

ダムの排砂バイパストンネル運用のための パイプ型およびプレート型インパクトセンサー を用いた流入土砂動態把握手法の高度化

UPGRADING OF INFLOW SEDIMENT MONITORING USING PIPE AND PLATE
TYPES IMPACT SENSOR FOR SEDIMENT BYPASS TUNNEL OPERATION

三浦 爽¹・富田邦裕²・叶 正興³・小柴孝太⁴・角 哲也⁴

Sawa MIURA, Kunihito TOMITA, Zhengxing YE, Takahiro KOSHIBA and Tetsuya SUMI

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 工修, 経修 株式会社建設環境研究所 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-23-2)

³正会員 博 (工) 株式会社建設環境研究所 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-23-2)

⁴正会員 博 (工) 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Sedimentation is the most crucial issues for reservoir sustainability. Countermeasures for reservoir sedimentation are classified such as dredging, excavation and sluicing. Sediment bypass tunnel (hereafter SBT) is one of those countermeasures which is to bypass inflow sediment to the downstream directly. It is currently operating at the Asahi, Miwa and Matsukawa dams in Japan. It has been also operating at the Koshibu Dam since 2016. Issues for the operation of SBT are how to optimize the operation such as opening and closing of the inlet gate of SBT under considering both the recovery of the reservoir storage and minimizing the sediment inflowing to the dam reservoir. In order that, it is essential to know the timing of sediment transport in the upstream of the dam. This study shows the dynamics of inflow sediment measured by pipe type and plate type hydrophones and turbidity meter at the upstream of the Koshibu Dam.

Key Words : plate type hydrophone, sound pressure, bedload measurement, sediment bypass tunnel

1. はじめに

日本のダムでは、計画堆砂容量を設けているものの、中部地方を中心に急速に堆砂速度が増加し、堆砂率が100%に近付いている。ダムの堆砂は、発電取水口の土砂埋没や貯水池の利水・治水容量の減少、下流河川への土砂供給の減少などを引き起こし対策が喫緊の課題である。ダムの堆砂対策には、貯砂ダムと組み合わせた掘削や浚渫、スルーシングやゲート排砂等がある。その一つである排砂バイパストンネル(Sediment Bypass Tunnel 以後SBT)は、旭ダム、美和ダムなどで実用化され、流入土砂の迂回により堆砂量の抑制に貢献しており、天竜川の小渋ダムでも2016年から運用が開始されている^{1),2),3),4)}。

SBTの運用上の課題は、洪水ハイドロの中で、洪水調節や利水容量の回復に伴う貯水池の水位操作と、ダムへの土砂流入を防止するバイパス運用操作の、いわば相反する切り替え操作を、いかに効率的に行うかであり、久

保田らは、SBT入口(分派湖)の土砂堆積量が分派効率に影響することを指摘した⁵⁾。

一方、ダム上流からの土砂流入は一定ではなく、より一層のダムの土砂管理の高度化のためには、ダム上流河道での流砂観測との連携が重要であるが、具体的事例は美和ダム⁶⁾などに限られ、特に掃流砂を観測している事例はほとんど見られない。天竜川の支川に位置する長野県の小渋ダム上流部では、砂防の土砂動態の把握のために、流入する小渋川と支川の鹿塩川にプレート型とパイプ型のインパクトセンサー(ハイドロフォン)や濁度計などが設置され、連続的な流砂観測が行われている。インパクトセンサーに関する研究は砂防分野を中心に進められてきている⁷⁾が、ダム運用には活用されていない。

そこで本研究では、これら観測システムのデータを分析することで、より精度を高めた複数の洪水波形に伴う流入土砂の動態を明らかにし、下流に位置する排砂バイパストンネルの効率的な運用操作に活用するための知見を整理することを目的としている。



図-1 観測地点の概要



図-2 小渋川大河原地点の観測機器の設置状況 (国交省提供)

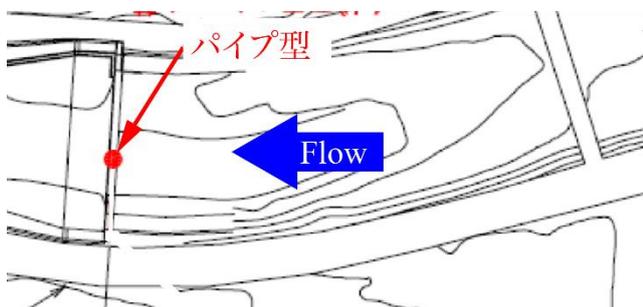


図-3 鹿塩川鹿塩地点の観測機器の設置状況 (国交省提供)

2. 観測概要

(1) 観測地点の概要

小渋ダムは長野県天竜川水系小渋川に建設された多目的ダムである。本ダムは排砂バイパストンネルを導入しており、流量が $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の時にバイパスゲートを開けることとしている。小渋ダムの上流（流域面積 288 km^2 ）は本川の小渋川と支川の鹿塩川に分かれており、この2か所で観測している（図-1）。小渋川大河原地点（大河原床固工1・2号）は、流域面積 134.8 km^2 、川幅 60 m 、河床勾配約 $1/70$ （図-2）、また、鹿塩川鹿塩地点は、流域面積 52.3 km^2 、川幅 31.7 m 、河床勾配約 $1/31$ である（図-3）。

(2) インパクトセンサーの概要

流砂観測において、インパクトセンサーは掃流砂観測機器の一つとして提案されている。インパクトセンサーは鉄製のパイプやプレートに内蔵されたマイクロフォンにより、衝突する砂礫の音を記録する装置である。

掃流砂量の推定においては、計測した砂礫の衝撃による音を増幅させ、その振幅（音圧値）が閾値を超えた回数（パルス数）に基づき、別で実測した掃流砂量と正の相関が高いパルス数を用いるパルス法⁷⁾と、音圧値そのもの、または音圧の積分値をあらかじめ算出した関係式に適用して推測する合成音圧法^{8), 9)}が提案されている。本研究ではパルス法を用いて掃流砂量を推測している。

パイプ型とプレート型インパクトセンサー（以降、パイプ型、プレート型と呼ぶ）の特徴として、パイプ型は細粒土砂を計測でき、土砂は衝突しやすく衝突音の大きいことが特徴である。しかし、土砂流出が激しい場合は砂礫によってパイプが変形するため、正常なデータが取れないことが多発し、維持管理が必要である。一方、プレート型は中～大粒径土砂を対象としている。パイプ型より感度が鈍く、面的に重複して衝突する傾向があるが、パイプ型よりも強度が大きく変形しにくいいため、耐久性に優れる¹⁰⁾。強度が高い例として、長野県小渋ダムSBTで2016年の初回の運用からパイプ型およびプレート型を用いたSBT内流砂観測を行ってきた¹¹⁾。 10 m/s を超える流速と高い土砂濃度により、パイプ型は初回で完全に破損してしまった一方、プレート型は8回の運用を終えるまで計測を続けることができたことから、プレート型の強度の高さが高いことがわかる¹⁾。

(3) 観測施設の概要

小渋ダム上流部では、流入する小渋川（大河原）と支川の鹿塩川それぞれにおいて、2016年から2019年現在まで1分間隔で水文及び流砂観測が行われている。大河原床固工1号では掃流砂観測のために、左岸・中央・右岸側の3か所にインパクトセンサー（ハイドロフォン）が設置されており、右岸がプレート型（ $L = \text{幅}50 \text{ cm} \times \text{長}20 \text{ cm}$ 、板厚 12 mm ）で、中央・左岸はパイプ型（ $L = \text{幅}50 \text{ mm}$ 、径 48.6 mm 、肉厚 $3\text{--}4 \text{ mm}$ ）である。大河原床固工2号はプレート型1基のみであるが2019年から故障している。鹿塩川はパイプ型を1基用いた計測が行われている。

パルス数が記録されている年もあるが、観測機器設置時に現地水路実験を行って作成したキャリブレーション式を用いて掃流砂量へ変換済みのデータを入手している。計測項目は、掃流砂量、水位、流速、濁度である。

3. 結果と考察

(1) 出水イベントの抽出

2016年から2019年まで計測しているが、2019年は観測

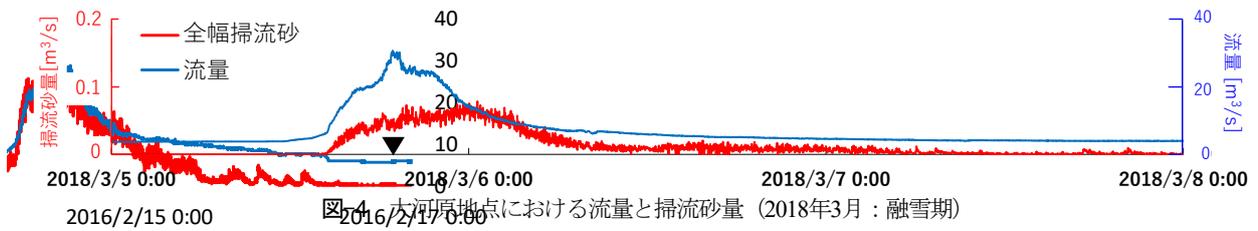


図-4 大河原地点における流量と掃流砂量 (2018年3月：融雪期)

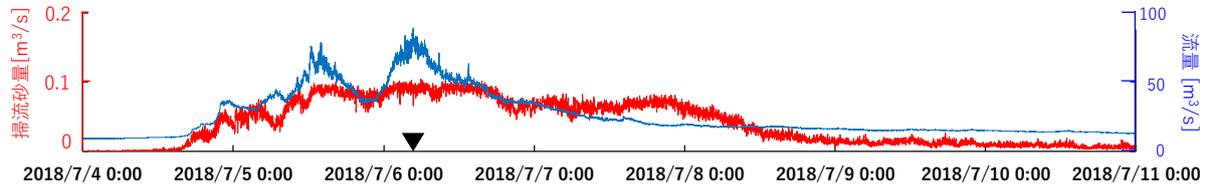


図-5 大河原地点における流量と掃流砂量 (2018年7月：梅雨期)

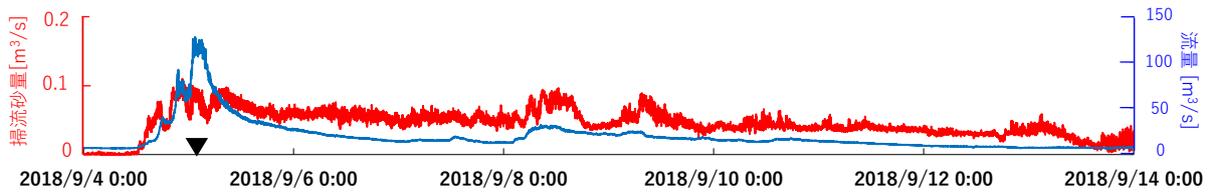


図-6 大河原地点における流量と掃流砂量 (2018年9月：台風期1)

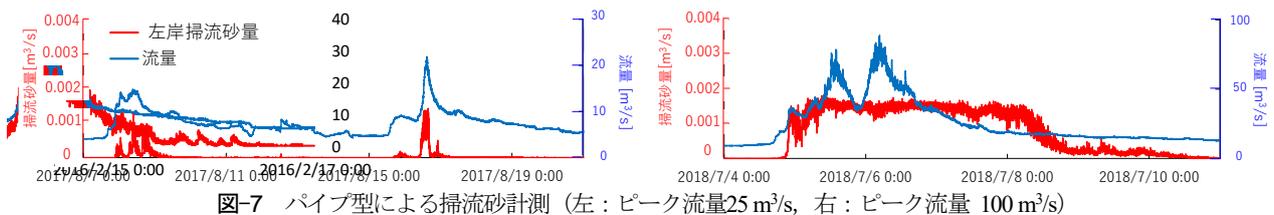


図-7 パイプ型による掃流砂計測 (左：ピーク流量25 m³/s, 右：ピーク流量 100 m³/s)

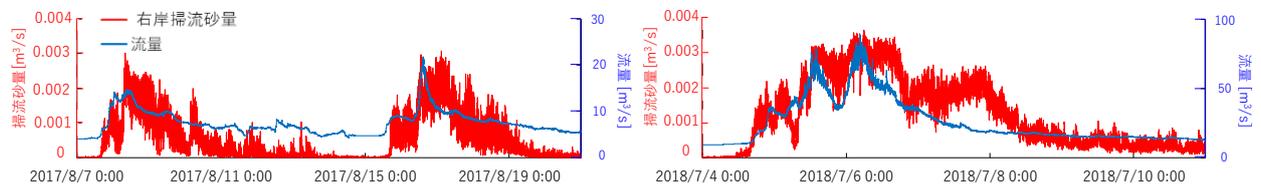


図-8 プレート型による掃流砂計測 (左：ピーク流量 25 m³/s, 右：ピーク流量 100 m³/s)

機器の故障による欠測値やエラー値が多いため、2016年1月から2018年10月に発生した出水を対象とする。その中でも大小様々な流入量がある2018年の出水を中心に本報では掲載した。

(2) パイプ型とプレート型による掃流砂観測値の比較

図-4、図-5、図-6に、それぞれ2018年融雪期中から最初の1出水を抜き出したもの、7月の梅雨期、9月前半に発生した台風21号による出水の台風期1における大河原地点の流量と全幅掃流砂量の関係を示す。▼印は洪水ピーク流量を観測した時点を示し、それ以前を増水期、以後を減水期とする。融雪期における出水(図-4)では、流量の低減に伴い掃流砂量も低減することが確認できる。一方、梅雨期(図-5)、台風期1(図-6)の掃流砂量のピークは、流量ピークよりやや遅れるとともに、流量低減期も長時間流砂が継続する傾向がある。

プレート型(右岸)とパイプ型(左岸)それぞれの計測データについて詳細に示す。図-7にピーク流量が約25

m³/s、約100 m³/sの出水のパイプ型(左岸)による掃流砂観測値を示す。ピーク流量が約25 m³/sの出水規模では、流量と掃流砂量の波形は一致しており、出水後の減水に従って掃流砂量も減っている。一方ピーク流量が約100 m³/sの時は、流量と掃流砂量の立ち上がりは一致しているが、流量のピークや減水期は反映されておらず、計測値が頭打ちとなり、掃流砂量の過小評価を招いた可能性が考えられる。

図-8にピーク流量が約25 m³/s、約100 m³/sにおけるプレート型(右岸)による掃流砂観測値を示す。プレート型においても、ピーク流量約25 m³/sでは、流量と掃流砂量の波形は一致しており、良好に計測できている。ピーク流量が約100 m³/sの時は、パイプ型同様に流量ピーク時の掃流砂量はやや頭打ちとなっているものの、立ち上がりは良好に反映できており、パイプ型よりも良好に計測できている。

これらのことから、小・中規模出水時はパイプ型もプレート型も良好に計測できているが、大規模出水時はパ

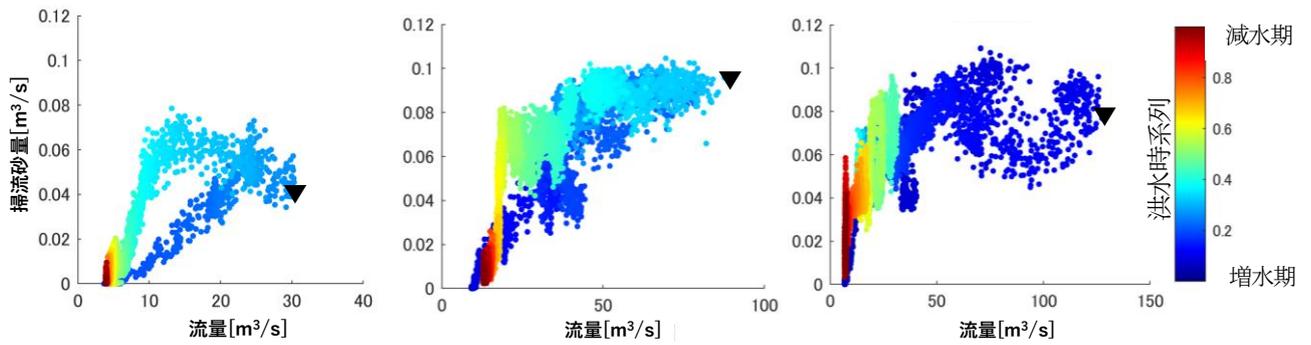


図-9 2018年大河原における洪水履歴と掃流砂量 (左：融雪期，中央：梅雨期，右：台風期)

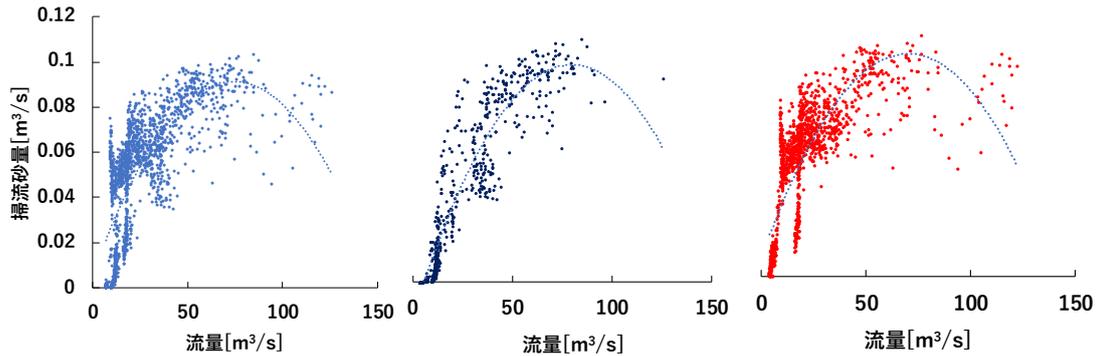


図-10 大河原地点における掃流砂の流入特性 (左：全体，中央：増水期，右：減水期)

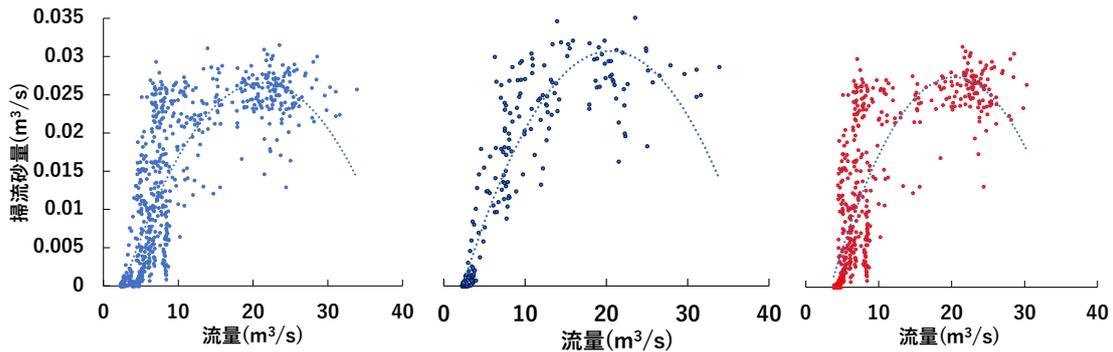


図-11 鹿塩地点における掃流砂の流入特性 (左：全体，中央：増水期，右：減水期)

イブ型は観測値の頭打ち（飽和）が発生していることから、プレート型の観測値の方が流砂量評価には適していると考えられる。

(3) 流砂の履歴とQ-Qs式の提示

図-9に大河原における2018年の3出水（融雪期，梅雨期，台風期）を抜き出した流量と掃流砂量の関係（Q-Q_s関係式）を時系列（青側（増水期）→赤側（減水期））で示す。▼印はそれぞれの出水におけるピーク流量を記録したデータを示し、図-4、図-5、図-6中のピーク流量時点と対応している。Q-Q_s関係式から、洪水履歴が把握でき、ヒステリシスループは反時計回りとなり、減水期のほうが多くの土砂が流れていることが確認できる。一般に、ウォッシュロードは、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ことが多い¹²⁾。これに対し掃流砂は、すでに河道内に土砂があるか、あるいは、河岸などから削れてくるか

といったように、どこに土砂供給源があるかによってループは変わってくる^{13),14)}。小洪ダム上流では、掃流砂はどの出水期でも反時計回りのループを示した。このことから、大河原では遅れて土砂が流れてくることがわかる。特に年間を通して前半の出水ほど反時計回りのループが顕著であることが確認できる。

2018年の融雪期，梅雨期，台風期におけるQ-Q_s関係式から、それぞれを合体させ、2018年全体としてのQ-Q_s関係式を大河原地点，鹿塩地点をそれぞれ図-10，図-11に示す。左は出水全体で，中央・右は増水期と減水期で分けた。流量の増減とともに掃流砂量も増減する関係が得られた。しかし，増水期と減水期で示す挙動は異なっており，図-9で示したとおり，同じ流量でも増水期より減水期のほうが掃流砂量が大きくなっている。

(4) 年間の季節変化による流入土砂特性

2018年大河原と鹿塩川の掃流砂量と流量の時系列の関

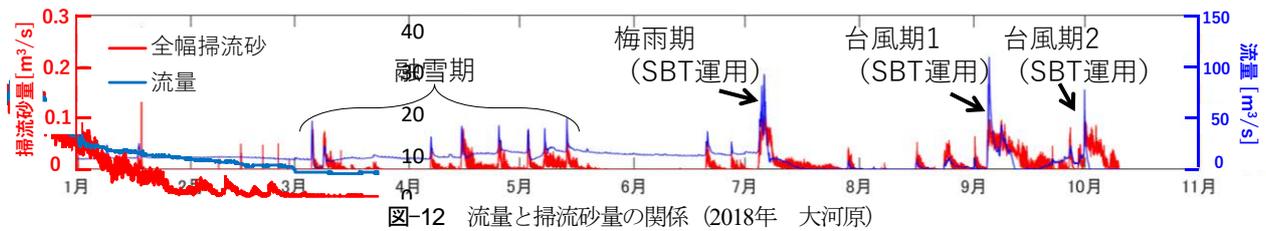


図-12 流量と掃流砂量の関係 (2018年 大河原)

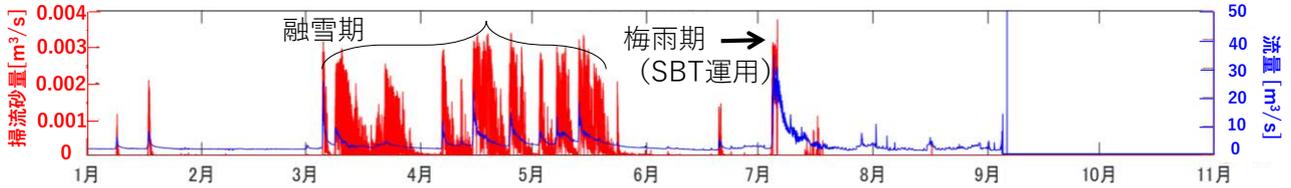


図-13 流量と掃流砂量の関係 (2018年 鹿塩)

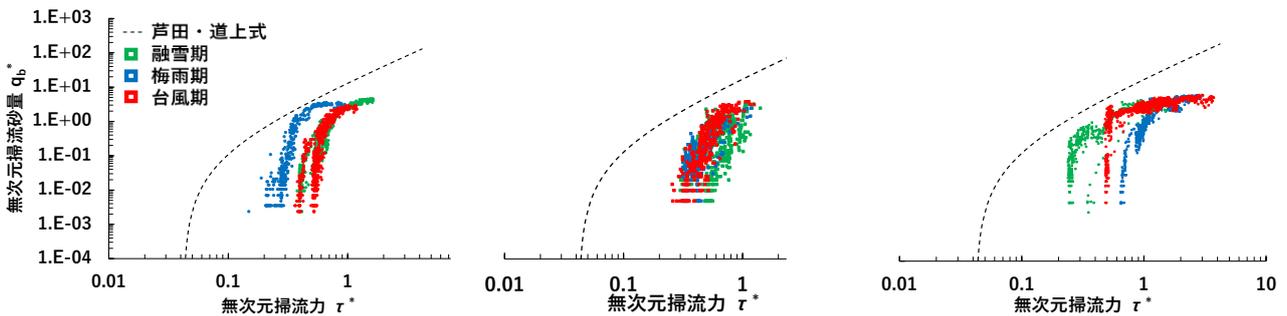


図-14 大河原地点における無次元掃流力と無次元掃流砂量の関係 (左: 2018年, 中央: 2017年, 右: 2016年)

係を図-12、図-13に示す。SBTは梅雨期と台風期のみ運用されている。鹿塩川は、7月の出水時以降は観測機器の故障により欠測している。大河原のデータについて、一年間を融雪期、梅雨期、台風期に分けることができ、流入土砂量の比率は、梅雨期や台風期の大規模出水時が過半数を占めている。一方、融雪期の出水は非洪水期であり、小さいピークの連続であるものの、総流入土砂量は年間の約1/4を占めており、洪水期と同程度の無視できない土砂量であることが分かる。

(5) 無次元掃流砂量の理論式との比較

a) 無次元掃流力と無次元掃流砂量の計算

大河原地点における流砂量の発生レベルを検討するために、観測した掃流砂量を用いて無次元掃流砂量を算出し、芦田道上式から算出した流砂量式(理論式)と比較した。無次元掃流力(τ^*)を以下の式(1)により求めた。

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

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。代表粒径はインパクトセンサーで検知することができる粒径が2mm以上であるため、2mmとし¹³⁾、径深には各時観測水位(m)、エネルギー勾配は河床勾配を用いた。また、無次元掃流砂

量(q_b^*)は以下の式(2)により求めた。

$$q_b^* = \frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} \quad (2)$$

ここで、 q_b はインパクトセンサーにより求めた単位幅掃流砂量(m³/s)である。

b) 無次元掃流砂量の理論式との比較と考察

図-14に2016年から2018年にインパクトセンサーで計測された掃流砂量に基づく無次元掃流砂と無次元掃流力の関係を示す(単一粒径2mmと仮定)。また、破線は芦田道上式による。融雪期、梅雨期、台風期いずれも最初の1出水を抜き出したものである。いずれの年も大河原地点における無次元掃流砂量はピーク流量時近傍で、芦田道上式による平衡流砂量と近い値を示している一方、支川鹿塩川鹿塩地点ではピーク時でも比較的低い値を示していた。観測地点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、大河原地点は掃流力に対して掃流砂量が多いことを示している。これは、地形的にも小渋川は中央構造線上に位置し、土砂生産が多いため、流出土砂も他の地域よりも多いと考えられる。

季節別でみると、2016年、2017年は梅雨期や台風期に土砂が流れやすいという同じ挙動を示している。一方で2018年は融雪期の出水が最も流砂量が多くなっていることが確認できる。流砂量は、前後の出水はもちろん、数年かそれ以上に一度の大規模出水にも関係する可能性が

ある¹³⁾。よって2018年の融雪期による出水は、2017年の最後の台風時に流出した土砂や、2017年秋から春までの期間による小さな出水によって土砂生産が行われ、河道内に土砂がたまっており、土砂が流れやすい状況を生み出していたのではないかと考えられる。

2017年融雪期前は、あまり小さい出水が見受けられず、2016年の台風による出水も小さかった。これらのことから、大河原地点は土砂が発生しやすく、また、土砂の発生は季節によって変化し、その前後の小さな出水や前年におきた出水の規模の影響を受けることが分かった。このような洪水履歴に対する掃流砂の動態把握はダムの土砂管理上重要である¹⁴⁾。

4. 結論と今後の課題

小渋ダム上流では高度な水文・流砂観測が行われており、本研究では、掃流砂に関するパイプ型とプレート型両方のインパクトセンサーの計測特性、また、これを用いた流量規模ごと、季節ごとの掃流砂量の変化、さらに洪水ピークに対する掃流砂の流下特性について検討し、以下のことが確認できた。

- ・パイプ型とプレート型インパクトセンサーでは、プレート型センサーの方が大きな流量時にも安定的に計測が可能である。
- ・ウォッシュロードは流量との相関が良いが、掃流砂は流量のピークから遅れる傾向がある。また、減水期にも掃流砂の流下が継続しており、その原因の一つとして、河道内に豊富な土砂が存在し、かつ、洪水後に遅れて土砂が流れ着いていることも考えられる。
- ・年間の掃流砂量の比較から、現在排砂バイパストンネルの運用をしていない融雪期の出水にも年間流入土砂量の約1/4がダムへ流入している。
- ・小渋川における掃流砂量の発生レベルは、季節によって変化する。これは毎年同じ傾向を示すのではなく、事前に土砂が供給されているか、直前の出水や前年の全体的な出水規模に影響していると考えられる。

今後は、これらのダム上流の土砂動態を踏まえ、さらに、バイパスゲート付近の分派湖の土砂動態と合わせて、排砂バイパスの効率的な運用について今後検討する必要がある。

謝辞：本研究にあたり、国土交通省中部地方整備局天竜川上流河川事務所および天竜川ダム統合管理事務所より現地観測データを、また(株)コルバックより観測システムの詳細情報の提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 小柴 孝太, 角 哲也 : 小渋ダム排砂バイパストンネルにおけるインパクトプレートを用いた掃流砂量計測, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp. I_841-I_846, 2018.
- 2) 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所 : 第6回小渋ダム土砂バイパストンネルモニタリング委員会資料 (平成31年3月14日), 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所, 2019.
- 3) Ishida, K, Sakurai, T. and Sumi, T. : Operation results of the Koshibu Dam sediment bypass tunnel completed in 2016, Conference proceedings of the Third International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, April 2019, Taipei, Taiwan.
- 4) 小林草平, 小柴孝太, 角 哲也, 竹門康弘, Kantoush Sameh : 2018年排砂バイパス運用による小渋ダム下流における河岸侵食と流路変化, 京都大学防災研究所年報. 62 B, pp.775-785, 2019.
- 5) 久保田踊児, 米山 望, 角 哲也 : 小渋ダムにおける河道内堆砂位が土砂バイパスの分派特性に与える影響, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, pp. I_679-I_684, 2016.
- 6) Sameh A. Kantoush, Tetsuya Sumi and Mitsuhiro Murasaki : Evaluation of Sediment Bypass Efficiency by Flow Field and Sediment Concentration Monitoring Techniques, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.55, S169-S174, 2011.
- 7) 水山高久, 野中理伸, 藤田正治 : 常願寺川津之浦下流砂防堰堤におけるハイドロフォンによる流砂観測, 砂防学会誌, Vol.55, No.3, pp56-59, 2002.
- 8) 鈴木拓郎, 水野秀明, 小山内信智, 平澤良輔, 長谷川裕治 : 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法に関する基礎的研究, 砂防学会誌, Vol.62, No.5, pp.18-26, 2010.
- 9) 鈴木拓郎, 内田太郎, 岡本敦, 高橋健太, 山下伸太郎, 小菅尉多, 福本晃久 : 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性の検証, 砂防学会誌, Vol.66, No.1, pp.4-14, 2013.
- 10) 富田邦裕, 叶正興, 小柴孝太, 角哲也 : パイプ型およびプレート型ハイドロフォンの流砂観測特性に関する比較検討, 水工学論文集, 64, I_643-648, 2019.
- 11) Koshiba, T., Sumi, T., Tsutsumi, D., Kantoush, S.A., and Auel, C.: Development of a bedload transport measuring system for sediment bypass tunnel in Japan. Proceedings 84th annual meeting of ICOLD (pp. 4-49-4-58). Johannesburg, South Africa, 2016
- 12) 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- 流域対策・流砂技術・下流河川環境 -, 技報堂出版, 2010.
- 13) 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.
- 14) 富阪和秀, 山崎友也, 米田格, 小林草平, 竹門康弘, 角哲也, 堤大三 : 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, 河川技術論文集, Vol.20, pp.43-48, 2014

(2020. 4. 2受付)