

研究展望

流砂系における土砂動態と土砂管理そして砂防

SEDIMENT PRODUCTION/TRANSPORT, SEDIMENT CONTROL AND SABO IN RIVER BASINS

水山高久¹

Takahisa MIZUYAMA

¹ 正会員 農博 京都大学大学院教授 農学研究科 (〒 606-8502 京都市左京区北白川追分町) mizuyama@kais.kyoto-u.ac.jp

Key Words : sediment, sediment production, sediment control, sabo

流域とそれに関連した海岸を含む流砂系を意識した土砂管理と砂防のあり方を検討し、実行に移して行く必要がある。平時の土砂管理と土砂生産を伴う出水の両方が、それぞれ環境、防災の観点から対象となる。姫川流域の平成7年の出水を大規模な土砂移動の例として取り上げ、従来よりも高度な砂防を目指す必要性を示す。平時の流砂のモニタリング、流砂系の土砂管理のための砂防堰堤についても考える。

1. 流砂系の土砂管理の必要性

山地部では、頻度は低いがいったん発生すると大規模な現象となる斜面崩壊、土石流などによる土砂災害から人命、財産を守るために砂防が行われ、貯水池では流入する土砂による貯水容量の減少に対応して、土砂の掘削、排砂ゲートの建設、土砂バイパスの建設が行われている。貯水ダムの下流では流下する土砂の減少から、河床低下、河床土砂の粗粒化（アーミング）が進み、ダムで流量が調節された結果、砂洲が固定化して植生が進出し洪水で破壊されることなく成長が続いている。河口では、河口閉塞の問題を抱えている河川が多い。海岸は、1960年代に代表される河川砂利採取、貯水池建設による河道を通しての土砂供給の減少、突堤の建設による海岸漂砂の断絶などによる砂浜の減少、海浜の後退に悩まされている。従来は、それぞれの場所で、砂防、ダム、河川、海岸のそれぞれの事業として個別に問題解決に当たってきたが、対応手法の規模が大きくなるとともに相互に関係するようになり、総合的で合理的な解決方法を山地から河口（流域）から海岸さらには海域まで広げた流砂系で検討する必要性に迫られてきた（河川審議会総合政策委員会、総合土砂管理小委員会（高橋保委員長）1998年¹⁾）。その検討のためには、新たな山腹斜面、溪岸、河岸の崩壊や土石流の発生、アーミングの顕著な破壊のない平時および、これらの土砂生産のある大きな出水時の土砂の生産と流出の実態（土砂動態）の情報が必要となる。しかし、これまで土砂動態の系統的な観測、調査は行われてこなかった。たとえば、砂防では土砂災害発生時

の崩壊や河床変動は調査、測量してきたが平時の土砂は調査してこなかった。貯水池では堆砂測量結果、流入土砂の濁度が年1度報告されている程度である。総合土砂管理小委員会の結論の一つとして土砂に関する情報を充実させるために土砂のモニタリングを行うことがあるが、土砂管理計画の方向が示されることなく土砂のモニタリングが始められたので、再びそれぞれの場所で個別の動きになっているように見える²⁾。そこでもう一度、流砂系の土砂管理についての議論、整理が必要だが、土砂管理には広義のものと狭義のものがあるように思える。広義のものは、直接的な土砂災害を防ぐものと平時の環境的な議論の両方を含むものである。一方狭義のものは、平時の環境的な議論に限るものである。概念的には図-1のようになるが、土砂

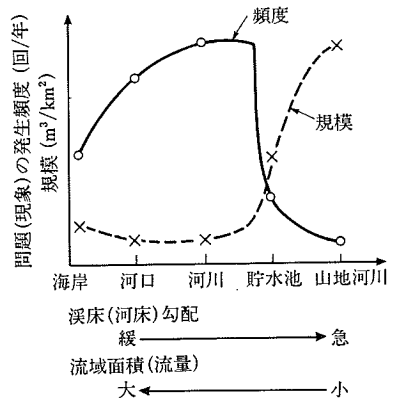


図-1 区間ごとの問題（対象現象）の発生頻度と規模（土砂量）の概念図

災害防止は従来から砂防として行われてきたので、流砂系土砂管理は、平時の環境的な議論に限った方がわかりやすいかもしれない。そうすると流砂のモニタリングの目標、範囲もわかりやすくなり、山地から海岸まで共通の議論が可能になる。

2. 流砂の追跡手法 (sediment routing)

流砂は、原則として流砂の運動の式（または流砂量式、土砂濃度式）と連続の式、水の運動の式と連続の式を用いて追跡される。1次元の計算についてはかなり一般的になってきた^{3),4),5)}。江頭⁶⁾は、土砂の生産、流出現象を不確定現象と連続的な現象に区別して河道に堆積した土砂を侵食させる連続的な取扱いで予測モデルを構築している。そこでは河道に十分土砂が存在することが前提になっている。筆者は移動可能な土砂がなくて、豪雨によって初めて準備されるような状況を含めて議論しようとしているが十分な成果を得るにいたっておらず⁷⁾、次節に述べるような既往災害などの経験を基礎として仮定せざるを得ない状況である。

アーミングなど混合砂礫の取扱い、非平衡の流砂量、浜岸河岸や一部の河床に現れる粘着性のある土砂の侵食抵抗力、山地急勾配河川での浮遊砂量などさらに研究を必要とする項目は多くあり、それらが実務的に使えるところまで解明されることが望まれるが、すでに流砂系の土砂をおおよそ追跡できる状態にある。ただし、上述したように土砂生産についてはまだ降雨量を与えて推定できるところまでは来ておらず、貯水池下流の河道の一方向的な河床低下、アーミングなど単純な条件下以外では、いつ、どこに、どのような土砂をどれだけ与えるかといういわゆる土砂生産（土砂供給）条件が計算結果を決めることになる。大きな出水時については、既往災害の調査結果や個人の経験から土砂生産を想定せざるを得ないのが現状であるが、できるだけ早く、与えられた降雨条件に対して土砂生産を合理的に予測することが可能になるように研究が進展することが望まれる。

3. 大出水時の土砂移動の例

1995（平成7）年7月10日から12日にかけて、姫川、関川、黒部川流域には総雨量が800mmを超える豪雨があり、崩壊、土石流、浜岸崩壊、河岸崩壊、浜床河床の洗掘により多量の土砂が生産され流出した。姫川の総雨量の分布といくつかの雨量観測点での時間雨量の変化を図-2⁸⁾、図-3に示す⁹⁾。姫川の流域面積は722km²であるが、雨量は時間的、空間的に大きく変化している。従来、特に砂防分野においてはある豪雨

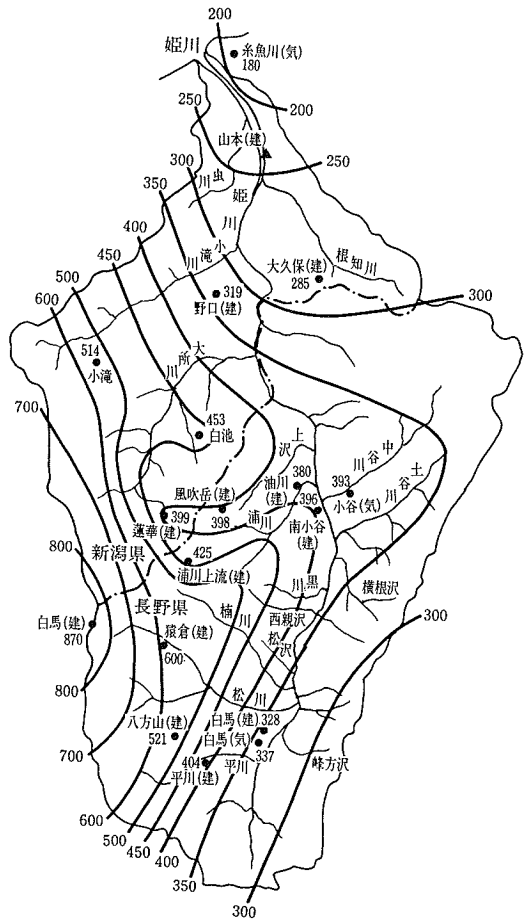


図-2 姫川流域の総雨量の分布（平成7年7月10日～13日）

に対する土砂生産、流出を総量でのみ議論する傾向があった。図-4は、姫川本川河道の出水前後の河床変動高さ、図-5は、土砂収支である¹⁰⁾。土砂生産量が崩壊だけでも1000万m³を超えたことがわかる。流砂を前述の計算によって追いかけるなら、どのような土砂がいつ、どこに、どれだけ、どのような形態で生産されたかを推定しなければならない。したがって、出水後の崩壊地の分布調査や河床の測量だけでなく、いつ、どのような土砂生産や流出が発生したかを地元の住民に聞き込む必要がある。この姫川の7.11出水では、流域に住む人が少ないために十分な証言は得られなかったが、それでも種々の情報を総合して分析が行われた。その結果、火成岩の多く分布する左岸と第三紀層で地すべり地が多く存在する右岸の支川では異なる土砂の生産が行われたことがわかった。図-6は、左岸側の支川を中心にまとめたもので、降雨のもっとも強かった時間付近に土石流が発生していたことがわかる。ところが、小谷村雨中地点で姫川本川の水位が最高になったのは、強い雨の終わり頃である。下流の山本地点の

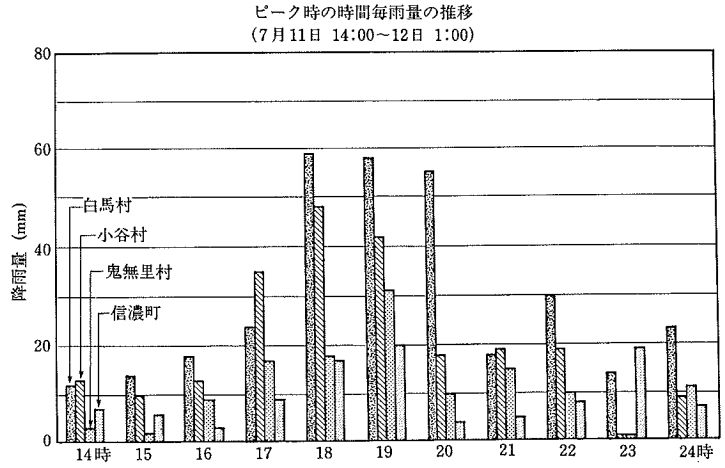
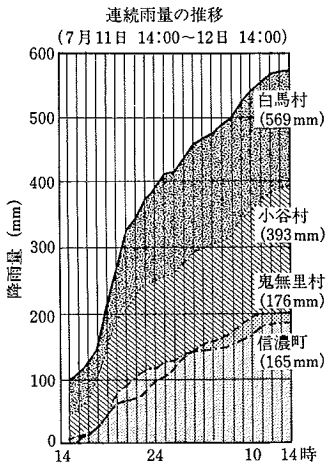


図-3 連続雨量と時間雨量の観測点における違い

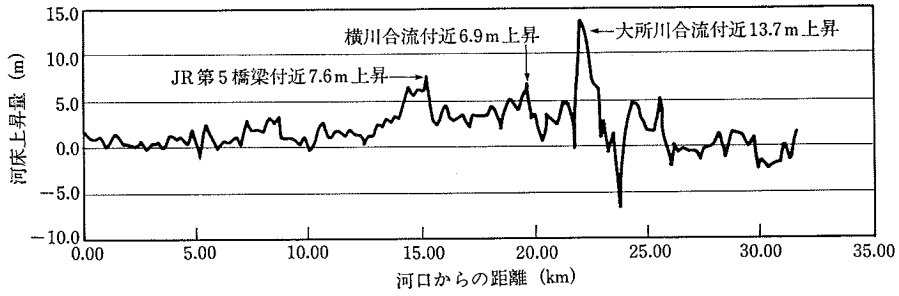


図-4 姫川本川河道における出水前後の河床変動高

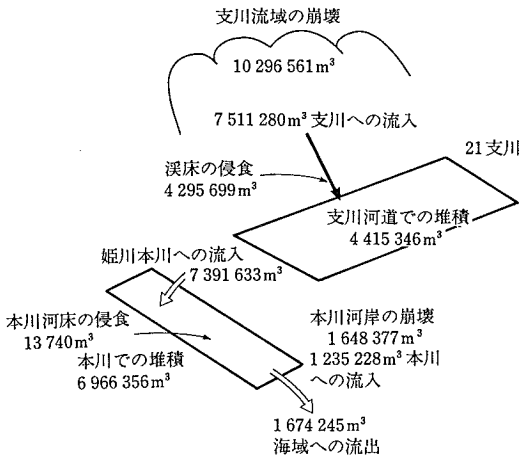


図-5 土砂収支

流量観測から出水のピークは降雨のピークからあまり遅れずに発生していることがわかっているので、流量はすでに減少傾向にあったが土砂の流出によって河床が上昇し結果的に最高水位が遅れて発生したと推定される。新国堺橋は翌年の災害復旧中に土石流災害が発生した蒲原沢の橋で、出水前の谷は深かった。蒲原沢からの土砂流出（おそらく土石流）によって河床が上

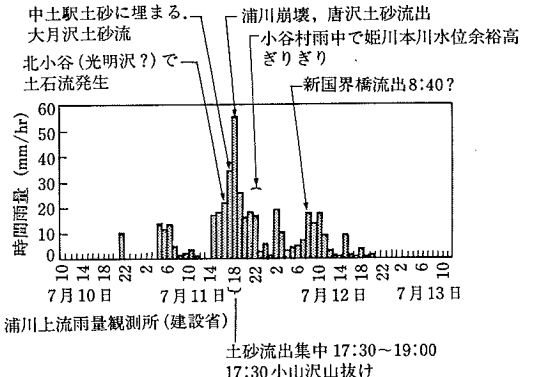


図-6 時間雨量の変化と災害の発生（左支川を中心に）

昇し、出水の後半になって橋が流されたと推測される。図-7は、本川と小滝川（左支川）、中谷川（右支川）について示している。道路の洞門が出水のピーク前に発生している。小滝川の最高水位は降雨のピークから遅れずに発生している。右支川の中谷川からの土砂流出は降雨のピークからかなり遅れている。中谷川の現地調査によると、ここでは地滑りが発生しており、出水後も支川河道内に細粒の土砂が大量に堆積していた。地滑りは、降雨のピーク時よりもかなり遅れて、降

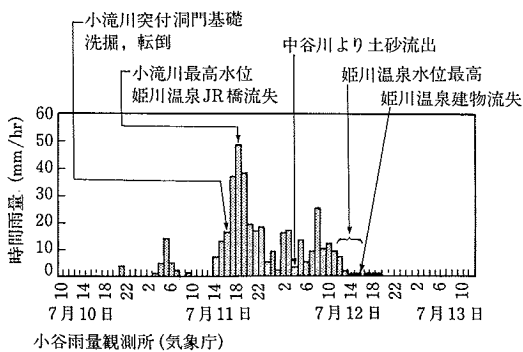
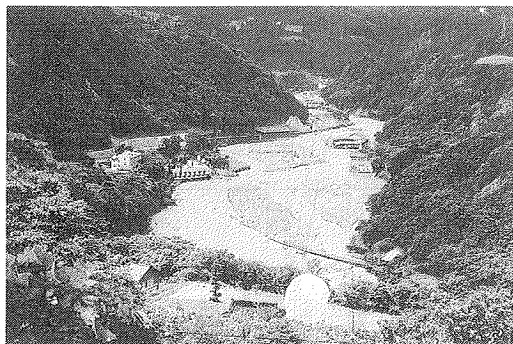


図-7 時間雨量の変化と災害の発生 (本川, 右支川を中心に)



(a) 昭和 62 年 8 月 26 日撮影



(b) 平成 7 年 7 月 13 日撮影

写真-1 出水前後の姫川温泉 (白馬大仏付近より姫川を望む)

雨の終わり頃または終了後発生することが多く、ここでも降雨の後半に土砂の移動、流出があったと推測される。低い河岸段丘上にあった姫川温泉 (写真-1)¹¹⁾では、降雨の終わり頃になって最高水位となり、建物が流出している。出水直後河道が土砂で埋塞していることと合わせて考えると、出水後半に河床が上昇したと推測される。このように、土砂の生産、供給は時間とともに大きく変化している。大まかに言えば、姫川本川では、出水前半からピークにかけて、土砂は支川から供給されず、河床は低下して、洞門の基礎が洗掘されたり、橋脚周辺が洗掘されたりした。降雨のピーク付近では左岸支川で土石流が発生した。降雨後半に

は右岸支川で地滑りが発生し、細粒分の土砂が流出した。以上の結果、本川は出水後半に河床上昇し橋の流失や建物の流失が起こった。

出水後は本川に 700 m^3 の土砂が堆積したことからこれまでもまして土砂流出を抑制する砂防を展開しなければならないと言われた。しかし、上記の土砂流出過程が正しいとすれば、土砂流出を抑えると、出水前半の河床低下に伴う災害は助長されることになる。望ましいのは、出水前半には流量に見合った土砂が供給され、出水後半には土砂の流出が抑制されるような土砂のコントロールである。図-4の河床変動であるが、河口付近で平均 1 m 程度の河床上昇となっている。しかし、右岸側の堤防が流量のピーク時付近に洗掘され、護岸が破壊されて破堤している。聞き込みからもこの出水後、徐々に河床が上昇したと推察されている。河床の測量には時間がかかることから、その間に河床が変動を続けており (上流は河床低下、下流は河床上昇)、河床変動計算結果と比較する際にはその点に注意する必要がある。最近ではレーザープロファイラーによる測量が使われるようになったので、今後は出水直後とその後の河床変動が時間を追って詳細に追跡されることが期待される。

4. 山地流域での土砂管理と流砂のモニタリング

砂防が主に対象としている山地溪流や貯水池での土砂管理の基本方針は、下流で河床上昇を引き起こしてそれが河道閉塞や氾濫になるような土砂流出を抑え、それ以外の土砂はできるだけそのまま流下させることになろう。そのためには、これまでのような通過させても良い土砂を貯め込む砂防堰堤 (不透過型と呼ぶ) ではなく、後述する透過型の砂防堰堤を採用することになる¹²⁾。ただし、砂防堰堤に期待される機能はいくつかあり、すべてが透過型というわけにはゆかない。これについては後で少し詳しく述べる。自然の河道は、流量と流砂量の結果として形成されるもので、ひとつの答えと言える。したがって、土砂の管理は自然河道を基本にその変動のある範囲にコントロールするように行われる。しかし、現在までどのような土砂が、どの程度流出しているかについての情報はあまりにも不足しているので、流砂のモニタリングが行われることになる。いずれは、計画に基づいて土砂が管理され、それが計画どおりの結果となっていることを確かめるために流砂のモニタリングが行われるようになるであろうが、それまでは流砂モニタリングは、流砂の実態を把握するために行われることになる。

流砂系の中下流では、流砂の多くは浮遊砂で、浮遊砂

の観測はある程度可能である。しかし、山地河川では掃流砂も重要であるが、その観測は難しい。ここでこの数年間筆者が試みているハイドロフォン（音響法）による掃流砂の観測について紹介する。これは、鉄パイプを砂防堰堤や床固めの水通し天端に設置してそこに衝突する砂礫の音をマイクロフォンで記録し、その数

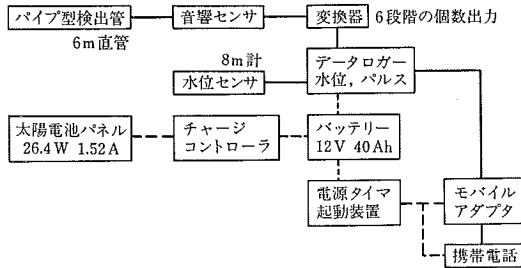


図-8 ハイドロフォンのシステム構成

を数えて掃流砂量を計測しようとするものである¹³⁾。これは鉄パイプでなくても鉄板などでも良く、マイクロフォンでなく振動計でも良い。筆者は単位時間に衝突した砂礫の数を数えているが、振動や音の波形から砂礫の粒径を推定しようとする研究もある¹⁴⁾。図-8は、常願寺川の津之浦下流砂防堰堤（スリット砂防堰堤、流域面積；131.5km²）のスリット部に設置したハイドロフォンのシステム構成で、水位を同時に計測している。山地河川では商用電源が得られないことが多いので、バッテリーと太陽電池を組み合わせて電源とし、携帯電話でデータを送信するようにしている。最近では、濁度、水温、水の電気伝導度（EC）なども同時に計測して浮遊砂の傾向なども同時に把握するシステムに発展させている。図-9は、記録の例である。入力の間値を変えた図で、channel-5は全データを示している。水位とパルスの関係は、他の出水のデータも

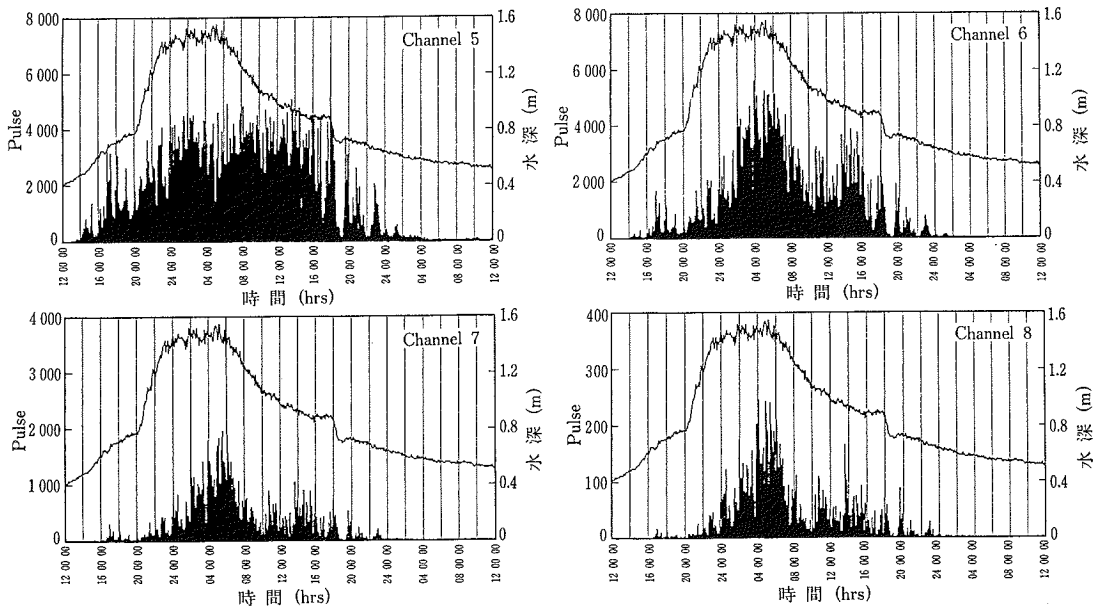


図-9 水位とハイドロフォンの入力（パルス：回/5分）の例

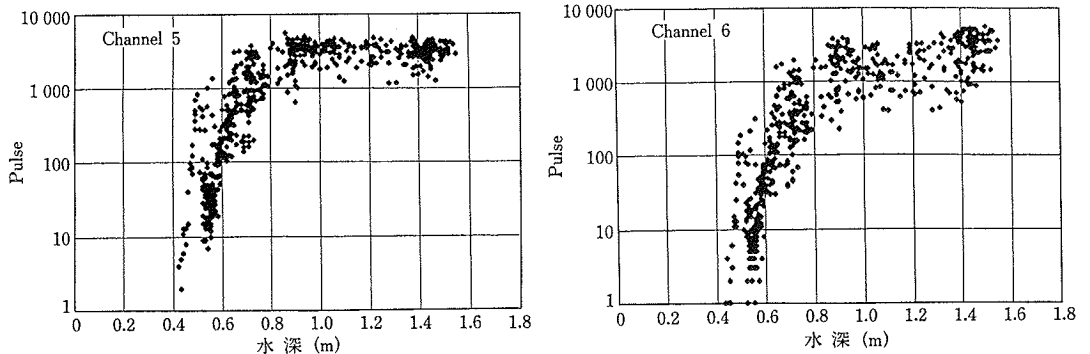


図-10 水位とパルス数の関係

合わせて図-10 のようになり、水位 40 cm 程度から掃流砂が発生していることがわかり、移動限界流量が推定できる。この方法では掃流砂量の相対的な変化はわかるが、絶対量は不明で砂防堰堤などを用いて流出土砂量の総量を測りキャリブレーションを行う必要がある。幸いハイドロフォンは線形性が良いことがスイスの観測研究でわかっており¹⁵⁾、総パルス数と総掃流砂量の関係から瞬間の流砂量を推定することが可能である。しかし、タイミング良く測量することは流域面積が ha オーダーの小溪流でなければ大仕事である。そこで、溪床に穴を掘り、そこに箱を埋めて、そこに堆積する土砂の重さを荷重計で連続的に測定してハイドロフォンの値をキャリブレーションする方法を試験し始めている¹⁶⁾。

なお、山地溪流では土石流も重要であるが、その発生頻度は一般の溪流では 100 年に 1 回以下と低い。したがって観測の対象とすることはできず、焼岳、桜島などの活火山と移動可能な土砂が凍結融解や崩壊で毎年準備され土石流の発生頻度が高い例外的な溪流でビデオカメラによる撮影を通して観測されている。水深、流速、礫径はビデオ記録の分析から求められるが、土砂濃度の測定は難しい。土砂と水の重さを河床面に設置した荷重計で測定して、その記録とビデオ記録からの水深を比較することで推定可能であるが、観測例は多くない。

5. 流砂系土砂管理における砂防堰堤と砂防

平時はできるだけ土砂の流出を阻害せず、災害を引き起こすような大量の土砂が一気に流出するようときにはこれを制御するような砂防の構造物が必要になる。最近の砂防の考え方と、砂防の代表的な構造物である砂防堰堤の開発検討状況について述べる。

砂防堰堤(砂防ダム)には、侵食基準面を人工的に与え、山腹工の基礎として機能する、流出する土砂を貯砂する、流れを谷の中央に導き、溪岸の侵食を防ぐ、勾配が緩くなり、川幅が広がった砂防堰堤上流に出水時に流出する土砂を堆積させ、その後その土砂は徐々に侵食され流出する(土砂流出調節効果)、といった機能が期待されてきた。それぞれの場所で、単一または複数の機能が期待されるべきだったが、あるときからすべての機能が同時にあると信じられてしまったように思う。すでに多くの砂防堰堤が建設されてきたが、ここでもう一度、それぞれの砂防堰堤について主に期待すべき機能をできるだけ限定するのが良いように思う。その結果予想されることは、土砂生産源での侵食防止の砂防堰堤と流出する土砂を捕捉する砂防堰堤の 2 分化であろう。



写真-2 鋼管製土石流捕捉工(砂防堰堤) (白浜川, 北海道)

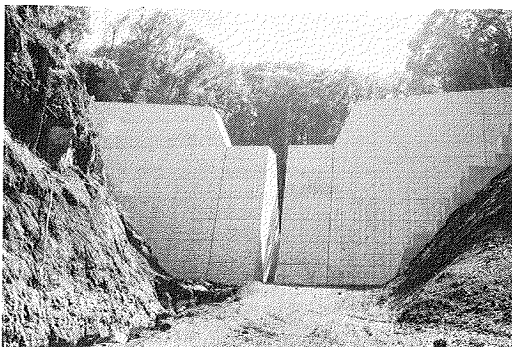
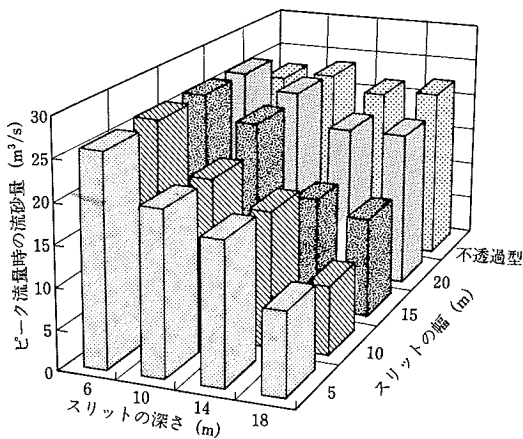
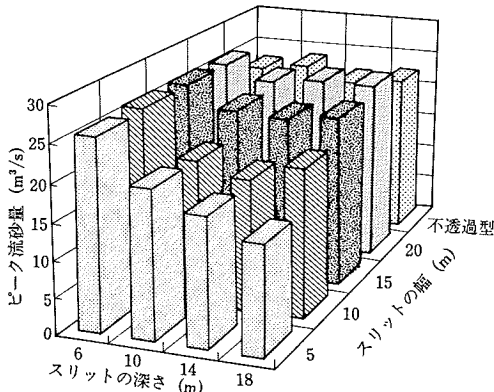


写真-3 スリット砂防堰堤 (三宅島, 松村和樹氏提供)

土砂生産源の砂防堰堤は、溪床勾配が急であることからヨーロッパアルプスや明治、大正時代の日本の砂防に見られるような比較的高さの低い堰堤を階段状に並べるのが一般的となる。溪床が侵食されてその結果溪岸が崩落するのを防ぐ場合と、崩壊し溪床に堆積した土砂が流出するのを防ぐ場合が考えられる。後者はかつて多く発生した現象であるが、現在では建設機械の能力が向上したので、取り除く作業と比較して侵食を防止することを選ぶか、もしくは両者を組み合わせることになる。流出する土砂を捕捉する砂防堰堤は下流の保全対象の上流に、ある程度の容量を有する比較的大規模なものとなる。海外の火山砂防で用いられている遊砂地と同じ考え方である。平時の土砂はそのまま流下させる方が良いので、開口部を有する透過型砂防堰堤が考えられる。土石流に対しては鋼管製の堰堤が考案され採用されている(写真-2)。これは、土石流が発生するまでは、水も土砂も自由に通過させ、土石流発生時にはこれを捕捉するものである。土石流発生後は原則として人工的に堆積土砂を取り除いて(除石という)次の土石流に対する土砂捕捉容量を回復させる。この種の構造物が考案された頃に期待された、大きな礫だけを捕捉することや、土石流発生後流水の侵食によって自然に捕捉容量が回復するといったことは、



(a) スリット形状によるピーク流量時の流砂量の変化



(b) スリット形状によるピーク流砂量の変化

図-11 スリット砂防堰堤の土砂コントロール(常願寺川, 天鳥第2砂防堰堤を材料として, 計画規模の想定出水ハイドログラフを与えた場合)

その後の研究や実際の土石流捕捉状況, その後の侵食状況から基本的には否定されている。

掃流区間では, スリット砂防堰堤(写真-3)が考えられる。図-11にスリット砂防堰堤の流出土砂調節効果を具体的な事例で検討した結果を示す¹⁷⁾。その効果は, 流量ハイドログラフと流砂のセディググラフの形によって変化するが, 大まかに言えば, 流量の大きい間は流れが堰上げられ土砂は堰堤堆砂地内の上流部に堆積する。流量が減少し始め堰上げが解消されるにつれて, 堆積した土砂が侵食され流出する。堆積土砂の下流面は安息角に近い急勾配なので高い土砂濃度で堰堤から流出するが, 堰堤下流は溪床勾配が緩いので急激に堆積する。さらに下流に流出するのは, 河床勾配と流量に見合った土砂になる。したがって, 従来の砂防堰堤では堰堤上流に堆砂空間を準備したが, スリット砂防堰堤では堰堤の上流だけでなく, 下流にも堆砂空間を準備することになる。スリット砂防堰堤では平時の流量で侵食が進み, 堆砂容量が回復することが期待されるが, 連続して土砂流出が発生する可能性もある

ので必要に応じて除石を行うのがよいであろう。

このようにスリット砂防堰堤は土砂流出を平滑化させることが期待される。しかし, 山地河川では前述したように土砂流出は土砂生産に強く支配され, 流砂が流量に見合って発生しないことが多い。したがって, 開口部が固定されたスリット砂防堰堤では十分に流出土砂をコントロールできない場合も考えられる。そこで考えられるのが, ゲートを有する砂防堰堤である。このゲートは貯水池の排砂ゲートとは異なり, 日頃は空いた状態になっていて土砂の流出が望ましくないときにだけ閉じられるもので貯砂ゲートと呼んだ方がよい。水密性は必要でないで, 格子状のゲートや, スリット部の隙間を狭くするだけの構造などが考えられる。ゲート砂防堰堤は, まだ検討段階と言える^{18),19)}。ゲートの操作のためには, 流量, 流砂量のモニタリングが必要になる。この段階まで来れば, 砂防での土砂管理と言えると思う。

参考文献

- 建設省河川審議会総合政策委員会, 土砂管理小委員会: 流砂系の総合的な土砂管理に向けて, 1998.7
- 国土交通省河川局砂防部砂防計画課ほか: 流砂系における土砂移動実態に関する研究, 土木技術資料, Vol.45, No.3, p.26-31, 2003
- たとえば(社)砂防学会編: 山地河川における河床変動の数値計算, 山海堂, 2000.9
- 水山高久, 富田陽子, 井戸清雄, 藤田正治: 砂防施設計画策定支援システム(六甲山住吉川を事例とする研究), 砂防学会誌, Vol.50, No.6, pp.40-43, 1998
- 井戸清雄, 佐藤一幸, 水山高久: 数値実験による砂防施設効果評価システムに関する研究, 砂防学会誌, Vol.52, No.4, pp.26-32, 1999
- 江頭進治: 土砂流出予測法, 水工学シリーズ 01-A-2, 土木学会水理委員会・海岸工学委員会, 2001
- 水山高久, 網木亮介, 今村遼平, 西口哲夫: 山地流域における土砂生産の想定, 砂防学会誌, Vol.40, No.4, pp.18-22, 1987
- 新潟県土木部河川課, 糸魚川土木事務所: よみがえれ! 清流姫川, (発行年記載なし)
- 長野県土木部: 長野県北部 7.11 梅雨前線豪雨災害速報, 平成7年7月
- 新潟県土木部: 平成7年7.11 水害, 平成7年7月
- 水山高久: 姫川の大规模土砂流出と土砂管理, 河川1998-11月号, pp.8-12, 1998
- 寺田秀樹: 総合的な流域土砂管理(砂防分野での取り組み), 水工学シリーズ 01-A-3, 土木学会水理委員会・海岸工学委員会, 2001
- 水山高久, 野中理伸, 藤田正治: 常願寺川津之浦下流砂防堰堤におけるハイドロフォンによる流砂観測, 砂防学会誌, Vol.55, No.3, pp.56-59, 2002
- 澤井健二: 流砂計測技術の現状と展望, 砂防学会誌, Vol.54, No.2, pp.73-84, 2001
- 水山高久, 野中理伸, 野中伸久: 音響法(ハイドロフォン)による流砂量の連続計測, 砂防学会誌, Vol.49, No.4, pp.34-37, 1996
- 水山高久, 里深好文: ビット掃流砂計測装置のハイドロフォンのキャリブレーションへの適用, 砂防学会誌, Vol.56, No.3, pp.55-56, 2003

- 17) 大久保駿, 水山高久, 蒲正之, 井戸清雄: 連続するスリット砂防ダムの土砂調節効果, 砂防学会誌, Vol.50, No.2, pp.14-19, 1997
- 18) 水山高久: 土砂のコントロール, 土砂移動現象に関するシンポジウム論文集 (芦田和男先生退官記念), pp.141-152, 1992
- 19) 今井一之, 水山高久, 平松晋也, 石川芳治, 江島敬三: 砂防ダム用貯砂ゲート周辺の砂礫の挙動 (ゲートを閉じた場合), 砂防学会誌, Vol.50, No.4, p.11-18, 1997

(2003.12.3 受付)