

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630225

研究課題名（和文）単一超音波センサを用いた浮遊砂濃度・粒径情報の同時推定の試み

研究課題名（英文）Simultaneous Estimation of Sediment Concentration and Particle Size Information using Single Ultrasonic Wave Sensor

研究代表者

加藤 茂 (Shigeru, Kato)

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40303911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：単一振動子による超音波パルス波を用いて、ガラスビーズを用いて作成した実験試料からの反射エコーデータを取得し、その周波数解析を行うことで、試料の粒径情報を推定することを試みた。寒天ファントム上に粒子を薄く配置して浮遊状態を模擬した実験では、粒径の変化に伴って反射エコーデータの周波数スペクトルの中心周波数が変化することを明らかにした。試料層厚を厚くし底質表層砂を模擬した実験では、周波数スペクトルの最大値の変化が、粒径変化と対応していることを明らかにした。以上より、超音波パルス波による反射エコーデータの周波数解析を行うことで、濃度推定のための重要な情報である粒径情報の推定が可能となる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：The estimation of particle size information was conducted using a single ultrasonic wave sensor. Reflective echo intensity data by samples made in glass beads, which is imitation sample of sand, was measured in the experiments. And frequency analysis was employed for the data to investigate the relationship between particle size and frequency characteristics. The experiment imitating the suspended sand using agar phantom indicated that the center frequency calculated from frequency spectral distribution of the echo data changed in accordance with the change of particle size of a sample. The experiment imitating sediment surface sand by increasing layer thickness demonstrated that the change of the maximum of frequency spectrum corresponded to that of the particle size. Experimental results suggested that it is possible to estimate sand particle information indispensable for estimation of sediment concentration by measurement using ultrasonic pulse wave.

研究分野：海岸工学

キーワード：超音波パルス 粒径推定 周波数解析

1. 研究開始当初の背景

各種計測機器が高性能・高機能化した現在でも、土砂濃度計測において最も信頼性の高い計測方法は、濁水の直接採取・分析によって濃度を求める方法であると考えられる。しかし、現地観測において、時間変化調査のために高頻度で濁水採取することは困難である。そのため、濁度計設置による代替計測が行われることが多いが、根本的に濁度と濃度は等価ではなく、計測された濁度 (ppm など) から濃度 (mg/L など) を推定する必要がある。近年では、超音波流速計などで付加的に得られる超音波反射エコーを用いた濃度計測も試みられているが、反射エコー強度から濃度への推定に濁質 (砂) の粒径情報が欠かせないため、現地で採取した土砂サンプルを用いたキャリブレーションが不可欠である。時々刻々変化する濁質情報を同時に得ることが困難であるため、濁質の粒径があまり変化しないことを仮定して、濃度変化を調査しているのが現状である。

2. 研究の目的

超音波による粒子計測では、用いる超音波の周波数によって計測に適した粒径範囲が異なる。多様な懸濁物質が混合している現地水域での計測実現を目指して、計測対象粒径を広げるために複数センサを搭載し周波数の異なる超音波を発信可能な機器も開発されているが、機器自体が高価になることに加えて、センサ (周波数) 間での相互干渉などの問題もあり、使用実績は非常に限られている。本研究では、単一センサを用いるがその送波信号にパルス波を用いることで連続的な周波数情報を付加 (広帯域化) し、多様な粒子サイズに対応可能な計測方法の開発を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、水中に懸濁している砂粒子 (浮遊砂) とその発生に大きく寄与する底質表層砂の粒径情報を推定するための計測・データ解析方法を検討するために、それらを模擬した室内実験を実施した。より理想的な条件下での実験を行うために、形状にばらつきのある砂粒子の代わりに、球形で均一性の高いガラスビーズ粒子 (比重 2.5) を用いた。

(1) 浮遊砂の粒径推定に関する実験

本実験では超音波の送受波に、直径 30mm の円筒型振動子と本研究で自作したパルサーレーシーバーを用いた。振動子の中心周波数は約 1MHz である。実験には 7 種類の粒子サンプルを基に、それら単体および混合により粒度分布および中央粒径の異なる 16 種類の粒子サンプルを準備した。実験の再現性を確保するために、0.5%濃度の寒天を使用したファントムを作成し、円筒形容器の中にファントムを

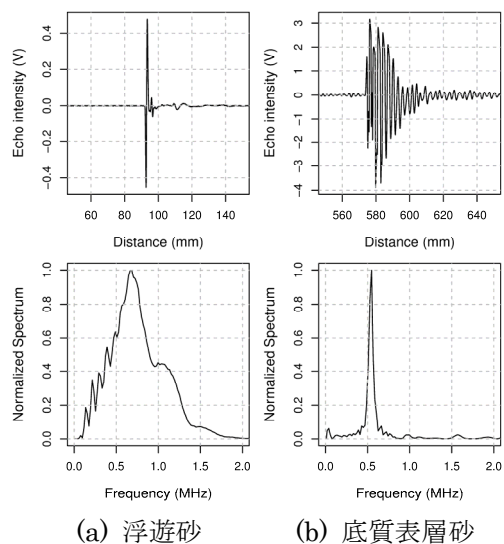


図-1 実験概要

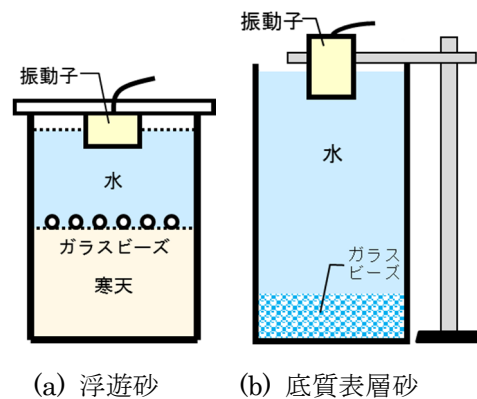


図-2 実験概要

敷き、その上にガラスビーズを配置することで浮遊状態を模擬した。ファントムの水中密度は水とほぼ等しいため、ファントムからのエコー反射は非常に小さいことを確認している。

(2) 底質表層砂の粒径推定に関する実験

本実験では、直径 50mm (中心周波数 550kHz) の円筒型振動子とパルサーレーシーバー (1) と同品) を用いた。円筒形容器の底にガラスビーズを約 5cm 敷き詰め、容器内を水で満たすことで底質を模擬した。実験には、粒度幅の非常に狭い 6 種類のガラスビーズを使用した。

図-1 に、それぞれの実験で使用した振動子から発信された超音波信号 (パルス波) とその周波数スペクトル (最大値で基準化) を示している。また、図-2 には実験の様子を示している。

4. 研究成果

(1) 浮遊砂の粒径推定

図-3 は、図-2(a) の実験において 16 種類の粒子サンプルから得られた反射エコーデータの周波数スペクトルを示している。図中の太破線は、周波数スペクトル分布の断面一次モ

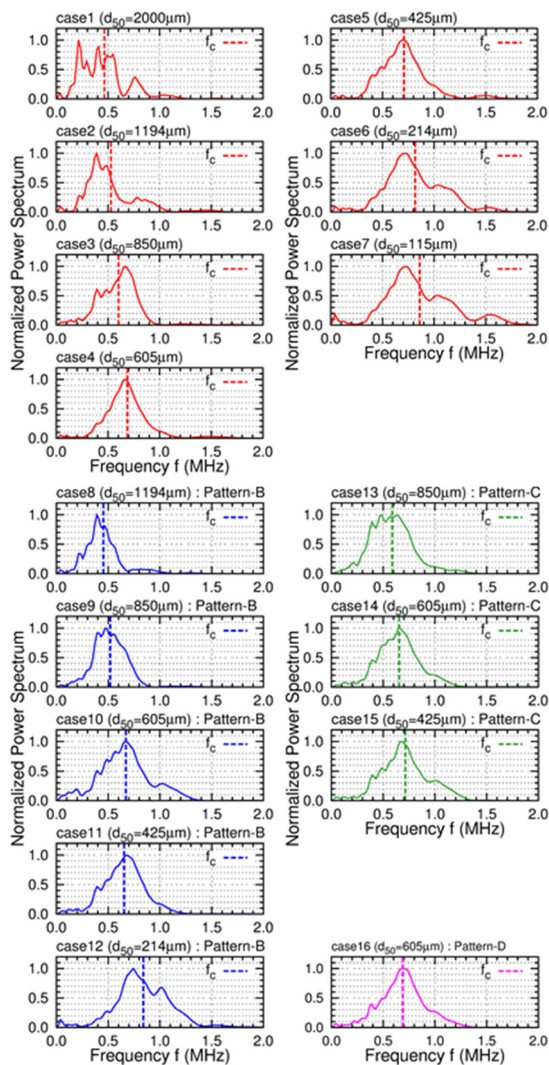


図-3 反射エコーの周波数スペクトルの比較

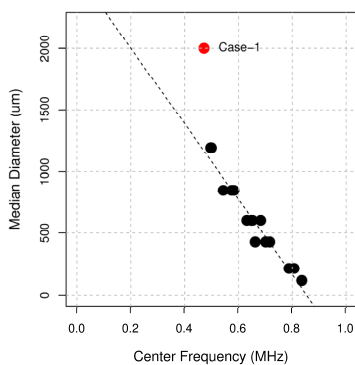


図-4 反射エコーの中心周波数と中央粒径の関係

ーメントから求めた中心周波数 f_c の位置を示している。スペクトル分布は試料の粒子サイズが小さくなるほどその分布形状が高周波側にシフトし、それに伴って中心周波数も高周波側に移動していることがわかる。図-4には図-3で得られた中心周波数 f_c と実験資料の中央粒径 d_{50} の関係を示している。粒子サイズの最も大きいCase-1を除くと、試料の粒度分布特性に関わらず f_c と d_{50} には非常に強い線形関係を確認することができる。Case-1

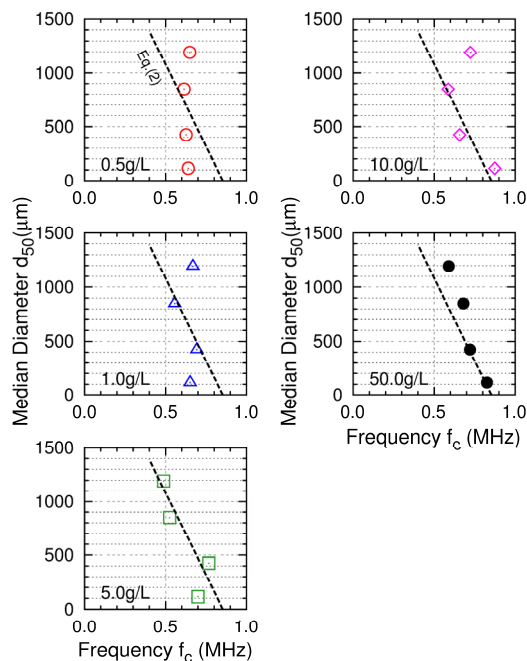


図-5 中心周波数と粒径の関係性

以外の結果を用いることで以下の回帰式を得た（相関係数 0.97）。

$$d_{50} = -3065.1 \cdot f_c + 2615.6 \quad (1)$$

Case-1の粒子サイズは、本実験で用いた振動子の周波数特性に対して、レイリー散乱領域外に相当する粒子サイズであるため、図-4に示すように f_c と d_{50} の線形関係から大きく外れたものと考えられる。したがって、送波信号の周波数特性に対してレイリー散乱領域に対応する大きさの粒子群を対象とした場合、本実験で用いたパルス波によって得られた反射エコーデータを周波数解析することにより、浮遊砂中の粒径情報を推定することが可能であることが示された。

図-5は、ガラスビーズを混入した寒天ファントムの表面から得られた反射エコーデータを用いて算定した中心周波数 f_c と実際の粒径 d_{50} の関係を示している。図中の破線は、上記の回帰式(1)を示している。混入した粒子の濃度 C が 5.0, 10.0 および 50.0 g/L のケースでは、中心周波数 f_c は概ね式(1)に対応しているが、0.5, 1.0g/L の場合は、 d_{50} の変化に応じた f_c の変化は小さく、対応関係は確認できなかった。したがって、5.0 g/L 以上の濃度であれば f_c を用いて d_{50} を推定することが可能であるが、低濃度の場合には f_c から d_{50} を推定する方法以外の推定方法を検討する必要がある。

(2) 底質表層砂の粒径推定

図-6は、図-2(b)の実験において6種類の粒子サンプルから得られた反射エコーデータの周波数スペクトルを示している。周波数スペクトルの大きさは、使用した振動子の中心周波数である 550kHz 周辺で最大値を取っている。周波数スペクトルの最大値と試料の粒子サイズ（中央粒径）との関係は、粒径が大きくなるにつれて周波数スペクトルの最大値は

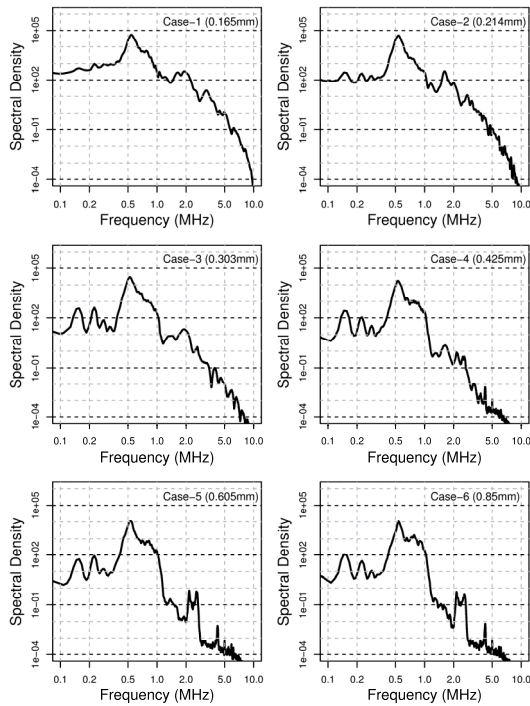


図-6 反射エコーの周波数スペクトルの比較

小さくなっていることが確認できる。図-7は、中央粒径と周波数スペクトルの最大値の関係を示した図である。両社には非常に高い相関があり（相関係数：-0.974）、反射エコーを用いることで、底質表面付近の粒径情報を周波数スペクトルの最大値の変化から推定できる可能性が示された。また、図-6のスペクトル分布では低周波数成分（400kHz以下）と高周波数成分（1.2MHz以上）でスペクトルの値が大きく減衰してことも確認できる。粒径変化に対応した最大値の変化量（減衰量）に比べて、低周波数成分、高周波数成分の減衰量は大きく、粒径変化に関連した情報がこれらの周波数領域に多く含まれていると推測される。今後は、各周波数成分にも着目して粒径情報を推定する必要があると考えられる。

図-8は中央粒径と中心周波数の関係を示した図である。粒径が小さいCase-1（0.165mm）～3（0.303mm）では、粒径が大きくなるにつれて中心周波数も低くなる傾向が見られる。この傾向は、浮遊砂における粒径情報推定においても同様の傾向が確認できている。しかし、今回は d_{50} が0.400mm以上の粒径では、逆の関係を示し、浮遊砂の場合のような実験対象とした粒径範囲全体をカバーできる関係の確認には至らなかった。この違いは、使用した振動子の周波数特性の違いも関係すると考えられるが、両実験における粒子（ガラスビーズ）の配置の違いによる部分が大いと考えられる。浮遊砂を模擬した実験では、ファントム上に敷き詰めた薄い粒子層（ほぼ1層）からの反射エコーを計測しているのに対して、底質表層砂を模擬した実験では粒子が何層にも積み重なった状態からの反射エコーを計測している。そのため、後者の実験では最上部層

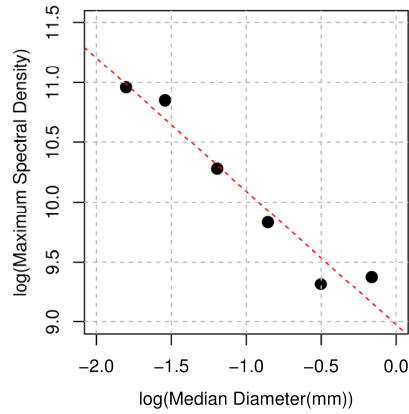


図-7 中央粒径と周波数スペクトル（最大値）の関係

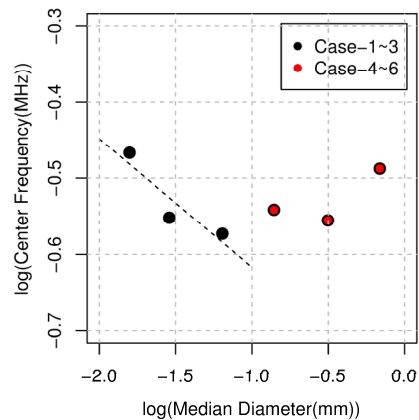


図-8 中央粒径と中心周波数の比較

以下からの反射エコーも計測データには含まれていることが推察される。実際に堆積した砂を対象とした計測では、ある程度の層厚を持った試料からの全情報を含んだデータを解析し、そこから目的とする粒径情報を抽出することになる。浮遊砂と底質表層砂の状況の違いを考慮した粒径推定方法の検討・開発が必要である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

1. 中嶋亮太・加藤 茂・穂積直裕・岡辺拓巳：超音波パルスを用いた浮遊砂の粒径推定に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 70, I_1476-I_1480, 2014.（査読有）

〔学会発表〕（計1件）

1. 飯吉勇己・加藤 茂・岡辺拓巳・中嶋亮太：超音波パルスを用いた浮遊砂粒径推定手法の改良，平成27年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，II-13, CD-ROM, 2016.（2016/3/4，豊田工業高等専門学校）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 茂 (KATO SHIGERU)
豊橋技術科学大学大学院工学研究科・建築・
都市システム学系・教授
研究者番号：40303911

(2) 研究分担者

穂積 直裕 (HOZUMI NAOHIRO)
豊橋技術科学大学・国際協力センター・教
授
研究者番号：30314090