

音響インピーダンスと音圧反射率を用いた浮遊砂濃度推定に関する基礎的研究

豊橋技術科学大学 学生会員 ○中嶋亮太
豊橋技術科学大学 正会員 加藤 茂

1. 諸言

海岸侵食に対して、実践的かつ効率的な対策を講じる上で土砂動態の把握は欠かせない。特に顕著な地形変化を伴う暴浪時には、底質が大きく巻き上げられることで浮遊砂量に決定的な変化が現れると予想される。そのため、浮遊砂の移動形態を知ることは海岸侵食の様子を探る足がかりとなる。

本研究室では、直進性の高い超音波を発信するリニアスキャンソナーを用いることで、超音波線上の空間的な浮遊砂の測定方法の開発に取り組んでいる。既往研究としては、ソナーから固定距離においてエコー強度(V^2)と浮遊砂濃度(kg/m^3)に比例関係が存在することを示した(加藤, 2009)。しかし、測定領域を空間的に拡張するには至っていない。

音響インピーダンス $Z(\text{Ns/m}^3)$ とは、媒質中における音速 $C(\text{m/s})$ と濃度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ の積であり、相接する媒質 1 から媒質 2 へ進行する超音波の音圧 A_i と、そのエコー A_r の比である音圧反射率 R_p との関係を次式に示す。

$$R_p = \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2}$$

この関係式より、校正時には密度と音速が既知の媒質を用いて測定地点における音圧反射率の基準値を取得し、浮遊砂測定時には音圧反射率の基準値と測定値を用いて、浮遊砂の存在する領域を区間分けし、段階的に濃度を推定するという過程を踏められるならば、現場における作業性の向上を多に見込める。

2. 測定可能域の確認

ソナーは指向角や近距離音場といった特性を持つ。指向角は、発信される超音波の広がりを表し、近距離音場は、超音波発信部近傍に存在する音圧が不安定な領域である。これらを踏まえ、定位置のソナーにて超音波を発信・収録することで、有効な測定領域の確認を行う。ここでは鉛直方向に設置した水中における直径 6mm のアルミ棒を反射体として、その存在位置に伴い得られる音圧から指向角と近距離音場を探る。

超音波進行方向に直行する面(横断面: Y)における音圧分布を図-1 に、進行方向(縦断面: X)における音圧分布を図-2 に示す。尚、縦断面のケースは、アルミの他に同形状の亚克力と真鍮を媒質として選定した。測定に用いた水槽の構造上、500~650mm 区間は計測が不可能である。理論値では指向角(第一零ふく射角)は 2.85° 、近距離音場の限界距離は 205.5mm であるが、図-1 より指向角の実測値を幾何学的に計算すると 2.48° と理論値に収まり、図-2 より音圧の安定域(遠距離音場)は 300mm 地点付近以降であると判断できる。図-3 はアルミに対する亚克力の相対音圧反射率の縦断面方向分布を示しているが、700mm より遠方では理論値に近い値を取ることが確認でき、本研究における濃度推定方法が可能であると考えられる。

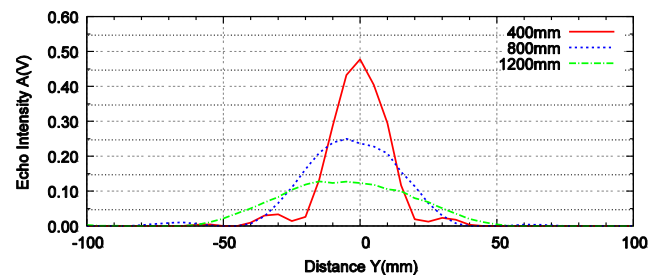


図-1 ソナー発信面から 400mm, 800mm, 1200mm 地点における横断方向の音圧分布(測定間隔 5mm)

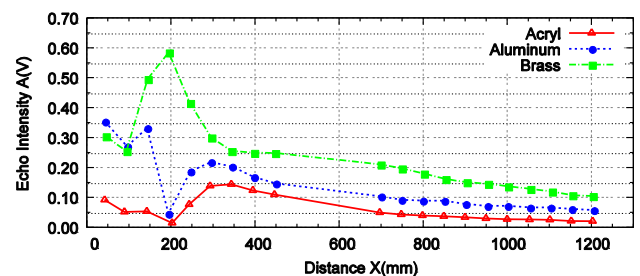


図-2 超音波進行方向における音圧分布

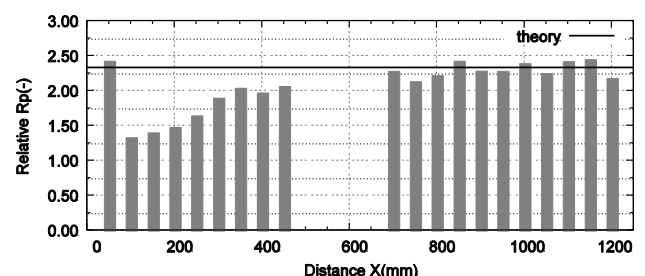


図-3 各測定地点における亚克力棒に対するアルミニウム棒のエコー相対値と圧反射率相対値

3. ファントムによる浮遊砂再現と濃度測定

ファントムとは、医療技術において画質、音場、分解能等の校正・測定用に使用される、音速・密度が水とほぼ同一条件である標準試験体である。寒天もファントムに相当するため、本研究では寒天を利用し、その凝固時に、計量された試料砂を添加・攪拌することで作成したファントム（写真-1）にて浮遊砂を再現した。このファントムを測定対象の媒質と置き、照射される超音波から得られるエコーを収録することで、実際に音響インピーダンスと音圧反射率から浮遊砂の濃度推定を試みた。

水槽の寸法上、写真-2のように水底にファントムを置き、水面近傍に発信器を設置すると、その間の距離は617mmとなる。図-1, 2より、120mm×180mmのファントムをソーナー前面より617mm地点に設置することは、対象媒質が指向角から算出される超音波照射範囲59.8mm×59.8mmを超過する反射面積を所有し、遠距離音場に存在することを意味するため、有用なエコーが収録されると判断する。

砂種は豊浦砂とふるい分けにて粒径を固定した三河珪砂（355-425 μm , 212-250 μm , 106-150 μm ）の4種類を用意し、それぞれ濃度10.00 g/L, 1.00 g/L, 0.10 g/Lの3ケース、計12種類のファントムを作成した。誤差の軽減として、各条件につき3個のファントムを作成、測定時はファントムの表面と裏面から超音波を照射、ソーナーが持つ8つのチャンネル全てを使用することで収録される計48個のデータを平均化した。

図-4における破線で囲まれた枠中には、作成した豊浦砂のファントムより得られたエコーを濃度別に示す。濃度の減少に伴い、エコーの振幅量も減少していることが分かる。ファントム厚35mm全域にエコーが及ぶため、この区間において振幅を平均化し、12種類のファントム全てについてグラフ化しても、図-5に示す通り4種類の試料全てにおいて濃度とエコー振幅の大小関係は成立している。

しかし、アクリルから得られるエコー振幅を基準に浮遊砂濃度推定を行うと、表-1に示すように実際の濃度を過小評価している。図-6は粒径とエコーの関係を示している。粒径と平均エコー振幅の変化に強い相関性が見られ、明確なエコーの粒径依存性が確認できる。このため、的確な濃度推定には、粒径情報を加味した定式化、定数の導入等が必要であると考えられる。

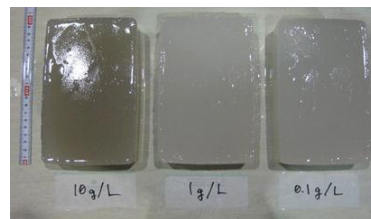


写真-1 作成したファントム

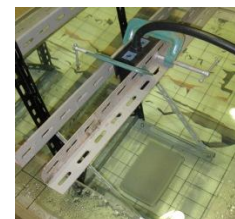


写真-2 設置状況

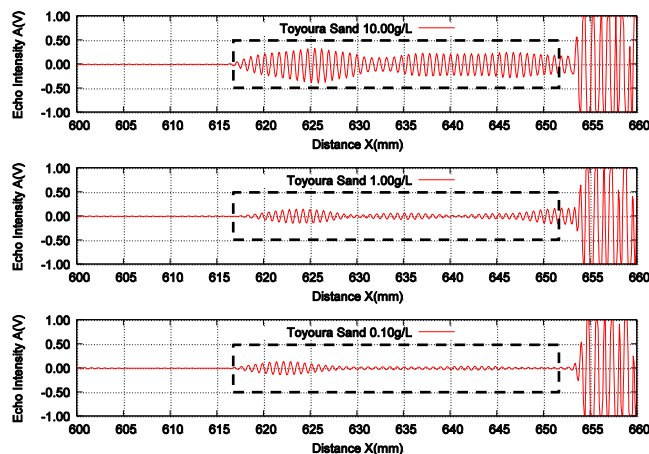


図-4 ファントムから得られるエコー波形

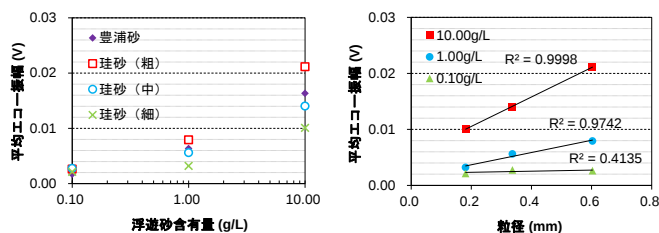


図-5 濃度 - エコー関係

図-6 粒径 - エコー関係

表-1 各ファントムにおける音圧と濃度推定

		浮遊砂濃度 ρ (g/L)		
ファントムの浮遊砂含有量		10.00	1.00	0.10
豊浦砂	$d_{50} = 0.210$	0.78	0.30	0.08
珪砂 (粗)	$d_{50} = 0.603$	1.01	0.38	0.13
珪砂 (中)	$d_{50} = 0.337$	0.67	0.27	0.13
珪砂 (細)	$d_{50} = 0.181$	0.48	0.15	0.10

4. 結論

本研究では、超音波の基礎実験により音圧反射率を介して、音響インピーダンスと浮遊砂濃度との間に関係性を確認できた。しかし、計測されるエコー振幅には粒径依存性も確認された。従って、本手法による浮遊砂濃度を推定には、粒径情報も考慮する必要がある。

実用的な計測手法の開発には、今後粒径に関する情報も取得可能な計測手法の改良・開発が必要である。

参考文献

加藤茂・Syamsidik・岡辺拓巳・青木伸一（2009）：超音波を用いた浮遊砂計測法の開発に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65，No.1，2009，pp.1436-1440。