

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

Bank Erosion and Thalweg Change in the Downstream of Koshibu Dam Induced by Operation of Sediment Bypass Tunnel 2018

小林草平・小柴孝太⁽¹⁾・角 哲也・竹門康弘・カントウツシュ サメ

Sohei KOBAYASHI, Takahiro KOSHIBA⁽¹⁾, Tetsuya SUMI,
Yasuhiro TAKEMON and Sameh KANTOUSH

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

Sediment bypass tunnel (SBT) of Koshibu Dam was constructed in 2016 to reduce reservoir sedimentation and to promote downstream sediment transport. In 2018, significant channel changes occurred in the 5-km downstream reach by three events of sediment transport through SBT. Several bank erosions including failures of a riverside maintenance road occurred during the first event in early July. Bank erosions were extended much inner or downstream side, and in an unconfined reach the main flow was laterally shifted to a previously vegetated floodplain during the second and third events in middle and late September. Total deposition and erosion of sediment in the reach in this year was estimated to be about 63,000-73,000 and 75,000-76,000 m³. Many of the bank erosions occurred closed to a developed gravel bar. Processes of sediment transport that lead to a multiple occurrence of bank erosion during a single event were discussed. These events provide us insight on how to rework of stabilized sediment storage in the river channel.

キーワード: 小渋ダム, 排砂バイパス, ダム下流, 河岸侵食, 砂州, 流路変動

Keywords: Koshibu Dam, sediment bypass tunnel, downstream of dam, bank erosion, gravel bar, thalweg movement

1. はじめに

河床掘削, ダム堆砂, ダムによる流量安定化によって, 国内の多くの河川, 特に下流域において, 河床や流路の安定化, 砂州や氾濫原の樹林・陸地化が進行している. 本来の動きが無くなった川では, 景観に清らかさや壮観さが失われ, また急流や砂礫の環境に適応した生物が棲みにくく, 止水環境や陸地により適応した外来種の侵入や繁茂を受けやすい. 全

国で川に動きを取り戻そうと土砂還元などの事業が行われているが, いったん固定してしまった流路や砂州の動きを取り戻すのは容易でなく, 土砂還元が実施されても多くの場合は局所的に河床土砂の移動を高める程度の効果にとどまっている.

排砂バイパストンネル (Sediment bypass tunnel, 以降SBTと略す) は, ダム貯水池への土砂流入を減らしダム下流への土砂輸送を担う手段として注目される施設である (Vischer et al, 1997, Sumi, 2015). SBTを

有するダムは国内に5-6基、世界に約30基とまだ限られている。奈良県の旭ダム（関西電力）では1998年より排砂バイパスの運用が始まり、これまで全流入土砂量の約8割となる年間8万 m^3 の土砂を下流へと輸送してきた（Nakajima et al., 2015; Auel et al., 2016）。SBT開始から3-5年後にはダム下流の河床材料、瀬淵構造、底生動物群集がダム上流の状態に近づく、すなわちダム建設前の元々の姿に回復する、ことが示されている（竹中ら, 2004；三鼓・大本, 2010；Kobayashi et al., 2017）。旭ダム下流は、ダム下流とは思えないほど砂州が発達した景観が広がり、土砂還元による生態系の修復が最も成功した事例の1つに挙げられる（Kobayashi et al., 2018）。

長野県の小渋ダム（国土交通省中部整備局）は1969年完成の治水を含む多目的のダムである。ダムによって上流からの土砂供給が無くなったことで、河床粗粒化や氾濫原植生化が進んだ。本ダムでは貯水池堆砂問題からSBTの導入が計画され、2016年からSBTの試験運用が開始した（Kashiwai and Kuimura, 2015; Takeuchi et al., 2017; Ishida et al., 2019）。運用3年目の2018年は出水の多い年で、計3回のSBTの運用が行われ、過去2年よりも圧倒的に多い土砂が下流へと輸送された（国土交通省天竜川ダム統合管理事務所, 2019）。その結果、ダム下流に侵食と堆積の大きな変化が生じた。その1つは、管理用道路の被災を含む多数の河岸侵食の発生である。また、ある場所では河岸侵食が拡大した結果、それまで樹林が覆い繁っていた氾濫原に新流路が形成された。

本研究では2018年の小渋ダム下流で起こった侵食と堆積の量や空間分布について整理した。小渋ダム下流では、少なくとも近年における河岸侵食の多数同時発生や流路変化の記録はない。2018年は出水の多い年ではあったが、ダム下流における各出水のピーク流量はこれまでに何度も経験してきた規模のものであった。例年と比べ突出した出水規模ではなかったにもかかわらず、多数の河岸侵食と流路変更が生じたことは注目すべき点である。

2. ダム、排砂バイパス、ダム下流の概要

本ダムは天竜川の1支流小渋川に1969年に完成した堤高105m、総貯水容量5.8億 m^3 のコンクリートアーチ式のダムである。流域面積は288 km^2 、流域の年降水量は1600-1800mmで、治水（計画流入量1500 m^3/s 時に貯水して500 m^3/s を放流）、農業用水（1.8 m^3/s ）、発電（8.0 m^3/s 、最大10500W）が目的のダムである。

上流には大規模な崩壊地が多く土砂生産が活発である。1977年に第1貯砂堰堤を設置したが、1982、1983年の洪水により大量の土砂流入（各年200万 m^3

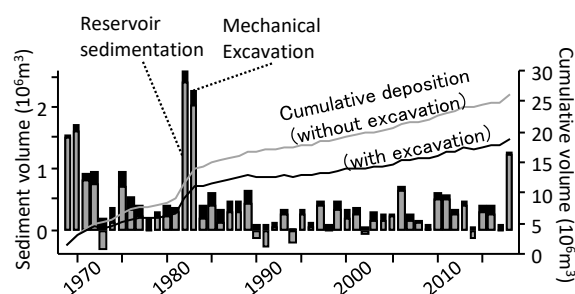


Fig. 1 Annual sedimentation of Koshibu Dam

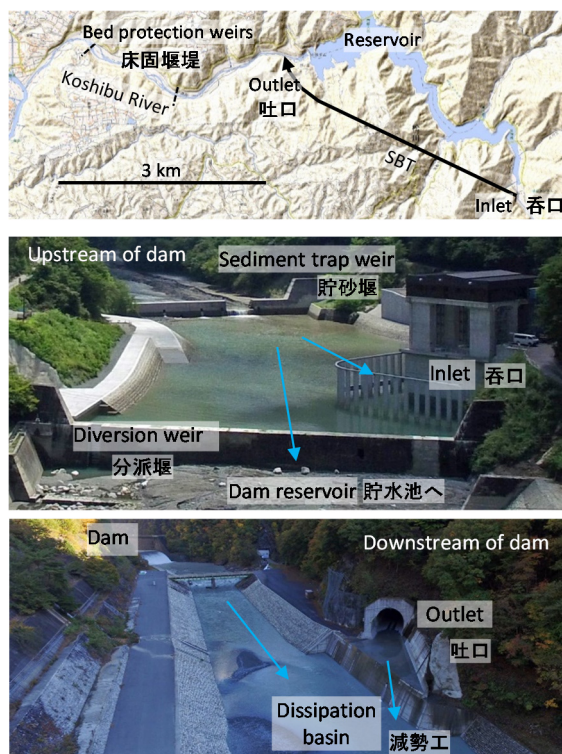


Fig. 2 Overview of dam and SBT facilities

以上）があり[Fig. 1]、1998年に第2貯砂堰堤を設置した。平均で50-60万 m^3 を超す（最近30年では約30万 m^3 ）年間堆砂のため、計画堆砂量は2000万 m^3 であるが2015年の時点でその89%の堆砂率であった。

貯水池への土砂流入の抑制、河川縦断的な土砂移動連続性の確保を目的とした「小渋ダム堰堤改良事業」が始まり、その中で2000年よりSBTの導入が進められ2016年に全施設が完成した。トンネルは全長約4km、縦断勾配は1/50で、内部底面幅約6m、高さ7m以上の馬蹄形である。トンネルの設計流量は370 m^3/s 、輸送対象は掃流砂（細粒成分）、浮遊砂、ウォッシュロードである。

トンネルの呑口は第3貯砂堰と分派堰（第1貯砂堰堤を改良）の間に位置しており、貯砂堰を通過した一部の土砂が呑口へと輸送される[Fig. 2]。掃流砂の

粗い成分は貯砂堰の上流や分派堰（貯水池となっている中）に堆積してSBTに流入させないことを狙っている。また、呑口前には流木はねがあり、大きな流木の流入を防いでいる。一方、吐口はダム堤体から100m下流の左岸側にある[Fig. 2]。SBTからの流れは、減勢工（長さ110m、底面幅22-33m、SBTからの落差7m以上）の途中で斜め下流向きに合流する。

ダム下流は約5km流れて天竜川本川に合流する[Fig. 2]。バイパス吐口は合流点から約4.7kmの位置にある。また、3.0kmと1.3km付近に床固堰堤がある。ダム下流の平均河床勾配は1/100で河道幅は30-100mであるが、床固の上流区間や合流点付近ではやや勾配が緩く河道幅が大きい傾向にある。ダム建設以降河床低下や粗粒化が進んだ。2014年時点で多くの地点で河床の40-70%以上が径75mm以上の石に覆われ、代表粒径 D_{60} は7-20cmであった。

3. 2018年の出水とSBT運用

2018年は3月から5月に流入のピーク流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ を超える出水が8回あり、このうち4回は $100\text{m}^3/\text{s}$ 以上であった[Fig. 3]（国土交通省天竜川ダム統合管理事務所, 2019）。これらの出水で貯砂堰や分派堰に大量の土砂が堆積し、また分派堰を通過した土砂も多く、2018年の貯水池堆砂量は約120万 m^3 であった[Fig. 1]。貯砂堰や分派堰に堆砂した結果、これまでより大きい粒径（10-30cm）がSBTに流入した。

バイパス運用は、1回目は梅雨前線等による西日本豪雨時の7月4日から5日、2回目は台風21号時の9月4日から6日、3回目は台風24号時の9月30日から10月3日に行われた[Fig. 3]。1回目は最初の流入ピークの立ち上がりからSBT運用が始まり、放流量のほとんどがSBTからの流量となったが[Fig. 3の赤線]、下流の管理道が被災したことを受けて、その10-11時間後に運用が停止となった。停止後に流入ピークが2回あり（最大 $370\text{m}^3/\text{s}$ ）、ダム放流量も $230\text{m}^3/\text{s}$ まで増加し、SBTからの土砂が無い状態で高い流量が2日間続いた[Fig. 3]。総流入量は8千万 m^3 を超え、3イベント中で最大であったが、SBTによる土砂（掃流砂、砂礫）輸送量（数値シミュレーション解析、トンネル内プレートフォン観測による推定）は中断のため1.5-2.0万 m^3 に留まった。なお、被災時間は午前3時半くらいとみられる。放流量（ダムとSBTの合計）が $200\text{m}^3/\text{s}$ まで増加してから $100\text{m}^3/\text{s}$ 近くまで下がり、SBTからの流量が全放流量のほとんどを占めていた時間帯になる[Fig. 3]。

2回目のイベントでは流入のピーク流量が $480\text{m}^3/\text{s}$ を超え、SBTの運用は出水の立ち上がりから始まり約44時間続いた[Fig. 3]。SBTの最大放流量は $170\text{m}^3/\text{s}$ 、

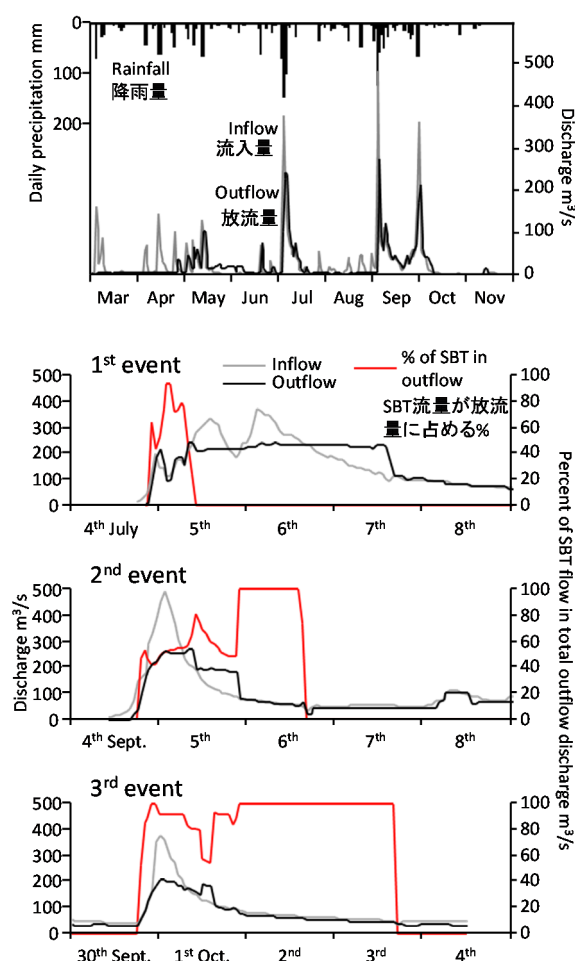


Fig. 3 Hydrograph of year 2018 (upper) and hydrograph and SBT contribution in outflow discharge for each flood event (lower 3).

ダム下流の最大流量（ダムとSBTの合計）は $260\text{m}^3/\text{s}$ であった。全放流量に占めるSBTからの流量は、増水期には40-60%であったが、全放流量が $100\text{m}^3/\text{s}$ 以下となった減衰期後期には100%であった。SBTによる土砂輸送は8-12万 m^3 と推定された。

3回目のイベントでは流入量が最大 $360\text{m}^3/\text{s}$ で、SBTの運用は出水の立ち上がりから始まり、約70時間続いた[Fig. 3]。SBT流量の $195\text{m}^3/\text{s}$ は既往最大となった。増水期から減衰期までSBTからの流量が全放流量のほとんどを占める状態が長く続いた。SBTによる土砂輸送は8-12万 m^3 と推定された。全3回のイベントで輸送された総土砂量は約20万 m^3 と推定された。

4. 調査分析内容

出水後となる8月8-9日、9月20-21日、10月18日に、また、その後として12月13日、2019年1月23-24日において、ダム下流の河岸侵食箇所における横断地形の



Fig. 4 Location of bank erosion in the downstream of Koshibu Dam in July 2018.

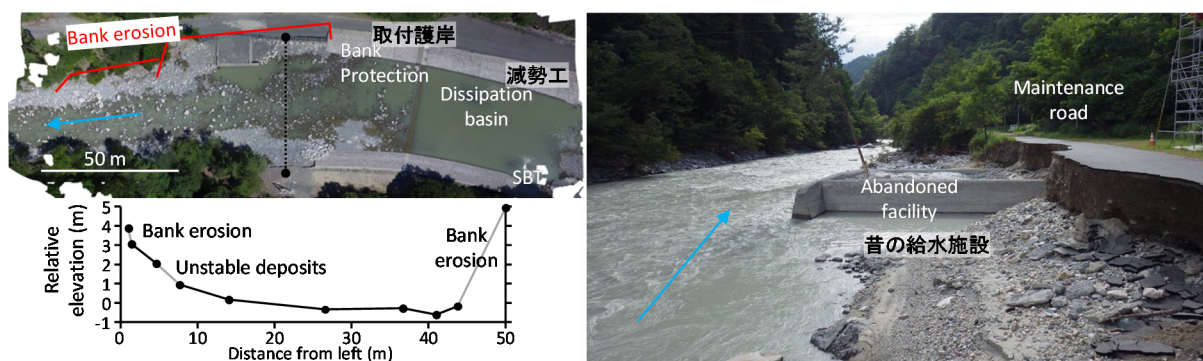


Fig. 5 Plan view, cross-section, and close-up view of the road failure (bank erosion) 100m downstream from SBT outlet.

測量，ドローンによる空中撮影，河床材料調査を行った．空撮画像からPhotoscan（Agisoft社）によりオルソ化画像とDEM（digital elevation model）データを得た．

小渋川0.0k-3.0k（天竜川との合流から生田第二床固）について，定期横断測量調査が2018年5月と11月に行われた．横断線における標高値を内挿して1m単位で河床標高を求め，2期の標高差に横断線間隔距離（200m）をかけて堆積・侵食量を求めた

（ただし，低水路から水平にも垂直にも離れた場所は人為的な変化である可能性が考えられるため変化量の計算には含めなかった）．

また，ダム下流全域について，2017年12月，2018年7月と10月（いずれもその月の出水後）に，航空レーザ測量による3次元地形測量が行われた．調整用基準点測量結果との比較により誤差は15cm以下（平均5-6cm）と推定された．オリジナルデータに対して建物や樹木等（下記に示す項目）の地物を除去するフィルタリング処理が施され，グラウンドデータが作成された（1m格子データ）．水面以外の場所について，3期間の標高の差分から，SBT運用の1回目と2-3回目による堆積・侵食量を求め，また堆積と侵食と空間分布を調べた．

また，2018年11月にレーザ測量では欠測となる水面下の地形について水部補備測量が行われた．これらの結果を基に2017年12月と2018年11月の小渋川3.06k-4.8k（生田第二床固から小渋ダム直下）の横

断地形データが作成された．先と同じく2期の標高差から堆積・侵食量を求めた．

5. 結果と考察

5.1 7月出水後の河道状況

7月出水によって，ダム下流管理道において1kmの間に3か所で河岸侵食による被災が起こり，また，ダム下流5kmの中で自然河岸の侵食が多発した[Fig. 4]. Fig. 4に示す河岸侵食のほとんどは長さが100m以上にわたるもので，小規模のものを含めると侵食箇所は倍以上になる．道路が被災したのはトンネル吐口から100m下流（4.5-4.6k），200m下流（4.3-4.4k），1km下流（3.6k付近）である．100m下流[Fig. 4の赤色①，Fig. 5]では，バイパス吐口の減勢工の直下で河道がやや左に湾曲しており，外岸である右岸で約70-100mにわたる河岸侵食がおきた．ここではもともと護岸用に河岸に積まれていた巨礫ブロックの背面から侵食跡が見られた．巨礫ブロックの上流側は取付護岸，減勢工と続き，取付護岸（コンクリート）の裏側には空洞が生じていた．また，下流側にはそれまで樹木や土に覆われていた建設当時の給水施設が露出した[Fig. 5の写真]．侵食を受けた面積と河床と道路路面の比高から，侵食量は1750-3500m³（小は斜面が斜め，大は河岸斜面が垂直であった場合）と推定された．なお，左岸側も比高の高い位置で小規模な侵食の跡や不安定土砂が確認された[Fig. 5]．内岸でも

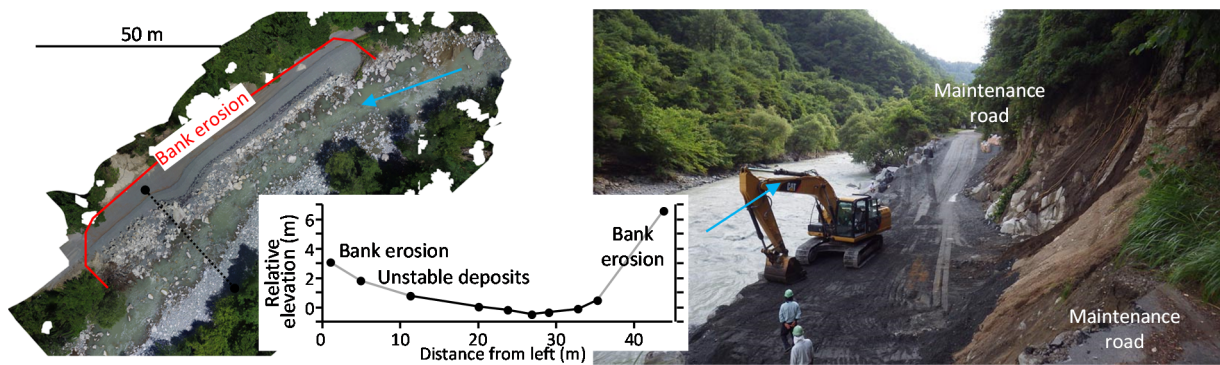


Fig. 6 Plan view, cross-section, and close-up view of the road failure (bank erosion) 200m downstream from SBT outlet.



Fig. 7 Photos of bank erosion and sediment deposit

侵食が生じるような流れが生じたか、内岸に一時的に厚く土砂が堆積した影響が考えられた。

200m下流[Fig. 4の赤色②, Fig. 6]も、河道の左への湾曲部にあたり、外岸側にあたる右岸側が約100mにわたり侵食を受けた。ここはもともと蛇籠により護岸がなされていた。侵食を受けた上流端近くには沢水が流れ込むため、沢からの水の流入により土壌の水分量が多い状態で侵食を受けた可能性がある。こ

こでの侵食量は2350-4700m³と推定された。

1km下流[Fig. 4の赤色③]も、河道の左への湾曲部にあたり、外岸にあたると右岸側が約90mにわたり侵食を受けた[Fig. 7a]。ここではコンクリート張りの護岸と管理道が流出し、下流の砂州にそれらの大きな破片が散乱していた[Fig. 7b]。侵食開始点の上流側のコンクリート護岸も裏側には大きな空洞ができていた。ここでの侵食量は2150-4300m³と推定された。

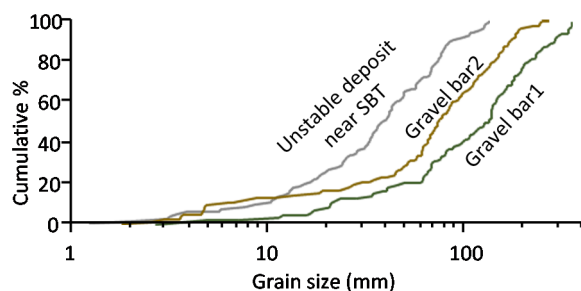


Fig. 8 Grain size distribution of surface bed materials

これより下流の人工物のない河岸において起こった侵食は、比較的大きなもの（縦断的長さ100m以上）だけで10以上を確認した[Fig. 4]. そのうちの2か所[Fig. 4の橙色⑥と⑦, Fig. 7c,f]では、侵食の面積と数点における高さから、侵食量は1650-3300m³と2250-4500m³と推定された. なお、⑥の侵食は次の出水イベントで新しく流路となる起点となっている.

また、特に下流側においては河岸高水敷に細砂が場所によっては数10cmの厚さで堆積している箇所がたくさん見られた[Fig. 7d]. 出水中、細砂が浮遊の状態で移動し、河岸に乗り上げたものと考えられた.

ダム下流では低水路においても、特に上流側では侵食が顕著であった. まず、トンネル吐口の減勢工のあたりに通常は砂州が形成しているが、7月出水後には見られなかった. また、トンネル吐口から1km下流の被災箇所まで、砂州の発達を確認できなかった. 一方、そこから下流には天竜川との合流点まで、大きく発達した砂州が幾つかみられた. ただし、これらの砂州の表面は大石や巨石が目立ち、全体的に粒径が大きかった[Fig. 8における gravel bar2, なお, gravel bar1はSBT吐口より200m下流付近で見られた小規模砂州]. 一方、SBT吐口の近くで見つけたSBT由来と思われる不安定土砂はこれよりもだいぶ小さいものであった[Fig. 8における unstable deposits near SBT]. このことから、発達した砂州に見られた粗い粒径は、SBT由来ではなく河岸由来の土砂であると推察された. また、大きな砂州が発達しているとその対岸には必ず河岸侵食が発生していた[Fig. 7c,e,f].

5.2 9-10月の2出水後の河道状況

9-10月の2回の出水それぞれによって、低水路には土砂堆積が増え、砂州の発達が7月よりも顕著であるとともに、7月出水で河岸侵食を受けた各箇所では侵食エリアがさらに拡大した. 新しく形成した1つは、減勢工から下流にのびる砂州（中州）で、その下流部の横は道路被災箇所（下流100m）であった[Fig. 9a]. 下流1kmの被災箇所においても、その対岸の上流側に砂州が形成した[Fig. 9b]. 各被災箇所は7月出水後



Fig. 9 Gravel bar developed by 2nd and 3rd events

に大型土嚢や巨礫により仮の補修が行われていたが、その多くが流出した.

1.6k付近では7月出水で河岸侵食を受けた箇所を起点に、樹林化していた氾濫原の約5000m²が侵食され新流路が形成された[Fig. 9c, Fig. 10]. 平水時において主流は新流路となり、旧流路の大部分は干上がった状態となった. 新流路河岸の侵食の高さが1-2mであったため、侵食土砂量は5千から1万m³と推定された.

新流路が形成された付近もそうであるが[Fig. 10], そこから下流において砂州が発達しているとその対岸には必ず河岸侵食が発生していた[Fig. 9d].



Fig. 10 Channel change (gravel bar development, bank erosion, new thalweg formation) at near 1.6k

5.3 堆積と侵食の総量，空間分布

航空レーザ測量による標高データから，ダム下流全区間における2018年の年間（2017年12月と2018年10月出水後の間）の総堆積量は $54,000\text{m}^3$ ，総侵食量 $76,000\text{m}^3$ と推定された（水面下の場所の標高は評価されていないので，堆積量も侵食量もその分過小評価である）[Fig. 11]. 年間の堆積の60%以上は2018年の7月と10月の間に（つまり，2と3回目の出水により）に生じたものである一方，年間の侵食の90%近くが2017年12月と2018年7月の間（つまり，1回目の出水により）に生じたものであった．一方，横断測量結果からは2018年の年間の総堆積量 $73,000\text{m}^3$ は，総侵食量は $76,000\text{m}^3$ と推定された[Fig. 11]. 航空レーザ測量は水面下の分が過小評価であるため，侵食量については2手法でたまたま同等の推定であったが，堆積量については2手法間の中間から横断測量に近い値（ $63,000\text{--}73,000\text{m}^3$ ）が実際の値ではないかと考えられる．いずれにせよ，年間で堆積と侵食はほぼ同等かもしくは侵食がやや多かった．また，航空レーザ

測量のデータから，侵食の大部分（ $58,000\text{m}^3$ ，全体の76%）は河岸侵食であることが示された．

航空レーザ測量データ（LPデータ）から，河岸侵食を個別に抽出して体積を求めることができる．個別の侵食量について，現地測量による推定と航空レーザ測量の推定を比べると，道路被災箇所では航空レーザ測量が過小評価に，下流の人工物のない河岸侵食の場所では現地測量が過小評価の傾向にあった[Table 1]. 被災箇所では復旧工事による土嚢設置や一部は水面下となった影響があり航空レーザ測量では過小評価になったと考えられた．人工物のない河岸侵食では，現地測量では数点しか侵食厚を調べていなかったため過小評価になったと思われる．

ダム下流における侵食や堆積の空間分布について，航空レーザ測量と横断測量結果から確かめた[Fig. 12]. なお，航空レーザ測量については，砂州や河岸侵食の個別に堆積量や侵食量を求め，中心点の縦断的位置に対してそれらの量を示した[Fig. 12a,b]. 規模の大きい河岸侵食は，特に生田床固第一堰堤と第二

Table 1 Comparison of bank erosion volume (m^3) between 2 methods

	Field measurement	Aerial laser scanning data
Road failure1	1750-3500	1242
Road failure2	2350-4700	0
Road failure3	2150-4300	2394
Bank erosion6	2250-4500	5553
Bank erosion7	1650-3300	4216
New thalweg erosion	5000-10000	14010

堰堤の間の区間にあたる1.5-3.0k付近に多く見られた。ここは第一堰堤(1.3k)の影響により河道幅が広く、流路が潜在的に左右に動きやすい区間である。また、河岸侵食のそば(縦断的に同じ位置かやや上流側)には大抵、砂州が形成・発達し、3.0kの第二堰堤の直下だけ、砂州の発達なしに河岸侵食の発生が見られた[Fig. 12a]。侵食と堆積の位置的な対応はあるが、侵食量と堆積量の関係はそれほど強いものではなかった(Pearson's r : 0.57) [Fig. 12b]。なお、7月出水では侵食が卓越し、特に上流側では出水後に砂州が見られず、砂州発達と河岸侵食の空間的対応は見られなかったが、下流側では砂州発達と河岸侵食が同所的にみられる場合が多かった。

侵食と堆積に関係があることは横断測量結果からも示された[Fig. 12c,d]。侵食量と堆積量(いずれも200m区間あたりの推定値)の間の相関係数は高かつ

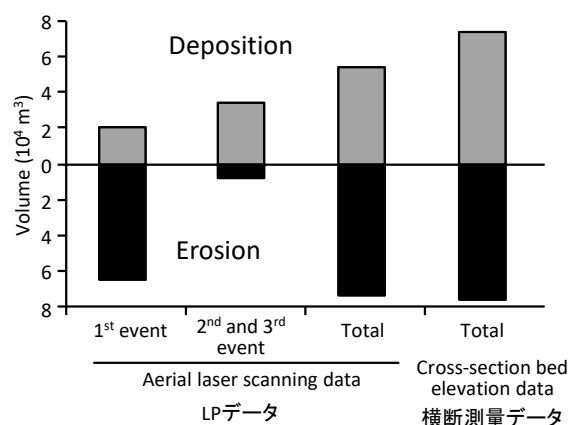


Fig. 11 Volume of deposition and erosion in the whole downstream reach of Koshibu Dam 2018

た(Pearson's r : 0.79) [Fig. 12d]。1.4-2.8kは、新流路が形成されたあたりであるが、河道幅がもともと大きい。一方、3.8kより上流では河道幅が狭い(峡谷である)ため、砂州や河岸侵食は大規模にはなり得ない。堆積量と侵食量の対応関係の一部は、こうした河道幅に関して生じたことが考えられる。いずれにせよ、堆積と侵食が相互に促進しやすい関係にあることが空間分布に対応が見られやすい一因と考えられる。

5.4 河岸侵食が発生した理由

2018年は3~5月に $100\text{m}^3/\text{s}$ レベルの出水が幾度もあり、 $400\text{m}^3/\text{s}$ レベルまたはそれ以上の出水が3回も

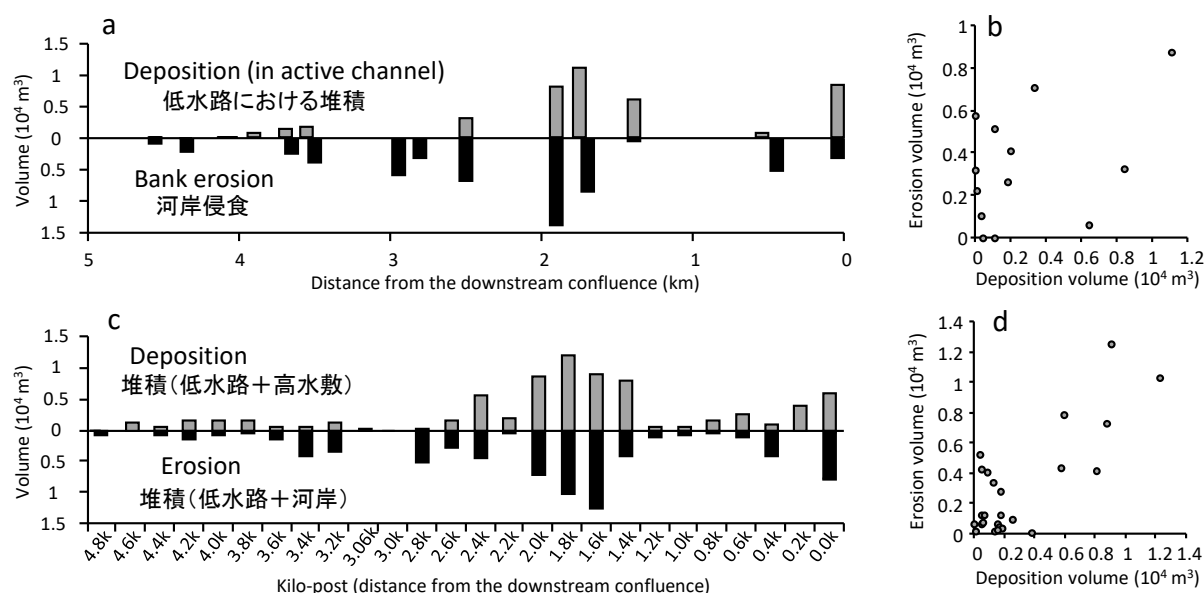


Fig. 12 Distribution of deposition and erosion, and their relationship in the downstream of Koshibu Dam 2018 (a and b: deposition in active channel and bank erosion estimated by aerial laser scanning data, c and d: deposition and erosion of each 200-m reach estimated by cross-section bed elevation data)

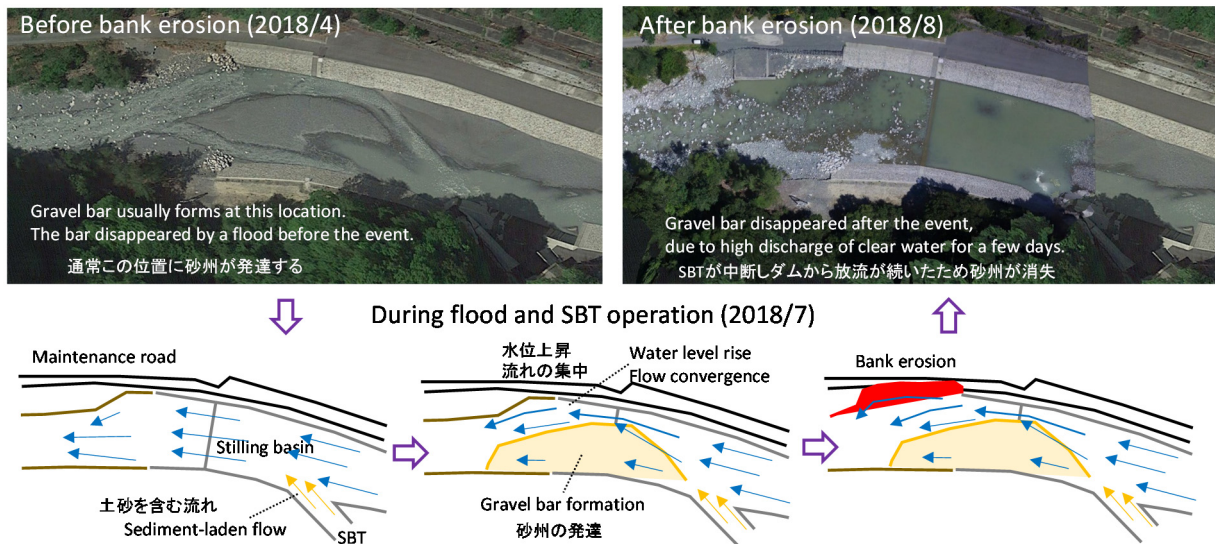


Fig. 13 A hypothesis of the processes of bank erosion at 100m downstream of SBT

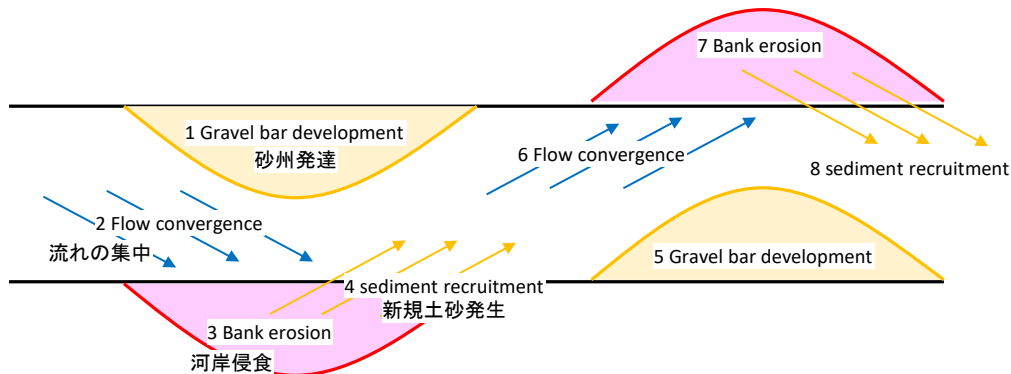


Fig. 14 A hypothesis of the processes in a chain of bank erosion

あり、出水の頻度も規模も大きい年であった。なお、2回目のSBT運用の出水時における流入量のピーク $482\text{m}^3/\text{s}$ は、ダム完成後において4番目の大きさであった。一方、ダム下流では $200\text{--}250\text{m}^3/\text{s}$ レベルの出水が2018年に3回起こった。 $200\text{m}^3/\text{s}$ レベルかそれ以上の出水はダム完成後に32回もあり、2年に1度は経験してきた出水のレベルである。にもかかわらず、これまで起きなかった河岸侵食による道路被災が起き、大規模な河岸侵食が多数発生した。2018年がこれまでと大きく異なっていることは、出水時にSBTで運ばれた大量の土砂が水と一緒に流れていることである。2018年のSBTによる輸送土砂量 ($20\text{--}30\text{万}\text{m}^3$) は2016年 ($<1\text{万}\text{m}^3$) と2017年 ($3\text{--}5\text{万}\text{m}^3$) を大きく上回った。

7月出水において吐口100m下流では流量が $100\text{m}^3/\text{s}$ 前後のときに河岸侵食による道路被災が起きた。それほど大きくない流量時に河岸侵食が起きた理由として、砂州の一時的な発達とそれによる水位上昇および流れの偏りが考えられる[Fig. 13]。道路被災箇所

はいずれも湾曲部の外岸で内岸側に砂州が発達しやすい。実際、吐口100m下流と1km下流では、9-10月出水後には砂州が被災箇所の対岸（やや上流側の位置）に形成した。なお、7月出水のときは、SBTが中断した後に（＝土砂がない状態で） $200\text{m}^3/\text{s}$ を超す放流が2日間も続いたため[Fig. 3]、出水後に砂州が残っていなかったと考えられる。吐口100m下流で被災したとき、 $100\text{m}^3/\text{s}$ の流量のほとんどはSBTからの流量であった[Fig. 3]。SBTから排出された土砂は減勢工に入り、川幅も広がり、ダムからの放流量も少なかったため、堆積が促進され砂州が形成されたことが考えられる[Fig. 13]。その砂州によって、通常の $100\text{m}^3/\text{s}$ 時よりも水位が高まり、また外岸側に流れが集中したことによって、道路被災の河岸侵食につながった可能性が考えられる。

吐口200m下流の道路被災から下流の河岸侵食はどの時刻に生じたかは分かっていない。SBTから排出された土砂が、徐々に下流に移動して次の湾曲点において内岸に砂州を形成し、河岸侵食を起こして

いき、上流から順次に河岸侵食が起こった可能性がある。また、吐口1km下流の道路被災より下流では、河岸侵食が発生するその対岸には必ずと言っていいほど砂州が発達していた。また、その砂州表面にはSBTではなく河岸由来と思われる粒径の大きい礫がたくさん見られた。これは、河岸侵食により発生した土砂がそのすぐ下流における砂州発達に貢献した可能性を示唆している。ダム下流の中ほどにあたる1.5-3.0kでは、1つ1つの低水路堆積と河岸侵食の規模が大きく、雪だるま式に堆積と侵食が増大していった可能性もある。河岸侵食が砂州形成をもたらし、その砂州形成が今度は河岸侵食をもたらすという「河岸侵食の連鎖」[Fig. 14]によって砂州形成と河岸侵食が徐々に規模を増し、最後に2k付近から始まる新流路の形成につながった可能性がある。

以上より、河岸侵食が多数発生したメカニズムとして以下のことが考えられる。まず、SBTより排出した土砂によって砂州が次々と形成され、上流2-3ヶ所における河岸侵食（道路被災）を促した。SBTからの土砂の到達ピークは下流へ行くほど慣らされるが、河岸侵食という新たな土砂供給によって砂州形成が下流へ進んでも維持され、それがまた次の河岸侵食を促す。このように、きっかけはSBTからの排砂とダム放流量の少なさによる砂州発達であるが、下流では河岸侵食による土砂発生が次の河岸侵食を促すという「河岸侵食の連鎖」が生じていた可能性がある[Fig. 14]。砂州発達や蛇行流路が河岸侵食を誘発する事例は多々あるが（例えば、永多ら、2013；河上・渡邊、2016）、人為的な土砂供給による侵食促進や河岸侵食の連鎖について言及した事例はまだ見つけられていない。本研究で示した現象は、河岸侵食を人為的に促進あるいは制御できる可能性を秘めており、今後画像解析や数値計算シミュレーション等により深く検証していく価値がある。

6. まとめ

2018年の小渋ダムSBTの運用によって下流河道に多数の河岸侵食や新流路形成など大きな変化が生じた。推定された河岸侵食量は76,000m³で、SBTによる排砂量20万m³の約1/3に相当する土砂が発生したことになる。土砂堆積量は侵食量と同じレベルであることから、約20万m³の土砂は天竜川本川に流出したと考えられる。2年に1度は経験してきた流量で、これまで起きなかった多数の河岸侵食が発生した。上流数か所の河岸侵食の原因はSBTからの土砂による砂州発達で、一方下流では河岸侵食による土砂発生が別の河岸侵食を促す河岸侵食の連鎖が生じていた可能性がある。SBT放流時にダムからの放流量もあ

る程度高く維持することで初期の砂州形成を防ぐことができるかもしれない。一方、置土や水制などによって河岸侵食のきっかけを作れば、滞筋が固定してしまった川において、動きを取り戻せる可能性があることが本研究から示される。海外では、水制のように流れに張り出す置土によって河岸侵食を狙う環境保全事業が実際に既に試されている（Barillier et al., 2018）。

謝 辞

調査をサポートしていただき、航空レーザ測量データと横断測量データ、水文データを提供いただいた国土交通省中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所の方々ならびに、調査にご協力いただいた京都大学防災研究所水資源環境研究センター社会生態環境研究領域の方々に感謝する。

参考文献

- 河上将尊・渡邊康玄（2016）：河岸侵食に及ぼす交互砂州の影響に関する水理実験，土木学会論文集A2(応用力学), Vol. 72, No. 2, I_593-I_600.
- 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所（2019）：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説明資料（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
- 竹中秀夫・岡崎和樹・與田敏昭（2004）：旭ダムバイパス放流設備運用後の下流河川環境調査結果報告(中間)，電力土木，No. 309，pp. 112-116.
- 永多朋紀・渡邊康玄・安田浩保・伊藤丹（2013）：砂州地形に誘発された蛇行発達，土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1099-I_1104.
- 三鼓晃・大本雄二（2010）：ダム貯水池の濁水長期化対策及び堆砂対策を目的としたバイパス排砂システムの効果，大ダム，No. 210 (2010-1)，pp. 141-145.
- Auel, C., Kantoush, S.A., Sumi, T. (2016): Positive effects of reservoir sedimentation management on reservoir life - examples from Japan, International Symposium on “Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries”, Johannesburg, South Africa, © SANCOLD, ISBN 978-0-620-71042-8
- Barillier, A., Clutier, A., Aelbrecht, D., Garnier, A. (2018): Morphological restoration of the Rhine River downstream Kembs Dam through bank erosion and sediment injections: design studies, field implementations and first lessons learned after a few

- years, Twenty-Sixth International Congress on Large Dams, 4th - 6th July 2018, Vienna, Austria, Q.100 - R.15, pp.229-249.
- Ishida, K., Sakurai, T., Sumi, T. (2019): Operation results of the Koshiu Dam sediment bypass tunnel completed in 2016, Conference Proceedings of the Third International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, April 2019, Taipei, Taiwan.
- Kashiwai, J., Kuimura, S. (2015): Hydraulic examination of Koshiu dam's intake facilities for sediment bypass, Proceedings of the First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, ETH Zurich, VAW Mitteilungen 232 (Boes, Ed.), pp 45-53.
- Kobayashi, S., Fukuroi, Takemon, Y. , H., Sumi, T. (2017): Invertebrate community changes in the downstream of dam after the operation of sediment bypass tunnel, In Proceedings of the second International Workshop on Sediment Bypass Tunnels (T. Sumi ed.), FP23, Kyoto University, Kyoto, Japan
- Kobayashi, S., Fukuroi, H., Sumi, T., Takemon, Y. (2018): Sediment derivation of bypass tunnel restores downstream environment. Twenty-Sixth International Congress on Large Dams, 4th - 6th July 2018, Vienna, Austria, Q.100 -R.28, pp.454-473.
- Nakajima, H., Otsubo, Y., Omoto, Y. (2015): Abrasion and corrective measures of a sediment bypass system at Asahi Dam, Proceedings of the First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, ETH Zurich, VAW Mitteilungen 232 (Boes, Ed.), pp 21-32.
- Sumi, T. (2015): Comprehensive reservoir sedimentation countermeasures in Japan, Proceeding of the First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, ETH Zurich, VAW Mitteilungen 232, pp. 1-20.
- Takeuchi, H., Ishida, K., Hayashi, M., Wakahara, C. (2017): In Proceedings of the second International Workshop on Sediment Bypass Tunnels (T. Sumi ed.), FP6, Kyoto University, Kyoto, Japan
- Vischer, D.L., Hager, W.H., Casanova, C., Joos, B., Lier, P. and Martini, O. (1997): Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation, Q74-R37, in Proceeding of the 19th ICOLD Congress, Florence, Italy, pp. 605-624.

(論文受理日：2019年6月17日)