

濁度計とハイドロフォンを用いた山地河川における土砂動態の把握

西日本旅客鉄道株式会社（元京都大学大学院農学研究科）
 京都大学大学院農学研究科
 京都大学防災研究所

○谷寧人
 水山高久
 堤大三

1. はじめに

流砂系において一貫した総合土砂管理を行うためには、流域内の土砂移動を量・質ともに把握する必要がある。しかし山地河川では土砂移動現象は非平衡状態にあるため、流量等の水理量を用いる流砂量式を適用して流砂量を推定することは困難であり、現地での流砂観測が重要となる。

流砂観測には、土砂を直接捕捉する手法（以下直接法と呼ぶ）と土砂移動に伴う副次的現象を観測する間接的な手法（以下間接法と呼ぶ）がある。直接法は精度は良いがコストが高く、一方で間接法は低コストで連続観測が可能であるが定量化に課題がある。間接法の精度向上を行えば、定量的な土砂動態を時空間的に把握できることになる。そこで間接法のキャリブレーション実験を実施して直接法と併用した流砂観測結果に対して実験結果を適用し、間接法を用いた流砂観測手法の精度を検証した。本研究では浮遊砂・ウォッシュロード（以下浮遊土砂観測に濁度計(CAMPBELL 社, OBS-3+)を用い、掃流砂観測にハイドロフォンを用いた。

2. 観測地の概要

岐阜県高山市に位置する神通川水系足洗谷(7.2km²)を対象に間接法による流砂観測を実施した。流域出口の足洗谷観測点では自動採水器(A.SIGMA 社, モデル 900)とピット型流砂観測装置によって直接的に土砂を捕捉する手法を併用した。

3. 濁度計を用いた浮遊土砂濃度推定

3.1 実験の概要

濁度計は懸濁物質濃度だけでなく粒子の色や形、粒径に依存して出力値が変化する。同一の河川内では粒子の色や形に大きな違いが生じない可能性はあるが、特に山地河川においては粒径は出水毎・出水中にダイナミックに変化する。そこで足洗谷観測点の溪岸から土砂を採取し、「d1 : 0.85~0.25mm」「d2 : 0.25~0.075mm」「d3 : 0.075mm 以下」の3つの粒径階にふるい分けて粒径階毎の濁度計の出力値変化を見た。また d1 : d2 : d3 = 1 : 1 : 2 となる混合粒径土砂に対しても実験を行った。半径 21cm のポリエチレン容器に濁度計を設置し、攪拌機で攪拌しながら 10 秒毎の瞬間値を 120 秒間記録し、その平均をそれぞれの土砂濃度に対する濁度として算出した。

3.2 実験結果と現地観測結果への適用

図 1 に示すように、濁度と土砂濃度は比例関係にあり、粒径階毎にその関係は異なることが分かる。更にその関係は粒径に反比例し、細かな土砂ほど出力値が大きくなっている。3つの粒径階土砂に対して一次関数で回帰式を算出し、それぞれの式に混合比(1 : 1 : 2)を掛けて足し合わせることで混合粒径の濁度を推定した。その結果、混合粒径における濁度出力値は混合比率さえ既知であれば粒径階毎の土砂に対する濁度

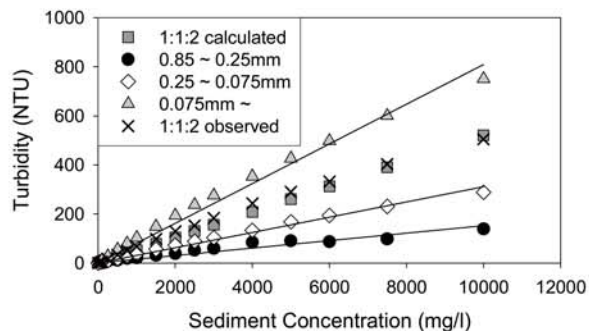


図1 土砂濃度と濁度の関係

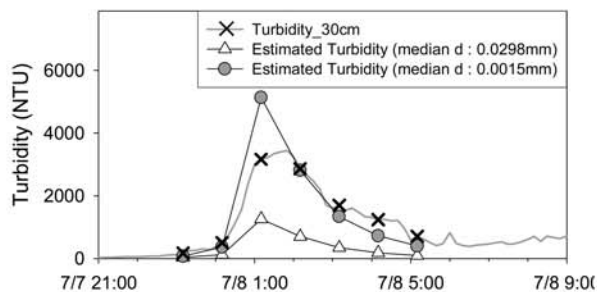


図2 現地観測への適用結果

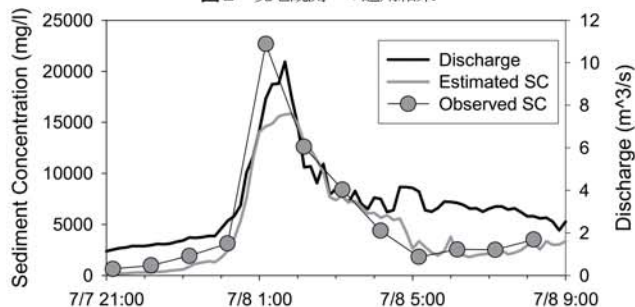


図3 濁度を用いた浮遊土砂濃度の推定

表1 各粒径階の50%粒径

| | 50%粒径(mm) |
|----------------|-----------|
| 0.85mm~0.25mm | 0.4085 |
| 0.25mm~0.075mm | 0.1746 |
| 0.075mm以下 | 0.0298 |

表2 (1)式の係数

| | |
|----------|---------|
| α | 0.01210 |
| n | 0.54071 |

を足し合わせて推定が可能であることが示された。

本実験結果を足洗谷流域における現地観測結果(2011年7月7-8日, 総降雨量80mm, 最大時間雨量21.5mm)に適用した(図2の△)。観測された浮遊土砂濃度から推定した濁度は、濁度観測結果と比較して明らかに過小評価された。

そこで単一粒径における土砂濃度と濁度の関係から粒径の影響を補正した。懸濁物質表面ではミー散乱理論により射出光は散乱され、その関係は以下の(1)式で表される。

$$T_{bi} = \alpha \times \left(\frac{1}{d_i}\right)^n \times SC_i \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 T_{di} : 粒径階 i の浮遊土砂に対する濁度、 a : 土質に関する係数、 n : 粒子の形に関する係数 (完全な球なら 1 となる)、 d_i : 各粒径階を代表する粒径、 SC_i : 粒径階 i の浮遊土砂濃度である。各粒径階を代表する粒径 d_i については、同じく足洗谷観測点付近で採取した溪岸土砂の粒度分布を用い、それぞれの 50% 粒径を採用した(表 1)。d2, d3 の実験結果から a , n を決定(表 2)して粒径と濁度出力変化の関係を求め、d3: 0.075mm 以下の土砂の 50% 粒径の値を $1.5\mu\text{m}$ とした時、濁度は良好に再現された(図 2 の ●)。この結果から、濁度計はウォッシュロード成分の中でも非常に細かなものが出力値の大半を占めることが確認された。また溪岸に残留する土砂では細かな成分は既に流出してしまっている可能性が非常に高く、現地土砂を用いてキャリブレーション実験を行う際には、粒径の影響を加味することが不可欠であることが示された。

最後に濁度から土砂濃度を推定した結果を図 3 に示す。濁度という単一の指標から粒度分布という複数の情報を得ることはできないため $d1:d2:d3=1:1:2$ とし、d3 の 50% 粒径は $1.5\mu\text{m}$ と仮定すると、ピーク時以外は概ね良好に浮遊土砂濃度の観測結果を再現できている。しかし現段階では濁度計で観測可能なのはウォッシュロードのみで浮遊砂は空白地帯となっている可能性が高い。今後出水中のウォッシュロード成分の変化や、ウォッシュロード・浮遊砂の出水毎・流量との関係等が明らかとなれば推定精度は向上すると考えられる。

4. ハイドロフォンを用いた掃流砂量推定

4.1 現地観測結果の音圧値を用いた掃流砂量推定

足洗谷流域出口ではハイドロフォンパルス(アンプ倍率: 1016, 256, 64, 16, 4, 2 倍)と音圧、ピット流砂観測装置による掃流砂の直接観測を行っている。2011~2012 年の 3 つの出水(2011/9/19~21, 2012/7/11~13, 2012/8/13~15)において土砂の捕捉に成功し、パルス数・音圧とピット重量変化の関係を求めた。図 4 にパルス(1016 倍, 16 倍, 2 倍)・音圧とピット重量変化の関係を示す。1016 倍ではパルス数が頭打ちしていることが分かり、16 倍, 2 倍では非常にばらつきが大きい結果となった。一方音圧は比較的対応が良い。3 つの出水は出水規模や流出土砂の粒度分布が違うが、音圧を用いればその違いをある程度無視してキャリブレーション式を描ける。この関係を 2011 年 7 月 11~13 日の降雨イベントに適用した結果(図 5)を見ると、音圧によって良好に流砂量が推定できている。

4.2 音圧とパルスを併用した粒径別流砂量推定

足洗谷観測点のハイドロフォンを用いて、粒径(30mm, 24mm, 15mm)と流量(0.65m³/s, 1.70m³/s)、流砂量(4kg/10s, 2kg/10s, 1kg/10s, 1kg/min)を変化させてハイドロフォンの検出率(パルス数/投入した礫個数)の変化を見た。流砂量と礫径が大きくなると検出率は下がる結果が得られた。これはパルス数がパルスの重なり合い(検知率)とハイドロフォンへの衝突率の 2 つに依存することを示す。

$$P(a) = R_1(a) \cdot N_1 + R_2(a) \cdot N_2 + \dots + R_k(a) \cdot N_k \dots (2)$$

ここに、 P : パルス数、 k : 移動土砂の粒径階、 N_i : 粒径階 i の礫の粒子数、 R_i : 粒径階 i の礫に対する検出率、 a : アンプ倍率である。パルス数は(2)式で表されると考えられ、検出率

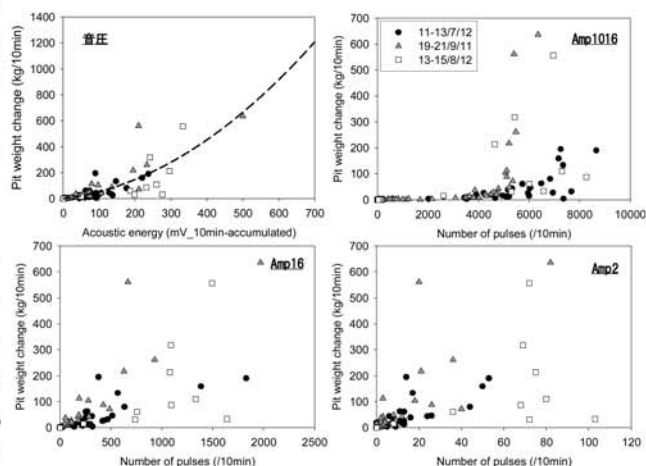


図 4 音圧・パルス数とピット重量変化の関係

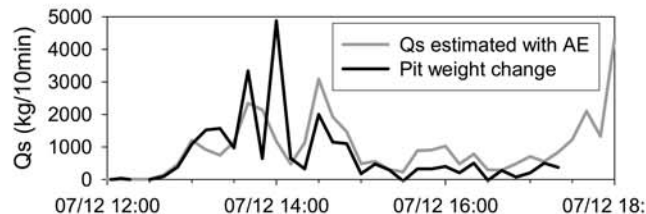


図 5 音圧による流砂量推定(2012/7/11-13)

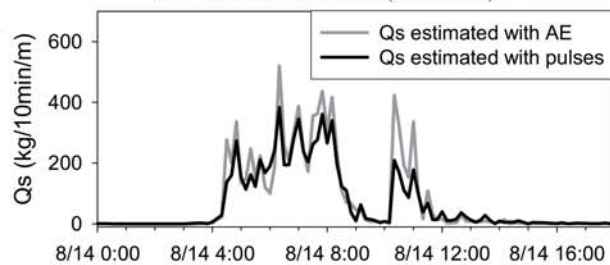


図 6 パルスと音圧を併用した流砂量推定(2012/8/13-15)

を流砂量によって変化させて流砂量を推定した。ある時間における流砂量は音圧の値を用いて推定した。図 6 に 2012 年 8 月 13~15 日の降雨イベント時の適用結果を示す。先述の通り、この出水ではピット流砂観測装置により土砂の捕捉に成功しており、流出土砂の粒度分布が分かっている。音圧で推定した流砂量をパルスで推定した流砂量は良好に再現できている。一方実験で用いた土砂は実際の粒度分布の一部にすぎず、粒度分布を適切に評価されているかまでは分からない結果となった。今後粒径を大きく変化した実験を行い、適用性を検証する必要がある。

5. おわりに

本研究では濁度計とハイドロフォンを用いた流砂観測システムの定量化を行った。2 つの手法を併用しても浮遊砂は空白地帯となり、適切に評価できていない可能性が高い。採水等の直接法を併用した現地観測結果の蓄積とともに新しい手法の導入も含めて更に精度良い流砂観測手法の構築が望まれる。

謝辞

本研究の一部は平成 24 年度砂防学会若手研究助成により行った。ここに記して感謝の意を表します。