

掃流砂観測手法開発に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 26～平 28

担当チーム：寒地河川チーム、水環境保全
チーム、水文チーム

研究担当者：島田友典、柏谷和久、萬矢敦啓

【要旨】

洪水時の掃流砂量は河道計画・管理に不可欠な基礎データであるが、その実測には、いまだ技術的な課題がある。このため、より安全性が高く、高速流下や様々な河床条件でも確実に計測でき、計測誤差が小さく、任意の時間で計測可能である掃流砂測定手法を開発する必要がある。

本研究は、十勝川千代田実験水路をフィールドとして、より安全性が高く、幅広い流況・河道状況に適用でき、かつ任意の時刻での掃流砂量を、より高精度で観測可能な手法を開発した。

キーワード：掃流砂, acoustic Doppler current profiler, Multi-beam echo sounder, ロードセル, IC タグ

1. はじめに

洪水時の河道内掃流砂量の経時把握は、適切な河道計画・維持管理を行う上で不可欠な基礎データである。しかし、洪水時の掃流砂量の実測は、計測時の危険性、制約条件、計測誤差等の他、多くの技術的課題が残されている。本研究では、安全性が高く、計測が確実で、計測誤差が小さく任意の時間での計測が可能である掃流砂測定手法を開発した。



写真-1 製作したロードセル採砂器(左)と実験水路での埋設状況(右)

を行った。

2. 研究方法および調査結果

2. 1 実験概要

本研究は、平成 26～28 年度に、北海道の十勝川千代田実験水路 (以下、実験水路) において実施した。本研究では、現地河道における掃流砂を計測する手法として、①ロードセルを用いた採砂器の開発・現地計測 (平成 26 年度および平成 28 年度)、②ADCP を用いた掃流砂計測 (平成 27 年度)、③IC タグを使用した掃流砂移動速度の計測 (平成 28 年度) の 3 種類について検討した。

2. 2 ロードセルを用いた採砂器の開発と現地計測

2. 2. 1 現地計測手法

製作したロードセル採砂器をあらかじめ河床に埋設し(写真-1)、通水中に上部開口部で捕捉される掃流砂の重量を荷重計の一種であるロードセルにより経時的に計測した。採取された掃流砂、計測される重量の経時変化および採砂器の開口幅により、掃流砂の粒径加積曲線の計測および単位幅掃流砂量の算出

2. 2. 2 計測結果と算出値との比較

図-1 は、実験水路においてロードセル採砂器で採取した土砂と河床材料の粒径加積曲線である。それぞれ得られた粒径加積曲線の比較より、ロードセルで捕捉された土砂は元々河床に存在している土砂の粒径よりも小さい。また、小流量時 (平成 28 年度 $Q=12\text{m}^3/\text{sec}$) にロードセル内に捕捉された土砂のほうが大流量時 (平成 26 年度 $Q=70\text{m}^3/\text{sec}$) に捕捉された土砂より粒度分布が細かいことがわかる。これは、流量規模に応じた底面せん断力で移動可能となる粒径の土砂が実際にロードセル内に捕捉されているためであり、ここで開発した手法により実際に現地河川の底面で移動している土砂を捕捉し、流砂量を計測できた可能性が示唆された。

ロードセル採砂器により掃流砂の重量計測の経時変化から、通水流量 $12\text{m}^3/\text{sec}$ (H28)の単位幅掃流砂量は $4.58 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$ と推定された。

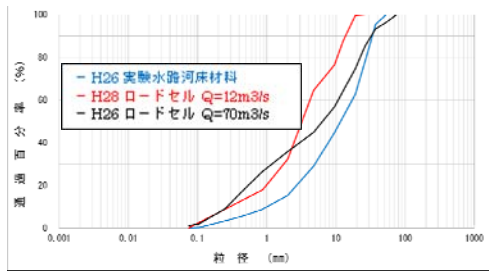


図-1 採取掃流砂の粒径加積曲線

この実測流砂量の妥当性を検討するために、掃流砂量の代表的な式である芦田・道上式¹⁾により掃流砂量を算出し、実測値と比較した。流砂量算定に用いる水理量は、平成27年度に実施した精密流量観測から推定された粗度係数、砂粒子の水中比重を使用するとともに、平成28年度にADCPで計測した流心における流速および計測流速から逆算した水面勾配を使用した。これらの水理量を基に、河床材料の粒径加積曲線から各粒径階ごとの掃流砂量を遮蔽効果を考慮して求めた。その結果、単位幅掃流砂量は $14.3 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$ となり、実測値と比較しても同程度の掃流砂量であることが確認された。一方、計測時間の短さ等の課題も明らかとなった。

なお、平成26年度実験時は、ロードセル採砂器の重量計測部に掃流砂が混入したため、重量計測が実施できず、採取した掃流砂の粒径加積曲線のみ計測できた。平成28年度実験時には外管と重量計測部を二重構造にするなどで、この欠点を改善している。これら改善点を含めたロードセル採砂器の詳細などについては、参考文献²⁾を参照されたい。

2. 3 ADCPによる掃流砂計測

2. 3. 1 現地計測手法

ロードセル採砂器による掃流砂量測定は、実際に底面に流れている土砂を直接捕捉することで、掃流砂量を推定するものである。本項ではADCP (Workhorse ADCP 1200kHz: Teledyne RDI社製) が計測する掃流砂層表面速度 u_b 、そして江頭らが提案した掃流砂量式³⁾を援用して掃流砂量を間接的に推定する手法について検討した。実験機器の平面配置を図-2に示す。図中のPは実験水路の上流端からの距離(m)を示している。また、推定した掃流砂量と比較するため、マルチビーム測深器(MB1: Teledyne Odom社製)により沈砂ピット(図-2中のSand Pit、縦断延長5m×横断幅2m×深さ1m)に堆積する掃流砂量を同時計測した。

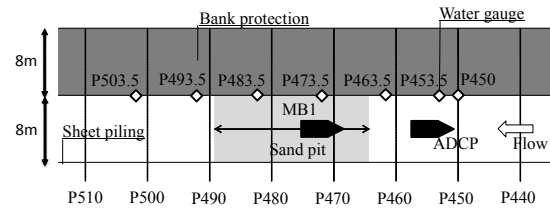


図-2 実験機器の平面配置図

2. 3. 2 ADCP等による計測結果と算出値との比較

ADCPで計測した水深等の水理量および江頭らが提案する掃流砂層内の鉛直流速分布の近似式⁴⁾(式-1)により掃流砂層の層平均移動速度 u_s を算出した。また、 u_s およびADCPで計測した掃流砂層表面速度 u_b は1次関数に近似できることから、式-2として簡易に算出できるかを試みた。なお、 α は更正係数であり、算出した u_s および計測した u_b により $\alpha=0.65$ となったが、感度分析のため $\alpha=0.5$ とした場合の掃流砂量も算出した。なお、詳細な算出手法については、参考文献⁵⁾を参照されたい。

$$\frac{u(z)}{u_*} = A_s \left\{ 1 - \left(\frac{h_s - z}{h_s} \right)^{3/2} \right\} \quad \dots \text{式-1}$$

ここで、

z : 掃流砂層底層からの高さ

u_* : 摩擦速度(m/s)

$u(z)$: 掃流砂層内の層別移動速度

$$h_s = \frac{d}{c_s \cdot \cos \theta \cdot (\tan \phi_s - \tan \theta)} \tau_* \quad : \text{掃流砂厚}$$

d : 平均粒径 (観測値)

c_s : 平均土砂濃度 (定数)

θ : 流向の河床面勾配 (観測値)

ϕ_s : 砂粒子の内部摩擦角 (砂粒子の形状で決まる定数)

A_s : c_s 、 θ 、 ϕ_s の関数

$$u_s = \alpha \cdot u_b \quad \dots \text{式-2}$$

図-3はMB1で計測した沈砂ピットの河床高分布のうち、計測開始直後と660sec後の計測結果であり、図-4はMB1で計測した河床高分布から算出した掃流砂量の時間変化と、ADCP計測値により算出された掃流砂量の時間変化の比較である。

ADCPによる推定結果はMB1の計測結果に対して、 $\alpha=0.50$ の場合410secまで一致している。

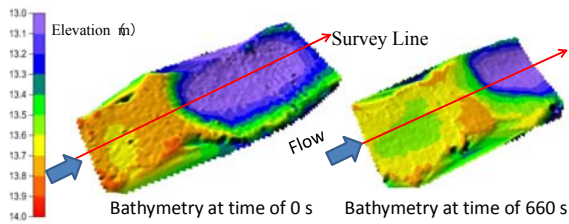


図-3 沈砂ピットの河床高分布の時間変化

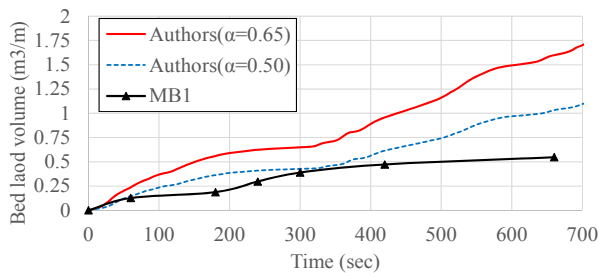


図-4 掃流砂量の堆積量と算出された掃流砂量の時間変化(Q=40m³/sec)

$\alpha=0.65$ の値は MB1 の値の二倍程度を示している。

これらの結果から、本項の推定方法が妥当であり、 α は幅を持ち、0.5-0.65 程度が適切な値であることが示された。なお、より詳細な解析手法については、参考文献⁵⁾を参照されたい。

2. 4 IC タグを使用した掃流砂による掃流砂単粒子の移動速度計測

2. 4. 1 現地計測手法

前述の掃流砂観測手法は掃流砂を砂粒子群としてとらえて、その移動量を直接的・間接的に計測するものである。しかし、掃流砂単粒子の転動・滑動・Saltation などに着目した研究¹⁾も行われていることから、掃流砂単粒子の移動を計測する手法の開発を行った。本項では、魚類の行動把握等を目的としたバイオテレメトリ技術として開発された IC タグを利用した掃流砂単粒子の移動追跡手法について検討を行った。

実験水路から採取した掃流砂をふるい分けし、各粒径階 (4.75~9.5mm、9.5~13.2 mm、13.2~19.0 mm) の掃流砂に IC タグ (Biomark 社 BIO12B および BIO9.HG.01) を添付した (写真-2)。作製した掃流砂は、上流(SP661 および SP665)から計 200 個散布し、河床を転動してくる掃流砂を下流(SP670)に設置した受信機 (Biomark 社 Cord Antennas System) により感知した。投入位置から下流に設置した受信機までの到達時間より、その区間を転動する掃流砂の平均



写真-2 使用した IC タグ (左) と作製した掃流砂 (右)

表-1 感知できた IC タグ添付掃流砂の移動速度

ID	粒径分布(mm)	流下距離(m)	流下時間	流下速度 m/min
6030618	4.75 ~ 9.5	5	0:09:48	0.510
6030617	4.75 ~ 9.5	5	0:14:22	0.348
6030614	4.75 ~ 9.5	5	0:20:16	0.247
6030611	4.75 ~ 9.5	5	0:30:40	0.163
5373478	13.2 ~ 19	9	0:06:40	1.350
5373474	13.2 ~ 19	9	0:29:29	0.305
5373488	13.2 ~ 19	9	0:17:51	0.504

移動速度を算出した。

2. 4. 2 計測結果と算出値との比較

表-1 は、上流側で散布した IC タグ添付掃流砂のうち、下流側の IC タグアンテナで感知できた掃流砂の一覧である。感知できた掃流砂 7 個の流下速度により算出した各粒径階別の掃流砂の平均移動速度は、通水流量 12m³/sec で、0.5cm/sec(粒径 4.75~9.5mm)、1.2cm/sec(粒径 13.2~19mm)となった。掃流砂の移動速度式のうち、Sekine and Kikkawa の式⁶⁾を用いて算出した粒子の移動速度は、1.6cm/sec~4.2cm/sec(粒径 11.0~16.3mm)となり、同程度の移動速度であることが確認できた。なお、2. 2. 2 と同様に、流砂速度算定に用いた水理量は、平成 27 年度に実施した精密流量観測から推定された粗度係数、砂粒子の水中比重を使用するとともに、平成 28 年度に ADCP で計測した流心における流速および計測流速から逆算した水面勾配を使用した。これらの水理量を基に、河床材料の粒径加積曲線から各粒径階ごとの掃流砂移動速度を算出している。なお、本観測手法や観測の詳細および課題等については、参考文献²⁾を参照されたい。

3. まとめ

掃流砂量を直接・間接的に観測できる手法を開発し、各理論式などとの比較により、概ね妥当な計測値であることが確認された。

参考文献

- 1) 芦田和男,道上正規:移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究,土木学会論文報告集,第 206 号,pp.59-69,1972.
- 2) 柏谷和久,新目竜一,島田友典,中島康博:千代田実験水路

における掃流砂量の直接計測の試行,土木学会北海道支部
論文報告集,B-37,2016.

3)江頭進治,宮本邦明,伊藤隆郭:掃流砂量に関する力学的
解釈,水工学論文集,第41巻,pp.789-794,1997.

4)江頭進治,芦田和男,高濱惇一郎,田野中新:連続体モデル
に基づく流砂量式の誘導,水工学論文集,第35
巻,pp.441-446,1991.

5)小関博司,萬矢敦啓,工藤俊,橘田隆史,岩見洋一:実
河川における掃流砂量と有効摩擦速度の評価方法,土木学
会論文集B1(水工学),Vol.73, No.4, I_763-I_768, 2017.2

6)M,Sekine. and H,Kikkawa: Mechanics of saltating grains. II,
Jour. Hydraulic Engineering, ASCE, vol.118, 4, pp.536-558,
1992.