

PIV を用いたフラッシング排砂時の 細粒土砂流出過程計測に関する研究

STUDY ON MEASUREMENT OF FINE SEDIMENT DISCHARGE PROCESS
DURING SEDIMENT FLUSHING OPERATION USING PIV

角 哲也¹・村崎充弘²・平 謙二³・新房健一³・名倉 裕⁴・玉置晴朗⁴

Tetsuya SUMI, Mitsuhiro MURASAKI, Kenji TAIRA, Kenichi SHINBO,

Hiroshi NAGURA and Haruo TAMAKI

¹正会員 博士(工) 京都大学助教授 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4)

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 三菱電機株式会社 コミュニケーション・ネットワーク製作所 (〒963-8586 福島県郡山市栄町 2-25)

⁴非会員 株式会社数理設計研究所 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 54-2)

In the Kurobe River, coordinated sediment flushing and sediment sluicing of Dashidaira and Unazuki dams have been executed since 2001. From the view point of the environmental assessment of these operations, how and when high sediment concentration discharge from reservoir will occur is one of key issues.

This paper shows the results of field data obtained during sediment flushing of Unazuki dam in July 2006. Time and spatial variations of reservoir surface velocities during drawdown period were measured by PIV (Particle Image Velocimetry) using CCTV camera and image data processor.

These data can be converted to actual velocities by the 3D laser scanner data. Both reservoir water level and flow velocity changes during the drawdown period help us to understand fine sediment discharge process from a reservoir.

Key Words: Particle image velocimetry, 3D Laser scanner, 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、排砂効率（排出土砂に対する使用水量の関係）および排砂効果（排砂前の堆積土砂に対する排出土砂の関係）をいかに高めるかが重要である。特に、排砂効果の予測に関しては、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⁾。

一方、排砂に伴う下流河川に対する環境影響においては、貯水池内における高濃度濁度の発生予測とその軽減対策が重要な課題となる。既往の研究によれば、排砂に伴う貯水位低下時に最大濃度を迎えることが指摘されている^{3),4)}が、水位低下時の実際の貯水池内の流動形態や細粒土砂の侵食に及ぼす影響などについては世界的に見ても観測例はほとんど無く、明らかにされていない。

筆者らは、宇奈月ダムの完成直後の平成 13 年 6 月の連携排砂時より、3D レーザスキャナを用いて、貯水池内に堆積した土砂の侵食過程に関する 3 次元計測を行ってきた^{5),6)}。これらにより、昼夜を問わず、水面および土砂面が混在する場合の地形変化を時間経過とともに追跡することが可能であることを示した。

貯水池内の土砂の侵食をさらに詳細に検討するには、貯水池内の流速分布およびその時間変化の解析が必要である。そこで本研究では、平成 18 年の連携排砂時の宇奈月ダム貯水池を対象に、CCTV カメラの撮影画像を用いた PIV（粒子画像流速測定法）による流速測定および 3D レーザスキャナを用いた貯水池内の地形計測を組み合わせた現地計測を行い、これらの結果をもとに、フラッシング排砂に伴う貯水位低下時の細粒土砂の流出過程に関する検討を行った。

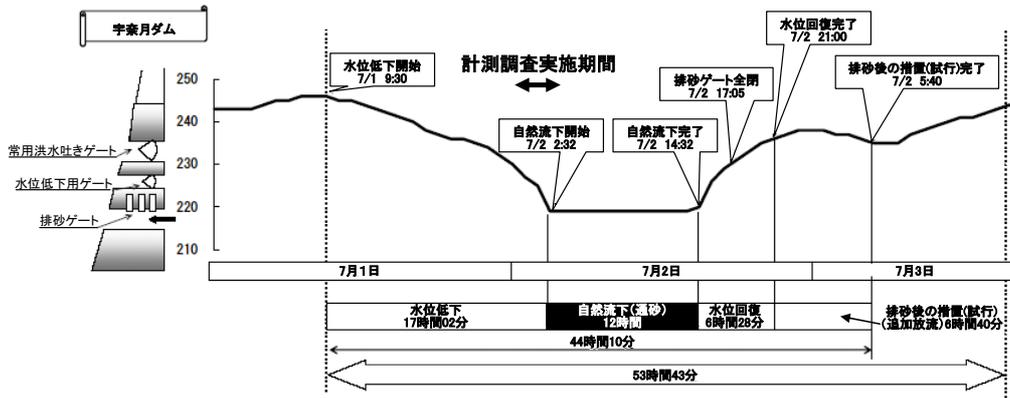


図-1 H18年7月宇奈月ダムの連携排砂・通砂の概要（貯水位変化等）⁷⁾

2. 宇奈月ダム排砂状況と近年の変化

2006年度の連携排砂は、図-1に示すように7/1から7/3にかけて実施された。水位低下に17時間、自然流下に12時間さらに水位回復に排砂後の措置を含めて約24時間の合計約54時間となり、極めて理想的な操作となった。

この間に宇奈月ダム下流において実施された、1時間間隔での採水調査による濁度およびSSの時間変化を図-2に示すが、これまでの例と同様に貯水位低下直後の7/2 2:00～3:00にかけて濁度およびSSがピークを迎えている。

そこで、この関係を過去の排砂事例と比較したものが図-3であり、貯水位が完全に低下して自然流下が始まった時刻を0時に統一して整理したものである。これより、①宇奈月ダム貯水池の堆砂進行により水位低下速度がH13→H16と年々増加してきたが、H16→H18ではほぼ安定化してきている、②SS濃度の最大値は年毎に異なり年々増加傾向にある（これまでの最高はH17）、③SS濃度の最大値の発生は自然流下開始時刻とほぼ一致しており、ダム下流の採水地点までの流下時間を考慮すれば、自然流下開始直前に細粒土砂の流出がピークを迎えている、ものと考えられる。

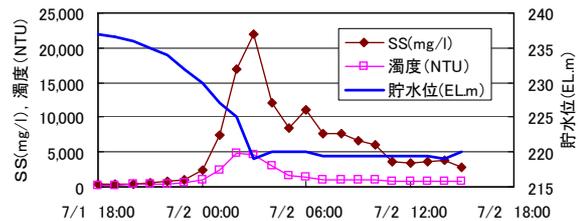


図-2 宇奈月ダム貯水位の変化と宇奈月ダムから約400m下流地点の濁度・SS濃度の変化(H18)

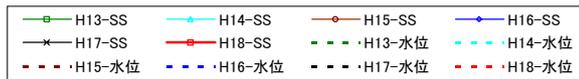


図-3 宇奈月ダム貯水位の変化と宇奈月ダムから約400m下流地点のSS濃度の変化(H13-18)



サイズ：
200(W)mm
× 44(H)mm
× 220(D)mm

写真-1 FX-8100外観

3. ビデオ画像処理装置の概要

宇奈月ダム排砂操作時における表面流速の推移をリアルタイムで把握するために、三菱電機（株）製ビデオ画像処理装置FX-8100（写真-1）を使用した。本装置は汎用画像処理装置であり、追尾侵入監視や土石流監視などの防災向け監視以外に、河川の流速や水位をリアルタイムで画像から算出することが可能である。

FX-8100を使用するに先立ち、この流速計測画像処理の精度を検証するために予備調査を行った。

宇奈月ダム下流に位置する音沢橋付近において、河川表面をカメラ撮影しFX-8100にてリアルタイムに流速計測を行った。同じく、流量調査などでよく使用される浮子測法を使用し、表面流速を比較した。

流速計測は、写真-2に示す河川内3箇所（A、B、C）の測線を対象とし、浮子を各測線に2～3回流して流速を測定するとともに、FX-8100による流速測定では、各測線の中央に合わせて監視エリアを配置し、そのエリア中で流速を計測した。監視エリアは、ビデオ画像の水面の動きに応じて任意の範囲に設定

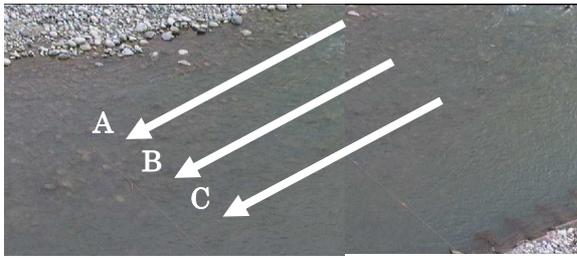


写真-2 黒部川 音沢橋 測定ポイント

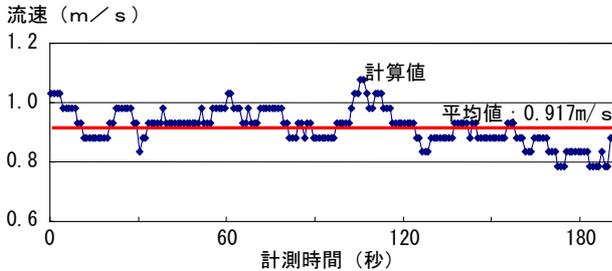


図-4 測線CにおけるFX-8100の測定データ

表-1 流速計測結果の比較

項目	FX-8100 (平均値)	浮子測法
測線A	0.858m/s	0.78m/s
測線B	1.044m/s	0.95m/s
測線C	0.917m/s	0.92m/s
流速の相違	平均 6.1% (最大 9.9%)	
備考	測定間隔 1 秒, 180 秒測定. 上記速度は 180 秒間の平均値	浮子流下距離: 20m 測定回数: 2~3 回

可能であり、現場でリアルタイムに画像処理を行うことにより、空間的、時間的に連続した計測が可能である。図-4に測線Cにおける計測結果を示す。折れ線がFX-8100による測定結果であり、1秒間隔で180秒間の流速測定を実施した。実線は、180秒間の流速の平均値0.917m/sであり、装置は振幅も小さく安定して流速を算出しており、FX-8100の測定結果は実流速をほぼ正確に示していると判断した。

写真-2に示す測線ごとに浮子測法とFX-8100の計測結果を比較したものを表-1に示す。浮子測法とFX-8100による測定結果の差異は、最大で+9.9%となり、従来の調査方法と同程度の精度を有していることが確認された。

一方、この計測手法の課題としては、霧や障害物などにより見通しがきかない場合や、水面の波が風や陽光の乱反射の影響で正常に観測出来ない場合における測定誤差の増大がある。本装置ではそのような計測困難時における誤差回避策として、測定不能を検知し上位に報告する機能を有している。この機能により、計測障害が発生している場合のデータを棄却し、誤差を累積することなく正常な流速を計測することが可能となっている。

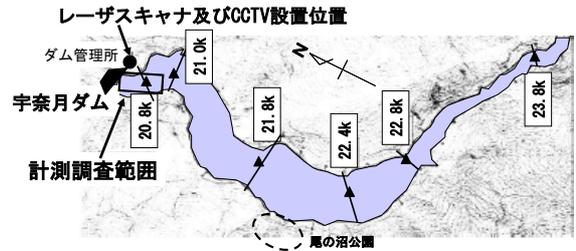


図-5 宇奈月ダム貯水池平面図及び河床縦断面図⁷⁾

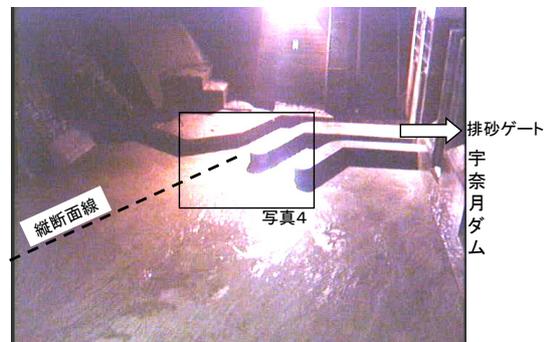
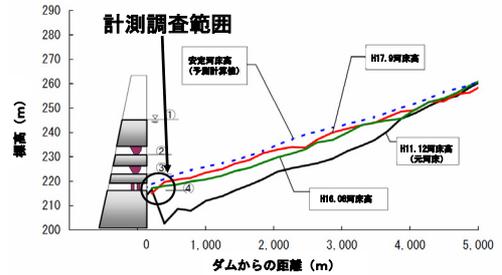


写真-3 宇奈月ダム排砂路上流側貯水池内の水面状況 (7/2, 2:07)

4. 3D レーザスキャナおよびビデオ画像解析装置による計測調査の概要

一般に、PIV 技術だけでは、ビデオ画像の単位時間当たりのピクセル移動量のみでの解析結果となる。そこで、実流速に換算するためには、ピクセルあたりの実距離の測量を別途行う必要がある。本研究では、従来から実施してきたレーザスキャナ計測を組み合わせ、ピクセル移動量を絶対速度に迅速に換算する手法を採用した。

今回の計測では図-5に示す宇奈月ダム直上から湖面橋の範囲を選定した。レーザスキャナ及びCCTVカメラの設置位置は、図-5上図に示す通りである。写真-3にCCTV設置位置からの見た宇奈月ダム直上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製のLMS-Z210(中距離型)である⁸⁾。

レーザスキャナは、例えば上記のような100m×200m程度のエリアであれば、地形データを約1分間で詳細に取得することができる。従って、ビデオ画像処理装置FX-8100を組み合わせ、リアルタイムで表面流速を求めることができれば、河川管理(流

量観測など)やダム管理(貯水変化を伴う排砂操作)のように時間経過に伴ったデータ収集を必要とする現場において、有効な計測手法となるものと期待される。

7月1日に開始された宇奈月ダムの排砂操作では、7月2日2:32に自然流下が始まったと報告されている⁷⁾。本研究は、貯水池内からの細粒土砂の急激な流出現象の解明を主な目的としており、この自然流下開始前後の貯水池内の水面及び流速変化に着目した。そこで、レーザスキャナ及びPIV計測を実施したデータのうち、自然流下開始時間の約40分前の1:50から約5分間隔で、1:50, 1:55, 2:00, 2:04, 2:10, 2:13, 2:18, 2:23, 2:27, 2:34に計測されたデータを使用して以下の解析を行った。

5. 計測結果及び考察

(1) 計測結果

a) 宇奈月ダム直上貯水池の水面形状

宇奈月ダム～湖面橋間を対象に、7月2日1:50～2:34間で計10回のレーザスキャナ計測を行った。各計測とも80,000～85,000点のデータを計測し、各回に約1分40秒を要した。2:18ごろの水面の形状を図-6に示す。上流側から下流側に向かって様に傾斜しているのではなく、○印で囲んだ地域は周辺より標高が数10cm～1mほど低くなっており、また、排砂路に向かって流れが集中して加速する領域が認められる。上流側の標高の高い地域については、土砂が上流から移動し、河床の高まりを反映していると推定される。なお、ダム堤体直上流では土砂堆積が進んでいること標高の高まりから確認される。

図-6及び写真-3に示す縦断面線に沿った水面形状を図-7に示す。1:50～2:10では、まだ湛水状態を継続しながら、ほぼ単調に7cm～8cm/分の水位低下が認められた。2:10～2:27では11cm～18cm/分と水位低下速度が増大し、さらに2:27と2:34では、側線の上流側(0m～120m)が河道状態に移行したと考えられ、大きな水面勾配が認められた。

2:10～2:18の断面形で、○印で囲んだ区間に数10cmの水位低下が認められる。図-6では、○印で囲んだAで示す地域に対応する。これは、排砂操作に伴う土砂の移動により、土砂移動の先端部において河道部の射流域から湛水部の常流域へ跳水が発生して水面が変動している影響と推定される。また2:27以降では、特に60m～100mの区間で水面が約1mの振幅を持って変動している。これは、射流域の拡大に伴って形成された河床波の影響を受けていると考えられる。

以上のとおり、2:10以前では湛水状態で単調に水

位低下が進行する状況、2:10～2:27では水位が大きく低下し水面勾配が増大する状況、2:27以降では射流状態となって河床波の影響により水面が大きく変動する状況の3つの段階が認められた。

b) 排砂路直上の水面形状

さらに排砂路直上区間に着目し、写真-4に示す縦断面線に沿った水面形状を図-8に示す。全体の傾向と同様に、2:10以前では水位が単調に低下する状況、2:10～2:23では水位が大きく低下する状況、2:23以降では水面が大きく変動する状況の3つの段階が認められた。

c) 排砂路直上の表面流速

CCTVカメラで取得した7月2日1:55～2:35のビデオ画像を使用して、写真-4に示す□で囲んだ領域Aおよび領域Bに対して、ビデオ画像処理装置FX-8100によりPIV処理を行い、各領域内の表面流速の平均値を求めた。

領域Aおよび領域Bの表面流速の平均値を図-9に示す。両領域とも水位低下に伴って、表面流速が3m/s程度から2倍以上の7～8m/sまで加速していることが分かる。さらに、加速途中の2:15～2:25間には、約1分間隔の1～2m/s(最大4m/s)の強い周期的な流速変動が認められる。この傾向は領域Aおよび領域Bで共通である。これは、前述の水面形状が変化する状況のうち、急激に水位が低下し水面勾配が増大する時期とほぼ一致している。

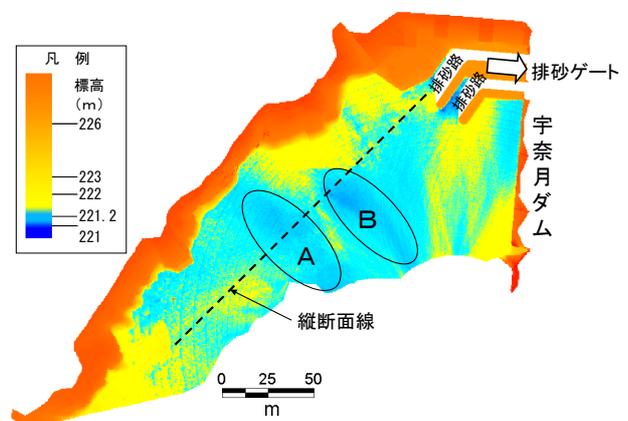


図-6 宇奈月ダム貯水池水面平面図(7/2, 2:18)
標高222m以下(黄色～青色)の範囲が水面

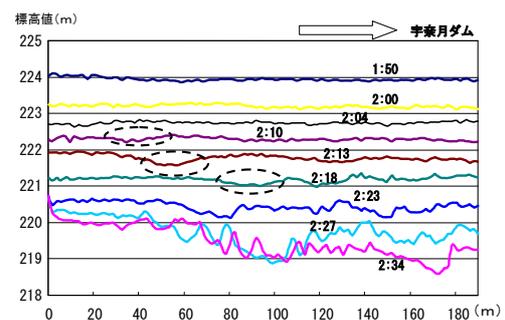


図-7 排砂ゲート排砂路上流側の水面形状

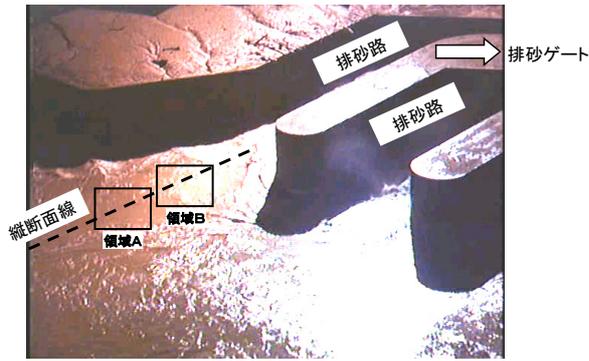


写真-4 宇奈月ダム排砂路直上の水面状況 (7/2, 2:20)

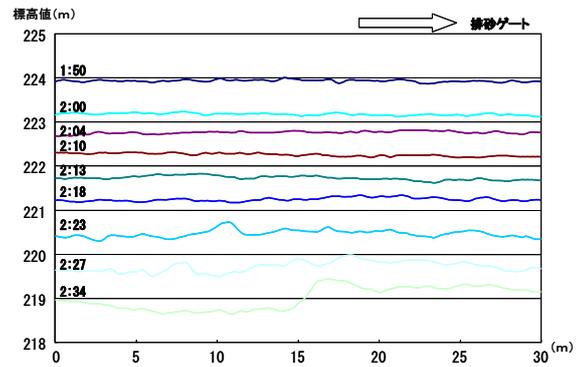


図-8 排砂ゲート排砂路直上の水面形状

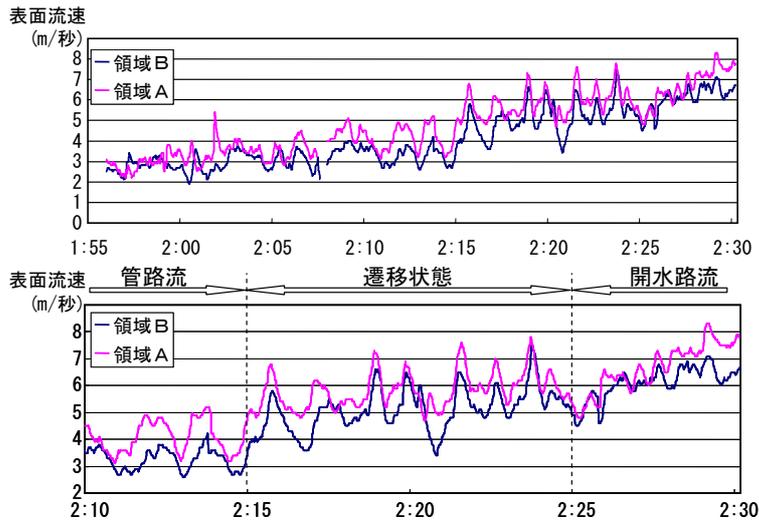


図-9 領域AおよびBの表面流速解析結果
 上図：計測時間全体 (1:55~2:30)
 下図：上図の拡大図 (2:10~2:30)

(2) 考察

a) ビデオ画像解析装置による計測調査方法

高機能 CCTV カメラを使用すれば、夜間でも常設の照明を用いてビデオ画像を取得し、PIV 技術を使用した表面流速の解析を行うことが可能であることが確認された。ビデオ画像を取得することができれば、秒単位で面的に表面流速を取得することができることも確認できた。しかし、光度不足の領域や、霧などにより視界が確保できない場合は解析を行うことは困難である。このため夜間においては、計測対象領域を予め設定して、照明等の配置を考慮する必要がある。

また、ビデオ画像解析装置だけでは、相対的なピクセル移動量の違いを確認するだけであったが、レーザスキャナと組み合わせることにより、ピクセル移動量を実スケールに換算して、流速をリアルタイムで取得することが可能となった。

b) 貯水池内の流動と細粒土砂の流掃形態

水面形状および表面流速の計測結果より、表-2に示すような変化が生じていることが確認され、特に2:15~2:25における周期的な流速変動が興味深い。

そこで、この時間帯におけるVTR画像を詳細に観察した。その結果、①排砂路内の水位が低下するとともに、排砂路内に貯水池から急激に水流が流れ込むことにより排砂路に接近する表面流速が上昇し、②その後、1分程度で排砂路内の水位が上昇し、その結果として流れ込む流速が低下する、といった周期的な流況変化が確認された。

ダム管理事務所による公式な自然流下開始時間は2:32と報告されている。上記の周期的な流速変動現象は、排砂路内の下流側に設置されている排砂ゲート部において、流れが管路流と開水路流を繰り返す遷移状態が生じていることが原因と考えられる。すなわち、排砂ゲート部において水面がゲート下端から切れると開水路流となり、排砂水路内の水位が急激に低下し、貯水池側の排砂路直上流部との水面勾配が大きくなって表面流速が上昇し、この時に貯水池から排砂路内に水と土砂の急激な流れ込みが生じる。その後、この水と土砂の流入量の急増が排砂水路内の水位上昇をもたらすために排砂ゲート下端に水面が接触(再付着)し、一時的に開水路流から管

表-2 水面形状および表面流速から見られる各段階の特徴

	2:15 まで	2:15～2:25	2:25 以降
水面形状	<ul style="list-style-type: none"> ・湛水状態で水位が単調に低下 ・水面形状も大きな変化なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・水位が、大きく低下 ・水面勾配が増大 	<ul style="list-style-type: none"> ・河床波の影響により水面が大きく変動
表面流速	<ul style="list-style-type: none"> ・流速：3～4 m/s ・流速の変動量：最大約 2m/s ・流速の変動周期：ランダム 	<ul style="list-style-type: none"> ・流速：5～6 m/s ・流速の変動量：最大約 4m/s ・流速の変動周期：約 1分 	<ul style="list-style-type: none"> ・流速：6～7 m/s ・流速の変動量：最大約 2m/s ・流速の変動周期：ランダム

路流に戻る。この結果、貯水池水位と排砂路内水位の水面勾配が小さくなって表面流速が低下し、水と土砂の流れ込みも減少する。その後、排砂路内の水と土砂の排出に伴って水位が低下し、排砂ゲート部において再び管路流から開水路流に移行する。

ダムのオリフィス形式の放流管では、管路流から開水路流に移行する過程でこのような遷移領域が発生することが一般に知られている。今回明らかになった宇奈月ダムの排砂路における流速変動も一義的にはこの管路流から開水路流に移行する過程での遷移領域によるものと考えられる。

しかし、これだけでは変動の周期性を説明するには十分ではない。考えられる周期性の原因として、①一定の容量を持った排砂路への土砂流入量の変化が排砂路内の周期的な水位変化をもたらしている、②排砂路内では下流端の排砂ゲート部および上流端の排砂路入口部の2箇所支配断面が存在し、水位低下時にはこれら2点間で支配断面を交互に繰り返している、ことなども考えられ、今後の課題である。

なお、このような急激な水位と流速の変動は、貯水池上流から運ばれてダム直上に堆積した細粒土砂を急激に巻上げる原因となり、これがダムから排出されるSS濃度が自然流下直前にピークを発生させる原因と大きく関係しているものと推察される。

6. おわりに

本論文では、黒部川宇奈月ダムの連携排砂を調査対象として、貯水位低下時の貯水池内流動および細粒土砂流出過程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である。

- (1) PIV 技術と3Dレーザスキャナを組み合わせることにより、ピクセル移動量から実流速をリアルタイムで推定することができた。
- (2) PIVによる表面流速計測では、貯水位低下に伴って排砂ゲートに向かう流れの加速が確認され、排砂路前面では自然流下時に最大約7～8m/sの高流速が発生していることが推定された。
- (3) 3Dレーザスキャナによる水面を含む地形計測では、貯水位低下に伴って、水深が浅く射流領域と推定される河道部の前進とともに、河床波

の形成によると考えられる水面の波立ちが顕著な区間の存在が確認された。

- (4) 自然流下直前には、排砂水路前面において周期約1分、流速値で2～4m/sの周期的な流速変動が観測され、これは排砂ゲート部において管路流から開水路流に移行する過程で生じる遷移領域の影響を受けているものと推定される。
- (5) ダム下流においては、高濃度のSS濃度が自然流下開始直前に観測されており、水位低下に伴って、貯水池内の射流域の拡大に伴う流速上昇に加えて、遷移領域に伴う水面と流速の急激な変動が貯水池内の細粒土砂の強烈な巻上げを生じさせていることが推定される。

宇奈月ダムの堆砂進行に伴い、貯水位低下速度の上昇や排出される粒径の増大などの変化が明らかとなっている。本研究で明らかとなった水位低下時の貯水池内の流動特性を参考にしながら、細粒土砂の流出に伴う環境影響を考慮した排砂ゲート操作のあり方について今後検討していく必要がある。

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および(有)和泉測量には、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，No.3，pp. 41-44，2003.
- 2) 角 哲也：排砂効率および環境適合を考慮したダム堆砂対策の選択，大ダム，194，pp. 125-138，2006.
- 3) 角 哲也：ダム貯水池からの排砂と排砂時の放流水質管理，ダム技術，No. 127，pp. 30-39，1997.
- 4) 角 哲也，白音包力舉：宇奈月ダムフラッシング排砂時の細粒土砂流下特性，水工学論文集，第50巻，2006.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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/>
- 8) 株式会社数理設計研究所：ホームページ，<http://www.madlabo.com/mad/>

(2006. 9. 30 受付)