

I C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

MONITORING OF SEDIMENT TRANSPORT AND DEPOSITION PROCESS IN IN-STREAM FLOOD MITIGATION DAM USING RFID TECHNOLOGY

角 哲也¹・倉橋 実²・石田裕哉²・Mohammad Ebrahim Meshkati Shahmirzadi³
Tetsuya SUMI, Makoto KURAHASHI, Hiroya ISHIDA

¹正会員 博士(工) 京都大学教授 防災研究所水資源環境研究センター(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²非会員 株式会社建設技術研究所東京本社ダム部(〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

³正会員 京都大学研究員 防災研究所水資源環境研究センター(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Recently, number of in-stream flood mitigation dams which are usually empty and will store flood flow in only short period is increasing. This structure can be understood ecofriendly because it can sluice incoming sediments through bottom outlets naturally and reduce adverse environmental impacts on downstream river below dams. But there are still unknown factors such as effects of grain size on sediment passing through reservoir. Based on past studies, it has been noted that coarse gravels and stones bigger than a certain level may not be discharged but left in the reservoir because of the difference in tractive force in the channel upstream of the reservoir and in the reservoir although fine sediments are adequately discharged through the bottom outlet.

We conducted a field survey on the Masudagawa Dam in Shimane prefecture, a typical flood mitigation dam in Japan, by using RFID (Radio-Frequency Identification Device) technology to track the movement of gravels by several floods in the reservoir area from 2009 to 2013. Sediment transport and deposition process in reservoir area is discussed longitudinally and transversely both by tracking data of gravels and 1D/2D numerical models.

Key Words : In-stream flood mitigation dams, reservoir sedimentation, RFID, Masudagawa Dam

1. はじめに

国際大ダム会議(ICOLD)では、「今後のダムの多くは多目的であろうが、100年間あたり数週間程度の洪水時を除いてほとんど空の状態を保つ洪水調節専用ダムは環境順応型と位置づけられる。」と述べられている¹⁾。国外では、米国、欧州(スイス、オーストリアなど)でこのような洪水調節専用ダム(Flood Retention Basin)による洪水管理が進められてきている²⁾⁶⁾。

日本では、この洪水調節専用ダムは「流水型ダム」として、河床部に放流設備を有し、平常時には流水の貯留を行わず流入水とほぼ同じ水質が維持されることや、魚類等の溯上・降下や土砂の流下などの河川の連続性を確保しやすいことなどの環境面の特徴が注目されている。日本における実績は、主として昭和30年代から50年代にかけて都道府県の土地改良事業として建設された中小規模の農地防災ダムがある。一方、国土交通省所管の直轄及び補助事業のダムとしては、島根県益田川ダム(2005)に続き、鹿児島県西之谷ダム、石川県辰巳ダムなどが建

設され、今後も増加する傾向にある⁷⁾⁸⁾。しかしながらこうした流水型ダムで生じている現象に関しては、現地調査などで一部データが収集されてきているが、実際の環境変化等については十分に明らかになっていない⁹⁾¹¹⁾。

一般に、貯水池内の土砂流入・堆積・排出過程は図-1のようなプロセスで進むと想定されているが、粒径ごと、特に粗粒土砂の湛水地内の輸送形態については不明な部分が残されている。すなわち、通常状態から洪水ハイドロが立ち上がってくると、上流河道よりさまざまな粒径の土砂が湛水地内に流入してくる(A)。さらに流量が増加すれば、ダム底部に設置された常用洪水吐きによって洪水流量がカットされて湛水が開始され、上流河道と湛水地部で土砂掃流力のギャップが生じて土砂堆積が始まる。特に、大きな洪水時には一時的に堆砂量が増大するものと考えられる。洪水ピーク後には、湛水された水の排水が開始され(B)、回復した掃流力によって一時的に堆積した土砂の再移動が始まりダム下流に自然排砂される(C)。しかしながら、このタイミングでは上流河道からの供給流量が減少しており、細粒土砂は排出されるものの、一定規模以上の粗粒土砂は排出されずに湛水地内

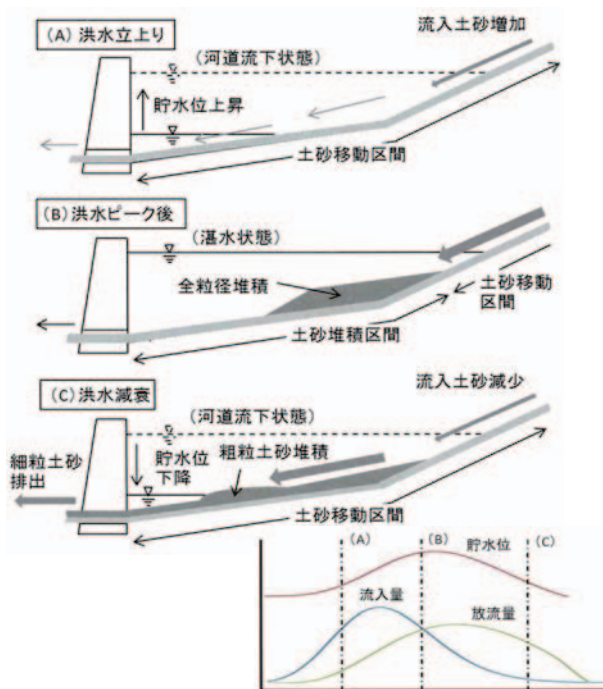


図-1 流水型ダムの土砂流入・堆積・排出過程

に残り残される可能性がある。このような粗粒土砂が流入土砂全体に占める割合や、土砂堆積によるダム管理上の影響についてはこれまで十分に検討されていない。

一方で筆者らは、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)）を導入した砂礫移動計測手法を開発し、これまでに、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還元土砂の移動プロセスの理解に貢献してきた^{12)~15)}。

そこで本報では、このICタグを流水型ダム貯水池内に適用し、日本の代表事例である益田川ダム貯水池内を対象に、粗粒土砂の湛水地内の移動プロセスを明らかにするための現地観測を行った結果とその分析結果について報告する。既報では、ダム貯水池の上下流方向の縦断的な土砂移動可能性を中心に議論を行ってきたが、ここでは特に、貯水池内の河道横断的な掃流力の評価を行い、最終的に土砂が堆積する過程までを対象とし、現地の堆積状況の把握と、この再現を目指した2次元河床変動計算結果について考察する。

2. ICタグシステム

(1) 装置概要

読取器にてICタグが持つ固有の番号を識別する事をその基本機能としている。本検討では、長期の観測期間を考慮し、電池を内蔵せず読取器からアンテナを通じ電波にてその必要電力が供給されるパッシブタイプを用いた。なお本装置のタグ検出範囲は0.5m程度である。

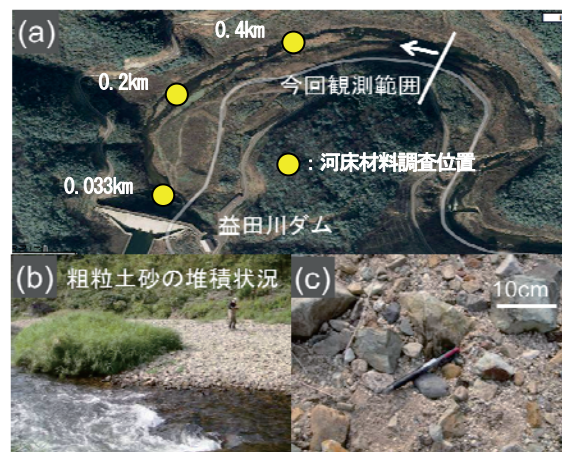


写真-1 益田川ダム貯水池と粗粒土砂堆積状況

(2) ICタグ試料

タグは、長さ32mm、直径3.8mm、重さ0.8グラムのガラス封入タイプである。これをコンクリートブロックに直径4mmの穴を開け挿入し樹脂で封入したものをICタグ試料（以下、試料）とする。タグ自体の寿命は30年程度であるため、コンクリートブロックに物理的な破損がなければ長期間の追跡が可能である。

(3) 読取器

読取器は、バッテリーおよび無線通信部からなる読取器本体、ゲートアンテナ（715mm×270mm×16mm）、GPS（Global Positioning System）および制御記録用のノートパソコンで構成される。ゲートアンテナ（以下アンテナ）以外の装置一式を観測者が背負い、アンテナを水中あるいは気中の河床上にかざすことで試料の有無を判定する。試料が観測された場合、タグ固有の識別番号とGPSの位置、観測日時が記録される。

3. 益田川ダムにおける砂礫移動観測

(1) 益田川ダムの現状と観測目的

益田川ダムの現在の状況は写真-1に示すとおりであり、(a)ダム堤体上流の河道部には、ダム建設前から形成されている砂州が存在し、(b)このうちの一部に粗粒土砂が顕著に集積しており、(c)その粒径は大きいもので10-15cmの礫となっている。観測は、貯水池内におけるこれら粗粒土砂に着目した土砂流入・堆積・排出過程を明らかにすることを目的とする。

(2) 観測方法

ダム貯水池内河道部に試料を設置し、その位置の経時変化を追跡する。試料の形状は、コンクリート製の直方体で、写真-1に示す現地の状況および調査範囲近傍の河床材料粒径を踏まえて、小（60mm×50mm×40mm）および、大（100mm×80mm×70mm）の2種作成した。数量はそれぞれ

表-1 試料設置箇所および個数

記号	基準点からの距離(m)	設置個数		記号	基準点からの距離(m)	設置個数	
		小	大			小	大
⑬	533	3	3	⑧	331	3	3
⑮	507	3	3	⑦	300	3	3
⑭	501	3	3	⑥	259	3	3
⑬	449	3	3	⑤	210	3	3
⑫	408	3	3	④	168	9	3
⑪	390	3	3	③	130	10	3
⑩	380	3	3	②	112	6	3
⑨	366	3	3	①	94	3	3
		計				64	64

表-2 試料観測個数

調査	調査日	経過 日数	試料観測個数		
			小	大	計
設置日	2011.06.09	0	64	64	128
1回目	2011.08.12	64	22 (34%)	26 (41%)	48 (38%)
2回目	2011.09.13	96	31 (48%)	27 (42%)	58 (45%)
3回目	2012.05.29	355	20 (31%)	26 (41%)	46 (36%)
4回目	2013.06.01	723	5 (8%)	5 (8%)	10 (8%)
5回目	2013.09.28	842	7 (11%)	8 (13%)	15 (12%)

(注) %は設置個数に対して

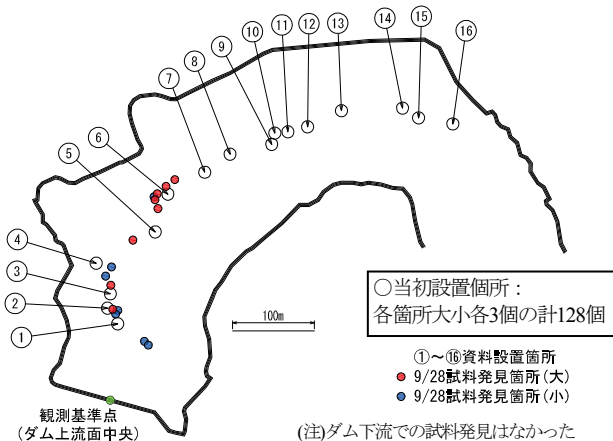


図-2 試料の第5回観測結果 (日付:2013.9.28)

れ64個の全128個である。これら試料の識別番号と試料サイズ、設置位置を全て事前に記録し、その後の追跡で得た識別番号と照合し位置の集計を行う。2011.6.3に設置した試料の位置、個数を表-1にまとめる。表中に記述した基準点からの距離とは、ダム堤体上流面中央からの直線距離である。

(3) 試料観測調査

調査はこれまで全8回試みているが、増水に伴う調査の中止やGPSデータの保存の不具合があり、有意なデータは5回分となる。観測結果については、この5回を第1回～第5回の調査データとして、整理・分析を行うこととした。調査範囲は、ダム堤体上流面より試料最上流設置位置までであるが、第5回調査は試料がダム下流へ流出している可能性を考慮し、ダム下流でも調査を実施した。各回の観測結果を表-2に示すが、5ヶ年での試料認識率は徐々に低下してきている。また、第5回調査結果における試料発見位置を図-2に示すが、ダム下流では試料は発見されなかった。

表-3 設置位置からの移動距離

調査	経過 日数	設置位置からの平均移動距離		
		小	大	大 + 小
第1回	64	44 m	33 m	38 m
第2回	96	46 m	38 m	42 m
第3回	355	54 m	40 m	46 m
第4回	723	46 m	34 m	39 m
第5回	842	118 m	120 m	119 m

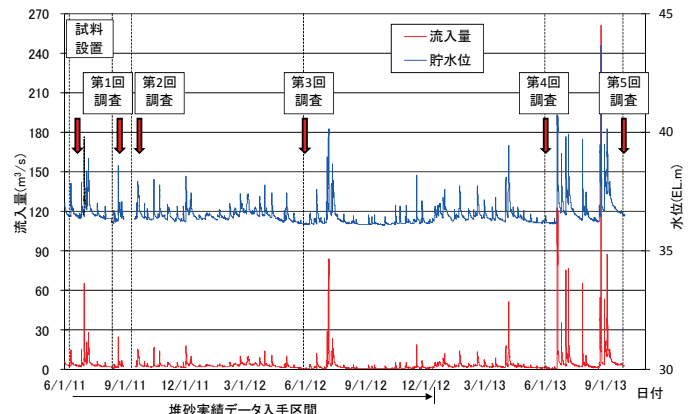


図-3 益田川ダムの流入量(2011.6～2013.9)

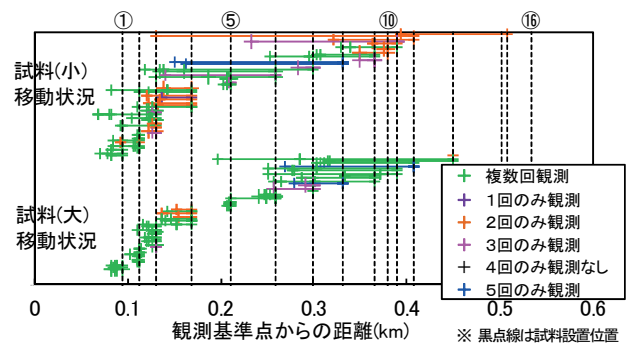


図-4 試料の移動状況

(4) 益田川ダムの流況

観測期間中の益田川ダムの流入量を図-3に示す。流量は2013/8/25の出水が261.2m³/sと最も多く、次いで同年6/19の122.8m³/sであった。第4回から第5回調査までの期間に、調査期間最大規模の出水が2度発生したこととなる。この時の湛水深は最大で7m程度である。

(5) 観測試料の移動距離と出現傾向

試料の設置位置から観測地点までの移動距離について表-3に示す。第1回と第2回の間および第3回と第4回の間に出水があったにもかかわらず、観測された試料の移動距離の平均値は数mの差異となっている。第5回では、調査範囲上流に配置した試料が下流で多く発見され、平均移動距離が大きくなった。第4回～第5回調査間で発生した洪水が、調査期間内で規模・継続時間ともに最大であったことが原因と考えられる。

試料は識別番号にてその移動観測履歴を確認することが可能であり、試料の移動状況を図-4に示すとおりに整理した。図-4の横棒は試料の移動履歴で、それぞれの観測状況に従い、各回で観測されたものと、第1～5回で2回以上観測されたものを色分けしている。また、試料の

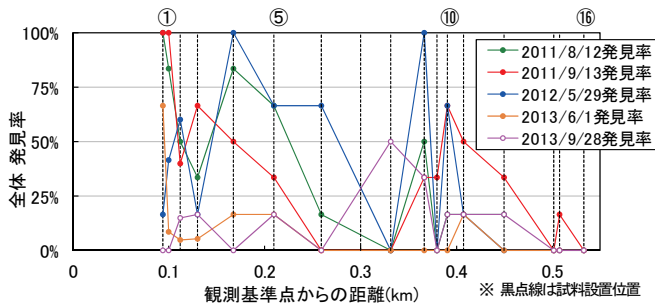


図-5 設置箇所別発見率（全試料）

設置個数に対する観測された個数の割合を発見率と定義し、これを最初に設置した場所ごとにプロットしたものを図-5に示す。

これにより、最下流の設置箇所1の試料が、第1回、2回では100%観測されておりほとんど移動していなかったのに対し、第3回では、発見率17%と大きく減少していることが分かる。その後、第4回で発見率67%となるが、第5回においては、発見率がゼロまで低下している。この間は試料設置以後最大となる洪水が2度発生したことで、ダム基準点より0.3km付近の河床が洗掘され、設置地点8の試料発見率が増加するとともに、設置地点1では堆積土砂が増えて試料が埋没し、発見率が減少したと考えられる。

以上の観測結果より、出水に伴って進行する堆砂形状の中で河床交換層下部への埋没が繰り返し発生していることが推定される。

(6) 掃流力と観測結果の関係

益田川ダム貯水池の河道断面形状(2010.11)と2011.07.01および2013.8.25の出水データにおける不等流計算より出水時の掃流力を得て、試料の限界掃流力と比較する。ここで直方体である試料のみなし粒径 d を、ふるいの通過寸法として大80mm, 小50mmとした。なお、河床に働く掃流力 τ および試料の限界掃流力 τ_c はそれぞれ(1)(2)により算出される。

$$\tau = \rho g R i_e \quad (1)$$

$$\tau_c = \rho \cdot u_{*c}^2 \quad (2)$$

ここに、 τ : 掃流力, ρ : 水の密度, g : 重力加速度, R : 径深, i_e : エネルギー勾配, τ_c : 限界掃流力, u_{*c} : 限界摩擦速度 である。

限界摩擦速度は岩垣式により、試料の実測比重 $\sigma/\rho=2.00$, 水の動粘性係数 $\nu=0.01308\text{cm}^2/\text{s}$ (10°C)として R_* を,

$$R_* = \{(\sigma/\rho - 1)g\}^{1/2} d^{3/2} / \nu$$

により求めると、 $d=80\text{mm}$, 50mm いずれの場合においても、 $R_* \geq 671.0$ を満足し、限界摩擦速度 u_{*c} の関係式を以下に得る。

$$\begin{aligned} u_{*c}^2 &= 0.05(\sigma/\rho - 1)gd \\ &= 49d \quad (3) \end{aligned}$$

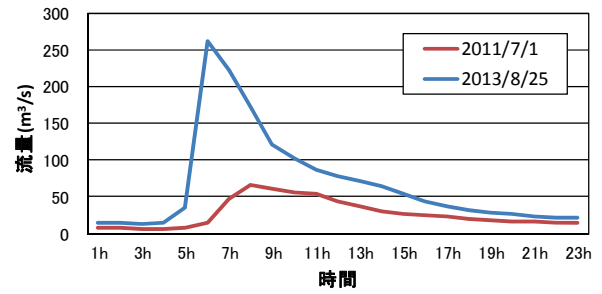


図-6 2011.07.01と2013.8.25の出水波形

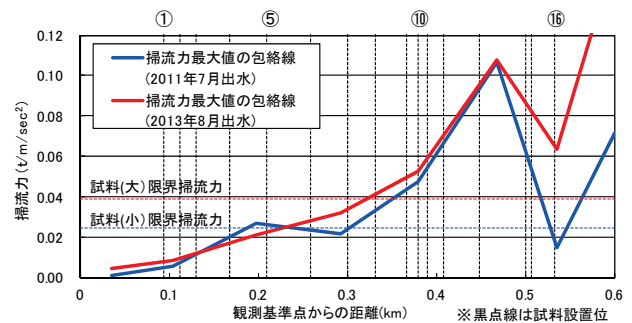


図-7 出水時各位置における最大掃流力の包絡線

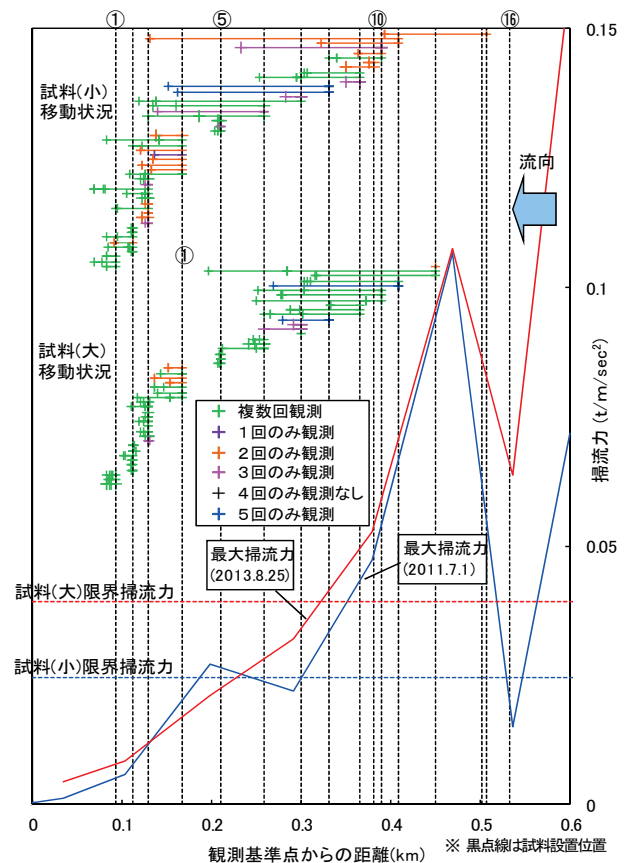


図-8 掃流力と試料の移動状況

図-6に2011.07.01および2013.8.25の出水波形を示す。また、ピーク流量前後の河道における掃流力を縦断方向に整理し、各位置における掃流力最大値の包絡線を図-7に示す。

また、図-4で示した全試料の移動状況と図-7で示した掃流力を重ね合わせて図-8に示す。これより、掃流力が試料(大)の限界掃流力を下回る0.3km地点より下流から試料(大)の発見個数が増えていることが確認できる。対して、試料(小)は0.3km地点での発見個数が少なく、掃流力が試料(小)の限界掃流力を下回る0.2km付近で発見数が増えている。また、掃流力が試料(大)の限界掃流力を上回る0.35km地点より上流ではほとんど試料が見つからず第5回調査時には観測個数がゼロであった。平成25年8月洪水時の掃流力が、0.35km地点より上流で試料の限界掃流力を上回ったため、試料が下流へ流下しているためと考えられる。

これらのことから、流量波形による不等流計算と岩垣式から得た掃流力の計算結果傾向と、今回の試料の移動観測結果が良好に合致するといえる。

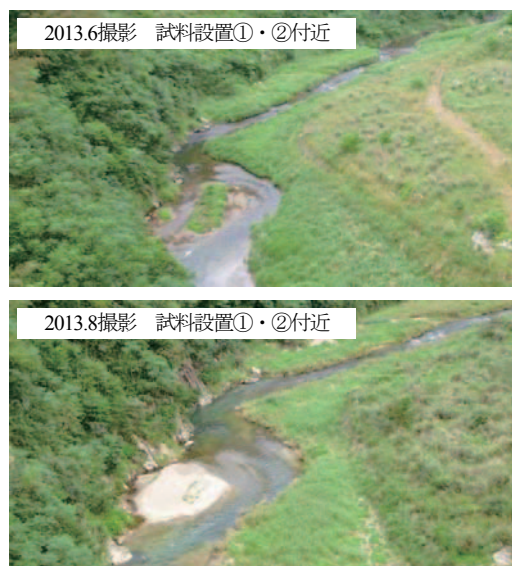


写真-2 益田川ダム貯水池堆積状況の変化

4. 土砂移動特性を反映した2次元河床変動計算

(1) 貯水池内の河道横断的な土砂堆積過程

これまでの検討により、貯水池上流に設置した礫が、複数の洪水を受けて下流方向に移動し、それぞれの粒径ごとに縦断的な移動可能性が決定されることを示してきた。一方で、写真-2に示すように、実際の貯水池内の土砂の堆積状況は左右岸方向に一樣ではなく、大きな洪水時の縦断的な移動に加えて、横断的な掃流力の評価も必要であることを示唆している。そこで、以下に流水型ダム貯水池内における土砂移動特性の分析結果を踏まえた平面2次元河床変動計算による数値解析を検討する。

(2) 平面2次元河床変動モデルの構築

流水型ダム貯水池の平面2次元河床変動計算として、「iRIC(International River Interface Cooperative)」を用いた。これは、これまでUSGS(アメリカ地質調査所)で開発してきたMD_SWMSと(財)北海道河川防災研究センターで開発してきたRIC-Naysの機能を統合した河川の流れ・河床変動解析ソフトである。計算条件を表-4に示す。モデルは、計算結果と堆砂測量結果との比較が可能な2011年7月の出水前後を対象とし、低水路粗度係数による感度分析により貯水池内土砂移動特性の再現性を検証した。この結果、混合粒径における低水路粗度係数0.04のケースが最も適合すると判断した。

(3) ICタグ調査結果との比較

2011年7月洪水の再現による河床変動差分図と第1回調査(2011年8月実施)のICタグ追跡調査結果を図-9に、2013年8月洪水の再現による河床変動差分図と第5回調査(2013年9月実施)のICタグ追跡調査結果を図-10に示す。

第1回調査では、ICタグは設置位置①～③付近で多数発見されており、発見した範囲は、2011年7月洪水

表-4 計算条件一覧表

設定項目	設定値	備考
対象区間	益田川ダム -0.33～1.6km	着目エリアの流況や河床変動に影響を及ぼさないよう、十分な距離をとり設定。波田川は考慮せず
河道地形	平面形状： H22 益田川ダム貯水池平面図 横断形状： H22 益田川ダム貯水池横断図	ICタグ設置(H23.6)前の地形を設定
メッシュ 分割	縦断：146分割(10mピッチ) 横断：低水路：10分割 (3.4～6.1mピッチ) 高水路：7分割 (3.8～13.4mピッチ)	河床形状の起伏が大きい低水路を細かく分割した
高水路 粗度係数	0.07	水理公式集[H11版]を参考に設定
低水路 粗度係数	0.03, 0.04, 0.05	工事誌における貯水池堆砂シミュレーションを参考に設定 粗度による影響度の比較のため3パターンとした
下流端条件	H23.7 益田川ダム実績貯水位	時刻歴データ
上流端条件	H23.7 益田川ダム実績流入量	益田川と波田川の合計流量
樹木群抵抗	—	樹木群諸元がないため、設定せず
粒度構成	2010年9月河床材料結果から 設定	比較のため混合粒径と均一粒径の2パターンとした

(ピーク流量65.6m³/s)前後の2次元河床変動計算結果における洗掘範囲と一致している。一方、第5回調査では、同箇所におけるICタグ発見個数は減少しており、2013年8月洪水(ピーク流量261.2m³/s)前後の2次元河床変動計算結果では、同箇所が堆積傾向へと変化している。第1回調査時に設置位置①～③付近で発見されたICタグは、2013年8月の大規模出水時に堆積した土砂に埋没し、発見されなかったことが推定される。

また、設置位置⑥付近は2011年7月洪水では堆積傾向であるのに対し、2013年8月洪水(ピーク流量261.2m³/s)では洗掘区間となっている。当該付近では、第5回調査で6つのICタグが発見されており、これらは上流⑧～⑩地点に設置されたものが多いことが確認された。設置地点⑥より上流に設置したICタグは、通常の出水時にこの区間に移動して堆積・埋没することで発見されなくなり、2013年8月の大規模出水時に再び洗掘されることで観測されたものと推察される。

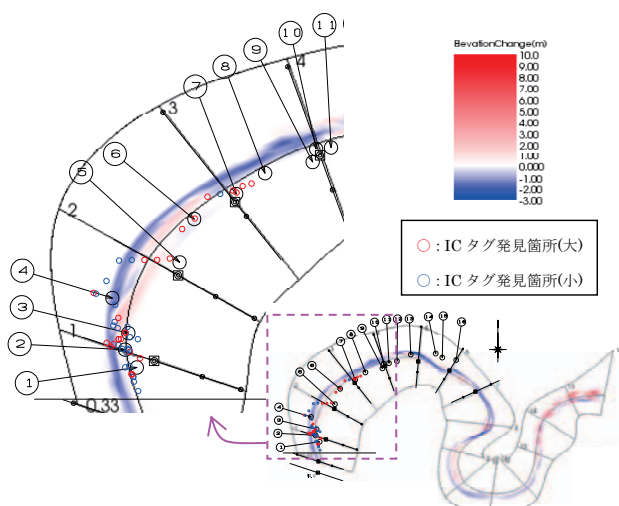


図-9 2011年7月洪水前後の河床変動差分とICタグ移動状況

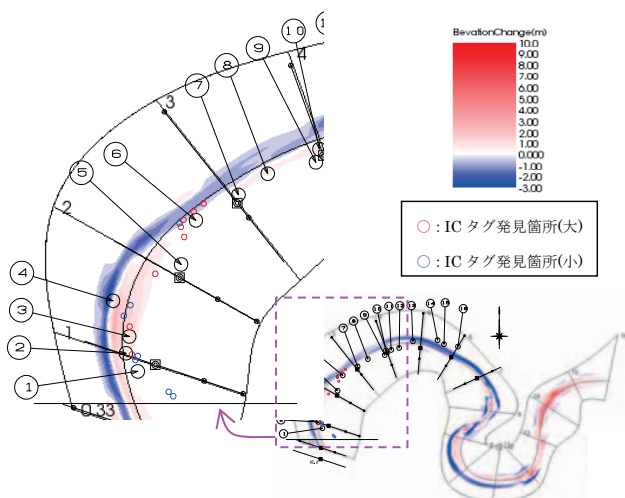


図-10 2013年8月洪水前後の河床変動差分とICタグ移動状況

5. おわりに

本論文では、ICタグを用いて日本の代表的な流水型ダムである益田川ダム貯水池内の礫移動観測・分析を行った。得られた結果は次の通りである。

- (1) 5ヶ年での試料発見率は徐々に低下してきており、わずかながらではあるが、出水に伴って進行する堆砂形状の中で河床交換層下部への埋没が繰り返し発生していることが推定される。
- (2) 5ヶ年の現地調査結果から得た試料の移動履歴は、出水波形から得られた掃流力の評価と良好に一致し、縦断的な移動は1次元解析で評価可能である。
- (3) 貯水池内の土砂の堆積状況は左右岸方向に一様ではなく、横断的な掃流力の評価を目的として平面2次元河床変動計算を実施した結果、土砂の洗掘・堆積箇所の再現が可能であることを明らかにした。

今後は、現地調査を継続するとともに2次元河床変動計算モデルの精度向上を図り、流水型ダム設計高度化手法への適用を検討する。

謝辞：益田川ダムにおける現地調査に関して、島根県益田県土木整備事務所の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Lempérière F. : The role of dams in the XXI century. Achieving a sustainable development target, Hydropower and Dams, Issue Three, pp. 99-108, 2006.
- 2) 角 哲也：スイスにおける治水専用オルデンダムの水理設計と管理，ダム技術No.241，pp.3-16, 2006.
- 3) Sumi T. : Designing and Operating of Flood Retention Dry Dams in Japan and USA. Proc. of ICHE Conference on Hydro-Science and Engineering, Nagoya, Japan, 2008.
- 4) 天野 邦彦：DRY DAMが持つ自然環境への影響特性，ダム技術No.264, 3-14, 2008.
- 5) 角 哲也：オーストリアにおける流水型ダム，ダム技術No.277, 1-13, 2009.
- 6) 角 哲也，船橋昇治，白井明夫：オーストリアにおける流水型ダム（続報），ダム技術No.287, 16-28, 2010.
- 7) 中村 壽浩：益田川ダムの設計と施工，ダム工学 18(2), 111-117, 2008.
- 8) Sakurai T., Aoyama T., Hakoishi N., Takasu S., Ikeda T. Evaluation of the impact of stream type flood control dams on sediment management. Proc. of 23rd congress ICOLD, Q. 89, Brasilia, 2009.
- 9) Kantoush S. A., and Sumi T. : Influence of stilling basin geometry on flow pattern and sediment transport at flood mitigation dams. Proc. Of the 9th FISC, The Federal Interagency Sedimentation Conferences, Las Vegas, Nevada, pp. 115-133, 2010.
- 10) 目 晋一，竹内博輝，青嶋大悟，齊藤明郎：洪水調節専用ダム（流水型ダム）の土砂流出特性に関する調査，ダム工学19(1), 29-40, 2009.
- 11) 鈴木荘司，白井明夫，船橋昇治：流水型ダムが有する特徴に関する研究－既存流水型ダムへのアンケート結果等を踏まえて－，平成19年度ダム水源環境技術研究所所報，調査研究6-1, 2008.
- 12) 角 哲也，石田 裕哉，佐竹宣憲：IC技術を応用した砂礫移動に関するトレーサ調査手法の開発，水工学論文集，第51巻，631-636, 2007.
- 13) 角 哲也，石田 裕哉，佐竹宣憲：ICタグ技術を用いたトレーサ調査手法による砂礫移動観測，水工学論文集，第52巻，889-894, 2008.
- 14) 角 哲也，石田裕哉，佐竹宣憲：アクティブタグ技術を応用した砂礫移動に関するトレーサ調査手法の開発，水工学論文集，第54巻，1123-1128, 2010.
- 15) 角 哲也，石田裕哉，佐竹宣憲：ICタグを用いた流水型ダム貯水池内における土砂移動特性の把握，土木学会論文集，第67巻，1171-1176, 2012

(2014. 4. 3受付)