

掃流砂観測手法の課題および解決に向けた流砂量換算手法に関する検討

国土技術政策総合研究所 西脇彩人*1、山越隆雄*2
株式会社コルバック ○吉村暢也

*1：現：国土交通省静岡河川事務所、*2：現：国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部

1. はじめに

掃流砂量の時系列データは、砂防事業実施や総合土砂管理または土砂災害に対する流域監視等の基礎データとなるものである。そのため、平成22年度ごろから全国の直轄砂防事務所が中心となって観測が進められて一定のデータが蓄積された。今後とも必要に応じたデータ蓄積が必要と考える。

しかし、観測の実施においては、データの不具合や機器故障または維持管理の難しさがあり、継続的に安定して観測データを得ることに課題¹⁾があることが分かってきた。本報告は、課題解決に向けた改良について検討した結果を整理したものである。

2. 掃流砂観測手法の概要と課題

掃流砂の観測手法は、センサー部に衝突する礫の音を計測する音響法を利用したハイドロフォン観測手法²⁾を主に採用している。センサーのタイプとしては、現在、通常タイプのパイプ型と高強度タイプのプレート型³⁾がある。

ハイドロフォン観測手法の主な課題を整理すると下記のとおりである¹⁾。

- ① センサー部に衝突する音を計測しているために、衝突によりセンサー部が変形する場合があります、変形するとセンサー特性が変化（性能劣化）。また、故障して欠測となる場合がある（耐久性不足）。
- ② 一部の流砂がセンサー部を跳び越すため過小評価となる（非衝突の影響）。
- ③ 流水ノイズの影響があり、小さな砂礫の移動を検知できない（流水ノイズの影響）。
- ④ データ取得にインターバル20～100kHzの音響データが必要で高価な記録装置となる（高価な機器）。

上記の①については、対応するために高強度タイプのプレート型が開発され、最近採用されつつある。②と③については、現地水路実験等により対応方法の検討が進められている。④については、計測値から掃流砂量に換算する計算手法の問題であり、今回、中心極限定理を利用した改良手法を提案する。

3. 流砂量換算手法の主な種類

全国の直轄砂防事務所で採用されている主な手法は、合成音圧方式⁴⁾であるが、それ以外にもパルス方式²⁾がある。また、ハイドロフォンと類似する手法としてスイス方式（geophone）⁵⁾がある。各手法の概要を表-1に整理した。

この表が示すように、流砂量への換算方法について、計測値の非線形性に対する対応方法が異なる。合成音圧方式については、生の音響波形データから音の干渉の影響をより厳密に考慮しようとしている。一方パルス方式については、流砂量と相関性の高い増幅率のセンサーを利用するようにしており、観測箇所ごとに使

用する増幅率を検討する必要があるが、アナログ技術を多用しているためデータ量が少なくなる利点がありそれを重視している。またスイス方式は、流砂量に依存させて非線形性を考慮している。しかし計測値と流砂量との相関性は若干低い傾向にある（ $R^2=0.2\sim0.3$ ）⁵⁾。

以上を整理すると、非線形性についてより厳密に考慮しようとしているのが合成音圧方式で、簡易的に考慮して機器を簡素化して安定的に計測しようとしているのがパルス方式、その中間がスイス方式となっているようである。

表-1 流砂量換算手法の主な種類

項目		合成音圧方式	パルス方式	スイス方式 (geophone)
センサー・記録系	センサー	音響マイク	音響マイク	振動センサー
	計測値	音響波形	パルス数	インパルス数
	サンプリングインターバル	20～100kHz	0.1秒	10kHz
	フィルター	デジタル(BPF)	アナログ(BPF)	アナログ(LPF)
流砂量への変換	出力項目	流砂量、平均粒径	流砂量	流砂量
	非線形性への対応	合成音圧法により音の干渉を考慮して対応	増幅率を変えたパルス数を計測値に応じて切り替えて対応	最大粒径と土砂量に依存する校正係数により対応
機器関連	電源	消費電力:大 商用電源が基本	消費電力:小 ソーラー電源が可能	消費電力:中
	記録装置 データ量	データ量:膨大 (100kHzの音響波形、2週間で8GBのファイルサイズ)	データ量:小 (1分～5分間隔のパルス数と平均音圧値)	データ量:小 (1分～15分間隔のインパルス数)
	データ配信	音圧波形の通信には、光回線が必要。 データ量を減らして携帯通信するためには、現地で演算処理が必要。	携帯通信可能	携帯通信可能

4. 流砂量換算手法の改良

表-1で整理したとおり、計測値の非線形への対応に対しては合成音圧方式が最も進んでいると考える。しかし、この手法は下記に示すように改良が必要となっている。

(1) 改良の必要性

観測を開始した当初は、センサーの音響特性を分析するために、生の音響波形データを保存する機器構成としていたが、観測を開始して10年以上が経過しており、基礎的なデータは得ており⁶⁾、これ以上、生音響波形データを蓄積する必要性は少ないと考える。

また、合成音圧方式の計算では、20～100kHzの計測インターバルが必要であり、対応できる記録装置が高価である。また計算量が多く、現地で計算する場合に計算能力の高いPCが必要となる。

以上より、音響波形データを蓄積せずに簡素化した計算手法への改良が必要と考える。

(2) 中心極限定理を利用した改良版

中心極限定理とは、音の信号がどのような統計的性質を有していても、多数の異なる音が重なり合うと、その音の信号の振幅値分布は正規分布に近づく。また、混ぜ合わせる音の数と微分エントロピー h に関係性があり、正規分布の場合 $h=1.419$ となる⁷⁾。

ハイドロフォンによる観測では、音の数をセンサー管に衝突する砂礫の数 N として、そのときの音響波形による微分エントロピー h との関係を利用することとした。この手法の利点としては、データのサンプリングインターバルとして 20~100kHz は必要なく、1kHz もしくはそれ以下でも計算可能であり、記録装置および計算の簡素化に寄与できると考える。微分エントロピー h の計算式を示すと下式のとおりとなる。

分布 $f(x)$ の微分エントロピー $h(X)$ は下式で与えられる。

$$h(X) = - \int_x f(x) \cdot \log f(x) \cdot dx \quad \text{--- 式-1}$$

また、分割幅 hw のヒストグラムで示す分布形では、微分エントロピーは下式で近似される。

$$h(X) = - \sum_{i=1}^n f(xi) \cdot \log \left(\frac{f(xi)}{hw} \right) \quad \text{--- 式-2}$$

ここに、

$h(X)$: 微分エントロピー

$f(x)$: 音響波形 $p(x)$ の密度分布

$f(xi)$: 音響波形 $p(x)$ を階級幅 hw でヒストグラムとしたときの度数で、度数の合計が 1.0 になるように正規化した値を使用。

hw : ヒストグラムの分割幅 (=0.1[V] を使用)

$p(x)$: 正規化した音響波形で下式を使用

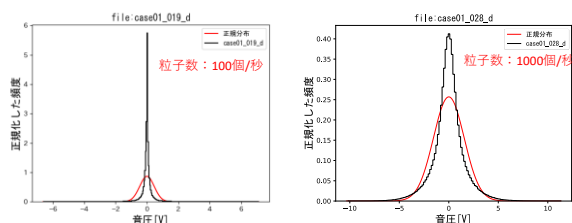
$$p(x) = \frac{P'(x) - P_{ave}}{P_{var}} \quad \text{--- 式-3}$$

ここに、

$p'(x)$: 計測した音響波形、 p_{ave} : 音響波形の平均値

p_{var} : 音響波形の分散値

図-1 に衝突する粒子数 100 個/秒と 1000 個/秒のケースについてヒストグラム図 (黒線) を作成した。また、赤線は正規分布を示す。この図が示すように衝突する粒子数が多いほどヒストグラムは正規分布に近くなる。



赤線：正規分布、黒線：計測値のヒストグラム

図-1 音圧のヒストグラムのサンプル

同様の計算方法で粒子数 N と微分エントロピー h との関係を整理すると図-2 のようになる。この整理図の関係より微分エントロピー h から粒子数 N を推定することとした。また、推定した粒子数 N から検出率 $f(N)$ の推定方法は、合成音圧方式と同様の推定式を用いることとした⁴⁾。

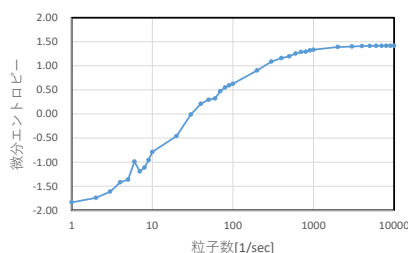


図-2
粒子数と微分エントロピーとの関係

流砂量 Qs への校正式は、合成音圧方式と同じ下式⁴⁾を使用する。この式の粒子数 N に中心極限定理手法から計算した値を使用する。

$$Sp = Qs \times \alpha \times f(N) \quad \text{--- 式-4}$$

ここに、

Qs : 流砂量 (m^3/sec)

Sp : 音圧積算値 ($V \cdot sec/sec$)

α : 校正係数 (箇所ごとの係数)

$f(N)$: 音響波形の干渉による検出率 (粒子数により変化)

N : 衝突する土粒子の粒子数 (個/sec)

(3) 中心極限定理手法の結果検証

平成 30 年度に小渋川支川鹿塩川流域にて実施した現地水路実験による集団衝突ケースの実験結果⁸⁾を使用して検証した。検証は、実験での供給土砂量と音響波形から計算した微分エントロピーによる計算土砂量を比較した。比較した結果を図-3 に示すように決定係数 $R^2=0.82$ の結果となり、適用性が高い結果となった。

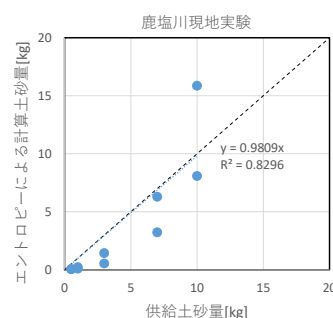


図-3 中心極限定理手法の検証結果

5. 流砂観測の簡略化に関する提案

さらなる計測の簡素化として、パルス方式²⁾の各増幅率のパルス数を利用した中心極限定理手法による流砂量換算法を考える。このパルス数は振幅の閾値以上の波数で、閾値は 6 種類または 10 種類となっており、中心極限定理手法の振幅のヒストグラムとして利用できると考える。また、パルス方式が利用できるならば、新たな機器開発の必要がなくなり計算手法の改良のみとなるので費用的にも最も安価となる。検討は、別途実用化に向けて検討している状況である⁸⁾。

6. おわりに

今回、計算手法の改良として中心極限定理手法の利用を提案した。

(1) 効果のまとめ

データ量が低減されることにより、計算量の低減、記録装置の簡素化 (機器低価格化)、データ回収作業の簡素化 (維持管理がしやすい手法) が望める。

(2) 今後の方針

現在使用している計算プログラムに中心極限定理手法の機能を追加する。記録装置を簡素化した機器構成を検討する。パルス方式による中心極限定理手法の実用化を進めるなどである。

参考文献 1) 岡本ら：砂防学会研究発表会 (H29), Pb-58、2) 水山ら：砂防学会誌, Vol. 49, No. 4, 1996、3) 吉村ら：砂防学会研究発表会 (H30), V-084、4) 鈴木ら：砂防学会誌, Vol. 66, No. 1, 2013、5) Wyss et al. (2016)、6) 泉山ら：砂防学会誌, Vol. 75, No. 2, 2022、7) 澤田：独立成分分析入門 (2010. 7. 26)、8) 吉村ら：砂防学会研究発表会 (R4), R4-15