

布目ダム上流におけるハイドロフォン観測 による流砂の洪水履歴の検討

STUDY ON HYSTERESIS EFFECTS OF FLOODS ON BEDLOAD TRANSPORT WITH A PIPE HYDROPHONE IN UPSTREAM OF NUNOME-DAM

富阪和秀¹・山崎友也²・米田格³・小林草平⁴・竹門康弘⁵・角哲也⁶・堤大三⁷
Kazuhide TOMISAKA, Tomoya YAMAZAKI, Itaru YONEDA, Sohei KOBAYASHI, Yasuhiro
TAKEMON, Tetsuya SUMI, Daizo TSUTSUMI

¹非会員 京大防災研究所 技術室 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

²非会員 京大防災研究所 技術室 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

³非会員 京大防災研究所 技術室 (〒569 大阪府高槻市奈佐原944)

⁴非会員 農博 京大防災研究所 水資源環境研究センター (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 農博 京大防災研究所 水資源環境研究センター准教授 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

⁶正会員 工博 京大防災研究所 水資源環境研究センター教授 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

⁷正会員 工博 京大防災研究所 流域災害研究センター准教授 (〒506 岐阜県高山市奥飛騨温泉郷中尾)

We installed a pipe hydrophone and monitored bedload transport for 3 years at an upstream site of the Nunome Dam in Nara Prefecture. A few dozen times of flood events were observed each year including large-scale floods, such as the typhoon No.18 last year. The hysteresis curve between discharge and bedload was examined by comparing bedload transport between rising and receding phases in each flood event. The curve of each event changed according to the previous occurrence of large flood. Bedload at given discharge was almost equal between rising and receding phases for small floods, while that of receding phases increased for a large flood, and that of rising phases increased for a few subsequent smaller floods. Bedload is likely to increase temporally after a sediment supply from banks and tributaries occurring during large floods.

Key Words : *pipe hydrophone, bedload, flood events, rising and receding phases, hysteresis curve, sediment supply*

1. はじめに

ダム貯水池へ流入する土砂は、山地の土砂生産源から溪流砂防域、河川域を得て運ばれる。ダムへ流入する土砂による堆砂量は、年に一度、貯水池内の深淺測量に基づいて調べられ、溪流砂防域においては土砂災害の防止・軽減を目的とした流砂量の把握のための観測が行われている。一方で、山地からダムへと繋がる土砂移動の過程において、河川が合流する中下流域では流砂量式を用いた土砂移動量の推定を行っているが、定量的な観測を実施したり、短期的な出水規模に伴う流砂動態を把握している例は少ない。

土砂生産源に近い砂防河川では、流砂量の間接的な観測手法として、ハイドロフォンを用いた観測が近年増え

つつある¹⁾²⁾。ハイドロフォンとは直径約5cmの金属管内にマイクロフォンを内蔵し、河床に固定して流砂が金属管に衝突する音を拾い、衝突した回数をパルス数としてカウントすることで流砂量の相対的な大小を知ることができる計測装置である。

著者らは奈良県の木津川上流の布目ダムの流入河川地点において貯水池への土砂流入量を把握するため、ハイドロフォンによる連続観測を2011年4月から実施している³⁾。その間に土砂投入実験を数回実施し、ハイドロフォンが検知する流砂の径が主に2mm以上であることを明らかにし、土砂量の検量線を策定した。この検量線から算出した、ダム貯水池への土砂流入量の推定値がダムの年間堆砂量と概ね一致することを示した。また、出水による流砂量は流量と深い関係にあることを示した³⁾。

本研究では観測開始から約3年間に発生した出水のイ

ベントごとに発生する流砂量に着目し、流砂量と流量の関係、年間を通して見た時の流砂量の変動、大きな出水前後の変化特性などを把握することを目的として、布目川における流砂動態の特徴を考察した。

2. 調査方法

(1) ハイドロフォンの設置と観測

布目ダムには水質改善用の副ダムが設置されており、この約1km上流に位置する峰寺水位観測所地点（以後、峰寺）を観測対象とした（図-1）。峰寺の標高は約300m、流域面積は50.92km²、河床勾配は約1/100で、川底は比較的平坦で川幅が18.3m、両岸は護岸でほぼ垂直である。

代表的な流砂量を計測できる流路のほぼ中央に、ハイドロフォンのセンサー管（ステンレス製、径48mm、長さ2.25m）を、流路に対し横向きに、管径の半分を露出させた状態で河床に固定した。ハイドロフォンは、ウレタン材で裏打ちした管内に水中マイクロフォンを取り付けたセンサー部、衝突音の電気信号を増幅するアンプ部、バンドパスフィルタで特定周波を抽出しパルスや電圧値を収録するロガー部によって構成される。粒子の衝突により発生した電圧（音圧：mV）と、電圧の大きさが閾値を越えた回数（パルス数）が記録される。後者は6種の倍率（2, 4, 16, 64, 256, 1024倍）に増幅され、それぞれでパルス数が記録される。

(2) 流砂量の計算

本研究では、現地での土砂投入実験の結果³⁾から、回帰決定係数の最も高かった増幅率16倍パルスで直線回帰（切片0）したものを検量線として用い、川幅に換算した流砂量（体積）を算出する（図-2）。すなわち峰寺での単位時間あたりの流砂量を S_B (m³/s)とすると、次式(1)より求められる。

$$S_B = \alpha \times p_{16} \times 10^{-6} \times \beta \div L \times W \quad (1)$$

ここで α は回帰係数（45.84）、 p_{16} は計測値（16倍のパルス数を単位時間あたりに換算）、 β は土砂に含まれる2mm以上の粒子の割合（0.7）、 L はハイドロフォン長（2.25m）、 W は現地の川幅（18.3m）である。

(3) 出水イベントの定義

観測記録から16倍パルスに反応が見られるのは、流量が約2m³/s以上の時であった。本研究では、一定量以上の土砂量を議論するためにピーク時の流量が5m³/s以上を記録したものを出水イベントと定義し、イベントの範囲を16倍パルスの反応開始時から終了時までとした。

また、布目川における流砂動態の特徴を検討するため、出水イベントにおいて流量がピークに達するまでを増水期、ピーク後を減水期として議論する（図-3）。

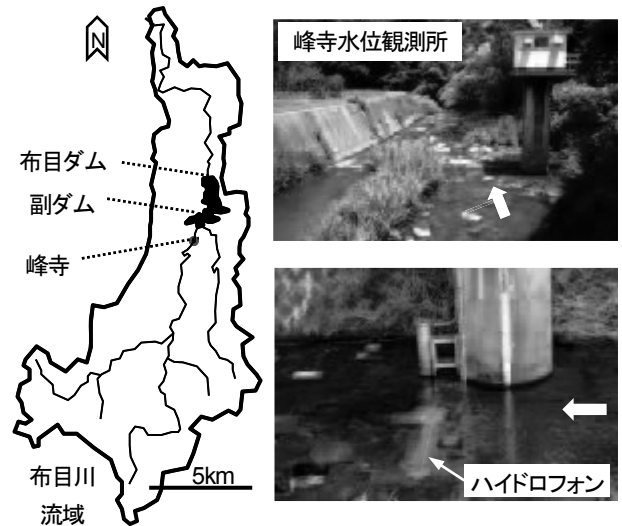


図-1 観測地点の位置と写真

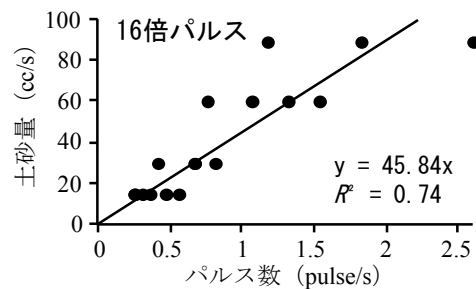


図-2 16倍パルスと土砂量の検量線

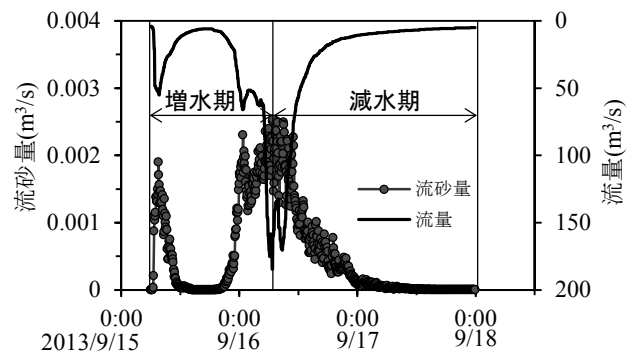


図-3 出水イベントの例（2013年9月15日－17日）

(4) 無次元掃流力と無次元掃流砂量の計算

布目川における流砂量の大きさを検討するため、ハイドロフォンにより観測した流砂量を流砂量式と比較した。峰寺における無次元掃流力(τ_*)を以下の式により求めた。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd} = \frac{Ri_e}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)d} \quad (2)$$

ここで、 u_* は摩擦速度 (m/s)、 σ は砂礫の比重（2.65）、 ρ は水の比重（1）、 g は重力加速度（9.8m/s²）、 d は代表粒径（m）、 R は径深（m）、 i_e はエネルギー勾配（m/m）である。峰寺の50%粒径（0.0985m）、各時観測水位（m）、過去出水時観測の水面勾配（0.01）を後者3つのパラメータに用いた。また、無次元掃流砂量 (q_{b*}) は以下の式により求めた。

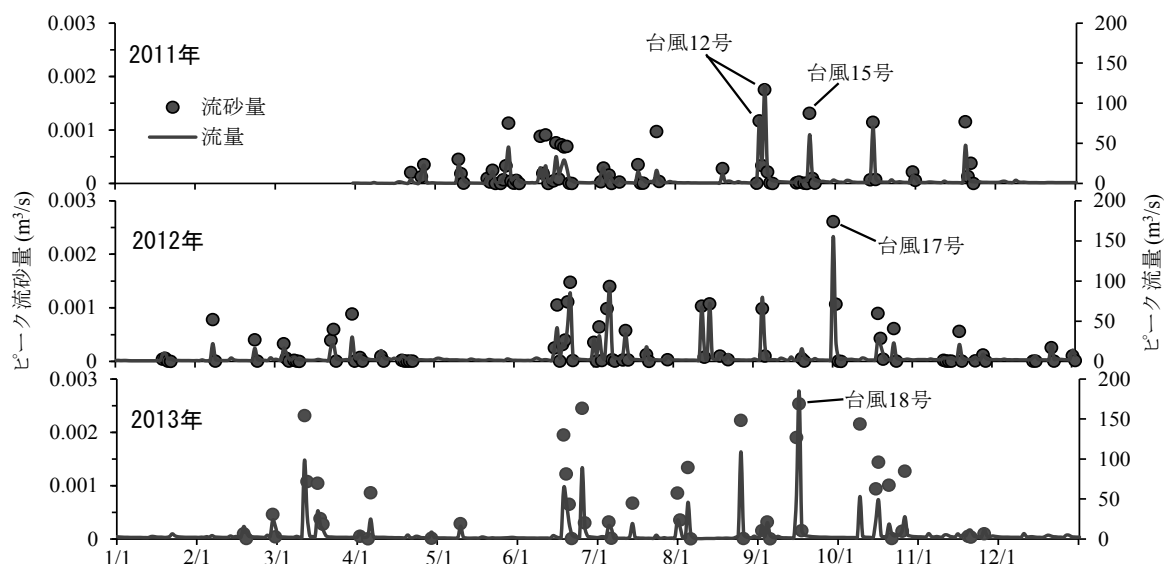


図-4 2011年～2013年におけるピーク流砂量とピーク流量の日変化

$$q_{b*} = \frac{q_b}{\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd}} \quad (3)$$

ここで q_b は流砂量 (m^3/s) で、ハイドロフォンにより求めた流砂量 (式(1)) を単位幅に換算したものをを用いた。また、比較のために芦田・道上の式⁴⁾を用いて掃流力から求められる掃流砂量を算出した。

3. 結果と考察

(1) 出水イベントの抽出

2011年4月から2013年12月の期間に発生した出水イベントは合計84回であった。この期間のピーク流砂量とピーク流量の日変化を図-4に示す。この期間には2011年台風12,15号, 2012年台風17号, 2013年台風18号などの大規模出水も記録されている。なお、図-3は観測期間中最大の流量である $185\text{m}^3/\text{s}$ を記録した2013年台風18号をイベント単体で切り出したものである。

(2) 流量に対する流砂量の分布

流量と流砂量の関係を、各流量時における流砂量の(中央値, +5%値, 95%値)とともに示す(図-5, 上: 全3年分, 下: 各年別)。どの年においても、流砂量は流量の増加とともに直線性を持って増加するが、流砂量が $1 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ を超えたあたりから傾きに変化し、緩やかになっている。年別では、流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下のとき2011年の流砂量が多く、 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以上では2013年が多かった。2012年は全体を通して流砂量が少ない傾向が見られた。

(3) 無次元掃流砂量の理論式との比較

布目川における無次元掃流砂量は、芦田・道上式から得られる無次元掃流砂量を大きく下回り、3オーダー以上の開きがあった。観測期間中では2013年が高い値を示し

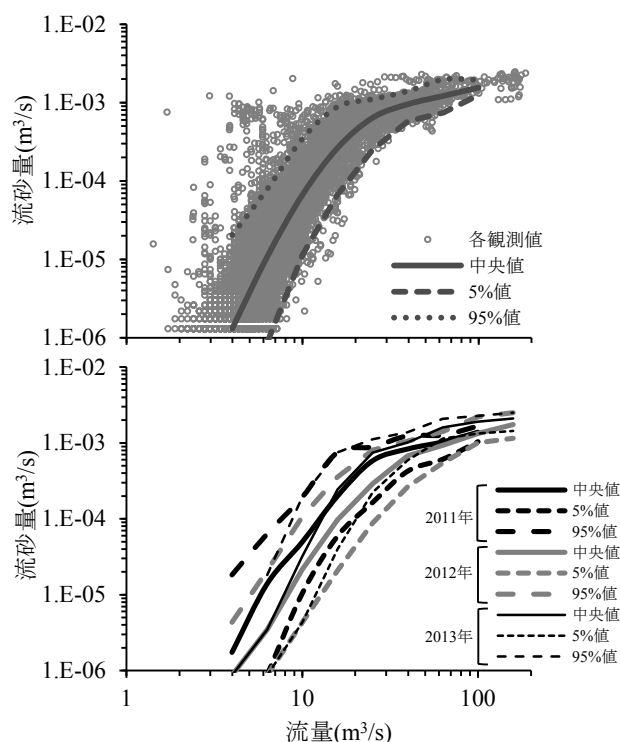


図-5 流量に対する流砂量の分布, 全3年分(上), 年別(下)

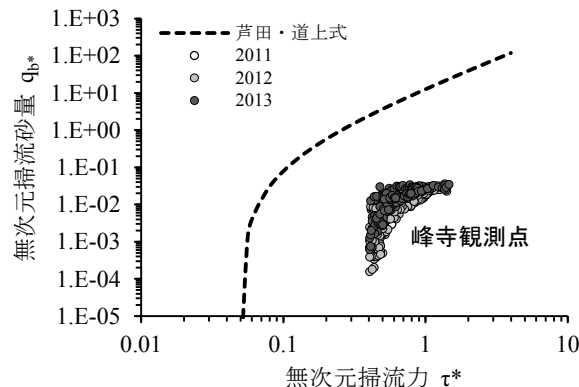


図-6 無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係

ており、台風18号による出水の影響が考えられる。国土技術政策総合研究所では、ハイドロフォンを用いた観測

を全国の山地砂防域を中心に行っている⁵⁾。それによると、地域によって無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係は大きく異なり、その中には流砂量式から4.5オーダー以上も下回るケースもみられる。布目川の結果は、掃流力に対して流砂量が少ないことを示している。布目川流域は河川に土砂を供給する裸地斜面が少なく⁶⁾、また観測点付近では岩盤の河床も目立つ。このことから、土砂の斜面からの供給量も河川内の蓄積量も少ないことが伺える。

(4) 流量と流砂量の関係の季節変化

出水イベントごとに流砂量の総量（全流砂量）を算出し、一年を4つの期間に区分してイベントごとの流量の総量（全流量）またはピーク流量との関係を調べた（図-7）。その結果、どの年も全流砂量は全流量に比例しており（図-7上）、2011年は4-6月に全流量に対する全流砂量が高い傾向にあったが、3年を通して一貫した季節による違いはなかった。一方、2012年は全体的に流砂量が少なく、2013年は多いなど、年による違いがあった。

また、各出水の全流砂量はピーク流量とより強い関係が見られた（図-7下）。特に2012年と2013年では、台風が集中する7-9月はピーク流量に対する全流砂量が他の季節よりも低く、また10-12月はそれが高い傾向にあった。これは台風による出水で河道内に土砂が供給され、しばらくの間は土砂が多い状態が続いたためと考えられる。

なお、布目ダムの過去の観測データから、2013年台風18号のピーク流量は過去10年間で最大であったと推察される。ピーク流量が150m³/sを超える出水は、2012年台風17号の前は、2009年と2004年のみであった。

(5) 流砂量の履歴効果の検証

各出水イベントにおける増水期と減水期の流砂量の大小関係を、出水規模（ピーク流量）との関係から考察する。

図-8は各年の台風による出水イベントと、その後2回の出水イベントを示したものである。各年とも最初の台風による出水では、ピーク流量が100m³/sを超えており、流量の増減とともに流砂量も増減するが、同じ流量でも増水期より減水期の流砂量が多くなっている。

一般に、濁度計で計測されるウォッシュロードや浮遊砂の場合は、増水期に土砂濃度が高く、減水期に低くなる時計回りのヒステリシスループが見られる⁷⁾。これに対して掃流砂では大規模出水のときには反時計回りのループであることをハイドロフォンの結果は示している。しかし、その後の2回の出水では、各年ともピーク時の流量の大きさに関わらず増水期に流砂量が多い時計回り、もしくは流砂量が減水期と等しいループとなっている。

増水期と減水期、また異なる出水イベント間で流砂量を比較するため、各出水において任意の4流量区分（1：<10m³/s、2：10-20m³/s、3：20-40m³/s、4：>40m³/s）に観測データを分け、それぞれの区分における流砂量の90%値を代表値として算出した。前者3区分での値は、流量が10m³/s、20m³/s、40m³/sを通過する間際の流砂量に相当する。出水を時系列順に並べると、年や季節というよりは特定の出水において増水期と減水期の関係が変わっていることが分かった（図-9）。ピーク流量の大きい出水では複数の流量区分で増水期よりも減水期の流砂量が多い傾向にあった。特にピーク流量が50m³/s以上の出水で、それ以前に長らく同規模の出水がない場合にその傾向が強かった。一方で、そうした出水の後のピーク流量が小さい出水では、逆に増水期に流砂量が多い傾向にあった。

この傾向をより明確にするため、それぞれの流量区分における増水期と減水期の流砂量の差を各出水のピーク流量に対してプロットしたのが図-10である。各出水について流量区分ごとに、流砂量が増水期に多い場合は正、減水期に多い場合は負を示す。全体的にピーク流量が小さい（40m³/s以下）出水では、正や0付近の値が多いのに

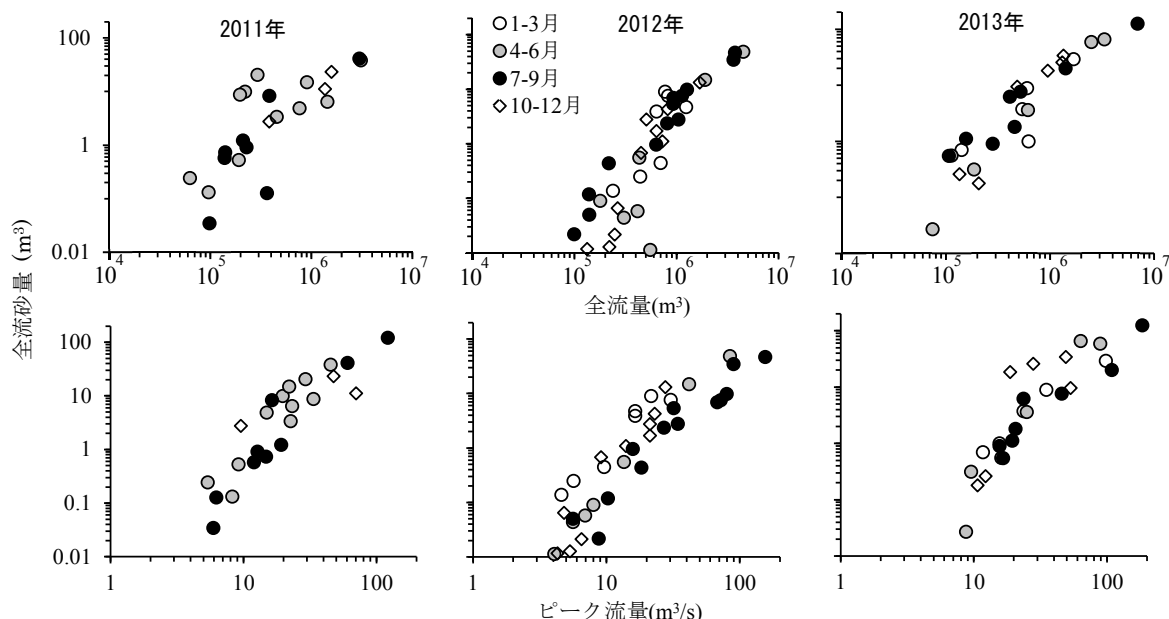


図-7 出水イベントごとの全流量（総量）（上）・ピーク流量（下）と全流砂量（総量）の関係

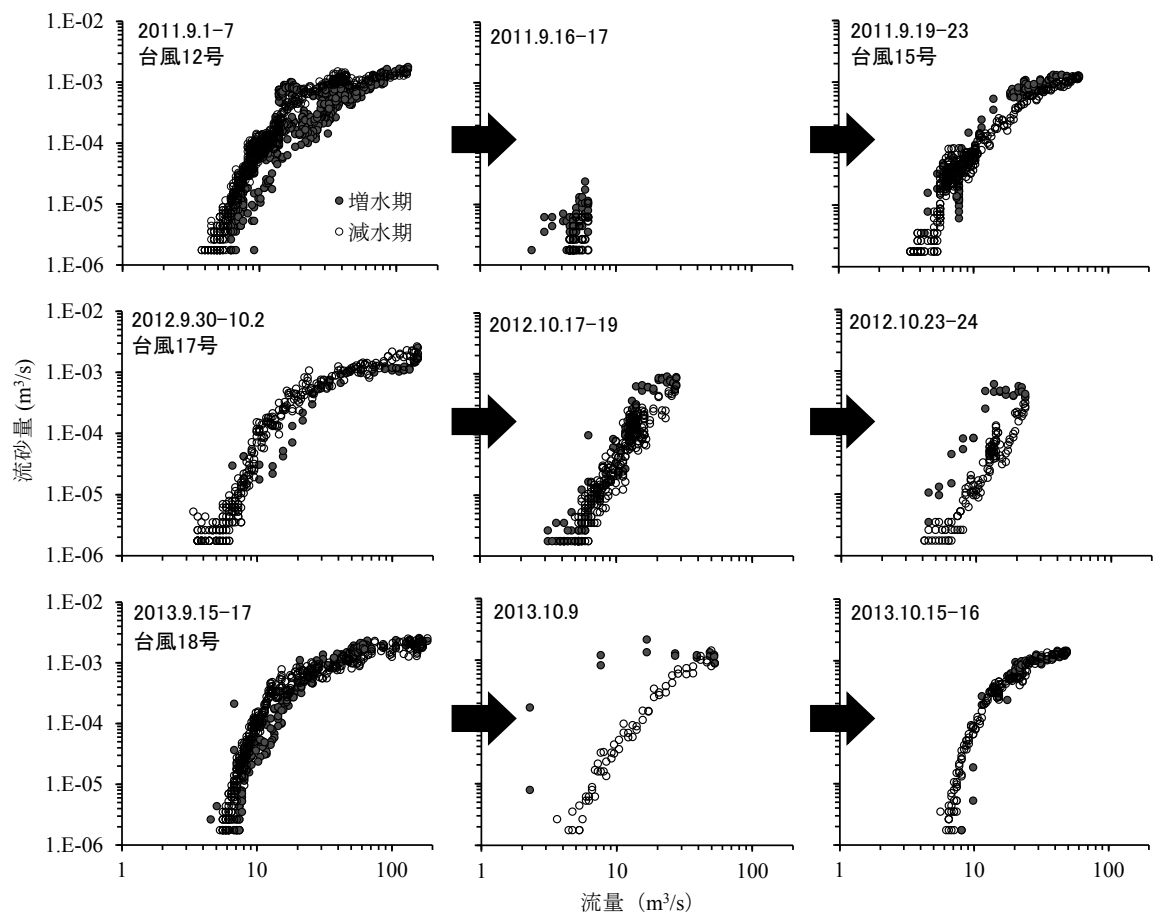


図-8 出水イベントごとの流砂量の履歴効果（ヒステリシスループ）

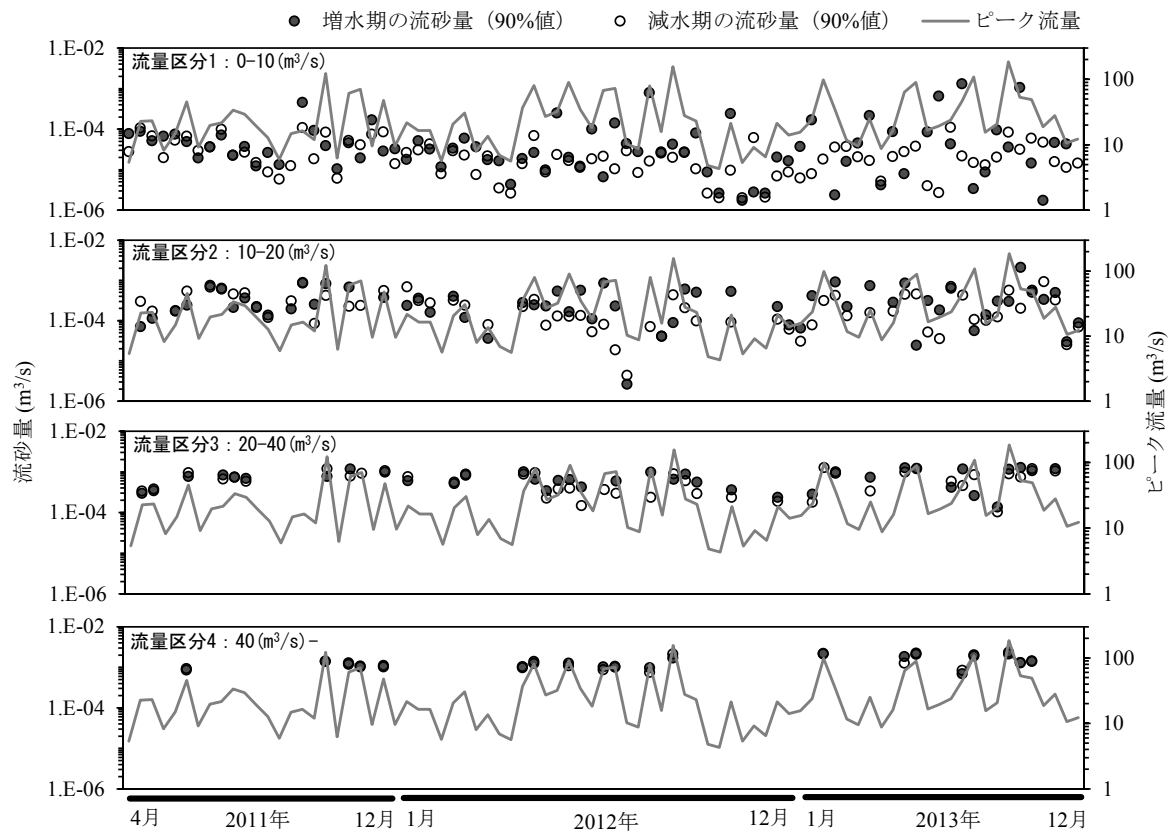


図-9 各出水における流量区分別の増水期と減水期の流砂量（全データの90%値）

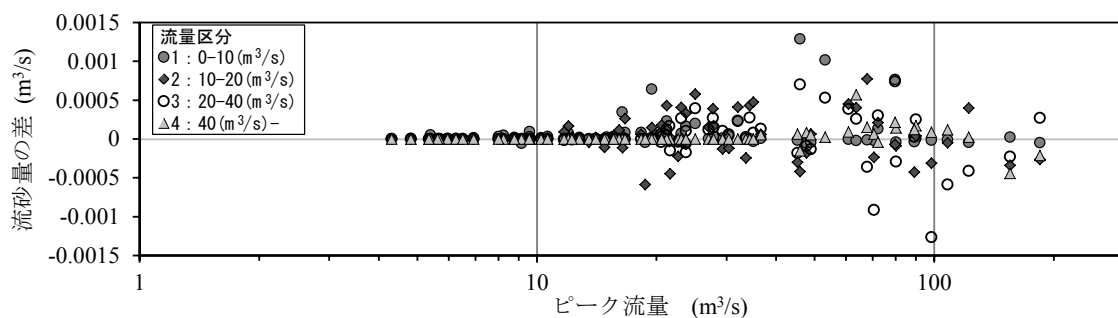


図-10 各出水のピーク流量と流砂量差（増水期－減水期）の関係

対して、ピーク流量が大きい（ $50\text{m}^3/\text{s}$ 以上）出水では負の値が多く、出水のピーク流量と流砂量の差は負の関係にあるのが分かる。特に流量区分2や3でその関係が明瞭であった。

これには図-11のような変化が考えられる。小規模の出水が続くと河道内の土砂が少なく、増水期と減水期の流砂量に差は生じない（①）。しかし、大規模な出水（ピーク流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ 以上、②）では、増水期はまだ土砂が少ないが、ピーク流量時に斜面、支流や高いテラス上の蓄積から土砂が供給され、減水期に河道内の土砂が増大した状態となる。その後の小規模の出水では（③）、増水期は土砂の多い状態から始まるが、新たな土砂の供給がないため土砂が動ききる減水期に流砂は少なくなる。これが続くといずれ①の状態に変わる。

4. まとめ

本研究では、木津川布目ダム上流で3年に渡りハイドロフォンによる流砂観測を行い、その間に発生した出水イベント記録を分析することにより、流砂量に及ぼす洪水履歴の要因について議論した。ピーク流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ 以上の出水によっては増水期よりも減水期に流砂量が高まる反時計回りのヒステリシスループを描き、その後の数回の小さな出水では、逆に増水期に流砂量が高まることを示した。このような流砂の洪水履歴は、上流域からの土砂供給が主に大きな洪水時に依存して間欠的に生じる布目川の特徴であることが考えられる。年による違いもみられることから、流砂量は前後の出水だけではなく、数年かそれ以上に一度の大規模出水にも関係している可能性がある。今後流砂の供給源を特定していくことで、流量と流砂量の関係の解明を進める必要がある。

謝辞：本研究は国土交通省と、京都大学防災研究所の共同研究プロジェクト「河川環境のための河床地形管理手法に関する技術開発」のもと行われた。河道情報や水位・流量データをご提供いただいた水資源機構木津川ダム総合管理所、観測にご協力・助言いただいたハイドロテック（株）野中理伸様にお礼申し上げます。

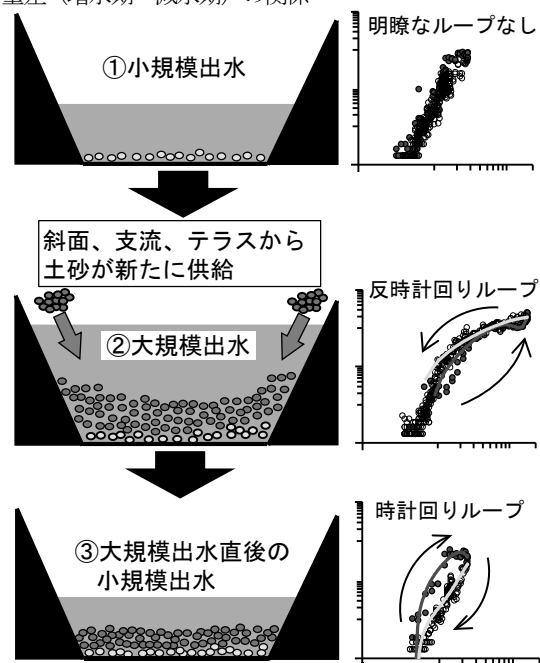


図-11 流砂の履歴効果の模式図

参考文献

- 1) 水山高久, 松岡美和, 野中理伸: 流砂量の多い状態のハイドロフォンによる流砂計測（音圧データの取得）, 砂防学会誌, Vol.61, pp.35-38, 2008.
- 2) 鈴木拓郎, 水野秀明, 小山内信智, 平澤良輔, 長谷川祐治: 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, pp. 18-26, 2010.
- 3) 小林草平, 竹門康弘, 角哲也, 富阪和秀, 山崎友也, 米田格, 堤大三: ハイドロフォンによるダム流入土砂量把握の高度化に関する研究, 河川技術論文集, Vol.19, pp.147-152, 2013.
- 4) 土木学会水理委員会水理公式集改訂小委員会: 水理公式集平成11年版, 土木学会, 1999.
- 5) 岡本敦, 内田太郎, 鈴木拓郎, 中川和男, 田方智, 松岡暁: 山地流域における流砂観測データの収集及び解析, 砂防学会研究発表会概要集, pp.176-177, 2012.
- 6) 堤大三, 藤田正治, 竹門康弘, 角哲也, 泉山寛: 木津川流域の土砂生産ポテンシャルの推定, 砂防学会誌, Vol. 66, pp. 13-22, 2014.
- 7) 角哲也, 岡野真久（監修）, Reservoir Sedimentation 研究会（監訳）: 貯水池土砂管理ハンドブックー流域対策・流砂技術・下流河川環境一, 技報堂出版, 2010

(2014. 4. 3受付)