

4.2 ハイドロフォンによる掃流砂観測の課題

ハイドロフォンを用いた掃流砂観測の課題として、

- ① 複数の土粒子がほぼ同時にハイドロフォンに衝突した場合に音響波形が相互に干渉するため、それぞれ個別に衝突する場合に比べて音響波形が小さくなる。そのため、音響波形の干渉による減衰の影響を評価しないと掃流砂量が過小評価になるおそれがあること¹⁾
- ② 掃流砂として流下している土粒子の一部がハイドロフォンに衝突しないため、掃流砂量が過小評価になる場合があること²⁾
- ③ 流水によるノイズが計測される音響波形に影響するため、衝突音が小さい粒径の小さい土粒子の衝突を検知できないこと³⁾
- ④ 金属管の音響特性による音響波形に上限値があるため、粒径の大きい土粒子の計測が難しいこと⁴⁾
- ⑤ 河道内において横断方向に掃流砂量のばらつきがあるため、ハイドロフォンの計測結果が当該箇所の掃流砂量を代表していない可能性があること⁵⁾

などが指摘されている。これらの計測技術上の課題が観測結果に及ぼす影響を定量的に把握しておくことは全国的に蓄積されつつある流砂観測データの解析において重要である。

3章で整理した掃流砂量のデータは、鈴木ら⁶⁾の提案した合成音圧法により、音響波形から掃流砂量に変換されたものである。以下では、合成音圧法を用いた場合の①～⑤の課題について考察する。

1) 干渉の影響

合成音圧法を用いた場合、音響波形を流砂量に変換する際に干渉の影響は評価できていることが水路実験²⁾や現地観測⁷⁾により確認されている。

鈴木ら(2013)は天竜川水系と田代川流域の坊主平砂防堰堤における観測結果を基に、合成音圧法を用いて音響波形データから掃流砂量・掃流砂の代表粒径に変換した結果と掃流砂の直接採取による計測結果を比較した³⁾。その結果、単位幅掃流砂量が 10^{-6} (m³/m/s)以上のとき、ハイドロフォンと直接採取による観測結果は比較的良く一致することを示し、合成音圧法を用いた場合、音響波形を流砂量に変換する際に干渉の影響はある程度評価できていることを確認した(図4.2.1)⁷⁾。

2) 非衝突の影響

掃流砂といえども、サルテーションなどの現象が見られ、必ずしも河床近傍のみを流下するわけではないことが広く知られている。そのため、掃流砂の全てが必ずしもハイドロフォンに衝突しないと考えられる。内田ら²⁾は水路実験において衝突率を推定する手法を提案した。この手法を用いて、水路実験によりハイドロフォンに土粒子が衝突する割合(衝突率)について調べた結果を図4.2.2に示す。なお、実験方法は、蒲原ら(2015)⁸⁾を参照

されたい。実験結果より、衝突率は無次元掃流力が大きくなるに従って小さくなる傾向が見られ、無次元掃流力が0.1以上0.3未満では、衝突率は0.3から0.7の値となることが確認された。

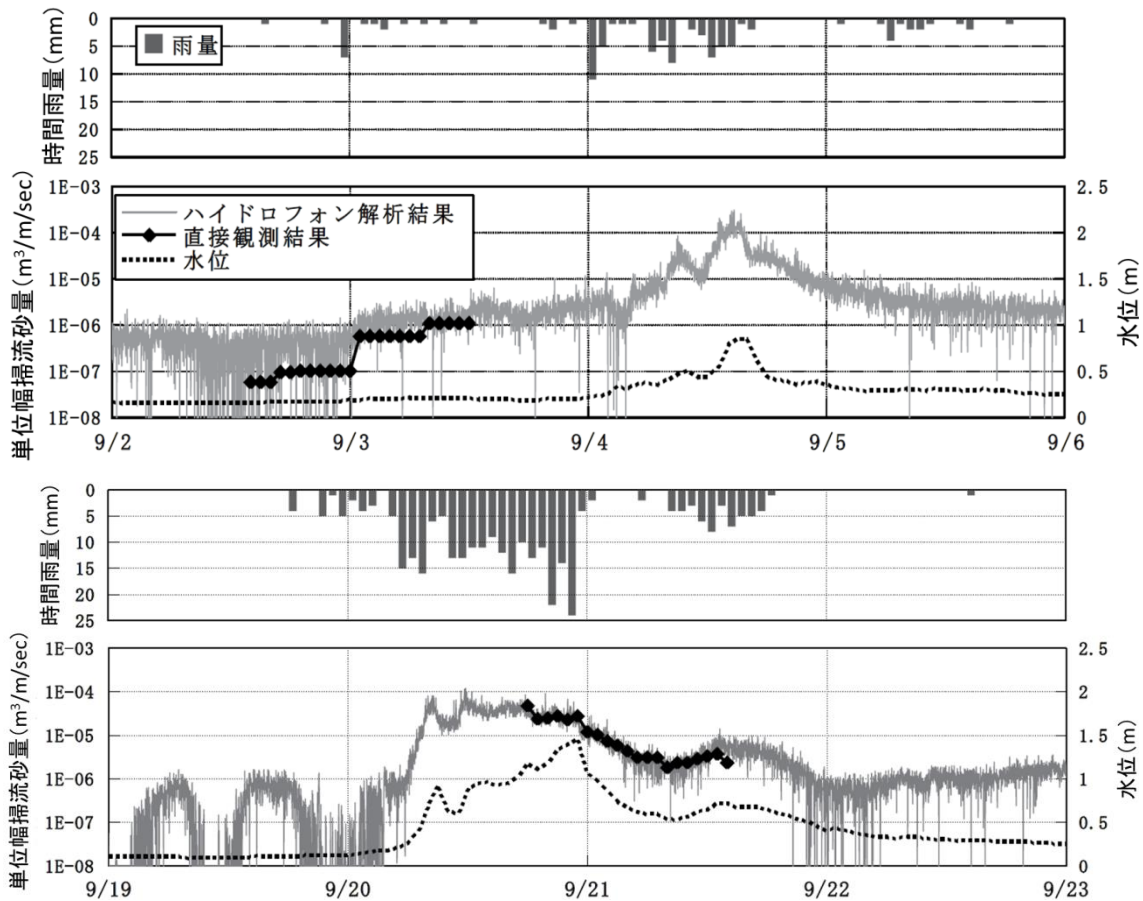


図 4.2.1 平成 23 年台風 12 号時 (上), 15 号時 (下) の時間雨量, 水位, ハイドロフォンによる単位幅掃流砂量および直接採取による観測結果⁷⁾

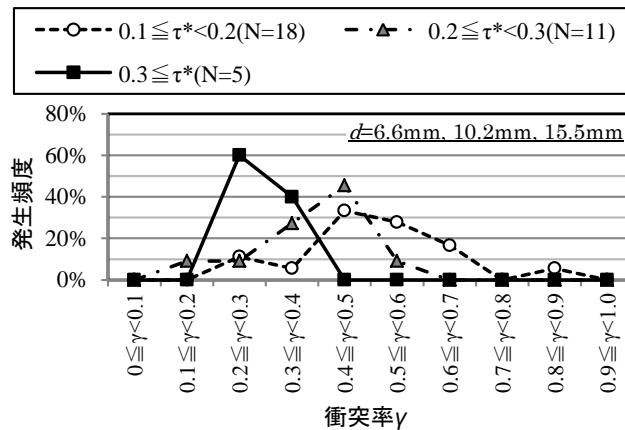


図 4.2.2 水路実験で求めた衝突率

3) 流水によるノイズの影響

水路実験において粒径が小さい(3~6mm)場合には、衝突音が流水などのノイズより小さくなり検知できないこと指摘されている²⁾。姫川水系平川流域の源太郎堰堤ではハイドロフォンの基本特性を把握するための現地実験が行われた¹⁰⁾。実験の結果、流砂の運動エネルギーが 3.0×10^{-8} (kg m²/s²)以上(粒径2.0mm以上の流砂が衝突した場合)のときはハイドロフォンの音響波形の大きさは流砂の運動エネルギーと明瞭な正の相関が見られた(図4.2.3)⁹⁾。このことから、ハイドロフォンにより流砂量を推定する場合には、運動エネルギーが 3.0×10^{-8} (kg m²/s²)以上であることが条件であることが示唆された¹⁰⁾。

また、富士川水系大武川流域ではハイドロフォンの計測値(合成音圧法により掃流砂量に変換)と観測ピットにおける計測値を比較した結果、ハイドロフォンによって粒径1~3mm以下の掃流砂は計測できないと仮定した場合、ハイドロフォンの計測値と観測ピットにおける計測値がおおむね一致することを示された(図4.2.4)¹⁰⁾。

一方、現地観測においては、ほぼ掃流砂がないと考えられる低水時であっても流水によるノイズにより一定の掃流砂量が算出される場合がある。これに対しては無降雨時の音響波形を流水によるノイズとして、流水によるノイズの影響を取りのぞく手法が提案されている⁷⁾。本資料の3章で示したデータにおいても同様な処理を行っている。

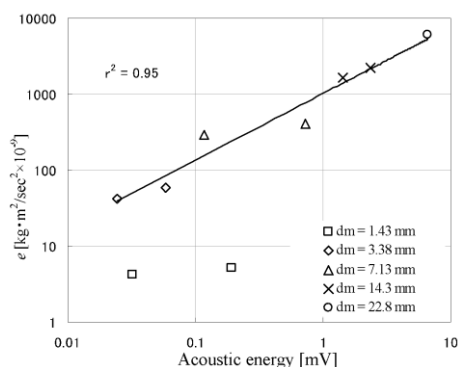


図 4.2.3 個別衝突実験における音響波形(音圧)の最大値と運動エネルギーの関係⁹⁾

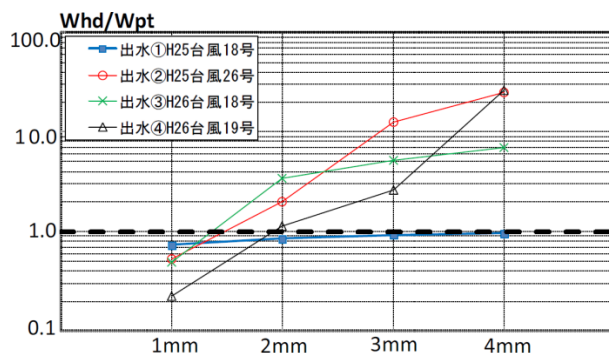


図 4.2.4 ハイドロフォンで計測された掃流砂量と土砂捕捉ピットで捕捉されたある粒径以上の土砂量の比と閾値とする粒径の関係¹⁰⁾

4) 音響波形の上限値の影響

ハイドロフォンによる音響波形の大きさは衝突する土粒子の運動量や運動エネルギーが大きくなるに従い大きくなることが現地実験や観測により確認されてきた（図 4.2.3, 図 4.2.5）^{9),11)}。しかし、金属管の音響特性による音響波形に上限値があるため、流砂の運動量・運動エネルギーが大きい領域では流砂の運動量・運動エネルギーが大きくなっても音響波形の大きさが変化しないことが指摘されてきた⁴⁾。

一方、蒲原ら（2015）の実験⁸⁾においては、図 4.2.6 に示すように音響波形の最大値に明瞭な頭打ちの傾向は確認されなかった。このことは、少なくとも本実験の範囲（粒径 16mm 以下、土粒子の運動量 150g cm/s 以下の範囲では、金属管の音響特性による音響波形の上限値の影響は見られないことが考えられる。

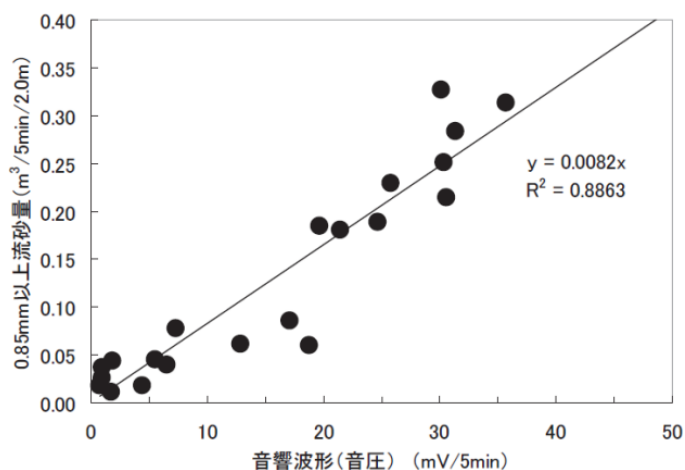


図 4.2.5 六甲山地白水谷流砂観測所におけるハイドロフォンの音響波形（音圧）と直接採水から求めた流砂量（0.85mm 以上）の関係¹¹⁾

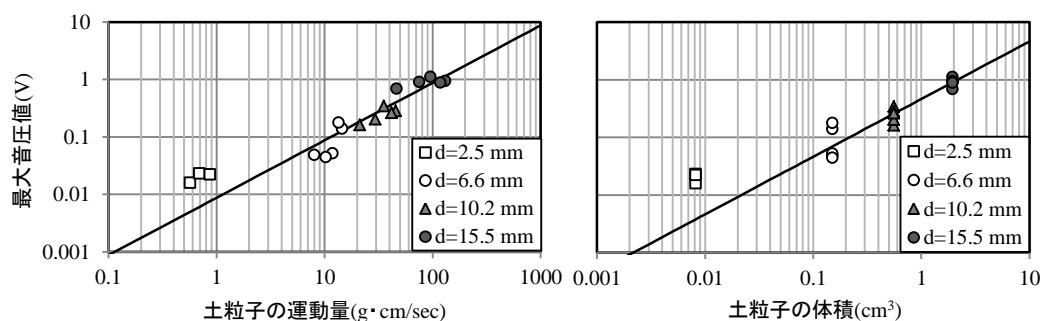


図 4.2.6 水路実験で求めた土粒子の体積・運動量と音響波形の最大値の関係

5) 横断方向のばらつきの影響

掃流砂は横断方向に大きなばらつきを有するため、河道の一部のみを計測している現行の手法では、場所によっては河道全体を代表していない可能性も考えられる。実際、姫川水系平川流域の源太郎堰堤では1つの断面で複数のハイドロフォンで計測した結果、掃流砂量が異なることが観測されている（図 2.2.2 参照）⁵⁾。

中谷ら（2010）は魚野川本川の大野原橋で流心部と右岸付近の 12.5m 離れた 2 箇所で観測ピットによる観測を行い横断方向の流砂量の分布を定量的に評価した（図 4.2.7）¹²⁾。その結果、5 分ごとに計測した逐次値はばらつきが大きく流心部と右岸部で相関はなかったものの、出水ごとで見た場合は両者に相関が見られ、回帰直線の傾きも 1 に近かった。さらに、ハイドロフォンによる計測値から求めた掃流砂量と砂防堰堤等の堆砂測量から求めた流砂量の比較からは掃流砂量がハイドロフォンにより良好に観測できていることが示唆されている（図 3.2.1 参照）¹³⁾。以上の結果から、1 出水上の期間を対象とした場合、ハイドロフォンによる観測は当該断面の流砂特性を表している可能性が考えられる。しかし、横断方向のばらつきの程度を定量的に評価した事例は少なく、今後はデータを蓄積し、横断方向の流砂のばらつきの実態の把握・評価手法の構築を進めていく必要がある。

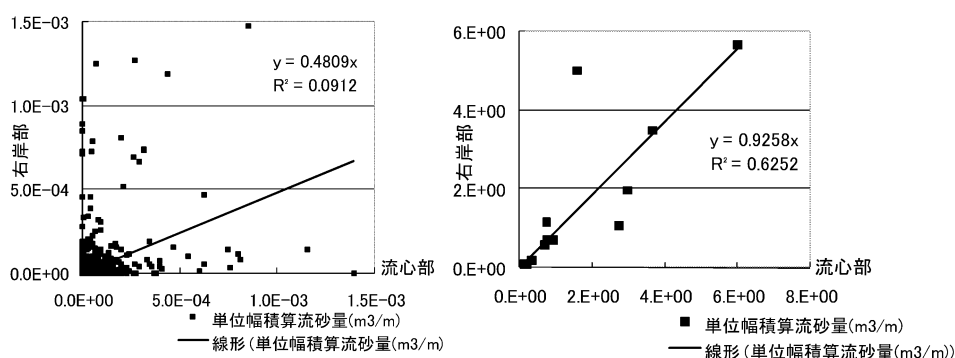


図 4.2.7 魚野川流域大野原橋における流心部と右岸側に設置された観測ピットから求めた流砂量の関係（左：逐次値（5 分間の積算値），右：出水ごとの積算値）¹²⁾

【参考文献】

- 1) 例えば、鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智（2010）：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，62(5)，18-26.
- 2) 例えば、内田太郎・吉村暢也・林真一郎・鶴田謙次・鈴木拓郎・長谷川裕治・蒲原潤一・水山高久（2015）：ハイドロフォンの衝突率に関する実験，砂防学会誌，67(5)，24-29.
- 3) 例えば、小田晃・長谷川祐治・水山高久・野中理伸・宮本邦明（2003）：水理模型実験におけるハイドロフォンを用いた流砂量計測（その 2）—粒径と感度の関係について—，平成 16 年度砂防学会研究発表会概要集，82-83.

- 4) 例えば, Goto, K., Itoh, T., Nagayama, T., Kasai, M. and Marutani, T. (2014) : Experimental and theoretical tools for estimating bedload transport using a Japanese pipe hydrophone , *International Journal of Erosion Control Engineering*, 7, 101-110.
- 5) 例えば, 判田乾一・地中浩・石川一栄・宮澤和久 (2013) : 姫川流域における土砂移動モニタリング, *砂防学会誌*, 66(2), 74-78.
- 6) 鈴木拓郎・水野秀明・小山内信智 (2010) : 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*, 62(5), 18-26.
- 7) 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 (2013) : 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*, 66(1), 4-14.
- 8) 蒲原潤一・内田太郎・田中健貴・吉村暢也・鶴田謙次 (2015) : ハイドフォンの衝突率・検出限界に関する水路実験, 平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集, B268-B269.
- 9) Kanno, T., Yoshida, K., Miyazawa, K. and Hida, Y. (2010) : Bedload detection with a pipe geophone: field experiments at the Gentaro Sabo Dam on the Hira river, *Int. J. Ero. Cont. Eng.*, 3, 126-129.
- 10) 光永健男・守谷武史・内田太郎・富田邦裕・叶正興 (2015) : 富士川砂防事務所管内における流砂量観測, *砂防学会誌*, 68(1), 83-87.
- 11) 田村圭司・内田太郎・森東哲郎・日野健・小菅尉多・木下篤彦 (2014) : 六甲山系における水文・流砂観測, *砂防学会誌*, 66(6), 82-86.
- 12) 中谷洋明・鶴田謙次・吉村 暢也 (2010) : 山地河川における掃流砂量の横断方向での変動特性に関する一考察, *砂防学会誌*, 63(3), 11-18.
- 13) 岡本敦・内田太郎・林真一郎・木下篤彦・水垣滋・吉村暢也・小菅尉多 (2012) : 山地流域における流砂観測データの収集及び解析, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, 176-177.

【参考】ピット掃流砂計測装置などを用いて計測した掃流砂量とマイクロフォンの計測値から経験的に掃流砂量を変換する手法における干渉・非衝突の影響について

マイクロフォンを用いた総流砂量の推定は、当初、計測された土粒子の衝突音を変換器により数段階で増幅させ、その音響波形の振幅が閾値を超える回数（パルス数）を計測し、ピット掃流砂計測装置などを用いて別途計測した掃流砂量とのキャリブレーションから得られた相関を用いる手法が主であった^{a)}。このパルス数を用いた方法はデータの取り扱いが容易であるなどの利点があるが、流砂量が多いときにはパルス数が減少し、パルス数と掃流砂量が正の相関関係でなくなってしまう課題があった。それに対し水山ら^{b)}により、流砂量の多い場合の計測手法として、音響波形の大きさもしくはその積分値とピット掃流砂計測装置などを用いて別途計測した掃流砂量との関係を用いて、掃流砂量を計測することを提案された。これらの別途求めた流砂量とマイクロフォンの計測値の相関性を見て、経験的な換算式から流砂量に変換する場合は、①の干渉の影響と②の非衝突の影響は2つの影響がかけ合わさった形で経験式中で評価されているため、別途①、②の影響を考慮する必要はない。

【参考文献】

- a) 例えば、水山高久・野中理伸・藤田正治（2002）：常願寺川津之浦下流砂防堰堤におけるマイクロフォンによる流砂観測，砂防学会誌，55(3)，56-59.
- b) 水山高久・松岡美和・野中理伸（2008）：流砂量の多い状態のマイクロフォンによる流砂計測（音圧データの取得），砂防学会誌，61(1)，35-38.