ＩＣ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

DEVELOPMENT OF TRACER INVESTIGATION TECHNIQUE ON GRAVEL MOVEMENT THAT APPLIED IC-TAG TECHNOLOGY

角　哲也[1]・石田裕哉[2]・佐竹宣憲[3]
Tetsuya SUMI, Hiroya ISHIDA, Yoshinori SATAKE

[1]正会員　博士(工) 京都大学助教授　京都大学工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4）
[2]非会員　株式会社建設技術研究所東京本社ダム部（〒330-0071 さいたま市浦和区上木崎1-14-6）
[3]正会員　有限会社佐竹設計事務所（〒114-0023 東京都北区滝野川1-93-5-403）

In case that we evaluate the effect of sediment replenishment during a flushing flow operation, there is no sophisticated measurement method to monitor gravel movements on the river bed. We have developed a tracer investigation technique on gravel movements that applied the IC-Tag technology.

This system is composed of an IC-Tag that is inserted in each gravel, an antenna, an amplifier and a logger. Through laboratory tests, basic characteristics of the IC-Tag such as readability in still and flow water, and under sand bed have been confirmed. We have also tested this system at the flushing operation of Managawa dam in 2005 and succeeded to find out flushed out gravels with IC-Tag in the downstream river bed.

In this paper, we present basic features of the measurement system and discuss results of laboratory and field experiments.

Key Words: *IC-Tag, Flushing flow, Sediment replenishment, Managawa dam*

１．はじめに

ダム建設に伴う環境変化の回復手段として，下流河川の攪乱機会を創出する「フラッシュ放流」や減少した砂礫移動を回復させる「河川土砂還元」などが試行されている[1)]．このような試行実験の効果を現地で計測する方法として，砂礫の移動状況を直接的に把握する方法と，流量増や流砂量増に伴う水質変化（濁度，SSなど）や礫上の付着藻類の剥離更新を把握する方法などが一般に行われている．

このうち，砂礫の移動状況を把握する方法として，ペイントした礫を河床に並べて放流前後で追跡する方法があるが，移動の有無は確認できても，その移動先や移動を開始したタイミングは不明であり，実施効果の評価が困難となっている．そのほか，河床に土砂を捕捉するトラップ箱を設置して放流後に回収してその土砂量と粒度分布から流砂量の多寡および移動した最大粒径を推定する方法があるが，これも砂礫の移動距離やタイミングは同様に明らかにはならない．

一方，単独の個体を広範囲に追跡する手法として，鳥や魚の移動行動をリアルタイムで追跡するラジオテレメトリー手法が各種開発されてきており，また，固有の識別コードや各種情報を自身に記録し観測機と無線で情報を交信するＩＣタグ技術を用いて，多数の個体群を廉価に管理する手法も実用化されている[2)]．

そこで筆者らは，このＩＣタグ技術を砂礫移動の追跡調査に応用する手法を考案し，これまでの移動観測に時間と位置の情報を加えることが可能となる調査手法の開発を行った．本論文では，水中（静水・流水）や砂礫下における読取特性に関する基礎実験および九頭竜川水系真名川ダムの下流河川を対象とする現地実験結果について検討を行う．

２．ＩＣタグシステム概要

(1) 装置概要

砂礫移動の追跡調査に用いるために，砂礫にマイクロチップを埋め込み，砂礫個々に固有番号を与え，肉眼に

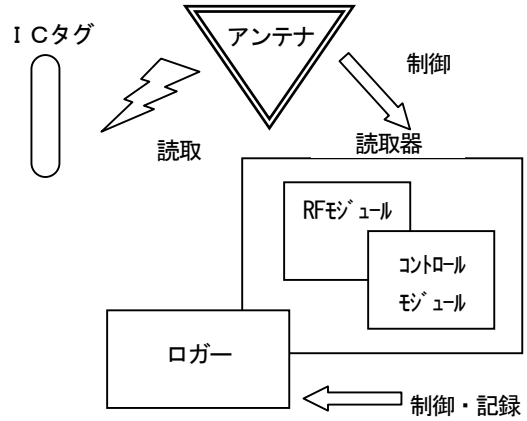


図-1　装置構成ブロック図

拠らずその位置観測が可能となるシステムを構築する．

本研究で用いた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リーダシステム（**写真-1**，**写真-2**）である．同システムは，タグの読み取りに使用する周波数帯が水の影響を受けにくい(134.2kHz)点と，ＩＣタグは電池を持たず読取器側からから受ける電磁波により電力が供給されるパッシブ型である点が特徴である．ＩＣタグが回収不能であった場合の河川環境への影響を配慮する上で，電池を内蔵しないパッシブ型は電池を内蔵し自己発信するアクティブ型に比べ有利である反面，パッシブ型は読取距離が数十cmと短く装置構成に工夫が必要である．本装置の構成（**図-1**）は，①ＩＣタグ，②アンテナ，③読取器，④ロガー（ノートパソコン）により構成される．以降に各装置の役割を示す．

(2)　ＩＣタグ

ＩＣタグとは，固有の識別コードや各種情報を自身に記録し，読取器と無線で情報を交信する事によりその識別を行うものである．なお，ＩＣタグには，記録情報が読込専用のものと書換可能なものがあるが，今回は固有の番号を持つ読込専用のものを使用した．また，河川に設置しその挙動を追跡する試料として，球形に加工したレンガやプラスチックカプセルの内部に取り付けた（**写真-3**）．今回使用したものはガラス封入型で長さ32mm直径3.2mmのものを使用している．なお，一般的な環境での使用寿命は30年程度である．

(3)　アンテナ

アンテナは，河床に定置することを前提として715×270×16mmの平面形状のゲートアンテナを採用した．アンテナは大きいほど読取距離が伸びる特性を有している．

(4)　読取器（アンプ）

読取器は，アンテナにＩＣタグへ送信する電力を供給するとともに，ＩＣタグより返信される信号を受信処理する回路である．

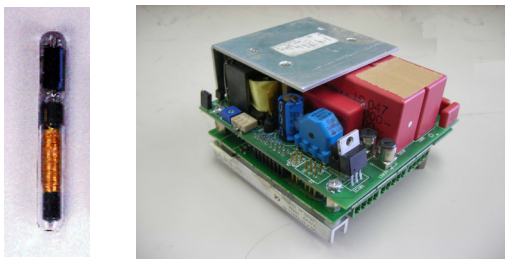


写真-1　左：ＩＣタグ(長さ32mm)，右：ＩＣタグ読取器

写真-2　読取用アンテナ(715mm×270mm)

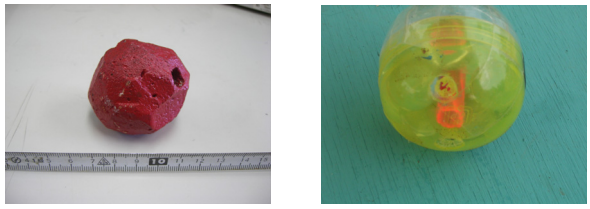


写真-3　ＩＣタグ試料(左:レンガφ40mm，右:カプセルφ50mm)

(5)　ロガー

ロガーは読取器を制御し，ＩＣタグの捕捉状況を確認，記録する装置である．屋外で使用するためノート型パソコンを使用した．

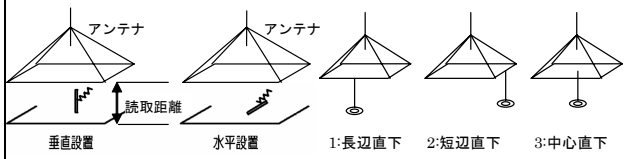
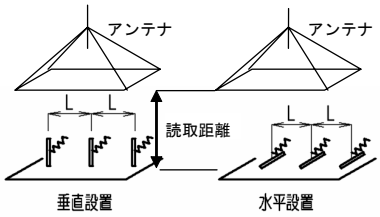
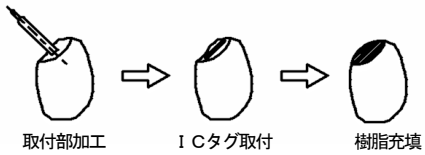
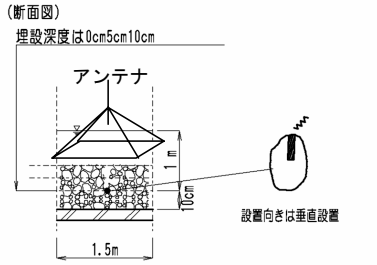
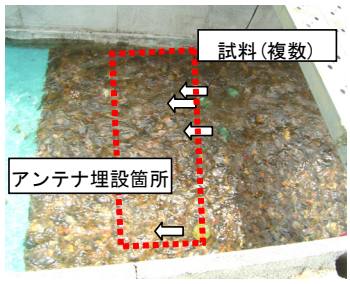
３．ＩＣタグの読取性能試験概要

ＩＣタグを読み取る事が可能なアンテナとＩＣタグとの距離や指向性等の読取特性を把握するため，**表-1**に示す試験を実施した．なお，読取距離はＩＣタグと通信が成功しＩＣタグの番号を読み取ることが出来る距離とした．試験で得られた結果を以下に示す．

(1)　単体試験

ＩＣタグの向きについて，垂直設置の平均読取距離が15.9cmであるのに対し水平設置では11.0cmに低下する．また，アンテナＩＣタグの位置関係については，垂直設置時は（長辺直下16.2cm，短辺直下15.8cm，中心直下15.9cm），水平設置時は（長辺直下10.9cm，短辺直下11.1cm，中心直下11.1cm）と，誤差程度の変化であった．この点から，今回使用したＩＣタグには指向性があり，読取距離に影響があることがわかった．

表-1　読取条件と試験種類

試験名	目　的	条　件		結　果	備　考
単体試験	ＩＣタグが1つの場合のアンテナとＩＣタグの読取距離を計測する．また，ＩＣタグに指向性があるかどうか，アンテナに指向性があるかどうかを確認する．	移動/固定	固定	垂直設置(20個の平均，単位cm) 長辺直下 16.2 短辺直下 15.8 中心直下 15.9 水平設置(20個の平均，単位cm) 長辺直下 10.9 短辺直下 11.1 中心直下 11.1	 ICタグの指向性確認　アンテナの指向性確認
		ICタグ個数	単体		
		取付方法	ICタグのみ		
		運用状況	気中		
複数試験	ＩＣタグがアンテナ近傍に複数あった場合の挙動と読取距離を計測する．また，今回は水中で計測を行い，水の影響を確認する．	移動/固定	固定	垂直設置 16.1 水平設置 9.2 (18個の平均，単位cm)	 複数ICタグの読取
		ICタグ個数	複数		
		取付方法	ICタグのみ		
		運用状況	水中		
衝撃試験	石材にＩＣタグを取り付けた状態で自由落下させ，ＩＣタグが衝撃に対して耐えられるかどうかを確認する．	移動/固定	固定	気中(10個の平均，単位cm) 垂直設置 / 水平設置 落下前 15.1 / 10.0 落下後 15.3 / 10.0 水中(10個の平均，単位cm) 垂直設置 / 水平設置 落下前 15.1 / 10.1 落下後 15.3 / 10.1	 石材へのICタグの取付
		ICタグ個数	単体		
		取付方法	石材取付		
		運用状況	気中/水中		
埋設試験	試料が河床上ではなく砂礫層の中に潜り込んだ場合を想定し，模擬河床（市販の砂利）中に試料を配置し，その読取距離への影響を確認する．ＩＣタグのアンテナへの向きは垂直方向に設置する．	移動/固定	固定	埋設深度 0cm / 5cm / 10cm 15.4 / 14.6 / 14.9 0cmは10個の平均 5,10cmは9個の平均 単位cm	 土砂に埋まった状態でのICタグの読取
		ICタグ個数	単体		
		取付方法	石材取付		
		運用状況	水中土砂		
気中転動試験	気中において回転しながら移動するＩＣタグの読取性能を確認する．一般的な急流河川の流速（V=4.0m/sec 程度）を想定し，河床面より鉛直距離でH=1.0m および H=1.5m の落差とする．	移動/固定	移動		 プラスチックカプセル 転動試験装置
		ICタグ個数	単体/複数		
		取付方法	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸｶﾌﾟｾﾙ取付		
		運用状況	気中		
流下試験	水路に通水させた状態で「気中転動試験」で用いたプラスチックカプセルにＩＣタグを封入した試料を上流から流下させ，実際の計測状況を再現した状態での動作検証を行う．	移動/固定	移動		 流下試験状況
		ICタグ個数	単体/複数		
		取付方法	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸｶﾌﾟｾﾙ取付		
		運用状況	水中		

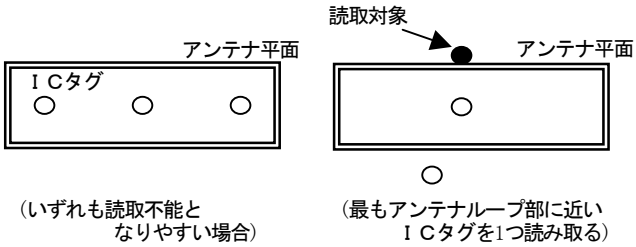


図-2　ＩＣタグが複数ある場合の読取

(2) 複数試験

平均読取距離は，垂直設置が16.1cm，水平設置が9.2cmであった．気中での試験結果が垂直設置15.9cm，水平設置11.0cmと比較すると，水平設置での読取距離が低下する傾向がある．これは水中・気中の差というより，複数設置の影響が有るものと考えられる．また，一度に読み取れるＩＣタグは1つであり，最もアンテナに近いＩＣタグを読み取る．また，**図-2**のようにアンテナ平面内に複数個ＩＣタグがある場合読取不能となりやすい．

(3) 衝撃試験

垂直設置での読取距離は水中気中落下前後いずれも15cm，水平設置での読取距離は水中気中落下前後いずれも10cm程度であった．このことから，河川内で土砂同士が衝突するエネルギーと同程度となる衝撃に対して，性能には影響ないことがわかった．

(4) 埋設試験

試料が河床上ではなく砂礫層の中に潜り込んだ場合を想定し，試料を砂利の中に埋設し読取距離を計測した．ＩＣタグのアンテナへの向きは垂直方向のみとした．各埋設深度においても読取距離は概ね15cm程度であり，特に通常の砂利は性能には影響がないことがわかった．

(5) 気中転動試験

スロープ（傾斜角=45°）を設け，上方より試料を落下させて，気中において回転しながら移動する場合の読取性能を確認した．一般的な急流河川（V=4.0m/sec程度）の流速を想定し，河床面より鉛直距離でH=1.0m およびH=1.5m の落差とした．また試料は，スムースにスロープを転がるように，プラスチックカプセル（直径50mm）にガラスビーズとＩＣタグを封入したものを使用した．

a) 単体落下

試料単体落下の場合，H=1.0mにおいては，全て読み取る事が出来た．H=1.5mにおいて，7割程度の確率で読み取る事が出来た．

b) 複数落下

H=1.0mでのみ試験を行った．同時に2～5個の試料を落下させたが，アンテナの読取エリア内に複数のＩＣタグが存在した場合，読み取れない状態となる．

c) 連続落下

毎秒２個程度の間隔で落下させたところ，アンテナの読取エリア内に複数のＩＣタグが進入する状態にならない限りは読み取ることが可能である．

d) まとめ

ＩＣタグ単体での読取性能については特に問題はないが，「**b) 複数落下**」の結果と同様，アンテナの読取エリア内に複数のＩＣタグが存在する場合，読取不能となる．通常状態での発生確率は低いと考えられるが，留意しておく点といえる．また，H=1.5mの成績が低下するのは，ＩＣタグの回転速度の影響が大きいと考えられる．

(6) 流下試験

水路床にアンテナを設置し，水路流速 約1.0m/sec ，水深 5cm の流れに上流側より試料を流下させ読取性能を確認した．また，水深30cm 程度まで増加させ，試料を浮遊させた状態での読取性能も確認した．なお，この試験以降は回路構成を変更してアンテナ出力を増大し，従来の約15cmから約35cmに読取距離を向上させた．

a) 単体流下試験

試料を単体で流下させた場合は支障なく読み取る事が出来た．

b) 複数流下試験

試料を複数流下させた場合，気中落下試験の場合と同様にアンテナの読取エリア内に複数のＩＣタグが存在した場合，読取不能となる．また前後して二つの試料が読取範囲内に進入し片側のみの試料を読み取った場合，後から進入した試料が読み取られる場合が多い．

c) 連続流下試験

毎秒２個程度の試料を連続して流下させたところ，支障なく読み取る事が出来た．

d) 浮遊状態試験

単体で浮遊させた状態では支障無く読み取る事が出来たが，読取範囲内の河床上に１つの試料を設置した状態で２個目の試料を浮遊流下させて読み取ることは出来なかった．逆に，１つの試料が浮遊状態で読取範囲内に留まった状態で河床上を２個目の試料が通過する場合も同様である．つまり，浮遊・掃流状態にかかわらず，**図-2**に示した状況となる．

e) まとめ

読取条件としては，気中転動試験にて設定した試料速度V=4.0m/sec 程度では支障なく読み取ることができる．ただし，試料が読取範囲に複数存在した場合読み取れない．つまり，読取範囲内に何らかの原因で試料がとどまってしまった場合，そのアンテナは読取不能になってしまう．ただし，アンテナの読取範囲付近に試料がとどまらない工夫と，アンテナを複数設置する事で，読取不能な事態の発生に対してシステムの耐性を向上させることが可能である．

４．現地試験

(1) 目的

ＩＣタグの読取性能試験を踏まえ，本調査手法を実用に供するために，アンテナを河床に定置する定置型装置と，アンテナを河床上にかざして河床にある試料を捕捉する追跡型装置を考案した．これらを試作し，実際に真名川ダム（福井県大野市）のフラッシュ放流にあわせて設置し現地試験を実施した（**図-3**）．

(2) 定置型装置試験

a) フラッシュ放流試験（2005.8.2，2005.12.8）

定置型装置は，試料（ＩＣタグ）が河床を流下し，河床に埋設したアンテナ上方を通過することで通過タグの特定と通過時刻の観測が行われるものである（**図-4**）．計測ラインを２ライン設ける事で，試料の移動速度を得る事も可能である．ただし，第1回，第2回のフラッシュ放流試験とも試行と位置づけ1ラインで行っている．特に第2回フラッシュ放流試験では、**図-6**に示すように，放流に合わせて河川土砂還元が計画された。そこで，直径70mm（150個）と40mm（150個）の球形に加工した素焼きレンガにICタグを取り付けたものを，この盛土の中に一定間隔（約50cm）で，深さ約10cmにて埋設（設置位置を記録）するとともに、図に示すように下流河床に装置を5基設置し，フラッシュ放流時の水流によって試料が流下して来るのを待ち受けた．ちなみに，第1回フラッシュ放流は，直径40mmの試料30個を放流前に河床に設置し，装置1基にて流下して来るのを待ち受けた．埋設したICタグは固有番号下3桁で管理している．

なお，第2回フラッシュ放流波形は，**図-5**に示すとおりである．

b) 試験結果

第1回試験および第2回試験ともに，放流前の試料の設置位置とアンテナの設置位置が離れすぎており（200～250m程度），残念ながらフラッシュ放流実施中（約6時間）には実際に流下してくる試料を計測できなかった．

また，アンテナは周囲の洗掘を防ぐように傾斜を持った水たたき状のアンテナベース（ドブ板）に固定したが，アンテナとロガーはケーブルで接続していたため，ケーブルに水流の力が作用し，アンテナがアンテナベースからはずれるケースが確認された．そこで，その改良版としてデータを無線によりロガーに送信するシステムが必要であることが明らかとなった．

(3) 追跡型装置試験

a) 追跡型装置

追跡型装置は，河床中の土砂にアンテナをかざし，掃流された試料の存在を確認するものである．ＧＰＳを搭載する事で，容易に位置を特定する事が出来る．

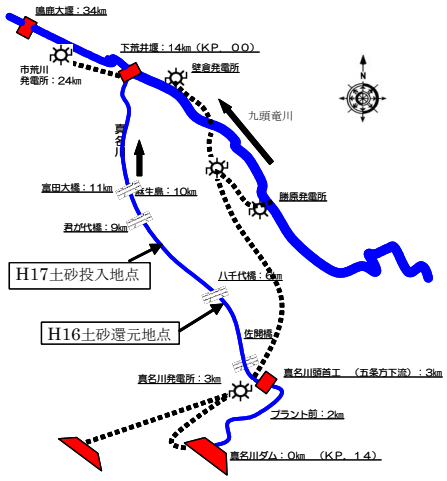


図-3　真名川ダム下流河川模式図（概念図）

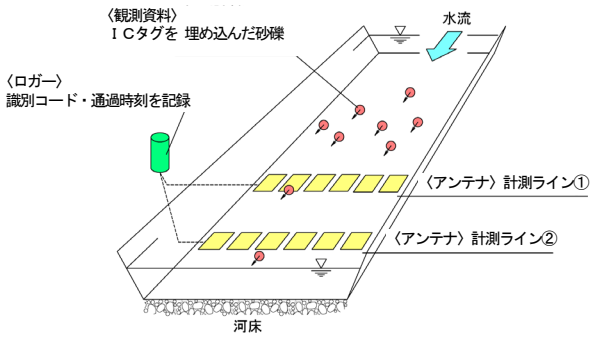


図-4　装置構成ブロック図

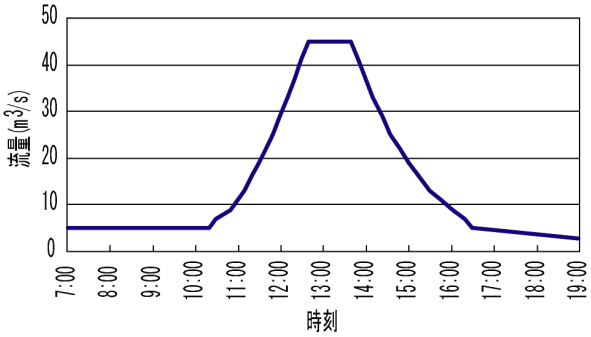


図-5　第2回フラッシュ放流波形（八千代橋地点）

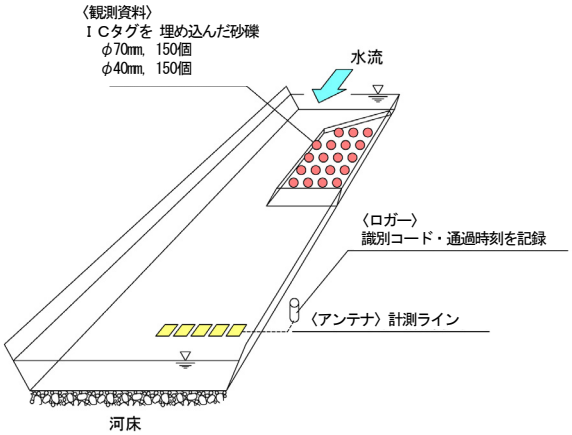


図-6　第2回試験における試料およびアンテナの配置

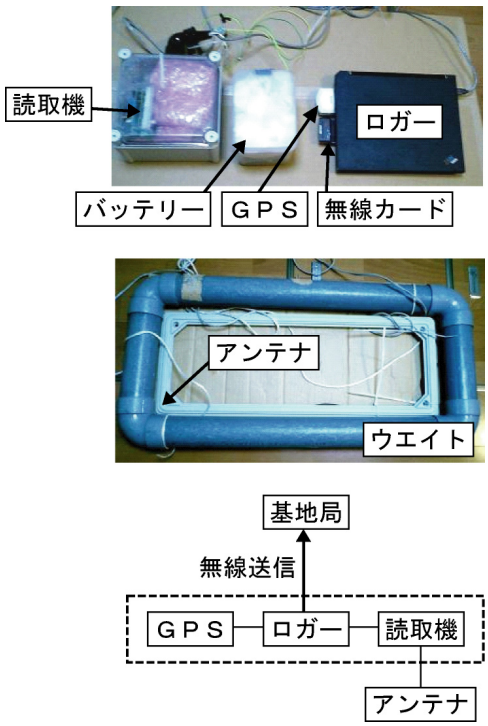


図-7　追跡型装置ブロック図

河川内で作業者が追跡型装置を持ち歩くため，**図-7**のようにロガーでＩＣタグの読み取り情報とＧＰＳの位置情報を把握し，その結果を地上の基地局に都度無線送信する方法としている．

b）試験結果

① 第2回フラッシュ放流直後

第2回放流試験を実施した翌日に調査した結果，埋設地点から下流200mの範囲内に点在してＩＣタグの反応が得られ，しかも，その大部分は目視で試料を確認することはできず，埋没していることが明らかとなった．このことより，実際の河床条件においてもＩＣタグの追跡が可能であり，短時間の出水での礫の移動距離は小さく，また，表面を転動しながら流下するのではなく，河床材料と混合しながら，一部河床に潜りながら流下しているものと考えられる．

② 第2回フラッシュ放流3ヶ月後

第2回放流試験を実施した約3ヶ月後に，試料埋設位置近傍での調査を再度実施した（**表-2**）．これより確認できた試料は，埋設位置からそれぞれ移動していることがわかる．また，確認できた試料は，フラッシュ放流直後に実施した時と同様，全て埋没しており目視では確認することはできなかった．なお，ＩＣタグの位置は，ＧＰＳを用い個々に移動位置を把握した．

③ その後の追跡調査

融雪出水などにより当初の予想以上に礫が移動していることが明らかとなったため，その後，数回に渡ってさらに下流地点の追跡調査を行った．その結果，第1回試験において八千代橋上流で流下させた試料が約3km下流の君が代橋下流地点で確認され，長期間かつ長距離にわたって試料の追跡が可能であることが確認された（**表-2**）．

表-2　試料移動状況

計測年月日	タグ番号	移動距離	直径	備　考
2005年12月 8日				ﾌﾗｯｼｭ放流の実施
2006年 2月 8日	541	5m	70mm	
〃	383	15m	70mm	
〃	377	15m	70mm	
〃	301	25m	70mm	
〃	283	25m	70mm	
〃	512	10m	40mm	
〃	409	15m	40mm	
〃	408	15m	40mm	
〃	367	15m	40mm	
2006年 6月11日	679	3.0km	40mm	05/8/2 放流分
2006年 7月 7日	322	0.9km	70mm	
〃	319	0.9km	70mm	
2006年 9月 2日	268	1.1km	40mm	
2006年 9月28日	275	1.3km	70mm	

５．おわりに

ＩＣタグ技術を用いて，河床の砂礫移動を目視によらず計測可能である事を示した．ただし，アンテナのサイズや使い勝手が既製品のためやや悪く，また読取可能距離も現状では約30cmと短い点など，デザインと性能の向上を図る必要がある．

一方，今回用いたパッシブ型の場合には，電源がＩＣタグ内に不要であり，砂礫に取り付けさえできれば電池寿命に左右されない追跡が可能であるため，砂礫の長期観測が可能である．今後は，システムとしては読取距離の向上，また，砂礫の挙動としては，試料の形状や材質による移動の相違，また，河床における埋没深さなどについて検討を進める必要がある．

謝辞：本研究を行うにあたり，国土交通省九頭竜川ダム統合管理事務所の協力を得た．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) 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，第12巻，pp. 271-276, 2006.
2) Klaus Finkenzeller：RFIDハンドブックー非接触ＩＣカードの原理と応用，ソフト工学研究所　訳　日刊工業新聞社；第2版，2004.05

（2006. 9. 30受付）