

〔特集〕 ここまでできた、流体計測

ダム貯水池土砂管理の最前線とこれを支援する計測技術

京都大学 防災研究所

角 哲也*

Frontline of Reservoir Sediment Management and Supporting Measurement Techniques

*Tetsuya Sumi, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

*E-mail: sumi.tetsuya.2s@kyoto-u.ac.jp

1 はじめに

流砂系の総合土砂管理において、ダムの堆砂対策の推進は大きな鍵を握っている。ダムは貴重な社会の財産であり、使い捨てにせず適切な貯水池土砂管理により持続可能な利用を目指す必要がある。

神戸市水道局の布引五本松ダムは、日本最古の重力式ダムとして有名であるが、1900年のダム完成8年後にバイパストンネルが造られ、その後、堆砂対策としてのバイパス機能が長年にわたって有効に活用されてきた。これにより、約25年で貯水池が満砂していたところを、容量的には千年以上の長寿命化が実現したと推定されている。

これらの他にも、安定的なダム排砂が実現されている黒部川連携排砂や、電力ダムの土砂管理の好事例と考えられる宮崎の耳川水系ダム群の再開発によるダム通砂（洪水吐きを改造して、洪水時に土砂を通過させるように貯水位を一時的に低下）や、四国の那賀川の長安ロダム下流における大規模な土砂還元（ダム上流で掘削した土砂を下流河道に投入）など、ダムの堆砂対策を基軸とする総合土砂管理が着実に進められている。

天竜川の佐久間ダムは昨年完成60年を迎えたが、侵食海岸の保全等、流域一貫とした土砂移動の連続性の確保が急務であり、現在、佐久間ダムに治水機能を新たに確保し、恒久的な堆砂対策を本格的に進めるダム再編事業が進められている。

本稿では、日本におけるこのようなダム貯水池の土砂管理の最前線とこれを支援する水理計測技術について紹介する。

2 ダム貯水池の土砂管理¹⁾

2.1 ダムの堆砂現象

日本の河川では、掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロードの形態により土砂が輸送されており、これらの粒径別構成比は一般に礫：砂：シルト・粘土=(0~10%):(35~40%):(50~65%)程度である。河川上流部に、ダム貯水池が建設されると、これらの土砂が流入し、**図1**に示すように貯水池内の堆積特性に応じて粒径ごとに分級された堆砂デルタを形成する。

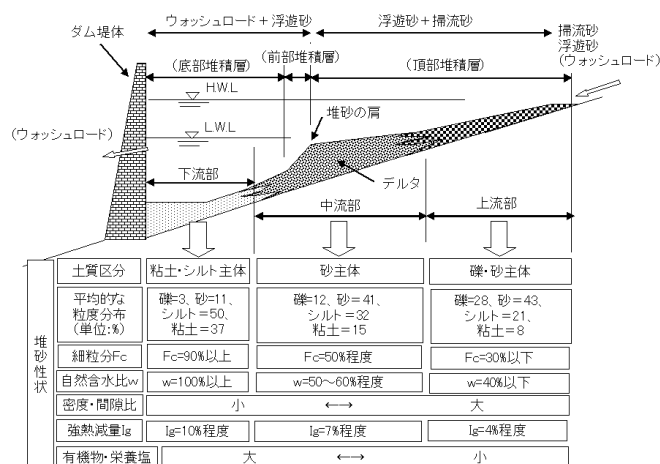


図1 ダムの堆砂現象と貯水池内の堆積土砂の性状

貯水池内の堆砂領域は、①頂部堆積層、②前部堆積層および③底部堆積層に大別され、デルタを構成する①および②には河床を転動してきた掃流砂および浮遊砂のうち粒径の比較的粗い部分(0.1~0.2mm以上)が堆積している。このうち②はデルタの肩を通過した掃流砂がその直下に堆積し、それに浮遊砂による影響が加わって形成される比較的勾配の急な部分である。デルタは時間経過とともに前進すると

同時に、その上流端は上流へ遡上していく。ダム直上流に水平に堆積した③の堆積物はほとんど粒径が0.1mm以下のウォッシュロードであり、主に濁水の密度流に起因するものである。なお、ウォッシュロードの一部は、放流設備を通じて下流へ流出し、この境界粒径はダム貯水池規模や貯水池回転率などで異なるが、概ね0.01mm程度と言われる。

2.2 ダムの堆砂問題

日本のダム貯水池の堆砂問題は、発電等取水口の土砂埋没問題、貯水池上流河道の背砂による洪水氾濫の危険性の増大、利水・治水容量の減少、ダム下流河川への土砂流出の減少と河道部の砂利採取が複合的に影響する河床低下や海岸侵食などがある。

日本では、堤高15m以上のダムが約2,700建設されている。国土交通省では、1977年以来、貯水容量100万m³以上の貯水池に対して堆砂状況などを継続的に調査しており、2014年3月現在、日本全国922箇所のダムの総貯水容量約183億m³に対する総堆砂量は約13.5億m³で、1ダム当たりの総貯水容量に占める堆砂量の平均割合(全堆砂率)は約7.4%である。このうち、土砂流出量の多い中部地方などでは容量損失速度が全国平均の約2倍と深刻である。

2.3 ダムの堆砂対策

日本における貯水池土砂管理は、大別すると、貯水池への流入土砂の軽減対策、貯水池へ流入する土砂を通過させる対策、貯水池に堆積した土砂を排除する対策に分けられる(図2)。

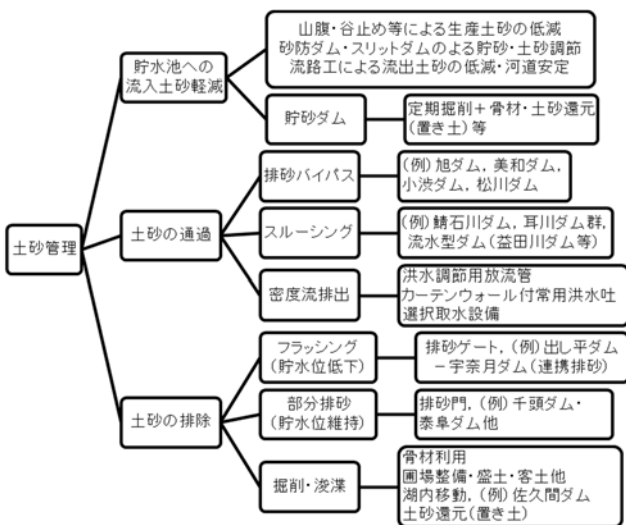


図2 貯水池土砂管理の分類と日本の事例

1) ダム貯水池への流入土砂の軽減対策

流入土砂の軽減対策では、貯水池上流末端に設置する貯砂ダムがある。近年、貯砂ダムで捕捉した土

砂を、ダム下流へ運搬・仮置きし、洪水時等に自然流下させる土砂還元(置き土)が実施されている。

2) ダム貯水池に流入する土砂を通過させる対策

土砂を通過させ、堆積量を軽減させる対策としては、貯水池を迂回させる水路を設け、流入土砂をダム下流まで導く排砂バイパスと、ゲート改造などにより洪水時の流速を増加させて土砂を通過させるスルーシング、土砂を含む高濃度の流水が貯水池深部を流下する特性を利用した密度流排出が採用されている。排砂バイパストンネルには、新宮川水系旭ダムや天竜川水系美和・小渋・松川ダムが、スルーシングには耳川水系のダム再開発や流水型ダムがある。

3) ダム貯水池に堆積した土砂を排除する対策

土砂の排除策としては、機械力等により土砂を掘削・浚渫する方法と、排砂門・排砂路等により流水の掃流力により土砂を排出するフラッシング(貯水位低下)がある。フラッシングの事例としては、黒部川水系出し平・宇奈月ダムがある。

3 ダム貯水池の土砂管理を支える水理計測

3.1 求められる水理計測手法

ダムの貯水池土砂管理においては、表1に示すようにモニタリング基本技術に加えて、貯水池内からの土砂排出現象、さらに、下流河道への流下現象にそれぞれ特化した技術の開発・導入が求められる。これまで、筆者らは黒部川におけるダム排砂時の貯水池内の土砂移動現象を、地上設置型3Dレーザスキャナを用いた現地観測と3次元河床変動計算を組み合わせて明らかにする研究などに取り組んできた^{2,3)}。ここでは、これらに加えて技術開発を行ってきたテーマについて紹介する。

3.2 高濃度浮遊砂濃度観測(SMDP)

ダムからの土砂排出(フラッシング排砂など)では、河川中の掃流砂、浮遊砂およびウォッシュロード量の測定が必要であり、従来ウォッシュロード量の計測手段として濁度計測や人力採水によるSS濃度計測がおこなわれてきた。しかしながら、採水によるSS濃度測定は連続測定ではなく結果が出るまでに時間と費用がかかるなど問題が多かった。

一方、筆者らは、河川水のSS濃度の変化を河川水の密度の変化と考え、連続して自動でSS濃度を圧力変化としてとらえる機器SMDP(Suspended Sediment Concentration Measuring System with

表1 ダム貯水池の土砂管理を支える水理計測

大分類	小分類	貯水池土砂管理手法	現在の対応技術	課題と今後の対応技術	備考（これまでの取組）
土砂動態モニタリング基本技術	貯水池堆砂・排砂量	フラッシング etc.	ナローマルチビーム, サイドスキャンソナー etc.	水中ロボット活用	
	浮遊砂(ウォッシュロード)	排砂バイパス, フラッシング, 密度流排出 etc.	濁度計 超音波 etc.	高濃度計測 粒度分布計測	連続濁度計測 SMDP
	掃流砂	排砂バイパス, フラッシング, 土砂還元 etc.	ハイドロフォン etc.	高速場計測 粒子追跡	ハイドロフォン, プレートインパクトセンサー, RFID(IC タグ)
貯水池内河床変動予測技術	河岸侵食	フラッシング, スルーフラッシング etc.	流速・土砂侵食モニタリング	PIV, 3D レーザスキャナ, ドローン活用	PIV, 3D レーザスキャナ
	粘着性堆積土砂再浮上	湖内移動, 水位低下 etc.	濁度計	貯水池内縦断方向計測	
土砂排出に伴う下流環境影響評価技術	濁水放流による生態系影響	フラッシング, 密度流排出 etc.	濁度計	高濃度計測	SMDP
	排砂による下流河床材料変化	フラッシング, 排砂バイパス, 土砂還元 etc.	写真撮影	ドローン活用	BASEGRAIN

Differential Pressure Transmitter) を開発し、これを黒部川や天竜川美和ダムなどに設置してきた⁴⁾。

SMDP は、ベルヌーイの原理を用いて流体密度を直接測定することにより、洪水時の河川や貯水池における高濃度 SS を連続計測するシステムである。具体的には、流体中に鉛直間隔(ここではH=1000mm)を一定に保った2つの固定基準点を設け、これらの圧力差を高精度のシリコン振動式の差圧センサー

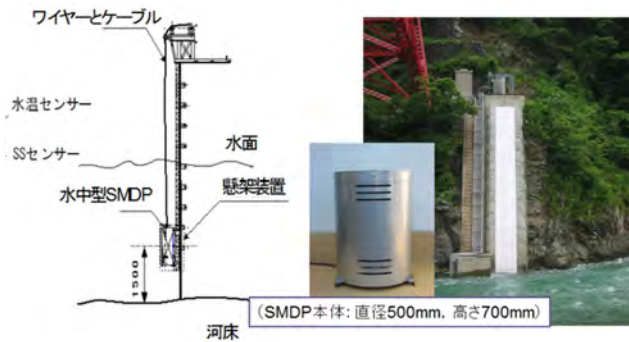


図3 水中型 SMDP と宇奈月ダム下流設置状況⁵⁾

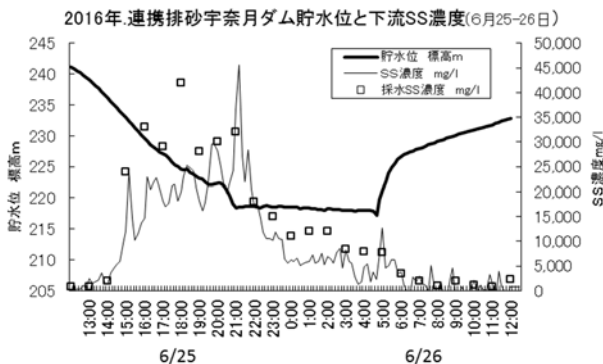


図4 連携排砂時の宇奈月ダム水位と SS 濃度⁵⁾

(横河電機株製) によって計測するものであり、本体を水中に直接設置した水中型とポンプで河川水を取り込んで配管を通して水槽(内部に差圧センサーを設置)まで導水する水循環型の2種類がある。

2015年には、黒部川の宇奈月ダムの下流に水中型 SMDP を設置(図3)して連携排砂の際の高濃度 SS をリアルタイムで測定することに成功した。2016年は SMDP で測定した SS 濃度値をダムの排砂ゲート操作に使う試み(貯水位低下時に排砂ゲートの開閉操作を複数回繰り返して土砂の急激な侵食(=高濃度発生)を抑制)がなされ、排砂量が例年より多かったにもかかわらず、ピーク SS 濃度を例年並みに抑制することができた(図4)⁵⁾。今後は、下流河川の SS 濃度を抑えながらできるだけ効率よく多くの浮遊砂の排出を行うために、本システムを用いた SS 濃度のリアルタイム計測とそれに対応したゲート操作によるダム下流の SS 濃度の制御が重要となる。

3.3 掃流砂観測(プレート型インパクトセンサー)

3.3.1 センサー開発とキャリブレーション

排砂バイパストンネル(SBT)は、洪水時にダム上流から貯水池に流入する土砂をダム下流へ直接迂回させる施設であり、日本とスイスが世界をリードしている。トンネル内は高流速(10m/s以上)で土砂が流下することからトンネル床面の摩耗対策が必須であり、摩耗量の予測には、SBT内の流砂量、特に摩耗量に影響する掃流砂量の計測が重要である。

既存の掃流砂量計測装置として、日本ではパイプ式ハイドロフォンが砂防分野などで多用されている。

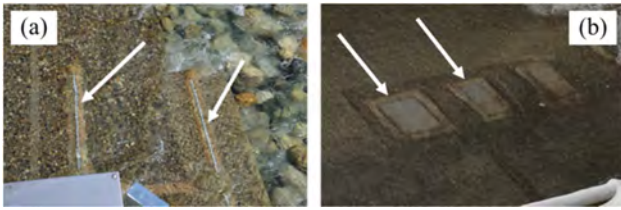


図 5 (a)パイプハイドロフォン (長野県与田切川) , (b) プレート型ジオフォン (穂高砂防観測所)



図 6 プレート型インパクトセンサー

これは、図 5(a)に示すように、スチールパイプ内に据え付けられたマイクロフォンに礫が衝突した際の音を検知して電圧の時系列波形データとして記録するものである。砂防は遠隔地が多いことから、データ量を軽くするために、電圧データを信号処理して、設定した閾値を超えるピーク数をカウントし、掃流砂量とピーク数の関係式から流砂量を推定する。

一方、ヨーロッパでは、スイスで開発されたプレート型ジオフォンが使用されてきた⁶⁾。これは、図 5(b)に示すようにスチールプレート形状であり、礫の衝突によるプレートの振動をジオフォン(地震動等の地盤振動を計測する超低周波の固有振動特性を有するセンサー)で計測し、ハイドロフォン同様に電圧の時系列波形データとして記録する。プレート型ジオフォンは、既にスイスの Solis ダム SBT 吐口部に導入され、2012 年より観測が開始されている。

両計測装置はいずれも間接計測であり類似しているが、各々表 2 のような得失を有し、特に重要な差異は強度と感知限度である。プレート型ジオフォンは比較的大粒径の礫の衝突に対しても耐久性を有す

表 2 ハイドロフォンとジオフォンの比較⁷⁾

	パイプハイドロフォン (Hydrophone)	プレート型ジオフォン (Geophone)
開発国	日本	スイス連邦
形状	スチールパイプ	スチールプレート
計測原理	礫衝突時の音(パイプ円周方向の固有振動数が卓越)	礫の衝突時の振動
長所	安価で設置が容易、粒径 2mm 程度まで検知が可能	巨礫の衝突による変形が少ない
短所	巨礫の衝突によりパイプが変形、高流速では礫が飛び越えてしまい、正確な計測が困難	導入コストが高い、cm 単位以上の礫から感知し、mm 単位の粒径材料は計測困難

るが、パイプハイドロフォンは礫の衝突によって変形する可能性がある。一方、プレート型ジオフォンは、小粒径の砂(粒径 10mm 程度以下)を検知することができず、パイプ式ハイドロフォンの感知限度(2mm 程度)と比べると大きく劣る。SBT 内は土砂が高流速であり、その上、粒径分布も広範囲に及ぶため、これら両者の特性を考慮した新たなプレート型インパクトセンサーを開発した。

図 6 が新しく開発されたプレート型インパクトセンサーであり、形状はジオフォンと同様にスチールプレート型であり、センサとしてマイクロフォンに加えて試験的に振動センサ(KEYENCE 社 GA-313A (応答周波数 40~8kHz))を導入している。

著者らは、この掃流砂量観測装置の性能を確認・比較するために人工水路を用いたキャリブレーション実験を行った⁷⁾。図 7 に、出力電圧波形の一例を示す。流速は 4.5m/s、粒径は(a)100mm、(b)2mm であり、上段がマイクロフォン、下段が振動センサである。図 7(a)より粒径が 100mm と大きい場合は両センサが礫の衝突を明確に感知している。また図 7(b)より、マイクロフォンでは波形が生じておらず、粒径 2mm 程度の小粒径の土砂の感知は困難であることが示された。一方、振動センサでは感知できており、両センサを組み合わせれば、広範囲な粒径の通過を捉えられる可能性があることが明らかとなった。

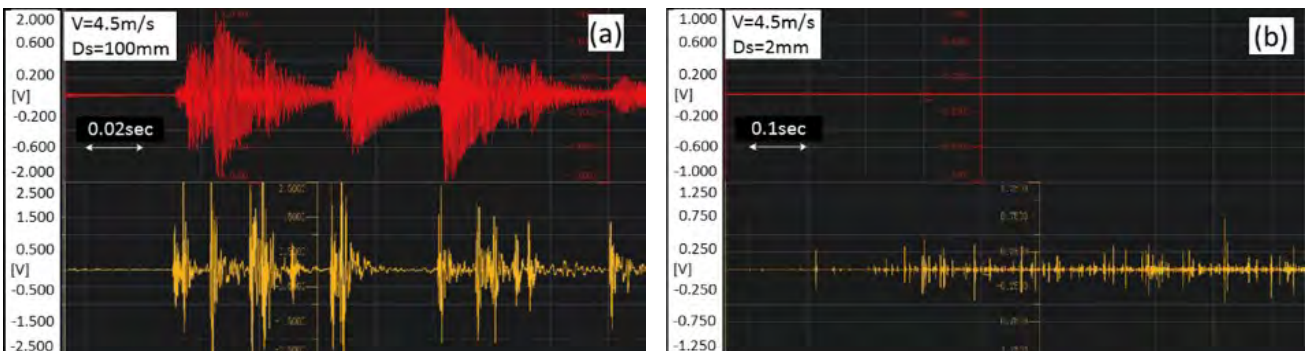


図 7 信号波形 (マイクロフォン (上段), 振動センサ (下段), 粒径 : (a) 100mm, (b) 2mm)

3.3.2 小渋ダム SBT への現地導入と現地計測

小渋ダム SBT を通過する流砂量を観測し、摩耗量の推定精度を高めることを目的として、トンネル下流端に図 8 のように計測センサーを設置し、2016 年度より試験運用を開始している。プレートは、流砂量の横断分布特性も把握できるようにデザインした。なお、次節に示す IC タグによる礫移動追跡用のアンテナも図 8 のように設置している。

実運用に先立ち、平成 28 年 8 月に現地キャリブレーション実験を行った。実験では、トンネル吐口から 800m 上流地点のトンネル内に置土（粒径 5,10,50mm, 土砂量 3~9m³）し、調節ゲートを開いて一定の流量（清水）を通水させた。その結果、水路実験同様に、流砂波形が観測され、マイクロフォンに比べて振動センサで反応が大きいことが明らかとなった。また、横断方向では、トンネルカーブの内側で流砂量が多く、大粒径の土砂が小粒径の土砂に比べ早くに吐口に到着している可能性があることなども明らかとなった。本計測システムは、2016 年 9 月、2017 年 7 月のバイパストンネルの実運用時にも掃流砂の通過データの取得に成功しており、主に、5mm 以上の粒径成分の土砂収支のみならず、時間的（洪水波形中）、空間的（トンネル横断分布）な土砂通過量の把握に大きく貢献することが期待される。

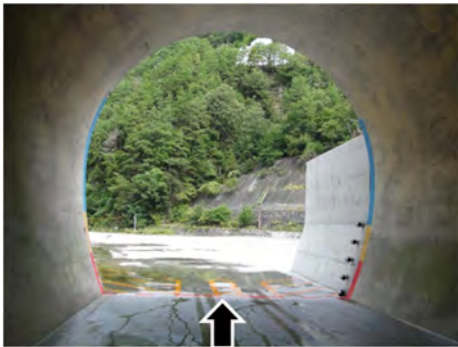


図 8 プレート型インパクトセンサーの配置

3.4 RFID (IC タグ)

3.4.1 IC タグシステム

近年、主に河川域における土砂移動をモニタリングする手法として、長期にわたり位置情報の継続観測が可能で、IC タグ (RFID (Radio Frequency

Identification Device)) を導入した礫移動計測手法が用いられてきている⁹⁾。筆者らも、渓流域での砂防ダム排砂時の土砂移動やダムからのフラッシュ放流時の置き土の移動プロセスを対象にシステム開発を行ってきた^{8),9)}。IC タグには、電池を内蔵しないパッシブタグと電池内蔵のアクティブタグがある。

IC タグシステム(テキサスインスツルメンツ社のシリーズ 2000 リーダシステム)は、パッシブタグであり、通信に使用する周波数が水の影響を受けにくい長波帯の周波数 (134.2kHz) である。パッシブタグはアンテナ側から供給される電磁波をタグが受信することで電力を得て信号を発信するため、タグ側に電池が不要で、破損しない限り 20 年~30 年という非常に長期の追跡が可能である点が移動観測にとって有利である (図 9, 10)。反面、通信距離が 50cm 弱と短く、水深が浅く、また川幅が狭い河川においては高い作業効率を得られるが、水深がより深くなるとアンテナを水中に沈めて計測する必要がある。

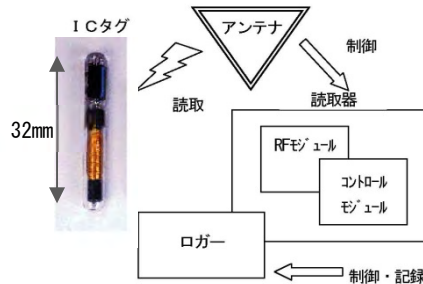


図 9 装置構成



図 10 IC タグを挿入した礫 (直径 100mm)

3.4.2 流水型ダム内の土砂移動の追跡

近年、洪水調節に特化し、常時は貯水しない「流水型ダム」が建設されてきている¹⁰⁾。流水型ダムは常用洪水吐が河床部に設置され、図 11 に示すように、貯水池内に洪水時に流入した土砂が、洪水後に自然排出されることが期待されているが、その実態は十分に解明されていない。島根県の益田川ダムは流水型ダムの代表事例であり、筆者らは、その土砂移動の実態を明らかにするために、上記の IC タグシステムを用いて、湛水地内の礫の移動を追跡した¹¹⁾。

調査では、IC タグを埋め込んだ礫 (コンクリートブロックで模擬、小 (50mm 相当)、大 (80mm 相当)) を湛水地内に設置して 2011 年 6 月から約 2 年間で 5 回モニタリングした。

図 12 に結果を示す。図の横棒はその間の試料の移動履歴を示し、全体的に礫はダム堤体に近づいてきており、試料(小)は 0.2km 付近まで到達しているのに対し、試料(大)は 0.3km 付近で留まっている。

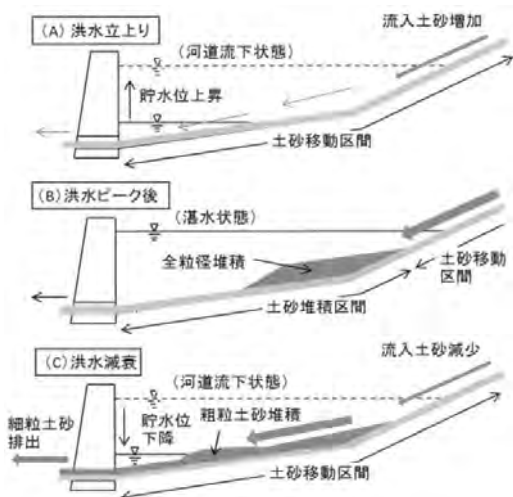


図 11 流水型ダムの土砂流入・堆積・排出過程¹⁰⁾

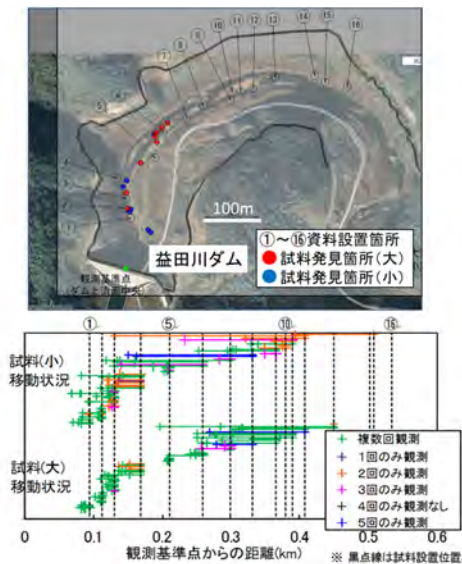


図 12 益田川ダムにおける IC タグ付き礫の移動¹¹⁾

粒径によって移動可能な範囲が異なることが確認された。なお、これらの移動範囲は、各粒径に応じた限界掃流力と、この間に湛水地内に発生した掃流力の推定値とほぼ一致しており、流水型ダムの土砂管理では粗粒分の動態把握が重要と示唆された¹¹⁾。

4 おわりに

本稿では、ダム貯水池の土砂管理の最前線とこれを支援する水理計測技術について紹介した。ダムの長寿命化のためには、貯水池に極力土砂を貯めないことが重要であり、安全かつ効率的にダムから土砂を排出するための土砂動態に関するモニタリング技術の進展が大いに期待されている。下流に流下した土砂は河川内に新たな地形を形成し、ダム下流の環境問題を大きく改善する可能性がある。このような課題に対しては、ドローンを活用した画像解析による河床材料の粒径分布測定や河川内水温分布調査な

どが有力であり、こうした技術も重要である¹²⁾。

謝辞

本稿に関する水理計測に関して、(株)SMD 技術研究所 森田佐一郎氏、(株)ハイドロテック 野中理伸氏、京都大学工学研究科 小柴孝太君、(有)佐竹設計 佐竹宣憲氏、(株)建設技術研究所 石田裕哉氏・倉橋 実氏、国土交通省黒部河川事務所・天竜川ダム統合管理事務所 および島根県の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 角 哲也：水系一貫の土砂管理について、水工学に関する夏期研修会テキスト、(2013) A-5-1-20.
- 2) 角 哲也、村崎充弘、平 謙二、新房健一、名倉 裕、玉置晴朗：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、水工学論文集、第51巻、(2007) 1075-1080.
- 3) Taymaz Esmaceli, Tetsuya Sumi, Sameh A. Kantoush, Yoji Kubota, Stefan Haun : Numerical Study on Flushing Channel Evolution, Case Study of Dashidaira Reservoir, Kurobe River, *Journal of JSCE, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 71, No. 4, (2015) I_115-I_120.
- 4) 角 哲也、森田佐一郎、越智隆志、小宮秀昭：差圧測定による浮遊砂濃度計測システムの開発、ダム工学、11(3)、(2001) 4-12.
- 5) 角 哲也、森田佐一郎、小宮秀昭：水中型SMDP による黒部川ダム連携排砂時の高濃度SS 計測と制御、土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4, (2017) I_559-I_564.
- 6) Helmut Habersack et.al. : First SedAlp Milestone, WP5 - Action 5.2, Protocol for data collection method in sediment transport, <http://www.sedalp.eu/download/dwd/reports/milestone.pdf>
- 7) 小柴 孝太、角 哲也、堤 大三：プレート型振動センサを用いた掃流砂量計測手法に関する研究、土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, (2016) I_925-I_930.
- 8) 角 哲也、石田裕哉、佐竹宣憲：ICタグ技術を応用した砂礫移動に関するトレーサー調査手法の開発、水工学論文集、第51巻、(2007) 632-636.
- 9) 角 哲也、石田裕哉、佐竹宣憲：ICタグ技術を用いたトレーサー調査手法による砂礫移動観測、水工学論文集、第52巻、(2008) 889-894.
- 10) 池田駿介・小松利光・角 哲也編著：流水型ダム ～ 防災と環境の調和に向けて ～ (技法堂出版、2017)、ISBN : 978-4-7655-1847-5
- 11) 角 哲也、倉橋 実、石田裕哉：ICタグを用いた流水型ダム貯水池内における土砂移動・堆積過程のモニタリング、河川技術論文集、第20巻、(2014) 13-18.
- 12) 小林草平、角 哲也、竹門康弘：ドローンとサーモグラフィを組み合わせた砂州の湧水ポテンシャルの評価、河川技術論文集、第23巻、(2017) 621-626.