

# 流砂水文観測技術を活用した天然ダム監視観測方法の検討

田中 健貴<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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)

近年活発に実施されてきているハイドロフォンや濁度計による流砂水文観測を、天然ダムの監視観測方法に活用する方法を検討した。その結果、電源確保といった面で、山地河川における観測は、条件が厳しいものの、出水時のデータについては良好に取得できることが分かった。また天然ダム堤体が大きく侵食される際には、流砂量のデータにも水位と流砂量の関係に変化が現れることが分かった。これらのことに着目することで、観測データに基づく、天然ダム監視観測技術が有効であることが示唆される。

キーワード 流砂水文観測、ハイドロフォン、天然ダム、監視観測技術

## 1. はじめに

平成23年台風12号により紀伊半島各地で深層崩壊と呼ばれる大規模な斜面崩壊が発生した。深層崩壊が発生した箇所のうち、複数の箇所では崩壊した土砂によって、河川がせき止められ、河道閉塞（以後、天然ダム）が生じた<sup>1)</sup>。形成された天然ダムの湛水池水位が降雨によって増加すると、天然ダム堤体の越流侵食が発生する。天然ダム堤体の越流侵食が進行すると、堤体が破壊され、大規模な土石流が発生し、大きな被害が生じる可能性がある<sup>2)</sup>。このような天然ダム堤体の侵食による被害を防止、軽減するためには、天然ダム堤体に越流侵食が生じている際の監視観測が必要である。

これまで、天然ダムの監視観測方法として、監視カメラによる天然ダム堤体の監視や水位計による湛水池水位の観測が提案されてきた<sup>3)</sup>。これらの方法では、天然ダム堤体の侵食状況をいち早く把握し、下流域住民へ速やかに情報伝達することで被害を防止・軽減することを想定している。しかし、夜間や悪天候時のカメラによる監視は視界確保が難しい。また水位観測では天然ダムの越流開始は把握できるが、侵食状況の把握は困難である。このような状況では、越流侵食による天然ダム堤体の状況変化は把握困難であり、地域住民の避難に必要な情報の伝達が遅れる可能性がある。

一方で、近年山地河川におけるハイドロフォンや濁度計、水位計を活用した流砂水文観測技術が確立されてきた<sup>4)</sup>。ここで、ハイドロフォンとは管状または板状の金属製の観測機器であり、観測機器の管部分または板部分

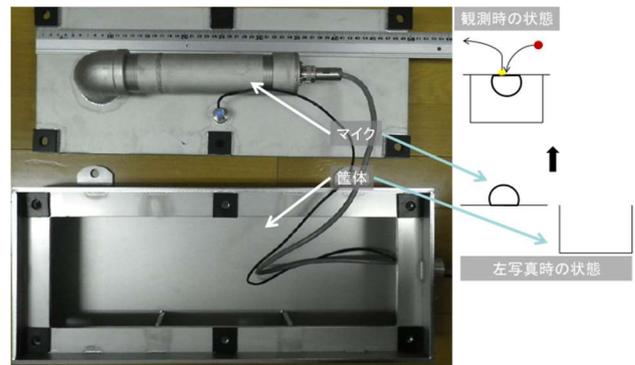


図-1 プレート型ハイドロフォン設置事例およびプレート型ハイドロフォンの構成

に河川内を流下する砂礫が衝突する音を利用することによって、主に掃流砂量を観測する機器である（図-1）。ハイドロフォンは濁度計、水位計等とともに、流砂量観

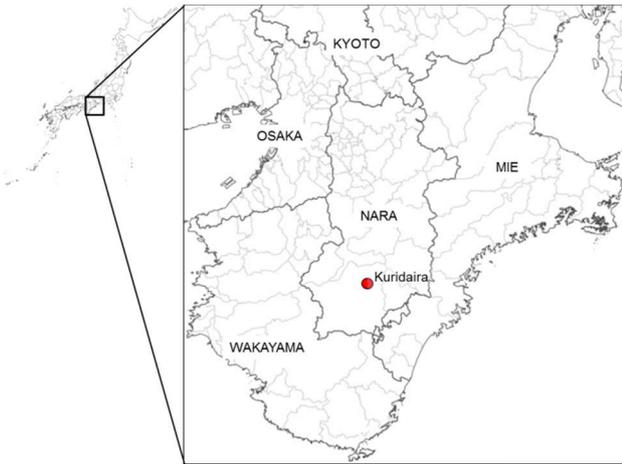


図-2 栗平地区における崩壊と天然ダム

測に利用される。長期間の観測によって対象流域の土砂動態変化を把握することに利用されることが多いが、対象河川で発生した土石流による流砂量の変化を検知した事例が報告されてきており<sup>5)・6)</sup>、流砂水文観測が流域状況変化把握に活用できることが示されてきている。

一般に、天然ダム堤体の越流侵食時には、堤体の侵食に伴う土砂移動が発生し、またその土砂移動状況に変化が見られることが想定され、その変化を捉えることが天然ダムを監視観測する上で重要と考えられる。これらから、流砂水文観測技術により、天然ダム侵食状況をふまえた天然ダムの監視観測が可能になると考えられる。そこで、本報告ではハイドロフォン等の流砂水文観測技術を活用した天然ダム監視観測技術について検討する。

## 2. 調査地概要

### (1) 調査方法

栗平地区(奈良県吉野郡十津川村)における崩壊地は高さ450m、幅600m、長さ650mであり、崩壊土砂量は約2385万<sup>3</sup>mであった(図-2)。栗平地区の天然ダムはこれまでも台風等による降雨によって越流侵食が生じて

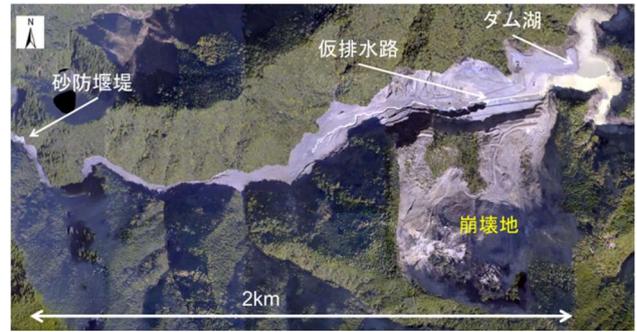


図-2 観測機器設置箇所の概要

いる。平成29年にも8月台風5号および10月台風21号によって越流侵食が生じた。なお、栗平地区の天然ダム堤体には仮排水路が設置されており、この仮排水路の敷高は535.53mである。天然ダム湛水池の水位がこれを超えると越流が始まる。

栗平地区ではこれまでも水位計やカメラによる監視が行われてきた。今回設置した観測機器は、水位計、底面流速計、濁度計、パルス式ハイドロフォンである。パルス式ハイドロフォンでは砂礫衝突音を1倍、4倍、16倍、64倍、256倍、1024倍の各増幅率で増幅を行い、これらの音響波形を解析し、算出されたパルス数を基に校正試験を実施し、掃流砂量への変換式を構築する。今回構築された変換式は以下の通りである。

$$Q_{sc} = \frac{1}{\beta} \times \frac{P_{16}}{\rho_s}$$

ここで、 $Q_{sc}$ : 計算土砂量 ( $cm^3$ )、 $\beta$ : 係数、 $\rho_s$ : 礫の密度 ( $kg/cm^3$ )、 $P_{16}$ : 増幅率16倍時のパルス数である。

これらの機器は天然ダム下流約2kmにある不透過型砂防堰堤直下流に設置し、平成29年6月より観測を開始した(図-3)。ハイドロフォンなどの観測機器は出水時の河川地形変化に留意し、河川構造物に設置することが一般的である。よって、今回天然ダム堤体の仮排水路、下流の不透過型砂防堰堤の水通し天端、下流の不透過型砂防堰堤の垂直壁天端が設置箇所候補として挙げられた。仮排水路への設置に関しては、設置以前に仮排水路自体が侵食を受ける事例があったことから候補から除外した。



写真-1 台風21号による降雨  
観測箇所周辺を上流側より撮影

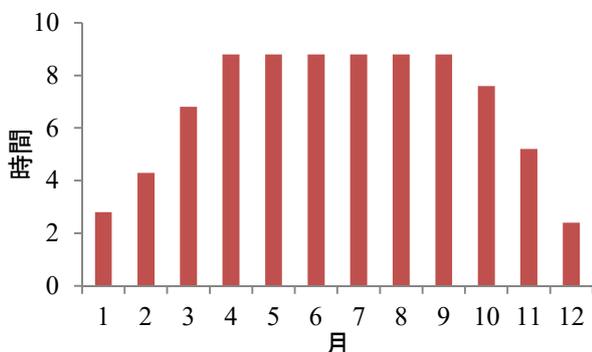


図-3 観測箇所における日照時間

また機器設置当時は砂防堰堤は満砂状態ではなく、天端は観測箇所として適さないと判断した。その結果、最も安定的に観測できると考えられる不透過型砂防堰堤の直下流に設置した(写真-1)。また観測箇所周辺は商用電源がなく、電源としてソーラーパネルを使用した。観測機器を安定的に運用するには日照時間が4時間必要であったが、夏期については日照時間が十分確保できることが分かった。一方で1月と12月は2.4~2.8時間程度しかないので、電圧低下時にはデータロガーの制御プログラムによって、観測を停止し、再度電圧が上昇した後に観測を再開するようにした(図-3)。

(2) 対象とした降雨および越流侵食

データ分析の対象とした降雨は平成29年10月20日から24日にかけての台風21号による降雨である。台風21号では平成29年10月20日から24日にかけて累積雨量468.5mmの降雨が観測された。平成21号は平成23年台風12号以降、最大の累積降雨を記録した(図-6)。この時、10月22日16時ごろから越流が始まった。降雨後、ヘリコプター(Aerospatiale AS350B Ecureuil)による調査を実施した。調査では、天然ダム堤体に設置している仮排水路が侵食されていること、天然ダム堤体と砂防

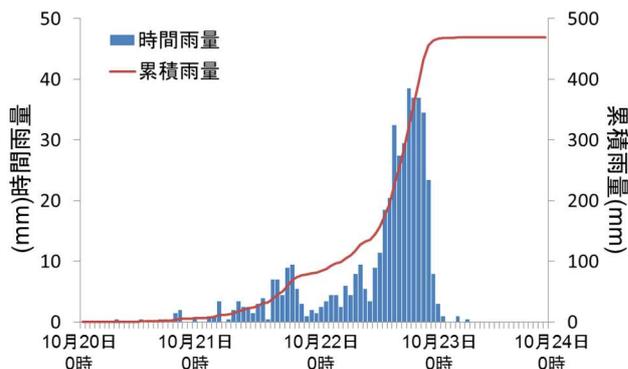


図-4 台風21号による降雨



写真-2 台風21号後の観測箇所周辺の状況  
観測箇所周辺を下流側より撮影

堰堤の間で河床地形に変化が見られることが分かった。

なお、侵食後の地形については、ヘリコプターからの写真撮影を基に、写真測量を行った。写真撮影はデジタルカメラ(Nikon D4)によって斜め撮影で実施されている。今回撮影した斜め写真を基にした写真測量を行い、平成29年8月台風5号時に行ったUAV画像を基にした地形データとの差分から侵食深さなどについて調査した。ここで写真測量は、以下の方法で行った。

- ① 平成29年8月台風5号時に作成されたオルソ画像を基に平面基準点、標高基準点を設定
- ② SfM法により今回撮影した斜め写真から自動的に撮影位置および撮影対象物の3次元形状を推定
- ③ ①で設定した基準点を基に②のデータを補正
- ④ ③で補正したデータから地形モデルを作成

ここでSfM法とはStructure from Motion法の略であり、異動しながら撮影された画像から、対象物の形状を復元する技術である<sup>7)</sup>。

台風21号による降雨によって移動した土砂は、それ以前に砂防堰堤にある程度土砂が堆積していたこと、また、降雨後の調査から砂防堰堤が満砂したことから一部の土砂は、砂防堰堤よりもさらに下流へと流出し、観測箇所周辺にも土砂が堆積した。このことにより、観測機器は土砂に埋没した。(写真-2)

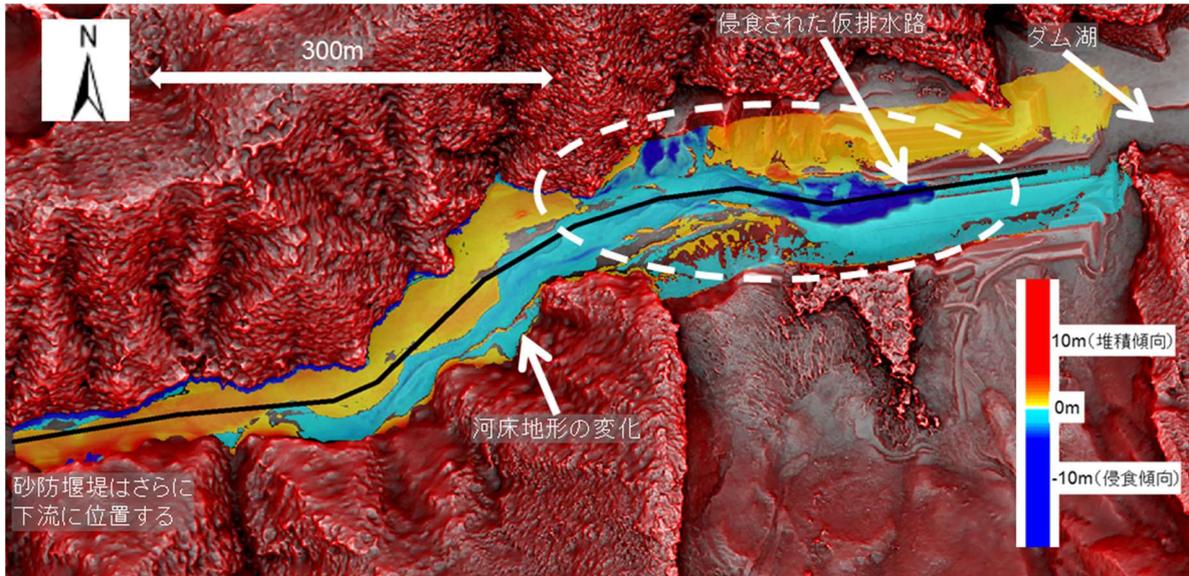


図-8 台風 21 号後の観測箇所周辺の状況

### 3. 降雨時の観測状況

#### (1) 測量による侵食状況の把握

写真測量の差分結果を図-8 に示す。この時、天然ダム堤体に設置されていた仮排水路は下流部延長 80m にわたり流出、直下の落差が最大 28m となる侵食を受けた。また天然ダム堤体と砂防堰堤の間についても河床地形に変化が見られることから、この区間でも土砂流出があったと考えられる。(2) 台風 21 号時の観測結果分析

台風21号による降雨時、観測された水位データは不安定ではあるが、4~239 cm を記録した。天然ダムの越流は10月22日16時頃から始まったが、水位増加にともなって濁度、掃流砂量が増加し、濁度・掃流砂量および水位の急激な増加は越流開始とほぼ同じ16時30分頃に観測された。その後濁度および掃流砂量は一度低下しているが、掃流砂量については2度のピークが見られる。23日2時から3時以降は濁度と掃流砂量が急激に低下し、水位も高い値を示したままとなった(図-9)。

#### (3) 水位と掃流砂量の関係

水位と掃流砂量の関係を図-10に示す。越流開始から5時間程度までは、越流から1時間後の22日17時ごろ掃流砂量の増加し、増加傾向は18時まで見られる。その後、掃流砂量は低下し、その後21時までには掃流砂量は小さい傾向にある。この期間での掃流砂量の増加は水位の増加に伴った変化であり、水位と掃流砂量の関係は右回りのループを示す。

越流開始6時間後から9時間後までの間では、21時から22時にかけて掃流砂量が増加し、23日0時まで掃流砂量は増加する傾向が見られる。この期間での掃流砂量の増加は水位の増加を伴わない変化、つまり水位が低下する

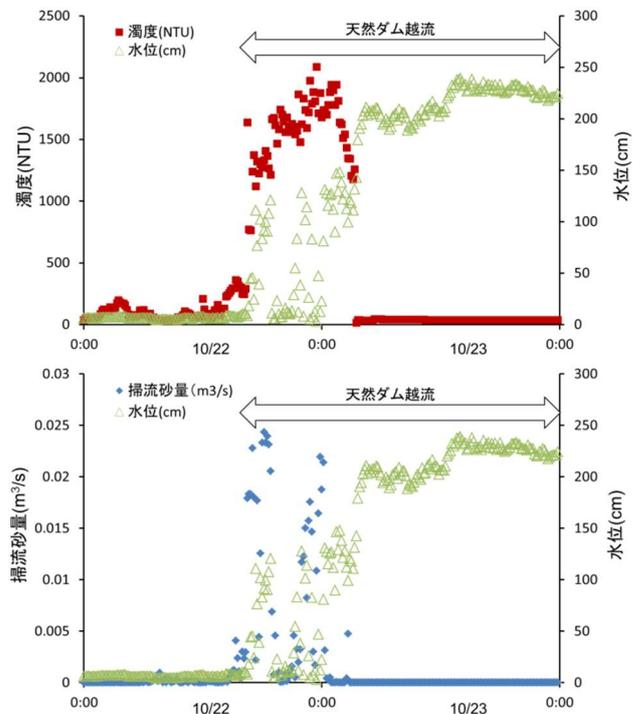


図-9 台風 21 号後の観測箇所周辺の状況

にも関わらず掃流砂量が大きくなる傾向を示し、水位と掃流砂量の関係は左回りのループを示している。その後、大きくなる傾向にあった掃流砂量は23日1時にかけて、ほぼ0m³/sまで掃流砂量は低下している。

### 4. 観測データに基づく状況変化について

#### (1) 越流開始と流砂量データ変化の関係

天然ダム堤体の越流が始まる前には、濁度、掃流砂量に

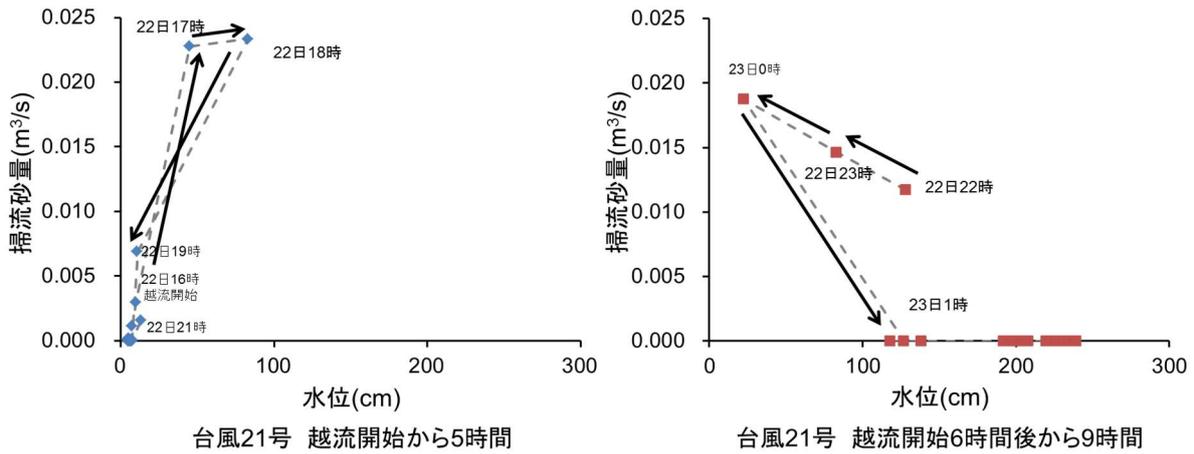


図-10 台風21号後の観測箇所周辺の状況

大きな変化は見られなかった。これは観測箇所での流砂量が天然ダムの越流侵食により規定されることを示唆していると考えられる。また濁度と水位は、台風5号では越流開始とほぼ同時刻に、台風21号では越流開始から30分程度経過した後には上昇が見られた。このことから、越流侵食により初期に移動した土砂は30分程度までには観測箇所に到達する可能性があると考えられる。

(2) 越流中の流砂量データの変化について

台風21号時の観測データでは、掃流砂量のピークが越流開始直後ならびに越流開始後から約8時間後の2度見られ、土砂移動現象は大きく2度あった可能性がある。

また水位と掃流砂量の関係は、1回目は右回り、2回目は左回りのループを描いた(図-10)。ここで出水後の調査結果から、天然ダム堤体と河床の侵食が見られ、写真-3に示す出水中に撮影されたカメラ映像から、左回りのループが描かれた時間周辺で仮排水路が侵食された様子が観察された。この時、下流の砂防堰堤は、ほぼ満砂状態であり、台風21号による土砂の多くは砂防堰堤を通過し、観測箇所に到達したことが考えられる。また仮排水路侵食前には天然ダム堤体部分から土砂運搬することなく、比較的土砂濃度が小さいまま流下したことが考えられるが、仮排水路侵食後には本来運搬可能な土砂が運搬されることにより、侵食前よりも掃流砂量が大きくなった可能性がある。

以上から、天然ダム下流での観測データを基に、越流期間中に水位と掃流砂量の関係に着目することで、天然ダム堤体の状況変化を把握出来る可能性が示唆される。

(3) 観測上の課題

各出水時に掃流砂量の最大値は約0.025cm³/sを示している。ここで台風21号時のハイドロフォンによる増幅率毎のパルス数を図-11に示すが、22日17時頃複数の増幅率でパルス数がほぼ同じ値を示し、パルス数が頭打ちとなっていることが考えられる。この場合、掃流砂量が実際よりも小さく算出された可能性がある。この要因



写真-3 台風21号時の CCTV 映像  
矢印は侵食が発生していると思われる箇所を示す

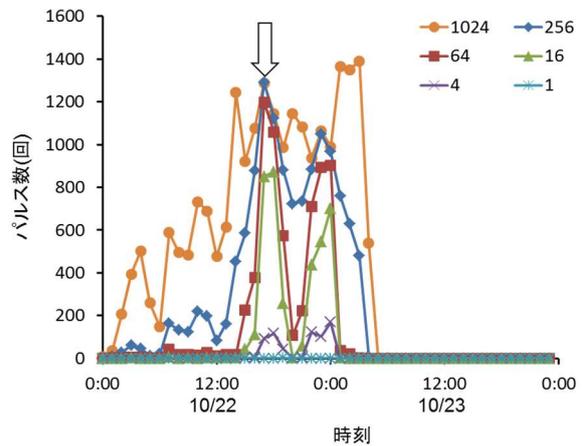


図-11 台風21号後の観測箇所周辺の状況

凡例はハイドロフォンで得られた音響の増幅率を示す  
矢印はパルス数が各増幅率でほぼ同じ値をしめしており、頭打ちとなっていると思われる時間帯を示す

としてハイドロフォンへ一度に大量の砂礫が衝突したことによる影響が考えられる<sup>4)</sup>。つまり、同時に複数の砂礫がハイドロフォンへ衝突することで、ハイドロフォン内部に設置されているマイクの検知能力の限界となって

いた可能性がある。また水位の観測データにばらつきが見られた。これは水位計が圧力式であることによる水面の乱れが要因として考えられる。さらに観測終盤では水位が高止まりした。出水後の現地調査によって観測機器が埋没していたことから、堆積土砂中の地下水圧を計測した可能性が考えられる。

また、今回の検討は既存の天然ダム水位の観測や、カメラでの監視と組み合わせて活用することが望ましい。現状、観測データから状況変化を把握することは先述の通り、課題がある。天然ダムの水位観測は、これまで長期間にわたり実施されてきており、天然ダム堤体の侵食状況の把握は出来ないが、越流開始のタイミングはある程度精度良く推定することが出来る。またカメラ監視では、実際に現場で発生している現象について把握することが出来るが、今回検討した方法では実際に発生していることの把握は難しい。したがって、既存技術である天然ダム水位の観測や、カメラによる監視も合わせた監視観測方法を構築することが有効であると考えられる。

## 5. まとめ

栗平地区において観測データに基づき、天然ダム堤体の越流侵食時の土砂流出状況を整理した。その結果、ハイドロフォンなどによる観測データから天然ダム堤体の侵食状況の変化が把握可能であることが示唆され、特に水位と掃流砂量の関係に着目して天然ダムの状況を推定する方法が有効と考えられた。しかし、観測に関する課

題もあためて明らかとなった。今後も観測を続け、より詳細に天然ダムの状況を観測から把握する手法を検討したい。

## 参考文献

- 1) 松村和樹, 藤田正治, 山田孝, 権田豊, 沼本晋也, 堤大三, 中谷加奈, 今泉文寿, 島田徹, 海堀正博, 鈴木浩二, 徳永博, 柏原佳明, 長野英二, 横山修, 鈴木拓郎, 武澤永純, 大野亮一, 長山孝彦, 池島剛, 土屋智: 2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol.64, No.5, pp.45-53, 2012.
- 2) 田畑茂清, 水山高久, 井上公夫: 天然ダムと災害, 古今書院, 2002
- 3) 田村圭司, 山越隆雄, 松岡暁, 伊藤洋輔, 田方智, 柳町利輝: 天然ダム監視技術マニュアル(案), 土木研究所資料第4121号, 2008
- 4) 桜井亘, 内田太郎, 田中健貴, 井内拓馬, 蒲原潤一: 近年の山地河川における流砂水文観測, 国総研資料第887号, 2016.
- 5) 光永健男, 佐藤勇, 齋藤一裕, 池田幸太郎, 長井斎, 松原智生, 田島規雄: 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, pp.B276-B277, 2013
- 6) 蒲原潤一, 中島一郎, 福本晃久, 玉置和基, 山下伸太郎, 内柴良和, 家田泰弘, 佐伯響, 梅村裕也, 江口友章: 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24年度砂防学会研究発表会概要集, pp.300-301, 2012
- 7) 織田和夫: 解説: Structure from Motion (SfM) 第一回 SfMの概要とバンドル調整, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.3, pp.206-209, 2016.