

濁り成分の砂防堰堤湛水域での滞留過程に着目した崩壊・土石流発生監視手法に関する研究

STUDY ON COLLAPSE AND DEBRIS FLOW MONITORING METHOD
FOCUSING ON THE RETENTION PROCESS OF THE TURBIDITY COMPONENT
OF SABO DAM

西岡恒志¹・筒井和男²・榎原伴樹³・崎山朋紀⁴・木下篤彦⁵・田中健貴⁶

Tsuneshi NISHIOKA, Kazuo TSUTSUI, Tomoki ENOHARA, Tomoki SAKIYAMA, Atsuhiko KINOSHITA and Yasutaka TANAKA

¹正会員 和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

²正会員 理修 和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

³非会員 和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

⁴非会員 和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

⁵正会員 農博 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

⁶非会員 農修 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6）

It is important to detect the occurrence of slope failure to reduce the damage by sediment disaster. Studies focusing on suspended solids concentration have been conducted to discover slope failure. There is a possibility that the suspended solids concentration may change due to the water accumulation of the Sabo dam. We observed in the downstream and upstream of the Sabo dam to investigate the influence on suspended matter concentration.

In result, the suspended matter concentration stays and settles in the water accumulation of the Sabo dam. We found that there is a possibility that the suspended matter concentration will be delayed or not transmitted downstream of the dam and it is necessary to observe with attention to fine particle sizes.

Key Words : *suspended load density, water accumulation of the sabo dam, fine particle size, particle residence and sedimentation, hysteresis loop*

1. はじめに

近年、表層崩壊や土石流に伴う被害が多発している。これらの土砂移動現象を下流域で早期に検知することができれば、速やかな避難行動が可能となり被害の軽減が見込まれる。従来、土石流の発生を検知するために、ワイヤーセンサーと振動センサーもしくは警報メールなどの警報機と組み合わせた土石流検知センサーなどが用いられてきた。しかし、設置にあたり急峻な山地内での電源設備の設置手間や、ワイヤー切断による再設置の必要性、出水による河床変動による検知能力の変化、地盤振

動の局所的影響等の課題がある¹⁾。また、既往研究では河川の濁り成分に着目した崩壊発生検知について報告されており、土砂動態と濁りの変化との関係²⁾、崩壊発生検知のための閾値の設定³⁾、土砂移動の有無⁴⁾、濁度成分の量と粒径分布の関係⁵⁾に関する研究などが行われてきた。また、流量と浮遊物質濃度の関係は、時間変化ヒステリシス^{6,7)}を示し、降雨による土砂移動が収束する場合は右回りのヒステリシスループを描くが、大きな土砂移動につながって行く場合には左回りのヒステリシスループを描くことが報告されている。一方、土石流の発生のおそれのある溪流などでは砂防堰堤が設置されていることが多く、砂防堰堤で湛水が発生すると濁り成分の

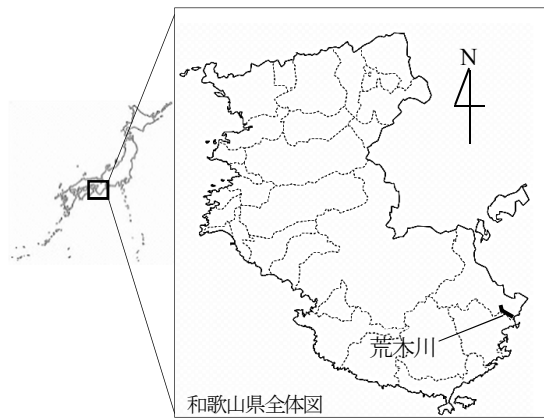


図-1 調査箇所図

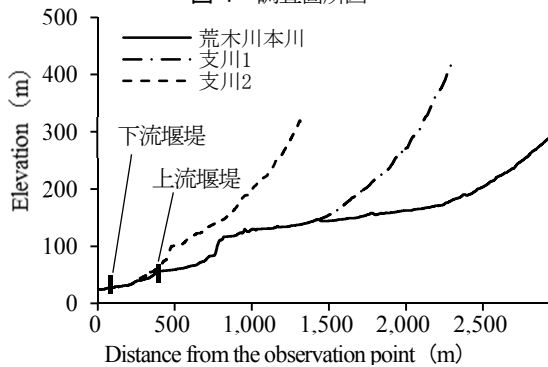


図-3 荒木川縦断面図

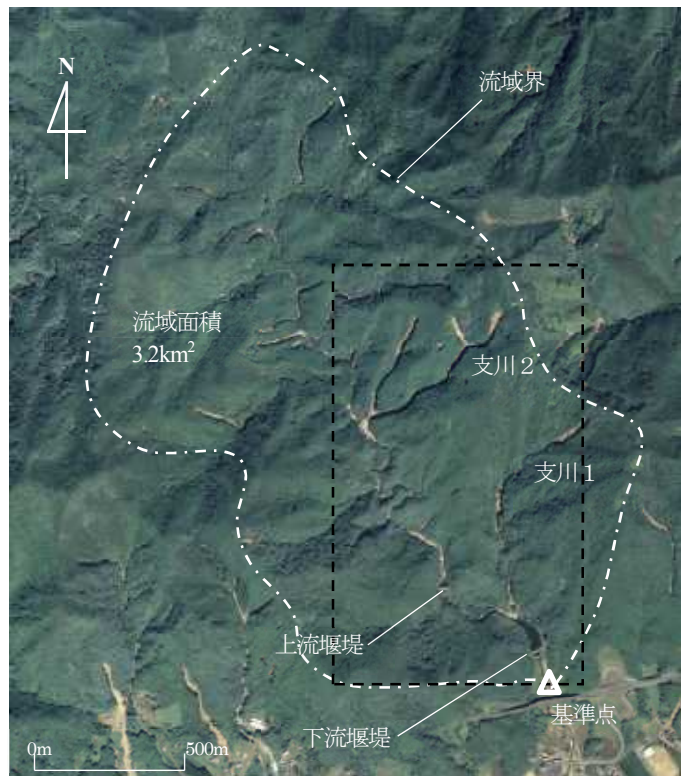


図-2 荒木川流域図. 白一点破線は流域界, 黒破線は図-4 の範囲を示す.



写真-1 出水時の下流堰堤湛水状況



写真-2 出水時の上段暗渠からの排水状況



写真-3 平成29年10月現在の下流堰堤堆砂状況

滞留や沈降が発生し、砂防堰堤の下流においては濁り成分の伝播過程が変化することが考えられるが、十分な検討はなされていない。

そこで本研究では、豪雨時に湛水が発生する砂防堰堤の上下流で濁り成分の観測を行い、砂防堰堤の濁り成分の伝播過程への影響について検討を行った。

2. 調査地の概要

(1) 調査地流域の概要

調査地は、紀伊半島南部に位置する二級河川佐野川水系荒木川流域である(図-1)。荒木川流域の砂防基準点上流の面積は3.2km²、流路延長は3.0kmで平均勾配は5.0°であり、下流から約800mのところ落差約30mの滝が存在している(図-2,3)。地質は下部が熊野層群と呼ばれる第三紀の堆積岩類(砂岩泥岩互層)であり、上

部は熊野酸性岩(花崗斑岩)で構成される。2011年9月の台風12号に伴う豪雨では、最大時間雨量132.5mm、総雨量832.5mm(気象庁新宮観測所)を記録し、調査地を含む周辺一帯では多数の表層崩壊及び土石流が発生し、甚大な被害となった。

(2) 調査地砂防堰堤の概要

調査地には不透過型砂防堰堤(以下、堰堤)が2基設置されている。2011年には支川1や支川2などで土石流が発生したが、土石流は河道内や上流側の堰堤(以下、上流堰堤)に堆積したため、堰堤の堆積状況は満砂に対して上流堰堤で2/3程度、下流側の堰堤(以下、下流堰堤)は殆ど未満砂の状況である。堰堤では、降雨時には湛水が発生している(写真-1,2)。上流堰堤の堆砂敷では、粒径の大きい砂や礫の堆積が多くみられるが、下流堰堤では粒径の大きい砂や礫は少なく、粒径の小さいシルトなど細流分の堆積が多くみられる(写真-3)。



図-4 観測機器配置図

堰堤の湛水量は、上流堰堤の平均湛水幅は約25m、湛水長は約20m、湛水深は深いところで約3m、湛水量は約600m³に対し、下流堰堤の平均湛水幅は約30m、湛水長は140m、湛水深は深いところで約6m、湛水量は約9,000m³あり、湛水量は下流堰堤が上流堰堤より約15倍大きかった。このことから濁り成分の滞留・沈降は、下流堰堤で多く発生していると考えられる。

下流堰堤にはφ500の水抜き暗渠（以下、暗渠）が上段2本と下段4本の2段に設置されており、常時は下段暗渠から排水されているが、まとまった降雨で湛水し、降雨が継続すると上段暗渠から排水開始し（写真-2）、続いて水通し部から越流する。越流発生までの時間は、最大時間雨量や降雨継続時間などによって異なるが、概ね累計雨量が200mmを越える場合に発生している。6回観測を実施したなかで、越流発生が4回、上段暗渠からの排水発生が1回、1回は下段暗渠からの排水のみであった。なお、下流観測点の無降雨時の流量は、流量観測により約1m³/sであった。

3. 調査方法

湛水量が大きく、濁り成分の滞留・沈降が多く発生している下流堰堤に着目し、2015年より観測を開始している。各観測手法と観測機器設置の概要（図-4）は以下のとおりである。

まず、濁度計（Campbell Scientific社製OBS-3+）及び水位計（クリマテック社製CWG-H10-C20）を堰堤の上流側（以下、上流観測点）と下流側（以下、下流観測

点）に設置して連続観測を実施した。流量は流量観測を実施し、水位と流量の回帰曲線式により求めた。また、タイムラプスカメラを設置して堰堤の排水開始時間とそのときの流量の関係を調査し、流量から堰堤の排水状況がわかるようにした。さらに、下流観測点における流量と濁度の関係を時間変化ヒステリシスに整理を行った。観測間隔は、それぞれ10分間隔とした。

続いて、平水時の浮遊砂の移動を観測するために浮遊砂サンプラー（Time-integrated sampler）を上流観測点と下流観測点に設置し、採取した試料の粒度分析を実施した。浮遊砂サンプラーは掃流砂が流入しないようにし、設置場所は濁度計近傍の濁度計センサー検出面の高さに合わせた。設置期間は2015年7月から11月までの約5ヶ月間である。併せて降雨時には下流観測点で直接採水を実施して粒度分析を実施し、浮遊砂サンプラーの粒径との比較を行った。

さらには、発生源の粒度分析を調査するため、荒木川流域の中で最も大きな支川2の崩壊地と、支川2と荒木川本川合流部で発生した河道閉塞部の土砂を採取し、各観測点の浮遊砂の粒径分布と比較を行った。

4. 観測結果

(1) 濁度ピークの遅れについて

2017年8月6～8日に下流観測点において観測を実施した流量・濁度の時系列の関係を図-5に示す。観測期間中、濁度が大きく分けて2回上昇した。1回目の濁度上昇開始は、降雨ピーク（43.5mm/hr、7日3:00）と同時で、濁度ピーク（7日3:30）はその30分後であった。次に、2回目の濁度上昇開始は（7日12:00）、2回目の降雨ピーク（22.5mm/hr、7日10:00）の2時間後であり、濁度ピークはその30分後（7日12:30）であった。堰堤の排水状況は、上段暗渠の排水開始時刻は7日4:30、水通しからの越流開始時刻は同日12:00であり、2回目の濁度上昇と越流開始のタイミングが重なっている。堰堤下流の流量は、上段暗渠排水開始後から越流開始までの期間は、降雨があってもほぼ一定であるが、越流開始後は急激に増加している。また、越流前には濁水が滞留し、越流が開始すると水通しから流下していくのを確認した（写真-4）。また、堰堤の上下流で同時観測を実施した2015年8月16～17日では、下流観測点ではピーク流量・ピーク濁度ともに上流観測点より小さいが、流量・濁度が高くなっている時間は上流観測点より長い時間継続していた。

これらのことから、堰堤では湛水によって下流へ流下する流量が一定に調整されると共に濁りの滞留が発生することが分かった。また、堰堤から越流開始すると下流の流量の増加及び濁度が上昇することから、堰堤の下流では濁りの流下する時間に遅れが発生し、その時間は長

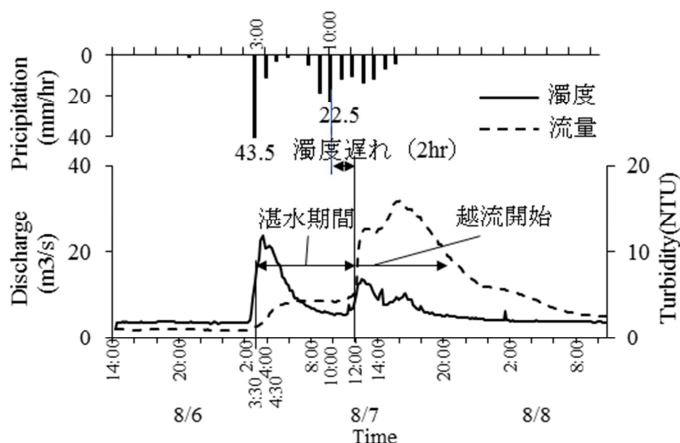


図-5 下流観測点における流量と濁度の時系列変化 (2017/8/6-8)

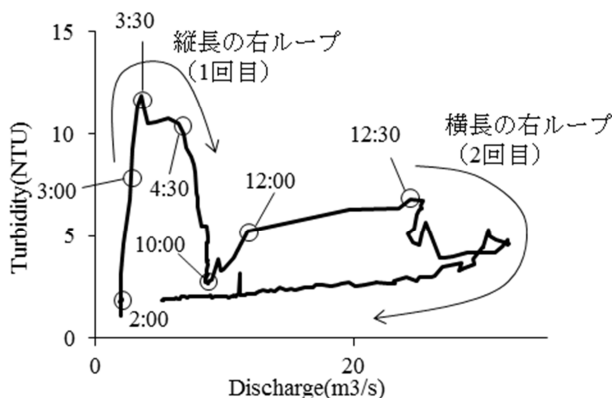


図-6 流量と濁度の時間変化ヒステリシス (2017/8/6-8)



写真-4 堰堤での濁り滞留状況 (a)越流前 2017/8/7 11:47 (b)越流後 2017/8/7 12:09

- 2:00 降雨開始
- 3:00 降雨ピーク (1回目・43.5mm/hr) , 濁度上昇
- 3:30 濁度ピーク (1回目)
- 4:30 堰堤の上段暗渠から排水開始
- 10:00 降雨ピーク (2回目・22.5mm/hr)
- 12:00 堰堤の水通しから越流開始, 濁度上昇
- 12:30 濁度ピーク (2回目)

表-1 観測結果一覧

観測年月日	上段：累計雨量 下段：最大時間雨量	湛水の 有無	堰堤 排水状況	濁度の遅れ 時間	各観測点の ヒステリシス
2015/7/16～17	224.5mm 23.5mm/hr	有	越流	3hr	右回り→右回り (下流)
2015/8/16～17	154.5mm 32.0mm/hr	有	下段暗渠排水	遅れ無し	右回り (上流) 右回り (下流)
2015/8/25	83.5mm 21.5mm/hr	有	上段暗渠排水	遅れ無し	右回り (下流)
2015/9/8～9	256.5mm 22.5mm/hr	有	越流	1hr40min	左回り (上流) 右回り (下流)
2017/8/7	161.0mm 56.5mm/hr	有	越流	2hr	右回り→右回り (下流)
2017/10/21～22	815.0mm 66.0mm/hr	有	越流	4hr	左回り→右回り (下流)

く継続することが分かった。そのほかの観測 (表-1) においても濁りの遅れは同様に発生していたが、暗渠から排水しているときに遅れは見られなかった。

(2) 流量と濁度の関係の変化について

2017年8月6～8日に観測を実施した堰堤下流における流量と濁度の時間変化ヒステリシスを図-6に示す。浮遊

物質濃度や濁度と流量の関係は時間変化ヒステリシス (以下、ヒステリシス) を示すことが報告されており、観測期間中にも2回の右回りのループを描くヒステリシスが確認された。1回目の右回りループは、7日3:00の降雨ピーク時に濁度が上昇したときに上方向に向かい、3:30に濁度ピークを迎えた後の、4:30に上段暗渠からの排水開始した後に流量が一定となったため、ヒステリシ

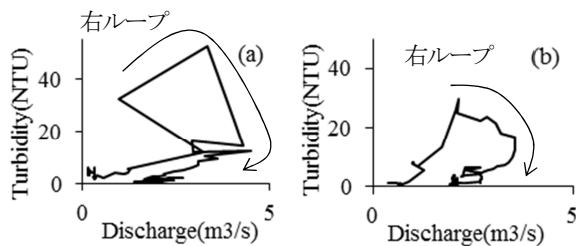


図-7 流量と濁度の時間変化ヒステリシス(2015/8/16-17)
(a)上流観測点 (b)下流観測点

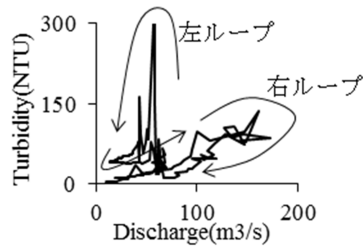


図-9 流量と濁度の時間変化ヒステリシス (2017/10/21-22)

スは下方向に向かった。このとき堰堤では湛水していた。続いて、2回目の降雨ピーク時の10:00前後のヒステリシスに変化は少ないが、降雨ピーク2時間後の12:00に越流開始した以降は濁度と流量が大きく増加し、さらに流量の増加が続いたためヒステリシスは右上方向に向かった。ループの形状の1回目は縦長、2回目は横長の形状となった。

次に、堰堤の上下流で同時観測を実施した2015年8月16～17日のヒステリシスを図-7に示す。このとき、上流観測点と下流観測点ではそれぞれ右回りループを描いた。下流観測点ではピーク流量・ピーク濁度ともに上流観測点より小さいが、流量・濁度が高くなっている時間は上流観測点より長く継続したため、下流観測点のループは上流観測点より小さく、なだらかな形状を示した。一方、上流観測点では、流量や濁度の降雨に対する応答性が良く数値の変動が激しいことから、ヒステリシスは直線の多い角張った形状を示した。

さらに、2015年9月8～9日の上流・下流観測点の流量・濁度の時系列変化(図-8)では、下流観測点では降雨ピーク後に濁度が減少しているのに対し、上流観測点では濁度が上昇を続けており、上流で観測された濁度が、堰堤の下流まで伝播していないことが確認できた。このとき上流観測点の流量は不明であるが、降雨が少なく流量が減少する状況において濁度が増加していることから、ヒステリシスは左回りループを描いたと考えられる。下流観測点では右回りループが観測されたため、堰堤を境にループの向きが変わったといえる。

これらより、湛水が発生した堰堤においてもヒステリシスがループを描き、湛水しているときは縦長、越流しているときは横長形状のループを描くことが分かった。また、堰堤の上下流ではヒステリシスの形状が異なり、上流では角張った直線上の大きなループを、下流ではな

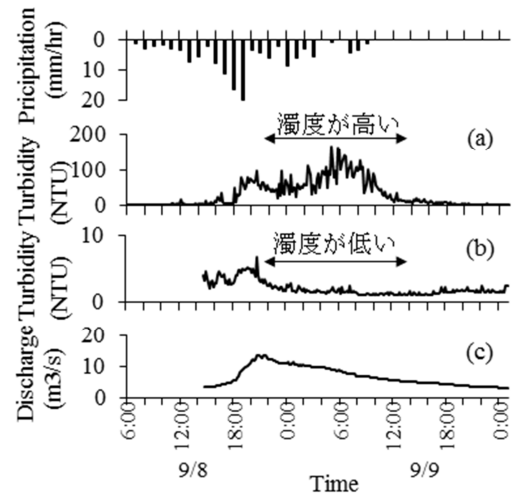


図-8 流量と濁度の時系列(2015/9/8-9) (a)濁度(上流観測点) (b)濁度(下流観測点) (c)流量(下流観測点)

だらかな小さなループを描くことが分かった。さらに、堰堤で上流の濁度が遮断されて下流に伝播しないことがあり、ヒステリシスのループの向きが堰堤を境に左回りから右回りのループに変化する可能性があることが分かった。

(3) 崩壊発生時の濁り成分の流出について

2017年10月21・22日の台風21号の豪雨(累計雨量815.0mm, 時間最大雨量66.0mm)によって、河道閉塞部が拡大崩壊して荒木川本川で土石流が発生した。このときの降雨は2回のピークがあり、ヒステリシスは左回りループと直線に近い右回りループを描いた(図-9)。土砂移動が発生したときのヒステリシスは左回りループを描くことが報告されて⁵⁾、湛水した堰堤の下流においても土砂移動発生時にはヒステリシスが左回りのループを描き、また、ループの形状が左回りから右回りに変化することが分かった。

(4) 堰堤上下流の浮遊砂の粒径の変化について

堰堤の上流と下流に設置した浮遊砂サンプラーで採取した浮遊砂の粒度分布分析結果を図-10に示す。下流観測点の粒径(Median値89 μ m, Mode値123 μ m)は上流観測点の粒径(Median値185 μ m, Mode値370 μ m)より小さく、その大きさは約1/2～1/3であった。0.1mm(=100 μ m)以下のウォッシュロードの占める割合に着目すると、上流観測点では全体の約3割(200 μ m以下は約5割)であるのに対し、下流観測点では全体の約5割(200 μ m以下は約8割)を占め、下流観測点でウォッシュロードの占める割合が増加していた。また、2017年台風21号の豪雨時に直接採水した粒度分布も、100 μ m以下の粒径が多くを占めており、堰堤の堆砂数には湛水後に細かな砂の堆積が確認(写真-3)できる。また、崩

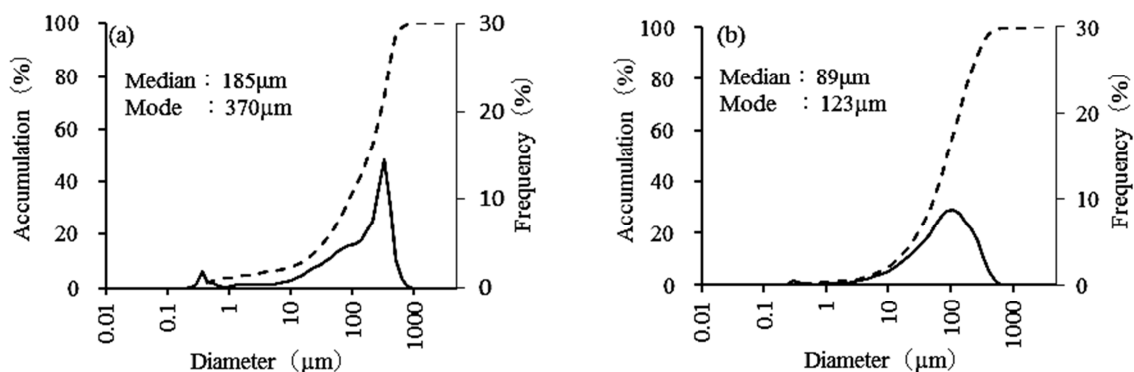


図-10 堰堤上流と下流の粒度分布の比較 (a)上流観測点 (b)下流観測点

壊地や河道閉塞部で採取した粒度分布は、崩壊地は粒径100 μm 以下が5割を占めるのに対し、河道閉塞部は2割であり、100 μm 以下の粒径が下流へ多く流下していることを確認した。

これらのことから、堰堤では湛水によって100 μm 以上の粒径の多くは滞留して沈降し、堰堤下流には主として100 μm 以下の細かな粒径の浮遊砂が流下しているといえる。

5. まとめ

本研究では、降雨時に湛水が発生している堰堤の上下流において河川の濁度、流量の観測及び粒度分析を行い、堰堤の湛水の影響による濁り成分の伝播過程について検討を行った。

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ・濁り成分は堰堤の湛水によって滞留し、水通しから越流すると同時に下流へ流下する。このため濁り成分が下流へ伝播する時間に遅れが発生したり、高い濁度が継続する時間が長くなることがある。また、堰堤の上流で観測された濁り成分が下流に伝播しないことがある。
- ・堰堤で湛水が発生した場合でも、堰堤の下流の流量・濁度の時間変化ヒステリシスはループを描き、土砂移動がない場合は右ループ、土砂移動がある場合は左ループを描く。
- ・堰堤の湛水によって濁り成分が滞留して沈降が発生する。このため、堰堤の上流と下流では浮遊砂の粒度分布が異なり、下流では100 μm 以下の粒径の占める割合が多くなる。

以上より、濁りの観測を湛水が発生する堰堤の下流で実施し、崩壊や土石流の発生の監視を試みる際には、濁りの伝播が堰堤上流より遅れる可能性や、伝播しない可能性に留意する必要がある。また、湛水によって濁り成分が滞留・沈降するため、100 μm 以下のウォッシュロードに着目して観測する必要があることが分かった。一方、濁り成分の下流への伝播過程は、堰堤の土砂堆積状況、降雨量や降雨継続時間など湛水状況によって異なることが考えられるため、今後も観測・調査を継続してデータを収集していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木研究所：振動検知式土石流センサー設置マニュアル案, 2005
- 2) 藤田正治・澤田豊明・水山高久：山地流域における濁度変化と土砂動態, 水工学論文集, 第47巻, p.739-744, 2003.
- 3) 土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報検討会：土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報の活用の方について, 2006.
- 4) 小山内信智・水野秀明・林真一郎・沖中健起：濁度計を用いた土砂移動緊急監視システムに関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.332, 2006.
- 5) 筒井和男・坂口武弘・西岡恒志・福田和寿・島田徹・田中健貴・木下篤彦：濁度成分の量と粒径に着目した流域内の崩壊監視に関する研究, 河川技術論文集, 第23巻, p.453-458, 2017
- 6) Williams, G.P.: Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in river, Journal of Hydrology, 111, 89-106, 1989.
- 7) 倉茂好国：河川の浮遊土砂研究における最近の動向, 北海道大学地球物類学研究報告, No.59, p.1-13, 1996.

(2018. 4. 3受付)