解析することが困難な場合であっても、保全対象の位置などを考慮し、照査が必要な合流点については領域を切り出すなどして検討することが望ましい。

合流点付近に限定した場合、2次元平面での解析や本川河道と支川を接続するネットワークモデルによる1次元解析により、合流点付近の詳細な被害推定を行うことが程度可能であると考えられる<sup>4)</sup>（参考資料2参照）。さらに、本川の水位から支川下流端の水位を設定することにより、支川の堆積遡上をある程度表現することも可能である。また、合流点における土砂動態の解析にあたっては、出水のタイミングの影響を考慮することが重要であり、集水のタイミングについて感度分析するなどが考えられる。

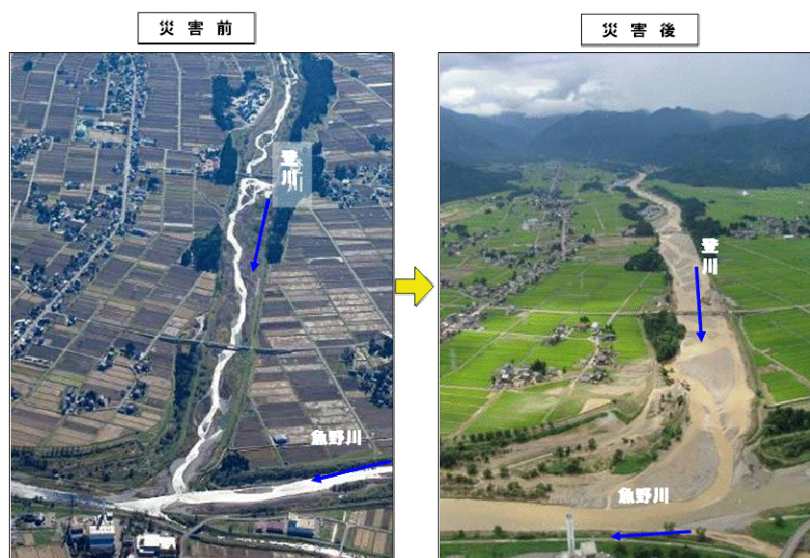


図 2.9 合流点における土砂堆積・氾濫状況（湯沢砂防管内）

【参考文献】

- 1) 水山高久・井良沢道也・小林幹男・酒谷幸彦（1990）：山地河川における河床変動の実態，砂防学会誌, 43(4), 27-32.
- 2) 増田 覚・水山高久・小田 晃・大槻英樹（2008）：本支川の出水のずれによる合流点の河床変動に関する研究，砂防学会誌, 61(4), 27-31.
- 3) 水山高久（2003）：わかりやすい砂防技術（4） 土砂の流出，堆積，砂防と治水, 36(3), 74-75.
- 4) 中谷加奈・前田大介・坂田拓朗・水山高久・里深好文（2012）：支川合流を考慮した土石流数値シミュレーション手法の検討，平成 24 年砂防学会研究発表会概要集, 78-79

### 3 豪雨時の土砂動態に則した条件設定に関する留意点

#### 3. 1 土砂の供給条件

##### 3. 1. 1 土砂の供給量・供給地点

土砂の供給量の設定手法は、現地調査や過去の豪雨時の土砂生産の実態に則して設定する手法と数値計算など解析的に設定する手法が考えられる。

一方、斜面崩壊、溪岸侵食・崩壊、土石流の発生位置を災害前に正確に想定することは現状難しい。また、1次谷など全ての河道を対象に解析を実施することは多大な労力を要する。さらに、土砂の供給の形態としては、斜面崩壊や溪岸侵食・崩壊などによる斜面や溪岸から河道への直接流入、土石流の発生による溪流からの流入など複数考えられる。そこで、土砂供給地点は、過去の災害時の崩壊や土石流の分布状況・生産土砂量の空間分布・土砂生産形態、各種の調査結果、計算対象区間の設定状況などを総合的に鑑み、適切に土砂供給地点を設定する必要がある。

#### [参考] 土砂供給量の設定方法

現地調査や過去の豪雨時の土砂生産の実態に則して土砂供給量を設定する手法については、国土交通省河川砂防技術基準（計画編）の第3章第2節「2.2.4 計画土砂量等」および国土交通省河川砂防技術基準（調査編）の第17章「砂防調査」などに詳しい。

#### 【参考文献】

- 1) 河川砂防技術基準（計画編）
- 2) 河川砂防技術基準（調査編）

〔例示〕土砂の供給地点の設定

2.1 で示したように、計算区間は極力土砂生産域に近い方が望ましい。一方、全ての土砂生産源から下流全てを解析対象とするのは、生産源の特定、計算の負荷の観点から多大な労力を要する。また、河床勾配が極めて急な領域においては、土石流に関する解析事例も少ない。

そこで、本川の計算区間の設定にあたっては、流域面積、河床勾配を考慮し、設定することが現実的である（図 3.1 の黒実線の河道）。例えば、土石流の堆積すると考えられる河床勾配（ $10^\circ$  以下）が概ね計算区間に含まれるようにするなどが考えられる。また、流域面積が本川の計算区間の上流端の流域面積と同程度か大きい支川については、土砂流出に及ぼす影響が大きいことも考えられるため、本川同様、計算対象河道を設定する（図 3.1 の青実線の河道）。さらに、流域面積が本川の計算区間の上流端の流域面積よりは小さいものの、流域面積が比較的大きい支川（図 3.1 の黄色の流域）も土砂流出に及ぼす影響はある程度大きいと考えられる。そこで、このような支川からの土砂流出が表現できるように、規模の大きい支川と計算対象河道の合流点に側方の供給点（図 3.1 の青三角）を設けることが考えられる。その上で、溪岸侵食による土砂供給が考えられる場合は、直接河道に土砂を流入させるなどが考えられる。

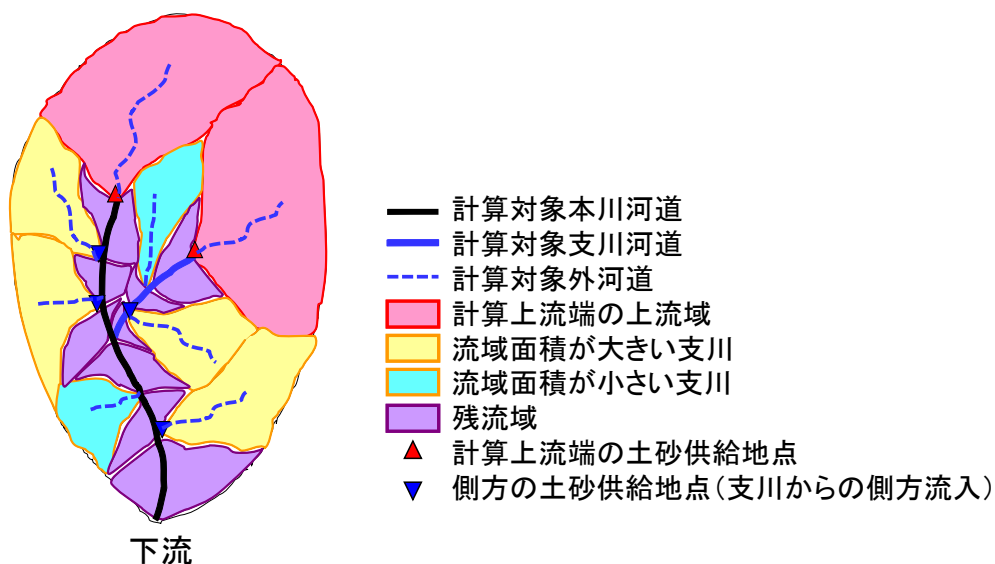


図 3.1 土砂供給地点設定の例のイメージ

【例示】 信濃川水系魚野川流域内の河床変動に関する調査事例

土砂の供給形態として、溪岸崩壊・溪岸侵食の果たす役割の大きさが指摘されてきている<sup>1)</sup>。下記には、レーザープロファイラデータを用いた、平成23年7月新潟福島豪雨による魚野川水系登川本川の河床変動量の調査結果を示す(図3.2)。同河道においては、河床における侵食・堆積に加えて、溪岸崩壊・溪岸侵食により、多くの土砂が生産されていることが分かる。

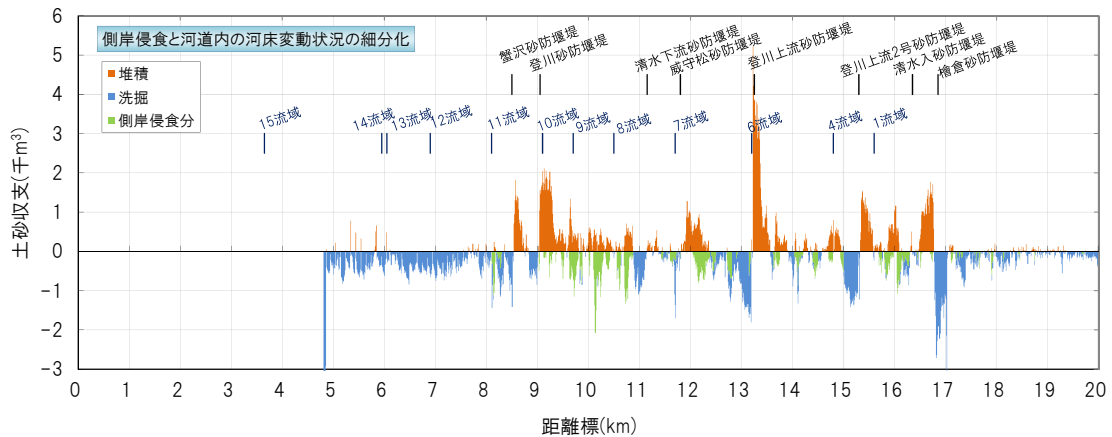


図 3.2 平成23年7月新潟福島豪雨による魚野川水系登川本川の河床変動(湯沢砂防事務所取得データを基に国土技術政策総合研究所 砂防研究室作成)

【参考文献】

- 1) 例えば、水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(3) 土砂の生産,砂防と治水,36(2), 64-65.

### 3. 1. 2 土砂の供給タイミング

豪雨時の河道への土砂供給プロセスとしては、斜面等からの崩壊や土石流による土砂供給が主たるものであると考えられ、一般的に総雨量または降雨強度が大きい時間帯に集中する。また、河床に大量の不安定土砂が堆積している急勾配な溪流の場合であっても、観測や水路実験によると、河道には、間欠的に土砂が供給されることが示されてきた<sup>1), 2)</sup>。

しかし、既存の計算事例では計算上流端において洪水期間中は常に平衡給砂するなど、単純な仮定が用いられる事例が多い<sup>3)</sup>。一方、住民からの聞き取り調査結果に基づき土砂供給タイミングを考慮した河床変動計算を実施し、洪水後の河床変動高を良好に再現できたことを報告した例もある<sup>4)</sup>。また、土砂供給の総量が同じであっても、土砂供給のタイミングを変化させることによって、下流への流出土砂量や河床変動高に違いが生じることも明らかにされてきた<sup>5)</sup>(巻末の参考資料1参照)。

そこで、土砂生産のタイミングの実態を調査することが重要である<sup>6)</sup>。その上で、土砂生産のタイミングを考慮し、土砂供給の条件を設定することが重要である。また、土砂生産のタイミングに関する十分な情報が得られない場合は、想定される範囲で感度分析を行うことも考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 今泉文寿・土屋 智・逢坂興宏 (2002) : 荒廃溪流源頭部の砂礫堆積地における土石流の発生と流動過程の観測, 砂防学会誌, 55(3), p.50-55
- 2) 池田暁彦・水山高久・杉浦信男・長谷川祐治 (2009) : 土石流発生源における溪床堆積土砂の変形に関する実験的研究, 砂防学会誌, 62(4), 46-51
- 3) 例えば、赤沼隼一・小山内信智・安田勇次・嶋 大尚 (2002) : 平成 11 年 9 月 15 日重信川流域土砂災害における砂防施設効果, 砂防学会誌, 55(2), 43-51
- 4) 栢木敏仁・水山高久・佐藤一幸・村上正人 (2007) : 土砂生産のタイミングを考慮した土砂生産・流出に関する研究, 砂防学会誌, 59(5), 15-22.
- 5) 丹羽諭・内田太郎・蒲原潤一・里深好文 (2014) : 土砂生産のタイミングが河床変動に及ぼす影響に関する数値計算, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 181-186
- 6) 水山高久 (2003) : わかりやすい砂防技術 (3) 土砂の生産, 砂防と治水, 36(2), 64-65.



#### [参考] 土砂供給時の土砂濃度の考え方

これまでの多くの山地流域の土砂流出解析において、計算区間上流端では、その場の水理条件と河床材料を用いて、流砂理論から決まる平衡濃度・平衡流砂量で土砂が流入するとして、解析が行われている。

本節で示したように土砂供給のタイミングを考慮した上で、土砂供給時に土砂の供給点付近の河床勾配、水理条件、供給土砂の粒径から決まる平衡流砂量を供給した場合、解析上の河道への土砂供給量が現地調査や過去の豪雨時の土砂生産の実態に則して設定した土砂供給量（3.1.1 参照）と整合しない場合が考えられる。不整合の要因としては、上流域の流出する可能性がある移動可能な土砂量や豪雨時に斜面崩壊等によって生じる生産土砂量が計算上流端における流量、勾配、粒径等によって決まる運搬可能な土砂量に比べて小さいことなどが考えられる。そこで、このような場合、過去の豪雨時の現象と整合を取るためには、土砂供給量をその場の平衡流砂量としない、土砂の供給のタイミングを見直す（出水前半に集中させるなど）、計算対象区間を見直す、側方流入点を見直すなどの対応が考えられる。

### 3. 1. 3 粒径

斜面崩壊や土石流などによって生じる土砂は出水前に山地流域内の河床に堆積している土砂と異なる粒径である場合が多い（図 3.3）。斜面崩壊や土石流などによって生じる土砂のうち、細粒分は出水期間中に流下し、河床に堆積しないことが考えられる<sup>1)</sup>。また、河床堆積土砂は、堆積後のアーマーコート化により生産土砂より粗い粒径分布を有している場合が多い。そこで、生産土砂と河床堆積土砂の粒径の違いを考慮し、計算上流端での土砂供給を実施することが重要である。すなわち、土砂生産源となる山腹、溪床、溪岸の粒度分布調査や河床堆積物のアーマーコート化に関する調査を行い<sup>2)</sup>、調査結果等を基に供給する土砂及び河床の土砂の粒度分布を決めることが重要である。



図 3.3 大量な土砂生産にともなう河床の粒径の変化の例（富士川砂防事務所管内）

#### 【参考文献】

- 1) 水山高久（2003）：わかりやすい砂防技術（3） 土砂の生産，砂防と治水，36(2)，64-65.
- 2) 水山高久（2003）：わかりやすい砂防技術（4） 土砂の流出、堆積，砂防と治水，36(3)，74-75.

【参考】 河床材料と大規模出水時に堆積したと考えられる土砂の粒度分布の調査事例

図 3.4 に常時流水がある区間の河床の土砂と大規模出水時に堆積したと考えられる土砂の粒度分布に関する調査結果の例を示す。調査方法については、蒲原ら(2014)<sup>1)</sup>に記載されている。この図より、常時流水がある区間の河床の土砂の粒径は大規模出水時に堆積したと考えられる土砂の粒径に比べて、中央粒径で見た場合、2 オーダー程度大きくなる場合があることが分かる。

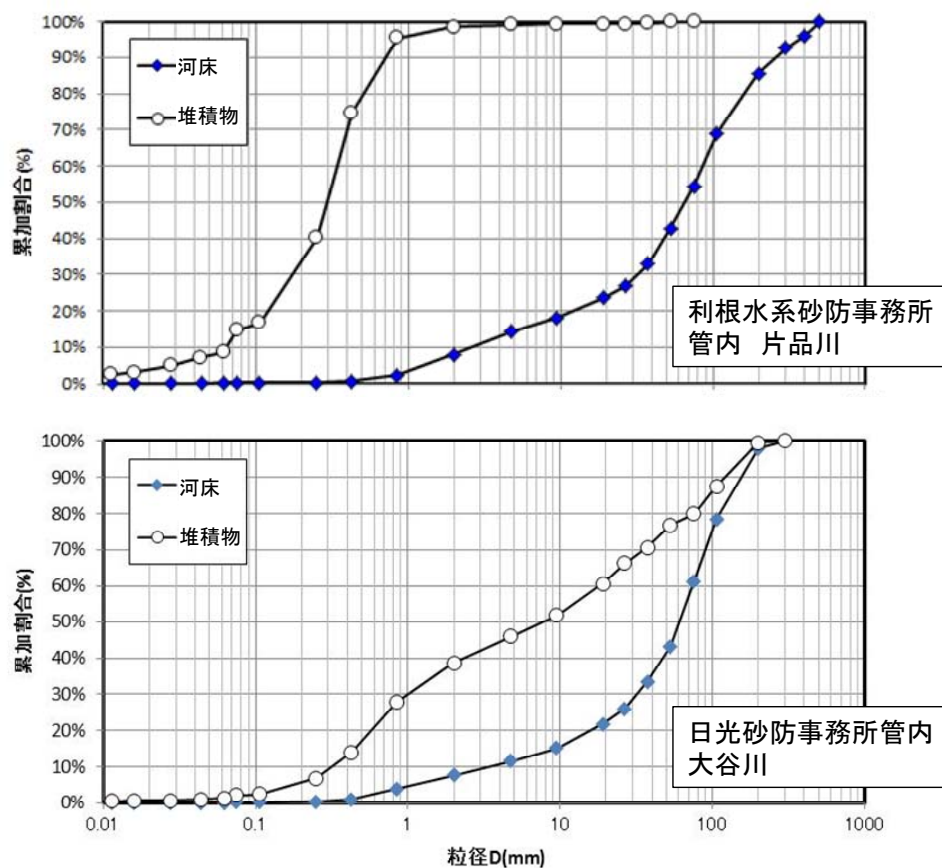


図 3.4 河床材料と大規模出水時に堆積したと考えられる土砂の粒度分布の比較（国土技術政策総合研究所 砂防研究室作成）

【参考文献】

- 1) 蒲原潤一・内田太郎・林真一郎・奥山悠木・丹羽諭・吉村暢也（2014）：ハイドロフォンを用いた掃流砂流出特性の分析，平成 26 年砂防学会研究発表会概要集，B62-B63

### 3. 2 水の供給条件

#### 3. 2. 1 降雨条件

保全対象に関する土砂・洪水氾濫による被害の推定を行うにあたっては、保全対象の位置に応じ、降雨条件を設定する必要がある。ある保全対象より、上流域の流域面積が小さい場合、雨域の狭い集中豪雨などにより、当該流域の流域平均の降雨強度が非常に大きくなる可能性が考えられる。

また、当該保全対象のある地点より上流域の流域面積が大きい場合、流域内の一部で雨域の狭い集中豪雨が生じた場合であっても、流域内のその他の地域の降雨強度が小さいことにより、当該流域の流域平均の降雨強度は小さくなる可能性がある。このような降雨分布の場合、当該保全対象が被害に遭う可能性は必ずしも高くない。一方、局所的に降雨強度が極めて強い領域がなくても、流域全体を覆うような雨域の広い降雨がもたらされた場合、流域平均の降雨強度が大きくなり、当該保全対象が被害に遭う可能性は相対的に高くなる可能性があると考えられる。

すなわち、同じ地域において同じ発生確率であっても、保全対象の流域内の位置により、災害発生のおそれの高い流域平均の総降雨量・降雨強度、降雨分布、降雨波形が異なる（図 3.5）。そこで、ある発生確率の被害を算出するにあたっては、保全対象を位置によって区分し、区分ごとに過去の実績などをもとに降雨規模と発生確率の分析を行い、計算に用いる降雨規模・波形および空間分布を区分ごとに決める必要がある。

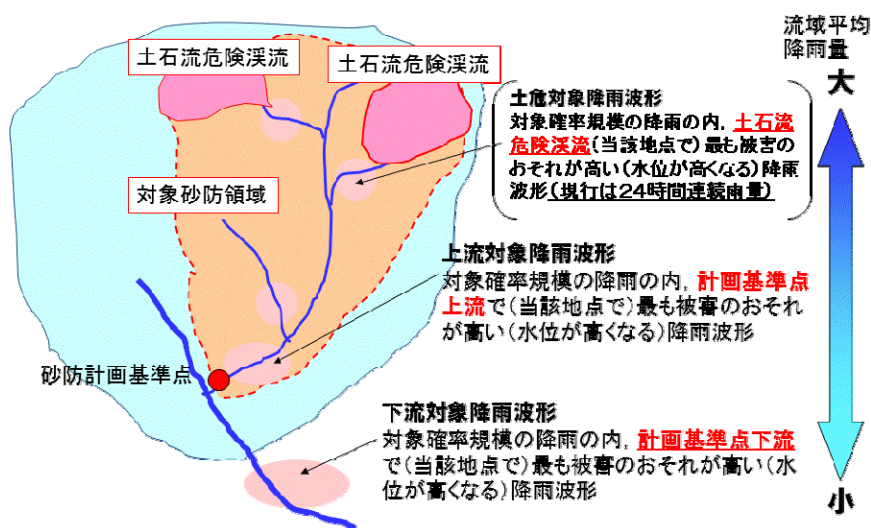


図 3.5 降雨波形の考え方のイメージ

### 3. 2. 2 流出解析

計算対象区間に流入する水の量を想定するためには、流出解析により、ハイドログラフを算出する必要がある。ハイドログラフの設定を行う場合は、山地流域流出特性が下流の平野部の河川の流出特性と大きく異なることに十分な注意を払うことが重要である<sup>1), 2)</sup>。

#### 【参考文献】

- 1) 水山高久 (2003) : わかりやすい砂防技術 (1) 山地河川 (溪流) の特徴, 砂防と治水, 35(6), 52-53.
- 2) 友村光秀・佐藤悠・内田太郎・松本直樹・蒲原潤一 (2015) : 急峻で企画的規模の大きい山地流域の洪水流出に関するデータ収集と分析, 平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集, B456-B457

[参考] 計算上流端のハイドログラフの設定時の留意点

豪雨時の土砂流出解析においては、ある地点において流量規模を事前の想定や既往の観測結果などと整合するように解析条件を設定するケースが多くある。このようなとき、計算上流端から当該地点までの間の洪水波形の伝搬時間を考慮して計算上流端のハイドログラフの設定を行うことや、計算上流端から当該地点までの区間における土砂の堆積にともなう水量の減少を考慮して計算上流端のハイドログラフの設定を行うことなどが重要である。

[例示] 水の供給地点の設定

3.1.1 の例示で示したような手法で土砂の供給地点を設定した場合、土砂供給地点において、流域面積見合いで水を供給した場合、残流域からの水の供給が十分に表現されず、流域全体では水の供給量が過小評価になることが考えられる。そこで、土砂の供給を行わなかった流域面積が小さい支川の合流点、残流域等を含む全領域から水の流出を考慮する必要がある。図 3.6 に示すような残流域から水を供給するにあたっては、当該残流域に接続する河道区間に均等に水量を分割して供給する手法などが考えられる。

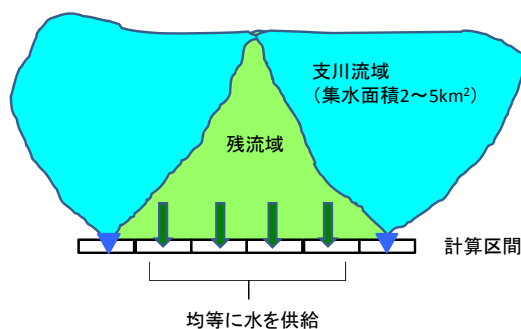


図 3.6 残流域からの水供給方法の例 (イメージ)

### 3. 3 河床条件

山地河道内の河床条件は多様である。例えば、対象区間の河床は露岩しているところ、横断工作物がある箇所、大粒径の土石で覆われているところなどは基本的には侵食は生じないと考えられる。このような区間は、解析上、固定床として解析を行うことなどが考えられる。

一方、河床に移動可能な土砂が堆積している区間については、移動床として計算するのが一般的であるが、侵食可能深、粒径の設定は計算結果に大きな影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、過去の実績や現地調査により、土砂動態の実態に則した侵食可能深を設定するとともに、「3.1.3 粒径」で示したように調査結果に基づきアーマールコート化を考慮して粒径を設定することが重要である。

## 4 施設等が被害範囲に及ぼす効果を直接的に評価するための留意点

### 4.1 対策の効果評価

施設による対策の効果評価はそれぞれの施設が有している機能の評価できる手法で評価を行うことが重要である。

計算区間内にある砂防堰堤の効果は堆砂状態・堰堤の型式を考慮して、解析することが重要である。また、計算対象区間外にある砂防堰堤の効果も堆砂状態・堰堤の型式、対象施設から計算対象区間までの状況を考慮して、計算区間への土砂の供給量を当該施設がない状態に比べて減ずることにより評価する手法などが考えられる。ただし、条件によっては、矩形断面に河道を近似する、計算の空間刻みを一様にするなどにより、実際、期待される効果量より、計算上の効果量が小さくなる可能性も考えられる。そのため、極力、実際期待される効果量と計算上算出される効果量が堰堤地点において整合するように条件設定することが重要である。

土砂生産抑制に関する機能が期待される施設は、計算区間への土砂の供給量を当該施設がない状態に比べて減ずることにより評価する手法などが考えられる。また、計算対象区間内の溪岸侵食等の防止が期待される施設についても同様に土砂の供給量を減ずることにより評価する手法などが考えられる。

床固工のような河床変動を制御する機能が期待される施設は当該箇所を固定床にすることにより評価する手法などが考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 里深好文・水山高久(2005)：砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, 58(1), 14-19.

[例示] 計算区間内にある砂防堰堤の効果を算出する手法の例

計算区間内にある砂防堰堤の効果を算出する手法の例を表 4.1 にまとめた。

表 4.1 一般的な計算区間内の砂防堰堤の取り扱いの例

堰堤種類	取扱い方法
不透過型(満砂)	堰堤本体箇所は固定床とし、堆砂域は堆砂域の地形を計算条件として設定する。
不透過型(未満砂)	里深・水山(2005) <sup>1)</sup> による計算方法など。
土石流区間の透過型	不透過型(未満砂)と同じ
掃流区間の透過型	せき上げが表現できるように地形条件または境界条件を設定する。



## 4. 2 下流河道の条件

砂防事業が下流河道の河床変動等に及ぼす効果・影響を評価するにあたっては解析の目的に応じた設定をすることが重要であり、以下の点に留意することが重要である。

当該砂防事業の対象としていない下流河道を移動床とした場合、下流河道において侵食および再堆積が生じることにより、上流域の土砂生産・流出とは無関係に河床上昇による土砂・洪水氾濫が生じる可能性が考えられる。このため、上流域における中期的な施設整備等による土砂の生産抑制・捕捉・調節が被害に及ぼす影響を直接的に評価するためには、当該砂防事業において対象としていない下流河道は、固定床とするなど、河床条件に留意することが必要な場合がある。一方、現時点の施設の有無が被害に及ぼす影響を評価する場合は、現状の河床条件を用いて施設の有無による被害の程度の違いを評価することが考えられる。

### [参考] 下流河道の断面形状の考え方

「砂防事業の費用便益分析マニュアル（案）」に従い、砂防事業の効果を解析する場合、治水対策として河川事業が展開されている区間については、河川整備基本方針等で示される計画流量規模に対応した河道断面を用いることが基本とされている。ただし、このような河道断面が存在しない場合や、不明確な場合には現況河道断面を用いることができるとされている。河川整備基本方針等で示される計画流量規模に対応した河道断面を用いるにあたって、堤防の余裕高を考慮するなどすると、計画規模を上回る流量が生じた場合であっても上流域における施設等による土砂の生産抑制・捕捉・調節と無関係に被害が生じないことがあり得る。そこで、上流域における施設等による土砂の生産抑制・捕捉・調節が被害に及ぼす影響を直接的に評価するためには、河川整備基本方針等で示される計画流量規模に準じた水のみ解析を行い、河道断面を想定するなど、河道形状の想定に留意する必要がある場合がある。

## おわりに

近年、山地河道においては、流砂水文観測が実施されるなど、土砂流出現象の理解が進んでいる<sup>1)</sup>。また、レーザープロファイラの活用などによって、従来に比べて、格段に精度良く、1 出水期間中の流出土砂量を推定できるようになってきている<sup>2)</sup>。その他の調査や観測を含めて、山地流域内の複雑な土砂移動現象の実態の解明が進むことが期待される。複雑な土砂移動現象の実態の解明が進むことにより、山地流域における豪雨時の土砂流出解析に関して新たに考慮すべき事象が明らかになることも大いに考えられる。

一方、これまで、重要性が指摘されてきているプロセスにおいても十分に解析手法が検討されていないプロセスもある。例えば、流下過程における摩耗・破碎による粒度変化<sup>3)</sup>などがあげられる。さらに、天然ダムの決壊にともなう水や土砂、流木の流出まで対象を広げた場合、検討対象に応じて、新たに加えるべき留意点もあると考えられる。

今後も土砂移動現象の特徴を把握し、土砂移動現象の特徴を考慮した解析手法の改良、数値解析の活用手法（条件設定など）の検討が重要となると考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 例えば、田中健貴・内田太郎・蒲原潤一・桜井 亘(2015)：近年の山地流域における流砂観測による成果と課題，土木技術資料 57(7), 22-25
- 2) 例えば、鈴木 豊・鈴木 崇 (2009)：滑川北股沢における土石流の観測体制について、砂防学会誌、61(6), 43-46.
- 3) 小菅尉多・水山高久 (2001)：河床砂礫の流下に伴う粒径減少に関する考察，砂防学会誌, 54(1). 39-47.

## 参考資料 解析事例

### 参 1. 富士川水系の支川の春木川の解析事例

ここでは、富士川水系の支川春木川における解析事例を示す。春木川においては、出水前後の航空レーザー測量が行われ、詳細な河床変動状況及び通過土砂量の縦断変化が把握されている（図 A.1 の黒線）。また、出水期間中の河床変動も砂面計により観測されている（図 A.2 の黒線）。そこで、この河床変動状況及び通過土砂量の縦断変化を再現対象に数値解析を行った。

ケース A として

- ① 土砂供給のタイミングを CCTV の画像等により特定
- ② 急勾配な領域を対象に河床内部のせん断力とせん断強度の比較により河床材料の移動限界を評価
- ③ 流下幅をレジーム則により設定

を行い、解析した。その結果、流出土砂量、河床変動高、河床変動の時間変化を概ね良好に実測の結果が再現された（図 A.1）。また、出水期間中の河床変動状況もある程度再現できている（図 A.2）。

次に、①の条件のように土砂供給のタイミングを考慮せず、出水期間中継続的に土砂供給を行ったケース B では、春木川第二堰堤堆砂域の河床変動高が過小評価され、流出土砂量はケース A と同程度であった（図 A.1）。さらに、2つ目の出水の台風 12 号時には全く河床変動が生じず、実態とは異なる応答を示した（図 A.2）。

②で示した土石流・掃流状集合運搬の区間の河床の侵食に関する制御を行わなかったケース C では、流出土砂量は実績値と概ね一致したが、河床変動量は春木川第二堰堤で過小評価、春木川第一堰堤付近で過大評価、下流域で過大侵食となった（図 A.1）。また、2つ目の出水の台風 12 号時には急激な侵食が生じるなど実態とは異なる応答を示した（図 A.2）。

③とは異なり流れ幅を河床変動幅の一定値で扱ったケース D は、春木川第二堰堤で過大堆積となり、その影響で、流出土砂量が実績の半分程度となった。河床変動の時間変化はケース A と同じく、観測値の特徴が表現された。

さらに、高橋の堆積速度式中堆積速度係数を 0.1 倍したケース E では、仲島堰堤堆砂域の河床変動高が過小評価され、早川への流出土砂量は実績値程度となった。

なお、解析の詳細は、丹羽ら（2014、2015）<sup>1),2)</sup>に詳しい。

【参考文献】

- 1) 丹羽 諭・内田太郎・蒲原潤一・里深好文 (2014) : 土砂生産のタイミングが河床変動に及ぼす影響に関する数値計算, 第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 181-186
- 2) 丹羽 諭・内田太郎・蒲原潤一 (2015) : 山地河川における豪雨時の土砂流出特性を考慮した河床変動計算, 土木技術資料, 57(5), 6-9

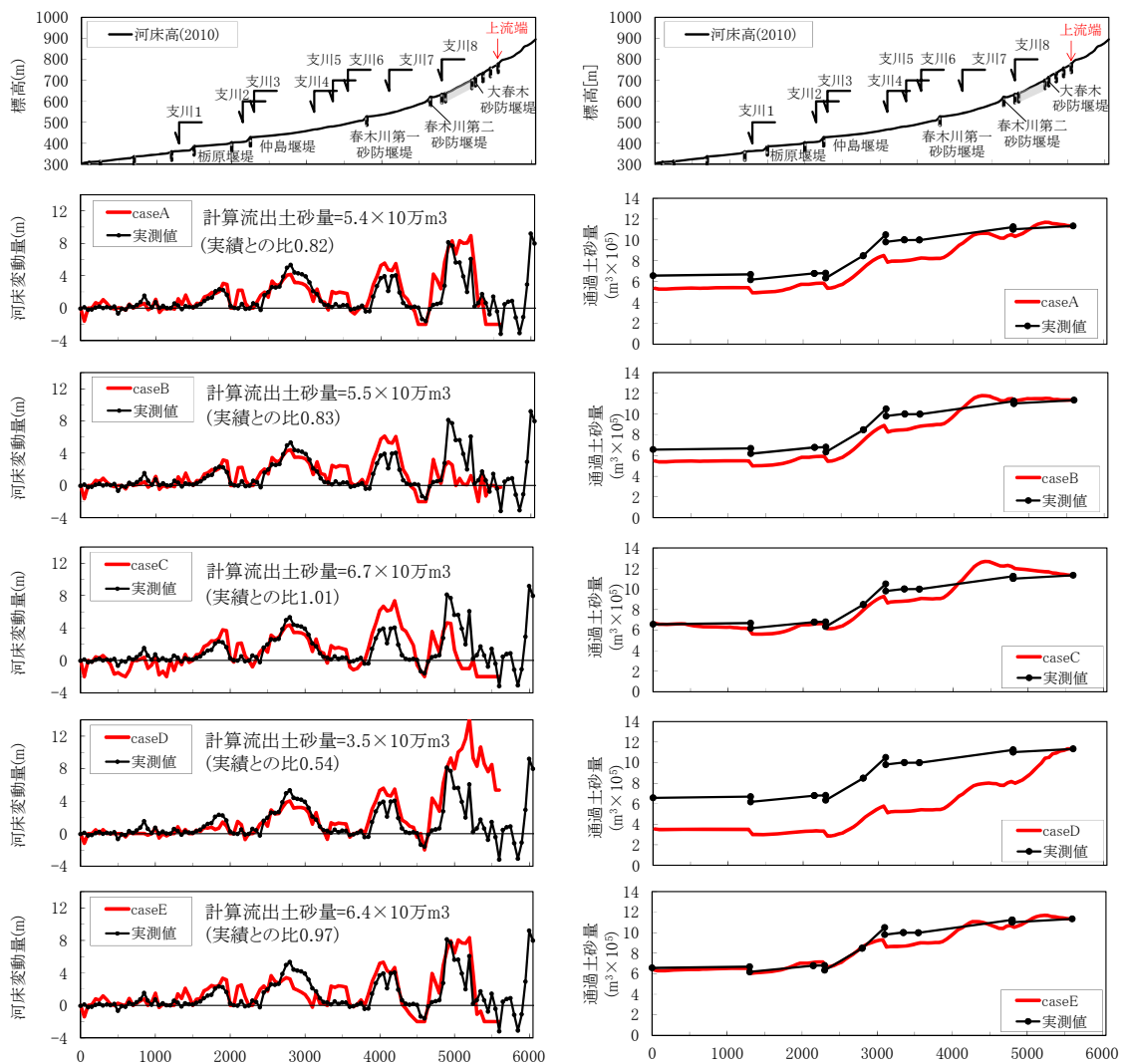


図 A1 解析結果と実績の比較 (左: 河床変動量、右: 通過土砂量)

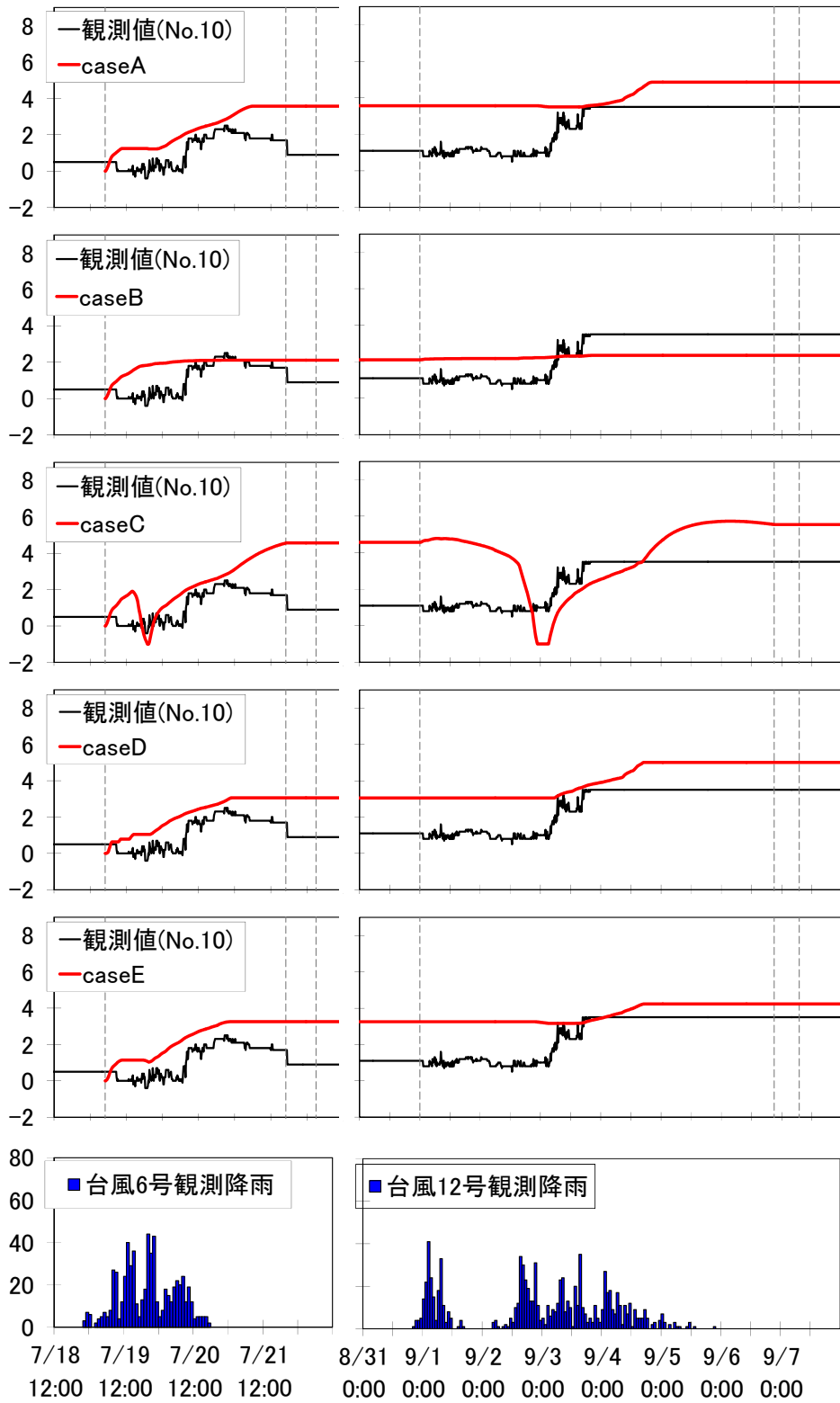


図 A2 解析結果と実績の比較 (河床変動量の時間変化)

## 参 2. 本川水位の違いが支川下流部の水位・河床変動に及ぼす影響の解析例

下記に、本川河道に一定流量を 5000 秒間供給し、そこから得られた水位を基に、逐次支川の下流端の水位を設定した計算事例を示す。なお、合流角度は 30 度とした。本川の流量の違いにより、支川の流量、土砂供給量が同じであっても、支川下流部の堆積形状、水位に大きな違いが生じる結果となっている。

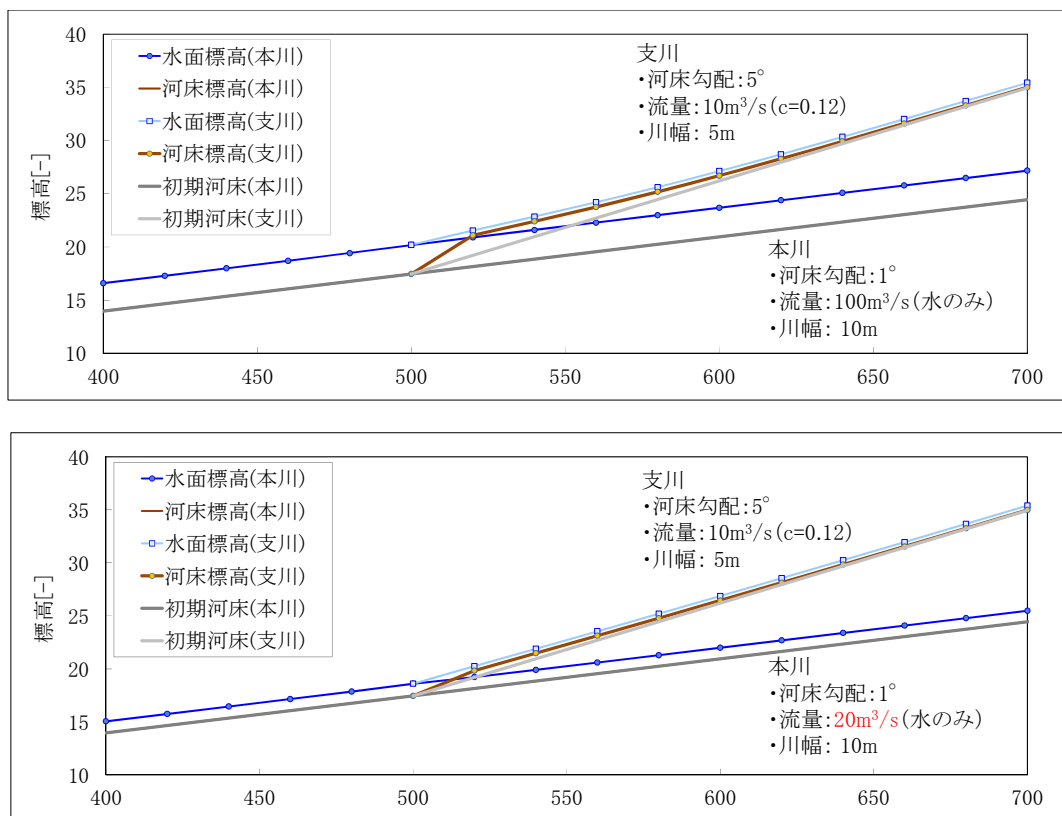


図 A3 本川水位の違いが支川下流部水位・河床変動に及ぼす影響の解析結果（国土技術政策総合研究所 砂防研究室作成）

---

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 874

November 2015

編集・発行 国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675