

海底地層のパターン認識に関する研究

松石 秀之

梅谷 陽二
(東京工業大学)

小林 賢
(本社海洋開発室)

森山 芳樹
(東京工業大学)

Study on Pattern Recognition of Seabottom Geology

Hideyuki Matsuishi Yoji Umetani
Ken Kobayashi Yoshiki Moriyama

Abstract

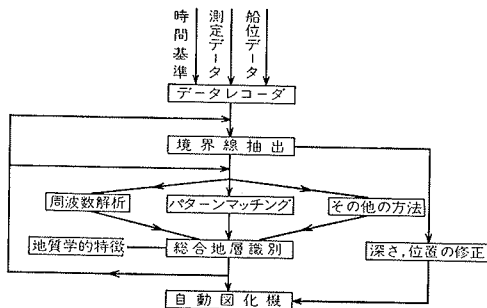
The purpose of this study is to find a method for automatically determining seabottom alluvium geology. The analysis consists of two processes—the process for extraction of facies boundaries and the process for extraction of characteristics which determine seabottom geology. Good results were obtained regarding the former with an experimental boundary extraction circuit. Regarding the latter, a frequency analysis was carried out and the result was that the frequency response of each layer might be considered as its own characteristic. Furthermore, application of the pattern matching method was investigated and a reflection model was consequently made. This is used to obtain sound wave patterns which are compared with reflected sound wave patterns received. The report explains the extraction of facies boundaries, results of frequency analysis, the pattern matching method and the accompanying sound wave reflection model.

概要

本研究は、ソノプローブ探査により得られた記録をもとにして、海底沖積層を、ヘドロ、粘土、シルト、砂、礫の5つに分類し、地質層序ならびに地層区分を自動的に決定することを目的とする。解析は、地層境界線の抽出過程と、地層を5つに分類するための地層の特徴抽出過程の2つに大別できる。前者については、試作した地層境界線抽出回路を用いて良好な結果を得た。また後者については、受信された反射音波の周波数解析を行ない、各地層の周波数特性が、特徴となり得ることを示した。さらにパターンマッチング法の適用を検討し、これを行なう上で必要となる比較用の音波パターンを得るために反射モデルを作った。本報告では、境界線抽出方法、周波数解析結果およびパターンマッチング法とそれに付随する音波の反射モデルについて述べる。

1. 序

ソノプローブ探査により得られた記録をもとにして



図一1 自動識別システム

海底沖積層の地質層序ならびに地層区分を自動的に決定するために、図一1のような自動識別システムを考えた。この図に沿って、解析作業を説明する。

まず地層境界線抽出回路により、水深、層の数および各層の厚さを決定する。次にこれらの情報により、層別の周波数解析、パターンマッチング、その他の方法により特徴抽出を行ない、これらの結果および測定場所の地質学的特徴により総合的に判断させて、地層の種類を決定する。

なお本研究では対象を沖積層とし、これを、ヘドロ、粘土、シルト、砂、礫の5つのパターンに分類する。

本報告では、境界線の抽出、周波数解析、パターンマッチングを中心に述べる。

2. 境界線の抽出

境界線の抽出過程は、すべての基準となる大事な作業である。

受信された反射波は、境界面での立ち上がり之急であることに注目して図-2のような構成の境界線抽出回路を試作した。

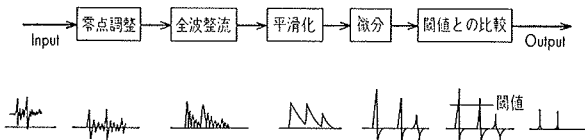


図-2 境界線抽出回路の構成

この回路へは、探査時に、データレコーダーに記録された反射音波が入力されるが、データレコーダーの零レベルと、この回路のそれを一致させるために、零点調整し、次にこれを全波整流し、さらに平滑化しもとの波形の包絡線をとる。この包絡線化したものを微分し、微分波形を閾値と比較し、閾値より大きいものを境界線とするのである。

この回路は閾値が可変であり、初めは低く設定しておき、総合判定の結果、必要に応じて徐々に高くしていけば、境界線をのがすことなく、又多重反射を境界線と誤認することを避けられる。

この回路を用いて境界線の抽出をした例を図-3～5に示す。これらにおいて①は入力音波波形、②は平滑化した波形、③は②の波形を微分したもの、④は境界線パルス列を表わす。



図-3 境界線抽出例 (閾値小)



図-4 境界線抽出例 (閾値適正)

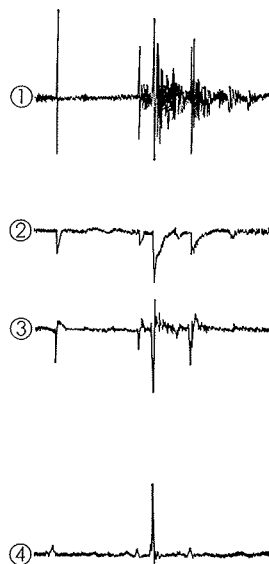


図-5 境界線抽出例 (閾値大)

これらは順に閾値を高くしていったものであり、図-3は不必要なパルスまで表われており、図-5では逆に必要なパルスが出ていない。

3. 周波数解析

3.1. 入射波の周波数解析

送波器の真下に受波器を設置し、この状態で送信することにより水中における実際の送信波をとらえた。この入射波形を図-6に示す。

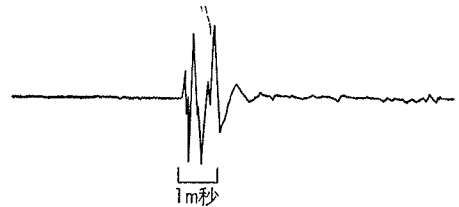


図-6 入射波形

このようにして得られた入射波をスペクトルアナライザーにより解析した結果、入射波は、2.1kHz、3.6kHz、5.3kHzの3つを主周波数成分とする波形であることがわかった。

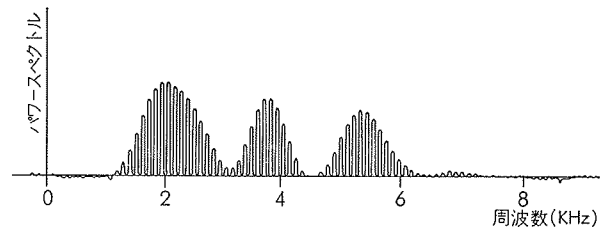


図-7 入射波の周波数解析結果

ただし、使用したスペクトルアナライザーの分解範囲は2.5kHzまでであったので、データレコーダーで $1/4$ に減速してスペクトルアナライザーに入力した。図-7に周波数解析結果を示すが、これは実際の周波数に換算してある。

3.2. 反射波の周波数解析

減衰項を含んだ非定常な波形にはスペクトルアナライザーを使用できないので、計算機を用いて3つの例についてフーリエ解析を行なった。

このときの層の種類等を表-1に示す。

	水深	層1の種類	層1の厚さ	層2の種類	レンジ
No.1	8.1m	シルト質粘土	7.3m	礫	50m
No.2	10.3m	シルト	9.5m	礫	25m
No.3	9.5m	砂質シルト	8.1m	礫	50m

表一

ただし、AD変換器へはデータレコーダーで1/256に減速した信号を入力しており

AD変換器のサンプリング間隔：1ミリ秒
フーリエ変換の分解範囲：70Hz～7000Hz

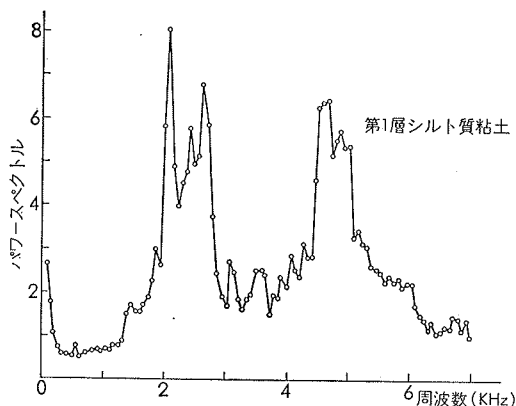
データ No. 1～3 の第1層の周波数解析結果を図一8～10に示す。ただし図一8は12個、図一9は5個、図一10は9個の音波の解析結果を平均したものである。

3.3. 考察および結果

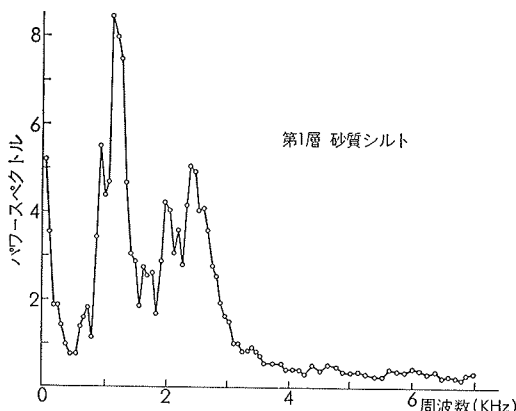
(a) 反射波の周波数成分には、3例とも入射波には含まれていない周波数成分がある。これは層が周波数変調機能を有するとも考えられる。

(b) 図一9、10においては、3.5kHz以上の周波数成分がほとんど表われていないが、これは受信器のバンドパスフィルターによってカットされているためであると思われる。

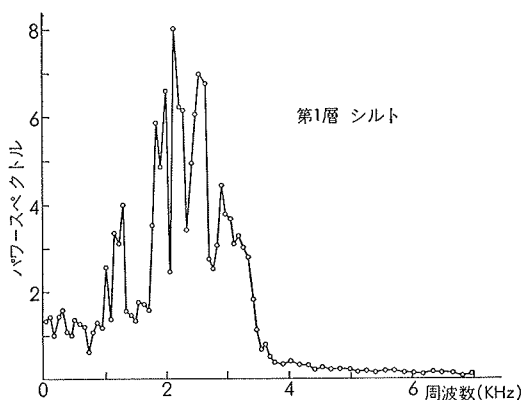
(c) 図一8～10を比較すると図一9と10では1.3



図一8 周波数解析結果 (データ No. 1)



図一9 周波数解析結果 (データ No. 2)



図一10 周波数解析結果 (データ No. 3)

kHz および 2.1kHz～2.8kHz に大きな周波数成分があり、図一8 では1.3kHz 付近には大きな成分がない。

表一が正しければ、データNo. 2と3は層の種類が似ており、データ No. 1とは異なるので、層固有の周波数特性といえるであろう。ただし表一に記した層の種類は確定的なものではなく、従来の解析方法による解析結果であり、この結果によれば、データ No. 2には2層しかないが、波形を見るとその上に更にもう1層あるように思われる。

(d) 層に周波数変調機能がないと考えると、このような周波数特性は、層素(後述)での反射率 r および透過率 t に周波数依存性をもたせることで一部説明がつく。このように考えると、周波数特性は層の種類だけでなく、厚さにも関係してくるはずである。この場合厚さの影響は、各周波数成分を $f(\omega)$ 、厚さを d として、 $\sqrt{f(\omega)}$ なる変換をすることにより取除けるはずであるが、これらは今後の課題である。

4. パターンマッチング

水深、層の数および各層の厚さがわかっているときには、層の数を n とすれば、分類するカテゴリーは5個であるから、層序の組合せは 5^n を越えない。隣接する層が同じではないすべての組合せを考え、そのおのおの場合のモデルパターンを計算し、試料と比較する。例えば、試料が $Y(t)$ 、各モデルが $y_i(t)$ で表わされるとき

$$\delta_i = \int \{Y(t) - y_i(t)\}^2 dt$$

を計算し、 δ_i が最小によるときの i を i_0 とすると、この試料の層序は、モデル y_{i_0} のそれと同じであると決定するという考え方がパターンマッチング法である。評価基準としては、このほかに差の絶対値の積分の大小等も考えられる。

このようにパターンマッチングするためには、何らかの比較パターンが必要である。この比較パターンを

与えるため及び反射波の意味づけをするために、音波の反射モデルを考えた。

4.1. 反射モデル

この音波反射モデルは次の仮定にもとづく。

- (a) 発信波は指向角 0° のパルス波とする。
- (b) 層内での吸収、散乱はないものとする。
- (c) 層の境界面は水平であり、これに垂直に音波を入射する。
- (d) 海を含め各層は均一である。
- (e) 海水および海底下の各地層をそれぞれさらに細かな層（以後これを層素という）に分ける。すべての層素は水平かつ等間隔であり、音波はこの層素上でのみ変化をうけ、層素間では変化しない。仮定(b)により層素上での変化には反射と透過の2種類のみが存在する。

図-11にこの反射モデルの説明を示す。実際には入射音波は海面に垂直に入射するのであるが時間経過を明らかにし、説明を簡単にするためにこの図では音波を斜めにしてある。

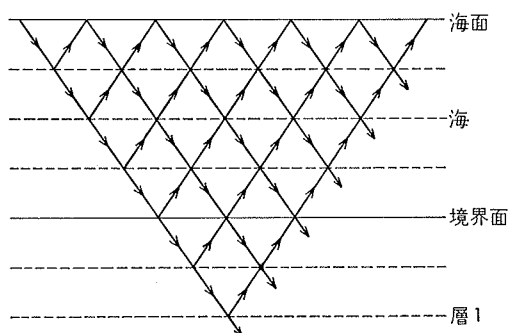


図-11 音波反射モデル

上図-11において、水平な破線は層素を表わす。斜めの矢印付きの線は音波を意味し、矢印の向きは音波の進行方向を表わす。右下がりの矢印は透過波を、右上がりの矢印は反射波を示すものである。

図-11の拡大したものを図-12に示す。この図では

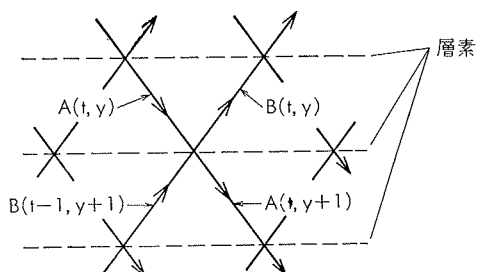


図-12 音波反射モデル

横軸に時間 t を、縦軸には水深 y をとってあるが、これは普通の連続座標とは異なり、層素を介して不連続な変化をするものとする。このように定義された座標 (t, y) を用いて透過波のエネルギーレベルを $A(t, y)$ 反射波のそれを $B(t, y)$ とすると $A(t, y)$ と $B(t, y)$ は次の関係式で与えられる。

$$A(1, y+1) = \begin{cases} t_0 \times A(1, y), & y \neq y_0 \\ T \times A(1, y), & y = y_0 \end{cases}$$

$t \neq 1$ のとき

$$A(t, y) = \begin{cases} R_0 \times B(t-1, y), & y=1 \\ t_0 \times A(t, y-1) + r_0 \times B(t-1, y) & 1 < y \leq y_0 \\ T \times A(t, y-1) + R \times B(t-1, y) & y = y_0 + 1 \\ t \times A(t, y-1) + r \times B(t-1, y) & y > y_0 + 1 \end{cases}$$

$$B(t, y) = \begin{cases} t_0 \times B(t-1, y+1) + r_0 \times A(t, y) & 1 \leq y < y_0 \\ T \times B(t-1, y+1) + R \times A(t, y) & y = y_0 \\ t \times B(t-1, y+1) + r \times A(t, y) & y > y_0 \end{cases}$$

上式においては海以外に層が1つの場合を想定しての式であるが層が複数になっても基本的な関係は不変である。

ただし y_0 : 海底面の深さ

r : 層素での反射率

t : 層素での透過率

R : 境界面での反射率

T : 境界面での透過率

添字 0 は海水の反射率等を表わす。

R, T は固有音響インピーダンスにより定義される。また仮定により、層素上ではエネルギー保存則が成立するので

$$r+t=1$$

$$r_0+t_0=1$$

t と音圧の減衰率 α との間には、層素間の距離を d として

$$2\alpha = -1/d \log_e t$$

が成立する。なぜなら減衰率とは、媒質を単位長さ当り伝播するとき、もとの音圧の $e^{-\alpha}$ 倍になったとしての α で定義される量であり、本モデルでは、単位長さ当りエネルギーが $t^{1/d}$ 倍になるからである。

よって音響インピーダンス、減衰率 α 、および層素

間の距離 d を決めてやれば、計算に必要なすべての定数が求まる。

このモデルにおいては、発信器から $A(1, 1)$ なる音波を放射し、受信器で時系列信号 $B(t, 1)$ ($t=1, 2, 3, \dots$) を受信すると解釈するわけである。

$A(t, y)$, $B(t, y)$ の解析解を求めることが困難だったので計算機を用いて計算した結果例を図-13に示す。ただし、エネルギーと音圧の変換の際の比例定数項は省略してあり、縦軸の目盛は相対的な意味しか持たない。又音響インピーダンス、減衰率は文献により引用。 $d=0.5\text{m}$, $A(1, 1)=1.0$

4.2. 考察

(a) 実際の反射波の第1層と第2層の間の凸部は低周波のノイズと思われる、このモデルは定性的な傾向をよく表わしている。

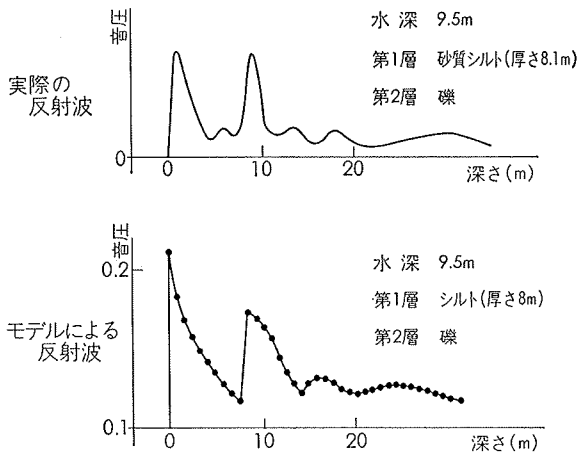


図-13 実際の反射波パターンとモデルの反射パターン

(b) 湯瀬 (文献2) 参照) により、砂層や礫層は多重反射をおこしやすいことが報告されており、モデルパターンにもこの傾向が表われている。

(c) 振幅の大きさ等の定量的な面では、実際の反射波パターンとの間に差があるので、モデルの改良をする必要がある。これができれば、パターンマッチング法はかなり有効であると思われる。

5. まとめ

5.1. 境界線抽出過程

解析システムにおいて重要な役割を果たす。試作した境界線抽出回路を用いて境界線の抽出を行ない良好な結果を得ることができた。

5.2. 特徴抽出過程

周波数解析とパターンマッチング法について述べたが、前者は、層が固有の周波数特性を持つらしいことを示した。データを蓄積する必要がある。又後者については、パターンマッチング法の基本的な考え方および反射モデルについて述べたが、反射モデルを改良することにより、パターンマッチング法はかなり有効な手段となろう。

参考文献

- 1) 実吉・菊池・能本, 超音波技術便覧 (1966)
- 2) 湯瀬, 海底地層の自動認識に関する研究 (1973)