

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

STUDY ON MEASUREMENT OF EROSION-DEPOSITION PROCESS OF RESERVOIR SEDIMENT DURING FLUSHING OPERATION

角 哲也¹・村崎充弘²・藤永清和³・名倉 裕³・玉置晴朗⁴

Tetsuya SUMI, Mitsuhiro MURASAKI, Kiyokazu FUJINAGA, Hiroshi NAGURA and
Haruo TAMAKI

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 群馬県前橋市上佐鳥町 54-2)

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

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. A field measurement with 3D Laser scanner in Unazuki dam reservoir shows 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

日本の河川流域は、世界的に見ても土砂生産の盛んな特性を有しており、水資源開発、洪水調節などを目的として建設されたダム貯水池の堆砂問題が顕在化している。次世代にわたる土木構造物の持続的管理を実現するために、ダム貯水池内に堆積する土砂の適切な管理が求められている¹⁾。

ダム貯水池の堆砂対策として、掘削、浚渫、バイパスによる排砂、貯水池内の水位を低下させ底部放流管（排砂ゲート）から土砂を排出するフラッシング排砂などが行われている。フラッシング排砂は、自然の川の持つ掃流力を利用して、堆積土砂を排出する有効な堆砂対策である。フラッシング排砂の事例として、海外では多くの実績が報告されている²⁾・³⁾。日本では、黒部川における宇奈月ダム及び出し平ダムにおいてフラッシング排砂の実績がある⁴⁾。平成3年から開始された出し平ダムの排砂操作に加

えて、その下流に位置する宇奈月ダムの管理開始に伴い、平成13年6月には宇奈月ダム及び出し平ダムの連携排砂が実施された。

このようなフラッシング排砂の成否の条件には、排砂ゲートの高さや排砂流量などとともに、貯水池の平面形状も重要である⁵⁾。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数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。

このような観点から、平成 11 年の出し平ダム排砂時に、ラジコンヘリを用いた空中写真測量を実施した⁶⁾。この調査では、堆積土砂の侵食過程を把握することができたが、雨天や夜間でも継続する排砂現象の連続計測が困難であること、リアルタイム性に乏しいことなどの課題が明らかとなった。

そこで本研究では、前調査の課題を考慮し、貯水池内の河道変化、堆積土砂の侵食・堆積過程などを把握することを目的として、平成 13 年 6 月 19 日～22 日の連携排砂時に、宇奈月ダム貯水池を対象に、3D レーザスキャナという 3 次元地形計測器を用いて、貯水池内地形の 3 次元計測を行った。

2. 3D レーザスキャナの概要

貯水池内の河道変化、堆積土砂の侵食・堆積過程などを把握するためには、貯水池内の地形を正確に測定することが必要である。従来は、限られた数の横断測量が非洪水期中に 1 回／年程度実施されてきたが、排砂中の堆積土砂の時系列的な変化過程を理解するためには、面的にかつ高速に（短い時間間隔で）地形情報を取得する必要がある。

本研究で用いた 3D レーザスキャナは、RIEGL の LPM-2K(長距離型：写真-1 左)及び LMS-Z210(中距離型：写真-1 右)であり、地形の 3 次元形状を容易に計測することが可能である。計測有効距離は、対象物の反射率、反射面の角度など多数の要因によるが、LPM-2K(長距離型)が約 2km で、LMS-Z210(中距離型)が約 250m である⁷⁾。表-1 に 3D レーザスキャナの緒元を示す。これらは計測準備を完了すると自動的に周囲の 3 次元プロファイルを計測できるため、計測中の人的労力は不要である。また、測量用の光波測距儀で必要となる反射板を設置しなくても計測可能であるため、ここで対象とするフラッシング排砂中の貯水池内など、人が近づけない地域を遠隔地から安全に計測できる。また、赤外線を利用した光波測距儀と同じ原理で動作することから、通常の雨天や夜間においても計測可能であり、前調査の課題がクリアされる可能性がある。

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、水面と堆砂面が混在する場合の計測可能性が想定された。そこで本研究においては、実際のフラッシング排砂時における計測を実施し、その有効性を検討した。

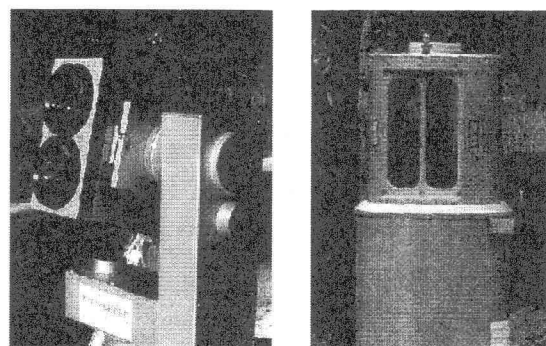


写真-1 左：LPM-2K(長距離型レーザスキャナ)⁷⁾
右：LMS-Z210(中距離型レーザスキャナ)⁷⁾

表-1 3D レーザスキャナの緒元⁷⁾

項 目	LPM-2K	LMS-Z210
反射の良いターゲット(反射率>80%)	～2500m	350m
反射の悪いターゲット(反射率>10%)	>800m	100m
反射シート キャッツアイ	2500m	400m
測定精度	標準±50mm(標準偏差+距離依存誤差≤20ppm)	標準±25mm(標準偏差+距離依存誤差≤20ppm)
測定分解能	10mm	5mm
計測速度	約 100 点/分	約 40 万点/分
スキャン速度	36° /秒 (水平・垂直共)	垂直：最大 20 スキャン/秒 水平：最大 15° /秒

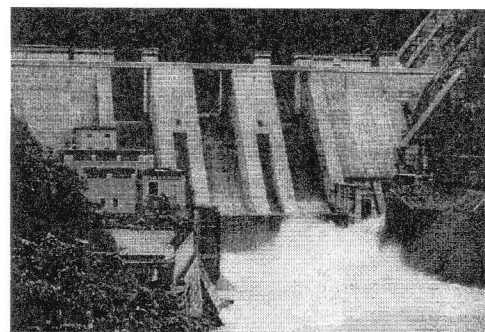


写真-2 宇奈月ダム排砂状況

3. 計測調査の概要

計測対象とした宇奈月ダム⁸⁾は、黒部川で洪水調節機能を持った多目的ダムとして建設され、堤体内に、排砂ゲートを備え、貯水池内に堆積した土砂を積極的に下流に流すことができる(写真-2)。フラッシング排砂の最大の課題は、貯水池内の堆積土砂の侵食・堆積過程を的確に把握し管理することである。

そこで、上流から流入した土砂が一時的に堆積する状況、土砂が緩やかに侵食・再堆積する状況などを計測できるように、貯水池内で比較的川幅があり、流れが緩やかになる図-1 の範囲を計測対象として選択した。レーザスキャナは、計測対象範囲の西側に位置する尾の沼公園に設置し、表-2 に示す調査を実施した。平成 13 年 6 月 19 日～23 日に実施された

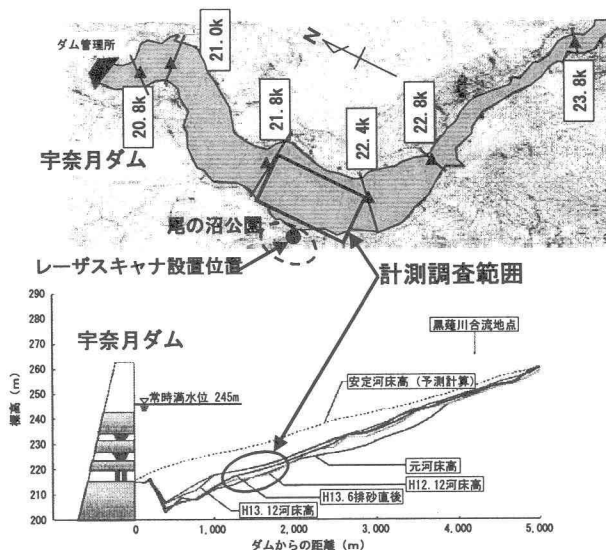


図-1 計測調査位置⁸⁾

連携排砂実施の経過及び計測調査の実施期間を図-2に示す。

4. 計測結果及び考察

(1) 計測結果

a) 計測手法 1

LMS-Z210 (中距離型) による計測の可能性を検討するために、計測有効距離約 250m の範囲を高密度・高速にデータを取得した。

宇奈月ダムにおける自然流下開始 (6 月 21 日 05:00) 以前の 03:26 から 11 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、計測に約 1 分 30 秒を要した。図-3 に、08:00 に計測したデータの分布状況及び標高表示を、また、計測時刻 08:00 とほぼ同時期の計測対象地域の状況を写真-3

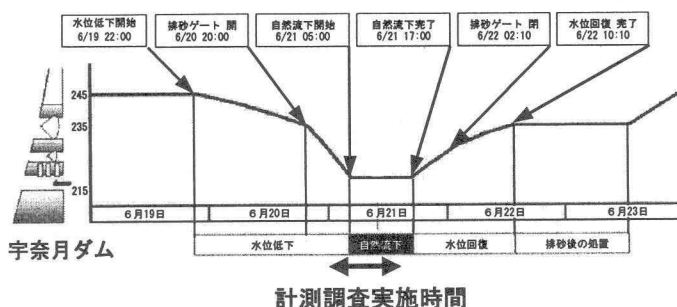


図-2 宇奈月ダム水位と排砂状況
(2001 年 6 月 19 日～23 日)⁸⁾

に示す。写真-3 より、計測地域の大半は、濁った水面であり堆積土砂が出現していないことが分かる。図-4 の横断図によると、河道部において、自然流下開始前の 03:26 から 04:28 の間に約 2m, 04:28 から 05:30 の間に約 2m 低下している。自然流下開始後の 05:30 以降のデータを見ると、05:30 から 14:35 の間では約 0.5m 以内の低下量で、大きく変化していない。これらのことから、河道部では水面の形状が計測されたと考えられる。

なお、図-4 から明らかなように、貯水池幅が広い区間では本計測手法による対岸までの計測は困難である。一方、計測データには写真-3 にも確認される筋状の水面の盛り上がりも計測されており、近距離では有効な計測手段であることが確認された。

b) 計測手法 2

LPM-2K (長距離型) による計測の可能性を検討するために、対岸までの横断測量を行った。各計測とも、250～350 点のデータを計測し、計測は約 4 分以内で完了した。図-5 に計測結果を示す。前節で述べたとおり、計測を開始した 00:21 においては、河道部には水面があり、時間経過とともに水面の低下が計測された。一方、水位低下に伴い、図中の○印で示す

表-2 計測調査の概要

	使用機器	目的	計測開始時刻 (6 月 21 日)
計測手法 1	LMS-Z210	計測有効距離約 250m の範囲を高密度・高速にデータを取得し、計測の可能性を検討する。	03:26, 04:28, 05:30, 06:00, 07:00, 08:00, 09:00, 10:00, 11:50, 13:04, 14:35
計測手法 2	LPM-2K	計測有効距離約 2km の範囲を対象に、水面上に出現している堆積土砂の侵食・堆積過程を計測し、計測の可能性を検討する。	00:21, 01:32, 01:43, 01:48, 02:09, 02:31, 02:50, 04:32, 15:55
計測手法 3		計測手法 2: 対岸までの横断測量を行う。 計測手法 3: 比較的狭い範囲を対象とする。	04:59, 05:15, 05:30, 05:45, 06:00, 06:15, 06:30

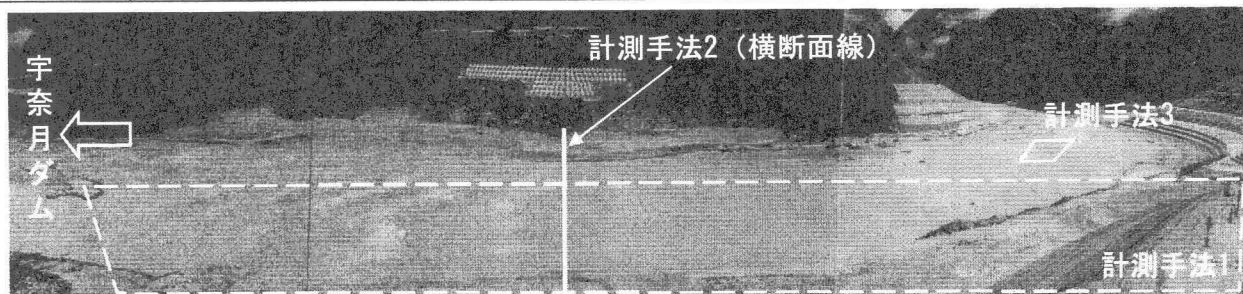


写真-3 6 月 21 日 08:00 頃の計測調査地域の状況 (計測地点から臨む)

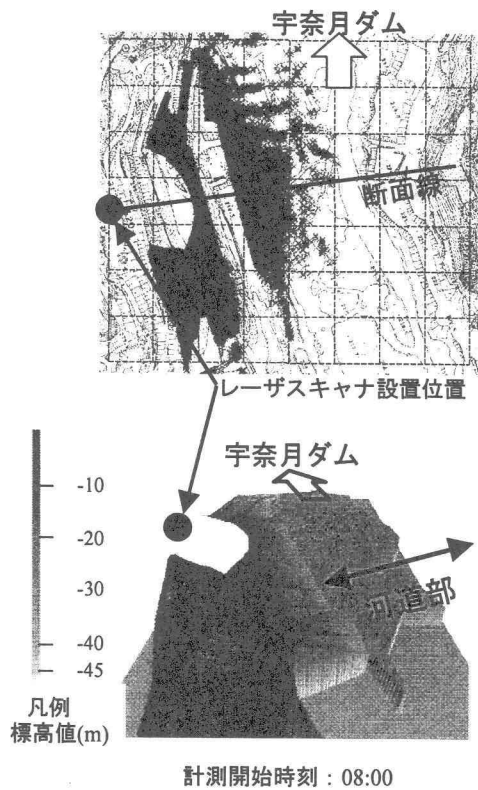


図-3 計測手法1による計測結果
 上図：計測データの分布状況図。
 グリッドの間隔は50m。
 下図：計測結果の標高表示。
 上流側からの鳥瞰図。
 標高値は計測地点を0mとしている。

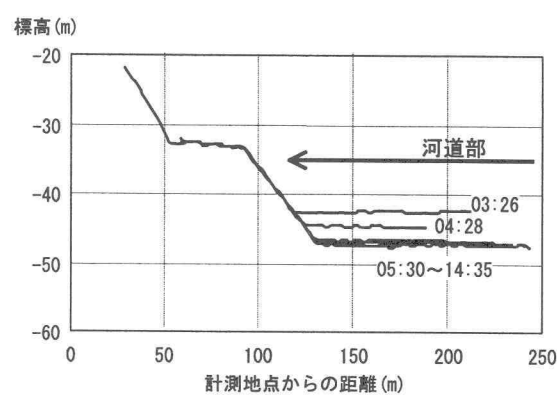


図-4 計測手法1による計測結果（横断面図）
 断面線については、図-3に示す。
 標高値は計測地点を0mとしている。

対岸部分で側岸が水面上に現れ、水面の低下と供に側岸斜面の形状が捉えられた。

c) 計測手法3

河道部に浮洲が出現している箇所を選んで、LPM-2Kによる堆積土砂の侵食・堆積過程を計測した。図-6に、計測調査範囲を、写真-4に計測調査地域の状況を示す。計測調査範囲は、縦断方向：約80m、横断方向：約55mで、約850点のデータを計測し、計測に約9分を要した。

写真-4より、時間の経過により浮洲が侵食されて

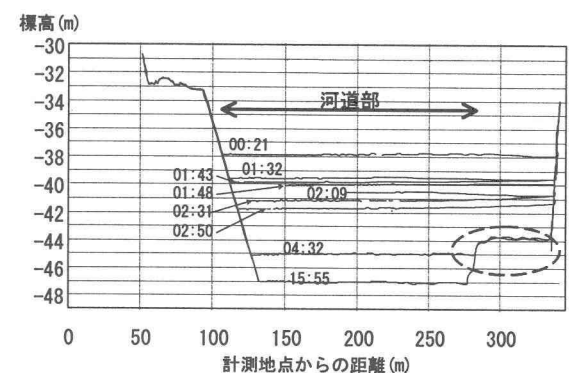


図-5 計測手法2による計測結果（横断面図）
 断面線については、図-3に示す。
 標高値は計測地点を0mとしている。



図-6 計測手法3による計測調査範囲
 グリッドの間隔は50m。

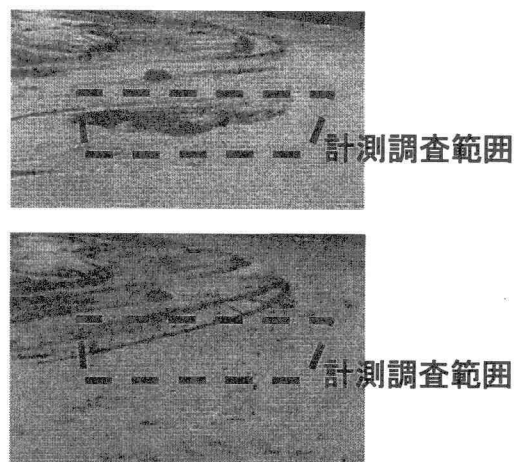


写真-4 計測手法3の計測調査範囲の状況
 上写真：撮影時刻 04:53
 下写真：撮影時刻 07:00

消滅するとともに全体に河床が低下し、向こう側に小さな側岸斜面が出現した様子が確認される。図-7、図-8にこの間の標高値及び反射率の変化を平面図と断面図で示す。図-8の地形断面図（堆積土砂面及び水面）では、浮洲による堆積土砂の上流側の高まり（30～70m付近）が時間の経過（06:00～06:30）とともに崩れて、調査範囲全体になだらかなる様子が確認される。次に、反射率断面図では、当初の浮洲区間（30～70m付近）で50～60%程度と高い反射率を示していたものが、その後20～30%程度まで低下しており、写真-4より浮洲から浅い水面に変化

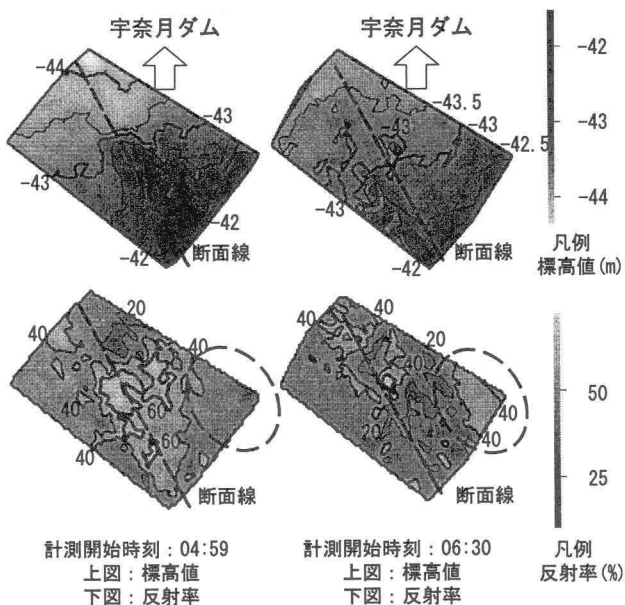


図-7 計測手法3による地形計測結果
標高値は計測地点を0mとしている。

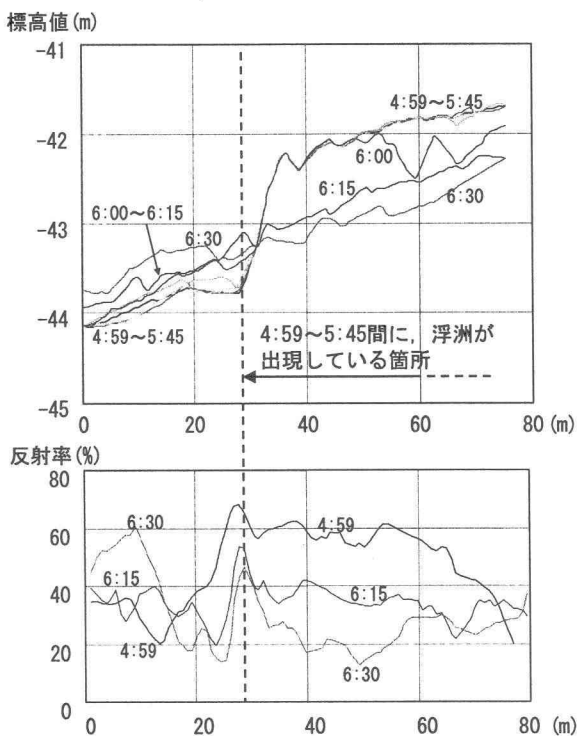


図-8 計測手法3による計測結果（縦断面図）
断面線については、図-7に示す。
上図：地形断面図（堆積土砂面及び水面）
標高は計測地点を0mとしている。
下図：反射率断面図

したためと推定される。一般に、レーザスキャナによる清水面の計測は困難と言われているが、今回のような排砂時の高濁水であればある程度の反射により水面の計測が期待され、計測手法1,2の結果及び上記の流況変化からもこの事実が確認された。

一方、当初は水面であった下流区間（10m付近）では、逆に反射率が時間の経過（06:00～06:30）とともに上昇しており、上流から流されてきた土砂の

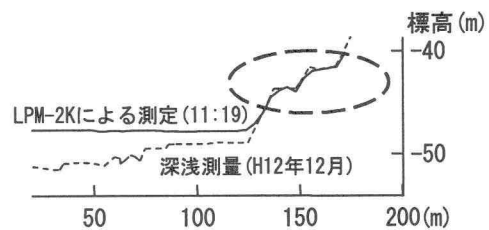


図-9 測点22.0kmにおける計測結果（横断面図）
測点については、図-1を参照。
標高値は計測地点を0mとしている。

堆積により水面から土砂面に変化しつつあった可能性が示唆される。さらに、図-7の反射率の右端部分（図中の○印）を比較すると、06:30時点で反射率が40%以上に上昇しており、写真-4で示す対岸の側岸斜面の出現に対応しているものと考えられる。

(2) 考察

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。

a) 他の計測手法との比較

人が近づけない地域を遠隔地から安全に計測できる手法として、音波を利用した深淺測量、ラジコンヘリ等を用いた空中写真測量などが実施されている。

深淺測量は、貯水池内の地形を測量する手法に用いられる。宇奈月ダムの湛水後の平成12年度に実施された深淺測量の結果（測点22.0km）と本研究の計測結果の比較を図-9に示す。地形的な経年変化や排砂時の侵食・堆積がないと推定される対岸部分（図中の○印）で、両手法の計測結果はほぼ一致することから、両者の計測精度は同程度と考えられる。しかし、深淺測量は湛水時に湖面上の船舶から実施できる手法であり、平面的な計測も困難なことから、フラッシング排砂時の計測手法としては適さない。

空中写真測量は、本研究の計測手法と同程度の精度が得られるものの、上記のとおり雨天や夜間での連続計測が困難であること、リアルタイム性に乏しいことなどの課題がある。

b) 3Dレーザスキャナを活用した計測調査方法

次に、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、計測手法3で示したとおり計測速度が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。一方、LMS-Z210は、計測手法1で示したとおり、80,000～85,000点のデータを2分以内に取得可能であり、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同時に計測可能である。

表-3に、LPM-2K及びLMS-Z210の特徴を活かした計測調査方法をまとめる。前述のように、幅の広い河道部全体の水みち形成過程の把握にはLPM-2Kの

表-3 3D レーザスキャナを活用した計測調査方法

	計測調査方法
LPM-2K	・計測速度が比較的遅いため、数 10 分以上の侵食・堆積過程の計測に使用する。 ・2km 以内の地域を計測調査範囲とする。
LMS-Z210	・計測速度が比較的速いため、数分以上の侵食・堆積過程の計測に使用する。 ・250m 以内の地域を計測調査範囲とする。

使用が有力であるが、フラッシング排砂時には種々の堆積土砂の侵食・堆積現象が生じており、測定対象に適した計測手法を選択する必要がある。

5. フラッシング排砂時の貯水池内堆砂の侵食・堆積過程

宇奈月ダムは完成間もなく、現在の貯水池は上流の出し平ダムから排出された土砂を受け入れている状況である。その中で、今回の計測結果をも踏まえて確認された特徴的現象を以下に整理する。

(1) 貯水位低下過程

貯水池内水深が浅くなり流速が増大するにつれて、出し平ダムから排出されたウォッシュロードを中心とする高濁水が貯水池内に侵入・流下（写真-3 で右上方から左側に向かって）する。その境界面は明確で、侵入側がやや黒い灰色、下流貯水池側が乳白色である。計測地点の尾の沼付近は河道幅が広く、侵入水は横断方向に一樣ではなく、いく筋かに分岐して流下し、平面的に逆流も見られる。

(2) フリーフロー過程

宇奈月ダム貯水池内の堆積土砂量が、多くないことから顕著な水みちの形成までは至っていない。確認される現象は、出し平ダムから排出された掃流砂が宇奈月ダム上流部（写真-3 の右上方）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することと、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が行われたことである。写真-4、図-7 及び図-8 で示した浮洲の侵食と側岸斜面の出現がこれに該当する。なお、具体的には、図-8 で示したように、時間の経過（06:00～06:30）とともに、浮洲区間（30～70m 付近）では約 1m 侵食され、一方、水面であった下流区間（10m 付近）では土砂が約 0.5m 堆積したことが計測された。また、特徴的現象として、写真-3 のほぼ全区間において、写真-5 に示すような反砂堆が 10 分間程度の継続時間で間欠的に形成され、急激な河床変動が生じたことが観察された。

(3) 今後の予想される現象

宇奈月ダム貯水池の堆砂進行により、今後の排砂では堆砂内の水みち形成が進むものと考えられる。その際に、貯水位低下～フリーフロー過程で、今回



写真-5 反砂堆が形成された水面

の高濁水浸入時に確認されたような流れの集中が河道内のどこに生じるかが鍵であり、今後、レーザスキャナの活用による観測の成果が期待される。

6. おわりに

3D レーザスキャナを用いて、フラッシング排砂時の貯水池内の水面及び堆積土砂の形状をリアルタイムに、かつ昼夜の区別なく計測可能であることを示した。ただし、霧など気象条件に影響を受ける点、水面下の河床地形までは取得できない点など、計測手法としての一定の限界や他の計測手法と組み合わせる必要性などが明らかとなった。

一方、今回は、計測されたデータより標高及び反射率の分析事例を示したが、このような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り、今後これらの研究を進めていく必要がある。

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：貯水池土砂管理の推進に向けて-第3回世界水フォーラムと将来展望-，河川，No.683，pp.49-57，2003
- 2) 角 哲也：欧州におけるダム排砂の取組，河川，11月号，pp.43-49，1998。
- 3) 角 哲也：ダム貯水池のフラッシング排砂における排砂効率，ダム工学，Vol.10，No3，pp.211-221，2000。
- 4) 角 哲也：土砂を貯めないダムの実現ー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。
- 5) E. Atkinson： Looking a little flushed， International Water Power and Dam Construction，February，pp.30-33，1998。
- 6) 角 哲也，坂田泰章，鎌田照章，小久保鉄也：フラッシング排砂時における堆積土砂の侵食過程に関する現地調査，土木学会年次学術講演会講演概要集第2部55巻，pp534-535，2000。
- 7) 株式会社数理設計研究所：ホームページ，<http://www.madlabo.com/mad/>
- 8) 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/>

(2003.9.30 受付)