

近年の山地流域における流砂観測による成果と課題

田中健貴・内田太郎・蒲原潤一・桜井 亘

1. はじめに

山地流域における土砂動態の把握は砂防基本計画の策定や総合的な土砂管理方針の検討、国土監視等の観点から重要である。1990年代以降、山地流域においてハイドロフォン（掃流砂が河床に設置した金属製パイプに衝突する際に発する音により、掃流砂量・掃流砂の粒径を計測する機器¹⁾）や濁度計等を用いた観測が行われるようになり、全国の直轄砂防事務所等においても2000年代頃から活発に実施されてきている（写真-1、図-1）。国総研砂防研究室としては、観測データを流砂量へ換算する方法の提案、流砂水文観測に関する国総研資料の出版^{2) 3)}、また流砂水文観測に携わる全国直轄砂防事務所職員を中心とした勉強会の開催⁴⁾等を行い、山地河道における流砂水文観測を推進してきている。その結果、多数の観測技術や流砂の実態、活用方法に関する知見が蓄積されつつある。しかしながら、これまで各直轄砂防事務所等で実施された観測・検討の成果は個別にとりまとめられており、現状の到達点、課題が概観しにくい状況にある。そこで本稿では、概ね過去5年程度で報告された最近の直轄砂防事務所等による流砂観測の成果をレビューし、流砂観測の現状、課題について整理する。

2. 流砂・水文観測の代表事例

ここでは全国の観測事例のうち、比較的古くから調査が実施されている、六甲山地、姫川、天竜川、富士川の事例について簡単にレビューする。

2.1 六甲山地での観測事例

六甲砂防事務所では、2011年以降、六甲山系の10溪流を対象に出水時の流量、表面採水による浮遊砂濃度（以後、SS濃度）の観測を行い、流域間で流量-SS濃度関係は同一の傾向を持つことを明らかにした⁵⁾。また、10溪流の1つである住吉川では1970年代に比べ、近年は同じ流量

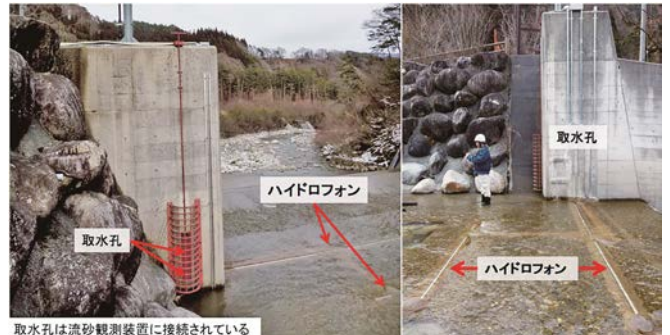


写真-1 山地河道における流砂水文観測状況の例（天竜川水系と田切川流域坊主平砂防堰堤）

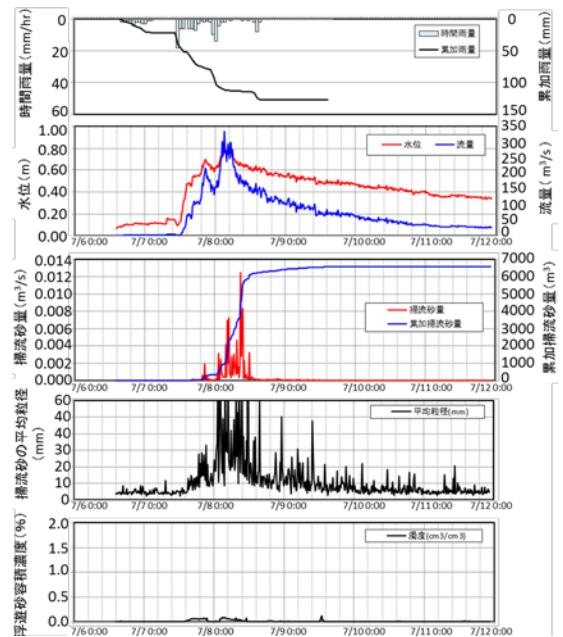


図-1 流砂水文観測より得られた時系列データの例（利根川水系片品川蒲田観測所）

のときに1オーダー程度、浮遊砂量が少ないことが観測され、砂防事業等による流域状況の変化が流砂量に及ぼす影響が定量的に把握された⁵⁾。

さらに、採水及びハイドロフォンの観測結果から流域からの流出土砂量の定量化が試みられた。その結果、裸地が広がる流域では掃流砂量が約10,000 m³/km²/y、浮遊砂量は約1,600 m³/km²/y程度であるのに対し、森林流域では掃流砂量は約40 m³/km²/y、浮遊砂量は10~70 m³/km²/yと推計された⁵⁾。

2.2 姫川流域での観測事例

2.2.1 ハイドロフォンの基本応答特性の把握

松本砂防事務所では梓川、姫川流域において流

砂観測を行ってきた。2010年には、姫川水系平川の源太郎堰堤において、ハイドロフォンの基本特性把握のために現地実験が行われた⁶⁾。ハイドロフォンによって得られるデータは機器に衝突した粒子の体積（質量）および粒子速度との関係で示すことが出来る。実験の結果、ハイドロフォンの音圧（音響波形の大きさ）とハイドロフォンに衝突する粒子の運動エネルギーに高い相関性が見られたことから、音圧データは粒子の体積、つまり流砂量を捉えることが出来ていると考えられ、あらためてハイドロフォンの有効性が示された。

2.2.2 ハイドロフォンによる流砂特性の把握

源太郎堰堤では幅68mある堰堤の天端において、横断方向に右岸、中央、左岸の3箇所にハイドロフォンを設置し、観測が行われている⁷⁾。その結果から、2011年6月の出水（最大日雨量108mm）では流砂が横断方向に均一ではなく、片側に集中するような現象が発生していたこと、流砂の集中する場所は1出水期間中でも横断方向に左右へ変動したことを指摘した。また、インターバルカメラの画像からも偏流や流路変動が確認され、ハイドロフォンの測定結果の妥当性が確認された⁸⁾。さらに、この結果は従来指摘されてきた掃流砂は横断方向に大きなばらつきを持つことを改めて観測で示したものであると言える。

2.3 天竜川水系与田切川の事例

2.3.1 直接採取による流砂特性の把握

天竜川上流河川事務所では、天竜川の支川である与田切川坊主平砂防堰堤において、掃流砂・浮遊砂を直接採取可能な流砂観測装置やハイドロフォン等を用いた観測を行ってきた⁹⁾。与田切川は上流域にオンボロ沢と呼ばれる大規模な荒廃地を抱えており、オンボロ沢においては、比較的高い頻度で土石流が発生する。直接採取可能な流砂観測装置を用いた観測結果から、オンボロ沢で土石流が発生した後の一定期間（1～2年程度）は、同じ水深であっても発生前に比べて掃流砂量が1～2オーダー上昇したことが観測された⁹⁾。また、土石流発生後、掃流砂の多い状態が続く期間の長短は、土石流発生後の降雨状況の影響を強く受けていたことも分かった。すなわち、土石流発生後に大出水がない場合、土石流による土砂は短期間では流出せず、上流域に長期間堆積していたため、掃流砂の多い状態が長期間継続した。

2.3.2 濁度計を用いた土石流の発生検知

オンボロ沢で土石流が発生した出水では、土石流が発生しなかった出水に比べて、水深が同程度である場合、坊主平砂防堰堤（オンボロ沢出口から下流に6.4km）で濁度が高くなることが観測された¹⁰⁾。すなわち、流域下流の濁度観測により、上流の土石流の発生の有無、発生タイミングが概ね把握できることが示された。

2.3.3 ハイドロフォンのデータ変換手法の検証

国総研においては、ハイドロフォンにより計測した音響波形データから掃流砂量・掃流砂の代表粒径に変換する手法を提案した¹¹⁾。坊主平砂防堰堤では、国総研が提案した手法を用いて音響波形データから掃流砂量・掃流砂の代表粒径に変換した結果と直接採取可能な流砂観測装置による計測結果の比較が行われた¹²⁾。その結果、掃流砂の量・代表粒径ともハイドロフォンと直接採取可能な流砂観測装置の観測結果はかなり良い一致が見られ、ハイドロフォンにより掃流砂量・掃流砂の代表粒径の連続観測が可能であることが確認された。

2.4 富士川流域の事例

2.4.1 ハイドロフォンを用いた流砂特性の把握

富士川砂防事務所では、富士川水系の支川である大武川や神宮川など、9箇所で流砂水文観測を実施してきている。大武川流域においては、通常は水深の増減に従い掃流砂量は変動するが（図-2(a)）、2011年台風12号（9月1日）による出水期間中に掃流力ー流砂量関係が変化し、同程度の掃流力であっても、流砂量が出水後では、出水前に比べて大きくなったことが観測された（図-2(b)）。また、概ね1年かけて徐々に掃流力ー流砂量関係は元の出水前半の状態に戻った¹³⁾。このことは、

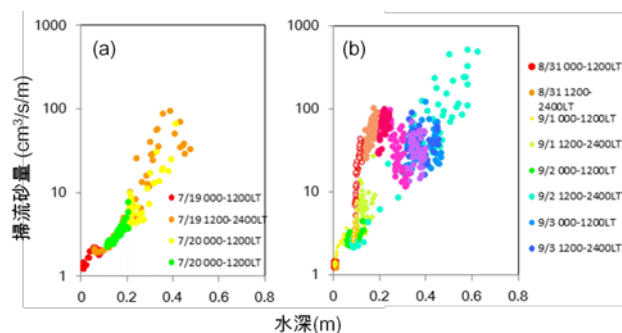


図-2 富士川大武川流域における水深と掃流砂量の関係（富士川砂防事務所取得データを基に作成）

ハイドロフォンによっても、前項で示した与田切川で見られたような流砂特性の変化が観測可能であることを示している。

2.4.2 ハイドロフォンの検出限界の検証

大武川第50床固工に設置されたハイドロフォンによる観測結果をみると移動粒径の最小値はおよそ3mmとなっており、出水後に残留していた土砂の粒径1.3mmまで小さくなっていない。このことから、ハイドロフォンの検出限界は3mm付近にあるものと考えられる¹⁴⁾。水路実験による検討においても、ハイドロフォンでは2~4mm以下の粒径の検出は困難であるという結果が得られており¹⁵⁾、現地観測と水路実験の結果はほぼ一致した。

3. 山地流域における流砂観測の現状と課題

3.1 山地流域における流砂観測技術

ここでは、全国的に広く用いられているハイドロフォン、濁度計について考察する。実際の山地河道における観測から、ハイドロフォンにより掃流砂の量・粒径がある程度観測可能なことが確認されてきた(2.2.1, 2.3.3, 2.4.2参照)。一方で、以下のような課題が残されている。

- (1) 掃流砂は横断方向のばらつきが大きく(2.2.2)、流砂量の定量化のためには横断方向の分布を把握する必要がある。
- (2) ハイドロフォンでは、2~4mm以下の粒径については計測が困難である(2.4.2)。

その他、掃流砂量を定量的に評価するためには、掃流砂が河床上を跳躍しながら移動することなどによりハイドロフォンに衝突せずに流下する掃流砂量の全掃流砂量に占める割合を定量化する必要があることが指摘されている¹⁵⁾。

また、表面採水や濁度計を用いて山地河道の浮遊土砂の流出特性がある程度把握できることが示された(2.1.1, 2.3.2)。一方で、山地河道においては比較的粒径の大きな土砂が浮遊するものの、濁度計を用いた観測ではそういった粒径の大きな浮遊砂の観測が困難であることも分かってきている³⁾。さらに深さ方向にも濃度分布がある場合の計測手法にも課題がある。以上のように、水位及び河床変動が大きい山地河道における流砂水文観測には技術的な課題も残されているが、直轄事務

所による観測により濁度計やハイドロフォンの山地河道における流砂観測に関する適用範囲、課題が明確に把握されつつある。

3.2 流砂実態の把握

流砂水文観測により、流域状況の違いによる年間の比流砂量の違いの定量的な把握(2.1.1)、出水期間中の流路変動の実態(2.2.2)、出水期間中の掃流力一流砂量関係の変化(2.4.1)、数ヶ月から1、2年の中期的な流砂特性の変化(2.3.2, 2.4.1)がとらえられた。また、上流域の土砂生産の有無やタイミングを下流で設置された濁度計により計測可能であることが示された(2.3.2)。また、今回紹介した以外にも、中期的な流砂特性の変化は常願寺川¹⁶⁾で、上流域の土石流発生による下流の濁度計の応答は日光砂防管内の大谷川¹⁷⁾でも報告されている。以上のように、表面採水や濁度計やハイドロフォンなどを用いて、流砂の実態や短期(出水期間中)から中長期までの流砂特性の変化を捉えられることが分かってきた。

3.3 流砂観測結果の活用

山地河道における流砂観測技術は進歩し(3.1)、流砂特性およびその変化を把握できる(3.2)ようになってきている。そこでここでは、今後のデータの活用について簡単に考察してみたい。

近年、危機管理の視点から流域の監視技術の向上が求められている。流砂水文観測により、出水期間中の上流域の土砂生産をリアルタイムで観測できることが分かってきた(2.3.2)。これらのことから、流砂水文観測がリアルタイムで出水期間中の流域の状況変化の監視に寄与しうることを示していると考えられる。

一方、流域の総合的な土砂管理が求められて久しい。近年、シャッター砂防堰堤のように状況に応じて流砂量を制御する試みも進められてきている¹⁸⁾。流砂の状況変化に応じた流砂の制御・管理を行うにあたっては、流砂特性の現況把握が必要不可欠であるが、現在の技術である程度、山地流域の流砂特性および流域の状況変化にともなう流砂特性の変化が把握できるようになった(3.2)。以上から、流砂水文観測データの収集・分析により、より合理的な流砂の制御、施設の管理に流砂水文観測が寄与できると考えられる。実際、多治見砂防国道事務所では、シャッター砂防堰堤設置箇所において、流砂水文観測を開始している¹⁹⁾。

4. おわりに

全国の直轄砂防事務所を中心に精力的な流砂水文観測が進められた結果、多大な成果があげられている。前節で示したように多くの成果を総括することにより、ある程度山地流域の流砂水文観測の到達点、課題点が明らかとなってきた。今後、国総研砂防研究室では、流砂量年表と本稿で示してきた成果を集めた事例集の出版を予定している。山地流域の流砂水文観測は発展途上の技術であり、本稿で示したような課題が残されている。一方で、本稿や今後出版予定の事例集を通して、これまで判然としなかった解決された課題と残されている課題を明確にすることによって、解決に向けた課題の検討が進み、最終的な課題解決につながることを期待される。国総研砂防研究室としても課題解決に積極的に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 水山高久ほか：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
- 2) 岡本敦ほか：山地河道における流砂水文観測の手引き（案）、国土技術政策総合研究所資料、第686号、2012
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn/tnn0686.htm>
- 3) 蒲原潤一ほか：山地河道の流砂水文観測における濁度計観測実施マニュアル（案）、国土技術政策総合研究所資料、第792号、2014
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn/tnn0792.htm>
- 4) 内田太郎ほか：流砂・水文観測に関する担当者勉強会の開催、土木技術資料、第57巻、第5号、pp.40、2015
- 5) 田村圭司ほか：六甲山系における水文・流砂観測、砂防学会誌、Vol.66、No.6、pp.82～86、2014
- 6) Kanno, T.ほか：Bedload detection with a pipe geophone: field experiments at the Gentaro Sabo Dam on the Hira river, Int. J. Ero. Cont. Eng., Vol.3, pp.126-129, 2010
- 7) 判田乾一ほか：姫川流域における土砂移動モニタリング、砂防学会誌、Vol.66、No.2、pp.74～78、2013
- 8) 城ヶ崎正人ほか：川幅の広い断面における流水・掃流砂観測、平成26年度砂防学会研究発表会概要集A、pp.182～183、2014
- 9) 草野慎一ほか：天竜川水系と田切川流域における土砂移動モニタリング、砂防学会、Vol.63、No.6、pp.71～74、2011
- 10) 蒲原潤一ほか：天竜川水系と田切川における土砂移動特性に関する考察、平成25年度砂防学会研究発表会概要集、pp.300～301、2012
- 11) 鈴木拓郎ほか：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究、砂防学会誌、Vol.62、No.5、pp.18～26、2010
- 12) 鈴木拓郎ほか：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性の検証、砂防学会誌、Vol.66、No.1、pp.4～14、2013
- 13) 小林拓也ほか：ハイドロフォンによる流砂観測に基づく流砂移動の特性変化に関する分析、平成26年度砂防学会研究発表会概要集A、pp.186～187、2014.
- 14) 光永健男ほか：富士川砂防事務所管内における流砂量観測、砂防学会誌、Vol.68、No.1、2015
- 15) 内田太郎ほか：ハイドロフォンの衝突率に関する実験、砂防学会誌、Vol.67、No.5、pp.24～29、2015
- 16) 三上幸三ほか：常願寺川における縦断的な掃流砂観測と津之浦下流砂防堰堤で集中観測、平成25年度砂防学会研究発表会概要集A、pp.224～225、2014
- 17) 光永健男ほか：流砂量自動観測装置が捉えた日光大谷川（稲荷川）の土石流発生事象、平成25年度砂防学会研究発表会概要集A、pp.276～277、2013
- 18) 三上幸三ほか：常願寺川における可動式シャッター砂防堰堤の設置と運用について、砂防学会誌、Vol.66、No.5、pp.42～48、2014
- 19) 有澤俊治ほか：木曽川水系と川の土砂移動実態に関する現地調査と流砂モニタリング、平成26年度砂防学会研究発表会概要集B、pp.370～371、2014

田中健貴



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部砂防研究室 研究官
Yasutaka TANAKA

内田太郎



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部砂防研究室 主任研究官
Taro UCHIDA

蒲原潤一



長野県建設部砂防課
(前 国土交通省国土
技術政策総合研究所土
砂災害研究部砂防研究
室長)
Jun'ichi KAMBARA

桜井 亘



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部砂防研究室長
Wataru Sakurai