

ハイドロフォンを用いた流砂量計測における流砂量の推定則に関する研究

アジア航測株式会社

○瀬田尊紀

筑波大学大学院生命環境科学研究科

宮本邦明

筑波大学大学院生命環境科学研究科

西田顕郎

1. はじめに

流域一貫した土砂管理のため流域内での土砂動態を把握することが必要となっている。そのため、流砂観測が数多く試みられるようになってきている。それらのなかでも装置の簡便さと連続自動観測が可能であることからハイドロフォンを用いた観測の試みが数多くなされている<sup>1)2)</sup>。しかしながら、解析法については、従来からいくつかの提案<sup>3)4)</sup>がなされているものの実際には経験に頼っているのが実情である。本研究では宮本ら<sup>3)</sup>により提案されている推定方法について検討すべく流砂運動に関する簡易な数値シミュレーションモデルを作成し実施した。その結果、宮本らの考え方に従って粒径別の流砂量の推定の可能性が十分高いという結果が得られたので報告する。

2. 既往研究

ハイドロフォンと流砂の衝突の際に生じる音は、実験的に、その円周方向モードの振幅が、衝突時に流砂がもっている運動量と比例関係にあることが知られている。一方、掃流砂の運動はある統計的な性質を持っていることから衝突時の円周方向のモードの振幅にも何らかの統計的な性質があることが期待される。そこで、宮本らは流砂の粒径階毎の粒子個数（ハイドロフォン地点での通過個数）ベクトル  $\vec{n}$  と振幅階毎のパルスカウント数ベクトル  $\vec{N}$  の間には、次式が成り立つであろうことを提案している。

$$\vec{N} = A\vec{n} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 $A$  は  $\vec{n}$  から  $\vec{N}$  への変換行列で、その列ベクトルはある粒径の粒子が多数回衝突したときに生じる振幅階毎のパルスカウント数ベクトルである。また、行列  $A$  の各成分は摩擦速度や河床の粗度の関数と考えられる。行列  $A$  が定まれば、式(1)の逆を求めることで、振幅階毎のパルス数ベクトルから粒径階毎の流砂の個数ベクトルが求められる。

3. 流砂運動の数値シミュレーション

式(1)に基づいて流砂量を求めるには行列  $A$  は逆が存在する必要がある。そこで、流砂の運動に関する数値シミュレーションを実施してその性質を調べる。ハイドロフォンは流れに垂直に置かれるので粒子の運動シミュレーションも簡単のため1次元で行う。河床は粒子を敷き詰めて表現することも可能であるが、これには河床形状を十分細かく表現する必要がある。そこで、ここではより簡単に流砂の河床粒子との衝突を確率的に取り扱うことでモデル化する。

粒子の運動方程式は、揚力、バセット項を無視すると、次式で表される。

$$\rho(\sigma + C_M)V \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \rho(\sigma - 1)V\vec{g} + \frac{1}{2}\rho C_D S |\vec{u}_f - \vec{u}_p|(\vec{u}_f - \vec{u}_p) \quad \dots(2)$$

ここに、 $\rho$  は水の質量密度、 $\sigma$  は砂礫の質量密度、 $C_M$  は仮想質量係数、 $V$  は粒子の体積、 $\vec{u}_p$  は粒子の速度、 $\vec{g}$  は重力加速度、 $C_D$  は抗力係数、 $S$  は粒子の流れへの投影断面積、 $\vec{u}_f$  は粒子の重心位置での流速である。座標系は図-1のように設定し、理論河床の位置は河床を構成する粒子頂部から粒径を  $d$  として  $0.2d$  下方に設定し、流速分布は  $z=ks$  より上方は対数則で下方は直線分布で与える。河床と粒子との衝突位置の分布は図-2に示すように河床粒子との衝突位置の粒子の運動方向に垂直な面への射影位置の分布が等分布となるとして投影位置を一様乱数により発生させて衝突位置を定めている。流砂の河床粒子との衝突に関する力学的な条件として、

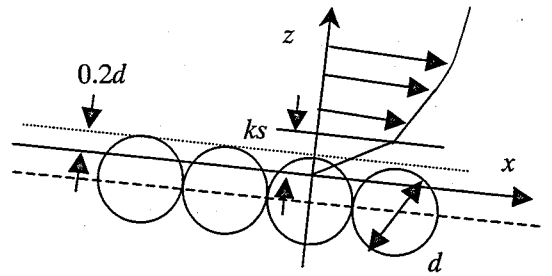


図-1 座標系と理論河床、流速分布

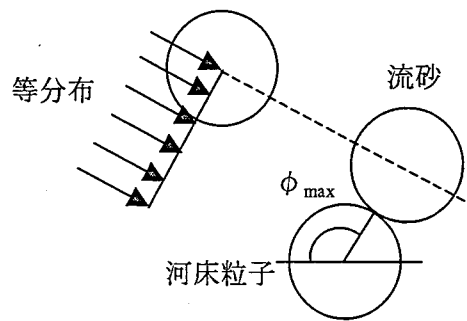


図-2 河床粒子との衝突の確率モデル

粒子間に固体摩擦は生じないものとし、反発係数のみ考慮している。ハイドロフォンは流砂の運動の追跡開始地点（流砂の運動の初期条件を与える地点）から、流砂が河床との間に十分な回数（衝突）の後（到達）するよう一定の距離を置く。

#### 4. 計算条件および結果

計算に用いた河床材料の粒径は 0.4cm、流砂の粒径は 0.4cm、0.3cm、0.2cm、0.1cm、0.05cm の 5 種類としている。水深、勾配、摩擦速度、およびハイドロフォンの半径を表-1 に示す。流砂運動に関する初期条件は、位置については河床粒子の頂部に接することとし、速度に対しては粗度高さでの流速に等しいとして摩擦速度の 8.5 倍を与えている。流砂運動の初期条件を与える地点からハイドロフォンの中心までの距離は河床粒子の粒径の 100 倍の 40cm としている。流砂がハイドロフォンに衝突する際、その運動の方向は必ずしもハイドロフォンの中心に向かってはいるわけではない。円周方向のモードの振幅と比例関係にある衝突時の粒子が持つ運動量とは粒子の運動がハイドロフォンの中心を通る、すなわち速度ベクトル・運動量ベクトルがハイドロフォンの中心を通るときの運動量の大きさを意味するから、ハイドロフォンへの衝突時の粒子の持つ運動量のハイドロフォンの中心へ向かう方向成分が知らなければならない運動量である。図-3 は粒子のハイドロフォンへの衝突時の粒子速度のハイドロフォン中心へ向かう方向成分の頻度分布を示している。粒径が大きいほど衝突速度のハイドロフォン中心へ向かう方向成分が大きくなっており、衝突速度そのものが大きくなっていることがうかがい知れる。図-4 は衝突時の粒子が持つ運動量のハイドロフォンの中心へ向かう方向成分の頻度分布を示したものである。図-3 の速度分布では粒径の分離が十分ではないが、図-4 ではこの程度の粒径階であれば重複が見られない。このことは、ハイドロフォンによる流砂量観測を行う場合粒径が重要なファクターであることを示している。これまで、経験的に洪水の前後で流砂量と振幅パルス分布との間の関係に変化が見られることが多く報告されているが、ここでの結果はその原因として流砂の流度分布の変化があることを示唆している。図-4 より粒径が倍になると振幅がおよそ 1 オーダー大きくなることが想定され、粒径階も実用的な間隔で設定することが可能であることを示唆している。

表 4-1 計算条件

水深(cm)	勾配	摩擦速度(cm/s)	円管の半径(cm)
7.96	1/300	5.09	1
5.97		4.41	
3.98		3.59	

図-3 は粒子のハイドロフォンへの衝突時の粒子速度のハイドロフォン中心へ向かう方向成分の頻度分布を示している。粒径が大きいほど衝突速度のハイドロフォン中心へ向かう方向成分が大きくなっており、衝突速度そのものが大きくなっていることがうかがい知れる。図-4 は衝突時の粒子が持つ運動量のハイドロフォンの中心へ向かう方向成分の頻度分布を示したものである。図-3 の速度分布では粒径の分離が十分ではないが、図-4 ではこの程度の粒径階であれば重複が見られない。このことは、ハイドロフォンによる流砂量観測を行う場合粒径が重要なファクターであることを示している。これまで、経験的に洪水の前後で流砂量と振幅パルス分布との間の関係に変化が見られることが多く報告されているが、ここでの結果はその原因として流砂の流度分布の変化があることを示唆している。図-4 より粒径が倍になると振幅がおよそ 1 オーダー大きくなることが想定され、粒径階も実用的な間隔で設定することが可能であることを示唆している。

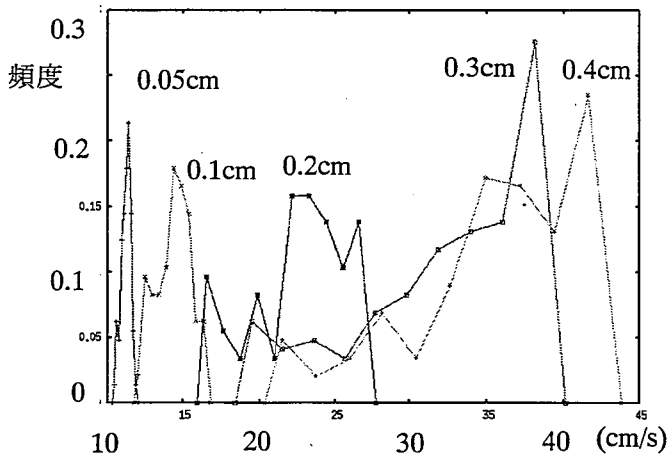


図-3 粒子の衝突速度のハイドロフォン中心に向かう方向成分

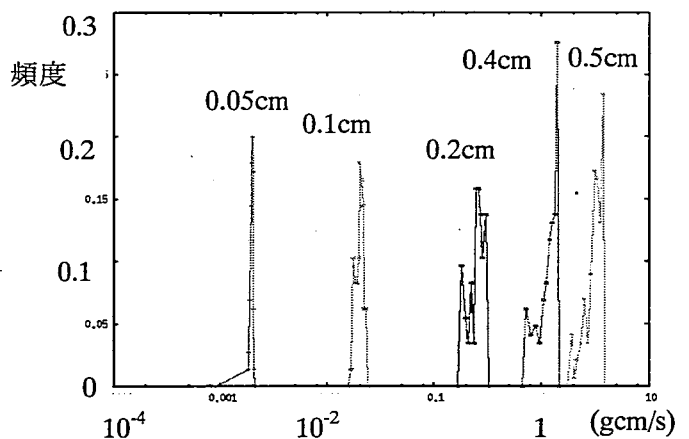


図-4 粒子の衝突速度のハイドロフォン中心に向かう方向成分

#### 4. おわりに

簡易な数値シミュレーション手法を用いてハイドロフォンを用いた流砂量の推定法について基礎的な知見が得られた。この結果を実験や現場観測に適用し観測手法としてとりまとめた。

- 1) 星野和彦・酒井哲也・水山高久・里深好文・小杉賢一朗・山下伸太郎・佐光洋一・野中理伸 (2004) : 流砂等計測システム (六甲住吉型) と観測事例, 砂防学会誌, vol.56, No6, pp.27-32、
- 2) 水山高久・里深好文 (2003) : ピット掃流砂計測装置のハイドロフォンのキャリブレーションへの適応, 砂防学会誌, vol.56, No3, pp.55-56、
- 3) 栗原淳一・宮本邦明 (1992) : 音響を利用した流砂量計測装置について, 新砂防, vol44, No5, pp. 26-31、
- 4) 澤井健二 (1998) : 衝突音による粒径別流砂量測定法, 平成 8 年度砂防学会研究発表会講演概要集, pp.261-262