

超音波パルスを用いた浮遊砂粒径推定手法の改良

豊橋技術科学大学 学生会員 ○飯吉勇己
豊橋技術科学大学大学院 正会員 加藤 茂・岡辺拓巳
株式会社建設技術研究所 正会員 中嶋亮太

1. 諸言

沿岸漂砂の動態を把握する上で、沿岸漂砂のモニタリングを行うことは必須である。中嶋（2013）はモニタリングの継続性・汎用性に富み、トータルコストを抑えた浮遊砂測定システムの開発を目標として、超音波技術を用いた測定システム（浮遊砂計測システム）の開発を試みた。中嶋（2013）は、砂粒子を模擬したガラスビーズに対して超音波パルスを送受することで得られる反射エコー情報から、粒子の粒径情報の推定を行い、エコーの中心周波数と粒子の中央粒径の間に強い相関があることを示した。しかし、収集される反射エコーデータが不安定であり、定量的な粒径推定を行うためには実験方法やデータ収録システム、収集したデータの解析方法等に改善すべき点が残されていた。

本研究では、中嶋（2013）の提案した計測システム（浮遊砂粒径計測システム）の見直しおよび改良を行ない、エコー収録時の精度向上を試みた。また、より正確な粒径情報を引き出すために解析方法の再検討を行った。

2. 粒子の粒径推定のメカニズム

超音波パルスとは、断続的かつ幅広い周波数帯を有した波形である。また、超音波は高い周波数であるほど減衰しやすい特性や物体に照射される超音波は散乱することで減衰する特性がある。散乱形態には、粒子の後方で生じた散乱（後方散乱）と粒子の前方で生じた散乱（前方散乱）がある。両者がほぼ同じくらいの強さを有するレイリー散乱と後方散乱が非常に小さな強さになるミー散乱がある。エコー強度は、後方散乱の音響エネルギーに相当しているため、ミー散乱の場合には非常に減衰してしまう。そのため本研究では、反射エコー情報から粒径を推定する際、散乱形態がレイリー散乱の周波数帯域を対象とする。

散乱形態の違いは粒子パラメータ α を用いて、粒子径 D 、波長 λ 、音速 c 、周波数 f 、粒子の直径 d で説明される。

$$\alpha = \frac{\pi df}{c} = \frac{D}{\lambda}$$

一般的に $\alpha \ll 1$ である場合にレイリー散乱、 $\alpha \geq 1$ である場合にミー散乱になる。上式より、レイリー散乱になり得る周波数帯域は粒径が小さくなるほど、高周波側に広がっていくことが考えられる。

3. 浮遊砂粒径計測システム

本システムは、ファンクションジェネレータのトリガ入力により、パルサーレシーバから電圧を振動子に印加し、超音波パルスの送受を行う。なお、出力した波形はオペアンプを介すことで、エコー強度を増幅させている。また、反射エコー情報はデジタルオシロスコープにて A/D 変換を行う。データ収録に際して、サンプリングを 20MHz とし、1 回の測定につき 120 回分のデータをアンサンブル平均することでホワイトノイズを消去した。

4. 粒径推定実験方法の改良と問題点

複数ある測定用ケーブルの内、延長用ケーブルの接続部に使用していない不要な電線があり、外部ノイズの影響を受けやすい状態になっていた。そのため、送波電圧値がケーブルの状態により、敏感に変動してしまっていた。そこで、不要な電線の使用と多段のケーブル延長を避けることでノイズを低減させる改良を行った。従来のケーブルと改良後のケーブルそれぞれでアクリル板に超音波を送受した結果を図-1 に示す。従来のケーブルは、エコー強度がおおよそ -0.10~0.10V の範囲で変動しているのに対し、改良後のケーブルは、おおよそ -0.05~0.05V の範囲で変動している。改良後のケーブルを用いることでノイズ部分におけるエコー強度の変動範囲を 1/2 程度に縮小できた。

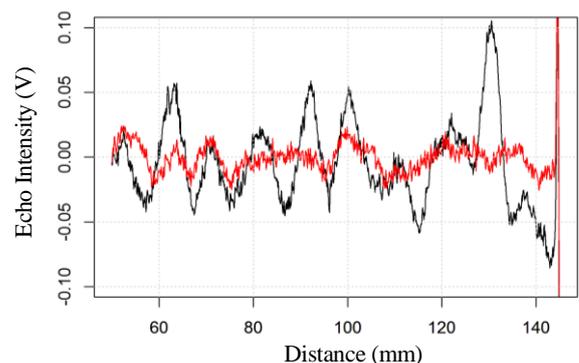


図-1 ケーブルの比較（黒線：従来、赤線：改良後）

また、エコー電圧値と送波電圧値を比較した場合、エコー電圧値が非常に低下してしまうことを確認した。これより、計測対象のエコー情報が一部損失する可能性が懸念される。この原因として、距離減衰もしくは計測装置が何か関係していると考えられる。今後、エコー電圧値が非常に低下してしまう要因を検討する必要がある。

5. 粒径推定における解析方法の見直しと提案

解析方法には、FFT（高速フーリエ変換）を採用している。従来の方法では、FFTの際にノイズ部分も同時に変換するため、スペクトル分布にノイズ要素が含まれることが懸念される。また、解析には各ケースの測定データを平均したものを用いているが、エコー波形を平均する方法とスペクトル分布を平均する方法で解析結果が変化することが懸念された。そこで、多数の計測データから平均的な周波数情報（スペクトル分布）を求める方法について検討を行った。

スペクトル内に含まれるノイズ要素を取り除くために、解析対象範囲（FFT をかけるエコー範囲）は、計測する対象物が存在する範囲のみに絞ることにした。また、解析対象データにゼロパディングを行なうことでデータ数を調整し、周波数情報の分解能を確保した（図-2(a)）。また、ゼロパディングを行ったことによって、データの不連続が発生し、このままFFTを行うと擬似的な高周波振動成分が発生してしまう（Gibbs現象）。そこで、解析データの両端部（0データへの接続部分）内側に三角フィルタを用いることでその影響を軽減させた。三角フィルタとは、対象範囲の片端を1としてもう一方の端が0に収束するようにデータを加工する方法である。三角フィルタによりエコー波形の急なシフトを防ぎ、滑らかにエコー波形を0にシフトさせることができた（図-2(b)）。このように事前処理を施したデータを用いることで、図-3

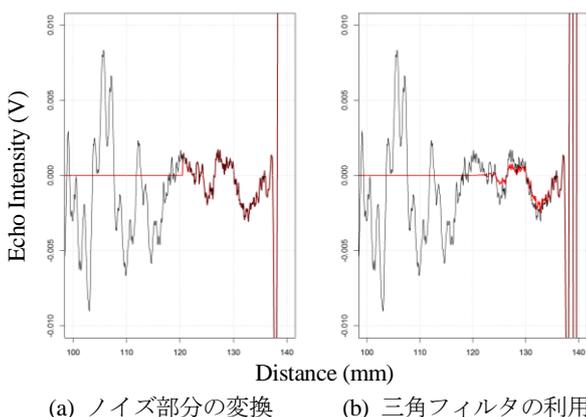


図-2 データ加工前後の比較

いる変動成分のみを抽出することが可能となった。データの平均方法は実際のデータを用いて比較し、最適な方法を検討した。データは7種類のガラスビーズを単独、3種混合、5種混合の条件でそれぞれ平面に配置し、測定した計15ケースを用いる。なお、スペクトル分布のパワースペクトル密度は最大値で無次元化する。解析より得られた中心周波数を実際に計測した粒子の中央粒径に対応させた結果、波形平均は-0.88、スペクトル平均は-0.95の相関が示され、どちらも非常に高い関係性が確認された。中嶋（2013）の結果でも同様にエコーの中心周波数と中央粒径に高い相関があることが確認されていることも踏まえ、より高い相関を示したスペクトル平均を解析方法で用いる。

6. 結論

本研究では、中嶋（2013）の提案した浮遊砂測定システムを用いて、浮遊砂粒径の定量的な評価を目的とし、システムの改良を試みた。

延長用ケーブルの接続部に不要な電線ケーブルがあり、外部ノイズの影響を受けやすくなっていた。そこで、ケーブルの改良を行い、ノイズの変動範囲を1/2程度に縮小できた。また、解析対象範囲を絞り込むことで、計測対象に関する適切な周波数情報の取得が可能となった。さらに、解析時にデータの平均方法の違いで、結果がそれぞれ変化することを懸念し、より強い相関を示したスペクトル平均を採用した。

しかし、これらの改良だけでは浮遊砂粒径の定量的な評価には至らなかった。また、粒径推定実験において、計測システムが外部ノイズを拾ってしまっている問題、エコー電圧値が非常に低下してしまう問題を確認した。これらの問題は今後検討および改善する必要がある。

参考文献

中嶋亮太（2013）：超音波パルスエコー法による浮遊砂濃度・粒径の同時推定手法に関する研究，豊橋技術科学大学修士論文

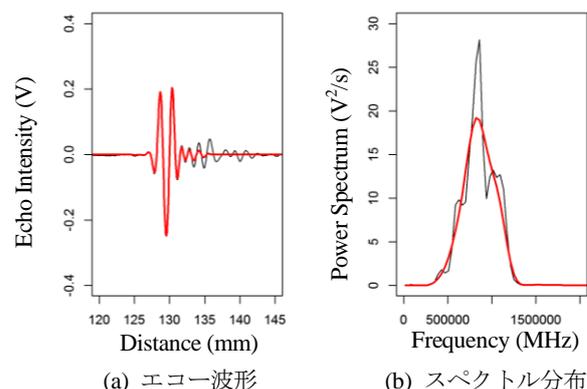


図-3 解析データの比較（黒線：加工前，赤線：加工後）