

## TDR を利用した全流砂量計測の試行

京都大学 ○宮田秀介, 高山翔揮, 小杉賢一郎  
株式会社ハイドロテック 野中理伸

## 1. はじめに

山地流域は流砂系の出発点にあたり流域の土砂管理のためには流域内土砂移動の把握が必須である。近年、日本国内の多くの山地流域で掃流砂および浮遊砂の観測が行われるようになった。掃流砂計測として、日本では河床に固定した金属パイプに衝突する砂礫の音響シグナルを計測する方法（以下、ハイドロフォン）が主に採用されている。一方、浮遊砂は濁度計が広く用いられる。これら計測は観測結果の蓄積に貢献しているが、課題も明らかになりつつある。本研究では課題のひとつである多量の土砂流出の観測について、TDR (Time Domain Reflectometry) を利用して全流砂量を計測する方法を試行した。

## 2. 方法

## 2.1 TDR を利用した土砂濃度計測原理

TDR は物質の比誘電率を計測することができる方法であり、砂防分野では、土壌含水率計測によく用いられる。そのほかにも洪水時の河川で高濃度となった浮遊砂濃度の計測にも活用されつつある（内藤ら, 2018 ; Miyata et al., 2020）。本研究では全流砂量計測を目的として本手法を援用する。

洪水時の河川水には土砂粒子のみが輸送されると仮定すると、河川水は水と輸送土砂のみで構成され、その比誘電率 $\epsilon_{obs}$ は以下の式で表される。

$$\sqrt{\epsilon_{obs}} = (1 - C)\sqrt{\epsilon_w} + C\sqrt{\epsilon_s} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_w$ 、 $\epsilon_s$ はそれぞれ水および砂の比誘電率、 $C$ は土砂濃度である。水の比誘電率は水温  $T$  の関数であり、約 70~80 であり、砂の比誘電率 $\epsilon_s$ は、3~5 の既知の値である。そのため、浮遊土砂を含む河川水の比誘電率 $\epsilon_{obs}$ が得られれば、土砂濃度 $C$ を求めることができる。

## 2.2 センサーの改変と現地での設置

TDR センサーを河川中に設置すると河川水の土砂濃度が計測できるが、掃流砂は粒径が数十 cm に及ぶこともあり、センサーの損傷のおそれがある。そこで、本研究では TDR センサーを河床に埋め込

んで金属ロッドのみを河川水と接触させる計測方法を採用した（図-1）。これまで浮遊砂濃度計測で用いられた TDR センサー（Campbell Scientific 社製、CS650、ロッド長 30 cm）の金属ロッドの直径を大きくするとともに、形状を変化させた（図-1）。本 TDR センサーは、専用のケーブルテスタを必要とせず簡易的に比誘電率を計測でき、かつ安価である特徴がある。

現地での試行は足洗谷観測流域の足洗谷観測水路で実施した。本流域は京都大学防災研究所穂高砂防観測所により流砂水文観測が継続されており、ハイドロフォンや濁度計、スロットサンプラと比較することができる。TDR センサーは 2022 年 3 月に設置されたが、センサーを水路床に埋め戻すためのコンクリートの完全な固化に時間を要したためか、計測された比誘電率が安定したのは 2023 年以降であった。

## 2.3 現地でのキャリブレーション

観測水路床に設置した TDR センサーは水路床を構成するコンクリート（比誘電率 $\epsilon_c = 8$ ）に埋め込まれるため、比誘電率の計測結果にはコンクリートの影響も含まれると考えられる。そこで、コンクリートの影響係数 $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) を式 (1) に導入し、さらに切片 $x$ を導入し、土砂濃度 $C$ について整理すると、

$$C = \frac{(\sqrt{\epsilon_{obs}} - \sqrt{\epsilon_w}) - \alpha(\sqrt{\epsilon_c} - \sqrt{\epsilon_w})}{(1 - \alpha)(\sqrt{\epsilon_s} - \sqrt{\epsilon_w})} - x \quad (2)$$

となる。

2023 年 9 月から 2024 年 10 月をキャリブレーション期間とし、スロットサンプラの荷重計測結果



図-1 足洗谷観測水路の水路床に TDR センサーを設置した様子

を用いて式(2)の係数 $\alpha$ および $x$ を求めた。スロットサンプラは、ほとんどの場合、1出水で満砂する。そこで、満砂までの総捕捉土砂量とTDRで推定した土砂濃度に溪流流量を乗じた総土砂量の差が最小となるよう、出水ごとに上記係数を決定した。

### 3. 結果と考察

図-2に2023年9月の出水時の観測結果を示す。本イベントは総雨量42.0mm、60分最大雨量28.0mmの短時間での集中的な降雨であった。降雨が終了し、溪流流量が減少した後も濁度計、ハイドロフォンともに応答が継続しており、土砂流出が継続した点が特徴的である。現地踏査により、この継続した土砂流出は白水谷と呼ばれる1支川のみからもたらされていたことがわかっている。スロットサンプラは約30分で満砂した。TDRで計測した比誘電率は、出水に対応して低下しており、比誘電率の低い砂粒子が河川水に含まれた結果と考えられる。

図-3に2023年9月の出水イベントでのキャリブレーション結果を用いたTDRで推定した全流砂量とスロットサンプラ、濁度計およびハイドロフォンでの流砂量計測結果を示す。スロットサンプラが満砂となった9/21 20:10時点で比較すると、TDRにより計測した単位幅あたりの積算土砂流出量は約2.81m<sup>3</sup>/mとスロットサンプラ(2.86m<sup>3</sup>/m)と非常に近い結果となった。このときの係数 $\alpha$ および $x$ の値はそれぞれ0、0.0095であった。TDRの全流砂量計測によると、本出水イベントでは、降雨開始から終了後約1.5日後までに単位幅あたり約80m<sup>3</sup>/mの土砂が流出した。一方、ハイドロフォンおよび濁度計から求めた土砂流出量を積算すると、約25m<sup>3</sup>/mであった。両者の精度検証については、今後の課題である。

上記の出水イベント以外にも、2024年5月28日および11月2日の出水時の観測結果を用いて係数 $\alpha$ および $x$ の値を決定した(表-1)。係数 $x$ の値は2023年に比べて2024年の2出水では1オーダー小さくなった。これはTDRで計測された比誘電率が長期的に減少を続ける傾向を示したことを反映している。この傾向の原因は未解明であるが、センサー形状を変化させたことが可能性として考えられる。図-2に示したように、出水による土砂輸送を河床に設置したTDRセンサーで計測可能であった。より長期的に精度の高い計測を行うには、専

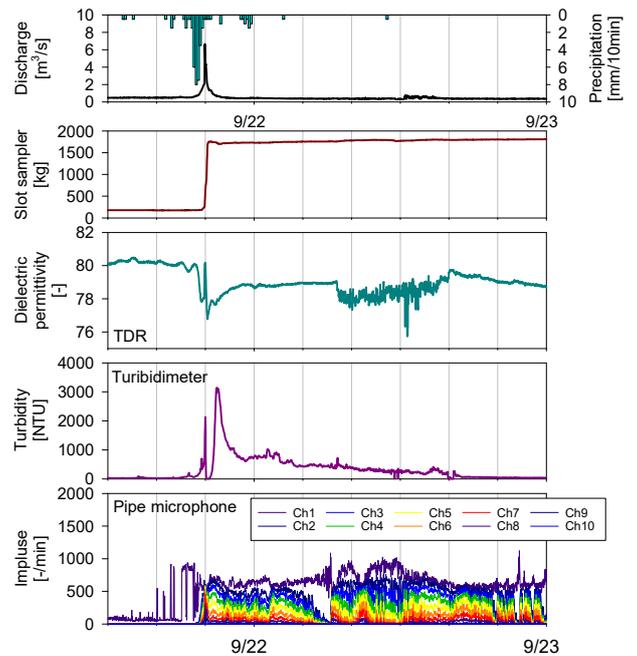


図-2 2023年9月21日の出水時の足洗谷観測水路での溪流流量、スロットサンプラ、TDR、濁度計、ハイドロフォン観測結果

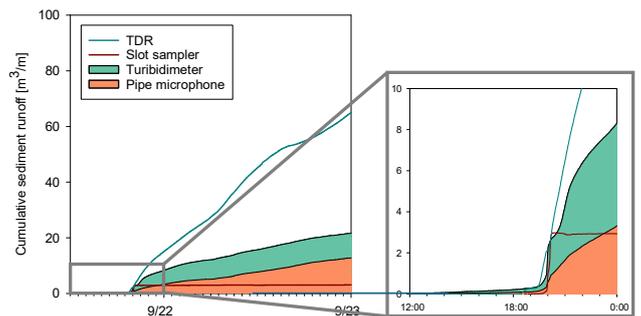


図-3 2023年9月21日の出水時TDR、スロットサンプラ、濁度計、ハイドロフォンで観測した単位幅あたりの積算流出土砂量

用のセンサー部を作成し、ケーブルテストと組み合わせる方式が適切と考えられた。

表-1 TDRセンサーのキャリブレーション結果

出水イベント	$\alpha$	$x$
2023/9/21	0	0.00947
2024/5/28	0	0.0564
2024/11/2	0.0568	0.0665

### 引用文献

内藤ら(2018)砂防学会誌, 71(4), 3-12.; Miyata, S. et al. (2020) Journal of Hydrology, 585, Article 124747.