

1. はじめに

ハイドロフォンシステムは、実河川での流砂量計測を行うために、広く利用されている。従来のシステムは、ハイドロフォンに衝突した粒子の個数をパルス数に変換し、ピット掃流砂計測装置とのキャリブレーションにより流砂量を推定するものであった¹⁾。近年は音響信号を積分する解析手法²⁾や、信号が振幅閾値を越えた時間を代表値に変換する手法³⁾によりハイドロフォンに衝突した粒子に対する代表値への変換率が評価できるようになり、計測精度が飛躍的に向上した。しかしながら、本システムの計測対象である掃流砂の運動形態からすると、たとえ河道全幅にハイドロフォンを設置しても衝突しない粒子が必ず含まれるため、さらに精度良く計測するには衝突率の検討が必要である。本研究では、先の研究により提案した解析手法を用いてハイドロフォンへの粒子の衝突率を考慮した流砂量の推定手法を検討した。

2. 解析手法の概要

図-1のように流砂量が多い状態でもパルスが検出されるように、1パルス中に閾値を越える時間に着目し、その持続時間を考慮したパルス数への変換および流砂量の推定式を下記のように提案した。

$$P(R_k) = \frac{\sum_{i=1}^{n(R_k)} W_i(R_k)}{W_s(R_k)} \cdots (1), \quad Q_s = \alpha \cdot P(R_k) \cdot \frac{\pi \cdot d_i^3}{6} \cdots (2), \quad R_k = f(d_i) \cdots (3)$$

ここに、 $P(R_k)$ はパルス持続時間を考慮した閾値 R_k に対するパルス数、 $W_i(R_k)$ は計測時間内における閾値 R_k に対するパルス持続時間、 $W_s(R_k)$ は個別の粒子が衝突した時の閾値 R_k に対するパルス持続時間の代表値、 Q_s は流砂量、 α はアンプの増幅率による比例定数、 d_i は閾値 R_k に対応した粒径である。また、振幅値が衝突粒子の運動量の0.7乗に比例すること、すなわち、流速が一定であれば粒径の2.1乗に比例することがわかっている⁴⁾。そこでアンプの増幅率に対応する閾値を粒径値に変換し、それに対応する時間の割合と比例するものとして衝突した粒子群の粒径を求めると、流砂量が算出可能となる。なお、本解析では全てのケースで平均流速を与えているが、粒径により移動速度が異なることが予想される。しかし、仮に速度が2-3倍程度異なっても、アンプの増幅率に対応した粒径値が異なるだけで、個別の粒子から得られる比例定数 α の数値が変化するため、流砂量の算出結果は1.1-1.2倍程度の違いにしかならず、本解析ではその違いを無視した。

3. ハイドロフォンアンプの増幅率の選定

同一の水理条件下で個別衝突と集団衝突の実験を実施し、ハイドロフォンへの粒子の衝突率の確認を行った。なお本解析では衝突した粒子は全て流砂量に換算できると考えて、衝突率は実測値の流砂量に対する計算値とした。実験は、流量と勾配、粒径を一定にして、上流端に設置したホッパーにより流砂量(粒子数)のみを変えた。粒子数が少ない条件は試行を重ねた。図-1は粒子数と流砂量の衝突率の関係をアンプの増幅率ごとに示したものである。アンプは6段階あるが検出されたのがch1-4の4つであった。図中の実線は各アンプでの衝突率の平均値である。この図によると、粒子数が少ないとアンプの増幅率に関係なく衝突率が0.6程度になることがわかる。また、増幅率ごとに確認すると最も倍率が小さいch1は、衝突率のばらつきが大きく、粒子数が増えると衝突率が極端に低くなる場合がある。これは、音響信号の位相がずれて重なり極大値が小さくなったためである。増幅率が最も大きいch4も同様にばら

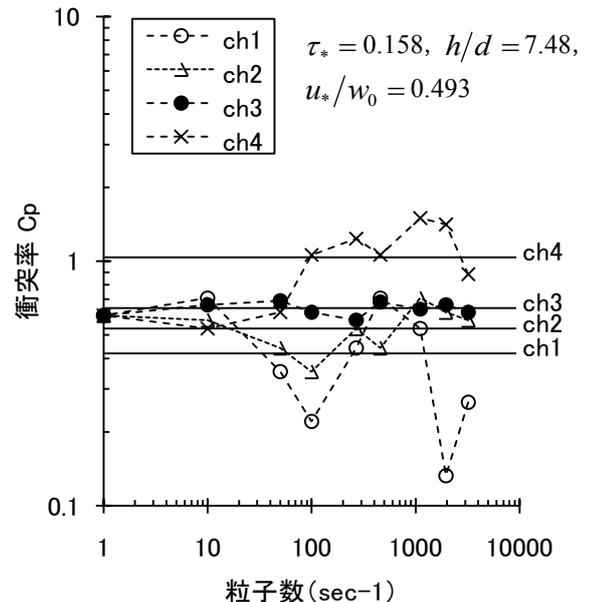


図-1 粒子数に対する衝突率

つきが大きく、衝突率が1を越える条件がある。これは、粒子が衝突したときの信号には残響音が含まれるため、ある数以上の粒子が衝突すると信号が出力され続けて、高倍率のアンプの増幅率、すなわち低い閾値上では飽和状態になっているからである。ch2, 3 は粒子数に関係なく衝突率がほぼ一定になることがわかる。本解析では個別衝突実験の衝突率に近い ch3 を用いることとした。なお、粒径により衝突率が一定になる増幅率は変化するが、上記の理由より低倍率と高倍率を外して選定すれば良いと考えられる。

4. 流砂量の推定手法

掃流力の増加は、粒子の運動を活発化にさせ、粒子の運動形態を滑動・転動から小跳躍へと変質させる。ハイドロフォンへの粒子の衝突率は、小跳躍のような軌跡の影響を大きく受けると考えて、図-2 のように無次元掃流力に対する衝突率の関係を確認した。掃流力が小さい場合には、河床との衝突により個々の跳躍の規模は異なるものの全体的に見るとその規模は小さい。これに対して、掃流力が増大すると、河床面から大きく離れた高さまで跳ね上がることもある。このことから、ハイドロフォンへの粒子の衝突率は無次元掃流力の関数で表現できる。なお、この関係からすると $\tau_* = 0.5$ 以上の領域では、衝突率が 0.1 以下となるため、計測誤差が大きくなることが予想される。この課題を解消するには、複数のハイドロフォンを設置するなど、衝突粒子の絶対数を増やす工夫が必要である。また、図-3 のように相対水深で衝突率との関係を整理すると、図中の▲のように相対水深が大きい領域でも、無次元掃流力が小さいと、相対水深に関係なく粒子の跳ね上がる高さが低くなり、さらに滑動・転動の割合が増えるため衝突率はむしろ大きくなる。ここから求めた衝突率を式 (2) に加えると流砂量の推定式は式 (4) のように書き換えることができる。

$$Q_s = \alpha \cdot P(R_k) \cdot \frac{\pi \cdot d_i^3}{6} / C_p \dots (4), \quad C_p = f(\tau_*) \dots (5)$$

ここに、 C_p はハイドロフォンへの粒子の衝突率であり、無次元掃流力の関数である。なお、ハイドロフォンの設置が衝突率などの結果に関係する場合がある。

5. おわりに

ハイドロフォンへの粒子の衝突率を考慮した流砂量の推定手法の検討を行い、衝突率は無次元掃流力の関数で表すことができることを示した。しかしながら、その関係から掃流力が大きくなると衝突率が小さくなるため（例えば、 $\tau_* = 0.5$ 以上では衝突率が 0.1 以下）、その領域では計測誤差が大きくなる。この課題を解消するには、ハイドロフォンを複数台設置して衝突粒子の絶対数を増やすことが有効であるが、どの位置、どの範囲に設置するのが良いのかは今後の課題としたい。

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, p34-37, 1996
- 2) 鈴木拓郎ら：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, p. 18-26, 2010
- 3) 長谷川祐治ら：ハイドロフォンによる流砂量計測に関する研究(2)，平成 22 年度砂防学会研究発表会，p. 288-289, 2010
- 4) 長谷川祐治ら：ハイドロフォンによる流砂量計測に関する研究，平成 21 年度砂防学会研究発表会，p. 282-283, 2009

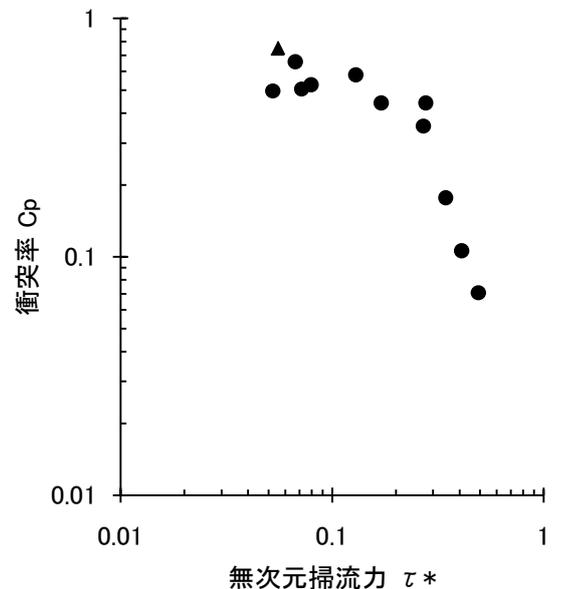


図-2 無次元掃流力に対する衝突率

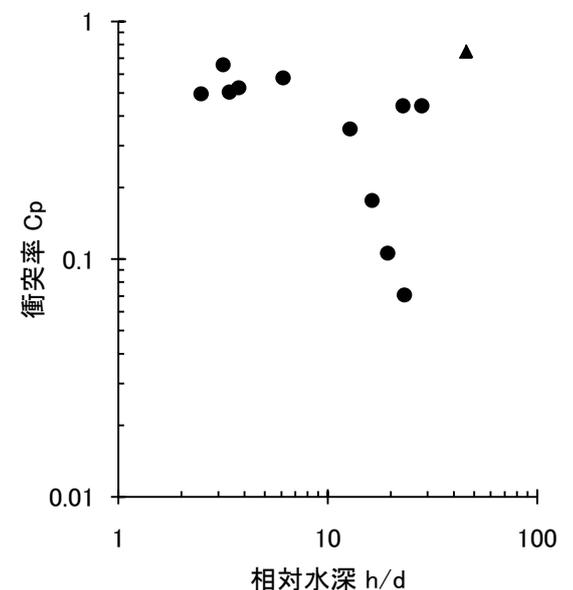


図-3 相対水深に対する衝突率