

流砂観測への TDR（時間領域反射法）の利用に向けた基礎的検討

京都大学防災研究所 ○宮田秀介・藤田正治

1. はじめに

豪雨による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量は重要な情報である。山地河川において様々な掃流砂モニタリング手法が提案されてきたものの、有効な手法が確立されているとは言えない状況である。堆砂池となる砂防堰堤上流などにおいて河床位の変動を連続観測できれば、その差分値が流砂量として求められる。多くの場合、河床は水面下にあるため水面で反射するレーザー距離計などの非接触式測定手法を採ることができない。接触式測定手法の場合、流れを阻害せず、出水時に破損しないためにはなるべくセンサーサイズが小さいことが望ましい。そこで本研究では、土壌水分測定などに利用される時間領域反射測定法（TDR: Time Domain Reflectometry）を流砂量モニタリングに活用する第一段階として、室内実験において TDR による水中の砂面位測定を試みた。

TDR はテスターから発信された電磁波パルスが 2 本もしくは 3 本のプローブの根端－先端間の往復に要する時間を測定する手法であり、プローブ周辺の比誘電率を測定することができる。近年、測定波形の変化点から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ていることから（宮本ら、2008）、これを利用して水－土砂境界面の検知を試みる。本研究では、水中に堆積した土砂面を測定する砂面位計の測定手法について検討した。

2. TDR を利用した砂面位測定法

異なる誘電率を持つ 2 種類の物質の境界面を検知するには、境界面を貫くようにプローブを設置し、TDR の測定を行う。すると、物質境界面に相当する箇所では TDR 波形の変換点が現れる。これを読み取ることで境界面を検知することができる（図 1）。

水中に堆積した土砂表面の位置を測定する場合、上層が水、下層が飽和土砂（水＋砂）と考える。水の比誘電率 80.2（20℃）に対して砂の比誘電率は 3～4 であり、境界面を検知するには両層で十分な比誘電率の差がある。

水にプローブを挿入したときに測定される TDR 波形は、プローブ根端で 1 つ目の大きな反射、プローブ先端で 2 つ目の反射を示す（図 1）。これに対し、上層（水）と下層（飽和土砂）を貫くようにプローブを挿入すると、プローブ根端、先端に加えて 2 層の境界面において TDR 波形が明確な変換点を示す。

本研究では TDR 波形に対して 2 通りの解析手法を適用し、砂面位推定精度を検証した。

手法 A（プローブ全長での測定結果を利用）

水および飽和土砂を貫くプローブ周辺の平均的な比誘電率 ϵ_{obs} は、水および飽和土砂の比誘電率（それぞれ ϵ_w , ϵ_{sed} ）を用いて以下の式で表される。

$$\sqrt{\epsilon_{obs}} = \frac{h_{sed}}{L} \sqrt{\epsilon_{sed}} + \frac{1 - h_{sed}}{L} \sqrt{\epsilon_w} \quad (1)$$

ここで、 h_{sed} はプローブが挿入されている飽和土砂の高さ（m）であり、 ϵ_{obs} は TDR 波形からプローブ先端

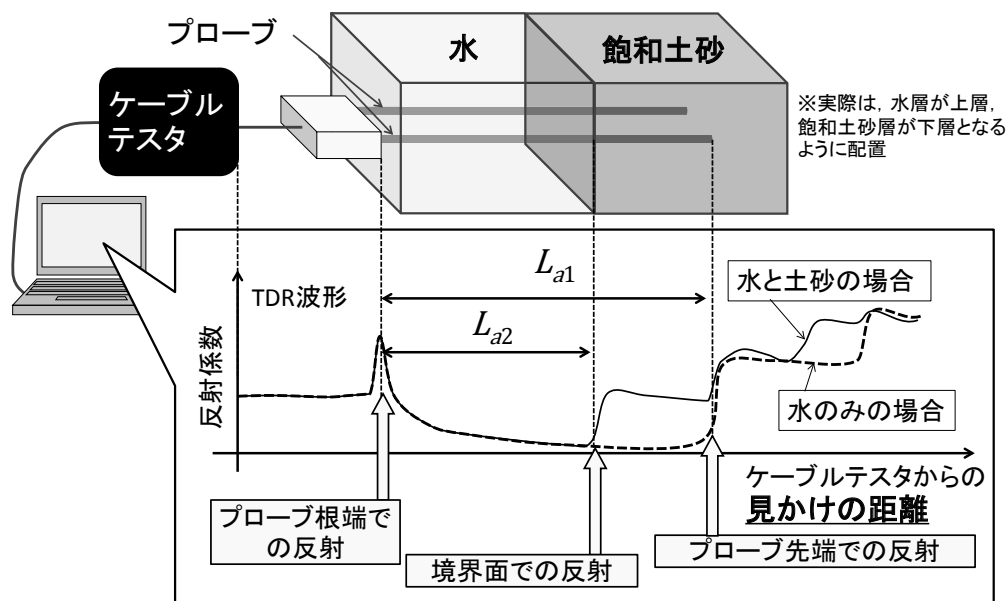


図 1 砂面位手法および室内実験の概念図

部でのみかけの長さ L_{a1} より算出する。すなわち、TDR 波形の変換点は無視し、 L_{a1} のみを用いる。

手法 B（プローブの水没部のみ測定結果を利用）

もう一方の手法では、水および飽和土砂を貫くプローブの上層部、すなわち水に接した部分のみの結果を利用する。あらかじめ、水のみに入れた場合のみかけのプローブ長 L_{aw} を測定しておき、水および飽和土砂にプローブを挿入して得られた TDR 波形の変換点までの見かけの長さ L_{a2} を測定する。 L_{a2} は水の比誘電率のみで決定されるため、プローブが挿入された飽和土砂の高さは、

$$h_{sed} = L \left(1 - \frac{L_{a2}}{L_{aw}} \right) \quad (2)$$

で求められる。手法 B は下層部の物質に依らないため、誘電率の異なる有機物（流木、落葉など）が多量に土砂に混入した場合に有効と考えられる。

3. 室内実験および実験条件

TDR を利用した砂面位計の測定手法確立と精度検証のために、室内実験を行った。水を充填したコンテナに TDR 用プローブが完全に水没するように挿入し、土砂を沈降充填させながら随時 TDR 波形および土砂面位を定規にて測定した。土砂の充填はプローブ根端が埋まるまで続けた。ケーブルテストは Campbell Scientific 社製 TDR100 を用いた。得られた TDR 波形について微分して極大値をとる点を波形変化点として抽出し、 L_{a1} および L_{a2} を求めた。

実験は異なるプローブおよび土砂を用いて 3 回行った。実験 1 および実験 2 では市販のプローブ（Campbell Scientific 社製、CS610、プローブ長 0.3m）を用い、実験 3 ではステンレス線で作した簡易プローブ（プローブ長 1m）を用いた。供給した土砂は、実験 1 では珪砂 5 号、実験 2、3 では山砂（平均粒

径約 1.5 mm、最大粒径約 5 mm）を用いた。

4. 結果と考察

4.1 TDR 波形測定結果

市販プローブを用いた実験 1、2 では TDR 波形は明確な波形変化を示した。一方、実験 3 では波形がこまかく波打っており、変化点はやや不明瞭であった。いずれの実験においても、土砂面位が高くなるにつれて TDR 波形の変化点が左に移動していく特徴をとらえることができた。簡易プローブの測定結果はやや不明瞭なものの波形解析上問題とならない程度であり、実用には差し支えないと考える。

4.2 砂面位の実測値と推定値との比較

実験 1 ではやや誤差が大きいものの、実験 2（図 2）、3 では非常によく砂面位を推定することができた。実験例が少ないものの、TDR を利用することで、堆積土砂の粒径によらず砂面位を測定することができた。いずれの実験においても、プローブ全長での測定結果を用いる手法 A よりも水没プローブ部のみの測定結果を用いる手法 Bの方が、推定誤差（＝|推定値－実測値|/プローブ長）が小さかった。実験 2 および実験 3 では手法 B による推定誤差はほとんどで 5%以下であった。実際の河川では、堆積物は土砂だけでなく比誘電率の異なる有機物を多く含む場合もあるため、その影響を受けず、かつ精度の高い手法 B を用いるべきと考えられる。

4.3 堆積土砂の空隙率の推定

水中で堆積した土砂層は飽和しているため、各計測における水および砂粒子の比誘電率から飽和土砂層の空隙率を計算することができる。そこで実験 2 と実験 3 の空隙率の推定値の鉛直分布と実測値を比較した。

空隙率の実測値が 0.31 であったのに対し、両実験とも推定値が 0.36～0.63 と過大評価となった。これは、TDR 測定範囲がコンテナのサイズを超過しており、コンテナ壁面の比誘電率（ほぼ 0）が影響している可能性が考えられる。

砂面位に加えて堆積土砂の空隙率を推定することができれば、土砂量の正確な測定が可能となる。砂面位測定については、本研究で提案した手法を用いてプローブを堆砂池に多数設置する観測システムを構築すれば、洪水時の堆砂面形状の連続観測、すなわち流砂量の連続観測が可能となると期待される。

本研究は平成 25 年度砂防学会若手研究助成を受けて実施しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮本・筑紫・呉：『土壌の物理性』，108，37-45，2008。

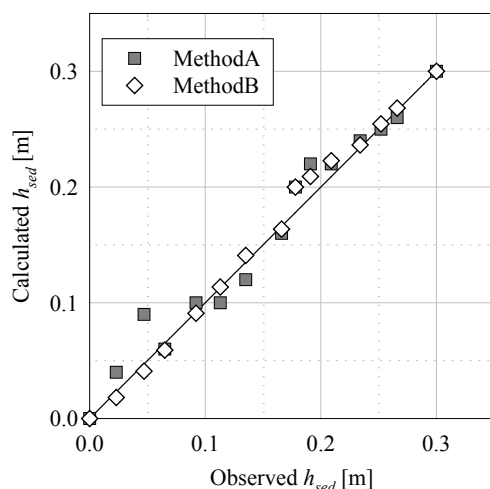


図 2 実験 2 の砂面位測定結果と推定結果の比較