

## 流砂の衝突音を利用した掃流砂測定法に関する研究

北海道開発土木研究所 正会員 ○桑村 貴志  
北海道大学大学院 外山 淳

### 1. 目的

河床近くを転がりながら通過する掃流砂の観測は、流水の圧力や河床の形状を大きく受けるため直接採取して計測することは困難な状況にある。そのため、掃流砂が移動する際に発生する音から掃流砂及び粒径を計測する技術の研究を行っている。本研究では発生音の音響波形の零交叉回数とパワーを用い、それらの分布形状を正規分布または混合正規分布に仮定して解析を行う。

### 2. 基礎実験

水路長 30m のコンクリート製水路により掃流砂音圧実験を行った。実験では水路の上流端から石を投入し、転がりながら掃流された石が水路床に設置したステンレス板に衝突する音を計測した。実験で流下させた材料は砂利を粒径別に分級したもので、単一粒径材料を 6 種類、それらの材料を 2 種類または 3 種類使用して混合した混合粒径材料を計 5 種類である。掃流力の状態を変化させるために実験時の流量を 900L/s, 200L/s の 2 ケースとした。流砂量と音響の関係性を調べるために単一粒径は濃度（流砂量）を 100, 500, 1000, 5000mg/L の 4 ケース、混合粒径では 100, 500, 1000mg/L の 3 ケースにて実験を行った。

### 3. 発生音の解析

解析には流砂の衝突により発生した音響波形の零交叉回数とパワーを用いている。零交叉回数  $z$  は 1 分析区間で波形が時間軸と交差した回数である。パワー  $p$  は振幅値の 2 乗和の対数をとった値である。フレームの開始時刻を 1, フレーム長を  $T$ , 時刻  $t$  における振幅を  $x_t$  としたとき,  $z, p$  は

$$z = \sum_{t=1}^{T-1} \delta(t) \quad , \quad \delta(t) = \begin{cases} 1 & (x_t \cdot x_{t+1} < 0) \\ 1/2 & (x_t \cdot x_{t+1} = 0) \\ 0 & (x_t \cdot x_{t+1} > 0) \end{cases}$$

$$p = \log \sum_{t=1}^T x_t^2$$

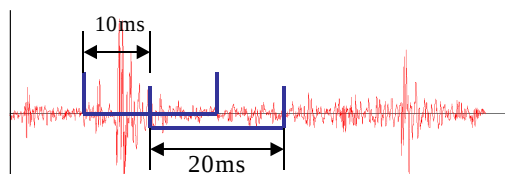


図-1 フレーム長

と定義する。また、図-1 のように、分析区間を 20ms、シフトの間隔は 10ms とする。

#### 3-1. 単一粒径材料に対する解析

単一粒径材料の発生音の零交叉回数、パワーを図-2, 3, 4 のように頻度分布として表した場合、粒径が大きくなるにつれ零交叉回数は減少してパワーは増大し、濃度が高くなるにつれて零交叉回数・パワーの両値とも増大することが確認できる。そこで、 $z, p$  の分布が 2 次元単一正規分布に従っていると仮定し、あらかじめ取得しておいた音の特徴を基に未知の粒径や濃度を判別する認識実験を行った。粒径や濃度が正しく判別されている割合を認識率とする。認識実験には約 180 秒の発生音波形データの中から、 $z, p$  の特徴を取得する学習に 100 秒のデータを用い、学習に用いなかったデータからテストデータを 5 区間抽出する。テストデータの 1 区間当りの時間は 10, 20, 30 秒間の 3 ケースとし、各ケース当り 5(粒径) × 4(濃度) × 5(データ数) = 100 データの識別を行う。単一粒径材料の認識実験の結果は、図-5 に示すように高い認識率である。テストに用いる時間が長いほど、認識率が上昇する結果となるが、これは短時間における特徴のばらつきが長時間の観測により平均化されたことを意味しており、自然な結果である。また、流速が遅いと認識率が低下する理由として、流速が遅くなると衝突エネルギーが小さくなり全体的にパワーが小さくなるうえ、波形の振幅も小さくなり各  $z, p$  の正規分布間が狭まることによる。また、粒径の小さいものは濃度が変化しても零交叉回数やパワーに変化があまり見られないことから誤認識を起こしやすくなり、認識率が粒径の速いものに比べて低下する。

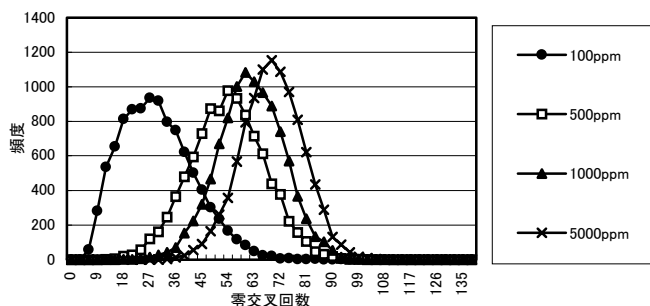


図-2 粒径(19.0-26.5mm)での濃度毎の零交差回数の頻度グラフ

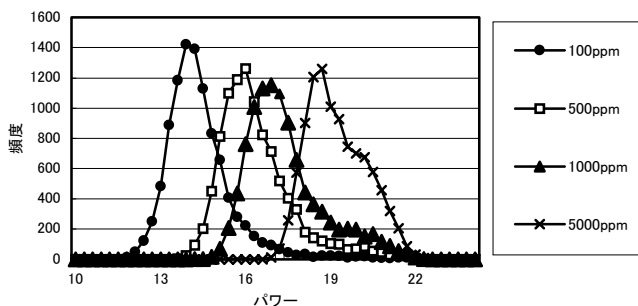


図-3 粒径(19.0-26.5mm)での濃度毎のパワー頻度グラフ

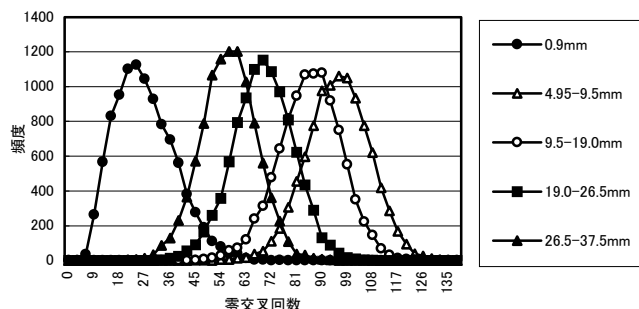


図-4 濃度一定(5000ppm)での粒径毎の零交差回数の頻度グラフ

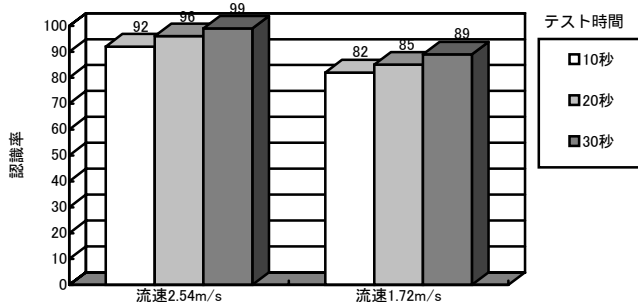


図-5 単一粒径での認識実験結果

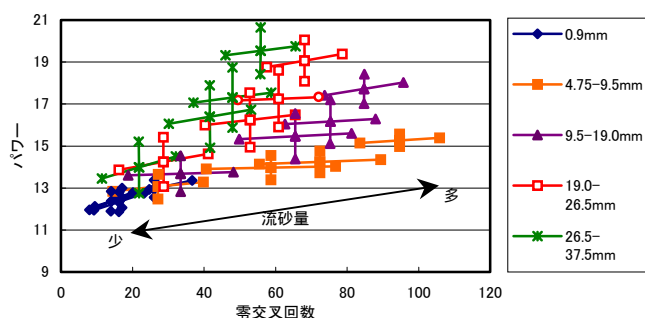


図-6 単一正規分布を用いた零交差回数とパワーの分布

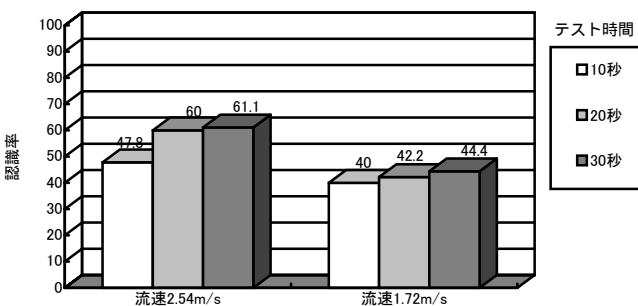


図-7 混合粒径での認識実験結果

### 3-2. 混合粒径材料に対する解析

単一粒径において濃度、粒径毎に分析に用いた零交差回数とパワーの分布を図-6に示す。この図からわかるようにそれぞれの分布は粒径・流量毎に独立している。そのため混合粒径の分析において得られる特徴の分布は、混合成分に対応する分布を合成した分布になることが期待される。そこで、混合粒径材料の分布には混合正規分布を用いる。混合正規分布の確率密度関数  $f(x)$  は混合比  $\omega_i$  を用いて単一正規分布の線型和で表され、

$$f(x) = \sum_{i=1}^M \omega_i f_i(x) \quad , \quad f_i(x) = \frac{1}{2\pi |\Sigma_i|^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x_i - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (x_i - \mu_i)\right)$$

である。ただし、 $\mu_i$ 、 $\Sigma_i$  はそれぞれ平均、共分散行列を表す。

混合粒径の認識実験を単一粒径の時と同様な条件の下に、混合正規分布を用いて行った。識別する種類としては、6(混合比の種類)×3(濃度の種類)=18種類である。実験結果を図-7に示す。混合粒径では40~60%の認識率であった。混合粒径材料では、大きい粒径の石のほうが小さい粒径の石に比べ零交差回数やパワーについて支配的であり、結果として粒径の小さい石の特徴が出現しづらく識別率が低下したものと考えられる。また濃度が高い場合には1フレームを20msという短い時間に設定したにもかかわらず、複数回の衝突が起きていることがわかった。今後は、録音機器の改良により砂粒衝突音の減衰時間の短縮や雑音の除去を行い、小粒径における計測精度を向上させていく必要がある。