

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

DEVELOPMENT OF TRACER INVESTIGATION TECHNIQUE
ON GRAVEL MOVEMENT THAT APPLIED ACTIVE 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 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. Up to now, we have confirmed that passive type IC-Tag can be used for gravel monitoring by laboratory tests and field tests such as in Managawa river. However sensing distance is very limited up to 0.5m or so and we have decided to use another active type IC-Tag to help the monitoring.

In this paper, we present basic features of active type IC-Tag, RUBEE system, that has been newly developed under the IEEE1902.1 protocol and discuss its applicability to monitor the gravel movement by laboratory and field experiments.

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

1. はじめに

近年, 物流や交通システムの発展により電波発信機やICタグの需要が増大し, 複数の規格や方式が用途に応じて使い分けられている。土木や自然観測分野においても, 発信器を用いた礫の移動観測やICタグを用いた落葉の移動観測のように, 直接目視や発見が難しい対象の位置を特定する手法として用いられつつある^{1,2)}。

筆者らは, 河川における礫の移動実態をICタグ技術によって把握する手法の開発を進めてきた³⁾。具体的には, 固有の識別コード(ID)や各種情報を自身に記録し観測器で無線にて情報を交信するというICタグの基本機能を利用し, 河床における礫の位置を特定する。ここで得られた位置情報を識別コード毎に時系列で整理し, ペイントによる目視追跡やトラップボックスによる採取, 河床面の水準測量といった, 従来の観測手法では得られなかった礫個々の移動履歴を記録する事に成功した。

ここで使用した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

ブタグと呼ばれる電池を内蔵しないタグで, 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。パッシブタグは観測器側から供給される電磁波を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。反面, パッシブタグは通信距離が50cm弱と短く, 表-1のように水深が浅く, 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50cmおよび川幅10m以上ともなればアンテナを水中に沈めて作業するために, 追跡に大きな労力を要することがこれまでの調査作業を通じて判明した³⁾。

表-1 観測対象河川の作業性

観測箇所	河幅	勾配	水深	流れ方向縦断観測距離
真名川 (九頭竜川水系)	17m	1/150	50cm	15 m/時/人
ヒル谷 (神通川水系)	1.5m	1/5	15cm	100m/時/人

平時かつ深い淵などは含まず

そこで、規模の大きな河川でのパッシブタグによる調査作業性の改善を目的に、アクティブタグを用いた調査方法を考案した。アクティブタグの特徴は、次節で詳述するが、パッシブタグに対して通信距離が数mと長いという利点を有する。今回用いたアクティブタグは、長波帯の周波数を使用した VisibleAsset 社の RUBEE（以下:RUBEE）である。本報では、RUBEEの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。

表-2 ICタグシステム比較

タグ種別	パッシブタグ			アクティブタグ	
	TI-RFID	FeliCa	μ-chip	RUBEE	ZigBee
方式名	TI-RFID	FeliCa	μ-chip	RUBEE	ZigBee
周波数 (Hz)	134.2k	13.56M	2.45G	131k	2.4G
通信距離	1m	10cm	30cm	5m	数10m
電池寿命	-	-	-	5年	1年
水中	○	×	×	○	×

2. RUBEEタグシステム

(1) ICタグシステム

ICタグシステムは、1) ICタグ(以下:タグ)、2)アンテナ、3)読取器、4)ロガー(パソコン等)により構成される。ICタグは読取器に対して自己のIDを通知し認識させることで個々のタグの有無を使用者が知り得る。このほか内部に固有の番号以外の情報を保有したり、又は読取器等から書き込んだりする事が可能なタイプがある。また、タグ自身が何らかの計測処理を行い、その情報を読取器に通知するタイプの開発も行われている⁴⁾。

タグは、表-2に示すように、電池を持たず読取器側から発する電磁波により電力が供給されるパッシブ型と、内蔵した電池により動作するアクティブ型に大別され、付加機能及び通信距離を必要とする分野では、タグが使用可能な電力の面でアクティブ型が有利である。ただし、今回のように、目視追跡可能な使用方法と異なり、土中や水中に埋没する状況が多く発生する用途での電池切れは、追跡が不可能となる事を意味する。また、通信に使用する周波数は、水により減衰しにくい帯域(主に長波帯)を選定する必要がある。表-2に一般的なICタグシステムの規格を列挙する。なお、表中の通信距離は標準的なシステム構成での理想状態の値である。

(2) IEEE1902.1

米国電気電子学会(IEEE)は 2009 年 2 月に周波数 450kHz 以下、最大通信距離 30m 以下、通信速度 9.6kbps のタグを対象とする近傍界の磁界を用いる通信の規格として IEEE1902.1 を定めた。中でも現在具体的に規格化されている IEEE1902.1-2009 は、搬送波周波数 131.072kHz、通信速度 1kbps を対象とした規格である。

(3) ICタグ

アクティブタグの電池サイズは、タグ寿命と概ね比例関係にある。タグに搭載するアンテナサイズと通信距離の関係についても同様のことがいえる。ただし、電池サイズやアンテナサイズが大きくなれば、観測可能な粒径レンジが限られるため、アクティブタグの使用サイズは、使用目的などを踏まえて設定する必要がある。

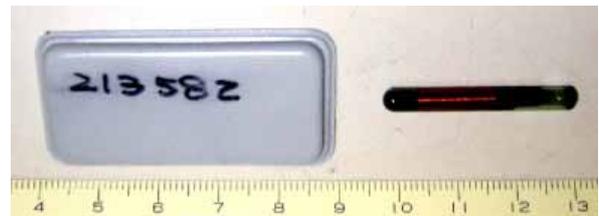


写真-1 右: RUBEEタグ (縦横 50mm × 25mm, 厚さ3mm)
左: 従来のパッシブタグ (3.85mm長さ32mm)



写真-2 左: ループアンテナ (29.5cm × 42cm)
右: ケーブルアンテナ (ループ部 24m × 3T)

このように砂礫に埋め込んでトレーサ試料(以下:試料)として用いる場合は寸法と性能に制約が生じ、例えば従来筆者らがパッシブタグにて採用した試料サイズは、主に 70mmと 40mm(試験的に 100mm)である。この 40mmという数値は、使用したパッシブタグの長さ 32mmから決定している。RUBEEには用途に応じ様々なタグが用意されているが、今回は極力試料サイズを小さくすると観測点より、写真-1に示す小型タイプの平板状タグ(縦横の長さ50mm×25mm、厚さ3mm)を採用した。

(4) アンテナ

RUBEE用のアンテナは、写真-2に示すように矩形のループアンテナ以外に汎用品のフレキシブルな線材を巻いたケーブルアンテナを使用する事が出来る。このケーブルアンテナは、観測サイトの形状に応じて現地で作成し、河川の横断方向に容易に張る事が可能である。ただし、際限なく長大化することは出来ず、読取器の対応範囲内では概ね20m×2m×1Tが最大である。ここで1Tとは線材の巻数を表し、1Tとは1巻のことである。

(5) 読取器とロガー(ノートパソコン)

読取器は、アンテナを介してタグと通信し、その固有IDを認識する装置である。アンテナの状態や特性値に応じて最適な同調を自動で行う機能を有し、アンテナ設計の自由度が高い(写真-3)。

ロガーは、制御ソフトウェアにより認識したタグのIDを記録することが主たる機能である。そのほかアンテナの同調や、観測モードの指定(後述)、タグ観測動作の開始・終了、周辺ノイズレベルの簡易測定、タグの信号強度測定(後述)といった一切の動作をつかさどる(写真-3)。



写真-3 読取器とロガー

(6) 観測モード

RUBEEはタグの呼出方法に表-3に示す3つのモードを有する。不特定多数のタグに呼び出しをかけるDiscover、既知のIDリストに基づき呼び出すPing、セイコーエプソン(株)が開発した不特定多数から高速でタグの呼び出しを行うDMCの3方式である。実際の観測では電池の消耗を抑えつつ不特定多数が呼び出せるDiscover方式が有利と考え同方式により試験を行う。

表-3 呼び出し方法比較

方式	Discover	Ping	DMC
対象	不特定多数	既知のID	不特定多数
利点	IDが既知である必要がない	不要なタグを呼び出さない。条件によってはDiscoverより高速	Discoverに比べ高速
欠点	通信が複雑なため時間がかかる	リスト順に呼び出すため対象個数が増えると遅くなる	独自のコードを埋め込む必要がある
電池寿命	通信が複雑なためPingとDMCの中間の消耗がある	必要なタグのみ呼び出すので3方式の中で最も消費しない	タグが常時呼びかけに反応するので消耗が激しい

(7) タグの信号強度

タグのIDを認識可能な距離(以下:認識距離)が長い場合、タグの有無だけ判明しても実際の位置の特定が困難となる。アンテナの指向性や利得制限で認識距離を調整するなどの手法が考えられるが、本装置はタグの信号強度の目安を測定し図示することが可能であるため、位置特定の参考となる。ただし、アンテナに指向性がある場合はアンテナとタグの相互の位置関係により、同一距離でも信号強度が変化するため信号強度のみでは距離の測定には至らない。アンテナからタグを徐々に離れた場合の信号強度の推移を図-1に例として示す。90cmから最大2.5mまでタグを遠ざけることによる受信強度の低下傾向が認められる。

(8) ICタグ試料

ICタグ試料(以下:試料)は、最終的に石材に穴を開けて取付ける事を想定し、今回は直径70mmの球形に成形したモルタルに埋め込んだものと、プラスチックカプセルにガラスビーズと共に封入した物(写真-4)を作成した。

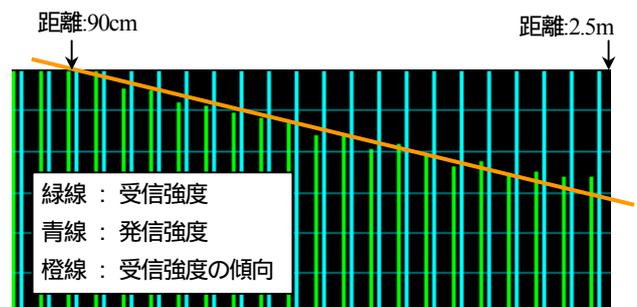


図-1 タグの信号強度推移の例

3. RUBEE基本性能試験

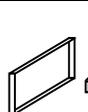
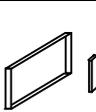
(1) 目的と概要

読取器が認識可能なアンテナとタグとの距離を把握する。読取器側のアンテナも、タグに内蔵されたアンテナも指向性を持つことが想定されるため、静置した状態では有利な状態と不利な状態にて計測する。また、衝撃や水圧、氷結と言った過酷な環境に対するタグのパッケージの耐力性能についても試験を行い確認する。



写真-4 ICタグ試料(70mm)

表-4 静置認識距離試験結果

アンテナ	認識距離		
	有利方向	不利方向(1)	不利方向(2)
ループアンテナ	3 m	1.5 m	1.0 m
ケーブルアンテナ	7 m	3 m	2.5 m
相対位置			

(2) 静置認識距離試験

30cm程度までタグとアンテナを近づけて読取器にタグを認識させた状態から徐々にアンテナからタグを離していき、認識できなくなった距離を認識距離とした。表-4に示すように、アンテナの種類およびタグの指向性により結果が異なるが、いずれも1m以上の認識距離があり、特にケーブルアンテナ(5m×7m×3T)では最大7mであることが確認された。

(3) 転動認識試験

実際の河川における礫の流下を想定し、図-2、写真-5のようにケーブルアンテナを斜路上に間隔1.5mにて設置し、15個の試料を同時に群体で下方に流下させて認識できたタグの観測個数を記録する。勾配は5°、7.5°、10°に変化させ、移動速度vと認識個数nの関係を確認した。

表-5に示すように、アンテナの認識範囲がd=4.0mと仮定すると、認識されたタグ一個あたりの認識時間は $t=d/v/n$ で表される。結果よりtは約0.3秒であった。これは読取器の認識処理タイミングが0.25秒に1回と設定していた事によると考えられ、認識個数はアンテナ認識範囲内を試料群体が通過する時間によって決定される事がわかった。これより、認識個数を増加させるためには認識時間を短くすることが重要と考えられる。

(4) 水没試験

タグに直接5mの水圧を2週間かけ、漏水やパッケージ破損の有無を確認した。水没させたまま認識距離を観測したところ、2週間後においても有利方向で約3mと気中と性能の変化はなく、外装も大きな変化は見られなかった。但し、樹脂は一般に吸水するとその含水率により強度が低下するため、長期間の確認は必要である。

(5) 氷結試験

1週間氷結させ温度低下やパッケージ破損により使用不能にならないかを確認するために、タグを入れた厚さ約5cmの氷を作成し、中央のタグを外部から観測した。その結果、水没させた場合と同様にタグを認識する距離は有利方向で約3mであったが、3つ試験したパッケージのうちの1つに写真-6のような凹みが生じた。

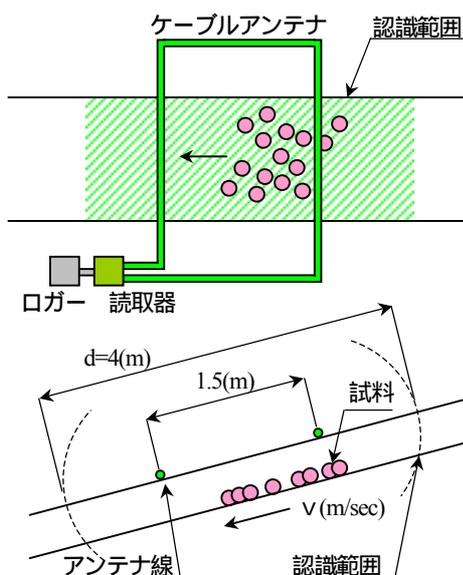


図-2 転動試験



写真-5 転動試験状況

表-5 転動試験結果

斜路勾配	5°	7.5°	10°
認識個数 n (個)	13	10	7
移動速度 v (m/sec)	1.12	1.48	1.79
$t=d/v/n$ (sec/個)	0.27	0.27	0.32



写真-6 氷結させた試料

なお、長期間では、水没試験同様の経年変化に加え、低温によるバッテリーの性能低下やパッケージの脆性が増大するなどの問題が生じる可能性があり、このような条件下での使用に対しては氷結防止対策が必要になるものと考えられる。



写真-7 茶筒に入れたタグ

(6) 金属透過試験

RUBEEの特徴の一つは金属による影響を受けにくいことである。RUBEEは近傍磁界による通信を行っており、磁力線の経路は物質の透磁率により変化するものの、金属等を透過しても熱などで減衰しないため、通信は可能とされている。これを確認するために、写真-7に示す一般的なスチール茶筒にタグを入れて蓋をした状態にて観測を行った。その結果、通常よりもやや短いもの有利方向にて1.5mの認識距離を得た。

(7) 衝撃試験

通常の実河川では最大流速が7m/s程度であり、タグが岩や石などに衝突した場合の耐衝撃性を確認した。モルタルで成形した試料を約2.5mの高さ（この時空気抵抗を無視した落下速度は約7m/s）から試料5つを落下させた結果、一部欠けたものが生じた試料も認められたが、認識性能に支障は見られなかった。

(8) パッシブタグとの混在試験

電池寿命を迎えたRUBEEは全く無反応となるため、パッシブタグを同一試料に取付けて試料回収の可能性を残す用途が想定される。そこで、RUBEEと従来使用していたパッシブタグ(以下:TI-RFID)が近傍に有った場合の認識距離の変化を確認した。結果を表-6に示す。

二つを1cmの距離に並べた有利方向での認識距離は、読取器を同時に使用しない場合はRUBEE 3.0m、パッシブタグ 35cmでありそれぞれ単独の場合と変化はなかった。一方、二つのタグを密着させた場合は、有利方向は全く読めなかったが不利方向については単独の場合より短い読み取り距離ではあったが認識することができた。

パッシブタグが連続して認識動作を行っている状況下においては、RUBEEは有利方向における認識距離が1mと大幅に低下し、不利方向では50cmまで近づいても認識できなかった。これはTI-RFIDとRUBEEの使用周波数が近い事が原因と考えられる。

(9) まとめ

以上から、移動する試料を認識するためには、可能な限りアンテナの認識範囲が大きくなるように設定するとともに、読取器の毎秒の認識個数が大きくなるようにプ

表-6 混在試験結果(RUBEE 認識距離)

タグ間距離	認識方法	有利方向	不利方向(1)
密着	個別	認識せず	1.0m
1cm	個別	3.0m	1.5m
1cm	同時	1.0m	認識せず

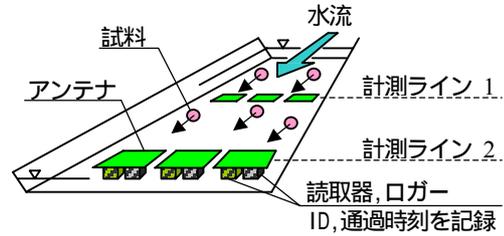


図-3 定置型装置(従来)

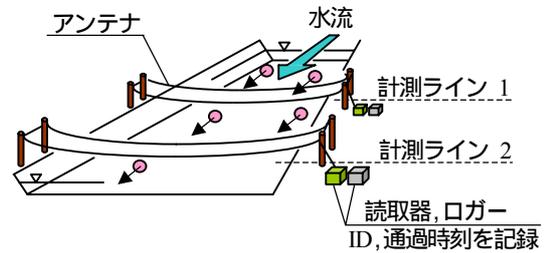


図-4 定置型装置(RUBEE)

ログラムを工夫することが必要である。タグ自体は試料に成形する事で、河川での使用に必要な性能を発揮する事が確認された。ここで、TI-RFIDとRUBEEの同一試料の取付けは可能であるが、二つのタグを密着させず、2種のタグに対して認識作業を同時に行ってはならない。また、低温における長期にわたるバッテリーへのダメージは今後も注意して確認する必要がある。

4. 真名川現地試験

(1) 目的と概要

基本性能試験を踏まえ、本調査手法を実用に供するため実際に河川で模擬的な観測を行う。観測には、アンテナを河床に定置し流下する試料を次々と認識する定置型装置と、河床上をアンテナを移動させて河床にある試料を認識し、位置をGPSで記録する追跡型装置を用いる方法がある。ここでは、定置型装置の改良を試みるための試験を行う。

定置型装置は、図-3、図-4のように計測ラインを二つ以上設けることで、その間の試料の移動速度が観測可能となる装置である。パッシブ型では認識距離が短く、複数台の読取器とアンテナをまるごと河床中に沈めて



写真-8 現地用ケーブルアンテナ(20m×2m×1T)

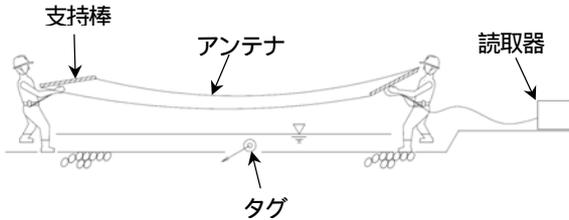


図-5 現地試験

表-7 認識距離

アンテナ	長辺	短辺	中央
20m×2m×1T	1.0 m	0.8m	1.2m
10m×2m×2T	1.2 m	1.0m	1.5m

観測することが必要であり、このため、設置には少なからぬ労力を要し、また、アンテナ周辺の洗掘による装置流出の恐れもあった。そこで、これまでのアンテナを河床に設置する方式から、RUBEEの認識距離に期待して、アンテナを水面上に設置する方式での観測を試みた。なお実験はパッシブタグでの経験を有する真名川(福井県大野市)にて行った。

(2) 試験結果

河川の水面上に設置するアンテナは20m×2mであり、写真-8、図-5に示すように人力にて流線方向に直角に伸張し、その場合の認識距離を計測した。なお認識距離は有利方向とした。表-7に示すように認識距離は一巻(1T)で1m程度とパッシブタグの現地での実績(最大50cm弱)より向上しているが、アクティブタグとしては基本試験での7m(5m×7m×3T)より低下した。これは巻き数が少なく、かつ細長い形状のためアンテナとしての効率が低かったためと考えられる。また巻数を1T→2Tに増やした結果では約25%の認識距離の拡大が認められた。

(3) まとめ

実河川における試験により、アンテナ巻数やサイズを工夫する事により、アンテナを水面上に設置してもタグを観測することが可能であることが示された。また、この場合水中に装置を埋設する必要がないため、洗掘による装置流失の恐れが無く安全に設置・撤収が可能である。

5. おわりに

RUBEEは小型長寿命に加え、金属に対する強みもあり過酷な環境に耐える。また、アンテナの観測範囲内に複数個のタグが存在しても混信を防ぎ個体の特定が可能であり、砂礫の移動観測に適したアクティブタグシステムで有る事が解った。しかしながら、アクティブタグは発信する事で電池は確実に消耗し寿命へと近づく。つまり、通信手順の選択が電池寿命を左右し観測スケジュールに大きな影響を及ぼす。この点はパッシブタグとの大きな違いである。

電池寿命は計算上、5年～7年かつ発信回数300万回と示されているが、実際にそれだけの年月を経たタグが無い実証はされていない。また、読取器との通信内容によっても消費電力は増減するため注意深く使用していく必要がある。

反面、電池による電力でマイコンや時計を標準で内蔵しているため、パッシブタグに比べて種々のセンサーを搭載する事が容易である。例えば水圧センサーを搭載することで、ICタグの平面位置のみならず鉛直深さも知ることが可能となり、たとえば一連の砂礫移動観測において移動床の交換層厚を把握することなども可能となるものと期待される。

また、従来の製品と異なり、ケーブルアンテナによるフレキシブルな観測範囲の設定により、河川の状況に応じた観測体制を取る事が可能となった。これらを踏まえて、実際の観測に則したタグとの通信手順、アンテナの形状や設置方法の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およびセイコーエプソン株式会社(RUBEEタグ技術)の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福島雅紀, 植木真生, 山下武宣, 箱石憲昭: 低周波発信器を用いた礫の移動状況調査, 第62回土木学会年次学術講演会, pp.235-236, 2007.
- 2) 船田晋, 吉村千洋, 石平 博, 竹内邦良: ICタグによる個体識別技術を用いた落葉動態観測, 水工学論文集, 第51巻, pp. 1159-1164, 2007.
- 3) 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, pp.889-894, 2008.
- 4) 泉田正道: LF 帯アクティブRFID の新規格IEEE1902.1のプロフィール, RFワールド 7, CQ出版社, 2009.

(2009.9.30受付)