

浮泥層判定装置の開発

THE DEVELOPMENT OF MUD LAYER DECISION DEVICE

山縣延文¹・原田卓三²・北島正明³・土屋明⁴・賀谷彰夫⁵・猿渡了己⁶
Nobufumi YAMAGATA, Takumi HARADA, Masaaki KITAJIMA, Akira TSUCHIYA,
Akio KAYA, and Ryouki SARUWATARI

¹正会員 工修 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所
(〒750-0066 山口県下関市東大和町2-29-1)

²正会員 工修 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所
(〒750-0066 山口県下関市東大和町2-29-1)

³国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-0066 山口県下関市東大和町2-29-1)

⁴東海大学海洋学部地球環境工学科計測機器学研究室 助教授 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

⁵工博 沖電気工業株式会社測機事業部 (〒108-8551 東京都港区芝浦4-10-3)

⁶社団法人海洋調査協会 専務理事 (〒103-0023 東京都中央区日本橋本町2-8-6)

The vertical slice of density profile along the surveying lines are important information to establish a countermeasure for the coastal marine environments and for the shoaling of waterway or anchorage with a drift of soft mud such as a low consistency clay or silt. To detect the density profiles of mud layer from the surface ship, "a mud layer decision device" using wide-band and narrow beam underwater acoustic pulses is being developed for area of several ten meters depth. The digitized reflection signals are stored in the hard disk of computer *in situ* and are analyzed off-line using a technique of wave-form analysis. This device is tested the performances in a dry dock and in coastal area. The results show that the device has capabilities to detect the mud layer of over 1 meter thickness at 5 meters depth by 25kHz band measurements and to estimate the density of mud surface at 0.01g/cm³ accuracy by 250kHz band measurements under the condition of the test. The estimated density profiles with this device show good agreement with the results of core-sampler.

Key Words : *soft mud, density profile, acoustic detection, wave-form analysis, coastal marine environment, shoaling*

1. はじめに

九州地域の周防灘や有明海など軟弱地盤海域においては、粘土やシルトのシルテーション現象による航路・泊地の埋没や底質の変化による海域環境への影響が問題となっている。これらの現象を把握し対策を検討する上では、海底の浮泥層の分布状況を定量的に計測することが重要である。また、浚渫土砂による埋立や処分場の土量管理を行う際にも投入前後の土砂性状を把握することは有意義である。

従来から用いられている浮泥層の計測方法として、高・低2周波の超音波パルスを用いる方法が実用化されている。この方法はエコーの指示差から層厚を求めるものであるが、層厚の計測精度は高くなく、

底質については経験的な推定を行なうにとどまっている。

ここでは、送受波形の解析により層の密度鉛直分布を定量的に計測することを目指して「浮泥層判定装置」(以下、本装置という)の開発を行ったので、測定原理および測定装置の構成、実海域およびモデル実験での精度評価結果について報告する。

2. 装置の性能

(1) 従来測定法との違い

実用化されている高低2周波の超音波パルスを用いる方法は、5~10kHzと200kHzの音響測深機を一体

化した装置により、2周波それぞれで計測した水深の差を浮泥層の厚さとしている。この解釈は現場での経験に基づくものであり、周波数の違いによる浮泥層の音波反射メカニズムの詳細は不明である。この方法では、送信パワーが大きくとれるため1-80mの測定水深を有する。しかし、送受波器が狭帯域（従って長パルス幅となる）であること、10kHz以下で約±25°、200kHzで±3°と広指向角であることにより深度分解能が低く、層内部の構造の詳細を知るには不向きである。また、帯域幅や指向角が周波数により不均一なため、浮泥層厚の判定に曖昧さを残している。

このように、従来の方法では堆積層表面付近の浮泥層の厚さの情報だけが得られるが、量的把握を行うためには密度の情報が不可欠である。

本装置では、音波反射の強度が反射面の密度への依存性が高いことに着目し、受信信号から密度を求めようというものである。

層探知の分解能を向上させるために、広帯域と狭ビームの両立を目指した。通常の送受波器では、高周波数域であるほど広帯域化が容易であり、高分解能を図りやすくなるが、音波伝搬路での減衰は大きくなり探知可能深度が浅くなる。そこで、探知可能深度と分解能を勘案して、使用周波数を25および71、250kHzの3周波として、各々使用周波数の1/2の帯域幅を持たせ、各周波数とも指向角は±2°とした。25kHzでは堆積層表面下数mまでの密度鉛直分布を10cmオーダーの分解能で計測することを目標とした。71kHzでは数10cmまでを数cmの分解能、250kHzでは表面付近で1cmオーダーの分解能とすることを目標とした。これらを組み合わせることにより、表面付近を1cmオーダーの高分解能で、下層にいくほど分解能は低下し10cmオーダーとなるが、堆積層表面下数mまで密度鉛直分布の推定が可能となった。

また、送信した音響信号が戻ってくるまでの時間から、従来の音響測深機と同様に、水深の計測も可能である。

(2) 目標性能

本装置では、浮泥層や軟泥層など低濃度海底堆積層を対象とし、主に深度数10mの海域で、堆積層表

Table 1 「浮泥層判定装置」の主な目標性能

項目	性能
適用水深	最小1m, 最大50m (25kHzの場合)
計測可能層厚	・ 25kHz:最大5m ・ 71kHz:最大1m ・ 250kHz:最大0.1m
深度分解能	・ 25kHz:12cm以下 ・ 71kHz:5cm以下 ・ 250kHz:1cm以下
密度推定精度	0.01g/cm ³ 以下
送受波器の許容傾斜	±2°以下
その他	GPSとの併用可能

面下最大数mまでの密度鉛直分布計測を目的としている。Table 1 に本装置の目標とする主な性能を示す。

3. 測定原理

(1) 波形解析

海底堆積層からの反射信号を波形解析して、地層の物理特性を求める試みは、いわゆる地層探査の分野で行われている。しかしながら地層探査では海底下数100mに及ぶ層構造の計測が目的で、数100Hz-数kHzの周波数が使用され、主に音速鉛直分布の推定に重点がおかれている。海底表面付近で、層厚に加え密度の鉛直分布を定量的に求める試みは1980年代に行われたが、数値シミュレーションのレベルまでで実用化には至らなかった。

本装置では、送信した音響信号が、海中伝搬路および海底堆積層の影響を受けた結果として受信信号を形成するというプロセスをモデル化し、受信信号から海底地層の情報だけを抽出するという手法を用いている。すなわち、受信信号には、海底堆積層の音響特性のほか、海中伝搬路および送信信号の周波数特性、送受波器の周波数特性が含まれている。

海中伝搬路が受信信号に及ぼす影響は、主に、音波の拡散と吸収である。拡散は伝搬距離で決定され、吸収は水温、塩分などの海水の状態と周波数、伝搬距離とで決定される。これらは受信信号そのものと現場での海水のモニタにより求めることができる。システムの状態に関わる送信信号、送受波器の周波数特性は、事前に、海中で送波器と受波器を対向（すなわち、海底堆積層の影響を除外）させた伝搬試験を行うことで求められる。

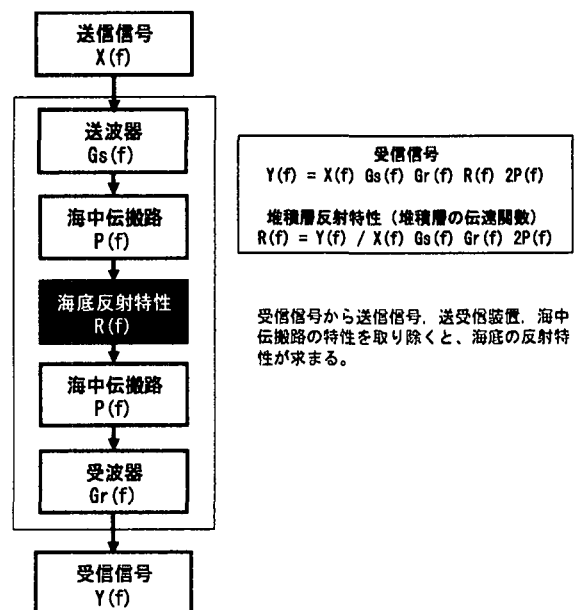


Fig. 1 音波の伝送経路

受信信号からこれらの既知の特性を取り除き海底堆積層の音響特性を抽出する方法の原理を Fig. 1 に示す。送波器—海中伝搬路—海底堆積層—海中伝搬路—受波器の経路をひとつのシステムと考えると、受信信号は送信信号を入力としたときのシステムの応答とみなせる。従って、送信信号と受信信号が既知であれば、システムの伝達関数を決定することができ、さらに、システムの伝達関数から既知量とすることが可能な送受波器と海中伝搬路の周波数特性を取り除くことで、海底堆積層の周波数特性が求まる。この周波数特性を海底堆積層の伝達関数と呼ぶことにする。

海底堆積層の伝達関数から海底堆積層の音響特性を求めるために Fig. 2 に示す多層モデルを適用した。送波器から送信された音響信号は、一部が堆積層表面で反射され受波器に戻り、一部は堆積層内部に透過する経路を辿る。堆積層内部の境界面でも同様に反射と透過が繰り返され、送波器から受波器に至る経路が複数存在する。受信信号は各経路をたどる信号の重ね合わせであることから、海底堆積層の伝達関数も各経路の伝達関数の重ね合わせである。

伝達関数の時間特性はインパルス応答と呼ばれているが、信号が十分広帯域であれば、海底堆積層のインパルス応答は経路毎に時間分離したインパルス列となる。インパルス列のひとつを他から分離するように時間窓をかけることで、経路のインパルス応答が分離される。この経路のインパルス応答をフーリエ変換すると経路の伝達関数、すなわち、経路毎の反射特性が求まる。

経路毎の反射特性 $R_n(f)$ は、経路 n について次の関係にある。

$$R_n(f) = \frac{\sum_{m=0}^{n-1} d_m}{\sum_{m=0}^n d_m} \left(\frac{1 - r_{n-1,n}^2}{r_{n-1,n}} \right) R_{n-1}(f) \left(r_{n,n+1} e^{-2\alpha_n(f)d_n} \right) e^{-j2\pi f t_n} \quad (1)$$

ただし、 $R_0(f) = \frac{1}{2d_0} \left(r_{01} e^{-2\alpha_0(f)d_0} \right) e^{-j2\pi f t_0} \quad (2)$

ここで、 d は層厚（ d_0 は水深）、 α は吸収係数である。層厚（または水深）は、窓関数で切り出したインパルス応答のピークの時間が音波の往復伝搬時間に相当するので、この値から求まる片道伝搬時間に海水音速を乗算して求めた。

r_m は境界 m の音圧反射率で、境界を挟む層の密度 ρ と音速 C とで次のようにあらわされる。

$$r_{m-1,m} = \frac{\rho_m C_m - \rho_{m-1} C_{m-1}}{\rho_m C_m + \rho_{m-1} C_{m-1}} \quad (3)$$

(1)式は経路の番号を次数とする漸化式であるから、まず、(2)式により堆積層表面からの反射経路（経路0）について、反射特性 $R_0(f)$ から堆積層表面の音圧反射率 r_{01} を求める。次に(1)式を適用すると、順次、各境界の音圧反射率 $r_{m-1,m}$ が求まる。(3)式から、層 m の密度 ρ_m と音速 C_m の積である音響イ

ンピーダンス Z_m は

$$Z_m \equiv \rho_m C_m = \frac{1 + r_{m-1,m}}{1 - r_{m-1,m}} \rho_{m-1} C_{m-1} \quad (4)$$

となる。

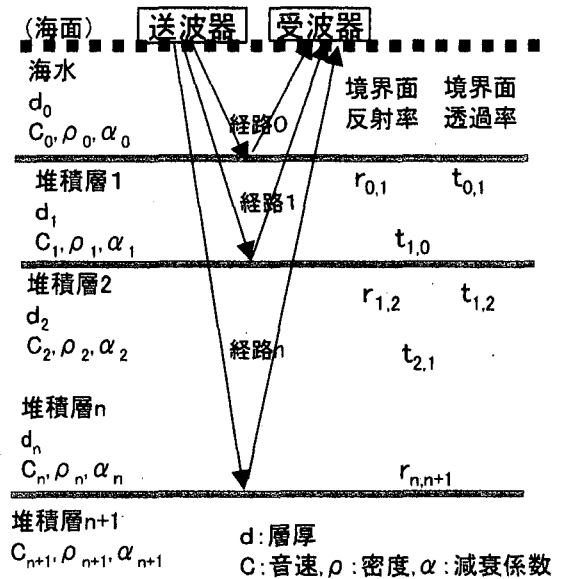


Fig. 2 多層海底モデル

(2) 密度の推定原理

前項で受信信号から、境界の音圧反射率を経て、層の音響インピーダンスが求められることを示した。

音響インピーダンスから密度を理論的に求めるには、音速を決定する必要があり容易ではない。そこで、様々な海域で採取した軟泥試料について実験室で音速 C_s と密度 ρ_s の測定を行い、あらかじめ音響インピーダンスと密度の関係を回帰式として求めた。

Fig. 3 は清水港、田子の浦港（静岡県）、東京湾、小野田港（山口県）で採取した海底軟泥試料について求めた密度と音響インピーダンスの関係である。海底軟泥は低濃度であるために、試料に含まれる海水の影響を大きく受ける。この影響を除去するために、試料に含まれる海水についても音速 C_0 と密度 ρ_0 を測定し、これらの値で規格化した。図の上部には規格化した値についての回帰式を示してある。

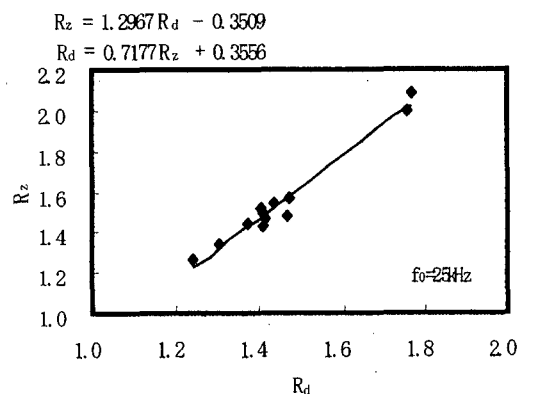


Fig. 3 規格化音響インピーダンスと規格化密度関係

今回用いたモデル堆積層では、砂層と軟泥層で構成したため、境界面で密度が大きく異なっており、25kHzの結果ではエコーの干渉により境界が不鮮明になってしまったが、実海域での底質密度は少なからずに変化するものと考えられるため、25kHzでもよい再現性を得られるものと考えられる。

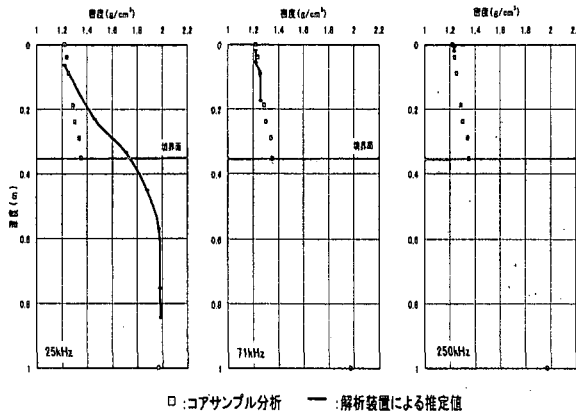


Fig. 6 密度分布推定結果とコアサンプルの比較

6. 実海域試験

実海域での適用性を評価するため、実海域試験を行った。試作装置を海面下約1m、2.5kntで曳航し、送受波器に内蔵する傾斜計、水位計の情報およびGPSによる位置情報をパソコンで記録した。これらのデータは解析時に水深への換算、信号取得状況に応じたデータの取捨選択に使用される。

波形解析により求めた密度鉛直分布を Fig. 7 に示す。上から250, 71, 25kHzの結果である。横軸は観測の経過時間(秒)でGPSによる位置計測結果とおきかえれば距離となる。縦軸は深度(m)である。等密度(1.20, 1.40及び1.80g/cm³)となる深度をコンターラインで示した。これによると、いずれの周波数でも、表面付近で密度は1.20g/cm³以下の値を示しており、深度とともに増加していくことが分かる。この表示では、密度コンターがある深度以上で描かれていない所がある。これは、ある深度の境界よりさらに深い層に透過したものは減衰が大きくなるために反射波が検出できなかったり、深度に対して密度がほぼ一様であるために反射波が検出できなかったことによる。図の例では、水深6mのとき250kHzではほぼ表層のみが捕らえられ、71kHzでは約0.5m、25kHzでは表面下1mまでが捕らえられていた。現段階では周波数毎の表示となっているが、これらの図を合成して表示する予定である。

Fig. 8 に柱状採泥した結果と浮泥層判定装置の結果及び従来方式の測定結果(200および10kHzの2周波)を示す。採泥の試料数が少ないが、浮泥層判定装置は採泥分析による密度をよく再現できているこ

とが分かる。また、浮泥層判定装置の結果と従来方式の測定結果を比較すると、従来方式で捕らえた浮泥層厚は密度鉛直分布の勾配が急変する深さを捕らえているものと考えられる。このように従来方式では密度の定量的評価が難しいが、浮泥層判定装置では密度分布をほぼ再現出来ているものと評価できる。

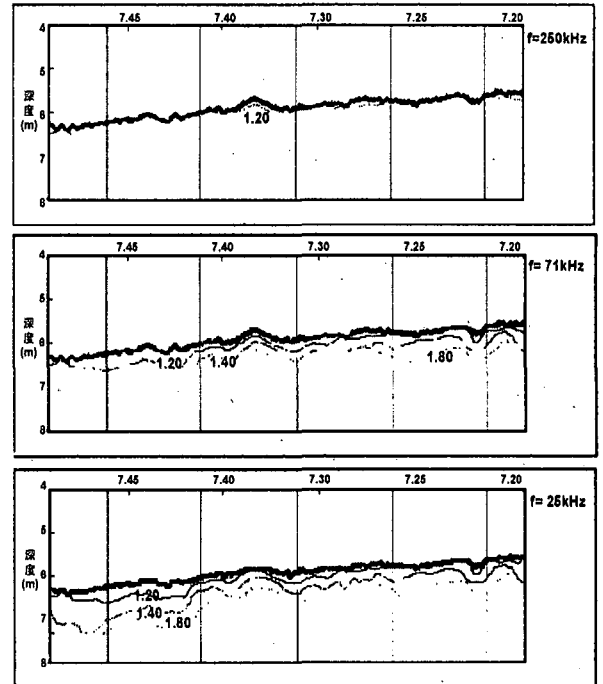


Fig. 7 波形解析による実海域の密度鉛直分布

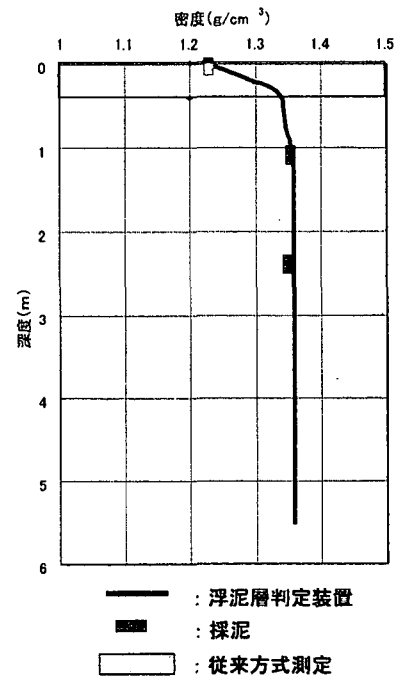


Fig. 8 本装置および従来方式測定結果と採泥分析結果の比較

7. おわりに

今回製作した浮泥層判定装置の試作装置によるモデル堆積層を使った乾ドック試験および実海域試験により以下のことが確認できた。

- ・試作装置において、各々使用周波数の1/2の帯域幅（広帯域性）と、各周波数とも $\pm 2^\circ$ の指向角（狭ビーム性）など当初設定した目標性能を達成できることが確認できた。
- ・乾ドック試験により、表面付近では密度推定精度 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 以下という目標性能を達成していることが確認できた。しかしながら、密度差の大きな境界（今回の試験では約 $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）が存在すると、その上下の境界からの反射波との干渉により、境界面が不鮮明になるとともに密度推定精度が劣化することが明らかとなった。
- ・実海域試験の結果、今回の例では、250kHzで水深6 m以上の探知が可能であり、25kHzで海底堆積層表面下1 mまでの密度構造の連続記録が得られた。また、実海域において、本装置および柱状採泥、従来方式の判定装置を同時に測定した結果の

比較により、本装置による密度の推定結果は柱状採泥の結果をよく再現し、従来方式の判定装置の示す浮泥層厚は密度勾配の急変する深度と一致することが明らかとなった。

今後の検討課題としては、250kHzなどの高周波で音波減衰を補完して探知距離を増加する信号処理方式の開発および現在3周波で標記している密度鉛直分布図の合成に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) A.Kaya, *et al.*, The estimation of wide-angle bottom loss by a normal incident acoustic pulse, Proc.IEEE ICASSP86, pp.2831-2834, 1986
- 2) 賀谷彰夫, 土屋明, 洞敏倫, 山縣延文, 原田卓三, 北島正明, 猿渡了己: 沿岸軟泥層の音響計測, 海洋理工学会秋季大会講演論文集, pp. 41-42, 2001.
- 3) 山縣延文, 原田卓三, 北島正明, 賀谷彰夫, 土屋明, 洞敏倫, 猿渡了己: 浮泥層判定装置の開発, 海洋調査技術学会研究成果発表会講演要旨集, pp. 20-33, 2001.