河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者		氏名(ふりがな)			所属			役	職	
		宮田 秀介		京都大学		助教				
②研索	名称	TDRを用いた土砂流出観測手法の開発								
でいた テーマ	政策	[分野] 地域課題分野(砂防)				融合	(リモー給杏 認	(リモートセンシング、非破壊(協査 認知行動学 等)		
	《 領域	[公募課題]				技術				
③研究経費(単位: 万円)		平成28年度		平成29年度		平成30年度		総合計		
※端数切り捨て。		248		151		0		40)0	
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜 追加下さい。)										
氏名			所属・役職(※平成 年3月31日現在)							
⑤研究の目的	・目標	(申請書に記載	よした研約	究の目的・目標る	を <u>簡潔に</u> 言	記入下さい。)				

流域の土砂管理および土砂災害防止軽減のために流域内土砂移動の把握が必須である が、出水時の山地河川における正確な土砂流出量観測は難しいのが現状である。そこで 本申請研究では、比較的高濃度での土砂流出に関して TDR (Time Domain Reflectometry: 時間領域反射法)を利用した新たな連続観測手法を開発し、現地観測により流域からの 土砂流出量を把握することを目的としている。平成 28 年度は、河川水の土砂濃度観測に 適したセンサープローブ形状の検討およびキャリブレーション手法の確立、測定精度検 証を目標とする。さらに、現地に計測システムを設置し、山地河川土砂濃度観測の開始を 目標とする。平成 29 年度は、六甲山系の土砂流出の卓越する流域に本手法を適用し、出 水中の土砂流出および鉛直濃度分布の実測を目指す。

⑥研究成果

(1) 土砂濃度測定手法の確立

(1-1) 測定原理および計測システム

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発信し、パル スが2本(送信および受信)もしくは3本 (送信×2および受信)の金属プローブの 根端-先端間の往復に要した時間を測定 する。プローブ周辺が測定領域となるた め、計測システムの末端部であるプローブ のみが河川中に設置されることとなる。ケ ーブルテスタではパルスの波形(以下、 TDR波形とする)が得られる。TDR波形の 縦軸には、反射パルス強度について発射パ



図-1 TDR 測定システムおよび測定波形の模式図

ルス強度を基準として表した反射係数がとられる。TDR波形の横軸は機種によって異なり、時間 もしくは見かけのプローブ長 L_a である(図 - 1)。見かけのプローブ長 L_a を波形変化点から読み取る と式(1)よりプローブ周辺物質の比誘電率 ϵ を求められる。

$$\varepsilon = \left(\frac{L_a}{LV_p}\right)^2 \tag{1}$$

ここで、Lはプローブの物理的な長さ、 V_p はケーブルに関する定数(0.99)である。 河川水に土砂粒子が含まれるとき、水と土砂粒子以外は含まれないと仮定すると河川水の比誘 電率 ε_{obs} の平方根は、水(比誘電率: ε_w)と土砂粒子(比誘電率: ε_s)の体積ミキシングモデルで あらわされる¹⁾。

$$\sqrt{\varepsilon_{obs}} = (1 - \theta)\sqrt{\varepsilon_w} + \theta\sqrt{\varepsilon_s}$$
$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon_{obs}} - \sqrt{\varepsilon_w}}{\sqrt{\varepsilon_s} - \sqrt{\varepsilon_w}}$$
(2)

ここで、 θ は体積土砂濃度である。水の比誘電率は温度依存し(80.4,20°C)、水温と比誘電率の 関係式が知られている²⁾。一方、土砂粒子(珪砂)の比誘電率は、2.5~3.5である。したがって、 土砂濃度 θ が高いほど測定比誘電率 ε_{obs} が小さくなる。

本研究で提案する土砂濃度計測システムでは、プローブ周辺の比誘電率 ϵ_{obs} と水の比誘電率を決定する水温を測定する(土砂粒子の比誘電率は3.0とする)。プローブ周辺の比誘電率 ϵ_{obs} の計測分解能はTDR波形の横軸分解能 dL_a とケーブル長Lの関数とであり、Lが長いほど良い計測分解能となる。そこで本研究では、プローブの長さを確保するために、コイル型のプローブ形状を導入した(図-2)。

(1-2) キャリブレーション方法 本研究で採用したコイル型プ ローブでは、プローブは塩ビパイ プに巻き付けられている(図-2)。 そのため、TDR計測波形から求め た比誘電率 ε_{obs}は塩ビパイプ(比 誘電率:約3)の影響を受ける。ま た、プローブ長Lはセンサープロ ーブ作成の制約上、正確に計測す ることが難しい。本研究では、塩 ビパイプ影響係数Aおよびプロー ブ長Lをキャリブレーションで求 めることとした。



⑥研究成果(つづき)

キャリブレーションの手順は以下の通り である。プローブごとに純水および空気(比 誘電率:1.0)中でTDR計測を行い、その結果 (それぞれ ϵ_{obs_w} , ϵ_{obs_a})から塩ビパイプ影 響係数Aおよびプローブ長Lを定めたプロー ブ5本の塩ビパイプ影響係数Aおよびプロ

ーブ長Lは0.244~0.263, 1.13~1.15 mとな

Ī	長-1 測定精度検証	測定精度検証実験の実験条件					
	Material	<i>d</i> ₅₀ [mm]	Max turbidity [ppm]				
Run 1	Silica Sand #7	0.2	300,000				
Run 2	Silica Sand #5	0.4	300,000				
Run 3	Kaolin	0.0004	400,000				

り、大きなばらつきは見られなかった。従って、キャリブレーションデータを蓄積する必要はあ るが、同様の方法で作成したコイル型プローブには共通の係数が使えると考えられる。

(1-3) 土砂濃度測定精度検証実験

TDR計測による土砂濃度測定精度を検証するための実験を行った。円筒型コンテナにいれた 60Lの純水に実験砂を順次投入してTDR計測を実施した。実験は粒径の異なる3種類の材料で行 い、土砂濃度は0~400,000 ppm(=体積土砂濃度15.1%)で変化させた(表-1)。計測中はハンド ミキサーで撹拌し続け、コンテナ内の土砂濃度が均一となるようにした。ただし、5号珪砂(平 均粒径:0.4 mm)を用いたRun 2は粒径が大きいために、目視でも均一な土砂濃度とならなかっ た。計測には5本のプローブと市販の3線式プローブ(Campbell Scientific社, CS610:プローブ 長30 cm)を用いた。

図-3に体積土砂濃度(%)とTDRに よる計測値の比較を示す。30,000 ppm (体積土砂濃度:1.1%)以下の領域で は、土砂濃度が高いほど、TDRによる 土砂濃度計測も高い傾向はあるもの の,計測誤差が大きかった。すなわち, 濁度計で計測可能な領域には本手法 は適さない。しかし,体積土砂濃度 (%) であらわすのが適当な高濃度の 領域についての実験結果をみると、体 積土砂濃度が2%(=53,000 ppm)を超 えるような領域では、いずれのプロー ブでも精度良く計測することができ た。また、粒径の異なるRun 1とRun 3 でも同様に計測可能であった。Run 2で は前述のようにコンテナ内が均一な 濃度とならず,低い濃度で計測され た。

(2) 現地観測手法の確立

北海道南部の沙流川水系総主別川 流域での現地観測により実河川での 設置方法や観測上の課題を抽出し, TDR計測による土砂濃度観測への適 用を確認した。河川水の土砂濃度鉛直 分布を観測するために,図-4のように 5本のコイル型プローブ(C-1~C-5) および市販の3線式プローブ(CS610) を護岸に設置した。また,温度依存す る水の比誘電率を正確に求めるよう 水温計を設置した。なお同地では,寒 地土木研究所により水位および濁度 が計測されている。



⑥研究成果(つづき)

北海道南部に大きな被害をもたらし た2016年9号台風により、総主別川流域 でも多量の土砂流出がおこった。最寄り のアメダス旭では8月21~23日に243.5 mmの降雨が観測された(図-5)。この ときのTDRによる体積土砂濃度観測結 果を図-5に示す。C-3はTDR波形計測設 定上のミスにより不安定な計測結果と なったが、それ以外のコイル型プローブ (C-1, 2, 4, 5) では降雨終了後まで良 好に土砂濃度を観測できた。降雨ピーク 周辺の8/23 5:20にはC-5(高さ37cm)で 土砂濃度0.06のピーク値が現れた。C-1, 4でも同じタイミングで0.005程度の土 砂濃度の増加がみられた。河川水位は 8/23 5:20~7:20にピークを示しており、 この土砂濃度の上昇は河川水位のピー クと一致するものであった。このように 河床変動を伴うような大出水時にも,本 手法は降雨終了後まで正常に計測を継 続することができた。

土砂濃度が約0.35で一定となった時にプ ローブが河床に埋没したと考えると,河床 位は8/23 16:00頃に高さ17 cm (C-1)に達し, 8/23 2:00頃に高さ37 cm (C-5)まで上昇した

(図-5)。また,各プローブで土砂濃度の上 昇が始まってから約0.35となるまでに2~ 3時間を要した。この間は非常に高い土砂 濃度が計測されており,掃流砂の移動層を 計測した可能性が考えられる。このように, センサを鉛直方向に複数設置することで, 土砂濃度分布を把握できることが示され, 本手法の有効性が明らかとなった。

コイル型プローブで土砂濃度の時間 変化を計測できたのに対し,市販の3線 式プローブ(CS610)はとくに土砂濃度



ベント中の土砂濃度観測結果。鉛直濃度分 布の時間変化(h)は C-1,2,4,5 の結果より作

上昇後に多くのノイズが含まれた(図-5)。3線式プローブは3本の金属棒が露出して おり、流木などの漂流物が付着しやすい形状であるためだと考えられる。したがって、 塩ビパイプ影響係数とプローブ長を求めるキャリブレーションが必要となるものの、コ イル型プローブが現地観測には有利であると示された。

(3) 浮遊砂鉛直濃度分布の現地観測

上記のキャリブレーション手法および現地観測手法の確立を踏まえ,六甲山系の白水 谷流域においてTDRによる土砂濃度観測を2017年1月より開始した。白水谷流域は武庫川 水系船坂川の上流域の一つであり,流域面積は0.252 km²である。本流域は荒廃面積率が 39%と非常に高く,六甲山系では突出して土砂流出が多いことが知られている³⁾。六甲 砂防事務所により,砂防堰堤水通し部においてハイドロフォンおよび濁度計,水位計, 流速計, IPカメラが設置され水文流砂観測が行われている³⁾。さらに,出水イベント中に は多段式採水器による濁度観測が実施されている³⁾。ここで,図-4と同様のシステムによ りTDR観測を実施した。プローブの設置高さは3~23cmである。

⑥研究成果(つづき)

2017年6月21日降雨イベントでは多段式採水およびTDRでの土砂濃度観測データが得られた。本イベントの総降雨量および最大降雨強度はそれぞれ89.3mm, 19.7mm/hであった。いずれの手法でも、河床付近ほど濃度が高い鉛直分布がみられた。ただし、全体的にTDRによる計測が多段式採水よりも高い濃度を示し、深度方向の差がより大きかった。 多段式採水で採取されたサンプルは平均粒径0.1mm以下の非常に細かいものであり、ほとんどがウォッシュロード成分と考えられた。これに対し、(1-3)室内実験で示されたようにTDR観測は幅広い粒径を対象としており、その結果、土砂濃度観測値が採水よりも高くなったと考えられる。

2017年台風21号にともなう豪雨により、10月22~23日に白水谷流域では多量の土砂流 出が発生した。結果を示す。プローブP-1(高さ3cm)では0.05以上の土砂濃度が計測され ており、流量の最大値付近の時刻(10/2221:30)では、P-3(高さ13cm)においても濃度 は約0.02まで上昇した。

ここで図-6に計測されたように、土砂濃度は底面ほど高い、下に凸の鉛直分布を示した。したがって土砂流出量を求めるには、断面の平均濃度を計算する必要がある。一般的に土砂濃度鉛直分布の計測は困難なため、基準面高さでの濃度およびラウス分布を仮定して断面平均濃度を求める。観測された土砂濃度鉛直分布を用いてラウス分布曲線の適用性について検討を行った。ラウス分布の適用には河床付近の基準面高さでの濃度が必要になる。ここでは、Garcia & Parkerの提案した基準面濃度式⁴⁾、芦田・道上式⁵⁾、TDRにより高さ3cmでの計測結果を基準面濃度としたときについて比較する。GP式もしくは 芦田・道上式を用いると基準面濃度が約0.25~0.3とTDR計測値よりも大きく、TDR計測による土砂濃度鉛直分布と

大きな乖離がみられた(図 -6)。一方,基準面濃度とし てTDR計測値を用いてラウ ス分布で表現すると, TDR 計測による土砂濃度鉛直分 布をよく再現した。ただし GP式および芦田・道上式 は、本来は移動床に適用す る式であり,砂防堰堤天端 で計測した今回の事例には そのまま適用すべきでない 点は注意が必要である。い ずれにせよ,浮遊砂の濃度 分布をもとに断面平均濃度 を評価するには河床近傍の 土砂濃度を実測することが 非常に重要であることが明 らかとなった。



土砂濃度鉛直分布観測結果とラウス分布による濃度分布の比較。 粒径は1mmとし、水理量は実測値を用いた。その他の定数は一 般的な値を用いた。

参考文献

- Dobson et al.: Microwave dielectric behavior of wet soil part II: dielectric mixing models, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, Vol. GE-23 (1), 35–46, 1985
- Pepin et al.: Temperature-dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 59, 38–43, 1995.
- 3)田村ら:山地河川における浮遊砂観測の課題と対応,砂防学会誌, Vol. 69(4), 3-9, 2016.
- Garcia M, Parker G: Entrainment of bed sediment into suspension, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117(4), 414-435, 1991.
- 5) 芦田和男・道上正規:浮遊砂に関する研究(1) 一河床付近の濃度一,京都大学防災研究所年次報告書, Vol. 13 (B), 1-10, 1970.

⑦研究成果の発表状況

学会における発表

- 宮田秀介,水垣滋,内藤秀弥,藤田正治:山地河川における大規模土砂流出の計測-新しい手法の開発と2016年台風9号出水の観測-, T4-7, 第128回森林学会(2017年3月)
- 内藤秀弥, 宮田秀介, 水垣滋, 藤田正治: TDRを利用した土砂濃度計測方法と現地観測への適用, 平成29年度(公社)砂防学会研究発表会(2017年5月)
- Miyata, S., Mizugaki, S., Naito, S., Fujita, M.: Assessment of Sediment Runoff during an Extreme Storm Event using a Novel Monitoring Approach, 14th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, HS18-A003, SUNTEC Singapore (2017年8月)
- 内藤秀弥・宮田秀介・岸本昌之・服部浩二・石塚忠範・永田葉子・小菅尉多・藤田正治:六甲山 系におけるTDRを利用した浮遊砂の鉛直濃度分布観測,平成30年度(公社)砂防学会研究発 表会(2018年5月)
- 宮田秀介・藤田正治: TDRを用いた土砂流出計測手法の開発, 平成30年度(公社)砂防学会研究 発表会(2018年5月)

<u>査読付き論文</u>

Miyata, S., Fujita, M.: Laboratory experiment of continuous bedload monitoring at a retention basin of a steep mountain river –Application of Time Domain Reflectometry–, Earth Surface Processes and Landforms (2018).

<u>投稿準備中の論文</u>

Miyata S., Mizugaki, S., Naito, S., Fujita, M.: Sediment concentration profiles and deposition in a mountain stream during a severe storm using time domain reflectometry, water Resources Research

内藤秀弥・宮田秀介・岸本昌之・服部浩二・石塚忠範・永田葉子・小菅尉多・藤田正治: TDR を利用した土砂濃度計測に基づく山地渓流における浮遊砂濃度鉛直分布の検討,砂防学会誌

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新 聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

なし

⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

なし

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の 今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

今年度の六甲山系の白水谷流域での観測により、本研究で提案したTDRを利用する手法 は豪雨時の土砂濃度観測に有効であることと土砂流出量を求めるには底面付近の濃度計 測が重要であることが示された。TDRを利用する手法は新規のものであり、今後のデータ の蓄積により手法の有効性や適用限界などについて明らかになっていくと考えられる。 本研究ではコイル型のセンサープローブを採用し、出水中のリター等の引っ掛かりが少 なく、現地観測に適していることがわかった。ただし、測定精度を向上させためにはより 良いプローブ形状やデータ解析手法も含めて現地観測方法について検討する必要がある。 ⑥研究成果で示したように、本研究で開発している手法は高い土砂濃度を現地観測するのに適し ている。また鉛直方向に複数で計測すると、河床に完全に埋没する前に土砂濃度が0.01から約0.4 まで2~3時間かけて上昇した(⑥研究成果の図-5)。この期間はプローブが掃流砂移動層に位置 し、その変化を計測している可能性が考えられる。今後はこれをさらに発展させ、土砂流や土石 流も含めた鉛直濃度分布が計測可能なプローブ形状およびシステム構築について、水路実験を通 じて検討し、現地への適用をめざしていく予定である。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

水系の最上流域にあたる山地河川では流砂の非平衡性が強いことと複雑な河床微地形のため に、流砂量式などによる推定が非常に難しく、観測による土砂流出量の把握は必須である。現地 観測による精度の高い計測結果は、山地河川に適応した流砂量推定モデルの研究には不可欠であ る。また、砂防計画に立案および事業実施中のフィードバックとして土砂流出量の実測値を蓄積 していくことは非常に重要であろう。

しかし、山地河川は平水時と洪水時の水位変動が大きく、大出水中には河床も大きく変動する ため、浮遊砂観測用に広く用いられている濁度計はセンサ部の埋没や露出が起こり、洪水中の正 確な土砂流出量観測は困難が伴うのが現状である。ただし、濁度計はウォッシュロード成分を主 として計測しており、狭義の浮遊砂計測には不適との指摘もある。また、大出水中の土砂流出量 は濁度計計測限界を超えている可能性もあり、高濃度の流砂を計測できる技術は、山地流域の基 礎的な情報としての土砂流出特性や年間土砂流出量の把握に大きく貢献すると考えている。

六甲山系では100年以上にわたる砂防事業により、斜面が森林で覆われ土砂流出および土砂災 害の規模は明瞭に抑制された。ただし、本研究で対象としている白水谷は裸地が多く残されてい るため、砂防事業前の明治初期の土砂流出特性に近いと考えることができる。白水谷流域と他流 域の土砂流出を比較することで、砂防事業の効果について土砂量および質(粒径など)の面から 評価することができる。白水谷流域は裸地を多く含むために土砂流出が大きく、正確な観測は容 易でない。本研究で提案した手法で大きな出水中の土砂流出量を計測することができることが明 らかとなっており、今後の観測の継続により中小出水から大出水の広範囲で砂防事業の効果を評 価できると期待される。