

旭ダム排砂バイパストンネルによる石礫の 排出機構および下流河道の瀬淵の回復

STUDY ON FLUSHING MECHANISM OF DAM RESERVOIR SEDIMENTATION
AND RECOVERY OF RIFFLE-POOL IN DOWNSTREAM REACH
BY A FLUSHING BYPASS TUNNEL

長田健吾¹・福田朝生²・山下克己³・福岡捷二⁴

Kengo OSADA, Tomoo FUKUDA, Katsumi YAMASHITA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 修士(工学) 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (同上)

³正会員 関西電力株式会社 土木建築室土木グループ (〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島3-6-16)

⁴フェロー Ph.D 工博 中央大学理工学部特任教授 中央大学研究開発機構教授 (同上)

In the Asahi River, riffles and pools had been scaled down in the downstream reach of Asahi Dam due to sediment deposition in Asahi Dam reservoir. To improve this environmental problem, a flushing sediment tunnel was constructed so as to bypass Asahi Dam reservoir. In this study, first, the authors demonstrated the recovery of riffles and pools and the grain size distribution in the downstream reach by using the data of cross-sectional surveying, air photographs and field investigation. Next, authors' two-dimensional model was applied to a series of flood events in the Asahi River. As a result, the flushing mechanism of Asahi Dam reservoir sedimentation, the recovery process of riffles and pools and the change in grain size distribution in the downstream reach were clarified by the model.

Key Words : *flushing sediment bypass tunnel, riffle-pool of downstream river, numerical model, sediment transport, grain size distribution*

1. 序論

新宮川水系旭川は、蛇行が著しく、それに伴う砂州の発達及び瀬淵の形成が顕著であった。しかし、昭和53年竣工の旭ダムによって、ダム貯水池の濁水の長期化、貯水池の堆砂、ダム下流河道の砂州の縮小及び瀬と淵の減少といった問題が顕著になった。特に、旭川上流部の花崗岩地帯より生産される白い石礫が、下流河道に運ばれなくなったことから、旭川特有の白い砂州がほとんど見られない状況となった。これらの対策として、平成10年に排砂バイパストンネルが設置された¹⁾。排砂バイパストンネルにより白い石礫を含む多くの土砂が下流河道に排出されるようになり、下流河道の瀬と淵が徐々に回復してきている。排砂バイパストンネルが有効に働いている旭ダムについて排砂トンネル上・下流の洪水流と河床変動を説明できるモデルを構築することは、今後、排砂

施設を検討する上で重要な課題である。

旭川は、巨石から砂までの広い粒度分布を有する石礫河川であるため、排砂バイパストンネルによる石礫の排出およびダム下流河道の瀬や淵の発達・移動や河床粒度分布を表現するためには、石礫河川の土砂移動および河床変動機構を十分に考慮した解析法を用いなければならない。長田・福岡^{2), 3)}は、石礫河川の河床表層の凹凸形状と土砂輸送を考慮した新しい平面二次元河床変動モデルを構築し、常願寺川現地実験および実河川への適用から、砂を多く含む砂礫河川における適用性には課題が残るが、大粒径材料が主体となる石礫河川では説明力を持つことを示してきた。

本研究では、最初に、排砂バイパストンネル建設前後の測量データ、航空写真および現地調査から、排砂バイパストンネルから排出される石礫により、ダム下流の瀬と淵が回復してきている実態を明らかにする。次に、石礫河川の河床変動機構を考慮した長田・福岡の二次元河



図-1 旭川周辺地図 (左) と排砂バイパストンネル平面図 (右)



写真-1 上流側から見た呑口部 (左) と吐口部 (右)

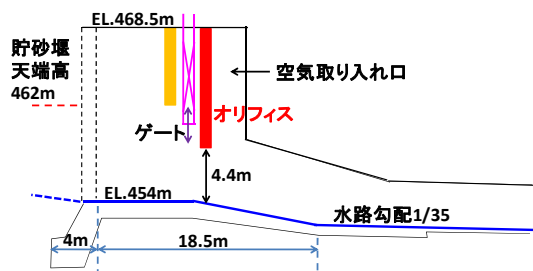


図-2 呑口構造図

床変動解析モデルを、旭川に適用し、ダム上下流河道の流れ、土砂移動、河床変動量と河床材料分布について実測と比較し、排砂バイパストンネルから排出される石礫の量と質に着目し、その排出機構及び下流河道の瀬淵の回復過程を明らかにする。

2. 旭ダム下流河道の瀬淵回復

(1) 旭川、排砂バイパストンネルの概要

図-1に旭川周辺地図と排砂バイパストンネル平面図を示す。旭ダムは、旭川6.0k付近に設置され、瀬戸谷川に設置された瀬戸ダムを上池とする揚水発電ダムとして昭和53年に運用を開始した。旭川の上流部には、旭川特有の白い石礫の生産源となる花崗岩地帯が広がる。旭ダム竣工とともに、この白い石礫はダム貯水池に溜まり、ダム下流河道では白い石礫の減少により砂州高が低下し、下流河道の地盤材料である堆積岩質（日高層群：黒色系）の転石や基岩が多く見られるようになった。ダム貯水池の濁水の長期化軽減、土砂堆積問題の改善と下流河道の瀬淵回復を目的として、平成10年に排砂バイパストンネルが設置された。

排砂バイパストンネルは全長2350m、幅3.8m、水路勾配1/35である。写真-1に、呑口部および吐口部の様子を示す。呑口部には貯砂堰が設けられ、流下土砂のダム貯水池への流入を防いでいる。トンネル内が管路流になり負圧が生じると、土砂流送能力が低下し、堆積土砂による閉塞が生じる恐れがある。図-2に示すように呑口部に設置されたオリフィスにより、流量が約120m³/sを超え



(a) 平成6年5月

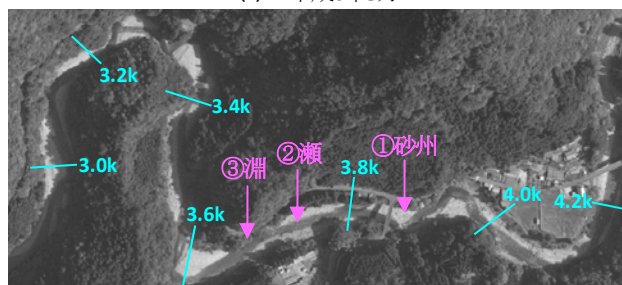


(b) 平成16年5月

写真-2 ダム直下流の河道状況



(a) 平成6年5月



(b) 平成16年5月

写真-3 3.0k～4.5k付近の河道状況

るとオリフィス流となり、また、空気取り入れ口を設けることで、トンネル内が開水路状態を保てるように設計されている。

旭川の河床勾配は、呑口部から上流約1kmの区間は、ダム建設前は約1/45であったが、ダム竣工後に貯水池に堆積した土砂により約1/75と緩くなっている。ダム下流は、ダム直下区間から旭川5.0kまでは1/36と急であり、5.0kより下流は平均1/100程度の勾配となっている。

(2) 下流河道における排砂前後の河道状況変化

写真-2, 3に、排砂バイパストンネル設置前後の航空写真(平成6年5月、平成16年5月)の比較を示す。写真-2は、ダム直下流の河道状況である。平成6年では、河道全体で岩や転石が露出したことで、写真上で河道は灰色



(a) 砂州上に堆積した白石
(写真-3①)

(b) 瀬の状況
(写真-3②)



(c) 淵の状況 (写真-3③)

写真-4 砂州上の白石と瀬・淵の状況

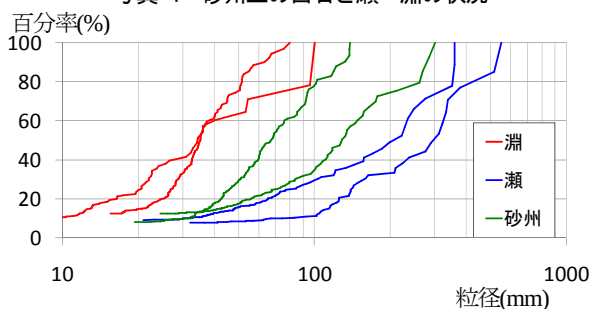


図-3 砂州と瀬・淵の河床材料分布

に見え、白い石礫は確認できない。一方、平成16年では、5.3k付近より上流では、岩や転石が多く見られるが、その下流では、排砂バイパストンネルにより排出された白い石礫が堆積することで、交互砂州が形成されていることが分かる。写真-3は、3.0k～4.5k付近の河道状況を示す。平成6年の3.4k～4.0k区間では、滞筋は、ほとんどが直線的な流れとなっており、瀬や淵がほとんど見られない河道であったことが分かる。河道は、ダム直下流ほどの大きな転石は見られないが、縦横断的に灰色となっており、堆積岩質の河床材料で構成されていたと考えられる。平成16年では、砂州上に白い石礫の堆積が見られる。砂州の発達により、直線的であった滞筋が変化し、瀬や淵が縦断的に回復していることが分かる。状況を詳しく見るために、写真-4に、写真-3(b)に示した①～③の地点の写真(平成23年5月撮影)を示す。図-3には、平成23年5月調査時の砂州と瀬・淵の表層粒度分布を示す。写真-4(a)は砂州の状況を示す。写真の右端に写っている黒色の石が堆積岩質の河床材料であり、その上に白石が堆積している。写真-4(b)は、瀬の状況を示したものである。瀬は、平常時においても流速が速いため、表層河床材料に白い石礫はほとんど見られず、堆積岩質の大きな石で構成されていた。写真-4(c)は、淵の状況を示す。淵は、写真に示すような岩の突出部や蛇行外岸部などに形成されており、表層には排出された白い石礫が多く見られ、砂州や瀬に比して小さな粒径集団で構成されてい

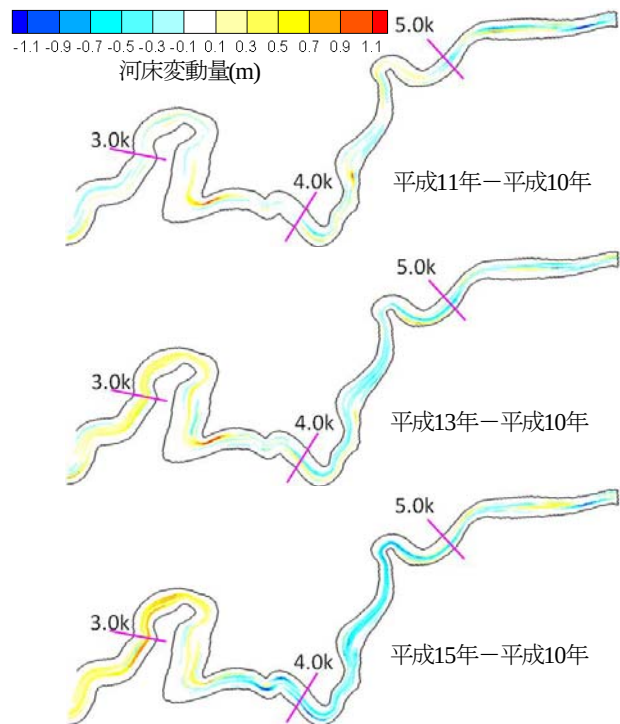


図-4 ダム下流河道の河床変動量 (平成10年基準)

た。瀬と淵の粒度分布の関係については、竹中ら¹⁾により平成10年～平成15年までの調査結果が報告されており、同様の結果が示されている。以上の調査結果から、瀬は、経年的に粗い材料(堆積岩質)で構成され、白石が留まりづらいこと、逆に、淵は、白石クラス(150mm以下)の材料が堆積しやすいことが明らかとなった。また、このような砂州の発達および粒度分布の回復により、変化に富んだ瀬や淵が縦断的に回復したことが明らかになった。

図-4は、ダム下流河道の平成10年の河床高を基準に作成した各年の河床変動量を示す。図-4の平成15年～平成10年が、写真-2、写真-3で示した平成16年5月の状況に対応する。後述するように、平成13年と平成15年に、ピーク流量が250m³/sを超える洪水が発生し、下流河道の変動量も大きくなった。平成15年の段階では、3.8k～5.0k区間で河床低下が顕著であり、3.8kより下流では、堆積傾向となっている。このような河床変動が、どのような流量・土砂移動(土砂排出)のもとで生じ、また、バイパストンネルから排出された石礫は、どのような過程で堆積し、河床粒度分布等を形成しているかについて、以下の解析により検討する。

3. 解析手法及び解析条件

解析法は、長田・福岡^{2), 3)}による非定常平面二次元洪水解析法と石礫河川の二次元河床変動解析法を一体として扱う手法を用いる。石礫河川の二次元河床変動解析法は、常願寺川現地実験より明かになった、石礫河川の土砂輸送・河床変動機構および石礫による表層凹凸分布を考慮したモデルとなっている。解析法の詳細は、既報

2), 3)で説明しているため、ここでは記述を省略する。

解析条件を述べる。図-1(右)に示す熊野川合流点から呑口部上流2kmまでの区間を解析対象範囲とする。初期河床として平成10年度の実測地形を与え、平成11年～平成15年までの洪水流を対象として解析を行う。ダム上下流に測水所が設置されており、水位および流量が観測されている。また、排砂バイパストンネルから流出する流量およびダムからの放流量も測定されている。解析では、上流端に流量を与え、下流端は水位観測が周辺で行われていないため、下流端に等流区間(断面形状を0.0k断面とし1/100勾配で作成)を設け、流量に見合う等流水深を与えた。河床勾配が急であるため、下流端水位の影響は、上流数百m程度しか影響しないことを確認している。また、ダム放流量および瀬戸谷川からの流入量も流量観測値に基づいて与えた。図-5に、呑口部と吐口部の計算メッシュを示す。呑口、吐口は、その構造を詳細に取り

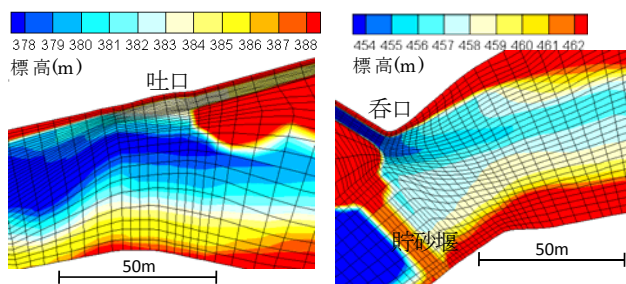


図-5 吐口部(左)と呑口部(右)の解析メッシュ

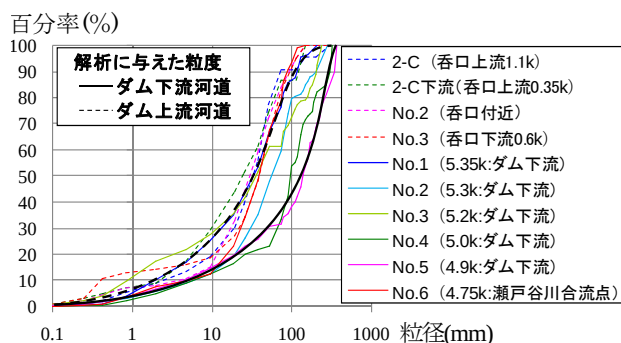


図-6 解析に与えた粒度分布

込む必要があるため、計算メッシュを細かく設定し、形状を表現した。呑口に設置されたオリフィスの抵抗は、トンネル内の解析流量が観測されたトンネル内流量と一致するように形状抵抗を与えた。図-6に上流河道(平成4年)及び下流河道(平成12年)において測られた粒度分布を示す。上流河道は、測られた分布をもとに初期粒度分布を与えた。下流河道は、初期に細かな粒度分布(例えば平成12年の平均値)を与えると、河床が大きく変動し、実測値を再現出来なかった。平成10年の下流河道は、粗粒化していたと考えられることから、平成12年に観測された粒度分布の中で最大値の形状を初期粒度分布として与えた。上流からの土砂供給量は、下流河道の全体的な変動量に影響する。解析では、平衡土砂量を与えた条件が、下流河道の河床高の再現性が高かったことから、平衡土砂量を上流端に与えた。

4. 解析結果と考察

排砂バイパストンネルからの石礫の排出過程と下流河道の土砂輸送、砂州の変化について考察する。図-7に解析対象とした平成11年から平成15年までのダム上流の流量ヒドログラフと、排砂トンネルからの流量・土砂排出量の関係を示す。ピーク流量が $80\text{m}^3/\text{s}$ 以下の洪水では、上流からの流入土砂量が少なかったことから、解析は、各年の洪水の中で、ピーク流量が $80\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水を対象とした。平成11年は $100\text{m}^3/\text{s}$ 規模の洪水5波、平成13年は $250\text{m}^3/\text{s}$ 規模の洪水2波、平成15年は対象洪水の中では最大となる $310\text{m}^3/\text{s}$ 規模の洪水を含む2波を対象とした。平成13年と平成15年の図には、ダム合計放流量(排砂バイパストンネルからの流出量とダム本体からの放流量の加算値)も併せて示している。排出過程の特徴は、上流からの流入量が大きくオリフィス流($120\text{m}^3/\text{s}$ 以上)になる時間帯の土砂排出量は少なく、流入量が $70\text{m}^3/\text{s}$ を下回る洪水減水期に多くの土砂が排出される。このような排

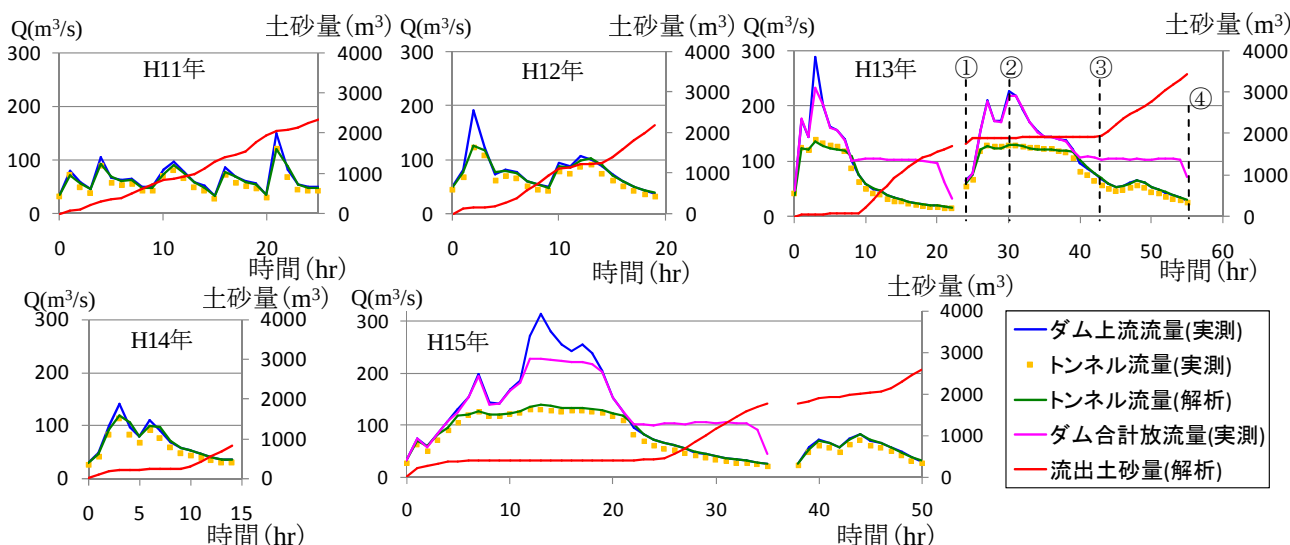


図-7 洪水流量ヒドログラフと排砂バイパストンネルからの排出土砂量の関係

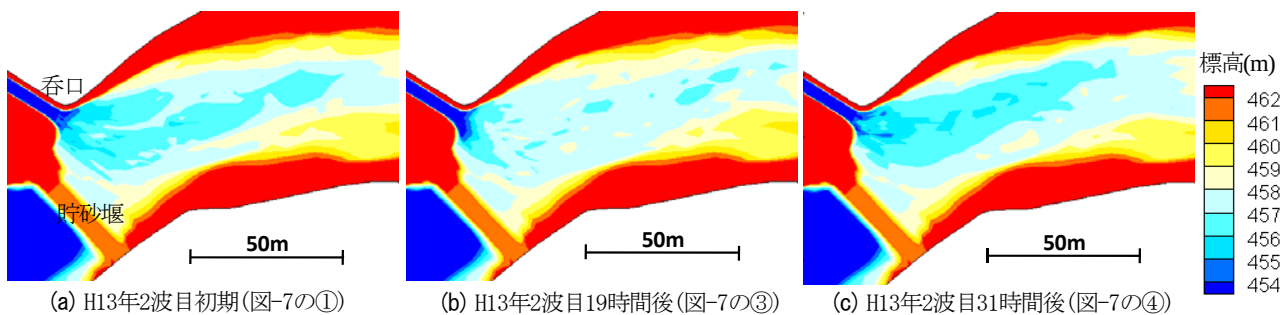


図-8 呑口部上流の洪水時の河床高変化 (平成13年2波目)

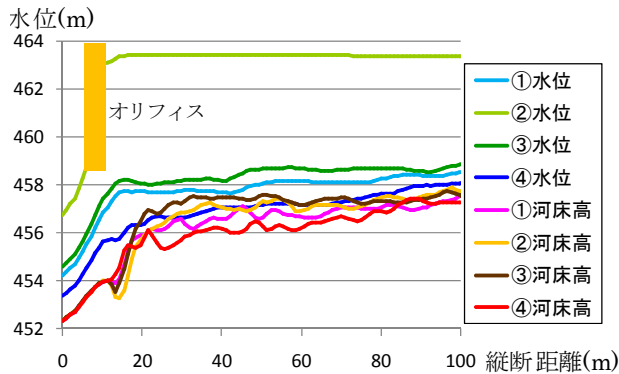


図-9 洪水中(H13年2波目)の水位・河床高変化
凡例の①～④は図-7に示す時間に対応

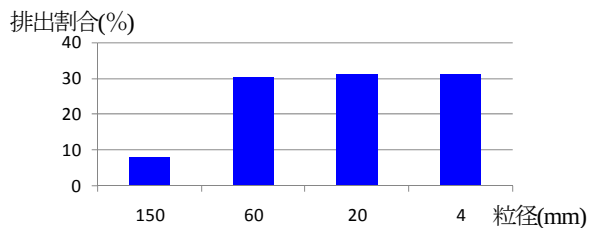


図-10 各粒径の排出土砂に占める割合

出過程は、原田⁴⁾による室内実験の検討でも同様な結果が示されている。図-8に、平成13年の2波目における呑口部上流河道の洪水時の河床高変化を示す。また、図-9には、各時刻(図-7の①～④)の水位・河床高の縦断分布を示す。図-9②の水位に示すように、オリフィス流になる時間帯では、呑口上流河道は、水面勾配がほとんどない状態になるため、上流から流下する石礫は、呑口部まで到達できず、上流側に堆積する。図-9③の時間帯になると、水面勾配が付き、上流に堆積した石礫は呑口部付近に運ばれ、図-8(b)のような状態になる。③から④の時間帯では、呑口部の水面勾配が大きくなるため、呑口上流に堆積した多くの石礫が排出され、図-8(a), (c)のように、洪水前後の河床高はほとんど変化しない状態となる。図-5右に示す、平成10年の地形と比べても、河床高の変化は少ないことから、上流から流下した多量の石礫は、適切に排出され、旭ダム排砂バイパストンネルが有効に働いていることが分かる。図-10に、各粒径の排出土砂に占める割合を示す。石サイズの150mmが約8%、その他の礫径集団が約30%の配分であった。上流河道に与えた粒度分布(図-6)とほぼ対応する割合であることから、上流河道は、粗粒化や細粒化が生じることなく、各粒径集団が適切に排出されていることが分かる。

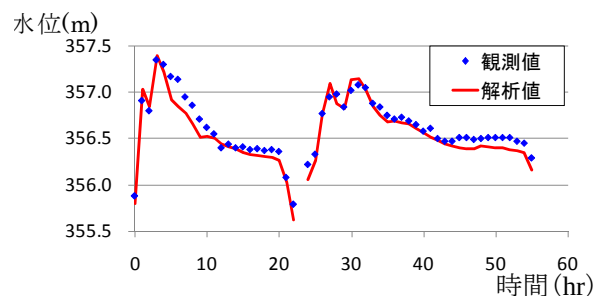


図-11 下流測水所の水位観測値と解析値の比較(H13年)

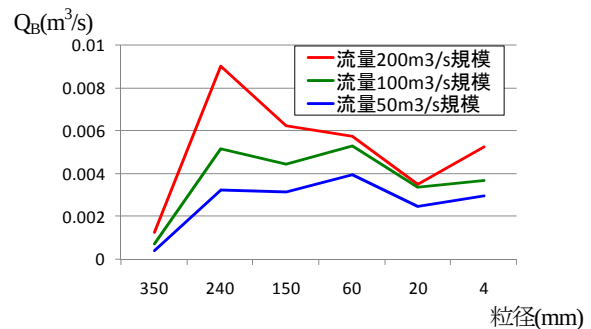


図-12 下流河道における各流量規模の粒径別土砂移動量

次に、下流河道の結果について考察する。まず、下流河道の洪水時の再現性を検証するため、下流測水所(4.3k)の水位観測値(平成13年洪水)と解析値を比較したものを図-11に示す。洪水減水期において観測水位を下回る箇所も見られるが、観測値を再現している。次に、旭ダム下流河道の土砂移動状況を把握するために、各流量規模における粒径別土砂移動量を図-12に示す。データは、3.0k～4.0k区間の粒径別土砂移動量を平均したものである。200m³/s規模の出水では、石サイズ(75mm以上)の粒径集団が活発に移動することが分かる。240mmおよび350mmは、下流河道の転石(堆積岩質)を想定した粒径であるが、これらの大きな粒径集団が移動し得る流量であることが分かる。図-7の平成13年、15年洪水のように200m³/sを超える洪水では、洪水減水期に、ダム貯水位調節のために100m³/s規模の放流が行われる。図-12の100m³/s規模では、200m³/s規模に比べると、移動量が少なくなり、240mm～60mmクラスが活発に移動する。上流から排出される白石サイズ(150mm以下)の集団は、十分に移動できる流量である。50m³/s規模になると、60mm程度の礫が主に移動するようになり、転石や150mmクラスの白石の移動量は少なくなる。

図-13に、図-4の実測値に対応する解析の河床変動量

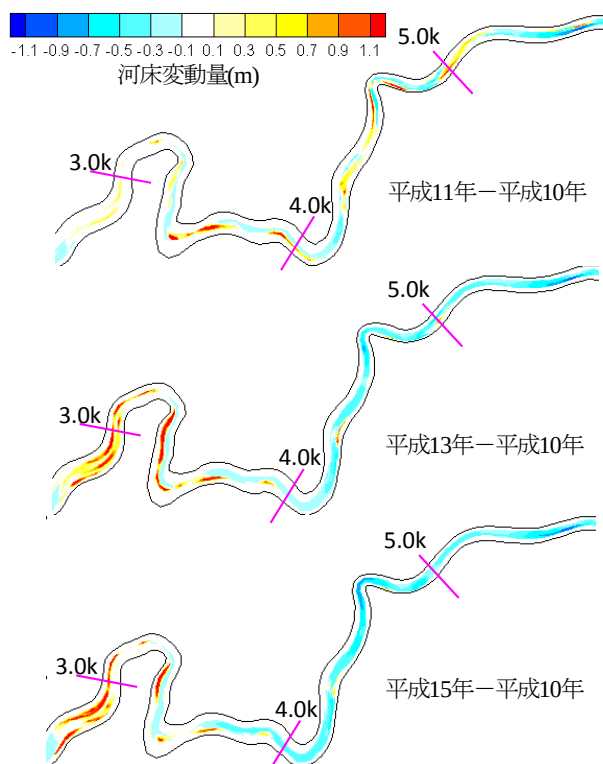


図-13 解析による下流河道の河床変動量

を示す。図-4の実測変動量のように、年度ごとに堆積域が下流へ進行し、4.0k～5.0k区間で洗掘が進行する過程が再現されている。ただし、堆積分布は、例えば平成15年の実測値では3.6kより下流河道で、縦横断的に平均的に堆積する傾向となっているが、解析では、蛇行の内岸にあたる箇所に、集中的に堆積する結果となった。この区間は、突出した岩や狭窄部が特に多い箇所であり、それらの作用で堆積しやすい区間となっているが、その影響が解析に十分反映できていないと考えられる。

図-14は、平成11年～平成15年までに排出された石礫の堆積量分布を示す。また、図-15には、平成15年洪水解析後の平均粒径分布を示す。解析初期の平均粒径は、約160mmであり、青色系は細粒化、赤色系は粗粒化を示す。排出された石礫は、主に5.0k付近および3.6k下流に堆積していることが分かる。5.0k付近は、勾配変化点であるため、堆積しやすい状況であったと考えられる。しかし、写真-2で示したように、5.2k付近に白石の堆積による砂州の形成が見られるが、この状況は再現できていない。3.6kより下流では、写真-3において、その上流区間に比して白石が広く堆積している様子が確認でき、平成15年までに排出された石礫は、主にこの区間に堆積し砂州を形成していたと考えられる。白石の堆積により、3.6kより下流では、一部を除いて縦断的に細粒化している。一方、白石がほとんど堆積していないのが瀬の区間（4.2k・3.7k付近、図-14, 15の赤丸）である。写真-4(b)に示したように、現地状況を見ても、瀬の部分には白石が見られず、河床は堆積岩質の大きな粒径集団で構成されていたことから、解析でもその状況が再現された。

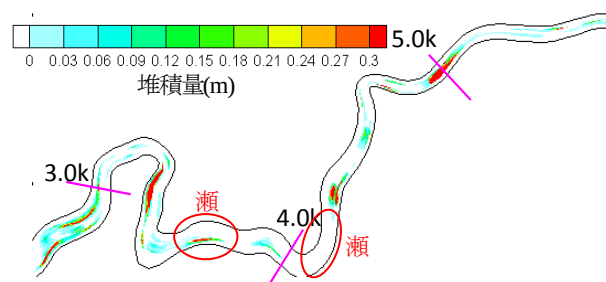


図-14 排出された白い石礫の堆積量分布（平成15年）

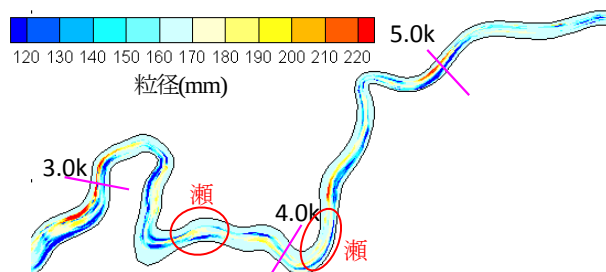


図-15 解析による平均粒径分布（平成15年）

以上の検討から、本解析法は、急流石礫河道である旭川におけるバイパストンネルから排出される石礫の量と質および下流河道の砂州の発達と瀬・淵の回復を説明する有用な手法であることが明らかとなった。

5. 結論

本研究では、旭ダム排砂バイパストンネルによる石礫排出機構と下流河道の瀬淵回復、粒度分布変化について、実測・調査データと長田・福岡^{2), 3)}の解析手法を用いて検討を行った。現地データ及び解析結果から、排砂バイパストンネルにおける石礫の排出過程を再現するとともに、粗粒化し、低下した下流河道では、上流から排出された多量の白い石礫の流下により、砂州の発達と、瀬・淵及び河床構成材料の回復過程等を明らかにした。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、関西電力(株)、国土交通省河川局、近畿地方整備局河川部との議論は有意義であった。また、本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（A））、課題番号22246067、代表：福岡捷二）の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 竹中秀夫、岡崎和樹、與田敏昭：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、2004。
- 2) 長田健吾、福岡捷二：石礫蛇行河川の二次元河床変動解析法に関する研究、河川技術論文集、第15巻、pp327-332、2009。
- 3) 長田健吾、小林幹男、福岡捷二：連続水制を有する急流石礫河道札内川の洪水時の流れ・土砂動態に関する研究、河川技術論文集、第17巻、pp.149-154、2011。
- 4) 原田稔：貯水池のバイパス排砂システムに関する研究、京都大学博士論文、1998。

(2011. 9. 30受付)