超音波パルスを用いた浮遊砂の粒径推定に関する研究

Estimation of Particle Size of Suspended Sediment by Ultrasonic Pulse Waves

中嶋亮太¹・加藤 茂²・穂積直裕³・岡辺拓巳⁴

Ryota NAKAJIMA, Shigeru KATO, Naohiro HOZUMI and Takumi OKABE

The estimation of a particle size, such as d_{50} , of sediment was attempted by using ultrasonic pulse waves. By investigating the effect of the particle size in reflected waves, it was confirmed that the center frequency, f_c , calculated by the moment of frequency spectrum would be changed depending on the particle size and the strong linearity was indicated between f_c and d_{50} . In case of quasi-suspended situation imitated by a phantom, the relation between f_c and d_{50} was shown by glass beads though it is insufficient for experimental cases with low concentration. In case of the experiments with sand particles, d_{50} was overestimated on the whole. This research indicated the possibility of particle size estimation in suspended sediment by ultrasonic pulse waves.

1. 緒言

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を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、基本的には“濁度≠濃度”であり、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 (後方散乱) を用いた濃度計測も試みられている (川西・稲田, 2006; Thorneら, 1991)。しかし、反射エコー強度の感度は、使用する超音波の周波数 (波長) と対象物の大きさ (粒径) に影響を受ける。したがって、反射エコー強度から濃度への高精度な推定には濁質 (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 (例えば、横山・藤田, 2001; Pedocchi・García, 2012)。しかし、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・推定しているのが現状である。

一方、多くの超音波計測機器では単一振動子 (= 周波数) が用いられている。その結果、超音波の反射特性 (感度) は送波の周波数 (波長) と対象物のサイズに大きく影響されるため、狭帯域スペクトルの超音波を用い

た計測では反応しやすい (計測に適した) 粒径範囲に限られる。これに対して、計測対象粒径を広げるために、複数個の振動子を搭載し周波数の異なる超音波が発信可能な機器も開発されている (Moate・Thorne, 2012; Hay・Sheng, 1992) が、機器自体が高価になることに加えて、センサ間での相互干渉などの問題もあり使用可能な周波数の制限が強いため使用実績は非常に限られている。

本研究では、広帯域での周波数情報を備え、多様な粒子サイズに対応可能と考えられるパルス波を送波信号に用いることで、その周波数特性の変化から濃度推定に必要不可欠な粒径情報を推定することを試みた。

本来、超音波の反射と散乱は異なる現象であり、超音波が物体に対して照射された場合、波長に対して十分に大きな物体との境界面で生じる現象を反射、波長と同程度もしくはそれよりも小さな物体によって生じる現象を散乱と区別される。本研究でも主に使用する超音波の波長と同程度もしくはそれ以下の物体 (粒子) を対象としているが、本論文の中では概ね「反射」の表現に統一していることに注意されたい。

2. パルス波の特性

図-1は、パルス波と連続波の送波信号とその周波数スペクトル分布を示している。パルス波の周波数スペクトルの値は連続波の場合に比べて非常に小さいが、連続波とパルス波の周波数情報の多寡を比較するために、最大値で規格化した相対的な形状を示している。どちらも同じ中心周波数1MHzの超音波振動子 (ソナー) によって発生させている。

現地や実験で使用する超音波センサは要求される計測距離分解能がcmオーダーのため、SNR (Signal to Noise Ratio: 信号対雑音比) を高め反射エコー強度の変化を明瞭に検出するために、送波信号の時間 (= 信号の長さ)

1 正会員	修 (工)	株式会社建設技術研究所 中部支社 河川部水工室
2 正会員	博 (工)	豊橋技術科学大学大学院准教授 建築・都市システム学系
3	工博	豊橋技術科学大学教授 国際協力センター
4 正会員	博 (工)	豊橋技術科学大学大学院助教 建築・都市システム学系

図-1 送波波形および周波数情報の比較(上段：パルス波、下段：連続波)

も可能な限り広く設定される(連続波)。それにより、一回の送受信(計測)でSNRが高く信号の変化が判別しやすい受波信号(反射エコー)が取得できる。一方では送受波信号の周波数情報は中心周波数周辺に集中した非常に狭帯域な情報となり(図-1下段)、ある特定の周波数帯に反応しやすい粒径からの情報に偏ってしまう問題がある。本研究では、送波信号幅を制御し広範な周波数情報を付加した送波信号(パルス波、図-1上段)を用いることで幅広い粒径範囲からの情報収集を試みた。パルス波を用いることで生じるSNRの低下は、複数回の計測を実施しそのアンサンブル平均を行うことで改善を行う。

3. ガラスビーズを用いた粒径計測に関する実験

(1) 実験概要

本研究では超音波の送受に、直径30mmの円形振動子(公称周波数1MHz)と自作したパルサーレーザを用いた。実際の砂は正確にふるい分けされた試料であっても、その粒子形状が様々であるため反射の仕方にもバラつきが生じる。そこで、より理想的な条件下で実験を行うために、砂粒子の代わりに球形で形状の均一性が高いガラスビーズ粒子(比重:2.5)を用いた。実験に用いた粒子サンプルは16種類の粒度分布(Case1~16)を設定し(図-2、表-1)、これらの粒径加積曲線の傾きが大きい試料群から、Pattern-A~Dとして分類した(A:粒径幅の非常に狭い≒単一粒径)。

実験の再現性を確保するために、粒子の状態を固定するための媒質として濃度0.5%の寒天を用いた。超音波は媒質の密度境界面で反射するが、低濃度で凝固された寒天はその密度が水に非常に近く、寒天からの超音波反射エコーは非常に僅かである(図-3)。そこで、容器内で凝固させた寒天上に粒子を一粒子層厚で配置し、その上を水で満たすことで粒子の浮遊状態を模擬した(図-4)。なお、粒径の違いによる反射強度の増減を低減させるために、試料の添加量は、容器断面積の20%を粒子の投影面積が

図-2 設定したガラスビーズの粒径分布

表-1 実験試料(ガラスビーズ)の中央粒径

Pattern-A					(単位:μm)
Case	1	2	3	4	5
d_{50}	2000	1194	850	605	425
Case	6	7			
d_{50}	214	115			
Pattern-B					
Case	8	9	10	11	12
d_{50}	1194	850	605	425	214
Pattern-C			Pattern-D		
Case	13	14	15	16	
d_{50}	850	605	425	605	

占める量として調整した。この実験方法により計測対象である粒子の位置は固定され、定常条件下で複数回のデータ収集が可能となった。

水面近傍に設置した振動子からは、パルサーレーザから印加される電圧によって、図-5に示されるような超音波を送波した。受波信号(反射エコー)は20MHzでサンプリングし、16ビット分解能($\pm 10V$)でAD変換することでデータ収録を行った。さらに、データ取得時に混入するホワイトノイズを除去するために、1回の測定につき反射エコーデータを120サンプル取得し、そのアンサンブル平均した結果を計測データとした。計測は各ケースにつき8回実施し、その平均値を各ケースの実験結果として以後の分析に用いた。

(2) 反射エコーの周波数スペクトルと中心周波数

一般的に超音波の反射(散乱)において、反射しやすい(感度が高い)とされる周波数(波長)は、粒子サイズによって異なる。本研究ではパルス波を用いることで、図-1に示したように連続波に比べて広帯域の周波数情報を付加することができる。したがって、粒径の異なる粒子に超音波(パルス波)を照射した場合、照射対象の粒径に対応した周波数成分による反射が優位となり、その影響が反射エコーデータの周波数特性に現れ、周波数ス

図-3 寒天ファントムからの反射エコー(ファントムと水の境界面: 155mm付近)

図-4 実験方法の概観

図-5 送波形状(左)とその周波数スペクトル(右)

ペクトルの分布形状も変化すると考えられる。

そこで、パルス波による反射エコーデータの周波数スペクトルを求め、周波数に関する一次モーメントにより中心周波数 f_c を求め、粒径と周波数情報の変化の関係を調べた。上記方法により求めた本研究で用いるパルス波の中心周波数は、0.75MHzであった(図-5の太破線)。水中の音速 c を1500m/sと仮定すると、次式より周波数 f_c を持つ超音波の波長 λ は2mmとなる。

$$c = f \cdot \lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

粒子径を d とすると、 d が λ よりも十分に小さい場合はレイリー散乱領域であると考えることができる。仮にレイリー散乱領域を $d < \lambda/2$ と仮定すると、表-1より本研究で使用した粒子サンプルの中央粒径 d_{50} は、Case-1, 2および8以外がレイリー散乱領域にあると考えられる。

4. パルス波による粒径情報の推定

図-6は、Pattern-Aの粒子サンプルを用いた場合に得られた周波数スペクトルの一例(8回計測したうちの1回)を示している。図中の太破線は中心周波数の位置を示している。なお周波数スペクトルは、スペクトルの最大値によって基準化している。スペクトル分布は、試料の粒径が小さくなるほどその分布形状が高周波側に変化し、それに伴って中心周波数 f_c も高周波側に移動していることがわかる。この傾向は、粒径幅の広いPattern-B, C, D(図-7)においても確認することができた。図-8には、すべての実験ケースにおける中心周波数 f_c (8回計測の平均

図-6 Pattern Aにおける周波数スペクトルと中心周波数

図-7 Pattern-B～Dにおける周波数スペクトルと中心周波数

図-8 エコー中心周波数とガラスビーズの中央粒径の関係

値)と実験試料の中央粒径 d_{50} の関係を示している。粒径の大きい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-2と8に関しては、中央粒径の値が前述のレイ

表-2 浮遊粒子として用いる試料の材質と中央粒径
ガラスビーズ (単位: μm)

Case	1	2	3	4
d_{50}	115	425	850	1194

Case	Toyoura	Silica-C	Silica-M	Silica-F
d_{50}	208	390	231	128

砂粒子

図-9 浮遊粒子(ファントム)を用いた小型水槽実験の状況

リー散乱領域の対象範囲外の可能性もあるが、図-8で確認する限りでは線形関係の延長線上にあると判断できる。よって、Case-1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)。

$$d_{50} = -3065.1 \cdot f_c + 2615.6 \dots\dots\dots (2)$$

したがって、送波信号の f_c 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、パルス波を用いてその反射エコー信号の周波数解析を行うことで浮遊砂中の粒径情報(d_{50})を推定することが可能であることが示された。

5. 浮遊状態粒子群の粒子情報推定

粒子群が水中で浮遊している状態での超音波計測を行うために、寒天ファントムを用いて浮遊状態を模擬した。寒天ファントム(W120mm×H40mm×L180mm)は水に粉末寒天0.8%とポリアクリル酸ナトリウム0.2%を添加し、煮沸して完全に溶解させた液体に試料(ガラスビーズまたは砂粒子)を投入し、寒天を攪拌しながら冷却凝固させることで製作した。ポリアクリル酸ナトリウムを加えることで、液体の粘度を僅かに高め、粒子群の浮遊状態を維持しやすくしている。実験には8種類の試料を用いた(表-2)。それぞれの試料に対して、粒子濃度0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 50.0g/Lの5ケースを設定して、ファントムを製作した(合計: 試料8種類×濃度5ケース=ファントム40個)。超音波反射エコーの計測は、水を満たした水槽にファントムを沈め、ファントム上方約70mmの位置に設置した振動子により超音波の送受を行うことで実施した(図-9)。なお、振動子の位置を水平方向に僅かにずらしながら、各ファントムにつき4回のデータ取得を行った。粒子を混入していないファントムを用いて、ファントムからの明確な反射がないこと、粒子を混入すること

図-10 中心周波数と粒径の関係性(ガラスビーズ)

図-11 実際の粒径と推定粒径に比較(ガラスビーズ)

で反射エコーが生じていることを確認している。本研究では、粒子を混入したファントムと水との境界面で生じた反射エコーのデータを用いて、周波数スペクトル解析および中心周波数の算出を行った。

図-10は、ガラスビーズを混入したファントムより算出した反射エコーの中心周波数 f_c と実際の粒径 d_{50} の関係を示している。粒子濃度 C が5.0, 10.0, 50.0g/Lのケースでは、 f_c は概ね式(2)に対応している。しかし、 C が0.5, 1.0g/Lの場合は、 d_{50} に応じた f_c の変化は小さく、周波数スペクトルから算定した f_c と試料の d_{50} は、式(2)で示される f_c と d_{50} の関係にあまり対応しない。図-11に、算定した f_c と式(2)を用いて推定した d_{50} と、試料の d_{50} との関係を示す。 $C=50.0\text{g/L}$ (●)と 5.0g/L (□)のケースについて、推定値は比較的实际の粒径に近い数値を示す傾向が見られるが、全体的には推定値のバラツキは大きい。

砂粒子を混入したファントムを用いた場合の反射エコーの f_c と試料の d_{50} の関係を図-12に示す。ガラスビーズ

を用いた場合に対して砂粒子を用いた場合は、全体的に算定した f_c と試料の d_{50} の関係は、式(2)からは大きく外れていることが分かる。しかし、粒径が大きいケースでは算定した f_c が式(2)の線に近づく傾向は確認できる。式(2)を用いて推定した d_{50} と試料の d_{50} との関係を図-13に示す。算定された f_c が低周波寄りであったため、全体的に推定された d_{50} は実際の d_{50} を過大評価する結果となった。

式(2)を求めた3章の実験では、粒子を1粒子厚のシート状に配置し、比較的高密度な粒子配置となっていた。そのため、粒径による反射エコーの周波数情報の変化が顕著に表れていたが、40mmの厚みを持ったファントム内では粒子が3次的に分布し、3章の実験に比べて粒子分布としてはかなり疎な状況であったことが考えられる。実際に、5章の実験ではガラスビーズまたは砂粒子を混入したファントムと水との境界面付近での反射エコーデータを用いて周波数解析を行ったため、境界面付近に存在した粒子数は非常に少なく、そのために濃度が低いケースや粒径が小さいケースでは、式(2)からの乖離が目立つ結果に繋がったと考えられる。

6. 結論

本研究では、送波信号として広帯域化したパルス波を用いることで、超音波を用いた浮遊粒子サイズの推定可能性について検討を行った。

まず、比較的粒径形状が揃ったガラスビーズを用いて反射エコーデータの取得を行ったところ、粒径の違いによって受波データ(反射エコー)の周波数スペクトル分布に変化が生じることが確認できた。また、周波数スペクトル分布から中心周波数を求め、試料の中央粒径との関係を調べたところ、両者の間に強い線形関係が確認でき、超音波パルスによる粒径情報の取得可能性が示され、中央粒径の推定式も得られた。

続いて、ガラスビーズおよび砂粒子を用いて、疑似浮遊状態における粒径情報の推定を試みた。ガラスビーズを用いたケースでは、高濃度な条件において比較的妥当な推定結果が得られたものの、低濃度な条件では十分な結果が得られなかった。砂粒子を用いたケースでは、全般的に粒径を過大評価する結果となった。

粒径の推定精度としては不十分なものの、本研究により超音波パルスによる粒径情報の取得可能性が示されことは、今後、粒径情報の時間変化の追跡、さらには濃度と粒径情報の同時推定、濃度推定精度の向上に繋がるものと考えられる。周波数情報と粒径情報の関係式の導出方法や実際の浮遊状態における実験方法などの改良が今後の課題である。

謝辞：本研究は、学術研究助成基金助成金(挑戦的萌芽

図-12 中心周波数と粒径の関係性(砂粒子)

図-13 実際の粒径と推定粒径に比較(砂粒子)

研究, 課題番号26630225)の補助を受けて実施しました。

参考文献

- 川西 澄・稲田 景 (2006) : 超音波流速計による浮遊粒子の粒径を考慮した浮遊砂濃度の測定法, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1401-1405.
- 横山勝英・藤田光一 (2001) : 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.937-942.
- Thorne, P.D., C.E. Vincent, P. J. Hardcastle, S. Rehman and N. Pearson (1991) : Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices, Marine Geology, 98(1), pp.7-16.
- Hay, A.E., and J. Sheng (1992) : Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter, J. Geophys. Res., 97(C10), pp.15661-15677.
- Moate, B.D., and P.D. Thorne (2012) : Interpreting acoustic backscatter from suspended sediments of different and mixed mineralogical composition, Continental Shelf Research, 46, pp.67-82.
- Pedocchi, F. and M.H. García (2012) : Acoustic measurement of suspended sediment concentration profiles in an oscillatory boundary layer, Continental Shelf Research, 46, pp.87-95.