

## 時間領域反射測定法を利用した流砂計測に関する実験的研究

### A Flume Experiment on Utilizing Time Domain Reflectometry for Bedload Monitoring

宮田秀介・藤田正治

Shusuke MIYATA and Masaharu FUJITA

#### Synopsis

To develop a new bedload monitoring method in pools of mountain streams, we attempted to establish a measurement system of sediment topography in a pool by utilizing TDR (Time Domain Reflectometry). Our measurement system consisted of cable tester, multiplexers and multiple sensor probes that were simply produced from a PCV pipe and two stainless rods. The measurement system was verified by a flume experiment, in which sediment was supplied to a flume and weighed in a container connected to the downstream end of the flume. Eight TDR probes were also installed in the container to measure sediment surface topography. Relative errors of sediment volume measured by TDR were around 10%, suggesting that our measurement system was useful even under running water conditions.

**キーワード:** 堆砂面測量, 水路実験, 堆砂池, 山地河川

**Keywords:** Topographic survey of sediment, flume experiment, pool, mountain stream

#### 1. はじめに

近年, 流砂系一貫した土砂管理の必要性が認識されており, 豪雨災害対策だけでなく, 河川生物生息場変動や長期的なダム容量変動の把握においても河川の流砂に関する情報の重要度は高まっている. 流砂系の最上流域である山地河川における流砂量は河川流量と必ずしも対応せず, 斜面での土砂生産量もしくは河床の移動可能土砂量およびその粒径などに依存することが知られる(澤田, 1985; Dietrich et al., 1989). そのため, 現状ではシミュレーションなどによる予測が困難であり, 山地河川における流砂量情報の把握には詳細な観測が不可欠となる.

これまで国内外の多くの研究により, 山地河川の掃流砂モニタリング手法が提案されているが, そのほとんどは, ある河川断面の流砂の通過量を測定するものである(栗原・宮本, 1992). 一方, ある範囲の河床堆積土砂の差分より流砂量を求める方法が考えられる. 山地河川では, 未満砂状態の砂防堰堤や堆砂池, 流れの穏やかな河道などが, このよう

な河床位観測に相当と考えられる. 河床位を観測するためには, 水面で反射するレーザー距離計などの手法は不適であり, 水面下にて堆砂面の高さを測定できる手法を開発する必要がある.

近年, 土壌水分計測などに用いられる時間領域反射測定法(TDR: Time Domain Reflectometry)により, 異なる比誘電率をもつ物質層の境界位置を判定する手法が提案され(Thomsen et al., 2000), 水と土砂層の境界面への利用例が報告されつつある(伊藤ら, 2009; 宮田・藤田, 2015). ただし, 既往の研究は一次元的な鉛直カラムでの実験によるものであり, 多地点での同時計測による土砂面形状の計測事例はない. また, 実河川に適用するためには流水中での測定精度についても検討が必要である.

そこで, 本研究では, まず複数TDRプローブによる堆砂量計測システムを構築した. 次に, 山地河川および堆砂池を模した水路に対して本計測システムを適用する水路実験を行い, 流れの中での測定精度への影響を検討した.

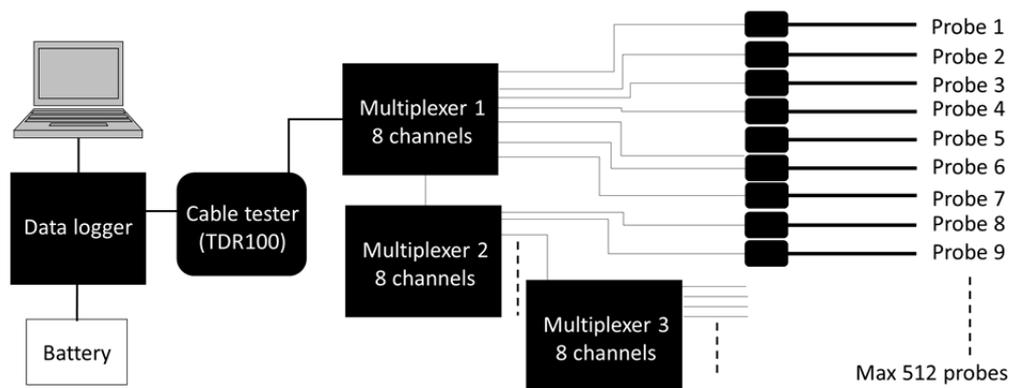


Fig. 1 Schematic illustration of measurement system of sediment surface using multiple probes.

## 2. TDRによる堆砂量計測システム

### 2.1 TDRを用いた堆砂量測定原理

TDR測定システムは、同軸ケーブルで接続されたケーブルテスタ（測定部）およびプローブ（受感部）から構成される。ケーブルテスタは電磁波パルスを送信し、パルスが金属プローブの根端-先端間の往復に要した時間を測定し、横軸を時間、縦軸を反射強度とする波形（以下、TDR波形とする）が得られる。得られたTDR波形を解析し、プローブ周辺の物質の比誘電率を求めることができる。

本研究では、TDRを利用し、堆積土砂の高さおよび空隙率を計測することで堆砂量を求めた。異なる比誘電率を持つ2種類の物質が隣接するとき、比誘電率の不連続点において生じるマイクロ波の反射を利用して境界面を検知することが知られている（Thomsen et al., 2000 ; 伊藤ら, 2009）。この特徴を利用し、水および堆積土砂層の境界位置、すなわち堆積土砂の高さを計測する。TDR波形の解析方法は宮田・藤田（2015）に詳しいため、本稿では割愛する。宮田・藤田（2015）ではTDR波形解析による堆積土砂の空隙率（=全相-固相）の計算方法も提案されているが、本研究の実験では圧密などによる空隙率の変化は無視できると考え、一定値とした。

### 2.2 堆砂量計測システム

堆砂池内の土砂量を連続的に計測するためのシステムを構築した。堆砂形状は平坦とはならないため、複数のセンサープローブを配置することで、より正確な堆砂量を計測することができる。そこで、本研究では、測定部であるケーブルテスタ（Campbell Scientific社、TDR100）に8チャンネルのマルチプレクサ（Campbell Scientific社、SDMX50）を接続することで、複数のプローブでの同時計測を行った（Fig. 1）。マルチプレクサを利用することで、最大512本のプローブが接続可能である。

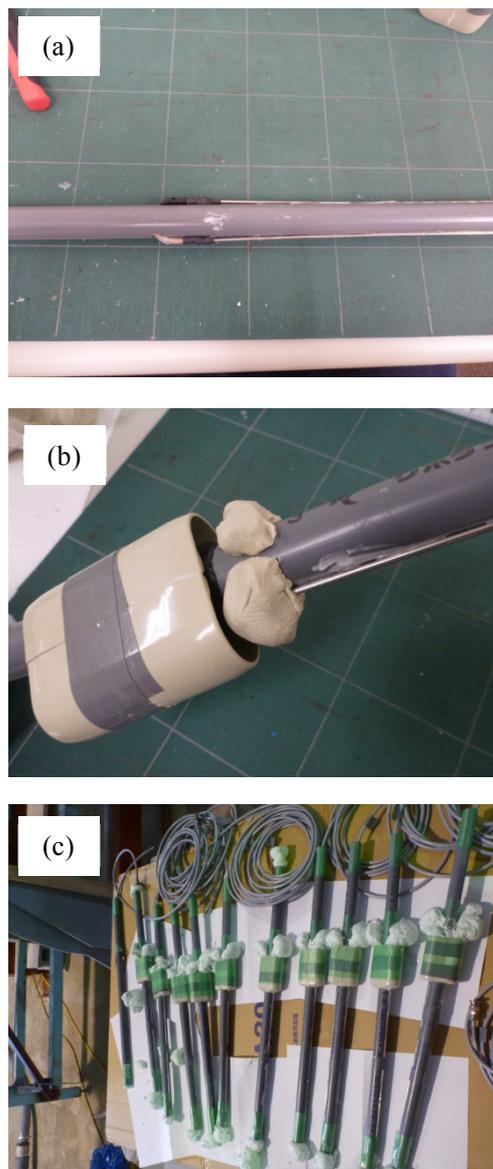


Photo 1 Production processes of a TDR

TDR計測用のプローブは、一般的には単純な2本ロッドや3本ロッドが用いられるが、U字型（Chung and Lin, 2011）やパイプ型（Chung et al., 2013）、コ

イル型（小杉ら，2004；山川ら，2007）などの様々な形状が存在する．本研究では，現地観測での耐久性などを考慮し，円筒状の軸に2本のロッドを固定する形状のプローブを作成した．

プローブの作成方法を以下に示す．軸には塩ビ管（外径16mm，内径13mm）を用い，長辺の両側に深さ1mmの溝を切り，それぞれ直径2mmのステンレス棒を固定した．この2本のステンレス棒がロッドに該当する．そして，同軸ケーブル（RG58）の中心線，シールド線をそれぞれステンレス棒に接続した（Photo 1(a)）．接続部をプラスチック製のケースで保護し，パテおよびシリコンシーラントで防水処置を施した（Photo 1(b)）．また，塩ビパイプの内部への水，土砂の侵入を防ぐために，発泡ウレタンフォームを注入した（Photo 1(c)）．本研究では，長さ50cmの塩ビ管および長さ30cmのステンレス棒を使用した．

TDR計測に用いるケーブルテスタは高価であるが，マルチプレクサにより1台で多地点での計測が可能となる．上で示したように，プローブは非常に安価に作成可能であり，出水時に破損しても容易に観測体制を復旧することができる．この点は，長期的な観測体制の構築に非常に有利である．

### 3. 実験方法

複数TDRプローブによる堆砂量計測システムの流水中での測定精度を検証するために，水路実験を行った（Fig. 2）．山地溪流を模した幅0.08m，勾配1/10の水路下流に，堆砂池を模したコンテナ（幅0.42m，長さ0.60m，高さ0.45m）を設置した．水路上流から水および土砂を供給し，コンテナでの土砂の堆積変化を計測した．コンテナの下流側にVノッチを設け，コンテナ内水位が一定となるようにした．また，上流から0.45mの位置に，静水のために高さ0.3mの亚克力板を設置した．したがって，コンテナ内の土砂が堆積する範囲は，長さ0.45m，幅0.42mである．

TDRプローブはコンテナ内の3横断側線に等間隔で計8本を設置し（Fig. 2, Photo 2），1分間隔で堆砂高さおよび空隙率の計測を行った．ただし，波形解析は手動で行ったため，13回分の計測結果のみを解析した．

TDRによって求められる堆砂量の精度を検証するため，ロードセルにてコンテナの重量 $W_{w+s}$ を1分間隔で計測した（Fig. 2）．コンテナ内の水位は一定で保たれるため，水路からの土砂の流入に伴い，コンテナ内の水は土砂に置き換えられる．そこで，下式より空隙込みの土砂量 $V_{obs}$ を求めた．

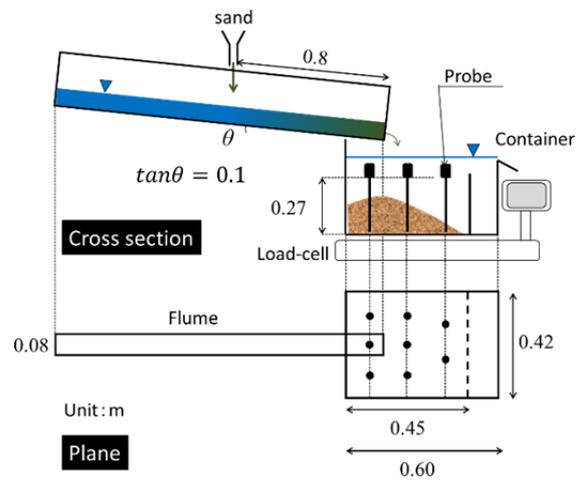


Fig. 2 Schematic illustration of flume experiment

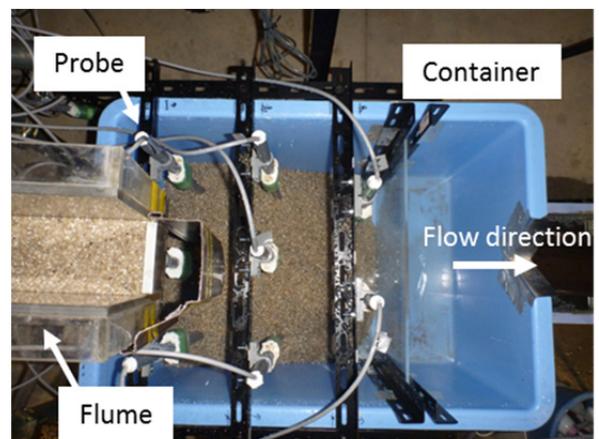


Photo 2 Eight TDR probes installed in a container

$$V_{obs} = \frac{W_{w+s} - W_w}{(1 - \theta)\sigma \left( \frac{\sigma - \rho}{\rho} \right)} \quad (1)$$

ここで， $W_w$ ：土砂流入前の水のみでのコンテナ重量， $\theta$ ：空隙率， $\sigma$ ， $\rho$ ：砂，水の密度（それぞれ2650，1000 kg/m<sup>3</sup>）である．本実験では圧密などによる空隙率の変化は無視できると考え， $\theta = 0.4$ とした．

流量一定（7.8L/s）の条件下で，水路に土砂を供給した．供給位置は水路の下端より0.8mであり，珪砂3号（平均粒径1.4mm）を使用し，1 kg/min（=3.77 × 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/min）で供給した．供給継続時間は10分間とし，これを5回繰り返した．10分の土砂供給終了後，コンテナ重量が定常となったのを確認して，各プローブにおける堆積土砂の高さを定規で計測した．

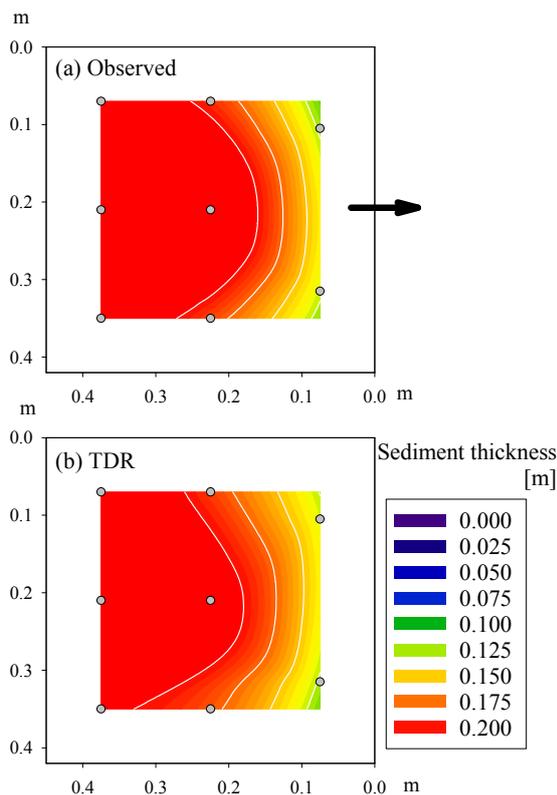


Fig. 3 (a) Observed and (b) measured by TDR measurement surface topography of sediment in a container. Gray circles indicate locations of probes. An arrow indicates direction of water flow.

## 4. 結果と考察

### 4.1 堆砂面高さ

全土砂 (50kg) を供給後のコンテナ内の堆積土砂面形状のTDRによる計測結果および定規による実測値の比較をFig. 3に示す. 水路から流入した土砂はマウンド上に堆積したが, TDRによる計測も同様に, 左側が高くなる堆積形状を示した.

次に, 各TDRプローブにおけるTDR波形の解析より求めた堆砂面高さ $D_{TDR}$ と定規による測定結果 $D_{obs}$ の比較をFig. 4に示す. 8本のプローブそれぞれについて, 実測値とTDR計測値の回帰式の決定係数 ( $R^2$ ) を求めると, いずれも0.9以上と非常に高い精度で堆砂面形状を測定できることが示された.

### 4.2 堆積土砂量

TDR計測およびロードセルによって求めたコンテナ内の堆積土砂量 (空隙を含む体積) をFig. 5に示す. 水路に供給された土砂は, 掃流砂として流下し, コ

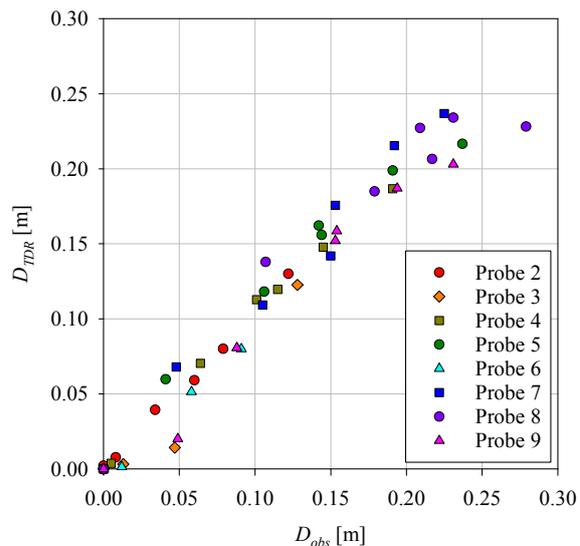


Fig. 4 Comparison of observed and TDR-measured sediment surface heights ( $D_{obs}$  and  $D_{TDR}$ , respectively) at eight probes.

ンテナに流入した. 供給から流入までの遅れ時間があるため, コンテナの重量が定常に達したのは, 10kgの給砂終了約10分後であった. 10, 20, 30, 40, 50kgを給砂し, コンテナ重量が定常に達した時点でのTDRおよびロードセルでの計測結果の相対誤差は, それぞれ11.9, 1.19, 4.44, 11.9, 6.99%であった. 現地スケールでの流砂観測では, オーダー単位での精度が求められているのが現状であり, 本研究の結果は, 実験室スケールではあるものの, 流砂観測としては十分な精度といえる. 本研究で構築したシステムにより, 流水中においても十分な精度で堆積土砂量を計測できることが示された.

## 5. おわりに

新たな流砂観測手法の開発を目指し, TDRを利用した堆砂面形状の計測システムの構築, および水路実験により測定精度の検証を行った. 受感部であるセンサープローブを安価に作成することで, 長期的な観測体制の維持管理が容易となる計測システムを構築することができた. 水路実験において8本のセンサープローブのTDR計測より求めたコンテナ内堆積土砂量とコンテナ重量変化より求めた堆積土砂量実測値を比較したところ, 相対誤差約10%以下と流水中でも十分な計測精度が得られた. 実用化に向け, 今後, TDR波形の自動解析手法の開発および現地スケールでの設置手法の検討や耐久性の検証を行う.

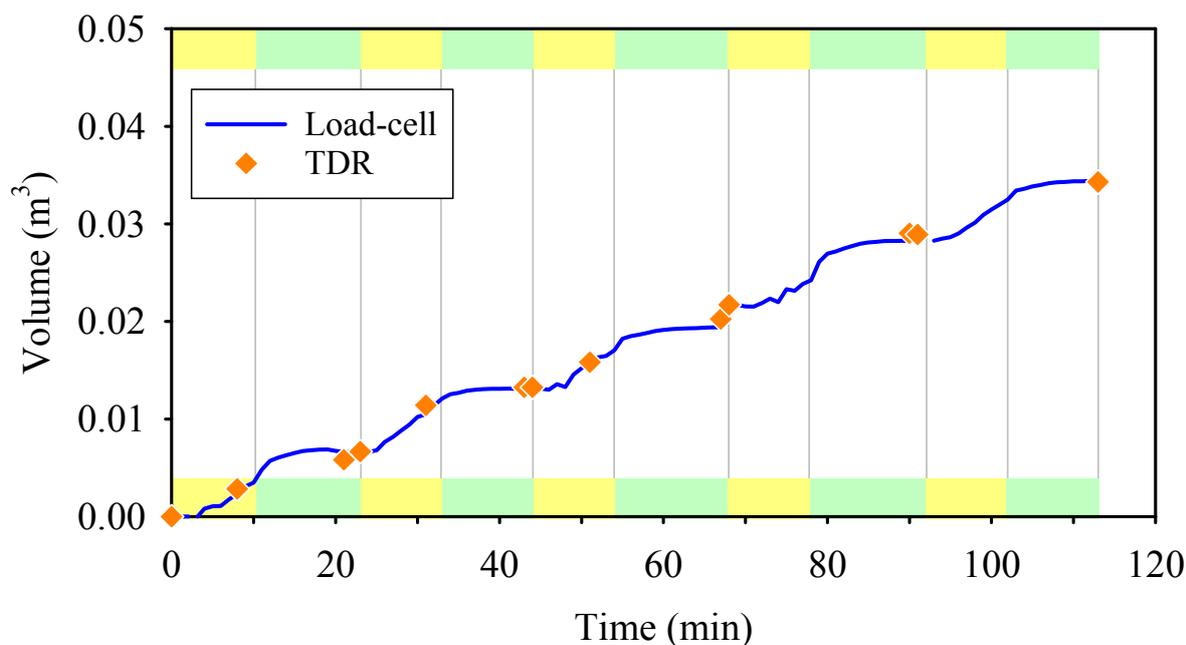


Fig. 5 Temporal changes of sediment volume in a container measured by load-cell and TDR. Sediment volume includes pores in sediment. Yellow and light green hatching indicate periods of sediment supply and waiting for container weight being stable.

#### 参考文献

伊藤祐二・宮本英揮・筑紫二郎 (2009) : 時間領域反射法による水中堆積土砂表面位の評価法, 農業農村工学会論文集, No. 262, p. 75-81.

栗原淳一・宮本邦明 (1992) : 音響を利用した流砂量計測装置について, 砂防学会誌, Vol. 44, No. 5, p. 26-31.

小杉賢一朗・堤大三・水山高久・長谷川秀三 (2004) : 斜面土壌水分空間分布のための土壌水分計付貫入計の開発, 砂防学会誌, Vol. 57, No. 3, p. 3-13.

澤田豊明 (1985) : 山地流域の土砂流出に関する研究, 京都大学学位論文, 149pp.

宮田秀介・藤田正治 (2015) : TDR (時間領域反射測定法) を利用した堆積土砂面位および空隙率測定, 砂防学会誌, Vol. 68, No. 1, pp. 32-38.

山川陽祐・小杉賢一朗・梁偉立・水山高久 (2007) : 土壌水分計付貫入計の改良, 砂防学会誌, Vol. 60,

No. 4, pp. 34-39.

Chung, C.-C. and Lin, C.-P. (2011): High concentration suspended sediment measurements using time domain reflectometry, *Journal of Hydrology*, Vol. 401, pp. 134-144.

Chung, C.-C., Lin, C.-P., Wu, I.-L., Chen, P.-H. and Tsay, T.-K. (2013): New TDR waveguides and data reduction method for monitoring of stream and drainage stage, *Journal of Hydrology*, Vol. 505, pp. 346-351.

Dietrich, W.E., Kirchner, J. W., Ikeda, H. and Iseya, F. (1989): Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers, *Nature*, Vol. 340, pp. 215-217.

Thomsen, A., Hansen, B. and Schelde, K. (2000): Application of TDR to water level measurement, *Journal of Hydrology*, Vol. 236, pp. 252-258.

(論文受理日: 2015年6月11日)