

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¹⁾。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²⁾。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¹⁾。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²⁾（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³⁾。

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⁴⁾や高橋の理論を基にした解析手法⁵⁾、土石流及び掃流状集合流動を統一的に扱える解析手法⁶⁾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⁷⁾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⁸⁾、数値計算プログラム作成上の留意点⁹⁾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¹⁰⁾。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¹¹⁾。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¹²⁾。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。

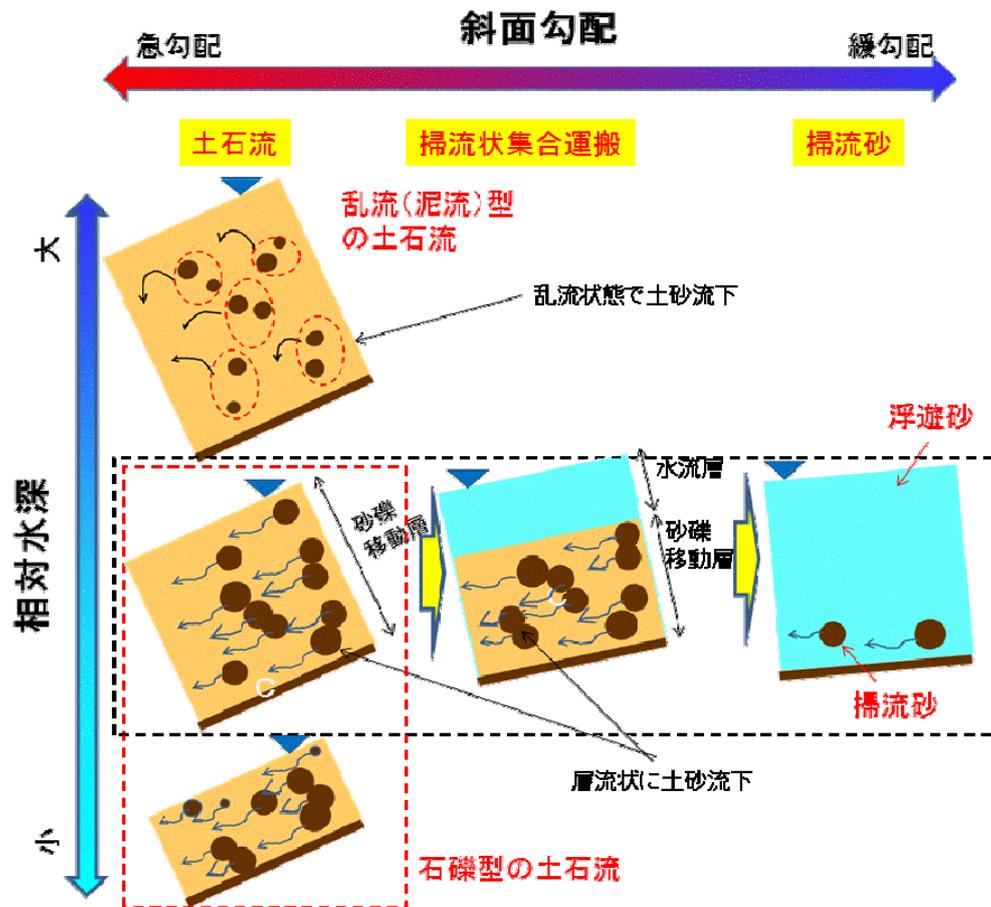


図 2.1 土石流から掃流砂まで土砂移動形態の変化のイメージ
 (細粒土砂分については図化していない(2.3節参照)。図中の黒破線の枠は図 2.2 で図化した範囲)

【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¹⁾。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²⁾。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^{3),4)}。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⁵⁾。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³⁾、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⁶⁾（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^{5),6),7)}。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⁷⁾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。

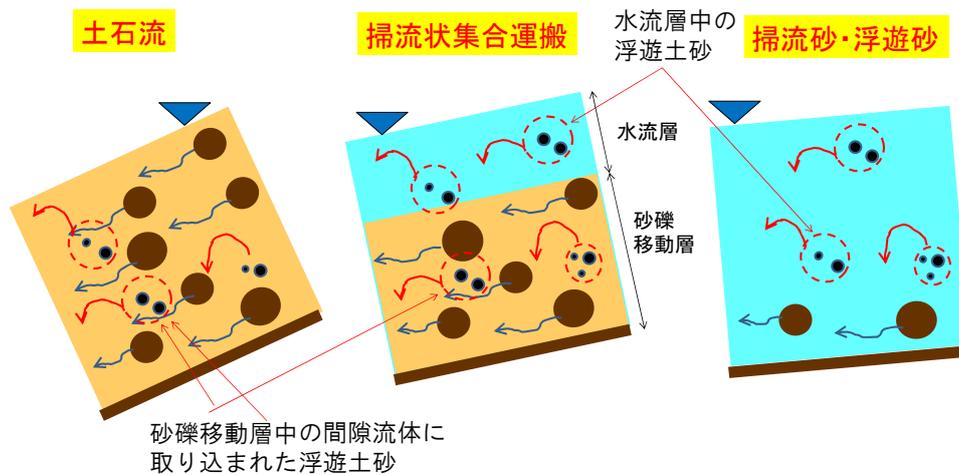


図 2.2 細粒土砂の流下のイメージ

【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¹⁾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²⁾。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³⁾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⁴⁾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⁵⁾。

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²⁾、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⁶⁾、江頭の式⁷⁾、鈴木らの式⁸⁾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⁹⁾。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。

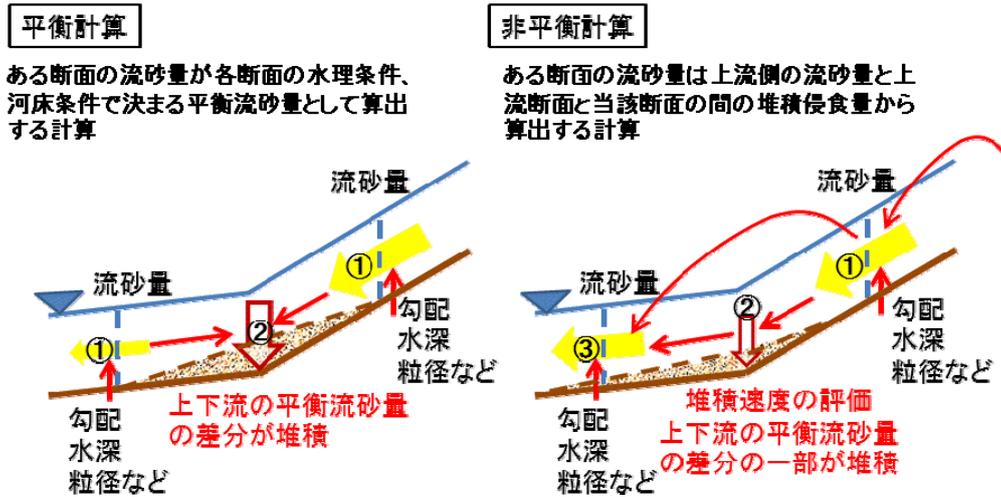


図 2.3 流砂の非平衡性のイメージ

図中の黄色矢印は流砂量、白抜き矢印は堆積量を表しており、赤線矢印は数値計算上で流砂量・堆積量算出時に影響を及ぼすと考えられる因子と流砂量・堆積量の関係を模式的に表したものである。また、図中の数字は算出の順番を表している。

【参考文献】

- 1) 例えば、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) 例えば、土木学会（1999）：水理公式集.
- 3) 例えば、大久保駿・水山高久・蒲 正之・井戸清雄（1997）：連続するスリット砂防ダムの土砂調節効果，砂防学会誌，50(2)，14-19
- 4) 例えば、竹林洋史・藤田正治（2011）：粘着性・非粘着性土混在場における一般断面による一次元河床変動解析，砂防学会誌，64(2)，3-14
- 5) 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
- 6) 高橋保・中川一（1991）：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，砂防学会誌（新砂防），44(3). 12-19
- 7) 江頭進治（1993）：土石流の停止・堆積のメカニズム（1），砂防学会誌（新砂防），46(1)，45-49.
- 8) 鈴木拓郎・堀田紀文・宮本邦明（2009）：非連行型侵食速度式を用いた勾配・流路幅の変化点や砂防ダムにおける土石流の数値シミュレーション，砂防学会誌，62(3)，14-22
- 9) 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

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¹⁾。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²⁾。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³⁾。

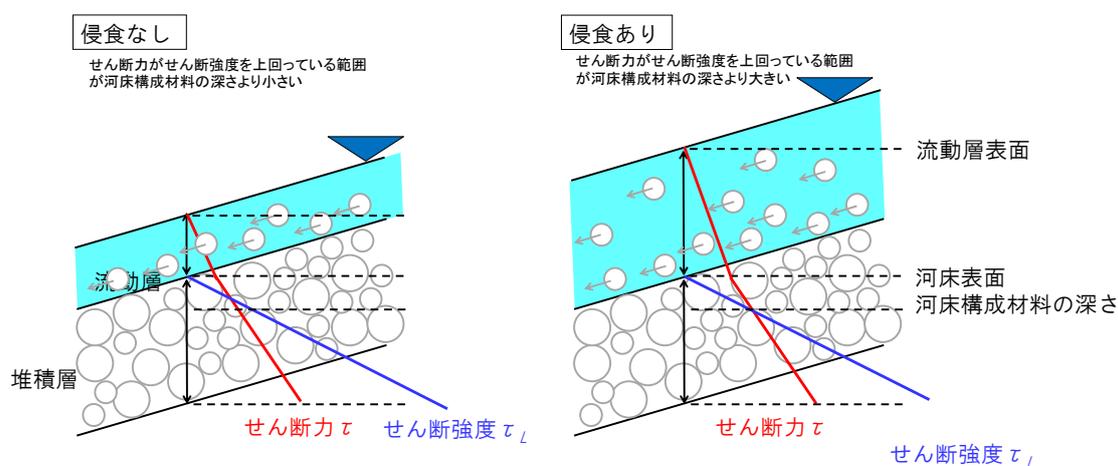


図 2.4 河床内部のせん断力とせん断強度の比較により河床材料の移動限界を評価する手法のイメージ

【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) ¹⁾ に詳しい。

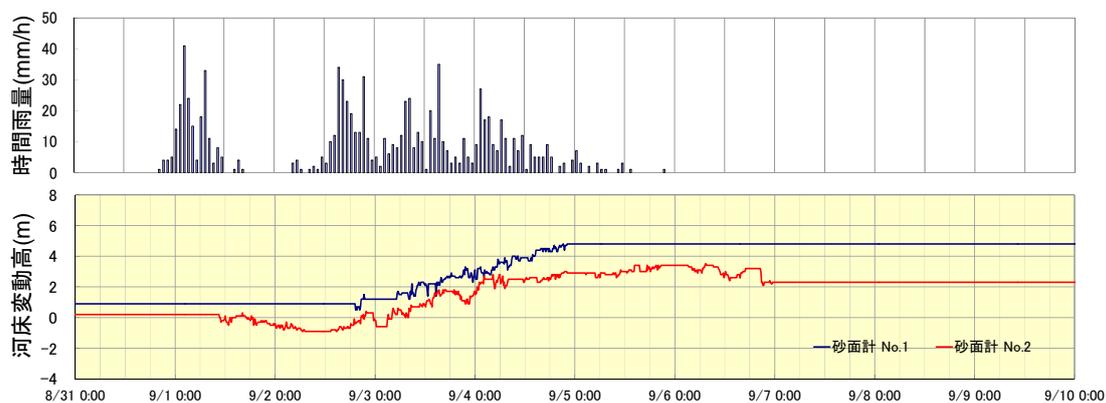


図 2.5 砂面計による河床変動の計測例 (丹羽ら (2014) ²⁾ を基に作成)

【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¹⁾。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 α 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²⁾。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^例 (例えば ³⁾~⁵⁾。



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）。

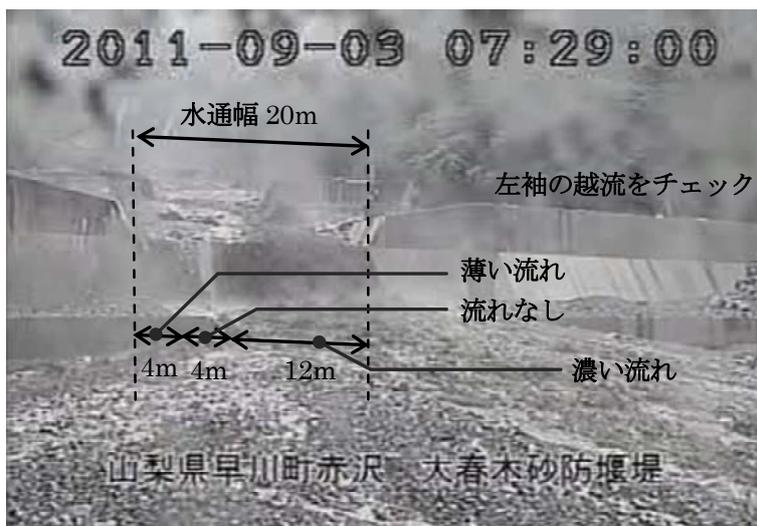


図 2.7 水通し越流範囲の判読方法

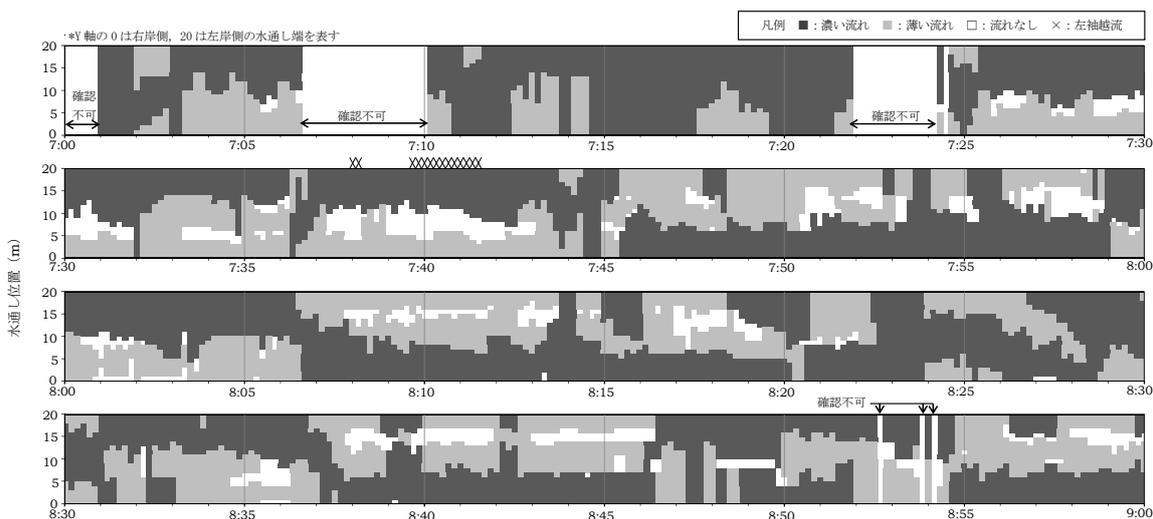


図 2.8 台風 12 号 9/3 の 7:00～9:00 における堰堤水通しの越流状況

*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¹⁾。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^{2), 3)}。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つては、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⁴⁾（参考資料2参照）。さらに、本川的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つては、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。

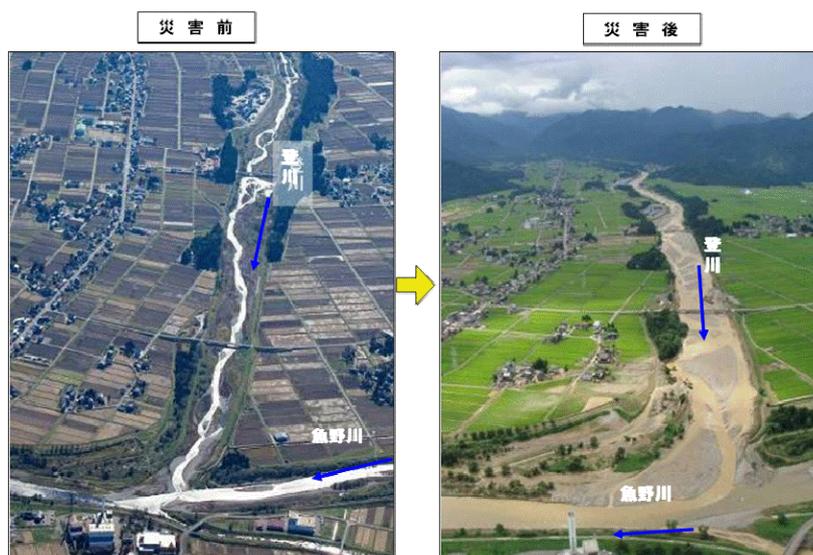


図 2.9 合流点における土砂堆積・氾濫状況（湯沢砂防管内）

【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