

ハイドロフォンによる粒径別流砂量算出法に関する一考察

国土交通省北陸地方整備局 松本砂防事務所 神野忠広, 吉田俊康, 春日裕次, 石田哲也
いであ株式会社 樋田祥久

1 はじめに 姫川水系左支川平川源太郎砂防堰堤では、平川流域の掃流砂量観測のためハイドロフォンと水位計を設置している。設置されたハイドロフォンは金属管に河床砂礫が衝突し、衝突音の振幅がある閾値を越えた回数をパルス数として計測する掃流砂量観測機器である。計測しているパルス数は衝突音をアンプで6段階に増幅（増幅率 1016, 256, 128, 64, 16, 4 倍）して出力されている。パルス数は従来の研究により掃流砂量を相対的に評価できることが知られており、流域の土砂動態の把握には有効な手段であると考えられている¹⁾。一方、衝突砂礫の粒径がわからないため、ある時間間隔にハイドロフォン上を通過した土砂量の推定を困難にしている。そこで、平成 20 年度に平川で実施された現地実験結果²⁾から、砂礫の運動エネルギーに対する増幅率ごとのパルス数の特性と流砂に対するハイドロフォンの検知率を明らかにし、ハイドロフォンの特性を利用した粒径別流砂量の算出法を考案した。さらに、洪水時の粒径別流砂量ハイドログラフを示し、洪水中にハイドロフォン上を通過した流砂粒度分布（計算結果）と堰堤直下に設置された観測ピットの堆砂粒度分布を比較することで検証した。

2 ハイドロフォンの特性 平成 20 年度に平川で実施された現地実験結果をパルス率と検知率について整理し、粒径別流砂量算出において必要なハイドロフォンの特性について記述する。

2.1 パルス率の特性 増幅率ごとのパルス数を増幅率

1016 倍のパルス数で割ることでパルス率 p_i とし、粒子 1 つの運動エネルギー e とパルス率 p_i との関係を見ると、粒子 1 つの運動エネルギー e とパルス率 p_i の間には高い相関関係がある（図 1）。この結果より、パルス率は衝突する粒子の運動エネルギーによって一意的に決まり、増幅率ごとに異なることが明らかとなった。この結果はパルス率から粒子の運動エネルギーを推定できることを示している。

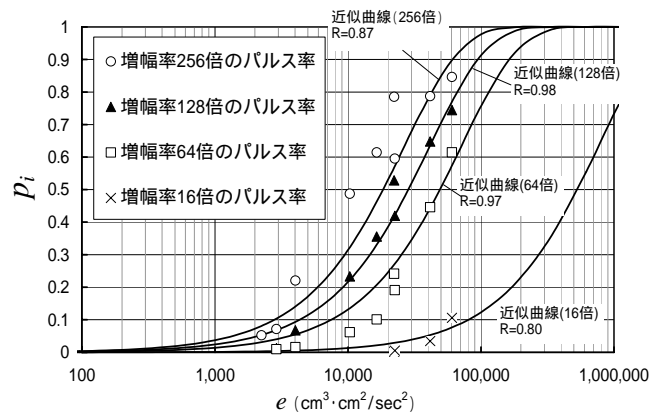


図 1 粒子 1 つの運動エネルギー e とパルス率 p_i の関係

ここに、粒子 1 つの運動エネルギーは $e = \frac{\pi d^3}{12} u_g^2$ 、 d は粒径、 u_g は芦田・道上式による粒子の推定速度³⁾、パルス率は $p_i = \text{増幅率 } i \text{ ごとのパルス数} / \text{増幅率 } 1016 \text{ 倍のパルス数}$ 、近似式は $p_i = 1 - \text{EXP}(ae)$ 、 a は係数で、増幅率 256 倍で -3.77×10^{-5} 、128 倍で -2.43×10^{-5} 、64 倍で -1.41×10^{-5} 、16 倍で -1.31×10^{-6} である。

2.2 検知率の特性 砂礫の跳躍によりハイドロフォン

が全ての流砂を検知しないことがある。最大のパルス数を検出する増幅率 1016 倍のパルス数を供給粒子個数で割ることで検知率とし、相対水深 (h/d) と検知率の関係を見ると、相対水深と検知率には高い相関がある（図 2）。この結果より、相対水深からハイドロフォンの検知率を推定できることが明らかとなった。すなわち、ハイドロフォンデータから算出した流砂量を検知率で割り戻すことにより、ハイドロフォン上を通過した粒径別流砂量を推定できることを示している。

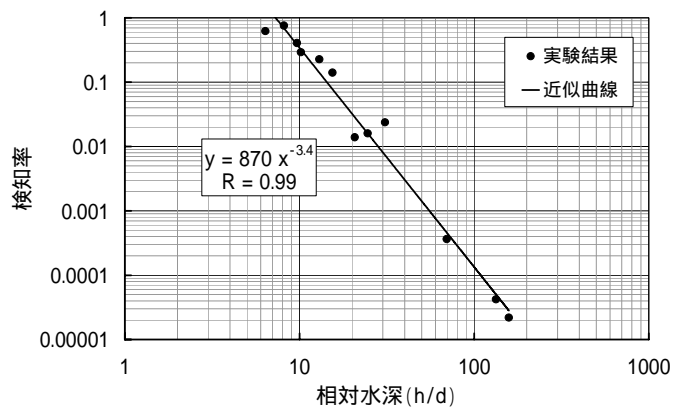


図 2 相対水深と検知率の関係

3 粒径別流砂量算出法 一定時間内にハイドロフォン上を通過する粒径別流砂量は観測された水深・パルス数を用いて図3のフローに示す手順で算出する。

手順：6段階の増幅率のうち、パルスが反応した増幅率の数より少ない数の粒径を設定する。手順：設定した粒径ごとの粒子速度を推定し³⁾、粒子速度から粒子1つの運動エネルギーを推定する。手順：図1に示した粒子1つの運動エネルギーと粒径別パルス率の近似式から粒径別パルス率を算出する。手順：式(1)の連立方程式を解くことで粒径別パルス数 $a_{(dn)}$ を算出する。これは粒径別の粒子個数に相当する。

$$\begin{cases} p_1 = a_{(d1)} \cdot p_{1(d1)} + a_{(d2)} \cdot p_{1(d2)} + \dots + a_{(dn)} \cdot p_{1(dn)} \\ p_2 = a_{(d1)} \cdot p_{2(d1)} + a_{(d2)} \cdot p_{2(d2)} + \dots + a_{(dn)} \cdot p_{2(dn)} \\ \vdots \\ p_i = a_{(d1)} \cdot p_{i(d1)} + a_{(d2)} \cdot p_{i(d2)} + \dots + a_{(dn)} \cdot p_{i(dn)} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 p_i は増幅率 i のパルス率、 $a_{(dn)}$ は粒径 d_n の増幅率 1016 倍における粒径別パルス数、 $p_{i(dn)}$ は粒径 d_n の近似式より求めた増幅率 i のパルス率である。

手順：図2に示した相対水深と検知率の近似式からハイドロフォン検知率を算出する。手順：粒径別パルス数(=粒径別粒子個数)からハイドロフォンが検知した粒径別流砂量を算出し、検知率で割ることでハイドロフォン上を通過する粒径別流砂量を算出する。

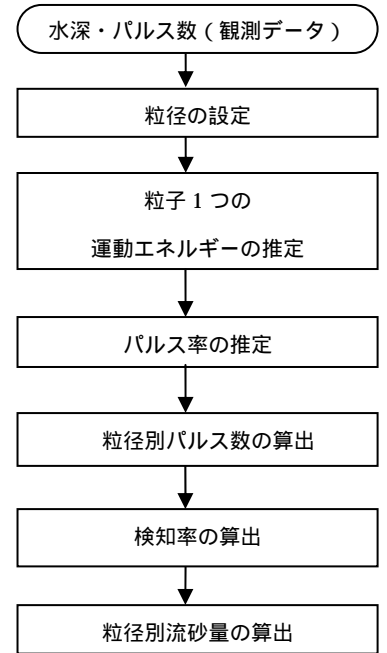


図3 フロー

4 計算結果および検証結果 平川源太郎砂防堰堤において、ハイドロフォンが顕著な反応を示した平成21年7月18日の出水について粒径別流砂量を推定した。粒径区分は小礫・中礫・大礫として9.5, 19, 37.5mmの3粒径を設定した。設定した粒径は現地実験²⁾において顕著な反応があった粒径を参考にしている。なお、計算過程において流砂量がマイナスとなる時点は除去している。推定された粒径別流砂量ハイドログラフを示す(図4)。また、観測ピットの堆砂の粒度分布と計算による流砂の粒度分布の比較を示す(図5)。計算結果より、観測ピットの堆砂の粒度分布と計算による流砂の粒度分布は概ね一致している。

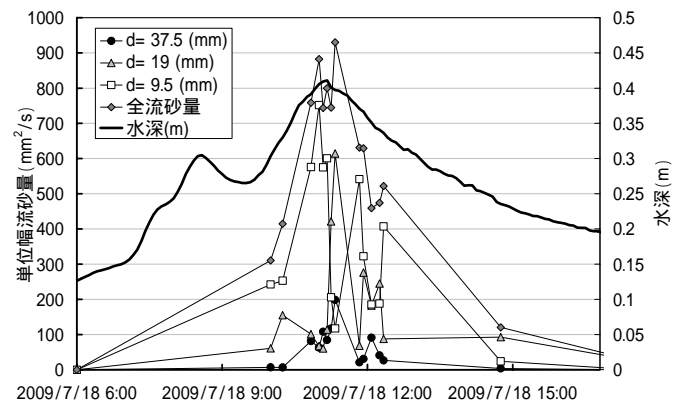


図4 粒径別流砂量ハイドログラフ計算結果

5 おわりに 本研究の成果として、パルス率から衝突粒子の運動エネルギーが推定可能であること、ハイドロフォンの検知率が h/d で概ね評価できること、粒径別流砂量の算出が可能であることが明らかとなった。今後は、算出した粒径別流砂量の検証および多粒径での計算を行う必要がある。

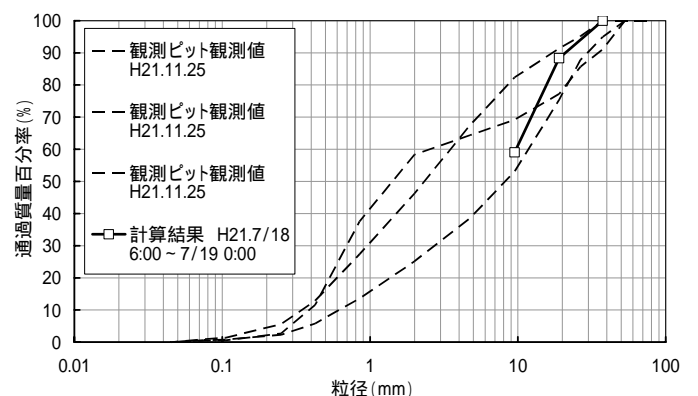


図5 流砂粒度分布(計算結果)と堆砂粒度分布の比較

6 謝辞 流砂量とハイドロフォンパルスの調査・解析

にあたっては、京都大学大学院農学研究科 水山高久教授に助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

7 参考文献 1)水山高久ら：音響法(ハイドロフォン)による流砂量の連続計測，砂防学会誌 vol.49, No.4, pp.34-37, 1996

2)神野忠広ら：平川・源太郎堰堤に設置したハイドロフォンの基本特性に関する現地実験，砂防学会研究発表会概要集 No.52, pp.70-71, 2009 3)水理公式集 H11, p.163