

合成音圧法による掃流砂量観測結果のばらつきと それを踏まえた流砂水文観測

泉山寛明・山越隆雄

1. はじめに

平成21年から直轄砂防事業管内では砂防計画の立案、砂防工事の実施等に必要な流域情報資料の整備を図るため、水位、濁度、浮遊砂、掃流砂等の流砂水文観測を実施している。その中でも掃流砂は河床変動を引き起こす主要な土砂移動形態の一つであり、一出水中の掃流砂および河床変動の時系列変化が明らかになればより実効性の高い対策の考案が期待され観測の重要性は高い。掃流砂量の観測は砂礫が金属製のパイプあるいはプレートに衝突する際の衝突音をマイクロフォン（以下「マイクロフォン」という。）で捉え、音圧波形を解析して間接的に掃流砂量を取得する手法を採用することが多い。音圧波形の解析手法は様々提案されているが、たとえば音圧がある閾値を超える回数をカウントし、回数と掃流砂量に正の相関があるとして掃流砂量を取得する手法¹⁾（以下「パルス法」という。）、音圧波形のある時間内の積分値（以下「音圧積算値」という。）と掃流砂量を関係づける手法^{2),3)}（以下「合成音圧法※」という。）が挙げられ、改良のための研究もいくつかなされている^{たとえば4)}。

これまで蓄積された観測データを用いて、近年では山地流域の流砂特性を把握したり⁵⁾、流域内の土砂動態監視への活用を検討⁶⁾する例や、出水中の流砂観測結果からシャッター砂防堰堤の効果検証を実施する例⁷⁾などが見られる。利活用を推進するためには、センサーによって得られる観測値の特性が明らかである必要があるが、合成音圧法については得られる観測値のばらつきが明らかでなかった。そこで、本報告では合成音圧法による観測値のばらつきを評価した結果について紹介するとともに、今後の流砂水文観測の方針案を提案する。

2. 合成音圧法による観測値のばらつき

2.1 合成音圧法の概要

合成音圧法は任意の時間 T [s] において任意の長さ L [m] のマイクロフォンに砂礫が衝突したことで得られる音圧（電圧に換算して記録）[V] の時間積分値（音圧積算値 $S_p T$ [V・s]）から単位時間あたりの掃流砂量 Q_b [m³/s] を推定するもので、下記の式(1)、(2)を使用する。

$$Q_b = \frac{\pi}{6} d^3 N_b v_b = \frac{S_p T}{\alpha R (N_b) T} = \frac{S_p}{\alpha R (N_b)} \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{R_k(k N_b)}{R(N_b)} = \frac{S_{pk}}{k S_p} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 d : 粒径 [m]、 N_b : 長さ L のパイプの上流方向に単位長さあたりで存在する砂礫の個数 [1/m]、 v_b : 砂礫の移動速度 [m/s]、 S_p : 単位時間あたりの音圧積算値 [V・s/s]、 α : 比例係数 [V・s/m³]、 R : 検出率、 k : 任意整数、 S_{pk} : Q_b を仮想的に k 倍したときの音圧積算値、 R_k : Q_b を仮想的に k 倍したときの検出率である。なお、 v_b は掃流砂量の観測結果に与える影響は小さいと仮定し、1m/s で一定と仮定している²⁾。検出率 R は複数の砂礫の衝突に伴う音響波形同士の干渉の程度を表す。干渉しない場合は1で、音圧波形が重なり合って干渉の度合いが増すと0に近づく²⁾。

2.2 現地実験

合成音圧法による観測値のばらつき評価を行うために現地実験を実施し、掃流砂量の実測値を得ることを試みた。実験は、試験粒子を複数衝突させる実験（以後「集団衝突実験」という。）を実施した。実験は鈴木ら³⁾で対象としたものと同じく与田切川の坊主平砂防堰堤（図-1）左岸側に設置された長さ0.5mのパイプマイクロフォンを対象とし、所定の量の試験粒子を上流側から投入し



図-1 坊主平砂防堰堤

て得られる掃流砂量の観測値を取得するために実施した。

実験の実施に当たり、可能な限り実際の土砂の挙動を確保しつつ実験条件を制御するため、水路幅50cm、長さ1.8mの簡易水路を使用し、掃流砂として運動するよう上流側から集水して水深を確保した(図-2)。

集団衝突実験は試験粒子として砂礫のみを用いた。供給土砂の質量は0.5kg、1kg、3kg、7kg、10kgの5パターンを設定した。

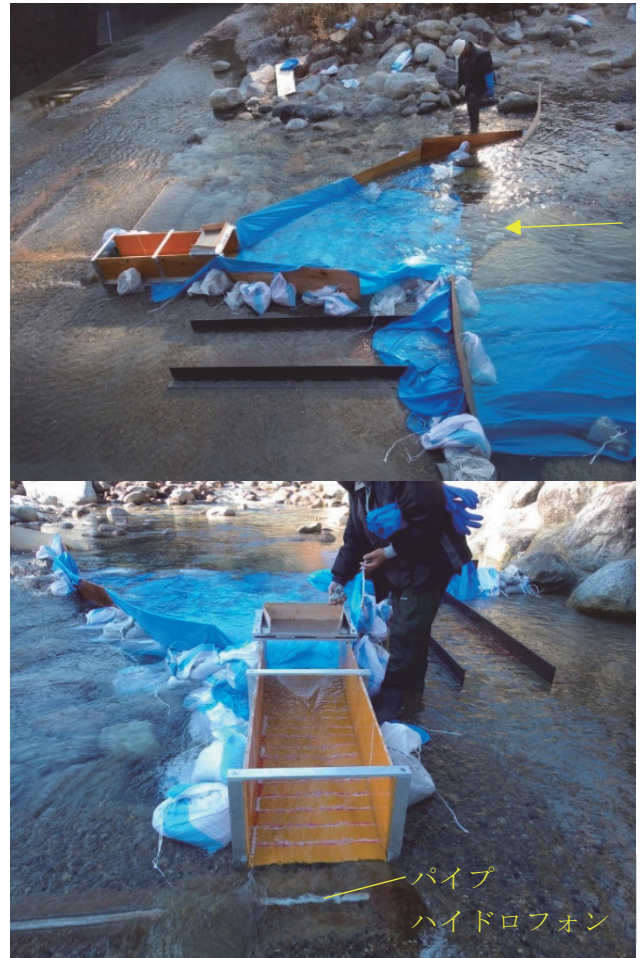


図-2 現地実験の状況

2.3 観測値のばらつき

集団衝突実験時の供給土砂量 M と式(1)、(2)による推定値 M_{est} (式(1)の $\alpha = 5.04 \times 10^{-3}$: 全国で一般に使用される値)を比較すると(図-3)、 M_{est} はいずれも過小評価されている。図にはばらつきの範囲として1:5.9および1:1/5.9のライン⁸⁾も示す。この値は集団衝突実験時の供給土砂量に対して推定値が取りえる範囲の上限と下限を示すもので、式(1)、(2)を用いた統計的な解析で得たものである。詳細は泉山ら⁸⁾を参考いただきたい。供給土砂量が小さい場合は1:1/5.9のラインに近い位置にプロットがある。供給土砂量が多い場合はより内側に位置する実験結果となっているが、別の条件で実験を実施すれば1:5.9および1:1/5.9のラインに近いプロットが現れる可能性はある。上記は与田切川での結果であって、他の流域でも同様のばらつき範囲であるかは不明である。比例係数 α が大きく異なる流域も想定されるため、観測値は真値の1オーダー程度、異なり得ると考えておくとうまいと推察する。

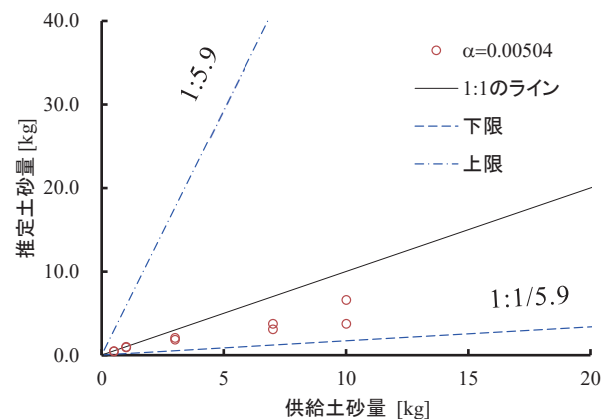


図-3 集団衝突実験の供給土砂量と推定土砂量

3. 合成音圧法の今後の活用方法案

合成音圧法のばらつきが明らかとなったところで、今後の流砂水文観測の方針案をいくつか述べる。なお、あくまで一例であり、その他の活用は十分にあり得る。合成音圧法のみならず、ハイドロフォンやそれに類似する装置を用いた掃流砂観

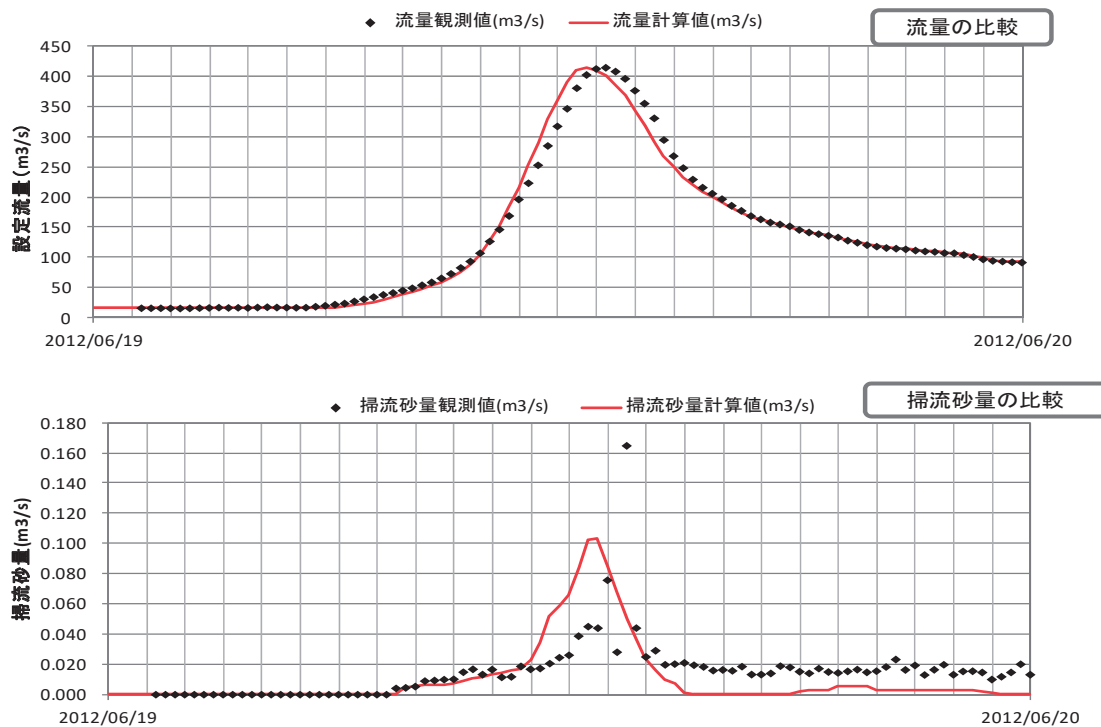


図-4 関の沢第2床固での流量，掃流砂量の観測値と河床変動計算による推定値

測手法には一定程度のばらつきがある。例えばスイスで開発されている、金属製のプレートと地震計を組み合わせたスイスプレートジオフォンを用いた場合、供給土砂量と観測土砂量との比は最大で10、最小で1/10、四分位範囲は数分の1～数倍と評価されている⁹⁾。パルス法に基づいて混合粒径土砂の観測結果を分析したところMao et al.¹⁰⁾は最大で2オーダー程度のばらつきが、後藤⁴⁾は最大で1オーダー程度のばらつきがあることを示している。

したがって、ハイドロフォンを用いた掃流砂観測は、出水中の流砂の時系列変化が掴める点が大きな利点ではあるものの相当程度のばらつきを有することを前提として活用する必要があるのが現状である。流砂量の絶対量を把握するというより掃流砂量変化の傾向をつかむことが主体となる。活用先の一つとして、河床変動計算モデルの検証材料、入力条件設定の資料とすることが考えられる。例えば、ある流域における土砂・洪水氾濫現象で想定される被害および施設の効果評価を実施する場合に河床変動計算を実施することになるが、十分に当該流域の土砂動態を表現できるモデルになっているか確認しておくことが必要となる。図-4は日光砂防事務所関の沢第2床固における観測

結果と河床変動計算による再現計算結果を比較したものである。計算は次元不定流の式、芦田・道上の掃流砂量式を修正したもの¹¹⁾を用いているが、流量については絶対値、時系列的な変化の傾向は良く再現され、掃流砂量についても上記のばらつきの範囲内であり、時系列的な変化傾向は良好な精度で再現できていると判断できる。

また、中期土砂流出現象時の土砂動態を把握し、流域管理する場合にも活用が期待される。短期土砂流出時には大量の土砂が生産・流出して大きな土砂災害が発生する可能性が高いが、生産土砂の内で流域内に残存する土砂も多い。残存土砂はその後の降雨等で活発に流出し、規模は小さいものの下流で氾濫被害等が生じる可能性がある。そこで、活発な土砂流出がどれほどの期間継続するか、降雨強度がどれほどになれば流砂が開始し、その経時変化はどうなっているかなどを流砂観測によって把握することが考えられる。また、流出土砂量が活発な間は不透過構造として土砂を積極的に捕捉し、一定程度落ち着いてくれば透過構造として土砂を下流へ流出させる運用を検討する場合にも活用が考えられる。

一方で、流砂は水の流れがあって初めて発生するので、まず流量観測を管内の複数地点で実施し

て流域の降雨・流出特性、本支川の出水のタイミングのずれを明らかにすることが考えられる。低確率の大規模な出水時の観測は困難であるが、中小規模出水時でのデータから大規模出水時の現象が具体的に推定できる可能性がある。河床変動計算の結果は境界条件・初期条件によって大きく変わる。これら条件を適切に設定するためにも土砂・洪水氾濫対策や中期土砂流出対策を検討する流域では実測のデータの蓄積が必要になる。

4. おわりに

本報告では、掃流砂量を間接的に観測するために用いられる合成音圧法による観測値のばらつきの程度を提示し、そのばらつきを踏まえた観測データの活用方法として、河床変動計算モデルの検証材料とするなど具体的な今後の観測の方針案をいくつか提示した。

謝 辞

観測データをいただいた地方整備局、直轄砂防事務所の担当者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Mizuyama, T., Larrone, J.B., Nonaka, M., Sawada, T., Satofuka, Y., Matsuoka, M., Yamashita, S., Sako, Y., Takami, S., Watari, M., Yamaguchi, S., Tsuruta, K.: Calibration of a passive acoustic bedload monitoring system in Japanese mountain rivers, In J. R. Gray, J. B. Laronne, & J. D.G. Marr (Eds.), Bedload-surrogate monitoring technologies (Sci. Invest. Rep. 2010–5091, pp. 296–318). Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2010
- 2) 鈴木拓郎、水野秀明、小山内信智、平澤良輔、長谷川祐治：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究、砂防学会誌、Vol.62、No.5、pp.18~26、2010
- 3) 鈴木拓郎、内田太郎、岡本敦、高橋健太、山下伸太郎、小菅尉多、福本晃久：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性の検証、砂防学会誌、Vol.66、No.1、pp.4~14、2013
- 4) 後藤健：山地河川における掃流砂観測に関する研究、北海道大学学位論文、119pp.、2016
- 5) 木村詩穂、内田太郎、田中健貴、井内拓馬、桜井亘、杉山実、田方智、松田悟、伊藤隆郭：山地河川における土砂流出特性の支配要因に関する一考察、砂防学会誌、Vol.70、No.6、pp.46~53、2018
- 6) 桜井亘、内田太郎、泉山寛明、井内拓馬、杉山実、松田悟、伊藤隆郭：流砂水文観測から得られた異常な土砂生産時の掃流砂流出特性と観測結果の山地流域監視への適用について、砂防学会誌、Vol.72、No.2、pp.25~31、2019
- 7) 野呂智之、吉村明、宮下優、長山孝彦、古谷智彦、中西隆之介、伊藤隆郭、水山貴久、藤田正治：常願寺川における水・流砂の連続的な把握とシャッター砂防堰堤の効果的な操作検証、2021年度砂防学会研究発表会概要集、pp.43~44、2021
- 8) 泉山寛明、内田太郎、吉村暢也、井内拓馬：合成音圧法による掃流砂量推定値のばらつきの定量的評価、砂防学会誌、Vol.75、No.2、pp.11~16、2022
- 9) Wyss, C. R., Rickenmann, D., Fritschi, B., Turowski, J. M., Weitbrecht, V., Travaglini, E., Bardou, E., Boes, R. M.: Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bed load monitoring system: 2. Application to field sites with direct bed load samples, Water Resources Research, Vol.52, pp.7760–7778, 2016
- 10) Mao, L., Carrillo, R., Escarriaza, C., Iroume, A.: Flume and field-based calibration of surrogate sensors for monitoring bedload transport, Geomorphology, Vol.253, p.10–21, 2016
- 11) 芦田和男、江頭進治、劉柄義：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析、水工学論文集、Vol.35、1991

泉山寛明



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部砂防研究室 主任研究
官、博士（工学）
Dr. IZUMIYAMA Hiroaki

山越隆雄



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部砂防研究室 室長、博士
（農学）
Dr. YAMAKOSHI Takao