

# 出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂時の土砂動態に関する研究

鈴木 航平<sup>1</sup>・福岡 捷二<sup>2</sup>・内堀 伸吾<sup>3</sup>・大坪 祐介<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a14.8ffp@g.chuo-u.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー 中央大学研究開発機構 (同上)

E-mail: sfuku @tamacc.chuo-u.ac.jp

<sup>3</sup> 国土交通省 北陸地方整備局 黒部河川事務所

E-mail: uchibori-s84jr@mlit.go.jp

<sup>4</sup> 関西電力(株) 水力事業本部 黒部川水力センター

E-mail: otsubo.yuusuke@c2.kepco.co.jp

黒部川の宇奈月ダム、出し平ダムでは、ダムの機能維持、下流河道の河床低下防止、海岸侵食軽減等を目的に連携排砂が行われ、河床低下や海岸侵食の回復が見られるようになってきた。しかし今なお一部区間の河床低下や大粒径材料の不足が進行しており、治水・環境上の課題となっている。そのため、連携排砂機構を適切に理解し河川管理に活かす必要がある。本文では、出し平ダムからの洪水流ハイドログラフと排砂量グラフを考慮した貯水池河道モデルを構築し、複雑な貯水池-河川システムにおける連携排砂時の土砂移動機構について検討を行った。その結果、出し平ダムのゲート操作の各時間帯によって出し平ダム直下流で異なる土砂移動特性を示し、連携排砂時には最大 300mm 粒径を含む 50mm-100mm の粒径集団が多く通過することが分かった。

**Key Words:** *coordinated sediment flushing, Kurobe River, bed variation, sediment discharge, sediment behavior*

## 1. 序論

黒部川流域は日本有数の急流河川であり、土砂の生産量が非常に多いことから、流砂系一貫の総合土砂管理計画を検討中の河川である。黒部川流域の下流に位置する宇奈月ダム(多目的)、出し平ダム(発電)では、平成 13 年以降、ダムの機能維持、下流河川の河床低下、海岸侵食軽減等を目的に連携排砂が実施されている。連携排砂とは図-1 に示すように洪水発生時に宇奈月ダム(国土交通省)とその約 7km 上流の出し平ダム(関西電力)が、連携したダム操作により、ダムに堆積した土砂や洪水による流入土砂を宇奈月ダム下流河道へ排砂するものである。河床低下や海岸侵食の回復が見られるようになってきたが、今なお一部区間の河床低下や大粒径材料の不足が進行しており、治水・環境上の課題を有している。

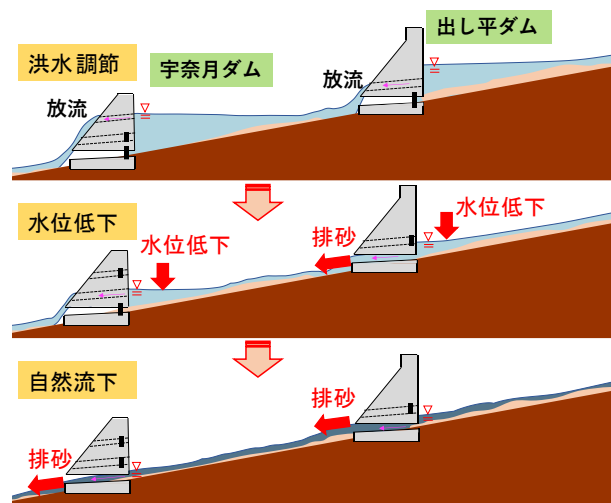


図-1 連携排砂の概念図

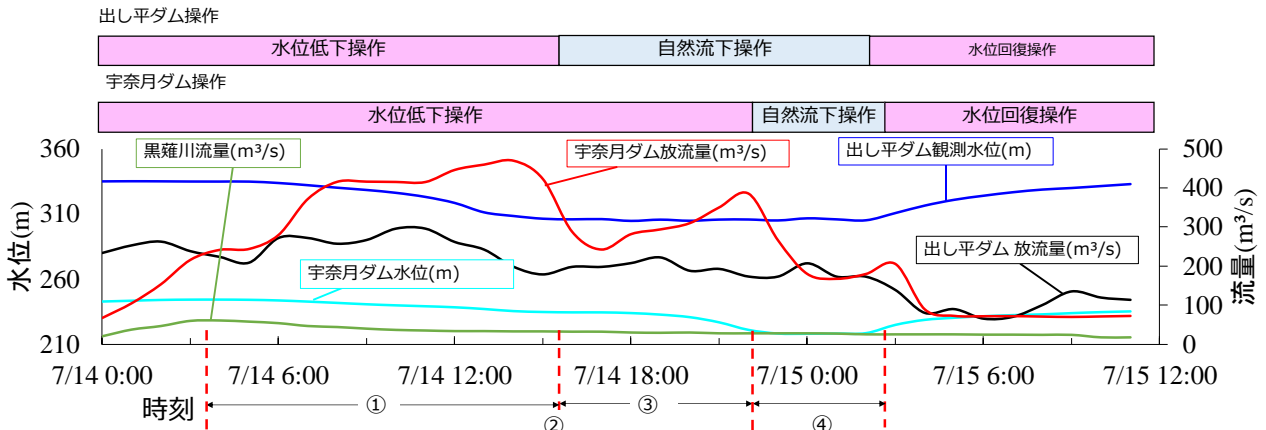


図-2 宇奈月ダム，出し平ダム水位ハイドログラフ，流量ハイドログラフ

その主要な要因として，粗い粒径集団のダム貯水池での捕捉が挙げられる。排砂は有効な解決手段であるが，貯水池-河道システムにおける，排砂機構を適切に理解し，河川管理に活かす必要がある。

宇奈月ダム，出し平ダムでは，幾つかの現地観測，解析的検討がなされている。現地観測では，角ら<sup>12)</sup>は，3D レーザースキャナを用いて宇奈月ダム貯水池の連携排砂時に見られる堆積土砂の侵食・堆積現象の観測を行い，宇奈月ダム水位低下時には宇奈月ダム貯水池内で流路が分岐しながら流下し，自然流下時には，水面上に現れている砂州が間欠的に側岸侵食を受けて下流へ移動することを示している。南ら<sup>13)</sup>は，宇奈月ダム，出し平ダムと下流河川を一体とした一次元河床変動解析モデルを構築し検討を行い，ダム直下区間や下流区間など，区間によって流出土砂の伝播特性が異なることを示している。また，Taymaz ら<sup>14)</sup>は，三次元洪水流河床変動モデルを構築し，出し平ダムを対象に連携排砂の再現計算を行い排砂効率向上の提言をしている。しかし，観測データが十分得られていないこともあり，連携排砂の機構解明には課題が残されている。

本文では，連携排砂前後の宇奈月ダム，出し平ダム貯水池の河床変動データを用い，複雑な土砂移動現象を適切に再現できるように境界条件や初期条件，パラメータ等を設定し，解析できる洪水流河床変動モデルを構築する。そして，両ダム連携排砂時の各時間帯，各粒径の流砂量や河床変動量等から宇奈月ダムにおける土砂流動特性を明らかにする。

## 2. 解析条件と検討方法

### (1) 解析条件

図-2 は，H26 年洪水連携排砂時の両ダムのダム操作の

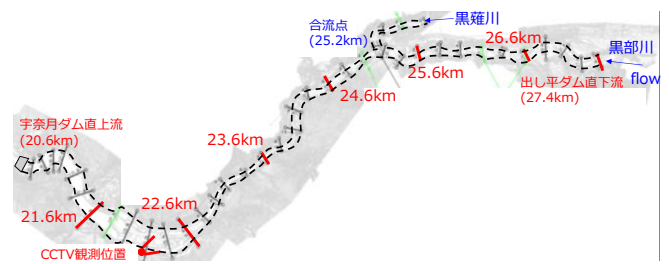


図-3(a) 解析区間

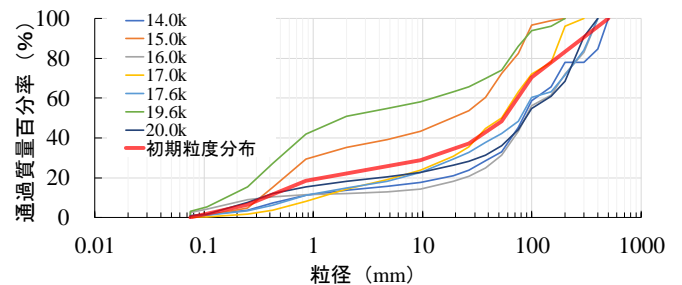


図-3(b) 解析に用いた粒度分布

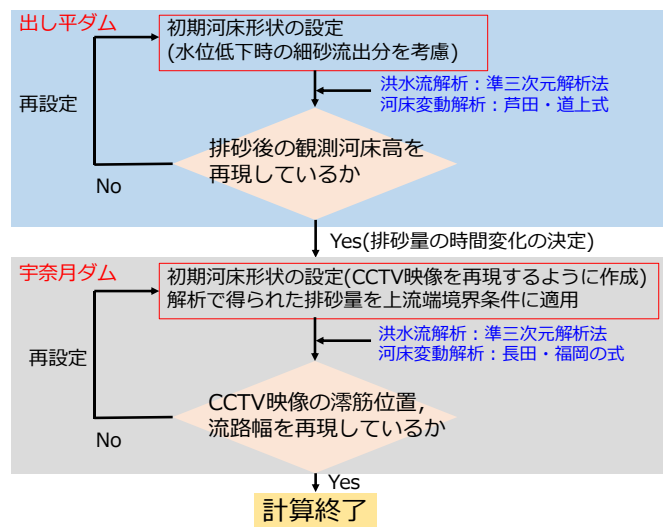


図-4 出し平ダム，宇奈月ダム土砂動態解析手順

時間帯と水位ハイドログラフ、放流量ハイドログラフを示す。本洪水での宇奈月ダムにおけるピーク流入量は約300m<sup>3</sup>/sであり、比較的流量規模の小さい洪水での連携排砂である。解析区間は、図-3(a)に示す出し平ダム直下流(27.4km)から宇奈月ダム堤体直上流(20.6km)までとし、25.2kmで支川黒灘川が合流している。宇奈月ダム洪水期制限水位時には、貯水池湛水上流端は22.8km付近にある。河道の粒度分布は図-3(b)に示す、宇奈月ダム下流河道(14.0km-20.0km)区間で採取されたものを平均し一様与えた。宇奈月ダム貯水池内の土砂動態の検討には、その7km上流にある出し平ダムからの流量ハイドログラフ、排出土砂量グラフを考慮する必要がある。図-4に出し平ダムと宇奈月ダムの土砂動態解析方法の手順を示し、以下にその詳細を示す。

## (2) 出し平ダムからの排砂量グラフの求め方

図-2中の①、②、③、④の時間帯は出し平ダムにおける、①排砂ゲートを開け水位を低下している時、②水位低下を終え、自然流下に移行する時、③④自然流下時の時間帯を示している。出し平ダム貯水池内の横断面形状は、排砂前と排砂後しか観測されていない。本研究では、排砂前後の出し平ダム貯水池縦横断面を用いて以下のように解析した。例として、解析に用いた出し平ダム堤体から約1.3km(No.7)、0.8km(No.5)上流の貯水池内の排砂前、水位低下操作時、排砂後の横断面を図-5(a)、(b)にそれぞれ示す。図-5(a)、(b)の黒のハッチ部には排砂前には細砂を中心とする土砂が多く堆積している。①の時間帯では黒のハッチ部の細砂が、洪水時の流量に応じて洗掘、輸送され排砂される。一方、粗礫は細砂の輸送と共に貯水池底に沈降、堆積する。そして②の時間帯に近づくに従い、貯水池が自然流下状態になり掃流力が増大し貯水池底部の粗礫を中心とする土砂が下流に排砂される。連携排砂前後の断面変化量は、①の時間帯に主に細砂が洗掘・輸送されると考え、黒点線で示す河床高を水位低下操作開始時の河床とした。また水位低下操作開始時の河床高は、解析後の河床が実測で得られた排砂後の河床高を再現するように設定している。粗粒土砂はこの黒点線河床高から移動し始めるとして、山地河川の洪水流解析に適した竹村・福岡の準三次元解析法<sup>9)</sup>を用いて宇奈月ダムにおける境界条件となる解析を行った。排砂量グラフの解析結果を図-6(a)、(b)に示す。粗礫は最大で300mmが排砂されており、出し平ダムが自然流下状態に近づくにつれ、粗粒土砂のピーク排砂量状態が続くことが分かる。

出し平ダム直下流では、黒部河川事務所によって連

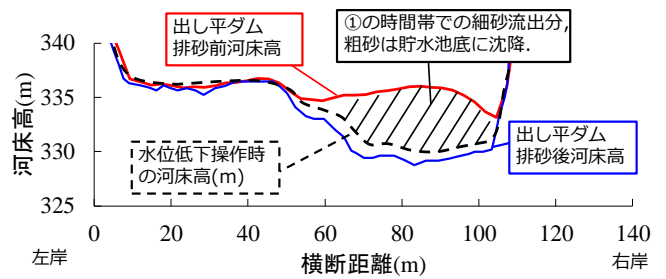


図-5(a) No.7断面

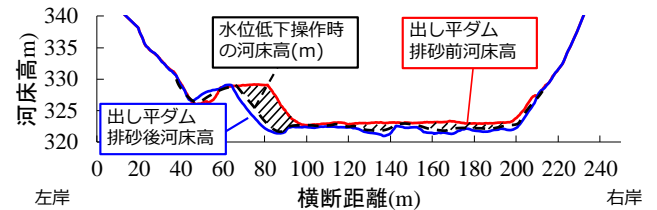


図-5(b) No.5断面

図-5 解析に用いた出し平ダム貯水池内の排砂前後の横断面と土砂流出の考え方

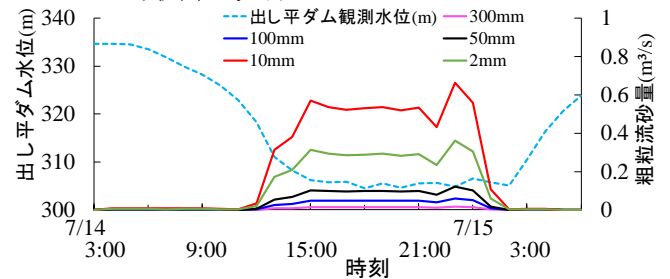


図-6(a) 出し平ダム粗粒排砂量グラフの解析値

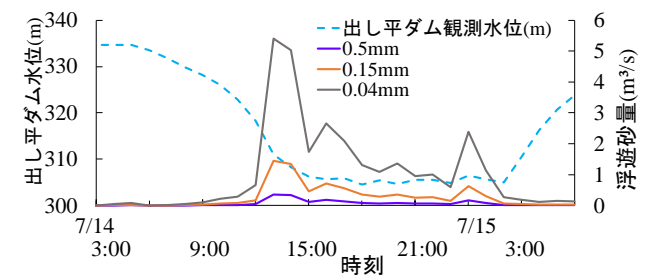


図-6(b) 出し平ダム細粒排砂量グラフ



図-7 7/15 4:40分に22.2km付近で撮影されたCCTV映像

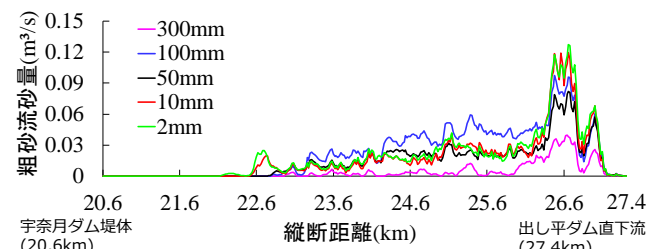


図-8 出し平ダム水位低下時(7/14 1:00時点)の宇奈月ダムにおける粗粒流砂量の縦断的な解析値

携排砂時に SS 濃度 [シルト(0.005mm~0.075mm), 細砂(0.075mm~0.25mm), 中砂(0.25mm~0.85mm)] が時間的に観測されている。図-6(b)は, 同年の連携排砂時 SS 濃度<sup>9)</sup>の時間変化をもとに, 細砂の総量が図-5(a),(b)の黒のハッチ部に一致するよう分布を求めたものである。出し平ダム水位が高い時は, 細粒土砂の排砂量は少ない。自然流下状態に入り滞筋を流れ排砂ゲートが開水路流になる直前でピークになり, その後は徐々に排砂量が落ちていく。これは, 既往研究<sup>7)</sup>で得られた結果と同様である。

### (3) 宇奈月ダムの土砂移動特性の検討方法

図-7は, H26年洪水における7/15 4:40分に22.2km付近で撮影されたCCTV映像を示している。この場所は洪水制限水位時の貯水池湛水域の上流端の直下流で川幅が広く, 大きな砂州の形成が見られる場所である。自然流下時は砂州の存在のため, 滞筋がほぼ固定化し, 水位回復時は小規模の流量であるため, 自然流下操作から水位回復操作の時間帯は中規模河床構造はあまり変化しない。そのため, 自然流下時の滞筋位置は連携排砂後に測量した横断面形状によく現れている。本研究では, CCTV映像から見られる滞筋の平面的な位置と連携排砂後に測量された横断面形を用いて初期河床形状を設定した。その他の河道区間は, 連携排砂前に200m間隔で測られた横断面を用いて初期河床形とした。

洪水流解析は, 複雑な河道特性に応じた洪水流計算に適した内田・福岡の準三次元解析法<sup>9)</sup>を用いた。出し平ダム下流で, 浮遊砂の最大粒径は0.25mmから0.85mmの中砂が観測されている<sup>9)</sup>。本研究では, 0.85mm以下の粒径が浮遊砂であると, 平面二次元移流拡散方程式, 浮遊砂濃度の鉛直分布式にLane-kalinske式, 浮遊砂の浮上量は板倉・岸の式をそれぞれ用い解析を行った。一方, 0.85mmより大きい粒径は掃流運動を考えると, 長田・福岡の二次元河床変動解析法<sup>9)</sup>を用いた。しかし, 浮遊砂, 掃流砂の区分については, 今後さらに検討する必要がある。

連携排砂量は, 二つのダムの操作の時間帯や貯水池水位低下時間などで大きく異なることから, 以下では, 図-2に示す, ①出し平ダム水位低下時, 宇奈月ダム水位低下時, ③出し平ダム自然流下時, 宇奈月ダム水位低下時, ④宇奈月ダム自然流下時, 出し平ダム自然流下時の3つの時間帯に分けて考察を行う。

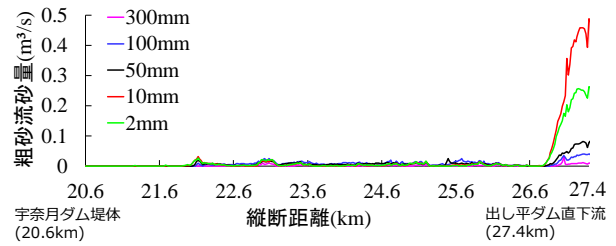


図-9(a) 出し平ダム自然流下時(7/14 16:00時点)の宇奈月ダムにおける粗砂流砂量の縦断的な解析値

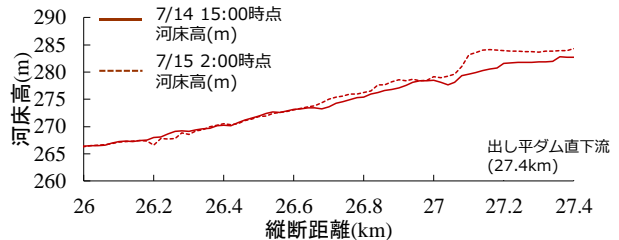


図-9(b) 出し平ダム自然流下前後での, 宇奈月ダムの河床高縦断の解析値

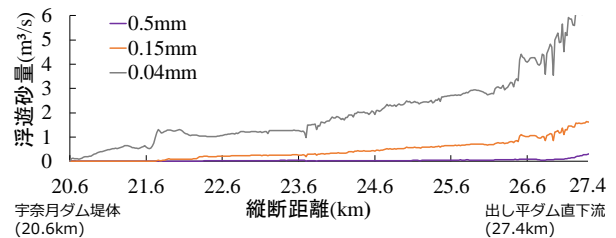


図-10 出し平ダム排砂浮遊砂量のピーク時(7/14 13:00時点)の縦断的な細粒土砂量の解析値

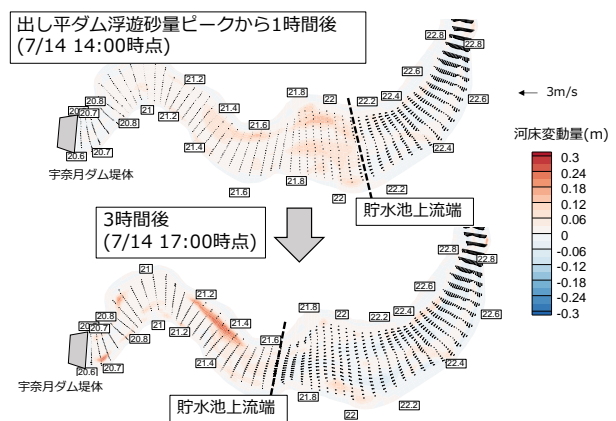


図-11 宇奈月ダム河床変動コンターの時間変化(解析値)

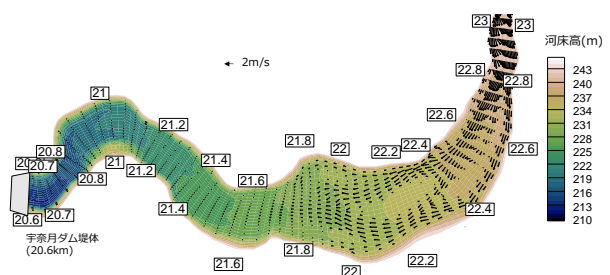


図-12 7/15 4:40分時点の宇奈月ダム河床高(解析値)



### 3. 解析結果と考察

#### (1) 出し平ダム:水位低下時, 宇奈月ダム:水位低下時

図-8 は, 出し平ダム水位低下時の宇奈月ダムの粗砂流砂量の縦断的な解析値を示す。①の時間帯は, 出し平ダムからの土砂の排出がほとんど無いのに加え, 水位低下中の出し平ダムからの放流量が多い。そのため, 出し平ダム直下流では, 河床が洗掘され土砂が下流に輸送される。また, 宇奈月ダム貯水池以外の区間では, 最大で300mm程度の粒径の土砂が移動し, その土砂が宇奈月ダム貯水池の背水の影響が強い箇所(22.6km付近)で堆積している。このことから, ①の時間帯は, 連携排砂開始前に出し平ダム直下流に堆積していた土砂が下流に輸送される時間帯である。

#### (2) 出し平ダム:自然流下時, 宇奈月ダム:水位低下時

図-9(a)は, 出し平ダム自然流下時のダム下流における粗砂流砂量の縦断的な解析値, 図-9(b)は自然流下前後の縦断河床高の解析値を示す。出し平ダム直下流では, 出し平ダムからの排砂の影響で流砂量が多く, 下流へ行くほど徐々に流砂量が低下する。

図-10 は, 出し平ダムからの排砂浮遊砂量のピーク時における粒径別細粒土砂縦断分布を示す。細粒土砂は, 河道区間(22.6-27.4km 付近)で緩やかな縦断勾配を有しており縦断的にほぼ一様に堆積する。また, 細粒土砂の中でも比較的細かい粒径(0.04mm)は, 宇奈月ダム堤体まで輸送される。図-11 は, 宇奈月ダム貯水池内における水位低下時の時間的な河床変動量の解析値を示す。細粒土砂は14:00時点では, 21.4km-22kmの右岸の水深の浅い箇所や22km-22.4kmの貯水池上流端で平面的に一様に溜まる傾向がある。17:00時点では, 貯水池上流端に堆積していた土砂は, 河道状態である自然流下時に再び浮上, 移動している。これより, 出し平ダムからの排砂により輸送されてきた細粒土砂は宇奈月ダムを通過し下流に輸送されていることが分かる。

#### (3) 出し平ダム:自然流下時,

##### 宇奈月ダム:自然流下時-水位回復時

図-12 は, 7/15 4:40分時点の宇奈月ダム貯水池河床コンターと水深平均流速ベクトルを示す。自然流下時-水位回復時に掛けては中規模河床はほぼ定まった形状をとるので, 図-7 に示されている形を再現するように河床高分布を与える。このことによって, 砂州が水表面上に現れ通水断面積が減ることにより主流速が早くなり, 土砂が貯水池内を通過しやすくなることが再現される。図-13 は, 宇奈月ダム自然流下時の流砂量の縦断形を示す。貯水池内の川幅が広がる区間(22.6km-22.2km)で, 粗粒

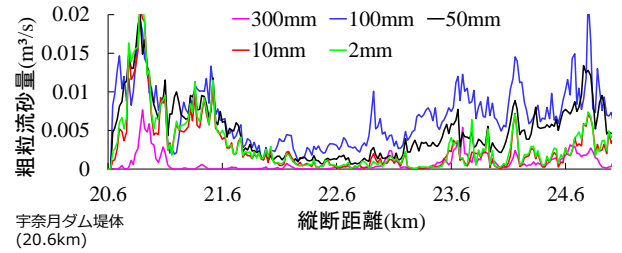
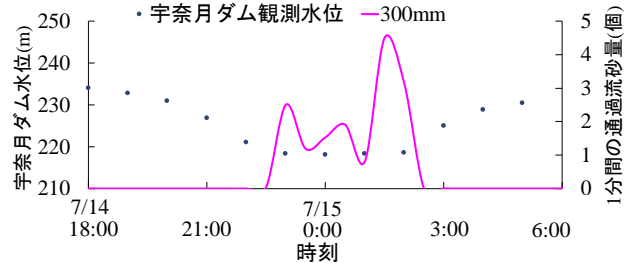
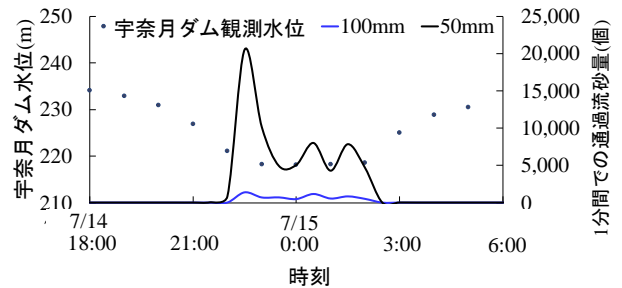


図-13 宇奈月ダム自然流下時(7/15 0:00時点)の流砂量縦断図の解析値



(a)300mm



(b)100mm, 50mm

図-14 宇奈月ダムを通過する粗粒土砂量グラフの解析値

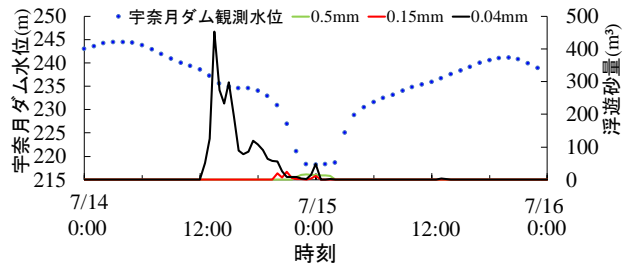


図-15 宇奈月ダムを通過する細粒土砂量グラフの解析値

土砂の中の細かい粒径集団は影響を殆ど受けていないが, 100mmの流砂量はこの区間で減少している。一方, 50mm流砂量はこの区間より少し上流から減じ始めている。宇奈月ダム貯水池内では, 砂州が水面上に出るために, 主流速が速くなるが, 水深平均流速が1.5m/s程度と上流河道に比べ遅いため掃流力が減じ, 100mm粒径の流砂量が減少していると考えられる。

図-14 は, 宇奈月ダムを10分間に通過した各粒径ごとの流砂量グラフの解析値を示す。自然流下中の宇奈月ダムを, 最大300mmの粒径の石が1分間で3個程度通過している。また, 50mm粒径は20,000個, 100mm粒径は2,000個程度通過し, 100mmや50mm粒径が主に通過していることが分かる。また, 300mmの粒径集団と

100mm, 50mm の粒径集団の通過量に時間差が生じている。黒部河川事務所によって、宇奈月ダム直下流の減勢池で河床状況調査<sup>10)</sup>が行われており、平均的に 100mm 粒径が多く存在し、最大で 200mm 粒径が存在している。これは宇奈月ダム下流の河床状況は解析で得られた通過最大粒径とほぼ対応している。図-15 は、細粒土の流量グラフの解析値を示す。出し平ダムの排砂浮遊砂量ピーク時(7/14 13:00)付近で宇奈月ダムでも通過浮遊砂量のピークが現れている。宇奈月ダム水位低下時には、出し平ダムから大量に排砂された細砂土砂と連携排砂前に宇奈月ダムに堆積していた細砂が宇奈月ダムを通過し下流に輸送されていると考えられる。

#### 4. 結論と今後の課題

本研究では出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂を3つの時間帯に大別し、各時間帯での土砂移動の特徴を数値解析と現地観測結果に基づいて考察した。以下に主要な結論を示す。

- ① 出し平ダムのゲート操作の各時間帯で、出し平ダム直下流で異なる土砂移動特性を示すことが分かった。出し平ダム水位低下時は、ダム直下流に堆積した土砂が下流に輸送され、自然流下時には、出し平ダムの排砂土砂は下流河道に輸送される過程でダム直下流に堆積が生じる。また、出し平ダムから大量に排砂された細粒土砂は宇奈月ダム水位低下時に宇奈月ダムを通過し下流に輸送されることが考えられる。
- ② 出し平ダムからの洪水ハイドログラフと排出グラフを境界条件として、宇奈月ダム貯水池内の土砂移動など排砂特性を明らかにした。
- ③ 今回の小規模な洪水流量時の連携排砂に対し、排砂解析から最大 300mm 粒径が通過しており、流砂が

リユームとしては 100mm や 50mm などの粒径集団が多く通過している。

#### 参考文献

- 1) 角哲也, 村崎充弘, 名倉裕, 玉置晴朗, 今城貴弘: フラッシング排砂時における貯水池堆砂の侵食・堆積過程計測に関する研究(その2), 水工学論文集, 第49巻, pp.1033-1038, 2005.
- 2) S.A.Kantoush, T.Sumi, T.Suzuki: Impacts of sediment flushing on channel evolution and morphological processes: Case study of the Kurobe River, Japan, *River Flow*, 1165-1173, 2010.
- 3) 南修平, 藤田正治: 貯水池からの排砂に対する下流河川での土砂応答特性, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp.653-659, 平成20年6月.
- 4) Taymaz.E, T.Sumi, S.A.kantoush, Y.Kubota, S.Haun.: Three-Dimensional Numerical Study of Free-Flow Sediment Flushing to Increase the Flushing Efficiency, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, doi: 10.3390/w9110900, 2017.
- 5) 竹村吉晴, 福岡捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.1, 61-80, 2019.
- 6) 黒部河川事務所, 第42回黒部川ダム排砂評価委員会資料, 平成26年7月連携排砂に伴う環境調査結果について, 2015年1月.
- 7) 鈴木麗子, 鶴田健次, 大津洋介, 角哲也: 浮遊砂観測からみた出し平ダムおよび宇奈月ダムの排砂特性, 土木学会関東支部技術研究発表, 2005年
- 8) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる種々な小規模河床形態の統一的解析法の構築, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, L1135-L1140, 2013.
- 9) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集 B1, Vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 10) 国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所: H28年度減勢池河床状況調査結果.

(Received May 31, 2019)  
(Accepted August 7, 2019)

## SEDIMENT BEHAVIOR DURING THE COORDINATED SEDIMENT FLUSHING OF DASHIDAIRA DAM AND UNAZUKI DAM

Kohei SUZUKI, Shoji FUKUOKA, Shingo UCHIBORI and Yusuke OTSUBO

Unazuki dam and Dashidaira dam, which are constructed in the Kurobe River basin with a large amount of sediment yields, conduct the coordinated sediment flushing for the purpose of maintaining the function of the dam, preventing the degradation of the riverbed and reducing coastal erosion. However, the riverbed degradation and the shortage of large bed material are still progressing in some sections. In this paper, we constructed analytical model of quasi three-dimensional flood flow and bed variations using the flood flow and sediment discharge graphs from Dashidaira dam as the boundary conditions, and examined the sediment behavior at the time of coordinated sediment flushing of the two dams. We clarified the sediment transport dynamics in the reservoir and river channel system in each time zone of the operations of Dashidaira dam and Unazuki dam.