

# 土砂バイパストンネルからの供給土砂の 移動特性把握を目指したICタグ技術の開発

DEVELOPMENT OF RFID TECHNIQUE ON GRAVEL MOVEMENT  
FROM SEDIMENT BYPASS TUNNEL

木村秀治<sup>1</sup>・関根秀明<sup>2</sup>・鈴木荘司<sup>3</sup>・鬼頭政徳<sup>4</sup>・石田裕哉<sup>3</sup>・角 哲也<sup>5</sup>  
Shuji KIMURA, Hideaki SEKINE, Soji SUZUKI, Masanori KITOU, Hiroya ISHIDA, Tetsuya SUMI

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所 (〒399-3801 長野県上伊那郡中川村大草6884-19)

<sup>2</sup>正会員 株式会社建設技術研究所 中部支社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-5-13)

<sup>3</sup>非会員 株式会社建設技術研究所 東京本社 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

<sup>4</sup>非会員 国土交通省中部地方整備局 河川部 (〒460-8514 愛知県名古屋市中区三の丸2-5-1)

<sup>5</sup>正会員 博士(工) 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Sediment bypass tunnel is under construction for reservoir sedimentation management in Koshibu dam. After completion of the tunnel, fine and coarse sediment will be released by bypass operation which will be transported in the downstream river channel. In order to investigate future sediment transport capacity after the bypass completion, we experimentally examined present sediment transport condition with RFID (Radio Frequency Identification Device) by installing IC-Tag in several gravels placed below the dam. Since detection rates of IC-Tag were very high where the maximum transport length was up to more than 1000m, RFID will be useful to track gravel movements. Critical shear stress calculated by 2D numerical model shows well agreement with actual movements based on placed conditions and grain sizes.

**Key Words :** Reservoir sedimentation, Sediment bypass tunnel, RFID, Koshibu dam

## 1. はじめに

ダムの持続的管理を実現するためには、ダム本体のみならず、貯水池の堆砂対策が不可欠となっている。そのためには、数多くの堆砂対策メニューの中から適切な対策手法を選択することが重要となるが、中規模の貯水容量で、土砂流入量が多く、河床勾配が急で、貯水池延長があまり長くない場合には、貯水池を迂回する土砂バイパストンネルを設置して、貯水池に流入する土砂量を軽減する対策が有効である<sup>1)</sup>。

土砂バイパスの代表事例は、新宮川旭ダムと天竜川美和ダムである。旭ダムでは、濁水長期化問題、堆砂問題に対して、バイパス設備(トンネル長さ2,350m, 最大通水量140m<sup>3</sup>/s)が1998年に設置された。対象とする土砂は、掃流砂・浮遊砂およびウオッシュロードである。一方、美和ダムのバイパス設備(トンネル長さ4,300m, 最大通水量300m<sup>3</sup>/s)は主にウオッシュロードの排出を目的とし、貯砂ダムと共同して土砂管理を実現するものである。このバイパス技術は、トンネル建設に伴う初期費用が発生

するものの、堆砂掘削のための貯水位低下が不要であり、かつ洪水時の貯水池流入水の直接放流であることから、ダムのない状態に近づける環境適合型の技術である。

天竜川小渋ダムにおいても、貯砂ダムによる掘削が実施されてきたが、本格的な堆砂対策が急務となっている。一方、下流河川では河床材料の粗粒化により100mm以下の粒径が相対的に減少し、河川の生物環境に少なからず影響が生じている可能性がある。そこで、不足する100mm以下の粒径供給による環境対策と貯水池堆砂対策の両立をめざし、掃流砂・浮遊砂およびウオッシュロードを流下可能とする土砂バイパストンネルを現在建設中であり、2016年に試験運用を開始する予定である。

これまで、バイパストンネル建設後の運用実績に関する調査報告は、森本<sup>2)</sup>、土居<sup>3)</sup>、鈴木<sup>4)</sup>、角<sup>5)</sup>などにより行われてきているが、ダム下流に排出された土砂の動態に関する検討事例は、旭ダム下流を調査した長田<sup>6)</sup>の検討などに限られる。そこで本報告は、土砂バイパストンネルから流下する100mm程度以下の礫が、出水時にどのような挙動を示すかを調査するための予備的検討

として、バイパス運用開始前の河道を対象にICタグ (Radio Frequency Identification Device, RFIDと総称される) を埋設した礫の洪水時の移動特性を追跡調査することを試みたものである。

## 2. 小渋ダムおよび土砂バイパストンネル事業の概要

### (1) 小渋ダムの概要と堆砂の現状

小渋ダムは、天竜川上流域で第二位の流域面積を有する小渋川の4k900において、1969年より運用を開始した多目的ダムである。構造はアーチ式コンクリートダムであり、総貯水容量は58百万 $m^3$ 、堆砂容量は20百万 $m^3$ である。洪水調節は、流入量が200  $m^3/s$ に達した時から一定率放流により調節を開始し、最大流入量に達した後は放流量を一定量で維持する一定率一定量放流方式をとっており、計画高水流量1,500  $m^3/s$ に対して、調節流量が1,000  $m^3/s$ 、最大放流量が500  $m^3/s$ の計画である。

小渋ダム上流は、中央構造線が南北に走る複雑な地質構造で発生土砂量が多く、ダムの堆砂が建設当時から課題となっており、全国に先駆けて1977年度に第一貯砂堰、1989年度に第二貯砂堰を建設して対策してきた。これにより小渋ダム貯水池の堆砂傾向は鈍化したが、十分には収まらず、2000年度に土砂バイパストンネル事業に着手したところである。2012年度末現在の計画堆砂容量に対する堆砂率は85.5%に達している。

### (2) 土砂バイパストンネル事業の概要

土砂バイパストンネル事業は、洪水の一部をダム貯水池の上流部からダム下流へ、ダム貯水池を通過させずにトンネルで流下させる事業であり、貯水池の堆砂の進行を抑制するとともに、ダム下流河道へ土砂を供給し河川環境を改善することを目的としている。また、トンネルの建設と併せて、呑口部上流に第三貯砂堰を新設し、既存の第一貯砂堰は分派堰として活用する計画である。バイパスの計画諸元を表-1に、バイパスのルートを図-1に、ダムサイトとバイパス吐口などの位置関係を図-2に示す。なお、小渋ダムのバイパストンネルは、旭ダムと同様に掃流砂や浮遊砂、ウォッシュロードを対象としている。

表-1 小渋ダムバイパストンネルの諸元

項目	諸元	備考
構造(断面)	楕円形 径6.9m, 断面積 $\approx 54 m^2$	※内空 断面積
バイパス縦断延長	3,998m	
勾配	1/50	
計画バイパス流量	370 $m^3/s$	
対象土砂	掃流砂・浮遊砂・ ウォッシュロード	



図-1 小渋ダムバイパストンネルのルート



図-2 ダム周辺の位置関係

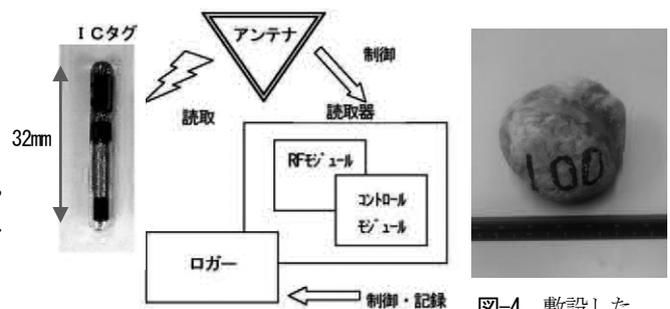


図-3 装置構成



図-4 敷設したICタグ付き礫

## 3. ICタグシステムの概要

### (1) 装置概要

小渋ダム下流の土砂移動追跡に活用したICタグシステムは、テキサスインスツルメンツ社のシリーズ2000リーダーシステムとした。このシステムは、タグの読み取りに使用する周波数帯を水の影響を受けにくい(水中で信号が減衰しにくい)134.2kHzに設定していること、タグ内部に電池を内蔵しないため使用寿命が長いパッシブ型であること、などが特徴である<sup>7),8)</sup>。装置構成を図-3に示す。

### (2) 小渋ダム下流に敷設したICタグ付き礫

#### a) ICタグ付き礫の概要

ICタグ付き礫は、河床に分布する自然石にダイヤモンドドリルで穴を空け、そこにICタグを埋め込むとともに、タグの落下防止のためにシリコンを充填させている。自然石は小渋川に多くみられる砂岩とし、粒径は、小渋川の出水時掃流力を考慮して50mm(以下礫(小)という)および100mm(以下礫(大)という)の2粒径とした。これらの粒径は、河床材料調査における20%および40%粒径に相当する。図-4に、小渋川に敷設したICタグ付き礫

を示す。

### b) ICタグ付き礫の敷設方法

ICタグ付き礫は、良好に通信（アンテナとICタグの間隔約50cm以内）できれば発見率100%が期待される。しかし、淵等の水深の深いところや、河床の攪乱により底層に深く埋没したりすると、アンテナによる受信が困難となり発見率が低下する恐れがある。このため今回の検討では、最終的に50個程度のICタグ付き礫を追跡できることを目標として、合計150個（発見率約30%）の礫を敷設した。敷設箇所は、出水に伴うダム放流時に確実に冠水する箇所とし、図-5に示す距離標3k900（ダムサイト下流1km, 土砂バイパストンネル吐口下流800m）の右岸水際部とした。敷設にあたっては比高差と流出の関係にも配慮し、図の3地点（A, B, C地点）とした。A, Cは水際部, Bはやや比高の高い部分に位置する。

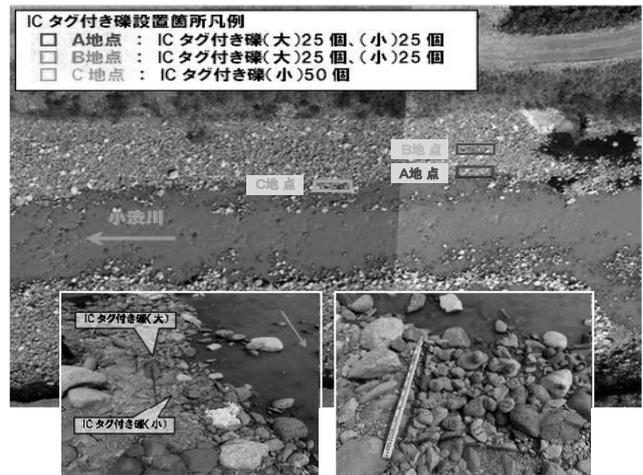


図-5 ICタグ付き礫の敷設状況

## 4. 小渋ダム下流河川における土砂移動観測

### (1) 出水の状況

小渋ダム流域では、平成25年9月16日に発生した台風18号がもたらした降雨により、ダム地点流入量ピークが306m<sup>3</sup>/sとなった。小渋ダムでは洪水調節操作を行い、ダム下流への放流量を132 m<sup>3</sup>/sに低減し、小渋川下流および天竜川の水位低減対策を行った。図-6にこの時のダム操作を示す。放流量132 m<sup>3</sup>/sは、小渋ダム下流における平均年最大流量（約200 m<sup>3</sup>/s）以下の出水であったが、図-7のとおりピーク流量時には水路の全幅を流水が流下し、敷設箇所も冠水状態であった。

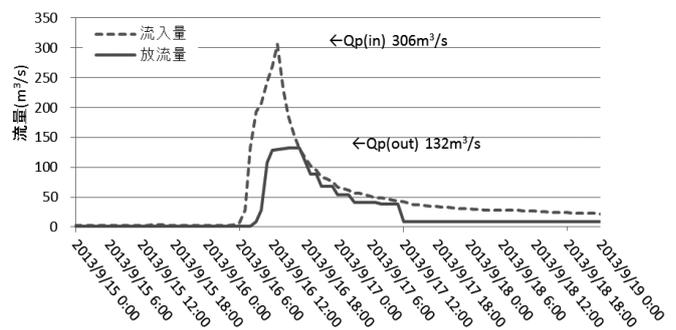


図-6 小渋ダムにおける台風18号出水時のダム操作

### (2) ICタグ付き礫の確認状況

流出したICタグ付き礫の確認調査は、河川流況が安定した10月21日以降に計5日間かけて実施した。調査範囲はICタグ付き礫を敷設した距離標3k900から天竜川合流点までの約4kmとし、図-8のように河道内を徒歩で移動しながら探索した。図-9にICタグ付き礫を発見した箇所



図-7 ICタグ付き礫の敷設箇所付近における水位  
(左：平常時, 右：130m<sup>3</sup>/s流下時)



図-8 ICタグ付き礫の確認調査と発見したICタグ付き礫

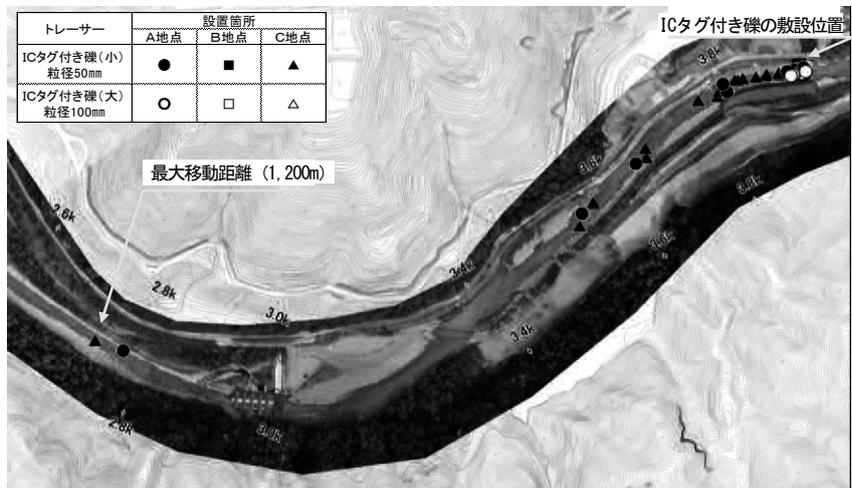


図-9 ICタグ付き礫を発見した箇所

を示す。調査の結果、敷設地点から最大で下流約1.2kmまでの移動が確認されたが、多くは400m程度の移動距離であった。A、C地点に比べてB地点の礫の移動は小さく、以降に考察を行う。

当初設置したICタグのうちで調査日ごとに発見した割合（以下、発見率）は、ICタグ付き礫の粒径や敷設した場所により若干異なるが、合計で65%（97個）であり、目標とした30%を確保した。表-2に調査結果を示す。

### (3) 発生流量と移動限界粒径の関係

ICタグ付き礫を敷設した地点より下流において、出水時における礫の移動性を水理計算により算出した。水理計算は一次元不等流計算とし、粒径ごとの限界掃流力に換算することで、礫の移動性を定性的に整理した。この場合の計算流量は、今回の出水におけるダムでのピーク放流量に近い100m<sup>3</sup>/sとした。図-10に計算結果を示した。ここに、Shields<sup>9)</sup>による移動限界掃流力  $\tau_{*c} \approx 0.050$  を参考として付記した。

図-10より、以下を考察した。

- ・礫(小)は、敷設した距離標3k900から3k500までの400mの区間において移動性を有している。
- ・礫(大)は、敷設した距離標から3k600までの300mの区間において移動性を有している。
- ・礫(小)および礫(大)は距離標3k600から3k100までの区間は縦断的に見て移動性が低下する。

### (4) 粒径と移動距離の関係

図-9で示した発見位置をもとに、粒径ごとに移動距離を算出し図-11に示す。なお、最大で距離標2k700付近ま

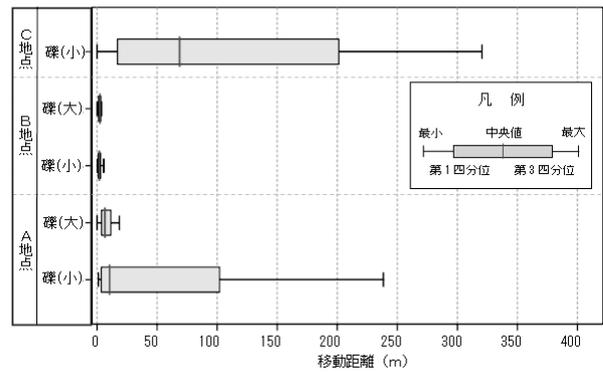


図-11 ICタグ付き礫の移動距離

で移動した礫は、多くの礫が集中する箇所から大きく外れており、これを考慮すると平均値に誤差がおよぶことから、極値として位置づけることで、移動距離の有意性を確保した。その結果、以下を考察した。

- ・A地点およびC地点に設置したICタグ付き礫の移動距離は、礫(小)で有意最大で238～321mであり、移動距離（中央値）は10～69mである。
- ・礫(大)はA地点に敷設したものが最大で20m移動したが、移動距離（中央値）は6m程度である。
- ・礫が集中して分布する区間は敷設地点から下流300m（距離標3k600）の範囲となる。
- ・図-10によると距離標3k600より下流の無次元掃流力はこれより上流に比べて小さいため移動しにくい。今回の調査では礫(小)においてこの傾向を確認した。なお礫(大)の移動傾向が礫(小)に比べて小さいのは、無次元掃流力の違いと考えられた。

以上より、移動距離は粒径ごとに異なり、その範囲は水理計算により示される無次元掃流力により概ね説明できることを確認した。

表-2 出水後におけるICタグ付き礫の発見率

トレーサー	設置箇所	設置個数	発見個数	発見率	最大流下確認距離
ICタグ付き礫(大)	A地点	25	16	64%	約10m
	B地点	25	21	84%	設置箇所付近
	合計	50	37	74%	—
ICタグ付き礫(小)	A地点	25	14	56%	約1,100m
	B地点	25	24	96%	約2m
	C地点	50	22	44%	約1,200m
	合計	100	60	60%	—

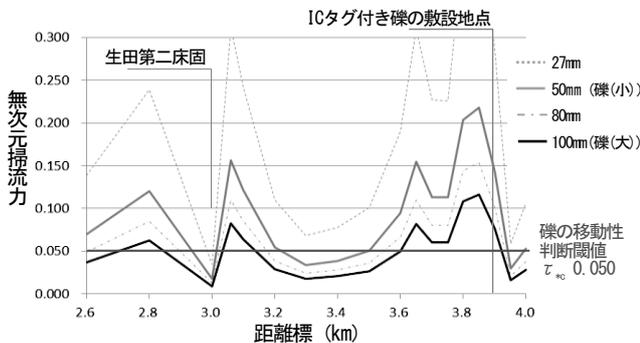


図-10 小渋川の限界掃流力縦断図（流量100m<sup>3</sup>/s時）

### (5) 敷設箇所と移動距離の違いの検証

調査結果では、A地点およびC地点とB地点で移動傾向に違いが生じた。この理由を、平面二次元水理計算により検証した。支配方程式は以下のとおりである。

○流下方向 s 軸の運動方程式：

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial s} - \frac{\tau_s}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left( \epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left( \epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) \quad (1)$$

○横断方向 n 軸の運動方程式：

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \frac{u^2}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial n} - \frac{\tau_n}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial s} \left( \epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left( \epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) \quad (2)$$

○連続方程式：

$$\frac{\partial(uh)}{\partial s} + \frac{\partial(vh)}{\partial n} + \frac{vh}{r} = 0 \quad (3)$$

ここに、 $u$  : s 方向の水深平均流速、  
 $v$  : n 方向の水深平均流速、

$r$  : 流路の曲率半径  
 $g$  : 重力加速度  
 $H$  : 水位  
 $h$  : 水深  
 $\rho$  : 流体の密度  
 $\tau_s$  : 流下方向掃流力  
 $\tau_n$  : 横断方向掃流力  
 $\varepsilon$  : 渦動粘性係数

計算流量は $100\text{m}^3/\text{s}$ とし、断面は平成22年測量の成果を使用した。計算結果のうち流速コンター図および流速ベクトル図を図-12に示す。この結果から、以下を考察した。

- A地点およびC地点とB地点は流速が異なる。A地点およびC地点の流速は $2\text{m}/\text{s}$ 程度であるのに対して、B地点は $1\text{m}/\text{s}$ 程度である。
- A地点およびC地点は水際部であり両地点の比高差はないが、B地点は $0.4\text{m}$ 程度高い位置となる(図-13)。
- $100\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量では、 $0.4\text{m}$ 程度の比高差が礫の移動性に関係する。

## 5. まとめ

以下に、本調査結果および今後の展開について総括する。

- 本検討では、ICタグを埋設した礫(自然石)により、出水時における礫の挙動を追跡した。
- 調査の結果、ICタグ付き礫の発見率は $44\sim 96\%$ であり、比較的高い割合であった。礫の挙動を把握する手法として、ICタグ付き礫による礫の追跡技術は有用性があると考えられた。
- 調査結果の分析では、小渋川の河床材料は平均年最大流量以下の流量により、河床を構成する $20\%$ ( $50\text{mm}$ ) $\sim 40\%$ ( $100\text{mm}$ )程度の粒径の材料を動かすことがわかった。この結果は、水理計算により算出される掃流力見合いの移動性と同様であった。
- 移動距離は粒径ごとに異なり、その範囲は水理計算により示される無次元掃流力により概ね説明できる可能性があることを確認した。
- 敷設位置の違いによりICタグ付き礫の動き方は異なっており、敷設する比高差の違いが主な要因になっていると考えられた。

## 6. 課題

本調査結果を踏まえて、ICタグ付き礫による掃流砂の移動性を追跡するための技術的な課題を以下に示す。

### (1) ICタグ付き礫の発見率の向上のための技術開発

今回の調査では、合計97個(全敷設量の $65\%$ )のICタグ付き礫を発見することができたが、残りの53個は発見

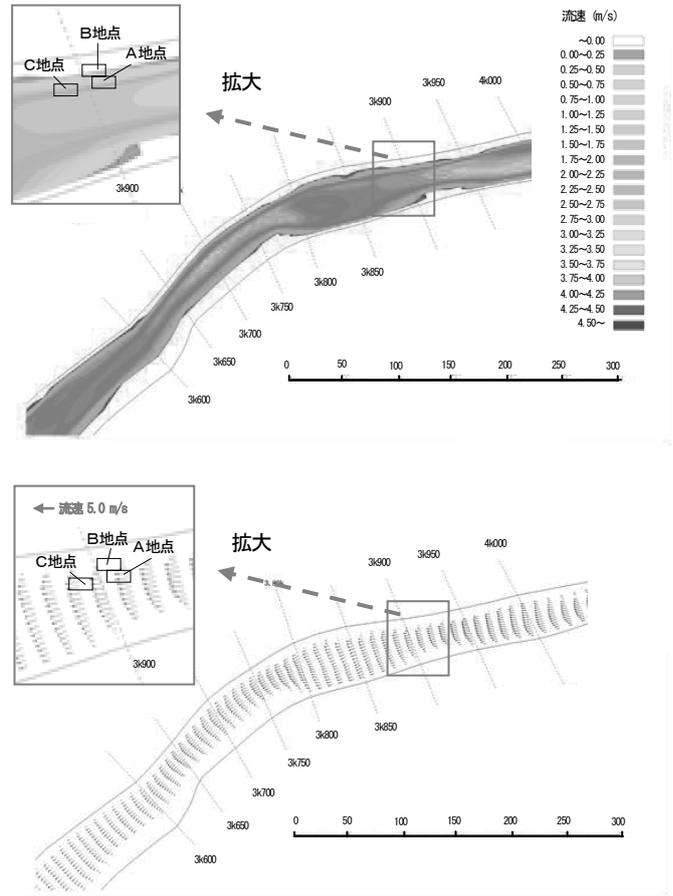


図-12 ICタグ付き礫の敷設地点付近の発生流速(流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 時、上段：流速コンタ、下段：ベクトル)



図-13 ICタグ付き礫の敷設地点の位置と比高差

できていない。発見したICタグ付き礫は、水深が浅い流水部や砂州上であることから、発見できなかったICタグ付き礫は以下の場所に分布している可能性がある。

- 淵など水深の深い流水部
- 床固めなど材料が攪乱しながら深く堆積しやすい箇所の下層

また、複数のICタグ付き礫が1箇所になり堆積している場合には、一方のタグしか検知しない場合があり、これも発見率を低下させている一因と考えられる。

以上より、発見率の向上のためには、ICタグの性能向上と読取アンテナの感度の向上が必要不可欠である<sup>10) 11)</sup>。

このうち、ICタグの性能向上については、生産メーカーとの連携が必要になる。また読取アンテナの性能向上では、受信範囲・深度の向上に向けた技術開発を行うことになる。

## (2) 規模の大きな出水時におけるICタグ付き礫の発見率の向上に向けた方法

小洪ダム下流は、河床勾配が1/100以下であり、かつ河道幅が50m程度であることから、今回調査したときの流量のように、平均年最大流量以下の出水であっても大きな掃流力が働くことになる。今後、これ以上の規模のダム放流が発生した場合、ICタグ付き礫はより遠くに移動するほか、河床材料との攪乱により、より下層に潜りこむ可能性が考えられる。その場合においても、ある程度発見率を確保した調査とするための方法を、上記(1)の技術開発により検討する必要がある。なおその際、あわせて読取機やアンテナの小型化など機器の軽量化を図り、現地調査時における作業員の負担軽減を考えることも必要である。

なお、今回の調査ではパッシブタグのみを用いたが、電池を内蔵し自ら位置を発信するアクティブタグを併用することで、広範囲の移動を概査してパッシブタグの追跡効率を向上させる「タグの組み合わせ」も重要な方法論として検討を行う必要がある。

## (3) 小さい粒径の礫の挙動追跡方法

今回の調査では、礫の大きさを50mmおよび100mmとした。小洪ダム下流の現在の河道は粗粒化が進行しているが、今後は土砂バイパスの運用によりこれらの粒径に加えてより小さい砂礫の供給も増加することから、これらの礫を追跡することも重要である。しかし今回採用したICタグ技術では、ICタグの大きさが32mmであることから、これ以下の粒径の礫に埋設ことができず、小さい粒径の礫の追跡調査に適用できない。今後は、今回採用したICタグ以外の方法による追跡調査の検討が必要である。

なお、既存技術としては、着色礫や方解石などの識別の容易な色彩を有する礫を用いた追跡調査方法がある。これまで複数河川で実施した着色礫調査結果では、着色塗料の剥離や付着有機物の付着などにより、発見率は低くなりやすいことが経験上わかっている。旭ダムでは、方解石に類する天然由来の白色の礫がバイパスを通じて供給され、ダム下流河道が以前のように白くなってきたと地元住民に評価されている<sup>2),3)</sup>。

今後、より小さい粒径の礫の挙動追跡を行うにあたっては、ICタグの小型化および礫の衝撃に耐えうるマイクロチップの開発が求められる。

## 7. おわりに

今回の報告では、ダム下流の掃流砂の挙動を、ICタグ付き礫を使用して追跡調査・考察した結果を取りまとめた。この追跡調査によって、土砂バイパストンネルを通過して下流に流れ出る掃流砂が、トンネル吐口付近で留まり続けず流下し得ることを確認することができた。

今後は、ICタグ付き礫を土砂バイパストンネルの呑口より上流にも敷設することで、土砂バイパストンネルへの掃流砂の流入タイミングの把握、トンネル内の掃流特性（トンネル内部にアンテナを複数箇所設置して移動速度を推定することも含む）の把握を含めた、ダム上下流の掃流砂の移動特性の解明に大きく貢献する可能性を秘めており、引き続き検討を進める予定である。

## 参考文献

- 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、pp. A-5-1-20, 2013
- 2) 森本浩：旭ダムバイパス排砂システムの運用実績と効果について、大ダム(167), pp.46-51, 1999
- 3) 土居裕幸, 岡崎和樹, 野尻慶介：旭ダムバイパスにおける排砂の効果, 電力土木(341), pp.38-42, 2009
- 4) 鈴木勝：美和ダム再開発事業洪水バイパス施設の概要と効果, 大ダム(210), pp.146-149, 2010
- 5) 角哲也, 鈴木昭二："Q92-R38 美和ダム排砂バイパストンネルの運用：上流および下流河川状況およびバイパス効果(ICOLD 第24回大会提出課題論文(口頭発表論文要約))." 大ダム(221), pp.89-98, 2012
- 6) 長田健吾, 福田朝生, 山下克己, 福岡捷二：旭ダム排砂バイパストンネルによる石礫の排出機構および下流河道の瀬淵の回復, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, pp.I\_1105-I\_1110, 2012
- 7) 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, pp.632-636, 2007
- 8) 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, pp.889-894, 2008
- 9) 土木学会, 水理公式集, pp158, 平成11年版
- 10) H.M.Habersack : Radio-tracking gravel particles in a large braided river in New Zealand:a field test of the stochastic theory of bed load transport proposed by Einstein, HYDROLOGICAL, PROCESSES, 15, pp.377-391, 2001
- 11) 坂本博文, 中村甚一, 角哲也, 浅見和弘：真名川ダム弾力的管理試験における「フラッシュ放流」の計画と効果の評価手法について, 河川技術論文集, Vol12, pp.271-276, 2006

(2014. 4. 3受付)