

# 海底地層の自動識別に関する研究 (その4)

原 田 暁 細 野 成 一  
(本社 技術本部 海洋開発部) (本社 技術本部 海洋開発部)

## Automatic Facies Recognition of Bottom Sediments (Part 4)

Akira Harada Seiichi Hosono

### Abstract

This research concerns a method of analysis and standardization of Sonoprobe data. The aims of the research are to classify alluvial sediments objectively by Sonoprobe data and to correctly draw submarine soil profiles. Formerly, conventional analysis was mostly dependent on experienced experts, but this research aims to make quantitative analyses in the acoustic engineering field so that it will be especially useful where no boring log exists. The profile shown by the research, rather than being a geological section, is a kind of geotechnical soil section represented by water content ratio of sediments. This research is therefore very useful in the field of technology. This paper refers to the analysis principle, necessary acoustic parameters, and experimental results of the last 4 years.

### 概 要

本研究は、磁歪振動式音波探査記録の解析手法および基準化に関するもので、①音波探査の層相判定を極力客観的にすること、②解析結果を正確に図化することを目的としている。従来、磁歪式音波探査の解析に当っては、熟練者の経験にすべて頼っていたが、本研究では、音響工学の分野から、定量的、客観的に解析することを試みた。本報は、従来の解析方法の問題点、本研究による解析手法の原理、4ヶ年の実証実験の結果等について言及している。また、音波探査の結果は、地質断面図というより、含水比に代表される土質断面図であることを示した。

### 1. 序

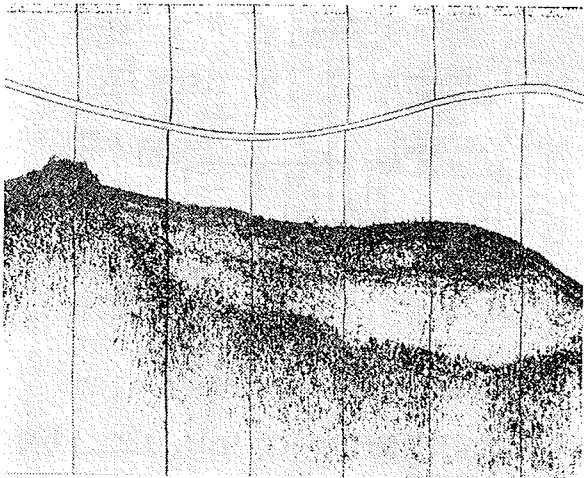
海洋開発の大水深化は、従来の海底地盤の調査法では経済的、技術的に不十分な面も生じさせており、水深100m位までの海域における調査技術の確立が緊要となっている。例えば、ドレッジは、マクロ的な底質判定には役立つが、投入位置の正確な測定は難しく、また調査測線の海底表面の平均的性質を表わしているにすぎない。他方グラブや重力式サンプラーは、あくまで一点の底質を表わしているにすぎず、海岸、河口付近などで底質の変化が激しい所では、一回の採取だけでは、その地点の性質を代表しているとは言い難い。またボーリングは、その地点の土質を目で観察できる点で有効であるが水深20m以深においては費用が急激に上昇する。一方音波探査は、経済的に、迅速に海底地質を調査できるが、正確性、土質判定の信頼性に劣り、特にボーリング

データの無い海域や層相変化の激しい海域においては、大きな問題となっているなどである。

著者らは、これらの問題を解決する一手法として、磁歪式音波探査結果を、音響学的観点に立って自動解析する研究を1973年に着手し、1981年電算機による解析手法を確立した<sup>1)~5)</sup>など。また、この数ヶ年に亘る現地実証実験<sup>6),7)</sup>などにより、信頼できる解析結果を得たので、ここにそれらをまとめて報告する。

### 2. 音波探査記録の解析・図化技術の現状と問題点

音波探査法はもともとアメリカで石油地質構造を求め非爆薬音源の地震探査法として開発されたもので、海中で音波を発射し、海底面下の地層境界面から反射してきた音波をとらえ、この記録から地層境界面並びに地質を推定する方法である。我国においても、1950年代か



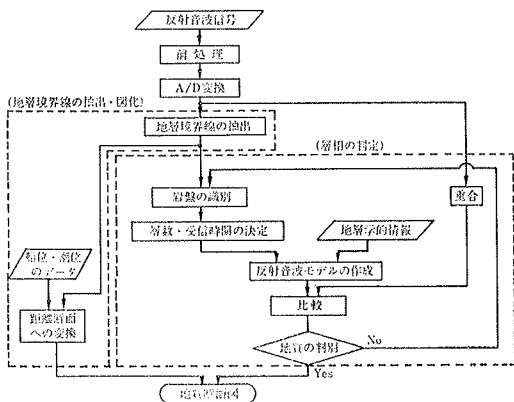
写真一 磁歪式音波探査記録の例

ら、各種の音波探査装置が導入、開発された。データ処理に関しては、石油探査などの低周波、高エネルギー音源の探査については、Water Reberberation 現象を抑えたり、探査記録の S/N を向上させ、地層境界線を見やすくする目的で、CDP 法や Deconvolution 法の技術開発が進められてきた。しかし、浅海域の比較的軟弱な地盤を対象とする音波探査は、その音源が高周波成分をもっていることもあり、次の理由により、この十数年間、データ処理技術は目ざましい進展を見せていないようである。

- (1) デジタル処理を行なうにはサンプリング時間を短くせねばならないという技術的制約があったこと
- (2) 探査記録自身が比較的分解能がよく見易いこと
- (3) これまでの対象海域は港湾が多く、土質の判定にあたってはボーリングデータを参考にできたこと

写真一は磁歪式音波探査の記録の一例であり、従来の解析法では、熟練者が地層境界面と考えられる強い反射面を抽出し、表一に示すような判定基準で土質を判定していた。しかし、この方法では、

- (1) 経験豊かな技術者を必要とする



図一 電算機による処理フロー

	ヘドロ (Sludge)	粘土 (Clay)	シルト (Silt)	砂 (Sand)	レキ (Pebble)
層中の濃度	白くぬける	白くぬける	やや白い	やや黒い	黒い
境界面の形状	平坦	平坦	やや平坦	でこぼこ	でこぼこ傾斜
境界面の濃淡強度	やや弱い	やや弱い	弱い	強い	強い
多重反射	ほとんど無し	非常に弱い	弱い	鮮明	鮮明
下部地層情報	鮮明	鮮明	鮮明	不鮮明	不鮮明

表一 磁歪式音波探査記録の判定基準の一例

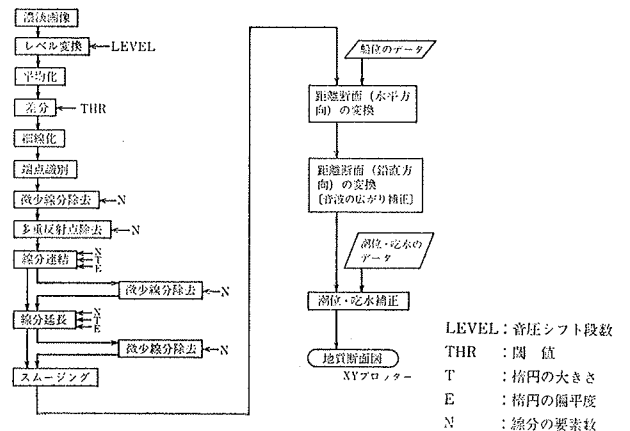
- (2) 地層の判定を誤る可能性も大きい
- (3) 時間軸から距離軸への変換は、すべて手作業によっていたため、変換誤差が比較的大きいという問題があった。

### 3. 電算機による自動解析の原理と結果

磁歪式音波探査の卓越周波数は 3~4 kHz であり、反射音波の包絡線波形(以下「音波波形」という)のピーク位置は地層境界面の深さを、またピークの高さと減衰状況は、海底土質の性質をよく反映している。したがって、逆解析することによって海底土質断面図を描くことは可能となる。図一は、電算機による場合の、全体の処理フローを示したものである。図中左側が地層境界面の抽出・図化、右側が層相判定のフローである。

図二は、前者の処理内容を更に詳しく示したもので各処理要素の内容は既報<sup>5)</sup>の通りである。図三は、この処理によって得られた図面の例である。これまでの実証実験によれば、地層境界面の検出誤差は、1~2 サンプルタイム(数+cmに相当)のようである。

層相(土質)の判定は図四の通りである。海底地層中を音波が伝播する機構の研究としては、Morse,



図二 境界面抽出・図化のフロー

LEVEL: 音圧シフト段数  
 THR: 閾値  
 T: 楕円の大きさ  
 E: 楕円の偏平度  
 N: 級分の要素数

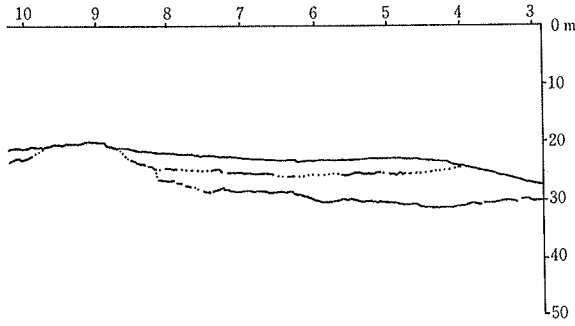


図-3 図化の結果例

Mackenzie, Hamilton などが海底地層を吸収性液体モデルや粘弾性固体モデルとして取扱い、海底面の反射率や地層中の減衰率を求めている<sup>8)~15)</sup>。しかし、これらの研究の多くは、音波の広がりを見放し、地層境界面や層内中での散乱現象を考慮していない。筆者らの研究によれば、反射音波は、反射率や減衰率に強く依存しているもの、砂や礫については、音波の広がりや散乱現象も考慮に入れないと正確な音圧は算出できない。

そこで筆者らは、図-5 に示す音波伝播モデルを考え、反射音波強度（音波波形） $I_R$  を境界面反射音波強度  $I_r$  と散乱音波強度  $I_s$  の和として定式化した<sup>3)</sup>。

ここに  $I_r$  は、音源から発射された音波が海底あるいは地層境界面から戻ってきた音波で、反射率  $r_0$ （音響インピーダンスの関数）、層内吸収係数（減衰率） $\alpha$ 、境界面側方散乱係数  $\sigma$ 、送受波器の指向性関数  $R_t, R_r$  の関数として表わされる。例えば、海底面からの  $I_r$  は、

$$I_r(x) = C_1 I_0 \frac{r_0}{\sigma_1} \iiint \left( \frac{l}{x+l} \right)^2 R_t^2 R_r^2 e^{f_1(\theta, \alpha_0, \sigma_1, x)} d\phi d\theta dx$$

また  $I_s$  は図-5 のモデル球殻全体から散乱現象で戻ってくる音波で、透過率を  $T (= 1 - r_0)$ 、層内散乱係数を  $S$  とすれば、例えば第1層からの  $I_s$  は次式となる

$$I_s(x) = C_2 I_0 T_{01} T_{10} S \iiint \left( \frac{l}{x+l} \right)^2 R_t^2 R_r^2 e^{f_2(\theta, \alpha_0, \alpha_1, x)} \sin \theta d\phi d\theta dx$$

但し、 $I_s$  は礫を除き、一般に  $I_r$  より相当小さい。

一方、海底軟弱層を伝播する音波の特性は、堆積物の含水比や粒子径により異なるため、堆積物の種類（層相）

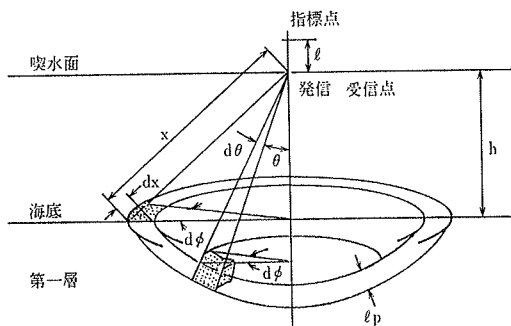


図-5 音波伝播モデル

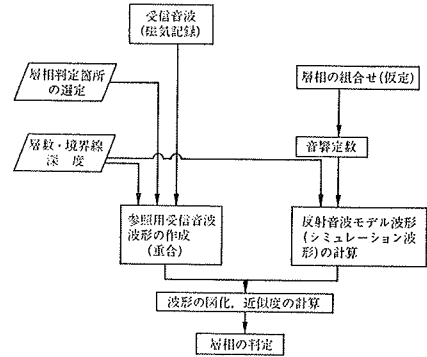


図-4 層相判定の処理フロー

に対応した音響定数が分かれば、上式により層相に対応した特定の波形を計算できる。したがって図-5 の手法をとれば、一義的に層相が決まるはずである。

本研究では、これらの音響定数のうち、 $\alpha$  は室内実験<sup>2)</sup>により求めたものを、音響インピーダンスは、外国の観測結果<sup>12), 15)</sup>などから想定したものを、 $S$  及び  $\sigma$  は、データが殆んど皆無のため、ボーリング結果と波形シミュレーション結果が一致するように仮定した。

音響インピーダンスは、音速と湿潤密度の積として求められる。図-6 は、音速と粒径の関係であり、また、湿潤密度は、飽和度 100% と考えて、含水比の関数となる。また、含水比は Trash なども指摘するように、粘性土では 50% 以上が多く、砂質土では 40% 以下が多く、かつ粘土質になるほど含水比が大きくなる傾向がある。従って見掛上、音響インピーダンスと粒径は一定の許容誤差のもとに、相関関係があると言える。他の音響定数も同様である。この条件のもとで層相判定した結果の一例を表-2 に示す。詳細は別報<sup>6), 7)</sup>などを参照されたい。

判定結果は全般的によく合っている。しかし、部分的に差が生じているところもある。これは、おそらく含水比-土質強度-の差によるものと思われる。実際には、音響諸定数は、含水比の関係とした方がより合理的である。このことは、粒径に比し、音波の波長が 100 倍以上もあることから、音波は粒径そのものより、マスとしての性質に強く影響されると考えれば、当然のことである。図-7 は、含水比と音響インピーダンスの測定例で

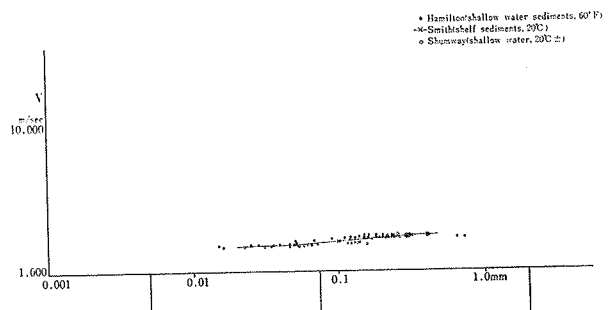


図-6 粒径と音速

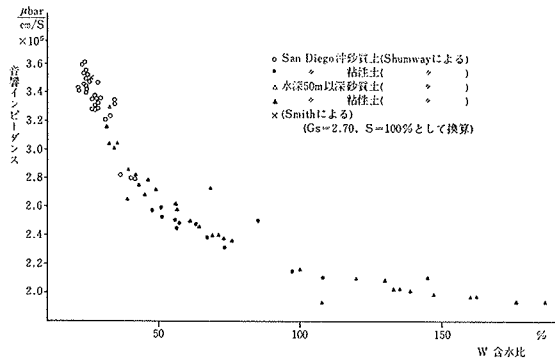


図-7 含水比と音響インピーダンス

あり、良い相関性をもっていることが分かる。また、減衰率は、著者らの実験においても、含水比の強い影響をうけている。

著者らは、既報において、層相判定の結果を混合土質として表示してきたが、現在は、表-3の右側の様に表示を変更すべきだと考えている。これまでの土質の表示記号は、すべてこのように読み替えて頂きたい。

#### 4. 解析システムの性能と今後の課題

著者らは、室内音響水槽実験と全国10海域以上の実証実験を通じて、海底沖積層の音波伝播モデルの定式化に成功し、それらをミニコン-磁気ディスクシステム(図-8、写真-2)として具現化した。本方式は、従来の磁歪式音波探査装置に磁気テープ装置を付加するだけでデータを採取できる。このシステムによれば、約1時間

の観測データを一度に処理できる。ミニコンは32kW NOVA-01で、磁気ディスクは10MBである。本システムの性能は、これまでの実証実験によれば、次の通りである。

- (1) 対象地質: 軟弱堆積物の砂質土、粘質土の区別と概略の含水比の推定
- (2) 対象水深: 3m~100mまで(但し懸濁物質が多いと浅くなる)
- (3) 深度: 海底下30m位
- (4) 精度: 土30cm
- (5) 処理速度: 約8km/日(土質断面図作成)

今回の研究の最大の特徴は、従来磁歪式音波探査の解析に当っては、熟練者の経験に全面的に頼っていたものを、音響工学の分野から定量的に解析しようとしたもので、ボーリングの無い、あるいは離れている海域には特に有効である。また層相変化の激しい所においても、多数の層相判定を行えば、その漸移傾向も把握できる。更にこれまでの経験から言えば、本研究によって得られる断面図は、地質断面図というより、堆積物の含水比によって代表される土質断面図に近く、工学的有益性も高い。

また電算機により地層境界線を抽出・図化させるため大量高速処理に寄与するのみならず、縮小、拡大などの距離断面変換時の誤差を大幅に縮小できることに留意すべきである。

同時に、磁歪式音波探査結果を電算機で解析・図化す

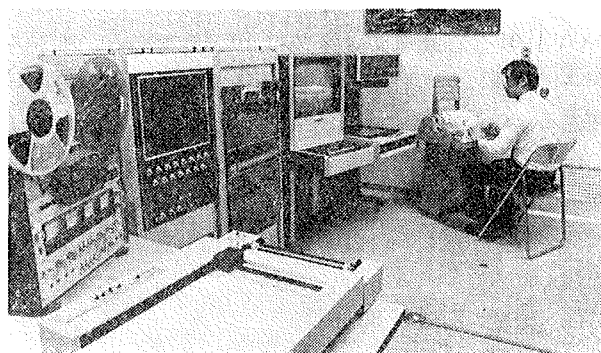
海域名	判定箇所	層相判定結果 (上位より)	ボーリング・採泥結果 (上位より)	備 考
東京湾	測線B-I P.14付近	N1~D2~S1 ~半固結	高含水比シルト質粘土~粘土質砂 ~細砂(N=10~30)~浮石シルト	
	測線B-II P.21~22	N2~D1~R1	シルト(一部貝殻混り)	海底下約4mに音波 散乱層
徳 島	測線W1-I P.3~4	(N2~S1~ R2)	細砂~シルト質砂~砂質シルト	吉野川河口のため、境界線が 表われず、解析不能
	測線WF-Ⅷ P.3~4	(N3~D2~ S)	シルト混り砂	港内で原地盤乱れのためか、 境界線出ず、解析不能
仙 台	測線D-Ⅳ P.3	S2~D2	砂~シルト質砂	砂層中に散乱あり
陸 奥	測線SC-II P.1付近	D2~R2	砂質シルト(採泥点No.57)	
	測線SD-VI P.8付近	S1~半固結	細砂(採泥点S-3)	
	測線SD-XI P.2付近	S1~R3	シルト質砂(採泥点S-1)	
	測線SD-XI P.8付近	S1~R2	砂(採泥点S-2)	
	測線SG-II P.12付近	S1~R3	貝殻混り砂(採泥点S-7)	

(層相判定結果の記号は表-3参照)

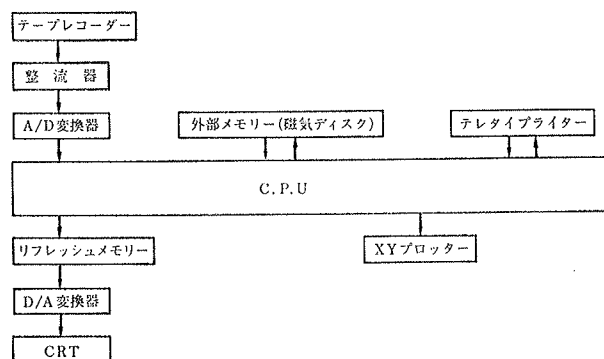
表-2 層相判定結果とボーリング、ドレッジとの対比

旧		新	
分類記号	内 容	分類記号	含 水 比
H 1	ヘドロ		150%
H 2			
H 3			
N 1	軟粘土	粘性土	130%
N 2	粘 土		90%
N 3	シルト質粘土		75%
D 1	粘土質シルト		50%
D 2	シルト		40%
D 3	砂質シルト		砂質土
S 1	シルト質砂	25%	
S 2	砂	20%	
S 3	粗砂 礫混り砂		20%以下
R 1	礫(φ4mm)	砂 礫	
R 2	礫(φ7mm)		
R 3	礫(φ10mm)		

表-3 層相判定の分類基準



写真—2 システム全景



図—8 システムの構成図

る研究は、未だ端緒についたばかりであり、幾つかの問題も残っている。これらの課題を解決し、より信頼性の高いシステムとして完成したいと考えている。これらの課題を最後に列挙する。

- (1) 音響諸常数の測定と統計的処理
- (2) 単一パルス音源による測方散乱波の解析への利用
- (3) 送受波器の指向性関数の確認
- (4) 絶対音圧測定による解析精度の向上
- (5) 砂質土の音速補正

### 謝辞

本研究は、1973年から始まった一連のものであり、多くの研究者の集大成によるものである。それらの方々には故松石秀之氏および小林 賢、古賀正綱、上村泰那、森山正樹の各氏などである。また、東京工業大学の梅谷陽二教授には全面的な御指導を頂いた。

更に、実証実験に当っては、建設省国土地理院の指導協力を頂いた。また、原データの採取や実証実験結果の検討には、国際航業(株)、アジアエンジニアリング(株)、シャトー海洋調査(株)、アジア航測(株)などの協力を頂いた。

ここに厚く御礼申し上げる。

### 参考文献

- 1) 松石秀之, 他: 海底地層の自動認識に関する研究 (その1), 大林組技術研究所報, No. 12, (1976), pp. 118~121
- 2) 松石秀之, 他: 海底地層の自動認識に関する研究 (その2), 大林組技術研究所報, No. 12, (1976), pp. 122~127
- 3) 原田 暁, 他: 海底地層の自動識別に関する研究 大林組技術研究所報, No. 14, (1977), pp. 119~123
- 4) 松石秀之, 他: 海底地層の自動識別に関する研究 (その2), 大林組技術研究所報, No. 16, (1978), pp. 80~83

- 5) 原田 暁, 他: 海底地層の自動識別に関する研究 (その3), 大林組技術研究所報, No. 22, (1981), pp. 105~109
- 6) 建設省国土地理院: 沿岸海域基礎調査報告書(東京湾地区), (1981), pp. 1~150
- 7) 建設省国土地理院: 海底地層探査記録の自動解析手法に関する研究(総括版), (1982), pp. 1~111
- 8) 橋本富寿, 他: 超音波による海底底質の判別に関する研究, 芝浦工業大学院研究報告, 4, (1975)
- 9) 木原純孝: 軟底質における超音波の反射透過特性, 港湾技研報告, Vol. 9, No. 1, (1970)
- 10) E. L. Hamilton: Geoacoustic Model of the Sea Floor, Physics of Sound in Marine Sediments, Plenum Press, (1974), pp. 181~222
- 11) H. P. Bucker: Sound Propagation Calculation Using Bottom Reflection Functions, Physics of Sound in Marine Sediments, Plenum Press, (1974), pp. 223~240
- 12) G. Shumway: Sound Speed and Absorption Studies of Marine Sediments by a Resonance Method-Part II, Geophysics, Vol. XXV, No. 3, (1960), pp. 659~682
- 13) E. L. Hamilton: Low Sound Velocities in High Porosity Sediments, JASA, Vol. 28, No. 1, (1956), pp. 1~9
- 14) H. Brandt: Factors Affecting Compressional Wave Velocity in Unconsolidated Marine Sand Sediments, JASA, Vol. 32, No. 2, (1960), pp. 275~306
- 15) D. T. Smith: Acoustic and Mechanical Loading of Marine Sediments, Plenum Press, (1974), pp. 41~62
- 16) 松本一明, 他: 港湾地域における土の工学的諸係数の相関関係について(第一報), 港湾技研資料, No. 71, (1969), pp. 1~40