特集報文：ダム技術の今後の展開

流砂の連続性確保(1)
～土砂還元・通砂の実現事例の考察～

宮川　仁・髙田翔也・石神孝之

1. はじめに

沖積河川は、上流から供給された土砂（以下「流砂」という。）が粒径集団別に分級堆積しセグメント別の河道を形成・維持する。検討対象の河床や地形に有意な構成材料として分級堆積する粒径集団を「有効粒径集団」と呼び[1]、その土砂動態(図-1　流砂フラックス図)[2]を理解することで河床低下区間や堆積区間など流砂系全体の特徴を把握できる。

貯留型ダムでも流入する流砂が分級堆積するので、貯水池や上流河道への影響を考慮して掘削・河道還元、通砂、土砂バイパスできれば貯水池の長寿命化と上下流河道等の管理に有益となる。

本報文は、土砂還元・通砂の意義とその実現事例を紹介する。既往文献等を基に相模川、耳川、黒部川のダムからの土砂還元・通砂事例を取り上げ、実現に至った背景や秘訣等を考察する。

2. 流砂の分級堆積と土砂還元・通砂の意義

流砂を伴う洪水流が河口や湖沼等の静水域に突入すると急激に流速を減じ、流砂も流れの変化に伴い、運動形態が変化して分級堆積する。ダム貯水池でも流入部の静水域を中心に分級堆積する。

流砂の運動形態と分級堆積の機構を大まかに説明する。礫は河床上を転動しつつ流下する掃流形態の流砂なので、貯水池に流入後、移動限界流速以下に減速する場所で停止し、そこより上流側に動的平衡勾配を形成しつつ堆積する。その量が多いと貯水池上流河道の河床を上昇させる場合もある。砂は、水深方向に濃度差を持つ浮遊砂的運動形態（図-2左）で貯水池に流入し掃流形態に近い運動形態に変化、または濃度差が小さいウォッシュロード的運動形態（図-2右）で貯水池に流入し浮遊砂的運動形態に変化し分級堆積する。その結果、貯水池内流入部を中心にデルタを形成・前進させる。シルト・粘土は水深方向の濃度差がないウォッシュロードとして流入し貯水池内で混合・拡散する。沈降速度が小さいため放流口に到達すれば下流に供給され、到達しないものは貯水池全体に沈降・堆積する。貯留型ダムの下流河道は、通常、掃流形態の流砂は流下せず、浮遊砂的運動形態の流砂の流下量も減少するため、流砂連続性は確保されない場合が多い。

貯水池で（特に流入部上下流に）分級堆積する土砂は下流河道や海岸の有効粒径集団を含む。これら有効粒径集団を下流に還元することで河道や砂浜の保全・復元に寄与し、貯水池容量の持続的な維持・管理にも資するので、土砂還元・通砂に取り組む意義は大きい。

以降の事例紹介では、分級を意識していない土砂堆積や分級の意図を含む有効粒径集団の流砂堆積は「堆積」、分級を意識することが重要な流砂堆積を「分級堆積」と表記する。

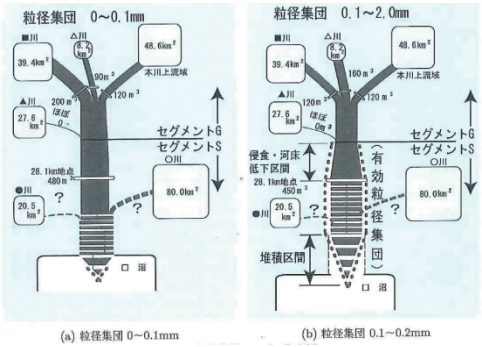


図-1　粒径集団別流砂フラックス図[2]

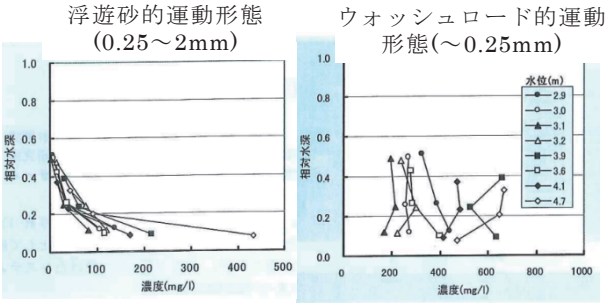


図-2 粒径集団別流砂濃度鉛直分布(木津川例)[2]

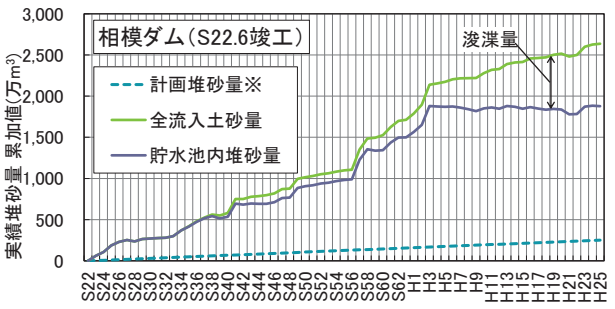
Feedback of Sediment Fluxes (1): Case Studies on Sediment Feedback and Sediment Sluicing in Dam Reservoirs

3. 土砂還元・通砂の実現事例

3.1 相模川－相模ダム浚渫土砂の海岸への還元－

相模川は、山梨県と神奈川県を流下し相模湾に注ぐ、幹川流路延長109km、流域面積1,680km²の一級河川である。相模川では昭和15年から河水統制事業の一環として相模ダム（水道用水・工業用水・発電）の建設に着手し、戦争を挟み昭和22年に完成した後、嵩上げ・導水による増強を経て[3]相模川・神奈川県の利水の要となっている。

相模川は、河道部において昭和30年代に大量の砂利採取による河床低下が生じ、その後、横断構造物下流における洗堀、土丹の露出、樹林化等の土砂環境に係る課題が存在している[4]。海岸域では河口部や沿岸施設の設置とあいまった侵食により、砂浜消失に伴う防災・レクリエーション上の弊害が生じており、砂浜を復元する海岸保全が目標となっている[4]。相模ダム貯水池の堆砂量の推移を図-3に示す。昭和62年度から浚渫船を導入し年間10～15万m³浚渫し、平成5年度から上流域の災害防止とダム機能の維持を目的に浚渫船団を2台に増強し年間25万m³浚渫した[3]。平成22年度からは、洪水時の上流域の安全性を維持できるようになったことから船団を1台に戻している[3]。



※堆砂が一定のペースで進み、100年後に計画堆砂量に達すると想定して引いた

図-3 相模ダムの堆砂状況[3]

図-4 相模川、相模ダムと浚渫土砂養浜位置

相模ダム貯水池浚渫土砂は、海岸域の有効粒径集団を含むことから、海岸侵食対策の一環として浚渫土砂の一部をダンプトラックで運搬し茅ヶ崎海岸中海岸地区の養浜材として利用している（図-4）。費用は協定を締結し海岸管理者(神奈川県)とダム管理者(神奈川県企業庁）で折半している[5]。貯水池浚渫土砂を活用した養浜は平成18年から実施され、汀線を概ね回復できている。

相模川では、海岸の有効粒径集団が河床の有効粒径集団より小さく、洪水時に河床材料と有意に混合せず通過することに着目し、浚渫土砂を相模川に置き砂する取組も行っている[4]。平水時の流出や濁水発生を防ぐため、粒径の小さい浚渫土砂を現地河床材料（砂・礫）で囲い、小規模洪水時に置き砂が流出して取水堰機能に影響しないよう工夫している[4]。

これら土砂還元実現の秘訣として、山・川・海の連続したなぎさづくりを目標として、河道内の土砂環境が課題である河川管理者、海岸侵食対策の養浜材料土砂を必要とする海岸管理者、同一水系にあり浚渫土砂の処理が課題であるダム管理者の三者の課題や必要性が適合したことで調整が円滑に実施できたことをあげることができる。

海岸保全では砂浜の機能を重視する地域の共通認識が醸成されたことが挙げられる。養浜材の流出時に発生する濁りに対し難色を示しがちな漁業関係者が、多少の濁りは魚が隠れられるポジティブな環境であると理解されたことが大きい[6]。このために、海岸管理者が養浜材の粒径等の具体的データを示しつつ、漁業関係者に対し濁りは出うる前提での試験施工を行い実証するなどの努力により信頼を獲得した経緯があった[6]。

3.2 耳川－発電ダムの堤体切下げ等による通砂－

耳川は宮崎県北部に位置し、その源を東臼杵郡椎葉村の三方山に発し支川を合わせ日向灘に注ぐ、流域面積884.1km²、幹川流路延長 94.8kmの宮崎県有数の二級河川である。古くから水力発電の適地として発電ダムが8ダム（(上椎葉ダム、山須原ダム、西郷ダム）存在する九州最大の電源河川である[7]。

平成17年台風14号時の既往最大洪水で、山崩れ等による大量の土砂が河道や貯水池に流入して河床が上昇したこととあいまって、流域市町村で浸水被害が発生した。特に山須原ダム貯水池上流

に位置する諸塚村の中心部では、壊滅的な被害が発生し、この原因の一つが河床上昇であった。

再度災害の防止・軽減対策として、河川管理者の宮崎県が河道掘削や宅地嵩上げ、輪中堤整備を行う土地利用一体型水防災事業による治水対策を実施するとともに、九州電力㈱が耳川に設置している図-5に示す山須原ダム等で堤体を切下げて通砂機能を付加するダム改造（図-6）や操作運用の変更を行うことで流砂の分級堆積による河床上昇をさせないダム通砂運用を実施している[8]。

ダム通砂運用は図-7のように台風による大規模出水が予想される場合に事前に貯水位を低下させ、貯水池が水面勾配をもち掃流力を高める（川の状態とする）運用で、洪水時に流入する流砂がダム・貯水池を通過することで河床上昇しなくなる。

図-8に示すように平成29年度よりダム通砂運用の準備が整った西郷ダム、大内原ダムで連携通砂を開始し、令和3年度からは山須原ダムも準備が整ったことから、当初予定していた3ダム連携通砂を開始している。

このダム通砂運用が実現した秘訣は、災害発生直後に再度災害防止・軽減に向け、河川管理者と九州電力㈱で協力体制を作ったことが挙げられる。河川管理者は治水対策を、ダム管理者の九州電力㈱はダム通砂運用を可能とする改造事業などを、5回にわたる技術検討会の開催や総合土砂管理計画を策定する取組を経つつ実施した。

ダム通砂運用の効果を予測するため、九州電力㈱は表-1に示す条件のもと、山須原ダム上流から河口までの全長約58kmにわたり一次元河床変動解析を実施した。

図-9に山須原ダム貯水池の縦断河床形状の予測結果[9]を、図-10にダム通砂運用下における山須原ダム貯水池上流から河口までの土砂収支[9]について、粒径集団毎に整理した結果を示す。

将来のダム貯水池の河床形状は、ダム通砂運用前のままでは、今後もダム貯水池に砂礫が堆積し河床が上昇する。一方、ダム通砂運用を行う場合、貯水池上流の砂礫が下流に引き込まれることにより、貯水池上流河床は現行よりも低下する形状で33年後に安定化する。通砂運用により、貯水池上流端上下流での洪水時の急激な河床上昇に伴う浸水リスクの軽減が期待できる。

通砂運用によりダム下流に供給される砂礫は、下流河川の河床や沿岸域の有効粒径集団であることから河床低下や海岸侵食を抑制するとともに、河原の洗浄効果の促進などによる生態系を含む水域環境の健全化に寄与することが期待される[9]。

現在、通砂による河川環境のモニタリングおよび評価がなされており令和2年度時点の土砂に係る問題・課題の評価は大きな変動は見られない[8]。また、通砂の効果や影響は出水規模や頻度等によって変化するため、分析・評価に向けたモニタリングを継続している[8]。

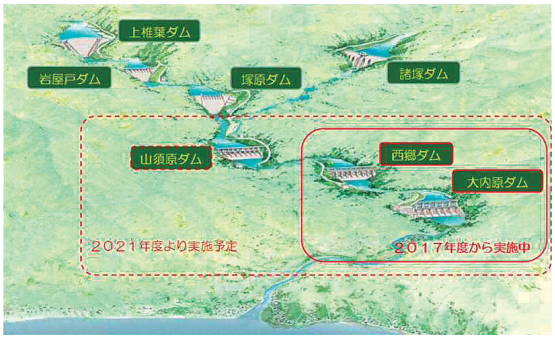


図-5　耳川水系のダム位置図[8]

山須原ダム改造工事概要

西郷ダム改造工事概要

図-6　ダム改造工事概要[8]

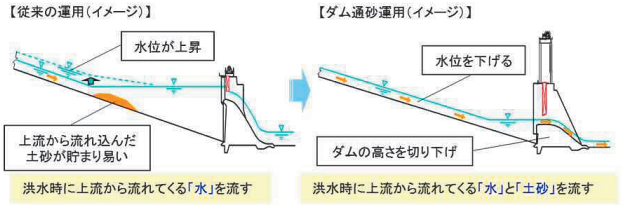


図-7　ダム通砂運用のイメージ[8]

3.3 黒部川　－河床部排砂設備連携排砂・通砂－

黒部川は、富山県と長野県の県境の鷲羽岳に発し黒部市愛本に至った後は扇状地を流下、日本海に注ぐ、幹川流路延長85km、流域面積682km²の一級河川である。黒部川には、5つの発電目的の利水ダム（黒部ダム、仙人谷ダム、小屋平ダム、

図-8 西郷ダムでの通砂状況[8)]

表-1 検討条件[9)]

検討条件			山須原ダム上流	西郷ダム上流	大内原ダム上流	大内原ダム下流河川	備考
初期河床条件			平成17年台風14号災害後の測量河床				
河川流量条件			平成6年～平成16年における各ダム地点の実績流量				
計算終了条件			ダム貯水池の安定河床化が確認されるまで、計算を継続				本検討では、計算33年後に安定河床化を確認
流入土砂量条件	当初10年間 ($m^3/km^2/年$)		1,092	1,056	791	791	平成17年台風14号災害後の崩壊地面積比率に基づき設定
	11年目以降 ($m^3/km^2/年$)		606	742	521	521	崩壊地の復旧、緑化等が進み、平成17年台風14号災害以前の流入土砂量に落ち着くと想定
水位条件	Case1	現行運用ケース	ダム運用実績を反映				
	Case2	ダム通砂運用ケース	実績流量を用いて、各ダム地点の流量が200m^3/sを超える間はダム通砂運用（全門フリーフロー操作）を実施する場合の水位を算定				山須原ダム、西郷ダムはダム改造後の形状を反映

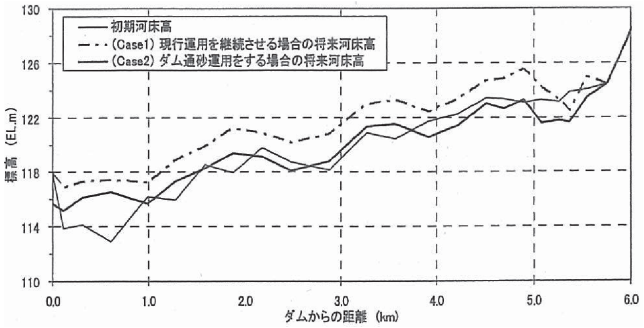


図-9 河床変動解析結果（山須原ダム）[9)]

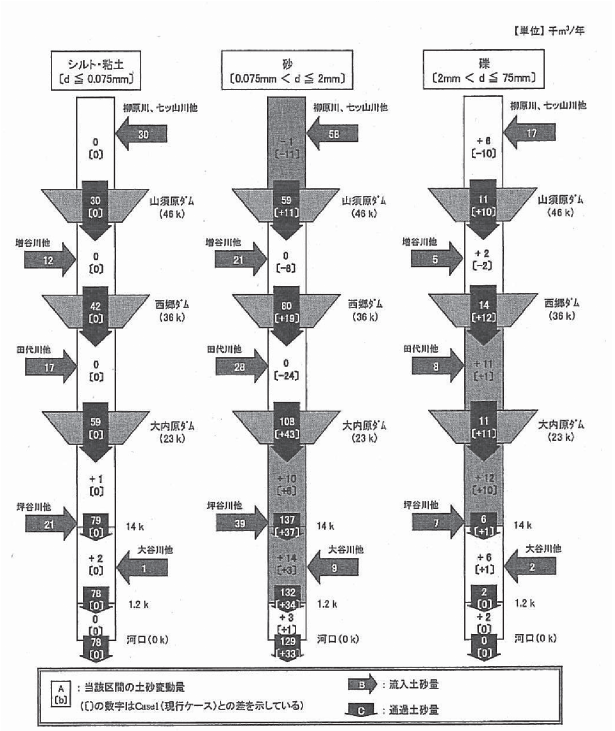


図-10 通砂運用(Case2)収支算定結果[9)]

出し平ダム、北又ダム）と1つの洪水調節を含む多目的ダム（宇奈月ダム）が整備されている[10)]。

黒部川は全国でも有数の流出土砂の多い河川で、ダムではその対応の1つとして、関西電力の本川の最下流に位置する出し平ダムとその下流約7kmに位置する国土交通省の宇奈月ダムにおいて、建設時から堆砂容量による対処が合理的でないと判断し、貯水池に流入・堆積する土砂を下流に流下させることができるよう工夫した排砂設備を設け、出し平ダムは平成3年に排砂を開始し、宇奈月ダム完成後の平成13年からは、両ダムによる連携した排砂を開始している。

両ダムの排砂設備の運用にあたっては、利水や治水それぞれの機能を適確に維持しながら、黒部川の上流から下流、そして海岸まで含めた流域全体を考慮して、排砂・通砂による環境影響をできるだけ軽減するように、出水後期に行う連携した放流操作（連携排砂・通砂）を実施している[11)]。

なお、「排砂」とは当該年度最初に実施する排砂設備を用いた放流であり、その後に実施する排砂設備を用いた放流は「通砂」という[11)]。つまり「排砂」とは前年度最後の連携排砂・通砂の後に堆積した土砂の放流で、堆積した土砂の還元反応の進行による変質の可能性の有無を明確にした用語の区別といえる。現場では「排砂」「連携排砂」という用語を用いるが、実施している本質的内容は「通砂」もしくは「排砂・通砂」であることから、本報文は以降、「排砂・通砂」を用いる。

図-11に宇奈月ダムでの通常時（排砂・通砂前）と排砂・通砂中の状況、ダム下流の排砂・通砂中の状況を示す。図-12に連携排砂・通砂の仕組みを示す。通常時はダムは水を貯留するが、一定規模の中小洪水が発生した際の洪水後期に、ダムの貯水位を低下させて、背水の影響を受けない自己流区間を長くする。自己流区間では掃流形態の河床材料有効粒径集団の流砂移動が促進され、堤体近くまで流れるようになる。

一定の貯水位になると排砂・通砂設備を開放し、排砂・通砂設備内を管路流から開水路流とすることで、貯水池全域を堰上げ背水の影響がない自己流区間とし掃流力を高め、河床材料有効粒径集団も掃流形態の流砂としてダムを通過させる。

排砂・通砂終了後は貯水位を回復させ、一定時間、流入量の全量を放流する操作を2ダムが連携

図-11 排砂・通砂の状況

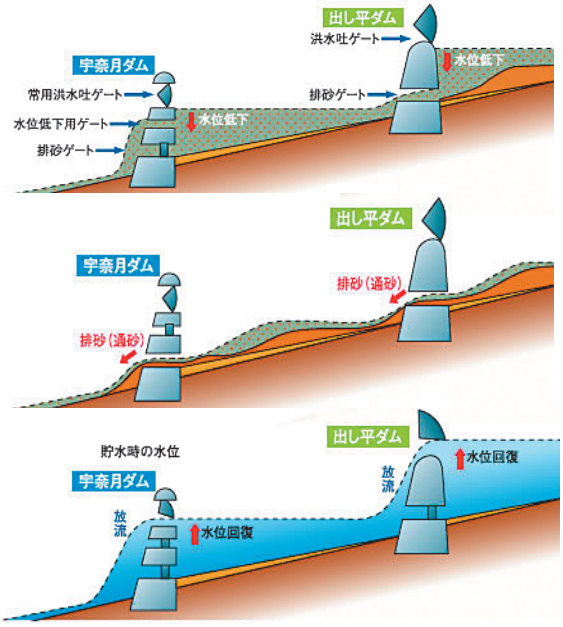


図-12 連携排砂の仕組み[12)]

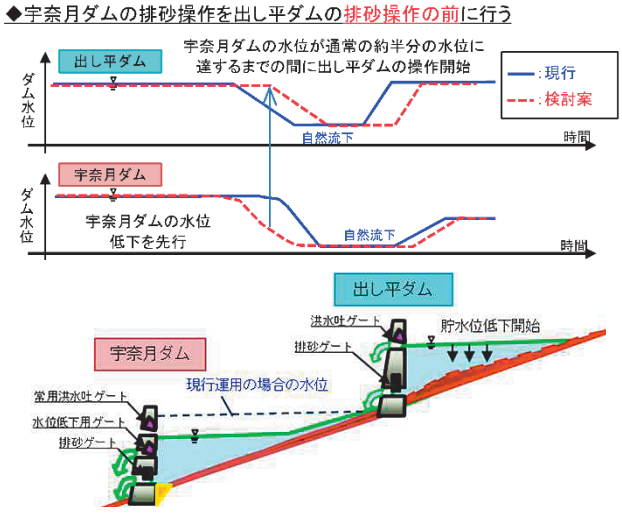


図-13 先行操作運用のイメージ[13)]

して行う[11)]。この放流は、排砂・通砂時にダム下流河川に堆積した細粒土砂を水位回復後の放流によって流し、河床の局所的な堆積や濁り成分の堆積を抑制することで、排砂・通砂直後の濁りを早期に解消する狙いがある。

宇奈月ダムと出し平ダムによる連携排砂・通砂は、環境に配慮しながらダム下流河川及び海岸の有効粒径集団を供給することで、河床低下の抑制、河口西側海岸の砂浜の保全回復などに効果を発揮しつつ、貯水池容量を安定的に確保している[13)]。

平成13年から続けられてきた連携排砂・通砂を、さらに宇奈月ダムから河口までの土砂動態がより自然に近い形となることを目指し工夫する取り組みが令和2年度から始まった（図-13）[13)]。同時に行っていた出し平ダムと宇奈月ダムの排砂・通砂運用操作を、宇奈月ダムを先行させることで大粒径流砂の流下促進が期待される。

黒部川では下流河川や沿岸域だけでなく、深海まで含めた環境調査も行われ、連携排砂・通砂による影響のモニタリングが行われている[13)]。

3.4 考察

土砂還元・通砂の実現のためには、まず、ダム貯水池側で掘削・浚渫・通砂を必要とする状況がある。相模川や耳川では貯水池への土砂堆積量が想定より大きく掘削や浚渫を実施していた。黒部川では堆砂容量による対処が合理的でなく排砂・通砂設備を計画した。耳川では豪雨災害による氾濫被害を受け、度重なる浸水被害に対する行政やダム管理者に対する地域住民の不信感増大[14)]が抜本対策へ舵を切るきっかけの1つとなった。

また、土砂還元・通砂の悪影響を懸念するステークホルダーの理解・信頼の獲得も必須である。紹介事例では、相模ダムの浚渫土砂の養浜還元利用により影響を受ける可能性がある漁業関係者、耳川のダム通砂運用が影響する可能性がある下流河道や沿岸域の関係者、黒部川の連携排砂・通砂が影響する可能性がある下流河道及び沿岸海域関係者がステークホルダーである。

相模川では、養浜を行う海岸管理者とステークホルダーの信頼関係の醸成が土砂還元の実現に大きく貢献した。

黒部川の連携排砂・通砂では、出し平ダムの最初の排砂運用で生じた当時の知見では想定できなかった堆積土砂の還元反応の著しい進行、下流域

のDO、BOD、SSなどの環境指標の想定を超えたことにより生じたステークホルダーの懸念を克服し理解・信頼を得るための努力が続けられている。

技術的には予測技術や試験実施後のモニタリングによってステークホルダーの懸念を払しょくする実証が重要となる。実証には、土砂還元・通砂の実施前や自然状態におけるダイナミズムや幅を把握・理解する必要があり、そのためにはこれらに関する計測データが基盤となることは巻頭言で触れられている。

事後の実証で信頼を得るには、推定モデルで将来計測する変動幅を予測し、実測したデータとの差分をステークホルダーに示し続け、精度を実感してもらい、差分が生じる場合は理由・考察を粘り強く説明し続けることなどがポイントと考える。

土砂還元・通砂はダム管理者のみでは実現できず、土砂の還元先（河川管理者・海岸管理者等）との連携が必須である。この連携を促進する基盤として、総合土砂管理計画の存在意義は大きい。相模ダム浚渫土砂による養浜還元や黒部川での連携排砂・通砂では取組が先行する中で、総合土砂管理計画が作成され、その後の継続や改善の基盤となった。耳川のダム通砂運用のためのダム改造では、県による総合土砂管理計画の作成が、改造の検討と同時並行もしくは先行する形で作成され、実現の根拠として機能を果たした。

4. おわりに

本報文は、貯留型ダムにおける土砂還元・通砂の実現事例と考察を述べた。土砂還元・通砂は流砂系における治水・利水・環境のバランスを保ちながら河川や海岸を持続可能な形で保全していく上で重要であり、本報文が現場の土砂還元・通砂の実現に向けた参考となることを期待する。

参考文献

1) 例えば、藤田光一ら：水系土砂収支分析のための「有効粒径集団」の考え方の提案、土木技術資料、第37巻、第12号、pp.34～39、1995.12
2) 例えば、国土交通省河川局治水課他：水系一貫土砂管理に向けた河川における土砂観測、土砂動態マップの作成及びモニター体制構築に関する研究、土木技術資料、第44巻、第4号、pp.26～31、2002.4
3) 神奈川県企業庁：「相模ダム70年の歩み」
4) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所ホームページ：相模川流砂系総合土砂管理計画、2015.
5) 佐々木常光：神奈川県における事前防災の対応と対策、海岸、Vol.57、pp.15～19、2020.
6) 吉岡敦：養浜による濁りの認識をChange!、海岸、Vol48No.2、pp76～80、2009
7) 宮崎県ホームページ：耳川水系総合土砂管理計画、2015.
8) 宮崎県ホームページ：耳川水系総合土砂管理に関する評価・改善委員会中間報告書、2021.
9) 朝崎勝之、加来睦宏、山上裕也：ダム貯水池における堆砂問題とその対策（第6回）－耳川水系での取り組み―、電力土木、No.360、pp.115～pp.118、2012.7.
10) 国交省北陸地方整備局黒部河川事務所ホームページ：黒部川水系河川整備計画、2010.
11) 国交省北陸地方整備局黒部河川事務所ホームページ：黒部川出し平ダム宇奈月ダム連携排砂のガイドライン（案）、2018.
12) 関西電力ホームページ、黒部川とダムが共存するための技術”排砂”
13) 国交省北陸地方整備局黒部河川事務所ホームページ、第52回黒部川ダム排砂評価委員会資料、2020.
14) 宮崎県日向土木事務所・九州電力株式会社 耳川水力整備事務所：耳川水系総合土砂管理計画を通じた川づくり　耳川をいい川にする～森林とダムと川と海のつながり～、平成30年度全国多自然川づくり会議発表資料、https://www.mlit.go.jp/river/kankyo/main/kankyou/tashizen/pdf/h30_3_5.pdf

宮川　仁

土木研究所つくば中央研究所
水工研究グループ水理チーム
主任研究員
MIYAKAWA Masashi

髙田翔也

土木研究所つくば中央研究所水工グループ水理チーム　研究員
TAKATA Shoya

石神孝之

土木研究所つくば中央研究所
水工研究グループ水理チーム
上席研究員
ISHIGAMI Takayuki