

現地における流砂量の自動計測

建設省立山砂防工事事務所 ○西井 洋史
(財)砂防・地すべり技術センター 宮本 邦明
(財)砂防・地すべり技術センター 高濱淳一郎

1. はじめに 本検討は洪水時における流砂現象を解明するため、山地河道における流砂量を測定する技術の開発・検討を行うことを目的として昭和60年度から開始された。平成元年度まで手法の検討、及び室内実験等を行い、それらの結果を基に平成2年度に常願寺川水系人津谷に現地観測ステーションを設置し、平成3年度より計測を開始した。観測ステーションでは礫の運動が活発なサルテーションを対象とした間接法（音響法）を用いて流砂量を計測している。本報では主にこの計測手法について説明する。また、今年度、礫の移動限界付近の現象ではあるが、直接採取による流砂量が得られているので、音響法のデータとの比較を行っている。

2. 現地観測ステーションの概要 本流砂量測定装置は人津谷富山県治山3号ダム地点に設置されており以下の2つの方法を用いて流砂量を測定している。

一つはダム天端を通過する流砂を水と分離してバケットに直接採取し、その重量を測定することで流砂量を測定する方法である（これを直接法と呼ぶ）。もう一つは次節で説明する間接法（音響法）によって測定する方法である。本システムは間接法による流砂量測定を主眼としている。直接・間接法による流砂量の他に水理量（水位、流速）、及び雨量を測定している。

3. 計測手法について（音響メディアによるPassiveな方法；間接法（音響法）の原理と信号処理）

3.1 間接法（音響法）の原理 以下に流砂量を測定するための間接法を示す。図-1の左端に示すように、適当な径の金属パイプ（パイプセンサー）の中に小型マイクロフォンを入れて、両端を吸音材で封じる。このパイプを約半分程河床に埋めて、このパイプに水流や流砂が当たるときの音を解析することによって流砂量を測定しようとするものである。

この方法は流砂がパイプをたたく時に発する音の違いから、流砂の状態を推定するわけであるが、この場合、物理現象から理論的に推定則を演繹することは難しいため、実験等によって推定則を検討してきている。

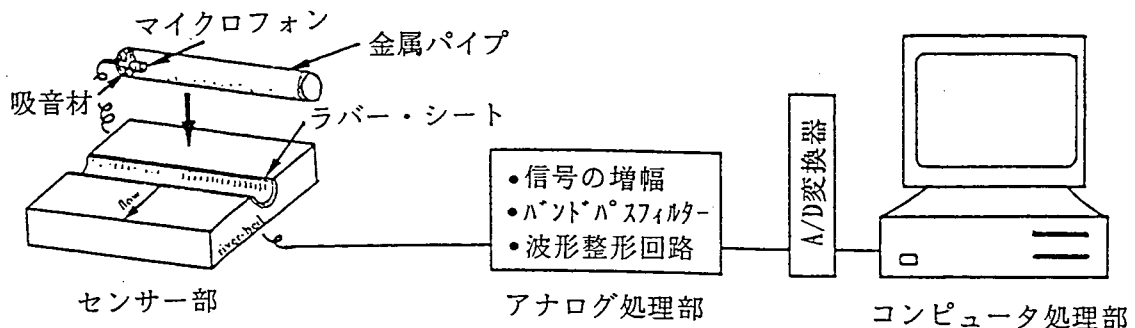


図-1 間接法（音響法）による流砂量計測装置の概念図

3.2計測及び処理の流れ 間接法による流砂量計測

システムの概念図を図-1に示す。システムは流砂の衝突を音響信号として採取するセンサー部、音響信号をアナログ処理するアナログ回路部、そしてデジタル信号に変換後、流砂量を推定するコンピュータ処理部から構成される。センサー部は両端固定の鉄パイプを利用し、パイプ内の片端にマイクロフォンを封じ込めたものである。センサーは流砂の堆積や河床形状の影響を受けないように固定河床に設置される。信号応答アナログ処理部は信号の増幅、減衰、特定周波数のみを通過させるバンドパスフィルターと波形整形回路からなる。コンピュータ処理部は、アナログ信号をデジタル信号に変換する装置(A/D変換器)と衝突の検出や流砂量の推定を行う各種のプログラムで構成される。

3.3室内実験による成果 碟の衝突時における音響信号に対するスペクトル解析の結果から図-2、3に示すようなスペクトル分布が得られている。これらの中で卓越したスペクトルは、次式で定義される基本周波数をもつ軸方向(周波数 f_z)、円周方向(f_{10})、径方向(f_{01})への共振信号である。

$$f_z = c/2l$$

$$f_{10} = 0.298c/a$$

$$f_{01} = 0.610c/a$$

ここに、 l はパイプの長さ、 a はパイプの内半径、 c は音速である。図中いくつかのスペクトルが観測されるのは、基本周波数の倍音信号である。

一方、パイプ内の音響エネルギー密度は ϵ は次式で表される。

$$\epsilon = \epsilon_0 \exp(-13.6/T)$$

ここに、 ϵ_0 は初期音響エネルギー密度を表し、衝突波形のピーク値を示す。 T は残響時間と呼ばれるもので、 $T=0.16V/(k \cdot S)$ と表される。ここに、 V は音響空間の体積、 S はその表面積、そして k は吸音率を示す。このことより本センサーから得られる音響信号は、音響信号の属性に依存することがわかり、特性を任意に決定できることが解明されている。

次に、空中において自由落下に近い状態で鉄球をセンサーに衝突させ、各信号のピーク値(ϵ_0)が鉄球の質量および衝突速度との関連で調べられている。この実験から得られた特徴を以下に示す。

(1)軸方向の信号特性

(a)信号の出力は碟の衝突位置に関係し、マイクロフォンより遠方になるほど小さくなる。

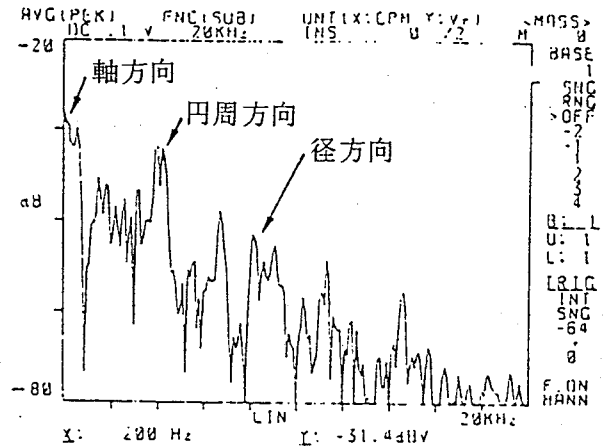


図-2 大きな碟の衝突信号のスペクトル分布

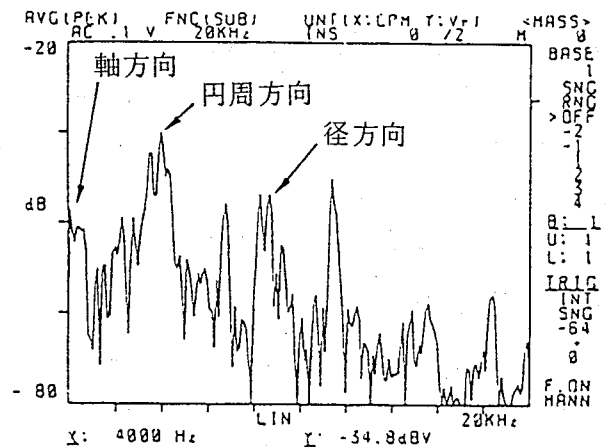


図-3 小さな碟の衝突信号のスペクトル分布

(b)小さな礫に反応しにくく大きな礫に反応する。

図-2のスペクトル分布でも軸方向のパワースペクトルが大きく観測されている。

(c)周波数が低域である。

(2)円周方向の信号特性

(a)信号の出力は礫の衝突位置に左右されず一定している。

(b)小さな礫を検知する。図-3のスペクトル分布でも円周方向のパワースペクトルが大きく観測されている。

(c)周波数が中域である。

(3)径方向の信号特性

(a)信号が小さい。(b)小さな礫を検知する。(c)周波数が高域である。

スペクトル解析を中心とする理想的な条件下での実験から、円周方向の信号特性の良さが確認されている。また、軸方向の信号は円周方向の信号と対照的な性質を示し、さらに音響エネルギーが大きいため円周方向の信号に干渉することがわかっている。そのため、両端に吸音材を詰めて軸方向の信号を減衰することにした。

一方ピーク値と鉄球の質量および速度との関連ではいずれの信号も図-4に示すような運動量との相関が得られている。

以上の解析結果から、音響法では円周方向の信号を抽出して、そのピーク値を処理する方式が有効であると考えられた。

3.4 現地への適用 現地ではダム天端直上流に2本のパイプセンサーを設置し、前項の信号特性に基づき、現地への適用性の検討の結果、水路実験により得られた推定則を適用するものとし、あるレベル以上のピーク数（カウンター値）を計数し流砂量を推定するものとした。以上よりレベルを5段階に設定し、計測を行っている。実験によって得られた各レベルのカウンター値による流砂量の推定式は以下のようなものである。

$$\begin{aligned} \text{レベル1} : Q_s &= 1.8 \cdot 10^{-2} N & \text{レベル2} : Q_s &= 0.5 + 2.16 \cdot 10^{-2} N & \text{レベル3} : Q_s &= 0.75 + 3.31 \cdot 10^{-2} N \\ \text{レベル4} : Q_s &= 1.8 + 4.35 \cdot 10^{-2} N & \text{レベル5} : Q_s &= 1.2 + 8.45 \cdot 10^{-2} N \end{aligned}$$

ここに、 Q_s は単位幅流砂量（kg/m/min.）、 N はパイプ1mあたり1分間のカウント数である。

4. 計測データ 今年度は8月21日から28日にかけて比較的長期にわたる出水があった。この期間の各降雨の最大雨量強度は10～40mm/hour程度で、間接法のカウンターデータはレベル1で約 $10^{-1} \sim 10^3$ 回/m/min.程度であった。図-5に上流側パイプセンサーのレベル1のカウンター値と直接法による流砂量との関係を示す。今回の出水時の単位幅流砂量は概ね $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}/\text{min.}$ であった。この時の水理量から出水時の無次元掃流力を計算すると約 $3 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$ 程度であり、限界掃流力（約 5×10^{-2} ）以下あるいはその近傍の領域に相当する。土砂水理学では限界掃流力以下では流砂量を見捨てる、また、水路実験で限界掃流力近傍の流砂量を測定すると、かなりのばらつきをもつことが分かっている。図-6に

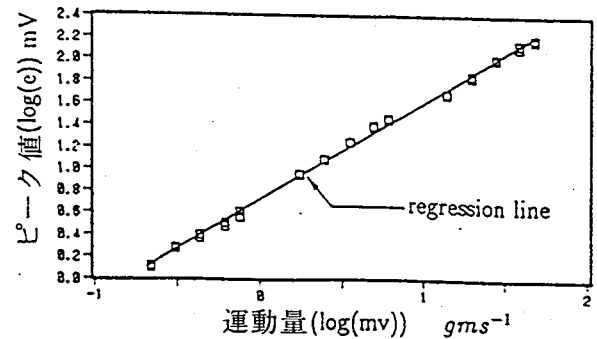


図-4 信号のピーク値と運動量との関係

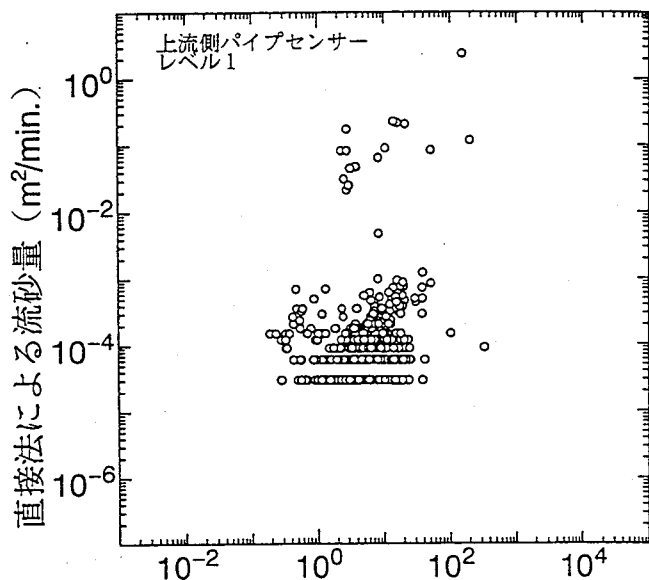


図-5 カウンター値 (N回/min./m)
間接法のカウンター値と直接法による流砂量

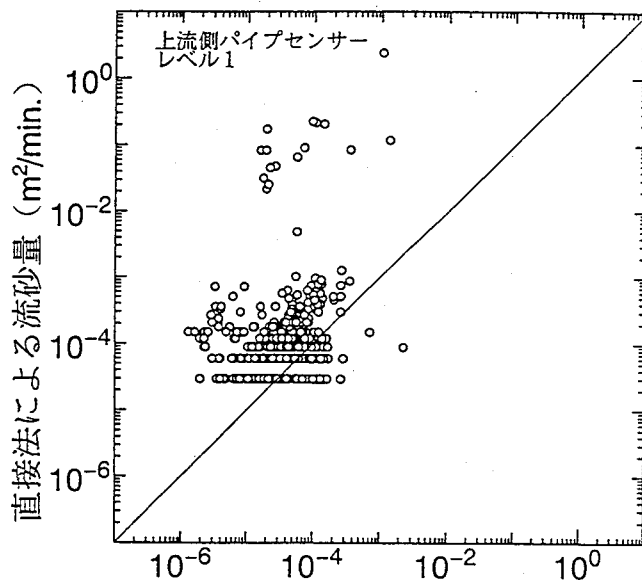


図-6 間接法による流砂量 (m²/min.)
間接法による流砂量と直接法による流砂量

上流側パイプセンサーのレベル1のカウンター値による推定流砂量と直接法による流砂量を示す。直接法による流砂量と間接法による推定流砂量には1オーダーから2オーダー程度の差が見られる。しかし、前述したように今回の現象が限界掃流力近傍の現象であるので、単純に比較することは難しい。また、間接法は前節に記したように礫の衝突音から流砂量を推定する方法で、礫の運動が活発なサルテーションを対象としている。したがって、限界掃流力近傍の小規模な現象、すなわち礫の滑動、転動などは基本的に対象としていない。したがって、このデータだけから流砂量の推定則の検討を行うには無理があると思われる。

図-7に8月21日の出水時における上流側パイプセンサーによる推定流砂量と直接法による流砂量の時系列変化を示す。両者の時系列変化をみるとレベル1のカウント数によって流砂現象を検知できているようである。

5. おわりに 今後、間接法による定量的な流砂量推定の検討を進めていくためには、より大きな規模の出水時のデータが必要である。

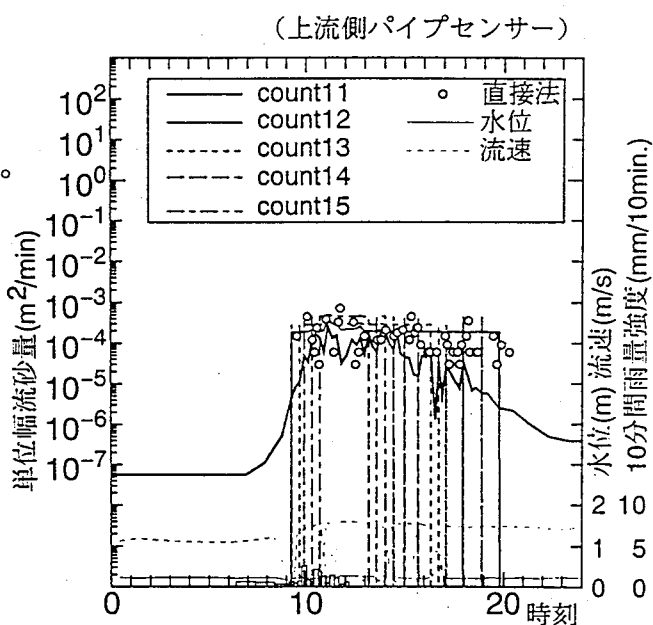


図-7 1993年8月21日のカウンター値による流砂量と直接法による流砂量と雨量、水理量