

海底地層の自動認識に関する研究 (その 1)

—海底地層の音波伝播モデルと識別システム—

松石秀之

古賀真綱

(本社海洋開発室)

原田 暁

梅谷陽二

(本社海洋開発室)

(東京工業大学)

Automatic Facies Recognition of Bottom Sediments (Part 1)

—Acoustic Propagation Models and Recognition
System of Sea Bottom Sediments—

Hideyuki Matsuishi

Masatsuna Koga

Akira Harada

Yoji Umetani

Abstract

An automatic facies recognition system for bottom sediments is discussed in this paper. This system aims for classification of bottom sediments into mud, clay, silt, sand and gravel facies and for automatic drawing of geological profiles by processing recordings obtained by the Sonoprobe Method. For this purpose, sound propagation models are discussed and a flow chart of the recognition system is illustrated.

概 要

ソノプローブ探査より得られたデータにより、海底沖積層を自動的にヘドロ、粘土、シルト、砂、礫に識別し、地層断面を描く方法を研究した。音波伝播機構をモデル化して、反射音波を計算し、実測の受信音波と比較することにより、地層を識別した。またこのモデルを利用した識別システムを作成し、更に、境界面の深度補正法を示した。

1. 序

著者らはソノプローブ探査により得られた記録をもとに、自動的に海底沖積層の地質層序及び層区分を求めるシステムの開発を試みてきた。前報¹⁾においては地層境界線抽出方法及び音波伝播モデルによるパターンマッチング法などについて論じた。地層境界線抽出の研究においては、地層境界線抽出回路を製作し、層数及び層厚を求めることを試み、伝播モデルによるパターンマッチング法の研究においては、海底下の各地層を更に細かな層素に分割した音波伝播モデルを考え、各地層の特徴を求めることを試みた。

本報告では、音波が $\Phi = \Phi_0 \cdot \frac{e^{-\alpha x}}{x}$ なる減衰を示し、受信音波は地層境界面からの反射と層内の散乱の和とする別のモデルを考え、パターンマッチング法を検討した。更に、これまでの研究結果をまとめ、自動識別システムを作成し、また、このシステムの中で必要と

なる深さの修正、多重反射の除去法などについて論じた。

2. 海底地層の音波伝播モデル

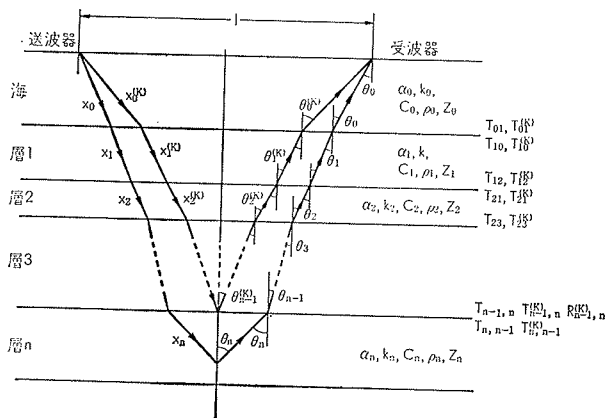
海底地層を音響学的に自動的に識別するため、地層境界線の抽出とともに、各地層間の反射係数、各地層の吸収係数、散乱係数をもつめ、あらかじめファイルされたデータと比較し、地層区分を行うことを試みた。

2.1. 音波伝播モデル

一般に海底地層中の音波伝播は複雑な現象を有するため、厳密な解析を行うことは困難である。したがって、海底地層、音波伝播機構をモデル化して受信音波を計算した。

モデルは次の仮説を設けた。(図—1 参照)

- 1) 地層は水平で、均質一様とする。
- 2) 取扱う音波は縦波のみとし、海中及び海底地



図一 1 音波伝播モデル

層中を伝播する際の減衰は $\Phi = \Phi_0 \exp(-\alpha x)$ なる吸収減衰と距離に反比例する拡散減衰の和とする。

- 3) 音源は実際の送波器より高さ h の所に在るものとし、どの方向にも一様に広がるものとする。
- 4) 音波は、送波点と受波点を結ぶ垂直 2 等分線上にて反射、散乱するものとする。

上記の仮定のもとに、第 n 層から反射、散乱されてくる音圧 Φ_n は第(1)式に示す通りである。

$$\Phi_n = \frac{h R_{n-1,n}^{(K)} \Phi_0 \left(\prod_{i=0}^{n-2} T_{i,i+1}^{(K)} \cdot T_{i+1,i}^{(K)} \right)}{2 \left(\sum_{i=0}^{n-1} x_i^{(K)} \right) + h} \times \exp \left\{ -2 \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i x_i^{(K)} - 2 a_{n-1,n} \left(\sum_{i=0}^n \frac{x_i}{C_i} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i^{(K)}}{C_i} \right) \right\} + \frac{h k_n \Phi_0 \left(\prod_{i=0}^{n-1} T_{i,i+1} \cdot T_{i+1,i} \right)}{\sum_{i=0}^n x_i} \times \exp \left(-2 \sum_{i=0}^n \alpha_i x_i \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに

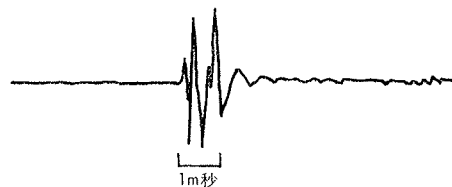
- Φ_0 : 発信音圧
- α_i : i 層中の吸収係数
- C_i : i 層中の音速
- x_i : i 層中の伝播距離
- h : 仮想音源の高さ
- k_i : i 層中の散乱反射係数
- $a_{i-1,i}$: 境界面の反射係数
- 補正係数

反射率

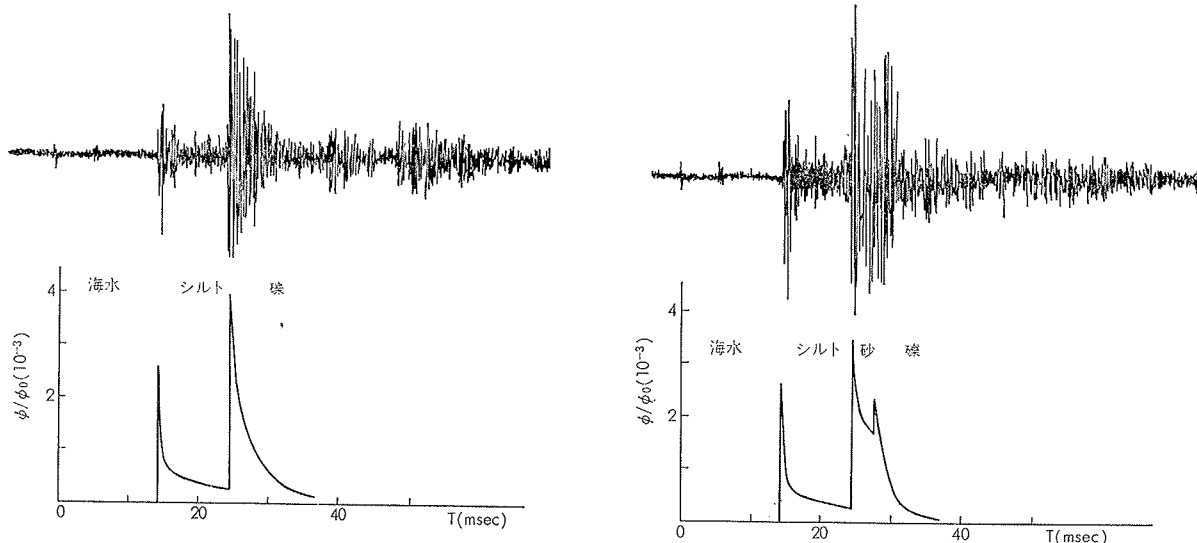
$$R_{i-1,i} = \frac{Z_i \cos \theta_{i-1} - Z_{i-1} \cos \theta_i}{Z_i \cos \theta_{i-1} + Z_{i-1} \cos \theta_i}$$

透過率

$$T_{i,i+1} = \frac{2 Z_{i+1} \cos \theta_i}{Z_{i+1} \cos \theta_i + Z_i \cos \theta_{i+1}}$$



図一 2 送波波形



図一 3 実測の受信波形と音波伝播モデルより計算された波形

第(1)式中の第1項は地層境界面における反射を示し、第2項は層内の散乱を示す。また添字(K)は、地層境界面における係数であることを示す。

2.2. モデル計算結果

モデル波形の計算においては、まずテープレコーダーに記録された実測の受信音波データより、各地層境界面までの深度を求める。次に C_i, Z_i, α, k_i に適当な値を入れ、第(1)式より受信音圧を求める。これを実測データと比較し、ドライ・アンド・エラー法により、 C_i, α, k_i, Z_i を決定する。本研究においては3層の場合につき、10組のモデルを計算した。求められた、 C_i, α, k, Z_i の例を表一に示す。

第2図は実際の発信波形で、第3図はモデル計算結果例を図示したものであり、上側は実測の反射波形で、下側は、計算結果である。

モデル計算には多重反射を考慮していないが、音圧ピークの高さの相対的關係、層内の減衰等、実測の受信波形とほぼ近似しており、このモデルを自動識別システムに採用することは有効である。

しかし、各地層の常数 α, Z, C, k_i は構成粒子の大きさ、含水率、音波の周波数等により変化し、ある程度の幅をもつと考えられるため、実験により、これらの値を確認する必要がある。その結果は第2報に示される。また、今後は、多重反射を考慮したモデルを作成することも必要となる。

3. 識別システムの設計

3.1. 検討対象の地層

検討の対象となる地層は、ヘドロ、粘土、シルト、砂、礫の5つに分類することとした。したがって考える地層の数を n とすれば、層序の組合せは 5^n を越えない。この組合せのうちで、ヘドロ、粘土については減衰が小さく、下位の地層の情報が得られること、砂については減衰が大きいので、層がある厚さ以上になると下位の情報がでないこと、また礫（音波散乱層を含む）については散乱が多いことなどから、記録上の最下位には砂層、礫層、或いは岩盤が考えられるため、組合せの数を減らすことができる。

3.2. パターンマッチング

前述した様に、実際の音波探査においては、表一に示す α, C_i, Z_i, k_i は周波数及び地層環境条件によって或る範囲の値をもつため、音波伝播モデルの計算に用いた α, C_i, Z, k_i を比較することのみで地層を識別することは不十分である。現在までの研究では

層名	海	ヘドロ	粘土	シルト	砂	礫
α [1/m]	0.006	0.020	0.025	0.030	0.080	0.25
k [-]		0.030	0.032	0.036	0.32	0.40
Z [g/cm ² s]	1.54×10^5	1.90×10^5	2.30×10^5	2.50×10^5	4.00×10^5	5.00×10^5
C [km/s]	1.51	1.50	1.49	1.47	1.75	1.80

$h = 0.4m, \Phi_u = 1, \ell = 8m, a = 4.0/ms$

表一 求められた各地層の音響常数

地層を（ヘドロ、粘土、シルト）群、（砂）群、（礫）群の三群に識別することができる。

3.3. 深さ、測定位置の修正

実測されたデータは時間軸で表示されているため、距離軸へ変換しなければならない。その場合、発信器と受信器が離れていること、音波が広がりをもっていること、海底地形が傾斜していることを考慮して、修正する。

図一4において、海底地形が緩やかに傾斜している場合、A点を発信点、B点を受信点とすると、実際の反射点がC点にもかかわらず、記録上では、D点の真下で反射し、時間は $t = (AC + BC)/v$ であらわされる。位置誤差は \overline{DC} となる。

また、実際の音波の反射点は、発信点と受信点を焦点とする楕円と海底面が接した点を考えられ、実際の海底面は、受信点と発信点が移動しながら得られる楕円群の包絡線として示される。

測線上の海面を x 軸、深さ方向を y 軸とし、記録上の反射点を (x', y_i) 、実際の反射点を (X_i, Y_i) とすると、

$$\frac{(x-x_i)^2}{y_i^2 + \frac{l^2}{4}} + \frac{y^2}{y_i^2} = 1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに l は発信点と受信点の距離である。よって、記録上の傾斜を $y'_i = \frac{dy_i}{dx_i}$ とすると

$$X_i = \frac{(2l^2 x y'_i + 4y_i^3 + l^2 y_i) \pm \sqrt{(4y_i^3 + l^2 y_i)^2 + (4ly_i^2 y'_i + l^3 y_i')^2}}{2l^2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$Y_i = \sqrt{(y_i^2 - l^2/4) \left\{ 1 - \left(\frac{X_i - x_i}{y_i} \right)^2 \right\}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 $y'_i = 0$ の場合 $X_i = x_i$
 $y'_i > 0$ の場合 符号-
 $y'_i < 0$ の場合 符号+

海底の傾斜を考慮せず、発信点と受信点が離れていることのみで水深を修正すると、修正値は必ず測定値よりも浅くなるが、測定位置まで考慮すると修正値は

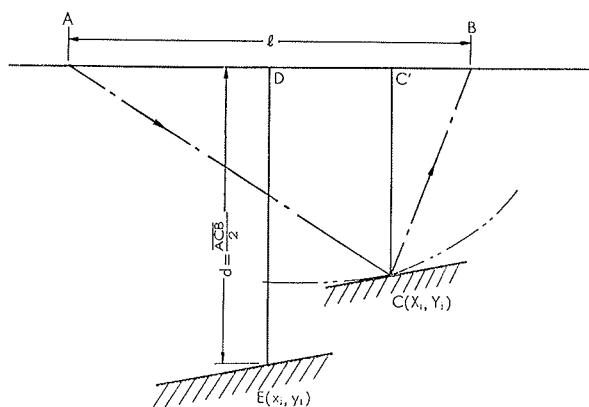


図-4 深さ、位置の修正

深くなることもあり得る。

3.4. 多重反射

砂層、礫層、岩盤など、多重反射が強い場合には、地層境界線と同様なパルスが得られるため、境界線抽出の後、除去する必要がある。

今、図-5に示すようなパルス列が得られた場合、発信時から海底面(第1層)、第2層、第3層において反射してきた往復時間を t_0 , t_1 , t_2 とすると、多重反射の発生する可能性のある時点のパルスは、

$$t = mt_0 + nt_1 + pt_2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

(m , n , p は同時に全て0でない正の整数)

多重反射を除去するには、第(2)式の時刻 t におけるパルス波を選別的に除けばよい。

3.5. 識別システム

前報¹⁾及び本報で述べた各処理要素を用いて、受信反射波形から地層断面を自動的に得るためのシステム

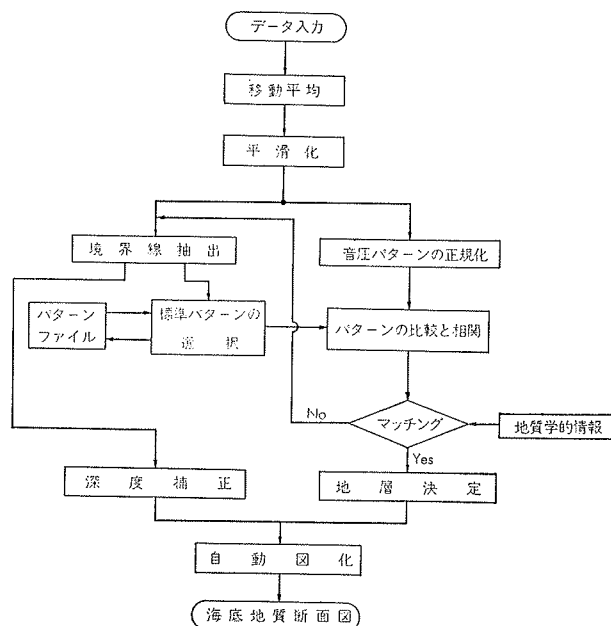


図-6 海底地層の識別システム

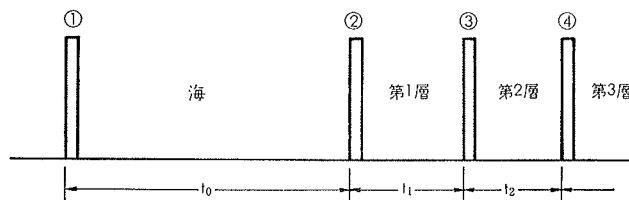


図-5 反射パルス列

を図-6に示した。

海底地層を自動的に識別するためには、現場での測定システムと解析システムが密接な関係をもっていなければならない。

入力としては、測定データ、時間基準データ、船位データなどであり、夫々 A-D 変換可能な状態にて記録されているものとする。

- 1) 各データを計算機に読みこむことと並列して、境界線抽出回路にて境界線を抽出する。
- 2) 地層の数と受信時間をもとに、可能な地層の組合せた反射モデル波形をパターンファイルとして記憶させておく。
- 3) パターンマッチングした結果と地質学的特徴を踏まえ、総合的に識別し、各地層の種類を決定する。もし、その結果に誤りがあればフィードバックさせる。
- 4) 深さ、位置を修正し、最終的に自動図化機により、地層断面図を描く。

4. むすび

反射波のもつ情報について仮説をたて、反射モデルパターンを作成し、実際の反射波形と比較することにより、境界面の反射、層内の減衰状態を定性的に示すことができた。また、海底地層を自動的に識別するシステム構成を提案した。今後は、反射音波波形処理のみだけでなく、記録画像データも併用した総合的識別法を確立する予定である。

最後に、本研究を進めるに当たって、東京工業大学、機械物理学教室森山芳樹氏の尽力に負う所が多い。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 松石秀之他(1975), 海底地層のパターン認識に関する研究, 大林組技術研究所報 No. 11
- 2) 実吉純一他(1966), 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社