

流砂量観測装置を用いたアラートシステム構築への取り組み

北本 楽・小杉 恵・木下篤彦

1. はじめに

2011年9月台風第12号による豪雨では、多数の斜面崩壊、崩壊に伴う河道閉塞が生じた。崩壊斜面および河道閉塞からの土砂流出を監視するために、河道閉塞下流にハイドロフォン等を設置し、流砂水文状況の観測監視を実施中である¹⁾。土砂移動監視における流砂量観測研究は、例えば、天竜川水系と田切川において、上流域で発生した土石流の有無により、下流域で観測される掃流砂量に違いが生じた事例²⁾があり、上流域の異常な土砂移動を流砂量観測によって検知できることが報告されている。また、桜井ら³⁾は、鬼怒川水系大谷川での土石流発生時に、流量と掃流砂量の関係が左回りのヒステリシスループを描くことに着目し、ヒステリシス解析に基づいて、警戒避難情報等を提供するアラートシステムを提案している。本稿では、紀伊山系砂防事務所管内（以下「管内」という。）における流砂量観測結果を解析し、桜井ら³⁾が用いたヒステリシスに着目した異常な土砂移動の検出方法の適用性および流砂量観測に基づくアラートシステム構築に向けた今後の課題について報告する。

2. 対象流域及び観測解析手法

2.1 流砂量観測対象流域

管内では、熊野川水系の川原樋川、栗平川、神納川、三越川、高田川、及び和歌山県を流れる日置川水系の熊野川を対象に流砂量観測を実施している（図-1）。川原樋川、栗平川、三越川、熊野川の4箇所の上流域には2011年9月台風第12号時の豪雨により生じた深層崩壊地がある。各箇所にはハイドロフォン、水位計、濁度計等の流砂量観測機器を設置している（写真-1）。本研究では、上記観測箇所の内、比較的長期間にわたり、大きな欠損が無く、良好なデータが取得できている川原樋川、三越川、熊野川の3流域のデータを対象

とした。なお、川原樋川は、上流の池津川合流付近と下流の赤谷川合流付近の2箇所で見測を実施している。対象とした4観測箇所の流域面積、河床材料調査による粒径と、ハイドロフォンの観測期間を表-1に示す。

2.2 掃流砂量の算出

ハイドロフォンは、金属板に衝突する砂礫が生じた衝突音をマイクで収集して電圧に変換することで、間接的に掃流砂量を計測する機器である。本研究では、パルス法と音圧法の2手法のうち、



図-1 流砂観測箇所の位置図



写真-1 日置川流域熊野川の流砂観測施設

表-1 流砂観測所の概要

| 観測地点名 | 水系名 流域名 | 流域面積 (km ²) | 粒径 | | | 解析対象期間 |
|-------------------|------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|--|
| | | | d10 (mm) | d60 (mm) | d90 (mm) | |
| いや 熊野地区 | 日置川 熊野(いや)川 | 5.4 | 1 | 30 | 80 | 2018年3月 ~2018年8月 2019年2月 ~2021年9月 |
| 川原樋川上流 (池津川合流) | 熊野(くまの)川 川原樋川 | 130.9 | 2 | 25 | 70 | 2018年9月 ~2021年9月 |
| 川原樋川下流 (赤谷川合流) | 熊野(くまの)川 川原樋川 | 150.8 | 4 | 40 | 95 | 2018年3月 ~2021年9月 |
| 三越川流域 | 熊野(くまの)川 三越川 | 23.3 | 0.7 | 40 | 70 | 2018年9月 ~2021年9月 |



図-2 2018年台風第20号時の熊野川におけるカメラ画像

音圧法を用いることとした。掃流砂量変換は国土技術政策総合研究所から掃流砂量算出プログラムを借用して算出した。

2.3 水位と掃流砂量の関係分析

流砂量観測結果を、横軸に水位、縦軸に掃流砂量の関係を示すことで、平常時には観察されない左回りのヒステリシスループが観測されたのか確認した。平常時出水では、増水時（出水前半）と減水時（出水後半）で水位に対する掃流砂量の関係は正の相関または直線的である場合が多い。一方で、異常な土砂移動時には、水位が低下する減水時においても、掃流砂量が多く、水位-掃流砂量の関係が左回りのヒステリシスとなる場合があり、これを左回りヒステリシスループと表記する。

2.4 異常な土砂移動の検出手法の検討

平常時の出水の際の水位-掃流砂量の関係と異常な土砂移動の際の水位-掃流砂量の関係との判別は、芦田らによる式⁴⁾（以下「A.T.M式」という。）やMeyer-Peter and Müllerの式⁵⁾（以下「M.P.M式」という。）を利用した。掃流砂量公式は、平均粒径を任意に変化させることで、平常時の水位-掃流砂量の関係を複数パターン推定できる。掃流砂量公式による水位-掃流砂量の関係（以下「推定曲線」という。）を、流砂量観測結果に重ねて、推定曲線から逸脱するような異常な土砂移動、つまり、左回りヒステリシスループの分離を試行した。また、粒径を変化させて、複数の推定曲線を設定することで、どの粒径を設定した際に、推定曲線が左回りヒステリシスループの分離に適する閾値線となるか確認した。

3. 解析結果

3.1 左回りヒステリシスループの確認事例

2018年8月の台風第20号による総降雨量約600mmの大規模降雨により日置川水系熊野川の流砂観測箇所では、ハイドロフォンが被災を受ける土

砂流（図-2）が生じた。この出水時の雨量、水位、掃流砂量を図-3に示す。また、この出水イベント中に水位-掃流砂量の関係から左回りヒステリシスループが確認された（図-4）。なお、表-1に示すすべての観測期間中で左回りヒステリシスループの事例が確認されたのは、熊野川での台風第20号による出水イベント中のみであった。

3.2 異常な土砂移動の検出閾値線設定

熊野川で観測された水位-掃流砂量の関係および、A.T.M式およびM.P.M式の各掃流砂量公式の平均粒径を変化させた複数パターンの推定曲線を図-5に示す。なお、推定曲線のうち、各粒径の限界掃流力となる水位以下は表示していない。観測期間のうち、2018年8月、2019年8月、2020年7月において、特に水位が上昇する降雨イベントが生じた。2018年8月の土砂流以外の出水では、水位-掃流砂量の関係は正の相関を示すような平常時出水であった。続いて、平常時出水における水

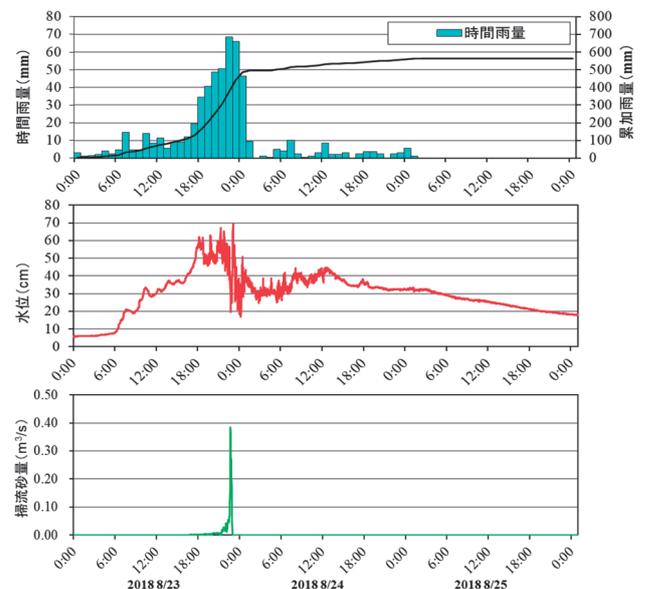


図-3 2018年台風第20号時に観測された熊野川流砂観測箇所の雨量、河川水位、掃流砂量

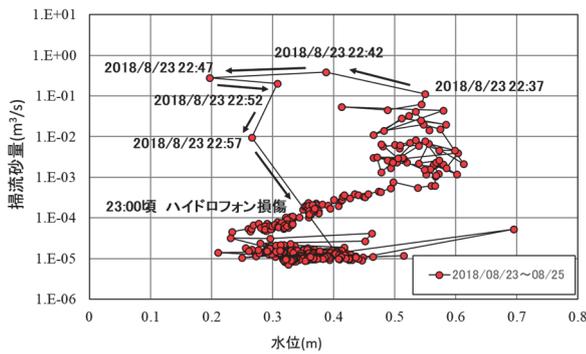


図-4 2018年台風第20号時の熊野川流砂観測箇所における水位-掃流砂量の左回りヒステリシスループ

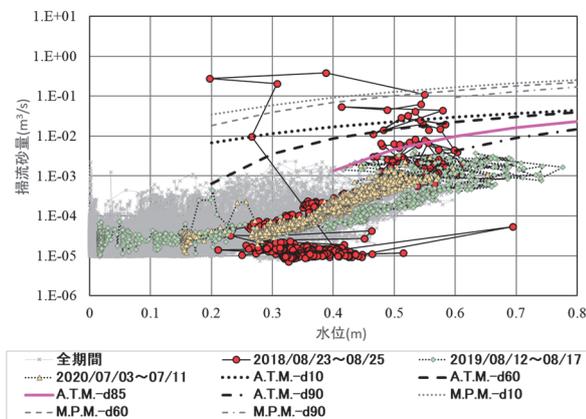


図-5 熊野川流砂観測箇所における掃流砂観測結果と推定曲線

位-掃流砂量の関係と異常な土砂移動を分離するために、平常時の水位-掃流砂量の関係を包絡し、かつ、左回りヒステリシスループとの閾値線になるような推定曲線を求めた。図-5に示した複数パターン of 推定曲線のうち、平均粒径d85を適用したA.T.M式が平常時の水位-掃流砂量の関係と異常な土砂移動による左回りヒステリシスループを分離するのに最適であることがわかった。M.P.M式による推定曲線は、イベント発生時の上限付近に位置し、その他の観測結果と離れていた。なお、この時の平均粒径d85はあらかじめ流砂量観測箇所近傍で行った粒度分布調査結果に基づき設定している。また、異常な土砂移動および明瞭な左回りヒステリシスループが確認できなかった熊野川以外の流砂観測箇所について、水位-掃流砂量の関係と推定曲線を図-6.1~6.3に示す。熊野川の観測箇所以外の三越川、川原樋川上流、川原樋川下流の3箇所の流砂観測箇所では、共通して平均

粒径d10のA.T.M式による推定曲線が、水位-掃流砂量の関係を包絡していた。異常な土砂移動が発生していない観測箇所においても、掃流砂量公式を用いた推定曲線を閾値線として活用し、異常な土砂移動と平常時の出水を分離できる可能性がある。

4. 考察

4.1 流砂水文観測データを用いた土砂移動検知の可能性

本研究は、桜井ら³⁾を先行研究として参照し、管内の流砂観測データにおける掃流砂量公式を用いた異常な土砂移動の検出を試みた。本研究においては、左回りヒステリシスループを確認したのは熊野川での土砂流、1事例だけであったが、掃流砂量公式による推定曲線を用いることで、平常時とは違う異常な土砂移動として、土砂流等を検知できることが示唆された。熊野川以外の流砂観測箇所では異常な土砂移動が観測されていないため、引き続き、流砂観測を継続し、他流域の流砂観測結果と掃流砂量公式を用いた推定曲線とを比較することで、閾値線の適用性と課題が確認できると考える。

4.2 流砂観測に基づくアラートシステム構築への課題

本研究で用いた音圧式データの掃流砂量はデータ容量が大きいことから、テレメータ化ができておらず、作業員が定期的に現地にてデータを回収して、内業で解析をしている。上流域で検知した異常な土砂移動をリアルタイムで解析し、下流域の警戒避難に活用するためには、音圧式データの軽量化や、流砂観測箇所現地でデータを解析する手段を検討する必要がある。また、異常な土砂移動の検知には掃流砂量公式を用いた閾値線の超過を判定する仕組みと合わせて、ヒステリシスループが左回りしたタイミングを判定する仕組みが必要となる。

5. おわりに

本研究では、異常な土砂移動時に水位-掃流砂量の関係において左回りヒステリシスループが生じることに着目し、掃流砂量公式を用いて、異常な土砂移動を判別する手法について検討した。今後は、流砂量観測結果を蓄積しつつ、土砂流出と

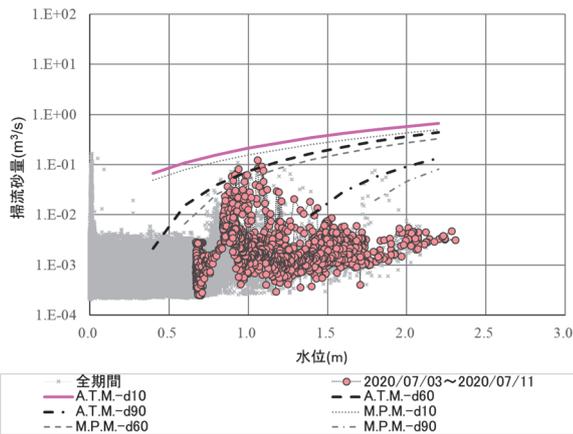


図-6.1 川原樋川上流流砂観測箇所における掃流砂観測結果と推定曲線

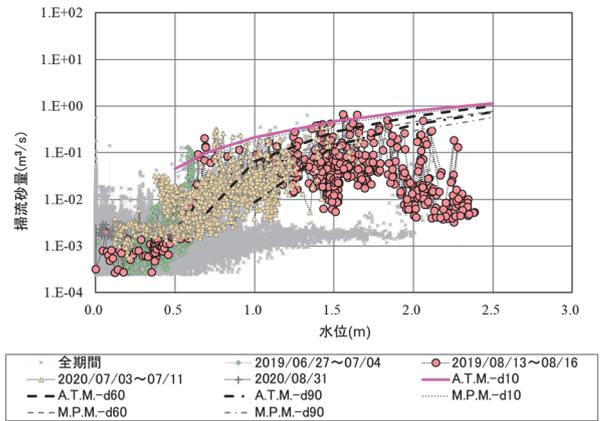


図-6.3 三越川流砂観測箇所における掃流砂観測結果と推定曲線

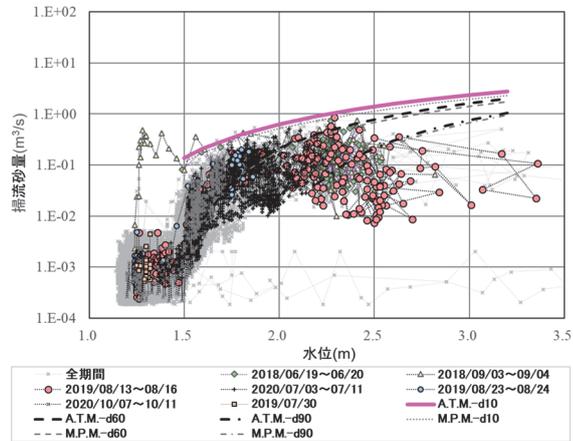


図-6.2 川原樋川下流流砂観測箇所における掃流砂観測結果と推定曲線

ヒステリシスの関係性、ヒステリシス発生の要因についても検討が必要である。管内の流砂量観測結果のみならず、全国の流砂観測データを用いた解析や閾値線設定の検討が有効だと考えられる。

参考文献

- 1) 井元成治、岡野和行、吉安征香、井之本信、小竹利明、山田拓、柴田俊、木下篤彦：熊野川流域における流砂水文観測データに基づく土砂移動状況の把握（その2）、2020年度砂防学会研究発表会概要集、pp.719~720、2020
- 2) Uchida, T., Sakurai, W., Iuchi, T., Izumiyama, H., Borgatti, L., Marcato, G. and Pasuto, A. : Effects of episodic sediment supply on bedload transport rate in mountain rivers. Detecting debris flow activity using continuous monitoring, Geomorphology, Vol. 306, 1, pp. 198-209, 2018
- 3) 桜井亘、内田太郎、泉山寛明、井内拓馬、杉山実、松田悟、伊藤隆郭：流砂水文観測から得られた異常な土砂生産時の掃流砂流出特性と観測結果の山地流域監視への適用について、砂防学会誌、Vol.72、No.2、pp.25~31、2019
- 4) 芦田和男、高橋保、水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究、砂防学会誌（新砂防）、Vol.30、No.4、pp.9~17、1978
- 5) Meyer-Peter and Müller : Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm, pp. 39-64, 1948

北本 楽



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、(併)紀伊山系砂防事務所 技官
KITAMOTO Gaku

小杉 恵



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、(併)紀伊山系砂防事務所 調査課長
KOSUGI Megumi

木下篤彦



研究当時 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（近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター）主任研究官、現 土木研究所土砂管理研究グループ火山・土流チーム主任研究員、博士（農学）
Dr. KINOSHITA Atsuhiko