

海底土質の判別法に関する研究

栗 村 康 彦*

A Study on the Detection of Sea Bottom Mud and Soil by Multifrequency Ultrasonic Reflection Method

By

Yasuhiko Kurimura

Investigations on echo soundings from the sea bottom of mud and soil have been carried out. The frequency characteristics of acoustical properties of Arakida and fly ash, which are typical soil of clay (very fine particles) and silt (relatively coarse particles) respectively, were obtained by a horizontal type experimental tank. The transmission and reflection echo characteristics on both soil were observed over a range of apparent density, from 1.01 to 1.5, at three frequencies, 200 kHz, 100 kHz, 14 kHz. At a fixed frequency, fly ash is far more transparent to ultrasonics, and gives weaker echo from the surface of soil than Arakida.

From these results, the nature of the soil of sea bottom can be determined by analysing the echo at many frequencies.

目 次

1. まえがき
2. 実験用海底土質の試料の選定
3. 試験装置と試験法
4. 透過および反射の試験結果
 - a) 透過特性
 - b) 反射特性
5. 海底土質の判別
6. むすび

1. ま え が き

音響測深機その他の水中音響測器は、最近海洋開発の進展に伴い各種の調査に利用することが考えられている。すなわち航路の安全余裕水深の測定のほか、アンカーの走錨防止のための底質判定、海洋開発機器の着底や係留時の支持力推定、海洋構造物の建設の際の海底土質調査用等々である。

上記の測定や調査用に音波を利用するについては、先ず、海底土質の音に対する反射特性が明らかにされていなければならない。海底表層は常に海水に接し深

部は多種多様な堆積物が積層されているため、音波の反射もしたがって複雑なものとなり、その反射記録の判読は難かしくなる。

この複雑な記録の中には貴重な海底の情報が入っているのであるから、底質の音波に対して示す反応現象を明らかにすれば、近づき難い海底の状態を海上より探知することが可能となる。よって、本研究は、底質とその密度を変えて周波数ごとに反射の特性を調べて記録の正しい読取り方と、音波による底質判別の可能性およびその限界について究めることを目的とした。

2. 実験用海底土質の試料の選定

海底の土質は場所毎にそれぞれの特徴をもっている。これは、その地域に河川が内陸より運び込んだ土の種類や火山の活動による地殻変動のためと考えられる。

図1はカリフォルニア海岸と大西洋の底質を調査した IIT¹⁾* の報告資料である。

この報告は底質が陸地よりの隔たりや深度によって変化することを示している。これらの各底質について

* Illinois Institute of Technology

* 海洋開発工学部 (原稿受付: 昭和46年12月13日)

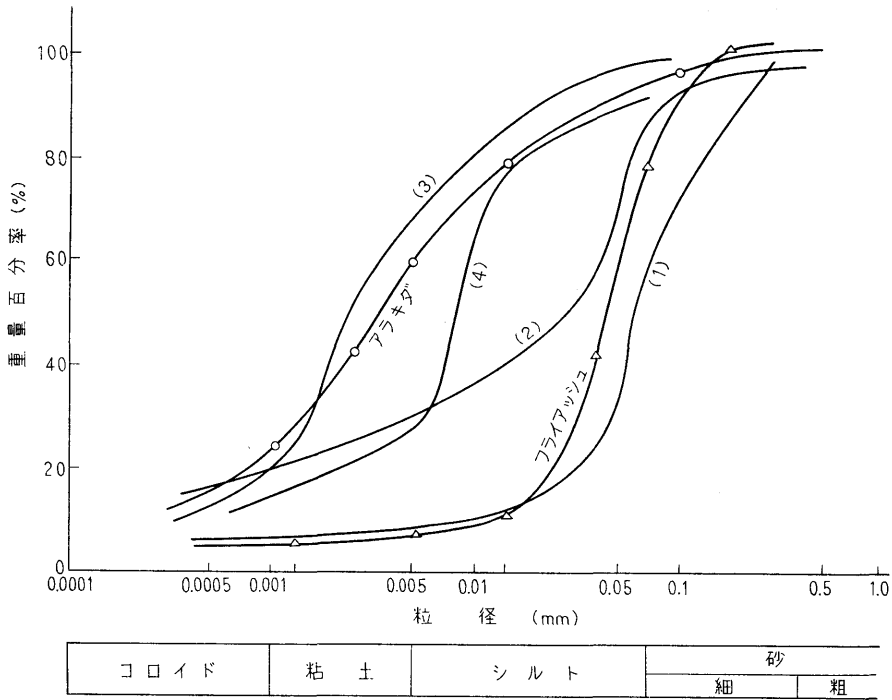


図 1 底質の粒径分布 (粒径加積曲線)

表 1 底質の特性

図 1 の記号	場 所	深 度	位 置	粒 径 分 布			土 質 分 類	真 比 重
				砂 %	シルト %	粘土 %		
1	カリフォルニア海岸	30 m	36° 6' N, 119° 11' W	70	21	9	シルト質砂	2.69
2	沖合 (i)	2,000 m	33° 48' N, 119° 36' W	10	63	27	粘土質シルト	2.65
3	沖合 (ii)	4,000 m	32° 1' N, 120° 38' W	0	31	69	粘 土	2.76
4	大 西 洋	3,000 m	34° 55' N, 74° 39' W	30	39	31	シルト質粘土	2.67
—○—	アラキダ			1	63	36	シルト質粘土	2.69
—△—	フライアッシュ			2	92	6	シルト	2.14

の特性を表 1 に掲げた。図 1 と表 1 により底質の場所による変化の傾向をみると、水深 30 m 程度の浅海は砂分が多く沖合の水深 2000 m 附近の砂分はわずか 10% となり水深 4000 m では砂分が 0 となる。同じく水深ごとの粘土の分布をみると砂の場合と正反対に増加の傾向にある。シルトの分布は不規則で水深に関係なく存在する。したがって沖合の底質は一般にシルトと粘土の混合したものであると考えることができる。しかし場所によっては、例えば記号 (4) に示された大西洋の底質のごとく砂とシルトと粘土がほぼ等量に混

り合っているところもある。

これらの砂、シルト、粘土の三粒径の土が混り合って混合土となった場合には、その粒径の分布状態により表 1 の右端の欄に示したごとく土質分類上の固有の名称がつけられる。この名称は図 2 に示した三角座標式土質分類法により区分して名付けることに約束されている。

以上にのべた底質の調査は外国の報告によるものであるがわが国の底質調査でも図 1 の底質粒径分布図と同様な底質調査結果が各現場から報告されている。

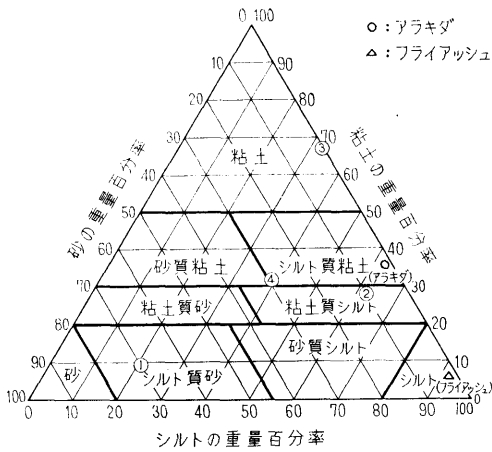


図 2 三角座標式土質分類法

よって底質の粒径分布から土質分類上の土の種類
の範囲が判明した。本研究では、以上に述べた底質中の
細粒の底質と粗粒の底質が、それぞれ音に対して示す
反応を究めることにした。この細粒と粗粒の底質を代
表する模擬海底土質試料を入手するため各種の陸土や
市販の人工土を調べた。その結果 図 1 中に (5) と (6)
の記号をつけて示したアラキダとフライアッシュを選
んだ。両者はそれぞれ底質中の細粒と粗粒の土質にほ
ぼ一致している。

図 3 はアラキダとフライアッシュの含水比と見掛
比重の関係を示した図である。含水比 W は一般に次
のごとく定義されている。

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

ただし w : 含水比

W_w : 水の重量

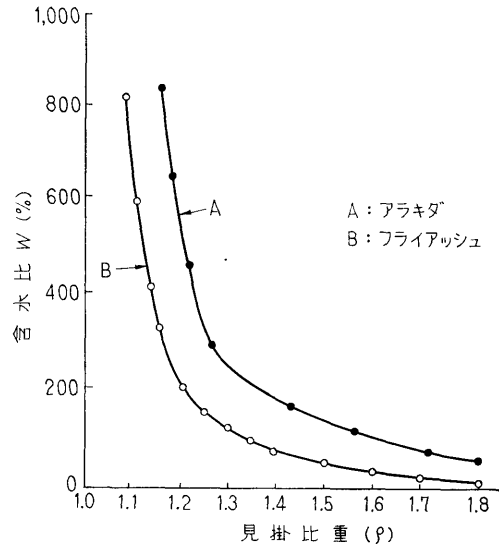


図 3 アラキダとフライアッシュの含水比-見掛
比重曲線

W_s : 固形部分の重量

アラキダの真比重は 2.69, フライアッシュは 2.14 だ
るが水中にあって水を含んだ見掛比重値で比べる
と, アラキダはフライアッシュより含水比は大きくな
る。また両者の含水比の差は見掛比重が小さくなるに
したがってその差は次第に大きくなる。これはアラキ
ダの土粒子がフライアッシュより微細で軽いため水中
の沈降速度が遅くあたかも水に溶け込んだような状態
になるものと思われる。

3. 試験装置と試験法

試験装置の概要は 図 4 の通りで、水槽寸法は長さ
7m, 幅 0.8m で水深は 1.2m の鋼製である。水槽の

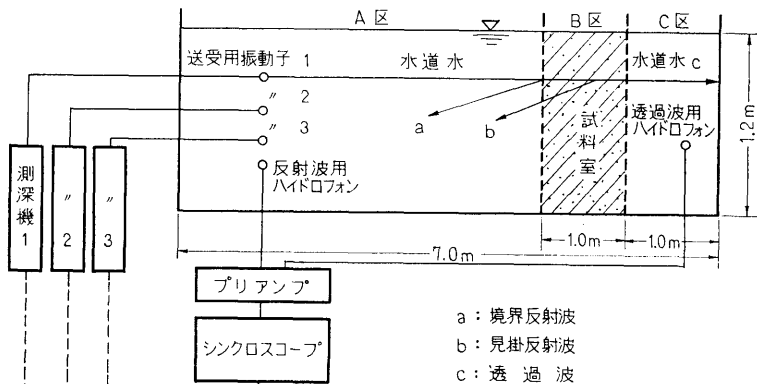


図 4 実験装置

一部を区切り試料の種類と濃度（見掛比重）を変えて試験を行なうための試料室がある。この試料室には外部より観察するためのガラス窓が取付けてある。測深機の送受信用振動子は試料室に直面させて設置し試料ごとのファクシミリ記録が取れるようにしてある。これとは別に反射波の受信用マイクロホンと透過波の受信用マイクロホンを試料室の前後に配置してあって、反射波と透過波の進行波形および到来時間の計測を測深機の発振部と同期させて2現象シンクロスコープで観測する。

図4に示すように水槽内のA区およびC区には水道水を注入してこれを媒質1とし、両区の中間のB区の試料室（両壁はアクリル板）には模擬海底土質となる試料を入れて媒質その2とすると、A区で発射された音波は媒質2に到達して一部は反射波aとなり、一部は透過波cとなる。

反射波と透過波の関係について、音響学的には次のように定義されている。媒質1の音響インピーダンス密度を $Z_1 = \rho_1 c_1$ 、媒質2のそれを $Z_2 = \rho_2 c_2$ とし図4の媒質1であるA区より、媒質2であるB区の模擬海底土質試料の境界面に音波が垂直に入射する場合、媒質2がある厚み l の層状になっているときは、反射率 R および透過率 T は、

$$R = \frac{\left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2}{4 \cot^2 \frac{2\pi l}{\lambda_2} + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2} \quad (1)$$

$$T = 1 - R \quad (2)$$

の関係がなりたつ。ここで λ_2 は媒質2の土質試料層の中における波長。 T はこの層を通り抜けて媒質3に再び出てからの音の強さと入射波の強さの比である。

透過試験のためには媒質2が入る土質試料室の厚さ l については、式より $l = \lambda_2/2$ またはその整数倍のとき、すなわち 7 kHz と 14 kHz の音は $l = 105$ cm、および 200 kHz の音では $l = 7.35$ cm のときに $R = 0$ および $T = 1$ となるから、B区の試料室は 7.35~105cmの厚みを加減できる移動壁とした。

4. 透過および反射の試験結果

海底土質の試験は各種の底質について逐一行なうべきであるが、今回は第2章で述べた理由でアラキダとフライアッシュの2種の試料による試験を行なった。以下この2試料による試験結果を述べる。

a. 透過特性

試料室内の媒質中の吸音減衰率および境界面の反射

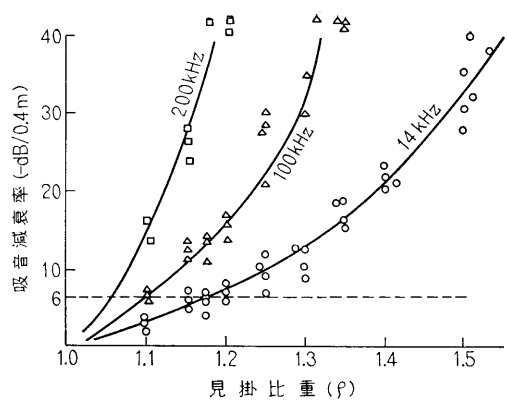


図5 アラキダの減衰率（吸音）

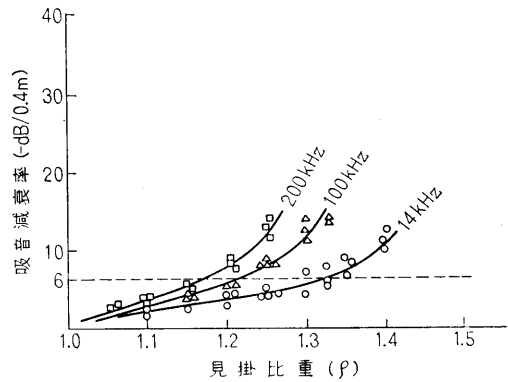


図6 フライアッシュの減衰率（吸音）

率は、

$$20 \log_{10} \left(\frac{\text{入射音圧}}{\text{透過音圧または反射音圧}} \right) \text{dB}$$

で表わした。

図5はアラキダの見掛比重 ρ と吸音減衰率の関係を一各周波数の音響ごとに測定した結果で、図6は同じくフライアッシュを測定した結果である。図5と図6のアラキダとフライアッシュの減衰率を比較してみると、アラキダはフライアッシュより非常に大きい減衰率を示している。

この吸音測定により、アラキダすなわちシルト質粘土の音の透過率は悪く、フライアッシュすなわちシルト質の透過率は予想外に良いことがわかった。

音圧の半減する値を dB で表わすと -6 dB であるから、図5および図6で減衰が -6 dB となる周波数ごとの浮泥の濃さを見掛比重 ρ で示したのが図7である。この図からわかるようにアラキダとフライアッシュでは、音の吸音減衰率は大きな差異を示してい

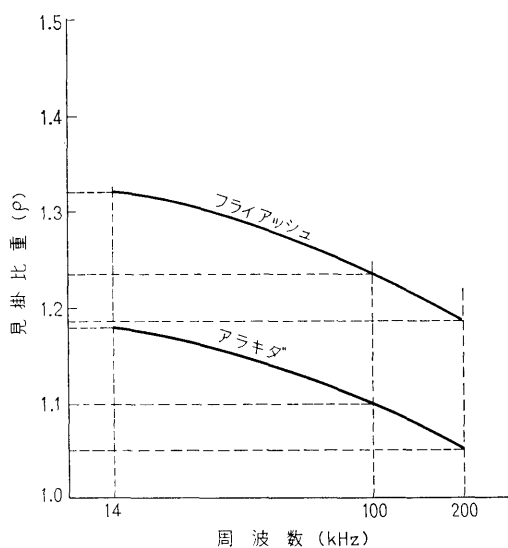


図7 アラキダとフライアッシュの半減値(吸音)

る。両者とも音の周波数が高くなるほど半減する ρ は小さくなる。

b. 反射特性

アラキダとフライアッシュのそれぞれの反響余裕値 M をマージンテスト法により 200, 100, 14 kHz の 3 つの周波数について求め、その結果を図 8 および 図 9 に示す。

ここで、 M 値は発振音圧と受信増幅器の感度を一定に保ち、各試料の濃度を順次増加したときの反射音

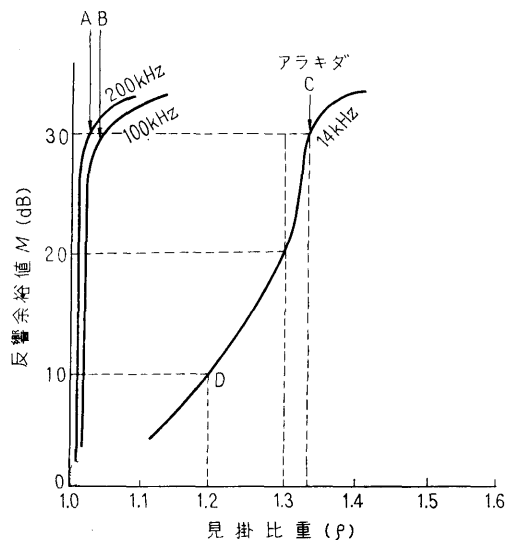


図8 アラキダの反響余裕値

の強さを減衰抵抗器で利得 0 まで減衰したときの抵抗値を dB に換算した値である。(図 10 と写真 1~5 は実験記録の一部である)

図 8 と 図 9 で両試料の反射率を比べてみると、アラキダはフライアッシュより明らかにすぐれている。アラキダは高い周波数の音響では、見掛比重の小さい場合にも強い反射を示し、200 kHz で 30 dB の M 値を示す見掛比重は 1.01 で非常に低い。フライアッシュで同じ M 値となる見掛比重は 1.06 でやや高い。

100 kHz でも同じ傾向を示し、30 dB の利得を得ることができる見掛比重は、アラキダで $\rho=1.02$ フライアッシュで $\rho=1.09$ とする。14 kHz でも同様で、30 dB の利得はアラキダで $\rho=1.34$ 、フライアッシュでは $\rho=1.5$ である。

図 11 は試料室の厚みを 1.0 m とし、背面に鋼板を入れて試料濃度を変えたときの測深機による見掛けの測深指示値である。アラキダの場合は水 ($\rho=1$) とわずかな濃度 ($\rho=1.01$) の試料の境界面で 200 kHz の音響はほとんど全反射に近いから測深値は試料面である。100 kHz で $\rho=1.01$ の反射はなく $\rho=1.02$ で試料面の測深記録がでる。14 kHz では $\rho=1.15$ で試料面より -45 cm の測深記録が薄くでる (-45 cm の誤差)。 $\rho=1.2$ では試料面より -20 cm の測深記録 (-20 cm の誤差) で記録濃度はやや濃くなる。 ρ が大きくなるにつれて測深誤差は小さくなり、 $\rho=1.34$ で誤差のない濃い記録濃度となる。14 kHz の反射は上述のごとく 200, 100 kHz に比べ桁違いに弱い。

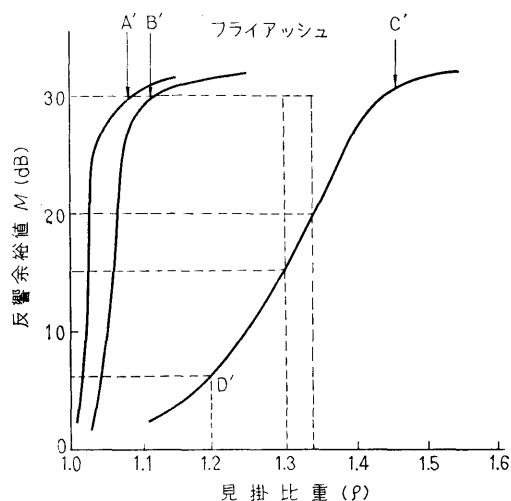


図9 フライアッシュの反響余裕値

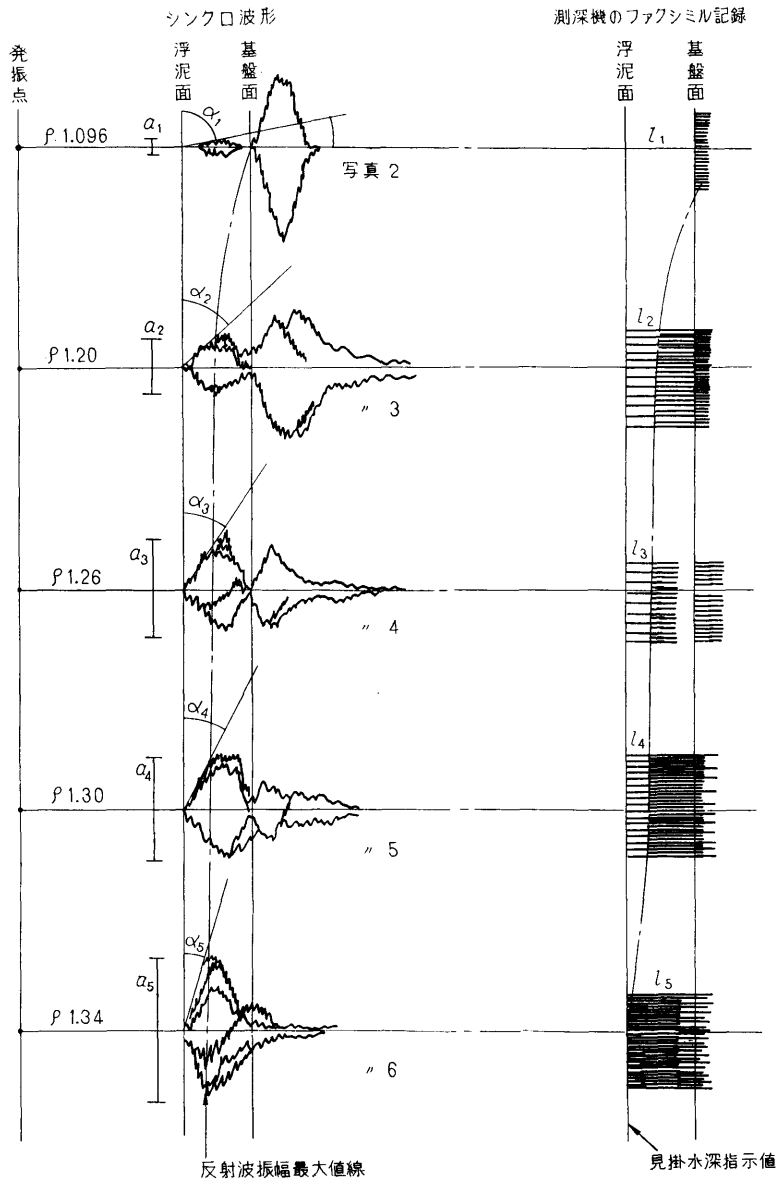


図 10 14 kHz のファクシミリ記録とシンクロスコープ波形

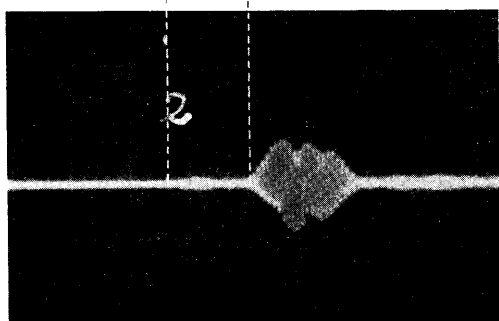
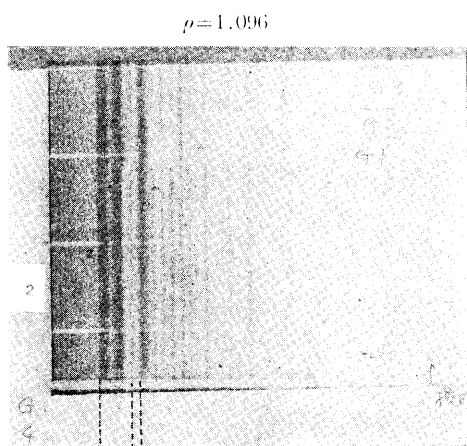


写真 1

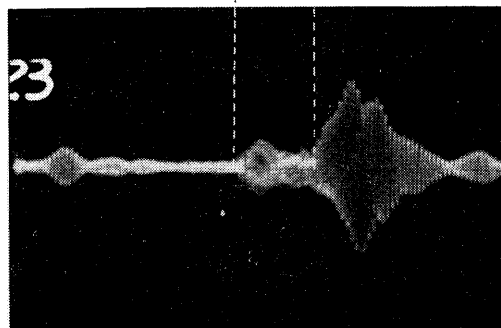
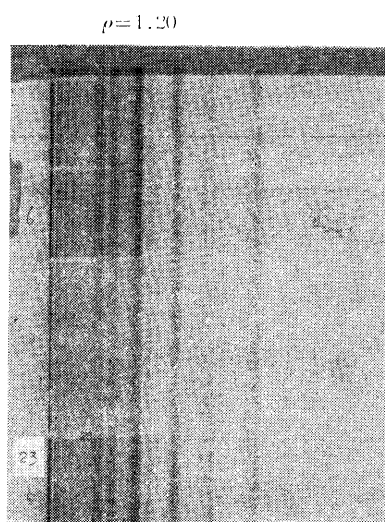
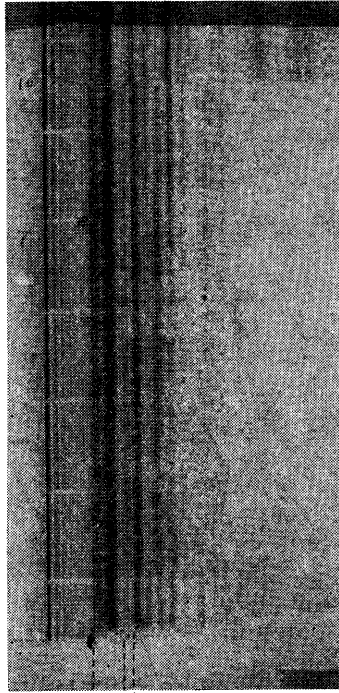


写真 2

$\rho=1.20$



管柱

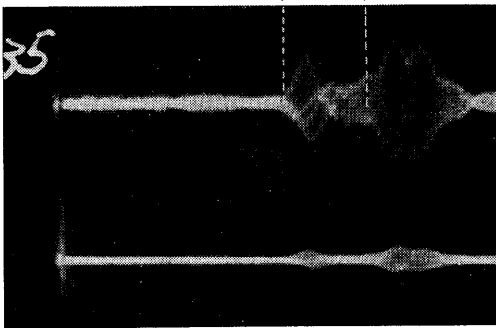
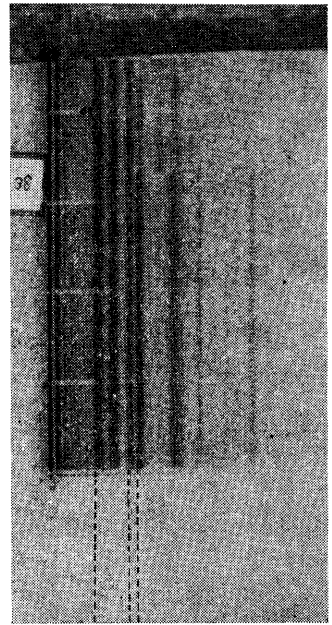


写真 3

$\rho=1.30$



管柱

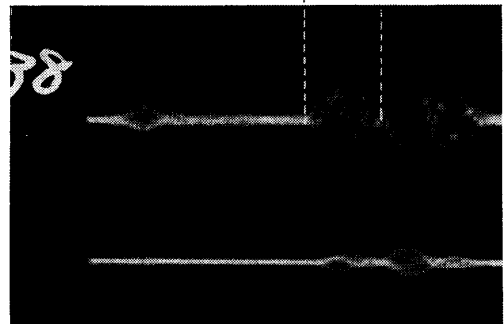


写真 4

$\rho=1.47$

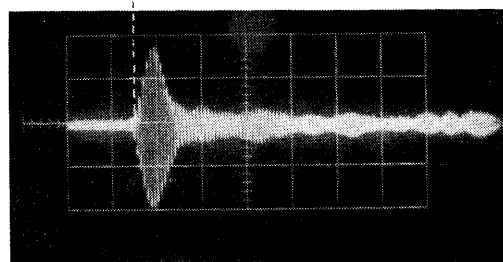
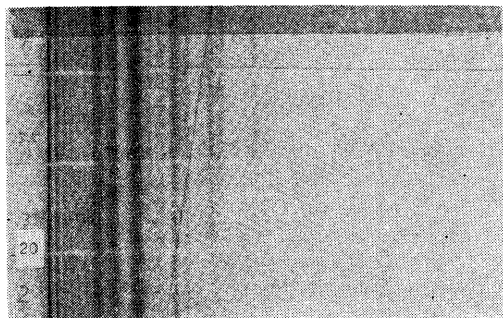


写真 5

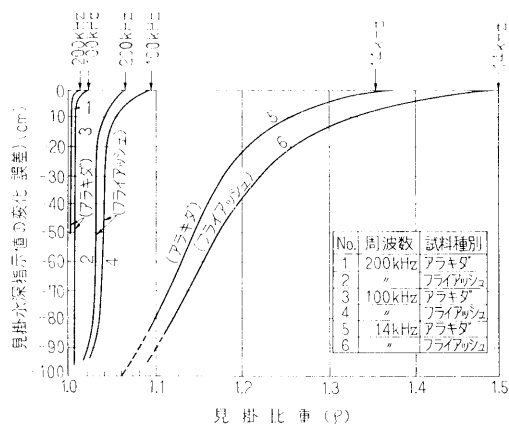


図 11 底質と周波数による見掛け水深の変化

次に、フライアッシュの場合はアラキダに比べ音響的透明度が大きく、試料濃度がある程度まで濃くならないと十分な反射が得られない。200 kHz で $\rho=1.03$ 程度は音響的に透明で、 $\rho=1.04$ になると測深誤差 -10 cm で薄い記録が表われはじめる。誤差が 0 の記録となるのは $\rho=1.06$ の濃さである。100 kHz では $\rho=1.05$ で測深誤差 -15 cm の薄い記録が表われは

じめて、 $\rho=1.1$ で誤差 0 となり記録は明瞭となる。14 kHz では $\rho=1.2$ で誤差 -30 cm の薄い記録が表われはじめ $\rho=1.3$ で -12 cm のやや濃い記録濃度となる。誤差が 0 の記録は $\rho=1.5$ である。

以上の反射試験により、底質の反射傾向は音の周波数が低くなると比重の小さい浮泥からの反射は記録ができ難くなる。また土質的にみると $\rho=1.5$ 以下の浮泥域では粘土系底質の方がシルト系底質より反射効率がよいということが判明した。

5. 海底土質の判別

前述の模擬海底土質の試験により判明したところの底質が音の周波数に対して示す特性を利用して、海底土質を判別する方法を示したのが図 12 である。

図 12 において、 $\rho=1.02$ のアラキダは 200, 100 kHz の音を試料面で 30 dB の強さで、測深誤差 0 の記録を示す。フライアッシュは $\rho=1.06$ の 200 kHz の音を 30 dB で測深誤差 0 の記録を示すが、100, 14 kHz の音は試料面を通過して背面の鋼板より反射音が帰ってくる。

次に $\rho=1.20$ のアラキダでは、200, 100 kHz が 30 dB で誤差 0, 14 kHz が 10 dB で誤差 -20 cm となる。フライアッシュは同じ ρ で 200, 100 kHz とも 30 dB で誤差 0, 14 kHz は 6 dB で誤差 -30 cm である。

このように 3 周波の音に対して、同じ ρ でも底質が変れば反射強度と測深指示値の値も変化するのであるか

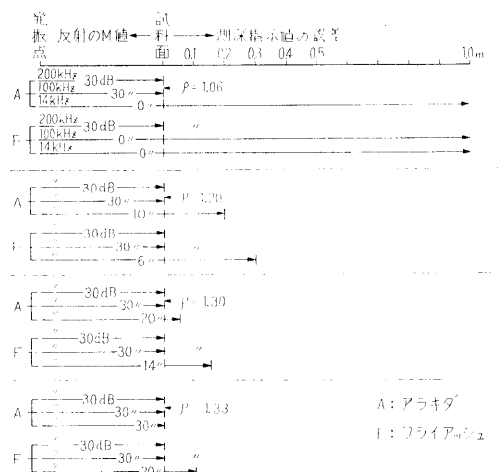


図 12 底質の反射強度と測深指示値の関係

ら、3周波（精度を上げるためにはさらに追加して多周波とする）の音に対する各種底質の反射強度と測深値の誤差を精密に調査することにより、「周波数、反射強度、測深誤差」のそれぞれの値を組合わせた音に対する底質モデルを作製するか、または連立方程式によって求めることができる。

6. む す び

本実験は底質の音に対する反応の示し方が、反射強度と測深誤差に表われることに着目して行なった音響測深機による底質判別法の一つである。

本判別法により底質を判別するには既存の測深機にも行なうことができるが、さらに高精度で判別するためには判別専用機を開発する必要がある。

現在、海洋開発の進展にともない底質調査の必要度

は益々増大している。本研究は単層海底の場合の報告であるが引き続き多重層海底の底質判別についての実験を行なっている。

参 考 文 献

- 1) E. Vey, R.D. Nelson: Environmental Effect on Properties of Ocean Sediments, Proceedings of the Conference on Civil Engineering in the Oceans, Sept. 1967, pp. 531~568.
- 2) 土屋明, 小川健一, 西村実: 超音波による浮泥層の探知に関する研究, 超音波研究会資料, No. 70—16 (1970—09)
- 3) 翁長一彦: アンカーの把駐力に関する理論的考察, 船舶技術研究所報告, 第4巻第6号, 昭和42年11月, pp. 199~216.