

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)

STUDY ON MEASUREMENT OF EROSION-DEPOSITION PROCESS OF RESERVOIR SEDIMENT DURING FLUSHING OPERATION (PART 2)

角 哲也¹・村崎充弘²・名倉 裕³・玉置晴朗³・今城貴弘⁴

Tetsuya SUMI, Mitsuhiro MURASAKI, Hiroshi NAGURA, Haruo TAMAKI and
Takahiro IMAKI

¹正会員 工博 京都大学助教授 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 理修 応用地質株式会社 関西支社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北 2-4-66)

³非会員 株式会社数理設計研究所 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐島町 54-2)

⁴学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Sedimentation management of reservoirs is one of crucial issues to realize sustainable development of water resources for the next generations. Recently, sediment-flushing techniques have been applied to Dashidaira dam and Unazuki dam in the Kurobe River, but erosion-deposition process of sediment in reservoirs and its effect on success or failure of flushing operation have been rarely discussed.

This paper studies how to measure actual sediment erosion-deposition process during flushing operations. Firstly, sediment flushing operation in 2004 is overviewed and some typical sediment transport processes in the Unazuki dam are reviewed. Secondly, results of a field measurement with the 3D Laser scanner in the Unazuki dam reservoir are discussed. These results show that 3D Laser scanner can be applicable to measure both water and sediment profiles and those temporal changes.

Key Words: 3D Laser scanner, reservoir sedimentation, reservoir sedimentation management, sediment flushing, Kurobe River, Unazuki dam

1. はじめに

ダム貯水池の堆砂対策として、黒部川水系宇奈月ダム及び出し平ダムにおいてフラッシング排砂が実施されている¹⁾。このようなフラッシング排砂の成否には、排砂ゲートの高さや排砂流量などとともに、貯水池の平面形状に対する排砂時に形成される水みち侵食の関係が重要となる²⁾。すなわち、排砂時には水平に堆積した土砂内に水位低下とともに水みちが形成され、水みち内では縦断方向の河床低下と横断方向の側岸侵食が同時に進行する。貯水池内の堆積土砂がいかに効果的に排出されるかは、形成される水みちの幅と縦断勾配及び側岸侵食形状に大きく依存する。ここで、水みち幅や縦断勾配は排砂流量や排砂ゲート敷高などの水理学的要素に、また側岸

侵食形状は堆積土砂の土質力学的要素によって決定される。そこで、これらを的確に予測し、貯水池地形との関係を検討可能な手法の開発が求められる。

一方、国内におけるフラッシング排砂事例は限定されており、上記の水みちの形成に関するデータは十分ではない。従って、これらを蓄積し、排砂流量、貯水位低下速度、排砂時間、堆積土砂の粒度や粘着力など、水理学的・土質力学的要素と水みち形成の関係について分析を進めることが、今後のフラッシング排砂の展開に極めて重要となる。

筆者らは、このような観点から、宇奈月ダムの完成直後の平成 13 年 6 月の連携排砂時に、3D レーザスキャナを用いて、貯水池内地形の 3 次元計測を行った³⁾。平成 13 年時点では、宇奈月ダム貯水池内の堆積土砂量が多くなかったことから顕著な水みちの

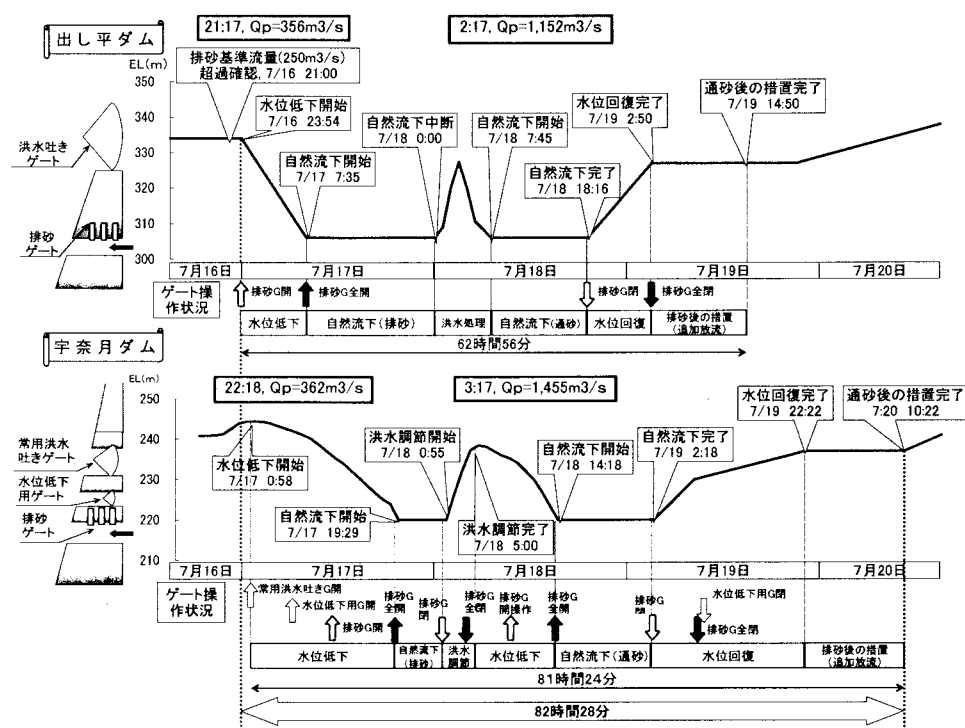


図-1 H16年7月出し平ダム及び宇奈月ダムの連携排砂・通砂の概要（貯水位変化等）⁴⁾

形成までには至らなかったが、上流の出し平ダムから排出された掃流砂が宇奈月ダム貯水池の上流部に一度堆積して河床上昇を起こした後、フリーフロー過程で再侵食を受けてゆっくりと下流へ移動し、また、侵食過程で小さいながらも側岸侵食を伴う水みちの形成を確認することができた。特に、計測された標高及び受光強度のデータを組み合わせることにより、混在する水面と土砂面の分離、さらには水面の変動なども計測できる可能性があることを示した。

平成16年7月は災害の多発した月であったが、新潟と福井豪雨災害に丁度はさまれるように上記の宇奈月ダム及び出し平ダムにおいても排砂及び通砂実施基準を超える洪水が発生し、連携排砂及び通砂が連続して実施された。そこで本研究では、この排砂・通砂操作を対象として実施した3Dレーザスキャナによる貯水池内地形の3次元計測結果をもとに、排砂・通砂時における貯水池内の河道変化、堆積土砂の侵食・堆積過程などについて検討を行う。

2. 平成16年度フラッシング排砂・通砂概要

平成16年度の排砂の特徴は、排砂実施中に大規模な洪水が発生し、排砂操作を一旦中断して洪水調節を行ったのに引き続いて通砂操作を実施したことである。また、これら一連の操作により宇奈月ダム貯水池内に大量の土砂が流れ込み、堆砂形状が大きく変化し、土砂の堆積・侵食現象が一気に活発化した。図-1に出し平ダム及び宇奈月ダムの連携排砂・通砂時の貯水位変化などの経過を示す。

(1) 排砂過程

排砂対象洪水は $350 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の通常規模の流入量であり、排砂過程における濁水発生も顕著ではなく、従来の連携排砂実績とほぼ同様であった。

ところが、出し平ダムの排砂終了直前（宇奈月ダムは排砂継続中）の18日未明に黒部川上流域で激しい降雨を記録し、出し平ダムではピーク流量 $1,152 \text{ m}^3/\text{s}$ の歴代2位の洪水発生により、排砂ゲートによる洪水の自然調節状態となった（排砂ゲートは開水路流からオリフィス流に移行）。一方、宇奈月ダムでは、流入量が洪水調節開始流量（ $650 \text{ m}^3/\text{s}$ ）を超過したため、排砂ゲートを一旦閉鎖して排砂を中断し洪水調節操作に移行した。宇奈月ダムの洪水ピーク流量は $1,455 \text{ m}^3/\text{s}$ と平成13年のダム完成後の1位を記録した。この洪水により両ダムとも通砂開始基準流量を超過した。

(2) 洪水調節ー通砂過程

洪水調節後は、それぞれ速やかに水位低下が開始（出し平ダムは自然に開始）され、通砂操作に移行した。排砂中断から通砂開始（自然流下）までの時間は、出し平ダム（7時間45分）、宇奈月ダム（13時間23分）であった。排砂時の放流濁度ピークが1回であったのに対して、洪水調節ー通砂過程では、排砂中断直後の洪水流入ピーク時、洪水調節後に再び排砂ゲートを開放した時、及び、再び自然流下が開始された時の計3回発生した。排砂ー通砂の連続により貯水池内の土砂がそれだけ複雑に移動したと考えられる。通砂終了後は速やかに貯水位を回復し、清水による追加放流を行って一連の操作が終了した。

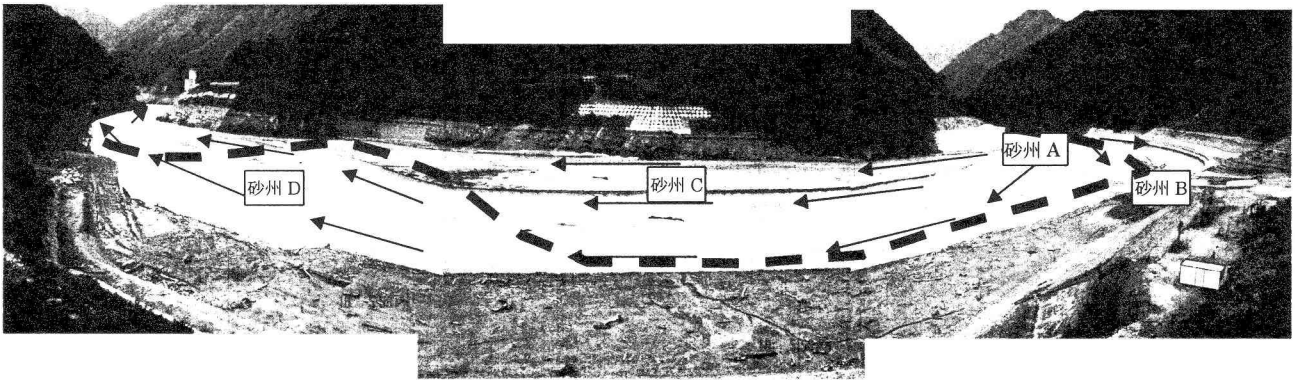


写真-1 宇奈月ダム貯水池内「尾の沼」付近の通砂時（7/18, 17:55）の砂州の形成と流れ（矢印）の状況
破線：水理模型実験による水みち形状

3. 宇奈月ダム貯水池における堆砂の移動過程

(1) 排砂過程

図-2 に宇奈月ダムの貯水池平面図及び河床縦断面図を示す。河床縦断面図には H15. 12 時点での堆砂測量結果を示しているが、この時点での宇奈月ダムの平成 16 年の予定排砂量は 4 万 m^3 であった。その後、例年になく 5 月の台風による洪水流入などによって宇奈月ダム貯水池への土砂堆積がさらに進んだ（14 万 m^3 ）ことと、上流出し平ダムの排砂開始による新規土砂流入（33 万 m^3 ）により、排砂時には宇奈月ダム貯水池内上流部において砂州の形成と侵食などの活発な土砂移動が発生し、「堆砂肩」の本格的な下流への移動が確認された。

(2) 通砂過程

最大 1,455 m^3/s の洪水発生に伴う新たな土砂流入により、宇奈月ダム貯水池内で最も川幅が大きくなっている「尾の沼」付近（ダム上流約 2km 地点）において、貯水位低下時に大規模な砂州が複数形成された。この砂州は、自然流下中に側岸侵食によって変形し、貯水池全体としては「堆砂肩」がさらに下流へ移動した。また、ダム直上流部にも砂州を確認するなど貯水池内の堆砂が一層進行した。写真-1 に「尾の沼」付近の砂州及び流れの状況を示す。

(3) 貯水池内の砂州の形成と流れの概況

7/17 の排砂時に形成された特徴的な砂州は、上流狭窄部から尾の沼に流れ込む上流端河道に形成された砂州 A であり、後述のように 7/17 夕方に約 1 時間程度で侵食されて消滅した。次に、7/18 の通砂時には、尾の沼上流河道左岸の三日月状の砂州 B、尾の沼中央の細長い砂州 C 及び尾の沼下流河道の網状の砂州 D が確認された。このうち、砂州 B は河道中央の主流及び左岸護岸沿いの流れに挟まれており、両側からの侵食作用により 7/18 夕方にかけて大きく変形した。また、砂州 C も左岸側の主流と右岸側の副流の両者による緩やかな側岸侵食により次第に瘦せていくのが確認された。

宇奈月ダムの排砂時を対象とした水理模型実験が（独）土木研究所で実施されているが、排砂時に形成される水みち形状は写真-1 の破線で示した通りであり、H16 年の河道内の状況とは大きく異なっている。この理由として、貯水池内の堆砂進行程度の相違などが考えられるが、模型実験における砂州の形成と側岸侵食の進行の再現精度の限界も考えられ、今後の排砂時のデータ蓄積の必要性が示唆される。

4. 3D レーザスキャナ計測調査の概要

レーザスキャナ計測の対象として、前回の調査と同様に図-2 の範囲を選定し、さらに写真-1 における砂州 A、砂州 B の侵食過程を追跡した。レーザスキャナの設置位置は、図-2 に示す通りである。写真-2 に、砂州 A、砂州 B の調査対象地域の拡大図を示す。計測に使用したレーザスキャナは、前回と同様に、RIEGL の LPM-2K（長距離型）及び LMS-Z210（中距離型）である^{3) 5)}。表-1 に計測調査の概要を示す。

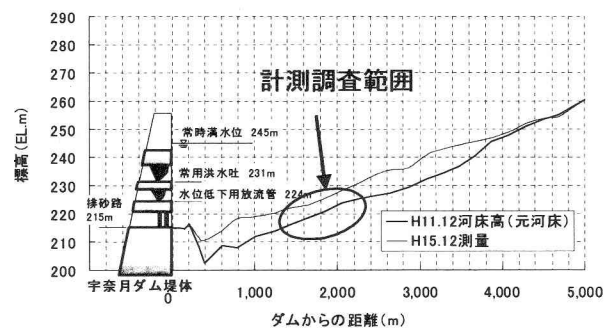
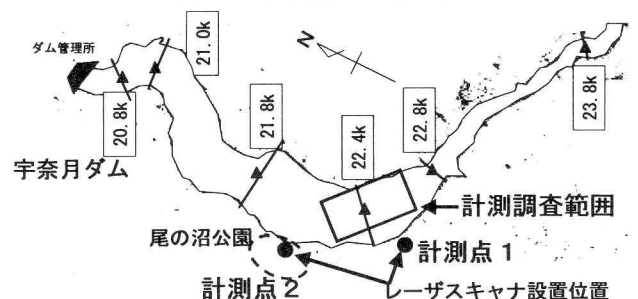


図-2 宇奈月ダム貯水池平面図及び河床縦断面図⁴⁾

5. 計測結果及び考察

(1) 計測結果

a) 砂州 A

計測点 1 より中距離型 (LMS-Z210) を使用して、計測を行った。計測調査地域の状況写真、標高値と受光強度 (反射強度) の平面図を図-3 に、砂州及び水みち上の縦横断面図を図-4～6 に示す。

7 月 17 日 16:00～17:00 間で 17 回の計測を行った。各計測とも 80,000～85,000 点のデータを計測し、各計測に約 1 分 30 秒を要した。計測を行った砂州は、16:30 頃までは安定して形状を保っていた (図-3 の上段)。砂州の上流側先端部に流水が乗り上げるようになると、侵食過程が急激に進行し、図-3 の○印で囲んだ地域が、16:45 頃からの約 15 分間で、さらに、破線○印で囲んだ地域が続く約 10 分間で侵食され、完全に砂州が消滅する状況が観測された。

計測結果によると、砂州は下流側に緩やかに傾斜し、水面から数 10cm の高低差しかなく、平面図、砂州上縦断測線図や横断測線図では侵食が進んでも地形的な大きな変動は認められなかった (図-4、図-5)。

一方、侵食が進み水没した地域や、砂州がもともとなかった地域では、流水の波形と考えられる約 1m の変動が計測された。特に、砂州の左岸側の水路では、砂州が存在する 16:45 頃までは、水面は穏やかであったが、砂州がなくなることにより、水流が変化し大きく波打つことが観測された (図-6)。

受光強度は、砂州が水面上にある地域では 30～40、混濁した水面では 30 以下もしくは計測不可である

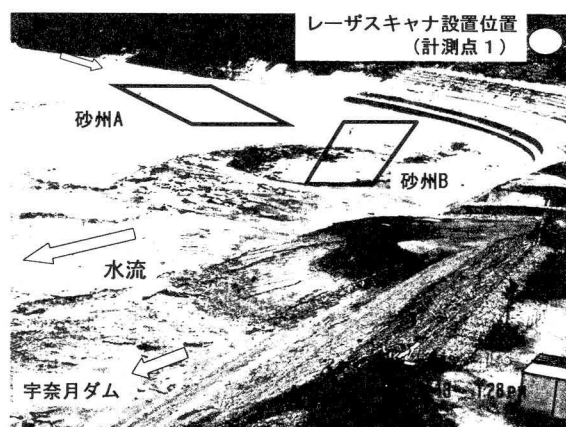


写真-2 7 月 18 日 01:30 頃の計測調査地域の状況 (計測点 2 から望む)

(図-3)。砂州がなくなる 16:50 頃では、受光強度はほぼ河床全域での低い値を示している。この結果は、筆者らの報告³⁾ とほぼ一致している。砂州上縦断測線図でも、砂州の侵食の進行とともに、受光強度が 30～40 の値から 30 以下もしくは測定不可の領域が下流側に遷移していることが認められた (図-4)。

b) 砂州 B

7 月 18 日には、尾の沼公園から上流の左岸側で、土砂が再堆積することで大きな砂州を形成し、側岸侵食を伴う侵食過程が観測された (写真-2 の砂州 B 周辺、図-7)。砂州の右岸側 (図-7 の□部分) では水衝部となっており、水流が側岸基部を激しく侵食し、側岸はあたかも柱状ブロックが砂州本体から崩れ落ちるように侵食が進行する状況が観測された。

この侵食現象を LPM-2K (長距離型) を使用し、7 月 18 日 15:25～16:00 間で 23 回の計測を行った。各計測とも 100～130 点のデータを計測し、各計測に約 1 分 30 秒を要した。計測結果によると、上記の柱状ブロック状の侵食状況を反映して、側岸の部分的な変状が計測された (図-7)。図中の○印で示す周辺では、約 30 分の間で高さ約 1.5m の側岸斜面が大きく侵食され、上流測線では 15:40～15:45 の間で約 4m、下流測線では 15:50～15:55 の間で約 3m 幅で後退したことが計測された (図-8)。

(2) 考察

a) 3D レーザスキャナを活用した計測調査方法

LPM-2K 及び LMS-Z210 の両者とも、堆積土砂及び水面の形状を同時に計測でき、フラッシング排砂のような、急激な堆積土砂の侵食・堆積過程をリアルタイムで計測可能であることを確認した。

ここで、LPM-2K は、河道部の対岸や上下流の遠方までの範囲を計測可能であるが、砂州 B の計測で示した通り計測速度が 100 点/分程度であるため、広範囲を高速で同時に計測することは難しい。このため、300m 以上離れた計測対象地域における数分の変化を計測するためには、砂州 B で行ったように狭い範囲に限定し、100～200 点のデータを効率的に取得する方法があり得る。一方、LMS-Z210 は、砂州 A で示した通り、80,000～85,000 点のデータを 2 分以内に一気に取得可能であり、計測可能距離は短いものの、急激な変化をある程度広範囲に計測可能である。

表-1 計測調査の概要

目 的		使用機器	計測開始日時	
砂州 A	砂州近傍の流れが砂州にほぼ平行し、側岸傾斜が緩やかで連続的に侵食が進行する過程の計測を行う。	LMS-Z210	7 月 17 日	16:00, 16:23, 16:25, 16:27, 16:28, 16:29, 16:30, 16:35, 16:40, 16:45, 16:46, 16:47, 16:48, 16:49, 16:50, 16:53, 16:58,
砂州 B	砂州の側岸の足元を侵食し、柱状のブロックが砂州本体から離れて倒れ落ちる侵食過程の計測を行う。	LPM-2K	7 月 18 日	15:25, 15:27, 15:29, 15:30, 15:32, 15:33, 15:35, 15:37, 15:38, 15:40, 15:41, 15:43, 15:44, 15:46, 15:47, 15:49, 15:50, 15:52, 15:54, 15:55, 15:57, 15:58, 16:00



図-3 砂州 A の侵食過程と各計測結果 (平面図)

写真：各計測時間の計測調査地域の状況。中央図：標高値，計測点を 0m としている。
右図：受光強度。グリッドの間隔は 25m。

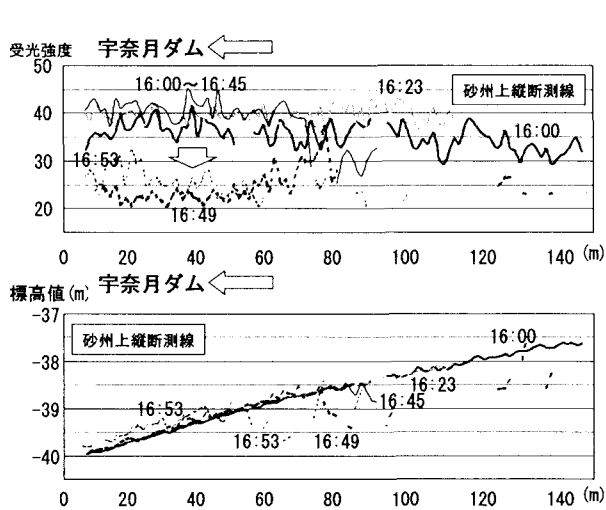


図-4 砂州上縦断測線 (受光強度及び標高値)
測線位置については，図-3 参照。
上段：受光強度。
下段：標高値，測地点を 0m としている。

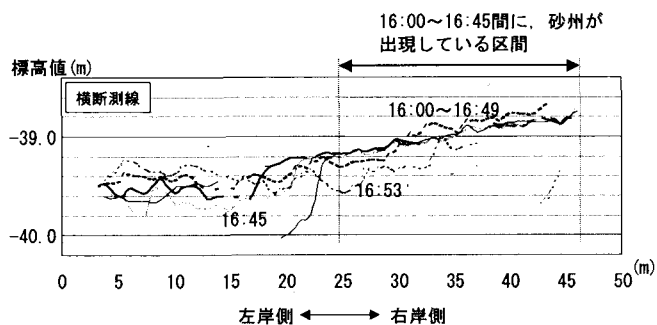


図-5 横断測線 (標高値)
測線位置については，図-3 参照。
測地点を 0m としている。

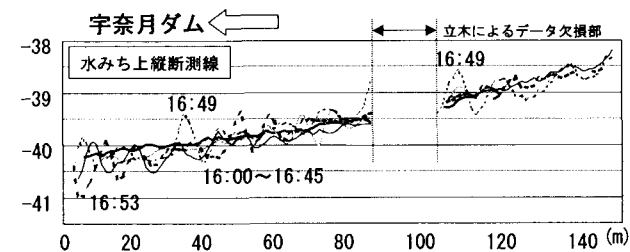


図-6 水みち上縦断測線 (標高値)
測線位置については，図-3 参照。
測地点を 0m としている。

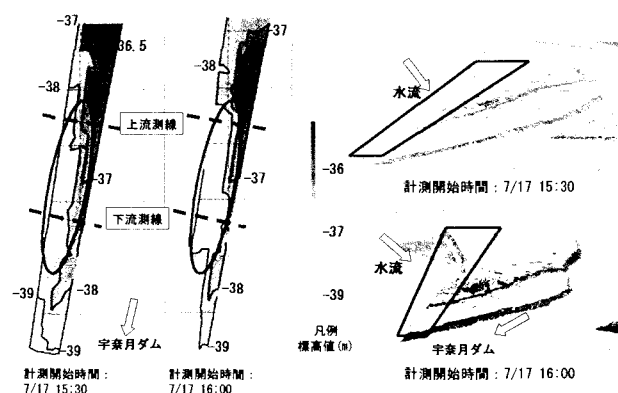


図-7 砂州Bの侵食過程と計測結果(標高値)
 写真: 各計測時間の計測調査地域の状況
 左図: 計測開始時間 15:30
 右図: 計測開始時間 16:00
 計測点を0mとしている。グリッドの間隔は25m。

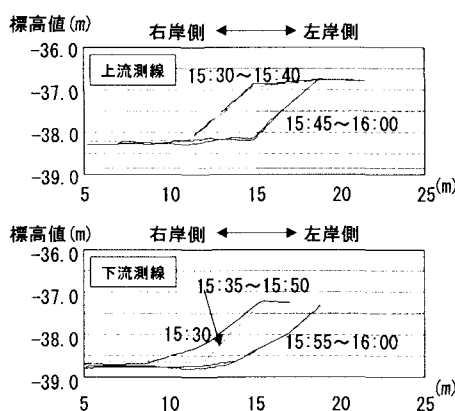


図-8 横断面図(標高値)
 上段: 上流測線。下段: 下流測線
 測地点を0mとしている。
 測線位置については、図-7 参照。

b) 砂州の侵食形態

一般的な砂州の側岸侵食は、砂州近傍の流れが砂州にほぼ平行し、側岸傾斜が緩やかで連続的に侵食が進行する場合が想定される。これに対して、砂州Bにおいては、側岸傾斜が急であり、柱状ブロックが倒れ落ちるような間欠的な侵食現象が確認された。

この様子を、VTR 画像から静止画像として抽出したものを写真-3 に示すが、柱状ブロックが砂州本体から分離して崩れ落ちる様子が捉えられている。レーザスキャナのデータから、側岸高さは 2.0~2.5m であることが明らかとなっており、仮に柱状ブロックの水平面積を 0.5m×0.5m とすれば 1 個あたりの侵食土砂量は 0.5m³ 程度と推定される。

一方、図-7 の標高値から推定される 15:30-16:00 の30分間における砂州Bの右岸側岸の侵食総土砂量は約 500m³ (約 170m 区間あたり) である。そこで、上記の柱状ブロックの体積 0.5m³ を用いれば、約 2 秒に 1 回ずつ $((30 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒}) / (500 \text{ m}^3 \div 0.5 \text{ m}^3)) \div 1.8 \text{ 秒}$ 、柱状ブロックが崩れ落ちた計算となり、これは VTR 画像からの観察とほぼ一致する。

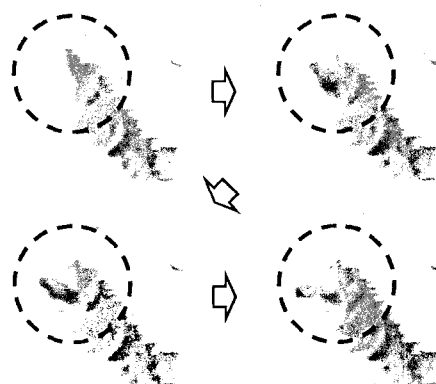


写真-3 砂州Bの右岸側の側岸侵食
 (柱状ブロックの崩れ落ちる様子)

なお、このような側岸侵食が発生するメカニズムについては、水理特性に加えて堆積土砂の含水比などの土質性状についても検討する必要がある。

6. おわりに

本論文では、黒部川の連携排砂を調査対象として、特徴的な堆積土砂の侵食・堆積現象の解明を試みたものである。得られた主要な結論は以下のとおり。

- (1) 3D レーザスキャナによる計測では、中距離型及び長距離型の特性を理解し、これらを効果的に用いることにより、水面と土砂面が混在し、かつ急激に土砂移動が生じる複雑な貯水池内の河床地形計測が実施可能である。
- (2) 計測データから得られる標高値及び受光強度の変化を解析することによって、砂州が侵食されて土砂面が水面に変化していく経過などの、より詳細な地形変化を追跡することができる。
- (3) 宇奈月ダム排砂時の砂州の形成及び侵食現象の基本的特性を整理することができた。特に、一般的な砂州の側岸侵食に対して、水流による側岸基部の土砂掃流が急激であり、柱状ブロックが倒れ落ちるような間欠的に側岸侵食が進行する場合があることが明らかとなった。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所には、現地測量など多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 角 哲也: 土砂を貯めないダムの実現—流砂系総合土砂管理に向けた黒部川の挑戦, 土木学会誌, Vol.88, No3, pp.41-44, 2003.
- 2) E. Atkinson: Looking a little flushed, International Water Power and Dam Construction, February, pp.30-33, 1998.
- 3) 角 哲也, 村崎充弘, 藤永清和, 名倉裕, 玉置晴朗: 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, 水工学論文集第 48 巻, pp.1147-1152, 2004.
- 4) 国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所: ホームページ, <http://www.kurobe.go.jp/>
- 5) 株式会社数理設計研究所: ホームページ, <http://www.madlabo.com/mad/>

(2004.9.30 受付)