

熊野川・日置川流域における流砂水文観測 データを用いた土砂移動検知手法の検討

SEDIMENT TRANSPORT DETECTION METHOD USING BED-LOAD SEDIMENT
TRANSPORT OBSERVATION IN THE KUMANO AND HIKI RIVER BASIN

北本 楽¹・小杉 恵¹・木下 篤彦²・岡野 和行³・井元 成治⁴・吉安 征香⁵
井之本 信⁵・滝澤 雅之³・武石 久佳³・鈴木 心⁵

Gaku KITAMOTO, Megumi KOSUGI, Atsuhiko KINOSHITA, Kazuyuki OKANO, Seiji IMOTO,
Yuka YOSHIYASU, Makoto INOMOTO, Masayuki TAKISAWA, Hisayoshi TAKEISHI and
Kokoro SUZUKI

¹国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 (〒637-0002 奈良県五條市三在町 1681)

²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 (〒649-5332 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市
野々 3027-6)

³(株) アジア航測株式会社 (〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 4-9-2)

⁴(株) アジア航測株式会社 (〒950-0087 新潟市中央区東大通 2-3-28)

⁵(株) アジア航測株式会社 (〒530-6029 大阪市北区天満橋 1-8-30)

Key Words: *bed-load, sediment transport, hydrophones, early warning, hysteresis loop*

1. はじめに

平成 23 年 (2011 年) 9 月の紀伊半島大水害による豪雨では、紀伊半島を中心として 3,000 箇所以上の崩壊および 17 箇所の深層崩壊に伴う河道閉塞 (天然ダム) が生じた。紀伊山系砂防事務所 (前; 紀伊山地砂防事務所) ではこれらの災害を契機として、直轄砂防事業により深層崩壊斜面および河道閉塞部からの残存土砂流出対策として砂防施設の整備を進めている。しかしながら、河道閉塞部には未だ土砂が多量に残存した状態であることから、ハード対策としての砂防施設整備のほかにソフト対策として、流域内の土砂動態の把握および流砂水文観測に基づく流域の土砂移動検知・監視を行うべく、河道閉塞部下流に水位計、濁度計、プレート型ハイドロフォンおよびインターバルカメラを設置して観測を実施している¹⁾。ハイドロフォン等の機器による流砂観測については、山間地の溪流においてハイドロフォンと濁度計を組み合わせることで粒径別に適した観測手法を提案した例²⁾や流域面積数百 km²の河川におけるパル

ス波解析を用いた掃流砂観測をした例³⁾など、これまでも山地溪流から下流域の河川に至るさまざまな箇所でも適用されている。また、田方ら⁴⁾は常願寺川本川の複数箇所においてハイドロフォンによる計測を実施して、出水規模や時期に応じた流砂流況にパターンがあることを明らかにしており、縦断連続的な土砂動態把握にも活用されている。こうした研究は、総合土砂管理の観点に立った流域の長期的な土砂動態把握⁵⁾を目的としてこれまでも数多く研究されている。一方、近年では、流砂観測による土石流等の短期的かつ突発的な土砂移動検知にも活用が期待されている。例えば、池田ら⁶⁾は、鬼怒川水系大谷川流域において上流域で発生した土石流が下流域に設置した音響式掃流砂計や濁度計によって検知できたことを報告している。また、Uchida *et al.*⁷⁾は、天竜川水系与田切川において上流域で発生した土石流の有無によって下流域で観測される掃流砂量の違いについて報告している。上流域での土石流等の土砂移動を検知して下流域に対して警戒避難情報を提供する流域監視の分野については、水位や流量と、濁度

あるいは掃流砂量とのヒステリシスの関係に着目した研究がある。例えば、今泉ら⁸⁾は、荒廃小流域においてサンプラーを用いた流砂採取を行い、流量と掃流砂および浮遊砂のヒステリシスループと粒径の関係について分析している。また、桜井ら⁹⁾は、ハイドロフォンを用いて観測した流量と掃流砂量の左回りヒステリシスループから土石流等の異常な土砂移動を検知する流域監視の手法を提案している。本稿では、熊野川水系および日置川水系の各支川で継続的に実施してきたハイドロフォン等による流砂水文観測データを用いて、桜井らが用いた左回りヒステリシスループに着目した異常な土砂移動の検出方法について検討した結果と今後の課題について報告する。

県を流れる二級河川日置川水系の熊野川を対象に流砂観測を実施している(図-1)。特に、川原樋川、栗平川、三越川、熊野川の4地点には上流域に紀伊半島大水害により生じた深層崩壊地があり、斜面および河道閉塞箇所の監視を目的として横断構造物天端上にハイドロフォン、水位計、濁度計等の流砂観測機器を設置している(写真-1)。本研究では、上記の観測地点の中で、比較的長期間にわたり、大きなデータ欠損がなく、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箇所観測が実施されている。対象とした4観測地点の流域面積、河床材料調査結果による粒径と、ハイドロフォンによる観測期間を表-1に示す。

2. 対象流域及び観測解析手法

(1) 流砂観測対象流域

紀伊山系砂防事務所では、奈良県、和歌山県、三重県の3県を流れる一級河川熊野川水系の川原樋川、栗平川(滝川支流)、神納川、三越川、高田川、及び和歌山

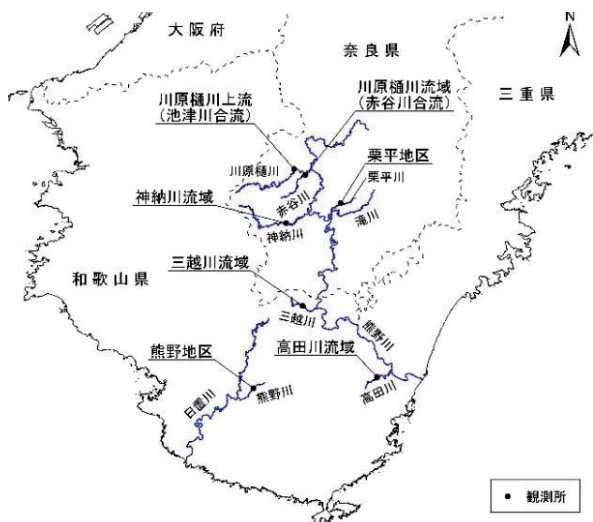


図-1 流砂観測箇所の位置図

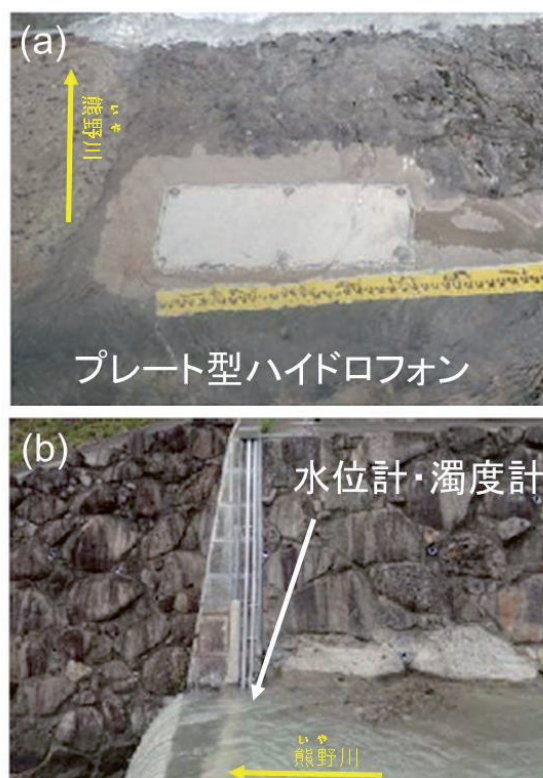


写真-1 日置川流域熊野川の流砂観測施設
(a)プレート型ハイドロフォン, (b)水位計・濁度計

表-1 流砂観測所の概要

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



写真-2 平成30年台風第20号時の熊野川におけるカメラ画像

(2) 流砂水文観測手法

a) 掃流砂量の算出

ハイドロフォンによる掃流砂量換算は、パルス数による算出方法と音圧波形の積分値による算出方法（音圧法）に大別されるが、本研究では、音圧法を用いることとした。なお、音圧法による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。

b) 水位と掃流砂量の関係分析

桜井ら⁹⁾は、土石流等の異常な土砂流出が生じた場合の出水中の掃流砂量の変動について、横軸に水位、縦軸に掃流砂量の関係を示すことで、土石流発生時において、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確認されることを報告した。通常の出水における掃流砂量は、流量に対して一意的に決定される関数関係を有していると考えられ、増水時（出水前半）と減水時（出水後半）で流量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。それに対し、異常な土砂移動の際には、土砂移動が流量のピークから遅れて到達するため、増水時に掃流砂量が増加した後、減水時に流量は低下するが掃流砂量は増加したままである。その結果、横軸水位、縦軸掃流砂量の平面上で、左回りのヒステリシスループを描く、という考え方に基づいている。

本研究では、先行研究同様、各流砂観測箇所を観測された水位と掃流砂量の関係図を作成し、異常な土砂移動および左回りヒステリシスループの有無を確認するとともに、既往研究で提案されている掃流砂量公式から推定される流砂量と、ヒステリシスが通過する範囲との関係を解析した。

c) 左回りヒステリシスループの検出手法の検討

流砂観測中に左回りヒステリシスループが確認された際に、下流域に対する警戒避難情報等の早期提供が可能となる技術を開発するために、流砂観測データによる左回りヒステリシスループの検知手法を検討した。

一般に、平衡流砂量式は、各流量に対して河床の平

衡状態が達成される場合に観測される流砂量を算出する式であり、自然河川においては、平常時の流砂量の上限に近いと考えられる。芦田らによる式¹⁰⁾（以下、「A.T.M式」とする。）やMeyer-Peter and Müllerの式¹¹⁾（以下、「M.P.M式」とする。）において平均粒径を任意に変化させ、水位と掃流砂量の関係を示す線を複数作成できる。これらの線から、各観測箇所を観測された平常時の水位と掃流砂量から推定されるヒステリシスの上限を包絡する線を決定すれば、平常時のヒステリシスと異常な土砂移動時のヒステリシスを分離することができる。そこで、本研究では、掃流砂量公式による水位と掃流砂量の関係線が平常時のヒステリシス上限を包絡する線を閾値線とすることで、平常時と異常時の分離および、異常な土砂移動の検出を試みた。さらに、その閾値線を作成する際の平均粒径が、観測箇所周辺の粒度分布の何%程度の粒径に相当するかを確認した。

3. 結果

(1) 左回りヒステリシスループの確認事例

2018年（平成30年）8月の台風第20号による総降雨量600mmを超す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、パイプ型ハイドロフォンが被災を受けるような土砂流（写真-2）が生じた（後にプレート型ハイドロフォンに交換）。この出水時の雨量、水位、濁度、掃流砂量を図-2に示す。また、この出水イベント中に水位と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-3）。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、熊野川でのこの台風第20号による出水イベント中のみであった。

(2) 左回りヒステリシスループの検出閾値線の設定

台風第20号時の熊野川流砂観測箇所における左回り

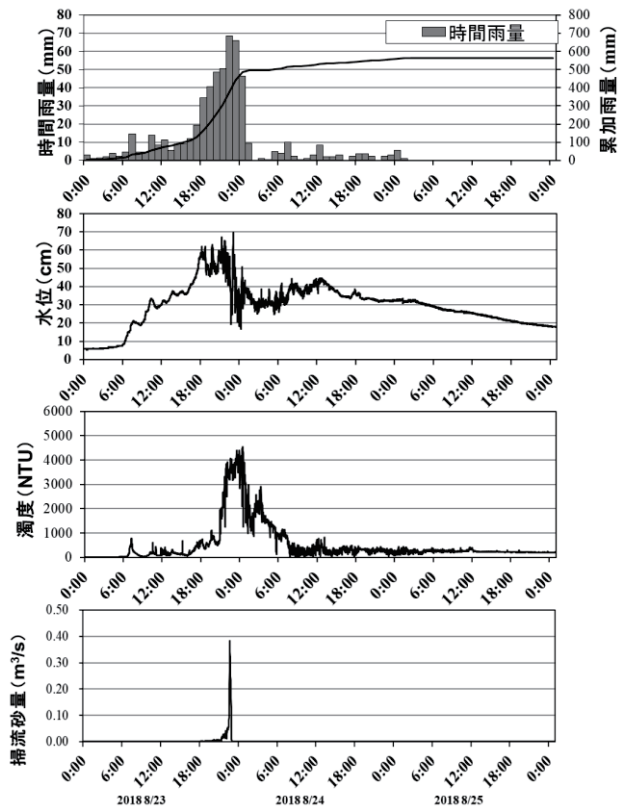


図-2 平成30年台風第20号時に観測された熊野川流砂観測箇所
の雨量，河川水位，濁度，掃流砂量

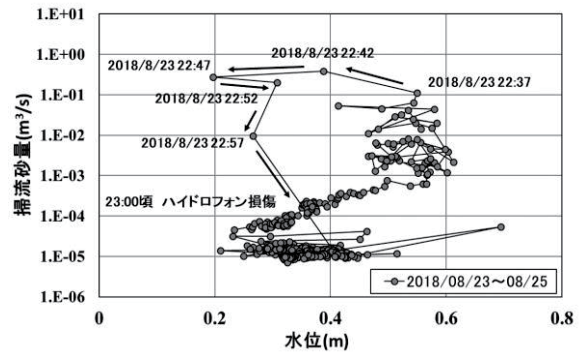


図-3 平成30年台風第20号時の熊野川流砂観測箇所における水位と掃流砂量の左回りヒステリシスループ

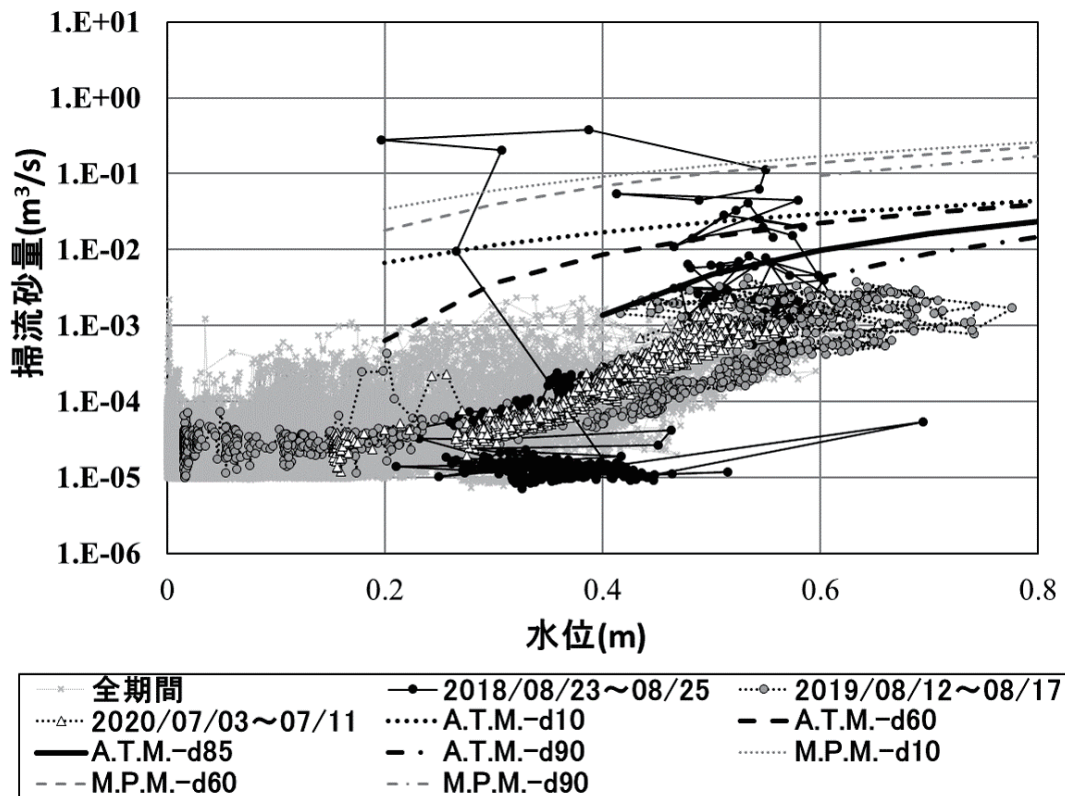


図-4 熊野川流砂観測箇所における掃流砂観測結果と掃流砂量公式による閾値線

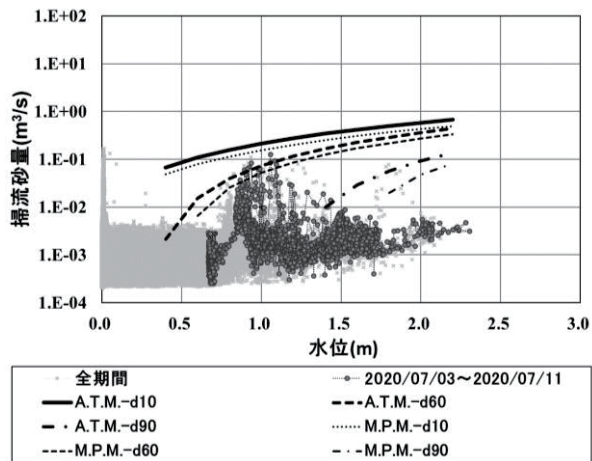


図-5.1 川原樋川上流流砂観測箇所における
掃流砂観測結果と掃流砂量公式による閾値線

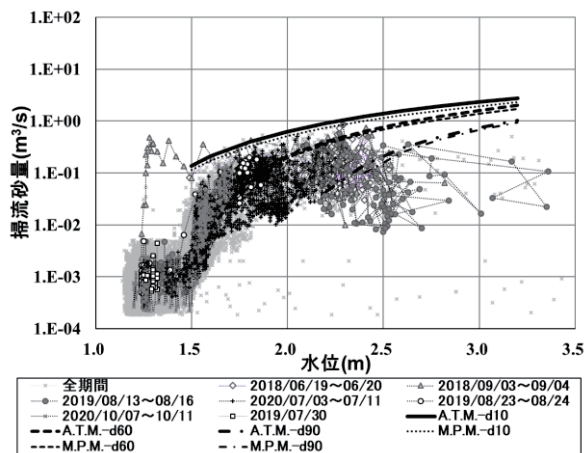


図-5.2 川原樋川下流流砂観測箇所における
掃流砂観測結果と掃流砂量公式による閾値線

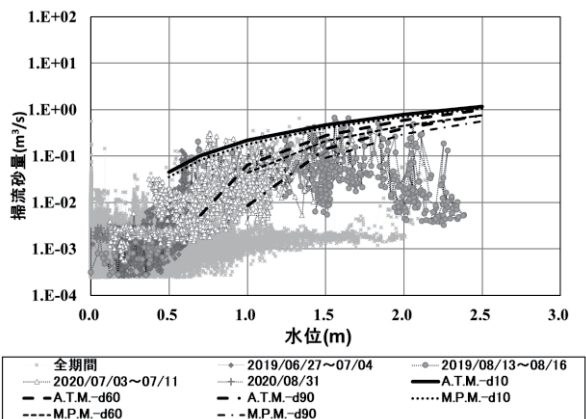


図-5.3 三越川流砂観測箇所における
掃流砂観測結果と掃流砂量公式による閾値線

ヒステリシスループを検出するために、観測されたヒステリシスループと、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閾値線を図-4に示す。なお、図には、観測所周辺の粒度分布からおおよその粒径を示す際によく用いられる10%、60%、90%の粒径に加え、85%粒径を用いた線をそれぞれd10、d60、d85、d90として示し、各粒径の限界掃流力となる水位以下の領域は対象外として作図した。熊野川で観測された左回りヒステリシスループとそれ以外の平常時出水における水位と掃流砂量のヒステリシスを切り分けるために掃流砂量公式や平均粒径を変化させて、平常時のヒステリシスと比較した結果、その上限値を包絡しつつ、平常時のヒステリシスと、2018年8月の土砂流による左回りヒステリシスループを分離ための境界となる閾値線は、平均粒径d85を適用したA.T.M式が最適であることがわかった。一方でM.P.M式による閾値線は、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、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、ヒステリシスループと閾値線の関係を図-5.1~3に示す。最適な掃流砂量公式や粒径には多少のばらつきがあるが、限界掃流力となる水位以上を対象とすると、掃流砂量公式を用いた閾値線は、各観測箇所の平常時のヒステリシスを概ね包絡していることから、掃流砂量公式を用いた閾値線で異常時の土砂流出を分離できる可能性が示唆された。特に、熊野地区以外の三越川、川原樋川上流（池津川合流）、川原樋川下流（赤谷川合流）の3箇所の流砂観測箇所では、共通して、A.T.M式による平均粒径d10の掃流砂量が平常時のヒステリシスを概ね包絡していた。左回りヒステリシスループが確認できなかった箇所においても掃流砂量公式を用いた異常時の土砂移動の抽出が期待できる結果となった。

4. 考察

(1) 流砂水文観測データを用いた土砂移動検知の可能性

本研究では、鬼怒川水系大谷川における土石流発生時の左回りヒステリシスループ解析事例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流出時のヒステリシス検出を試みた。これまでの流砂観測データを解析した結果、平常時の多くの出水では、ヒステリシスが掃流砂量公式

を上限とする範囲内を通過することが確認された。また、1事例だけであったが、平常時のヒステリシスを包絡する閾値線を超過し、左回りヒステリシスループが確認されたことから、管内の流砂観測箇所においても、異常な土砂移動を検知できる可能性が示唆された。熊野川での出水では85%粒径で、A.T.M.式で土砂移動を検知できるという結果になったが、どの大きさの粒径でどの掃流砂量公式を使うと良いかは流域によって異なると考えられる。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、流砂観測を継続するとともに、他流域の流砂観測データと観測箇所近傍の粒径をA.T.M.式にあてはめた閾値線とを比較することで、適用性と課題が確認できると考える。

(2) 流砂観測に基づく土砂移動検知技術の課題

本研究で用いた音圧式データによる掃流砂量はデータ容量が大きいことから、現行ではネットワークを用いたテレメータ化ができておらず、作業員が定期的に現地に設置したロガーからデータを回収して持ち帰ってパソコンで解析をしている。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、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、異常な土砂移動による左回りヒステリシスループの検知には、今回報告した掃流砂量公式を用いた閾値線を超過したことを判定する仕組みと合わせて、ヒステリシスループが実際に左回りをしているかどうかを判定する仕組みが必要となる。

5. おわりに

全国の直轄砂防事務所にて流砂観測を開始してから古いところでは数十年が経過し、流域の土砂動態把握や総合土砂管理の検討のための観測の他に、警戒避難としての流砂量観測について活用が期待される。本研究では、水位と掃流砂量のヒステリシスに注目して、異常な土砂移動の検知技術の実用化に向けて、観測データを用いた閾値の設定について検討した。流砂観測データに基づく警戒避難情報等の情報提供の実用化に向けては、流砂観測データを蓄積し、土砂流出とヒステリシスの関係、ヒステリシス発生の要因の検討が必要である。そのためには、紀伊山系のみならず、全国の流砂観測データを用いたヒステリシス解析や基準線設定の検

討が有効であると考えられる。

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) 堤大三, 水山高久, 野中理伸, 藤田正治, 志田正雄: 山地流域における土砂動態の定量的モニタリング手法の開発, 京都大学防災研究年報, 第51号B, pp.661-668, 2008.
- 3) 中谷洋明, 鶴田謙次, 吉村暢也: 手取川上流域でのハイドロフォンを用いた流砂量観測及び解析, 砂防学会誌, Vol.60, No.3, pp.20-25, 2017.
- 4) 田方智, 長山孝彦, 後藤健, 伊藤隆郭, 水山高久, 三上幸三, 越野正史, 奥井淳: 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の集中観測, 平成25年度砂防学会研究発表会概要集 As, pp.224-225, 2013.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 山地河道における流砂水文観測の手引き(案), 国土交通省国土技術政策総合研究所資料, No.686, 2012.
- 6) 池田幸太郎, 長井斎, 松原智生, 田島規雄, 光永健男, 佐藤勇, 斎藤一裕: 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年砂防学会研究発表会概要集 B, pp.276-277, 2013.
- 7) 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.
- 8) 今泉文寿, 山本享, 土屋智, 逢坂興宏: 荒廃小流域における掃流砂・浮遊砂の流出実態—直接採取法による実態把握と流出機構の考察—, 砂防学会誌, Vol.57, No.6, pp.13-20, 2005.
- 9) 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.
- 10) 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
- 11) Meyer-Peter, E. and Müller, R.: Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm, pp. 39-64, 1948.

(2022. 5. 30 受付)