

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

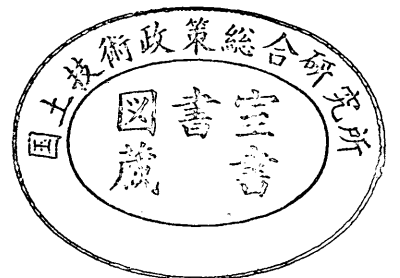
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 9

NO. 1

MAR. 1970

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第9巻 第1号 (Vol. 9, No. 1), 1970年3月 (March 1970)

目 次 (CONTENTS)

1. 組グイの水平抵抗に関する実験的研究
..... 沢口正俊 3
(Experimental Investigation on the Horizontal Resistance of Coupled Piles
..... Masatoshi SAWAGUCHI)
2. 港湾埋没に関する移動床模型の再現性—鹿島港模型実験の場合—
..... 佐藤昭二・田中則男・入江功・平原淳次 71
(Similitude of the model Test on Harbour-Shoaling in Movable Bed
—The Case of the model Test of Kashima Port—
..... Shoji SATO, Norio TANAKA, Isao IRIE, Junji HIRAHARA)
3. 水平全方向流速計の試作について (第1報)
..... 柴山煒彦・須藤茂 125
(A New Current-Meters of All-Direction-Type (1st Report)
..... Akihiko SHIBAYAMA, Shigeru SUDO)
4. 定置式波向計 (抵抗歪線型) の開発
..... 高橋智晴・鈴木禧実・佐々木弘 151
(On the Development of A New wave Direction meter
..... Tomoharu TAKAHASHI, Yoshimi SUZUKI, Hiroshi SASAKI)
5. 鋼直杭栈橋の耐震性に関する研究
..... 山本隆一・林聰・土田肇・山下生比古・小蔵紘一郎 179
(Evaluation of Seismic Stability of Trestle Type Pier with Vertical Steel Piles
..... Ryuichi YAMAMOTO, Satoshi HAYASHI,
Hajime TSUCHIDA, Ikuhiko YAMASHITA, Koichiro OGURA)

6. ふ頭エプロンの荷役活動と面積に関する研究
.....工藤和男・高力健次郎・久保重美..... 229
(Studies on Area of Wharf Apron and Related Cargo Handling Activities
.....Kazuo KUDO, Kenjiro KOHRIKI, Shigemi KUBO)
7. 軟底質における超音波の反射透過特性—フライアッシュ底質における室内実験—
.....木原純孝..... 275
(Reflection and Transmission Characteristics of Ultrasonic Wave in Soft Mud Layer
—An Experiment on Fly-Ash mud Sediment—
.....Sumitaka KIHARA)
8. 捨石均し機の開発
.....小岩苔生・大平勝・平山勇・白鳥保夫..... 307
(Development of a Leveling Equipment for Rubble Mounds
.....Taisei KOIWA, Katsu OHIRA, Isamu HIRAYAMA, Yashuo SHIRATORI)

7. 軟底質における超音波の反射透過特性

——フライアッシュ底質における室内実験——

木原純孝*

要 旨

軟泥層を適確に探知する超音波測深機を開発するには、周波数に応じて軟泥層からの超音波の反射・伝搬や、軟泥中の透過・吸収特性がどのように変化するかを究明する必要がある。このような事から、7周波方式の超音波探査機を、軟底質としてフライアッシュ底質を用いて室内実験を行なった。

実験結果および解析から、清水中にフライアッシュを懸濁させた水底沈澱物の見掛け比重が約1.5であり、その超音波周波数 f (KHz) と反射損失 L_m (dB) との間に次のような実験式が得られた。

$$L_m = 1.75 f^{0.27}$$

また、周波数 f (KHz) とフライアッシュ底質中の吸収係数 α_m (dB/m) との間に次のような実験式を得た。

$$\alpha_m = 12.5 f^{0.6}$$

この実験式によって、各周波数毎に総合伝送損失が求められ、且つ、探知可能距離と泥層探知可能厚さを、図式計算法により求めることが出来よう。

* 機材部 流体輸送研究室

7. Reflection and Transmission Characteristics of Ultrasonic Wave in Soft Mud Layer

—An Experiment on Fly-Ash mud Sediment—

Sumitaka KIHARA*

Synopsis

For the development of echo-sounder which detect efficiently the soft mud layer, it is necessary for us to study into the effect of ultrasonic reflection and propagation, transmission and absorption characteristics in soft mud layer.

So we experimented in the laboratory on the acoustic characteristic of the 7 frequencies ultrasonic echo-sounder in the fly-ash mud soft sediment.

Through the analysis of this experimental results, we found out that the specific gravity of fly-ash mud soft sediment was about 1.5.

The other side, reflection loss L_m (dB) and absorption coefficient α_m (dB/m) were expressed as follows:

$$L_m = 1.75f^{0.27}$$
$$\alpha_m = 12.5f^{0.6}$$

where f : frequency

From this empirical formula, we can take synthetic transmission loss and allowable distance of detection and allowable thickness of detecting mud layer.

* Member of Fluid Transportation Laboratory, Machinery Division

目 次

要 旨	275
1. まえがき	279
2. 実験装置および実験概要	279
2.1 実験装置および計測機器	279
2.2 実験概要	282
3. 実験結果および考察	284
3.1 水中超音波の反射透過特性	284
3.2 フライアッシュ底質における反射透過特性と総合伝送損失	289
3.3 探知可能深度と軟泥層探知可能厚さ	295
4. 結 論	300
5. あとがき	300
参考文献	300
記 号 表	300
附 録	317

軟底質における超音波の反射透過特性

1. ま え が き

軟弱な海底地盤の浚渫工事を行なっている港湾では、その掘り跡に相当の浮泥がたまり、その海域を深浅測量する際に、測深記録が不明確となり、またレッド法と併用した測量では、レッド法による深度と音響測深機による記録深度とに相違が生じたりする。また使用する音響測深機の周波数によって、超音波の海底からの反射特性がそれぞれ異なり、ビルドアップ特性と相まって、記録水深の変化の原因ともなって、多大の支障をきたしている。一方浚渫済みの航路や浚渫地域への浮泥の流入は、船舶の航行および構造物設置等に障害を生じ問題になってきている。この問題は、第14回港湾機械技術研究会¹⁾(昭和42年)や第18回直轄港湾技術研究会²⁾(昭和42年)の議題としてもとりあげられており、浮泥の除去ないし流入防止対策と共に浮泥探知用機器の開発が必要となってきた。

当研究所においても、浮泥ないしヘドロ等軟弱地盤に

おける音響測深機使用上の問題点の究明や、浮泥探知機開発のための基礎的資料を得るために、室内および現地実験等にて基礎的研究を行なっている。現地実験としては、昭和39年に東京湾、横浜港において行なった軟泥層探知実験³⁾があり、軟泥の性質と超音波周波数との関連性が部分的ではあるが、明らかとなった。

以上のような事から、昭和40年から43年にかけて、試作した7周波方式の超音波探査機⁴⁾を使用し、軟底質としてフライアッシュを用いた底質における超音波の反射特性や、フライアッシュ懸濁液による超音波の吸収特性等を実験水槽を用いて実験を行なった。本報告は、上記実験の内、第1報として、フライアッシュ底質における超音波の反射透過特性を調べた実験について記述したものである。

2. 実験装置および実験概要

実験に使用した超音波探査機は、発振周波数を11.5、

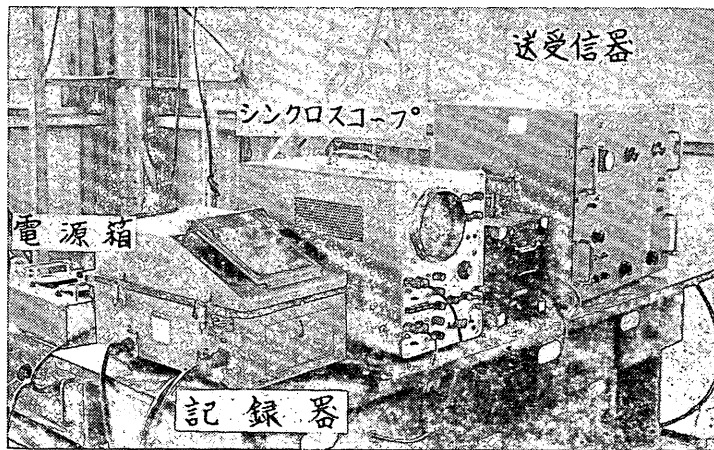


写真-1 超音波探査機の外観

24, 40, 100, 200, 500, 1000KHz の7段に切り換えて使用出来、発振出力も最低出力から最大出力まで連続的に切り換えて任意の出力で発振出来、且つ指向性も実験水槽で実験を行なうことを考慮して、各周波数共、半減指向角(半角)を6度以下におさえて鋭くしている。

次に、本実験に使用した実験装置や計測機器の主要目を示す。

2.1 実験装置および計測機器

(1) 超音波探査機

- a) 送信周波数 11.5, 24, 40, 100, 200, 500, 1000KHz 7段切換

- b) 送信出力 最大1KW_(p-p) (100Ω 抵抗負荷) 零から最大値まで連続可変
- c) 受信部増幅度 150dB 以上
- d) 送受波器指向角(半減半角) 1°~6°

(2) 測深実験水槽

- a) 水槽寸法 高さ10.5m, 内径2.4m
- b) 材質 鋼板製(内壁に松の吸音材付設)
- c) 攪拌装置 150mmサンドポンプ
- d) 媒質 清水(水道水)

(3) 計測機器

各周波数毎の水温を測定するためのサーミスタ温度

計、超音波パルスの波形を観測するためや出力測定のためのシンクロスコープ、反射強度や透過強度を測定するためのマージンテスト用の抵抗減衰器などがある。

(4) 水中受波器

軟底質の吸収特性を測定するために、水底に設置して透過波を受信するために試作した水中受波器がある。

表-1 水中受波器の特性

周波数 f (KHz)	振動子材質	寸法 (mm)	半減指向角 (度)	備考
11.5	フェライト	35×70	90.0	角型
24	"	40×40	70.0	"
40	"	40×40	34.5	"
100	チタン酸バリウム	20φ	27.0	円板型
200	"	20φ	13.0	"
500	"	10φ	10.5	"
1000	"	10φ	5.2	"

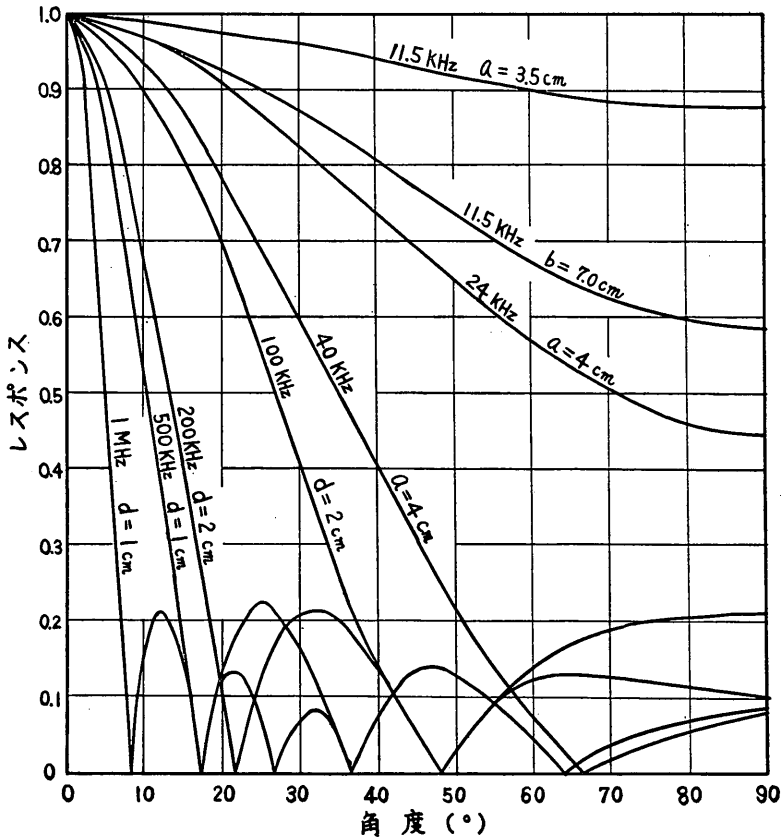


図-1 水中受波器の理論指向性特性

軟底質における超音波の反射透過特性

表-1 に水中受波器の特性を、図-1 にその理論指向性特性を示した。この受波器の特徴としては、軟底質中に設置して吸収特性を測定するため、受波面が送波器の指向軸より少しそれても確実に受信出来るように、比較的各周波数共、指向角度が大きくなるよう設計して作ったことである。振動子は11.5, 24, 40 KHz 共にフェライトの磁歪振動子を、100, 200, 500, 1000 KHz では、チタン酸バリウムの電歪振動子を用いた。そして、水底に

設置し、且つ泥中に埋め込んで使用するため、水圧等を考慮して、低周波においては、ナイロンケースに、100 KHz 以上では真鍮製の保護ケースに振動子を納めた構造となっている。図-1 で、a と b は角型振動子の超音波放射面の1辺の長さをcmで表わし、又dは円板振動子の放射面の直径をcmで表わしたものである。

写真-2 にその外観を示す。

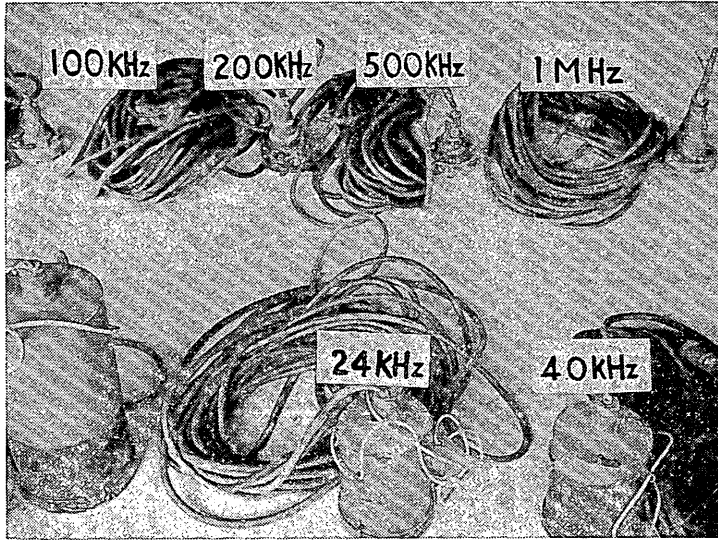


写真-2 水中受波器の外観

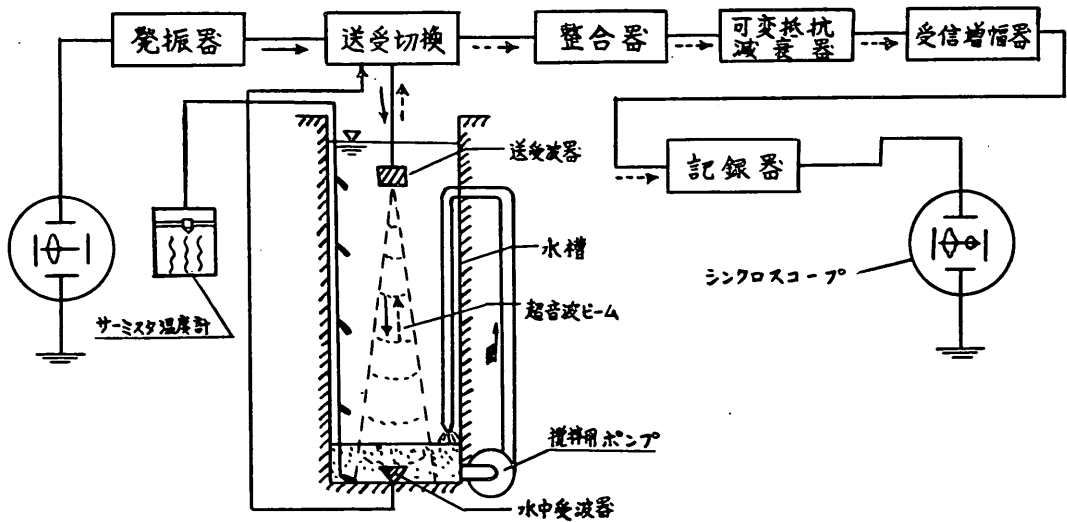


図-2 実験装置

2.2 実験概要

次に実験の概要を述べる。まず媒質が清水の場合で、底質が鋼板の場合の水槽の音響特性実験と、底質にフライアッシュを用いた、軟底質における超音波の反射透過特性実験について述べる。

(1) 水槽音響特性に関する実験

図-2 に示すように、実験水槽に送受波器を設置し、マッチングボックス（整合器）と受信増幅器の間に抵抗減衰器をそう入し、記録器観測端子にシンクロスコープを接続した。この状態で、超音波探査機を作動させて反響信号を記録紙に記録させ、その電圧をシンクロスコー

プで測定した。同時に抵抗減衰器で記録紙上の反響信号がちょうど消えるときの減衰量（dB）を測定し、それを反響余裕値（以下マージンと呼ぶ） M とした。なお、測定中、サーミスタ温度記録計で水温を連続測定記録した。また、送受波器の深度を種々変えて測定した。

上記実験を送信出力および受信感度を変えて、各周波毎にくり返し行なった。

その後、清水中の透過特性を調べるために、水槽の底に、写真-3 に示すように試作した水中受波器を設置し、水面から超音波を発射して、送受波器と水中受波器との間の超音波の透過特性を測定した。測定方法は上記反射

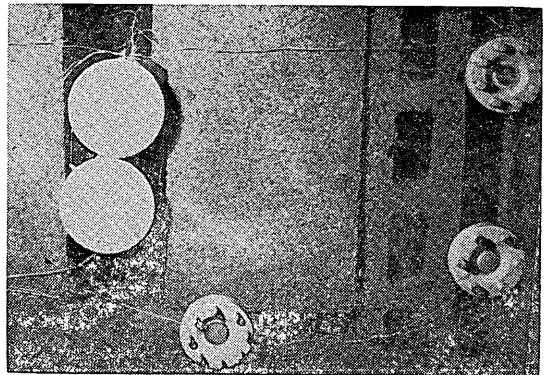
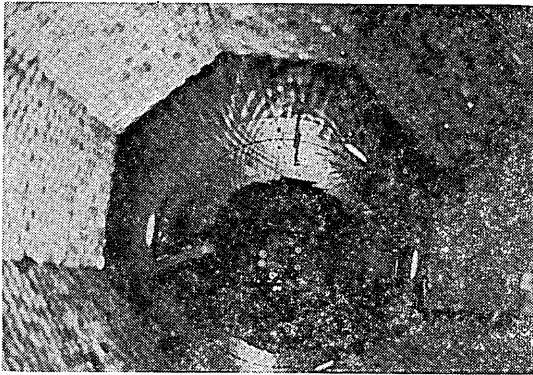


写真-3 水中受波器の水槽底設置状況

特性実験と同様に、マージンテスト法を用いた。

(2) フライアッシュ底質における反射透過特性実験

次に、軟底質における超音波の反射透過特性を調べるために、水槽底に軟底質材料としてフライアッシュを投

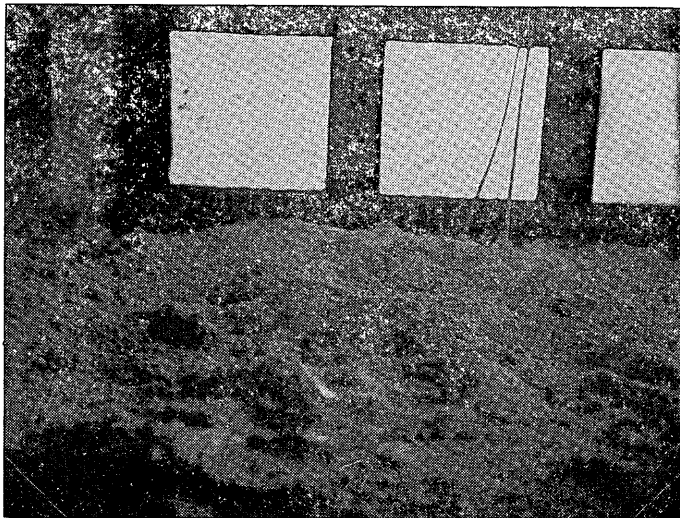


写真-4 フライアッシュ水槽底投入状況

軟底質における超音波の反射透過特性

入した。このフライアッシュは火力発電所の微粉炭燃焼によって生じた灰であり、粒径が200メッシュ以下の粉末で、粘結性が非常に小さく、水に入れば均一な液状となり、乾燥して固まったものは、手で容易に粉末とすることが出来る。

使用した字部ボゾランの比重は、粘土より約20%小さく、約2.04である。

以上のように、フライアッシュは比重や粘性では実際の海底の軟泥（ヘドロ、浮泥等）とは異っているが、粒子が非常に細かいので、この実験から軟底質の場合の超音波の反射透過特性を考えても、差支えないものと思われる。

図-3は、清水とフライアッシュとを混合した場合の見掛け比重 ρ_m と容積混合率 X_v 、および重量混合率 X_w の関係を示している。

軟底質を作る方法として、この実験では次のような方法を用いた。

まず水槽底にフライアッシュを1,920kg投入し、水を入れて攪拌用サンドポンプにて約30分以上、水槽中のフライアッシュと清水の混合液が均一な泥水になるよう攪拌した。ポンプ停止後放置し、約1週間経過した後、フライアッシュが完全に水槽の底に沈殿したことを確認した上、フライアッシュ底質の厚さを計るために、底面積が23.4cm²でcm²当りの重量が0.16kgの3.7kgレッドと、全重量が4.6kgでcm²当りの重量が0.007kgの3.7kgレッドに直径が30cmの鋼製円板を付けた皿付きレッドを用い

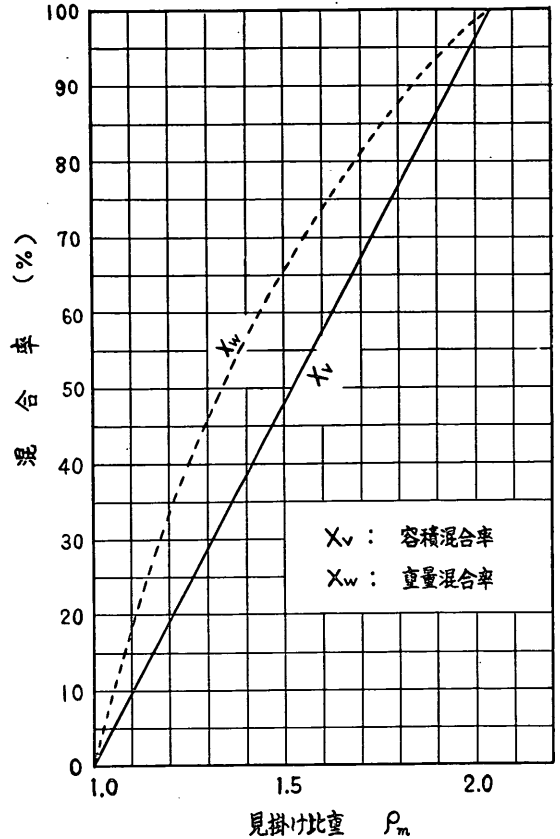


図-3 見掛け比重と混合率の関係

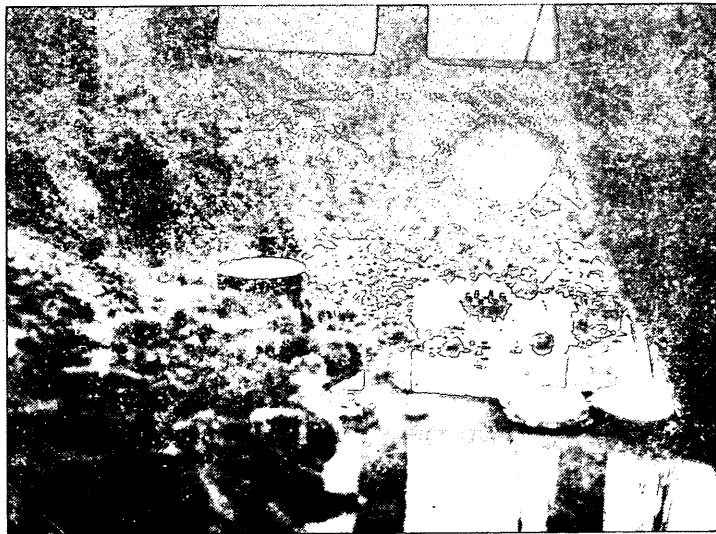


写真-5 フライアッシュ底質中の水中受波器
(受波器を底質中から掘り出したところ)

て、フライアッシュ底質の厚さを計測した。

次に、超音波探査機を作動させ、送受波器を水底から9.0mの位置に設置し、その反射特性をマージンテスト

法で測定した。また、受信方式を水中受波器に切換えてフライアッシュ底質の透過特性を各周波数毎に測定した。

表-2に、送信出力と受信感度を各周波数毎に示す。

表-2 送信出力と受信感度

項目 \ 周波数 f (KHz)	11.5	24	40	100	200	500	1000
パルス幅 (ms)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
パルス電圧 (v)	24.5	44.6	17.6	83.0	50.8	73.2	14.1
パルス電力 (w)	0.3	0.4	1.0	40	25	15	10
受信感度目盛	5	5	5	5	5	5	5

3. 実験結果および考察

以上の実験から、次のような結果が得られ、これらの測定値を用いて考察を行なって、反射損失、吸収損失を求め、最後に総合伝送損失から軟泥探知用測深機の設計に必要な泥層厚探知可能深度を求める解析方法が得られたので、以下順を追って記述する。

3.1 水中超音波の反射透過特性

測定時の気温は約24°C、水温21°C、湿度60%であった。図-4に各深度毎の水温分布を示す。

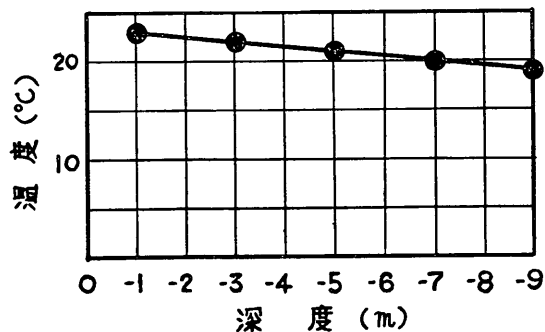


図-4 水温分布 (サーミスタ温度計による)

図-5には記録器感度目盛を変化させたときのマージン特性を各周波数毎に示した。この図によると各周波数共、記録器感度目盛 (Gain) を上げていくと、マージンMはほぼ直線的に上昇する。この直線の傾斜角が各周波数毎の受信増幅度を表わす。

図-6には、送信出力を一定として、送受波器を上下方向に昇降させたときの深度~マージン特性を示す。Sは送信機の送信目盛であり、Gは記録器感度目盛である。この図から、深度が10mでほぼ-20dBの曲線に乗るこ

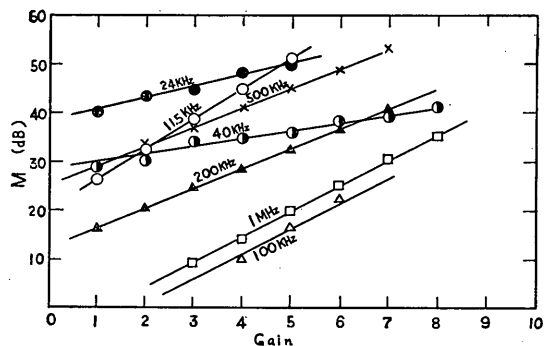
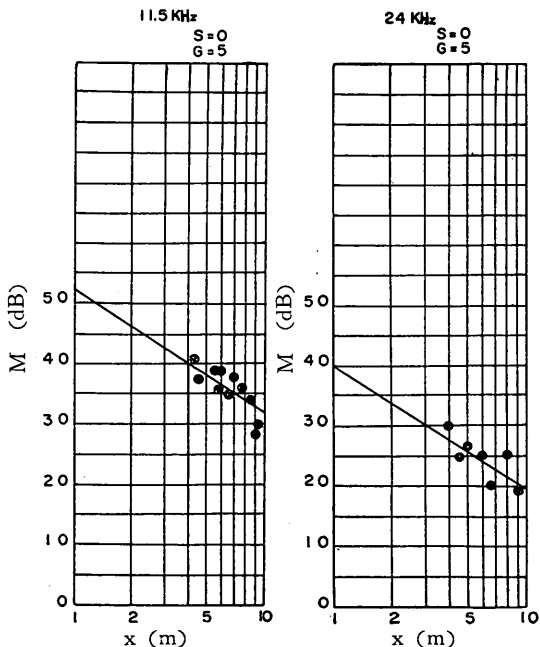


図-5 記録器感度目盛とマージン特性



軟底質における超音波の反射透過特性

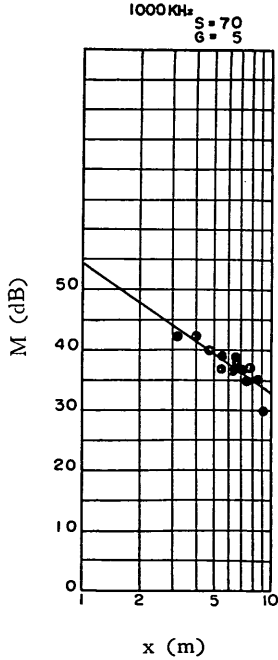
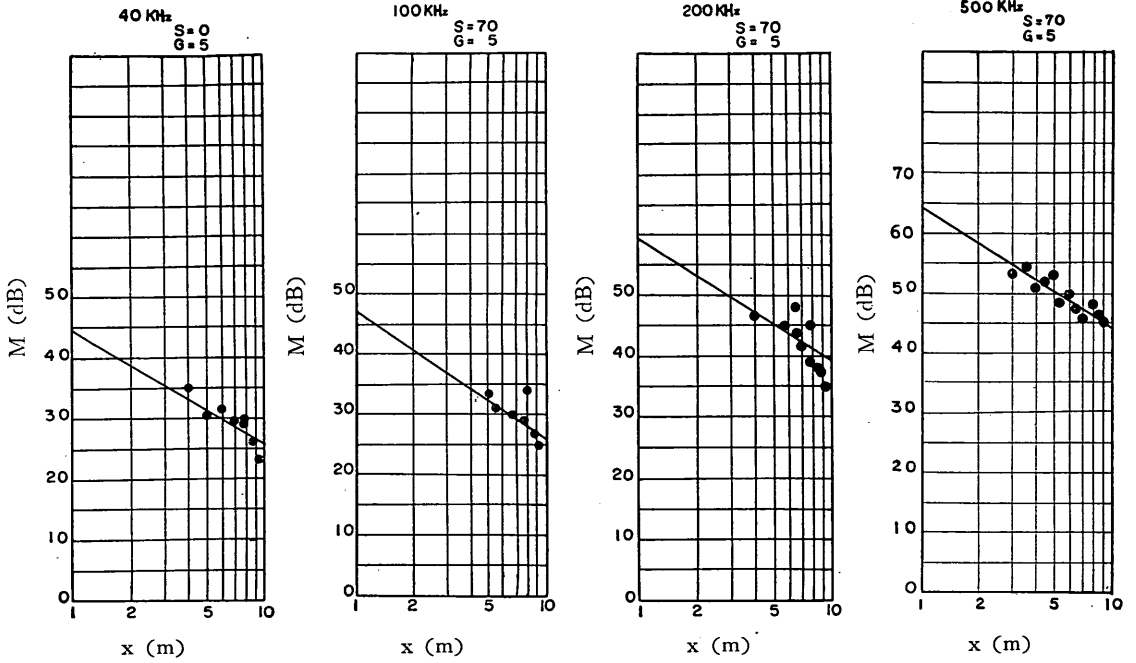


図-6 深度と反射強度の関係

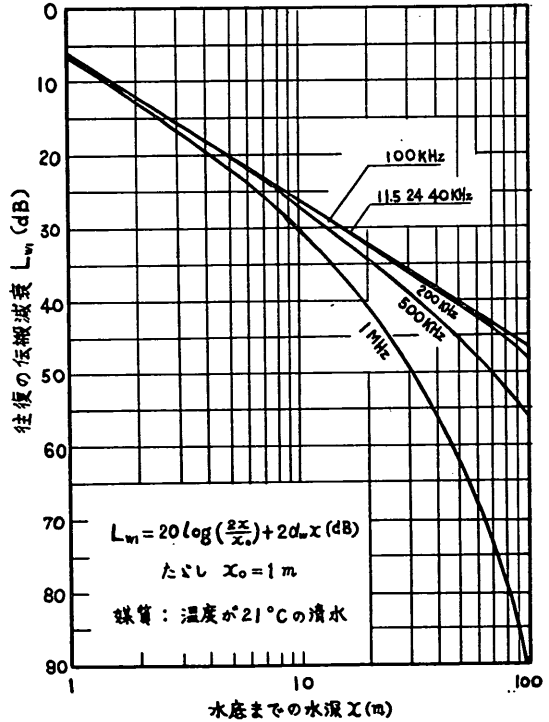


図-7 水中伝播に許しうる減衰と距離

とがわかる。すなわち反射波音圧は送受波器から水底までの距離に反比例するという拡散損失の式に一致することがわかる。

次に理論的に伝搬損失を考えてみる。水底が平滑ならば往復の伝搬損失 L_{w1} は

$$L_{w1} = 20 \log \left(\frac{2x}{x_0} \right) + 2\alpha_w x \quad (dB)^{5)} \quad (1)$$

で表わされる。図-7 に7周波 (11.5, 24, 40, 100, 200, 500, 1000KHz) それぞれの伝搬損失を示す。この図から、媒質が清水であることと、深度が浅いことから、この実験の範囲内では、500KHz および 1MHz を除いて、吸収損失を無視することが出来ることがわかる。なお、吸収係数 α_m は pinkerton の吸収係数を用いた。

図-8 に水中受波器による直接波のマージン特性を示

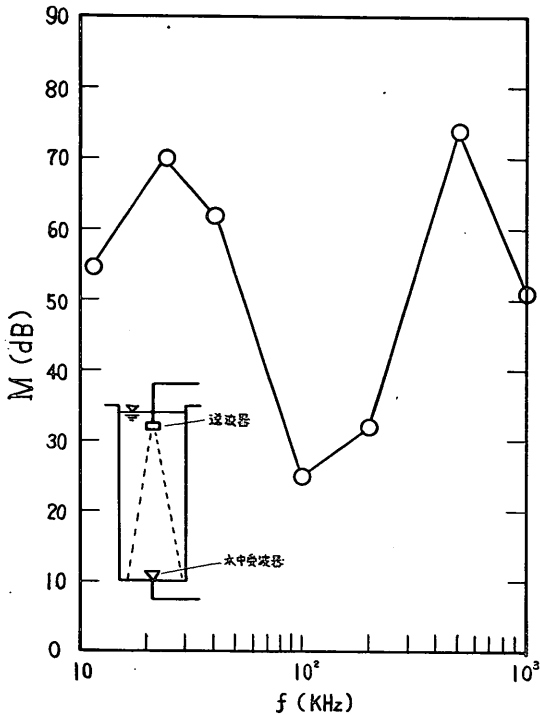


図-8 水中受波器のマージン特性

す。各周波数共、マージンレベルが相違しているのは、送信出力および受波器感度がそれぞれ異なっているからである。

写真-6 には、水中受波器による受信波のシンクロスコープ波形を示す。この波形をみれば、周波数が高いほ

ど波形の立ち上がり、即ちビルドアップ特性が良いことがわかる。

測深機の探知能力を数式で表示する方法に、ソナー方程式⁵⁾を使う方法がある。ここでは実験結果をソナー方程式を使って解析してみることにする。

送波器の電圧感度 S_s は、端子電圧を E_s 、送波器正面の単位距離の点の音圧を p_{s1} とすると

$$S_s = p_{s1} / E_s$$

$$= \sqrt{\frac{\rho c \eta_s G_s G_{f0}}{4 \pi x_0^2}} \times 10^7 \quad (\mu\text{bar/V}) \quad (2)$$

ここに、 ρC : 音響インピーダンス

η_s : 送波器の電気音響変換率

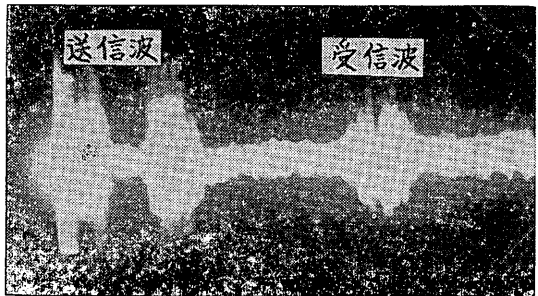


写真-6-a シンクロスコープ波形 (11.5KHz)

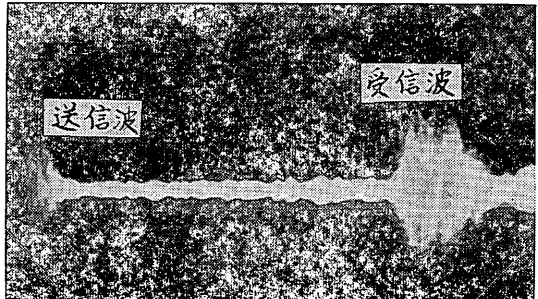


写真-6-b シンクロスコープ波形 (24KHz)



写真-6-c シンクロスコープ波形 (40KHz)

軟底質における超音波の反射透過特性

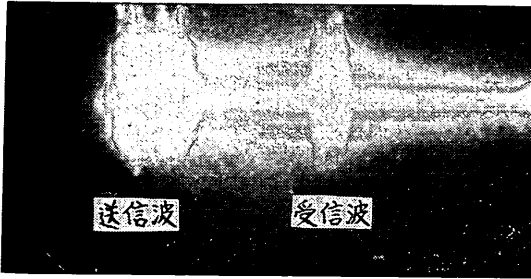


写真-6-d シンクロスコープ波形 (100KHz)

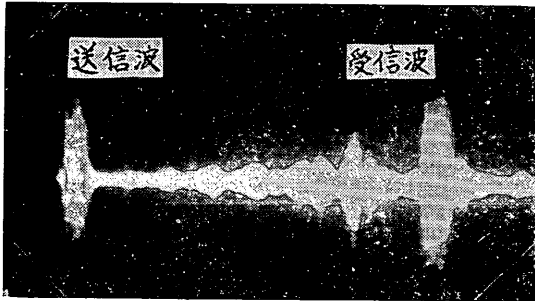


写真-6-e シンクロスコープ波形 (200KHz)

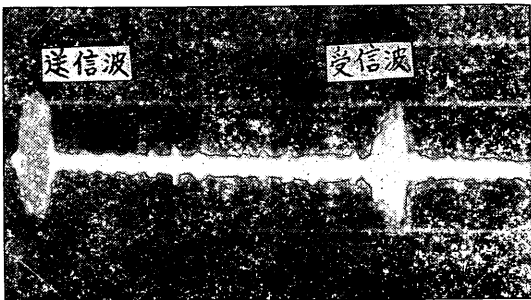


写真-6-f シンクロスコープ波形 (500KHz)

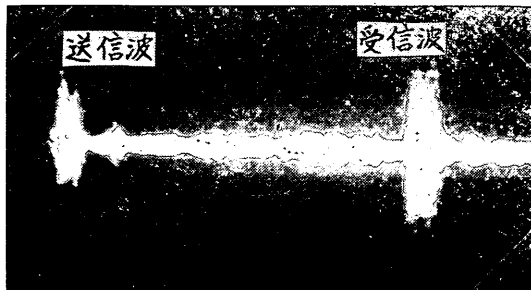


写真-6-g シンクロスコープ波形 (1000KHz)

- G_s : 指向性利得
- G_{of} : 送波器の自由コンダクタンス
- x_0 : 送波器の中心から水底方向へ単位距離

(100cm)

これより指標点の音圧は、指向性関数を R_s とすると

$$p_{s1} = E_s S_s R_s \quad (\mu\text{bar}) \quad (3)$$

送波指標点における送信波強度 I_{s1} は

$$I_{s1} = \frac{p_{s1}^2}{\rho c} = \frac{E_s^2 S_s^2 R_s^2}{\rho c} \times 10^{-7} \\ = P_{se} \eta_s C_s R_s^2 / 4\pi x_0^2 \quad (\text{w/cm}^2) \quad (4)$$

ここに P_{se} : 送波器電気入力 (w)

次に送信波の伝搬を考えてみる。

一定の吸収係数 α_w (dB/m) を持つ一様な媒質中を球面波として直進するものと考え、指標点から x (m) にある水底の位置の強度 (水底を取除いたときの値) を I_{sx} とすると

$$I_{sx} = \left(\frac{x_0}{x}\right)^2 10^{-0.1\alpha_w x} I_{s1} \quad (\text{w/cm}^2) \quad (5)$$

で表わされる。

水槽底に到達した超音波は一部反射し、その水槽底における反射波強度 I_{Rx} は、反射損失を L_s とすると、

$$I_{Rx} = I_{sx} \cdot L_s^2 \quad (\text{w/cm}^2) \quad (6)$$

となる。

帰路の伝搬については、

$$I_{RR} = \left(\frac{x}{2x}\right)^2 10^{-0.1\alpha_w x} I_{Rx} \quad (\text{w/cm}^2) \quad (7)$$

となる。

受波器の電圧感度音場校正値 M_R を用いると

$$M_R = E_{R0} / p_R \\ = \sqrt{\frac{4\eta_R A_R}{\rho c A_{fo}}} \times 10^{-7} \quad (\text{v}/\mu\text{bar}) \quad (8)$$

ここに、 E_{R0} : 受波器端子の開放電圧 (V)

p_R : 受波器位置の音圧 (μbar)

η_R : 受波器の電気音響変換効率

A_R : 受波器の受波面積 (cm^2)

で表わされ、

$$p_R^2 = \rho c I_{RR} \times 10^7 \quad (9)$$

であるから

$$E_{R0}^2 = M_R^2 \rho c R_R^2 \times 10^7 \cdot I_{RR} \quad (10)$$

ここに R_R : 受波器の指向性関数

となる。

以上の各段階の伝送を総合すれば、送波器電気端子から受波器電気端子までの総合伝送損失が求められる。

総合損失を

$$T_s = 10 \log_{10} (E_s / E_{R0}) \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

とすれば (3, 4, 5, 6, 7, 9, 10)

を用いて,

$$T_s = -20\log(S_s R_s) - 20\log(M_R R_R) + 20\log\left(\frac{2x}{x_0}\right) + 2\alpha_w x - 20\log L_s \text{ (dB)}$$

(送波器変換損失) (受波器変換損失) (拡散損失)
(吸収損失)(反射損失)

となる。

以上述べたことは送受波器が同じ位置にある場合であるが、水中受波器を水底に設置した場合は次のようになる。

$$T'_s = -20\log(S_s R_s) - 20\log(M_R R_R) + 20\log$$

$$\left(\frac{x}{x_0}\right) + \alpha_w x \tag{13}$$

これらの式を使って水深 x が 9.0m, 水底が鋼板, 媒質が清水の場合の各周波数毎の総合伝送損失を計算した結果が表-3 である。この表で水の吸収係数 α_w は, Pinkerton の吸収係数を用いた。又水底反射損失は, 平面波の理論式を使って計算で求めたものである。

また, 表-4 には水底に受波器を設置して, 直接波を受信する場合の各周波数毎の総合伝送損失を示す。

表-3 反射波受信の場合の総合伝送損失

周波数 f (KHz)	送波器変換損失 $-20\log(S_s R_s)$	受波器変換損失 $-20\log(M_R R_R)$	拡散損失 $20\log\left(\frac{2x}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $2\alpha_w x$	水底反射損失 $-20\log L$	総合伝送損失 $T_s = 20\log\left(\frac{E_s}{E_{R0}}\right)$
11.5	-62.92	46.27	25.10	0.00052	0.6	9.05
24.0	-59.48	48.16	25.10	0.00228	0.6	14.38
40.0	-71.46	64.64	25.10	0.00648	0.6	18.88
100	-71.92	77.32	25.10	0.0392	0.6	31.14
200	-78.32	81.42	25.10	0.156	0.6	28.96
500	-78.72	78.18	25.10	0.972	0.6	26.13
1000	-86.8	81.22	25.10	3.920	0.6	24.04

水深 $x = 9.0\text{m}$, 水底が鋼板, 媒質が清水の場合

表-4 直接波受信の場合の総合伝送損失

周波数 f (KHz)	送波器変換損失 $-20\log(S_s R_s)$	受波器変換損失 $-20\log(M_R R_R)$	拡散損失 $20\log\left(\frac{x}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $\alpha_w x$	総合伝送損失 $T'_s = 20\log\left(\frac{E_s}{E_{R0}}\right)$ (dB)
11.5	-62.92	95.00	19.10	0.00026	51.18
24	-59.48	102.90	19.10	0.00114	62.52
40	-71.46	89.40	19.10	0.00324	37.04
100	-71.92	83.50	19.10	0.0196	30.70
200	-78.32	84.92	19.10	0.078	25.78
500	-78.72	98.48	19.10	0.486	39.35
1000	-86.80	107.12	19.10	1.96	41.38

水深 $x = 9.0\text{m}$, 媒質が清水の場合

軟底質における超音波の反射透過特性

3.2 フライアッシュ底質における反射透過特性と総合伝送損失

(1) フライアッシュ底質の見掛け比重

測定時の気温は約24℃、湿度60%、水温21℃、底質の温度は22℃であった。図-9 に各深度毎の水温分布を示す。

レッドを用いた底質厚さの計測結果を表-5 に示す。その平均厚さは、3.7kgレッドで約30cm、皿付レッドで約40cmであった。

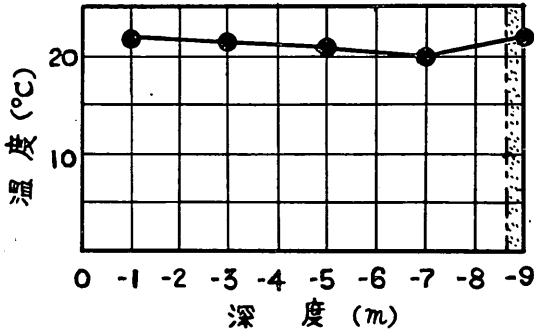


図-9 フライアッシュを入れたときの水温分布

表-5 底質厚さ計測結果

測定番号	3.7kgレッドで測深		皿付レッドで測深	
	測深値(m)	沈澱層の厚さ(m)	測深値(m)	沈澱層の厚さ(m)
No. 1	9.650	0.350	9.550	0.450
2	9.720	0.280	9.610	0.390
3	9.590	0.410	9.590	0.410
4	9.690	0.310	9.590	0.410
5	9.750	0.250	9.650	0.350
6	9.740	0.260	9.620	0.380
7	9.760	0.240	9.610	0.390
8	9.770	0.230	9.670	0.330
9	9.770	0.230	9.670	0.330
10	9.660	0.340	9.560	0.440
11	9.700	0.300	9.600	0.400
12	9.690	0.310	9.590	0.410
13	9.740	0.260	9.610	0.390
14	9.680	0.320	9.580	0.420

15	9.700	0.300	9.600	0.400
16	9.740	0.260	9.640	0.360
17	9.750	0.250	9.620	0.380
18	9.700	0.300	9.600	0.400
19	9.660	0.340	9.580	0.420
20	9.700	0.300	9.600	0.400
21	9.680	0.320	9.580	0.420
平均値	9.704	0.296	9.605	0.395

フライアッシュ投入量と清水中のフライアッシュ沈澱層の厚さからフライアッシュ底質の見掛け比重を求めてみる。

フライアッシュの投入容積(真容積)を V_s (m³) とすると、水槽中のフライアッシュの平均厚さ h (m) は、

$$h = \frac{4V_s}{\pi D^2} \quad (m) \quad (14)$$

ここに D : 水槽の直径

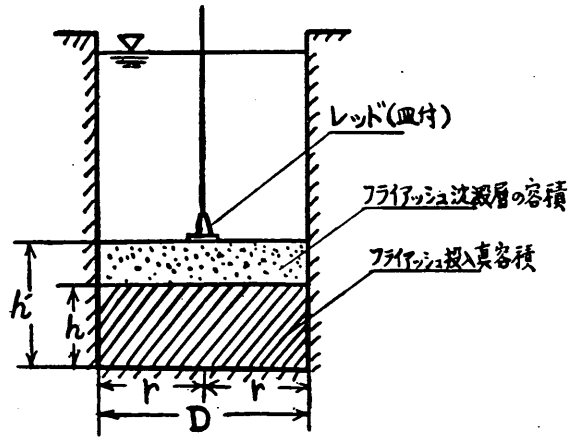


図-10 底質の見掛け比重の求め方

で表わされる。

フライアッシュ沈澱層の容積 V_m (m³) は、皿付レッドで測定した沈澱層の厚さを h' (m) として、

$$V_m = \frac{\pi D^2}{4} h' \quad (m^3) \quad (15)$$

沈澱層に含まれる水の重量 W_w は、水の単位体積重量を γ_w (kg/m³) として

$$W_w = (h' - h) \frac{\pi D^2}{4} \cdot \gamma_w \quad (kg) \quad (16)$$

したがって、含水比 w はフライアッシュ投入重量を W_s (kg) として

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%) \quad (17)$$

平均見掛け比重 ρ_m は

$$\begin{aligned} \rho_m &= \frac{W_m}{V_m \cdot \gamma_w} = \frac{W_s + W_w}{\frac{\pi D^2}{4} h' \gamma_w} \\ &= \frac{W_s + (h' - h) \pi r^2 \cdot \gamma_w}{\pi r^2 h' \gamma_w} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 W_m : 沈澱層の重量(kg)
 V_m : 沈澱層の容積(m³)
 r : 水槽の半径(m)

で表わされる。

前記実験結果よりフライアッシュ底質の含水比、および平均見掛け比重などを上記理論式を用いて求めてみる。

水槽中のフライアッシュの平均厚さ h は、フライアッシュの投入容積 V_s が 0.94 (m³) だから、(14)式より

$$h = \frac{4 V_s}{\pi D^2} = 0.21 (\text{m})$$

フライアッシュ底質に含まれる水の重量 W_w は、 h' が 0.4 (m) だから

$$\begin{aligned} W_w &= (h' - h) \pi r^2 \cdot \gamma_w \\ &= 0.859 (\text{ton}) \end{aligned}$$

含水比 w は

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = 44.7 (\%)$$

平均見掛け比重 ρ_m は

$$\rho_m = \frac{W_{sw}}{V_m \gamma_w} = \frac{W_s + W_w}{\pi r^2 h' \gamma_w} = 1.54$$

平均容積混合率(濃度) X_V は

$$\begin{aligned} X_V &= \frac{V_s}{V_{sw}} \times 100 \\ &= \frac{V_s}{\pi r^2 h'} \times 100 = 52.0 (\%) \end{aligned}$$

次に、直径が異なるフライアッシュ粒子が水底に沈澱した際の理論的な間隙率、濃度(混合率)、見掛け比重を求める。

いま簡単のために1個の粒子が図のように1辺が d の立方体の中にあるものとする。球の体積 V_B は次のように表わされる。

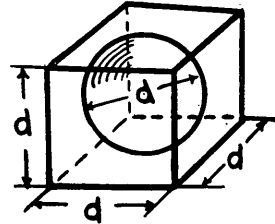
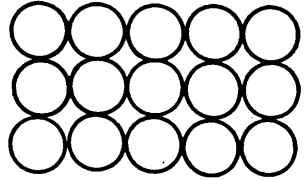


図-11 粒子の模型

$$V_B = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (19)$$

一方、立方体の体積 V は、1辺を d として

$$V = d^3 \quad (20)$$

立方体の体積 V と球の体積 V_B との差、即ち間隙の体積 V_o は

$$V_o = V - V_B$$

よって間隙率 n は

$$\begin{aligned} n &= \frac{V_o}{V} = \frac{V - V_B}{V} = 1 - \frac{V_B}{V} \\ &= 0.476 \end{aligned} \quad (21)$$

したがって濃度(容積混合率) X_o は

$$X_o = 1 - n = 0.524 \quad (22)$$

見掛け比重 ρ_m は

$$\begin{aligned} \rho_m &= \rho_s (1 - n) + \rho_w n \\ &= 0.524 \rho_s + 0.476 \end{aligned} \quad (23)$$

ここに、 ρ_s : 球の真比重

ρ_w : 水の比重 = 1

次にフライアッシュの粒子直径 d を 0.075 mm として ρ_m を求めてみる。 ρ_s を 2.04 として(23)式より

$$\rho_m = 0.524 \rho_s + 0.476 = 1.54$$

その他、水底の沈澱の見掛け比重を求める方法としてメスシリンダーを使用する方法がある。図-12により、堆積土の見掛け比重 ρ_m は、清水の単位体積重量を γ_w とすると、

$$\rho_m = \frac{W_H}{V_H \gamma_w} = \frac{W_s + \gamma_w (V_o - V_B)}{V_H \gamma_w} \quad (24)$$

で表わされる。

軟底質における超音波の反射透過特性

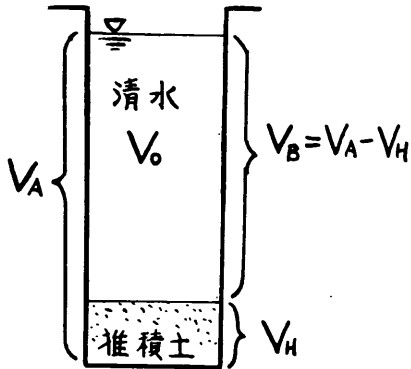


図-12 メスシリンダーによる見掛け比重の測定

ここに、 W_H : 堆積土の重量

V_H : 堆積土の容積

W_s : フライアッシュ粒子の乾燥重量

上記方法でフライアッシュ底質の見掛け比重を求めると約1.48であった。

又、写真-7 に示すような採水器を使用して、泥のサンプルを採取して、その見掛け比重や混合率を求めた。この採水器は、T. S. 北原型トーマイ採水器を改造した

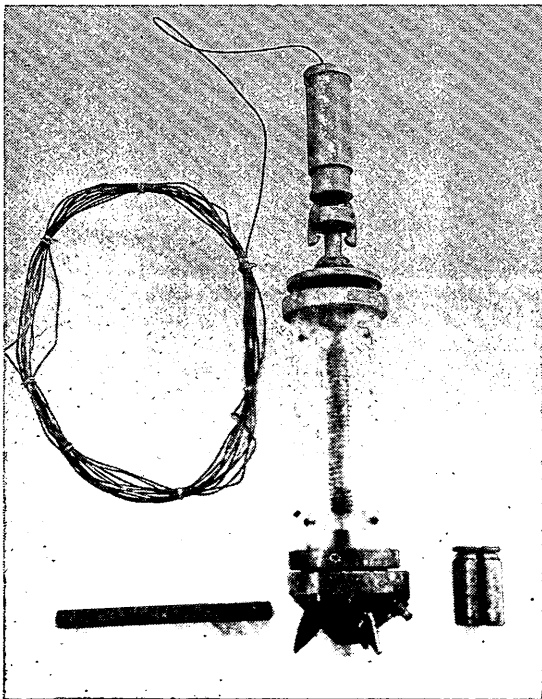


写真-7 採水器の外観

もので、底部に重錘を付け、且つ先端を鋭くして、泥層中に沈下するように工夫したものである。表-6 は上記採水器を使用して採取した泥のサンプルを分析して、見掛け比重、含水比、混合率等を求めた結果を示した。

このようにフライアッシュの底質厚さを計測して見掛け比重を出す方法や、フライアッシュ粒子を均一な粒径をもった球状の粒子と仮定して理論的に出す方法、およびメスシリンダーを使用して堆積土の見掛け比重から出す方法や、採水器を使用してサンプルを採取し、そのサンプルを分析して出す方法などから検討しても、フライアッシュ底質の見掛け比重は約1.5として考えても差支えないものと思われる。

(2) ソナー方程式を用いた総合伝送損失の理論

軟泥探知用測深機を開発するには、軟泥中の反射・透過・吸収特性等を明らかにする必要がある。

次に、水中の軟底質に超音波を入射したときの反射・透過の様子を理論的に考察してみよう。

図-13 に示すように送波器Sより放射された音波は、

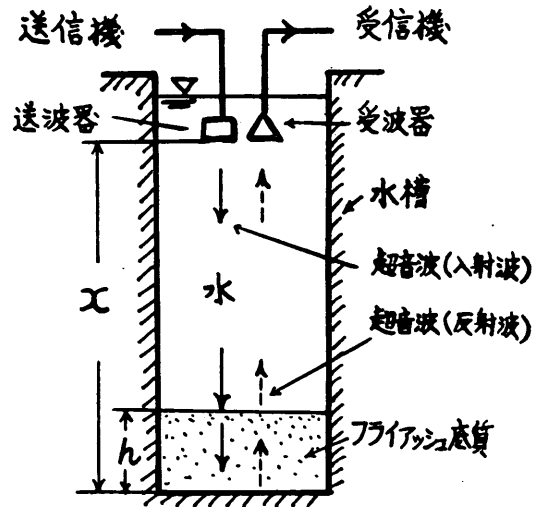


図-13 フライアッシュ底質における反射と透過

拡散減衰しながらフライアッシュ底質表面に到達して、一部は反射し、一部は透過する。フライアッシュ底質中に透入した透過波は、吸収減衰しながら水槽底に達し、そこで再び一部反射し一部透過する。反射波は再び吸収減衰しながら底質と水との境界層に至り、そこでまた反射透過の過程を経て、透過波が受波器Rに着着する。この伝搬の様子をソナー方程式で表わしてみよう。

底質表面より反射する音波は、総合伝送損失を T_m

表-6 フライアッシュ底質の土質試験結果⁷⁾

試験 No	土の全容積 V(cm ³)	乾燥土重量 W _s (g)	水の重量 W _w (g)	土粒子の容積 V _s (cm ³)	含水比 W(%)	間隙比 e	間隙率 n	混合率 x _v	見掛け比重 ρ _m
1	353.48	379.06	157.77	185.81	41.6	0.902	0.474	0.526	1.547
2	371.64	406.61	172.03	199.32	42.3	0.865	0.464	0.536	1.557
3	358.06	377.30	173.04	184.95	45.9	0.936	0.483	0.517	1.537
4	235.99	221.38	127.41	108.52	57.6	1.174	0.540	0.460	1.478
5	391.06	429.50	180.55	210.54	42.0	0.857	0.462	0.538	1.560
6	351.58	373.43	168.71	183.05	45.2	0.921	0.479	0.521	1.542
7	338.40	350.49	166.59	171.81	47.5	0.970	0.492	0.508	1.528
8	369.71	361.57	192.26	177.24	53.2	1.086	0.521	0.479	1.498
9	370.52	378.66	184.90	185.62	48.8	0.996	0.499	0.501	1.521
10	352.76	361.99	175.62	177.45	48.5	0.986	0.496	0.504	1.524
平均値	349.32	364.00	170.81	178.43	46.9	0.958	0.489	0.511	1.531

※ 飽和度 S = 1 とした。即ち泥土は水で飽和しているものと仮定し、気体含有量は無視した。

※ r_w: 水の単位体積重量 = 1, フライアッシュ真比重 ρ_s = 2.04

$$\text{含水比: } w = \frac{W_w}{W_s} \times 100(\%)$$

$$\text{間隙比: } e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{\rho_s r_w V}{W_s} - 1 \quad V_v: \text{間隙の体積(cm}^3\text{)}$$

$$\text{間隙率: } n = \frac{V_v}{V} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{W_s}{Gr_w V} = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{e}{e + 1}$$

$$\text{混合率: } x_v = 1 - n = 1 - \frac{V_v}{V_v + V_s} = 1 - \frac{e}{1 + e} = \frac{1}{1 + e}$$

$$\text{飽和度: } S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{W_w}{r_w(V - V_s)} \quad V_w: \text{水の体積(cm}^3\text{)}$$

$$\text{見掛け比重: } \rho_m = \rho_s(1 - n) + \rho_w n = \rho_s x + \rho_w n \quad \rho_w: \text{水の比重}$$

(dB)とすると

$$\begin{aligned} T_m &= 20 \log \frac{E_s}{E_{R0}} \text{ (dB)} \\ &= -20 \log(S_s R_s) - 20 \log(M_R R_R) \\ &\quad + 20 \log \left(\frac{2(x-h)}{x_0} \right) + 2\alpha_w(x-h) - 20 \log L_m \quad (2) \end{aligned}$$

ここに L_m は軟底質表面における反射損失である。

なお、水槽底より反射する音波は次のように表わすことができる。

送波器から軟底質表面までと、受波器表面から受波器電気端子までの損失は、3.1に述べた通りである。

したがってここでは軟底質中の各損失および帰路の伝搬を考えればよい。

一定の吸収係数 α_w (dB/m) を持つ様な媒質中を球面波として直進するものと考え、指標点から x-h の距離にある底質表面の音波の強度を I_{S(x-h)} とすると、

$$I_{S(x-h)} = \left(\frac{x_0}{x-h} \right)^2 10^{-0.1\alpha_w(x-h)} I_{S1} \quad (2)$$

軟底質における超音波の反射透過特性

で表わされる。

底質表面に到達した超音波は一部透過する。その透過損失 L_{T1} は、

$$L_{T1} = \frac{\text{底質表面における透過波強度}}{\text{底質表面における入射波強度}} = \frac{I_{Tx}}{I_{S(x-h)}} \quad (27)$$

であるから、透過波強度 I_{Tx} は、

$$I_{Tx} = I_{S(x-h)} \cdot L_{T1} \quad (28)$$

となる。

フライアッシュ底質中の伝搬については一般に複雑であるが、ここでは理想的に考えて、一定の吸収係数 α_m (dB/m) をもつような媒質中を直進するものとする。底質表面から水槽までの距離を h として、その位置の強度 (水槽底を取除いたときの値) を I_{Ah} とすると、

$$I_{Ah} = \left(\frac{x-h}{x}\right)^2 10^{-0.1\alpha_m h} \cdot I_{Tx} \quad (29)$$

となる。水槽底に到達した超音波は一部反射し、その水槽底表面における反射波強度 I_{Rh} は、反射損失を L_s とすると、

$$I_{Rh} = I_{Ah} \cdot L_s^2 \quad (30)$$

となる。底質表面までの伝搬については、底質表面の位置の強度を I_{Sh} として

$$I_{Sh} = \left(\frac{x}{x+h}\right)^2 10^{-0.1\alpha_m h} \cdot I_{Rh} \quad (31)$$

となる。底質表面に到達した超音波は、一部透過し、その透過損失を L_{T2} とすると

$$L_{T2} = \frac{I_{Th}}{I_{Sh}}$$

で表わされるから、透過波強度 L_{Th} は、

$$L_{Th} = I_{Sh} \cdot L_{T2} \quad (32)$$

ここで、 L_{T2} は(6)式の L_{T1} と等しい。

掃路の伝搬については、

$$I_{RR} = \left(\frac{x+h}{2x}\right)^2 10^{-0.1\alpha_w(x-h)} \cdot I_{Th} \quad (33)$$

となる。

以上の各段階の伝送を総合すれば、送波器電気端子から受波器電気端子までの総合伝送損失が求められる。

いま、総合損失を次の段階に分けてみる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_{R0}}{E_S}\right)^2 &= \left(\frac{p_{S1}}{E_S}\right)^2 \cdot \frac{I_{S1}}{p_{S1}^2} \cdot \frac{I_{S(x-h)}}{I_{S1}} \cdot \frac{I_{Tx}}{I_{S(x-h)}} \\ &\cdot \frac{I_{Ah}}{I_{Tx}} \cdot \frac{I_{Rh}}{I_{Ah}} \cdot \frac{I_{Sh}}{I_{Rh}} \cdot \frac{I_{Th}}{I_{Sh}} \cdot \frac{I_{RR}}{I_{Th}} \cdot \frac{p_R^2}{I_{RR}} \\ &\cdot \left(\frac{E_{R0}}{p_R}\right)^2 \end{aligned} \quad (34)$$

この式に (3, 4, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 9, 10) を入れると、

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_{R0}}{E_S}\right)^2 &= \left\{ S_S R_S \right\}^2 \left\{ \frac{10^{-7}}{\rho c} \right\} \\ &\cdot \left\{ \left(\frac{x_0}{2x}\right)^2 10^{-0.2\alpha_w(x-h)}, 10^{-0.2\alpha_m h} \right\} \\ &\cdot \left\{ 2 L_T \right\} \cdot \left\{ L^2 \right\} \cdot \left\{ \rho c \times 10^7 \right\} \cdot \left\{ M_R R_R \right\}^2 \end{aligned} \quad (35)$$

となる。

総合損失を、

$$T_D = 20 \log (E_S / E_{R0}) \text{ (dB)} \quad (36)$$

で表わせば、式(40)は、

$$\begin{aligned} T_D &= -20 \log (S_S R_S) - 20 \log (M_R R_R) + 20 \log \left(\frac{2x}{x_0}\right) \\ &+ 2\alpha_w(x-h) + 2\alpha_m h - 20 \log L_T - 20 \log L_S \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (37)$$

図-14 に、超音波の反射透過の過程を示す。この図で () の中の数字は、式の番号を示す。

図-15 のように水槽底に受波器を設置し、送波器からの直接波を受信する場合の総合伝送損失 T_D は、

$$T_D = -20 \log (S_S R_S) - 20 \log (M_R R_R) + 20 \log$$

$$\left(\frac{x}{x_0}\right) + \alpha_w(x-h) + \alpha_m h - 10 \log L_T \text{ (dB)} \quad (38)$$

となる。

(3) フライアッシュ底質における反射損失と吸収損失
軟泥層の厚さを探知する測深機を開発するには、底質における超音波の反射損失並びに底質中の吸収損失を求める必要がある。

図-16 に媒質が清水で底質が鋼板のときの各周波数のマージンテスト法による反射特性と、底質にフライアッシュ底質を用いたときの反射特性を示す。

また、図-17 には、水底に水中受波器を設置して吸収特性を測定した結果を清水の場合とフライアッシュ底質の場合について示した。

フライアッシュ底質の反射損失は、底質が鋼板のときのマージンからフライアッシュのときのマージンを引いた値に、鋼板の反射損失 -0.6 (dB) をたしたものである。この鋼板の反射損失 L_s は平面波の反射率の式から計算で求めたものである。

底質中の吸収損失は、フライアッシュ底質のないときの水中受波器のマージンから、フライアッシュ底質中に水中受波器を埋め込んだときのマージンを引いた値に、底質表面の透過損失を引いた値である。

これらの測定結果から反射損失および吸収損失を求め

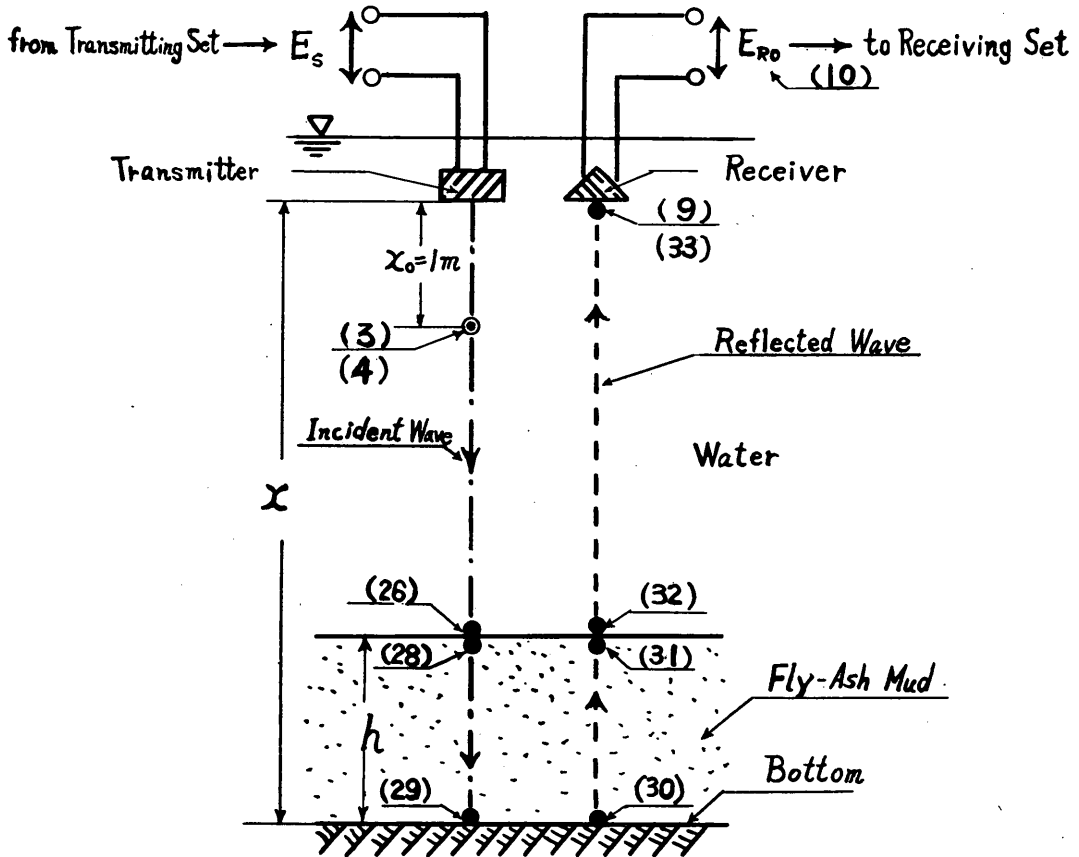


図-14 超音波の反射透過の過程

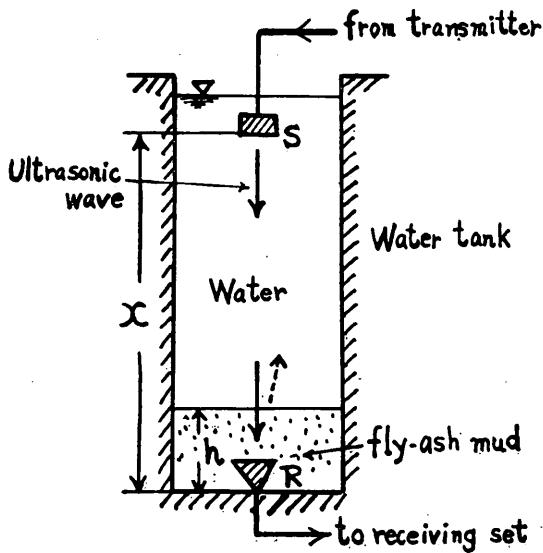


図-15 フライアッシュ底質における透過と吸収

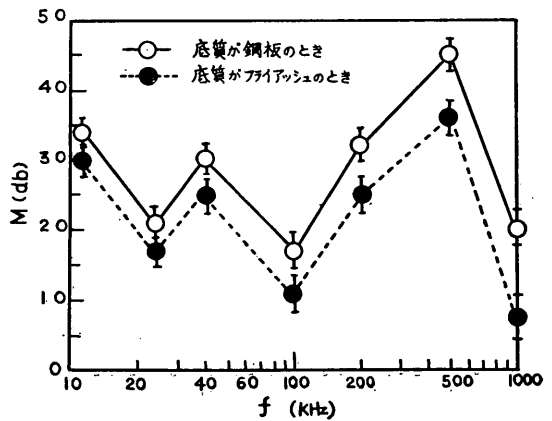


図-16 フライアッシュ底質の反射特性

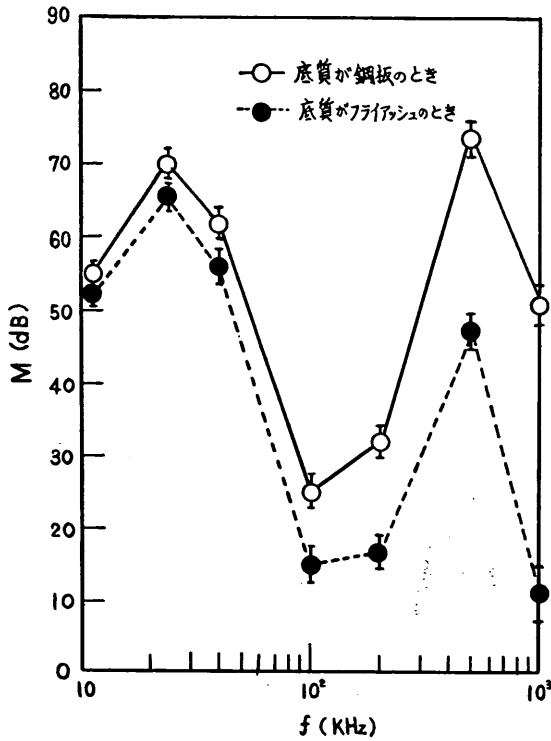


図-17 フライアッシュ底質の吸収特性

て周波数毎に示したのが図-18 であり、吸収損失を 1 m 当りに換算した値を吸収係数 $\alpha_m(\text{dB}/\text{m})$ として、周波数特性を示したのが図-19 である。

これらの図から次のような実験式が得られた。

反射損失 $L_m(\text{dB})$ は、

$$L_m = 1.75f^{0.27} \quad (\text{dB}) \quad (39)$$

ここに f : 周波数 (kHz)

また、吸収係数 $\alpha_m(\text{dB}/\text{m})$ は

$$\alpha_m = 12.5f^{0.6} \quad (40)$$

ここに f : 周波数 (kHz)

上記の結果から、見掛け比重が 1.5 のフライアッシュ底質の反射損失は、周波数の約 0.3 乗に比例し、吸収係数は、周波数の約 0.6 乗に比例するといえよう。

(4) フライアッシュ底質における総合伝送損失の計算
前述の反射損失や吸収損失および受変換損失等各種の損失を用いて総合伝送損失が求められる。

表-7 は、フライアッシュ軟底質の表面からの反射波の総合伝送損失を周波数毎に示している。表中の水の吸収損失は、Pinkerton の吸収係数を用いて求めた。底質における反射損失は(3)で求めた実測値を使用した。

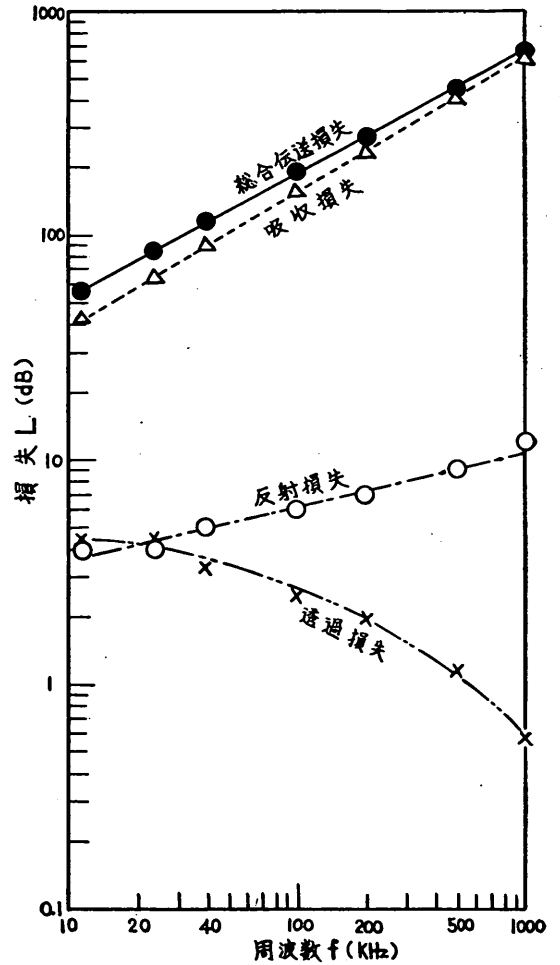


図-18 各種損失の周波数特性

表-8 は、フライアッシュ軟底質を透過して水槽底の鋼板から反射して受波器に帰着した超音波の総合伝送損失を周波数毎に示した。この表の底質中の吸収損失、透過損失は本実験での実測値、鋼板の反射損失は、超音波が軟底質中から鋼板へ入射するときの平面波の反射率の理論計算式で、計算で求めた値である。

3.3 探知可能深度と軟泥層探知可能厚さ

総合伝送損失と水中および泥層中の伝搬に関する損失から、軟泥層探知用測深機の設計に必要な探知可能深度と泥層厚さが求められる。

(1) 底質表面探知の場合

記録器の記録可能限界出力、受信機の増幅度、送信出力が既知であれば(25)式より、総合損失 T_m の許容最

表-7 軟底質表面反射波受信の場合の総合伝送損失

周波数 f (KHz)	送波器変換損失 $-20\log(S_S R_S)$	受波器変換損失 $-20\log(M_R R_R)$	拡散損失 $20\log\left(\frac{2(x-h)}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $2\alpha_w(x-h)$	底質における反射損失 $-20\log L_m$	総合伝送損失 T_m (dB)
11.5	-62.92	46.27	24.72	0.000496	4.0	12.07
24	-59.48	48.16	24.72	0.00218	4.0	17.40
40	-71.46	64.64	24.72	0.00619	5.0	22.91
100	-71.92	77.32	24.72	0.0375	6.0	36.16
200	-78.32	81.42	24.72	0.150	7.0	34.97
500	-78.72	78.18	24.72	0.929	9.0	34.11
1000	-86.80	81.22	24.72	3.75	12.0	34.89

表-8 軟底質を透過して水槽底反射波受信の場合の総合伝送損失

周波数 f (KHz)	送波器変換損失 $-20\log(S_S R_S)$	受波器変換損失 $-20\log(M_R R_R)$	拡散損失 $20\log\left(\frac{2x}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $2\alpha_w(x-h)$	底質中の吸収損失 $2\alpha_m h$	透過損失 $-20\log T_L$	鋼板における反射損失 $-20\log L_s$	総合伝送損失 T_b (dB)
11.5	-62.92	46.27	25.10	0.000496	43.2	4.44	0.9	56.99
24	-59.48	48.16	25.10	0.00218	67.2	4.44	0.9	86.32
40	-71.46	64.64	25.10	0.00619	92.0	3.30	0.9	114.48
100	-71.92	77.32	25.10	0.0375	160.0	2.51	0.9	193.95
200	-78.32	81.42	25.10	0.150	240.0	1.94	0.9	271.19
500	-78.72	78.18	25.10	0.929	424.0	1.17	0.9	451.56
1000	-86.80	81.22	25.10	3.75	640.0	0.58	0.9	664.75

大値が定まる。次に総合損失の式(25)の第1, 第2項は既知であり, 軟底質表面の反射損失が既知であれば, これらを差し引いて水中の伝搬に関する損失 L_{w1} (1)式の許容最大値が定まる。図-7 の曲線群から探知可能距離 x が求まる。(ただし, ここでは(25)式で $(x-h)$ を x と置きかえた)

いま, 数値例として, 周波数 f が 1MHz , 受信増幅度 A が 150dB , 送信出力 P_{SE} が 1W の場合の探知可能距離を求めてみる。

記録器の記録可能限界出力電圧 E_2 は $50\text{V}^{(4)}$ であるから, 受電端最低入力電圧 E_R は,

$$A=150=20\log\frac{E_2}{E_R} \quad (\text{dB})$$

より,

$$\log\frac{E_2}{E_R} = \frac{150}{20} = 7.5$$

$$\therefore E_R = 1.58 \times 10^{-6} \text{ (V)}$$

したがって, 開放端電圧 E_{R0} は

$$E_{R0} = 2E_R = 3.16 \times 10^{-7} \text{ (V)}$$

となる。

水中雑音, SN 比を無視すれば, 受電端に最低 $3.16(\mu\text{V})$ の電圧が必要である。

式(25)より

$$T_m = 20\log\frac{E_S}{E_{R0}} = 132.9 \text{ (dB)}$$

底質表面の反射損失が 12dB で送受波器の指向性軸で探知する場合には, 表-7 の各数値を式(25)に入れて水

軟底質における超音波の反射透過特性

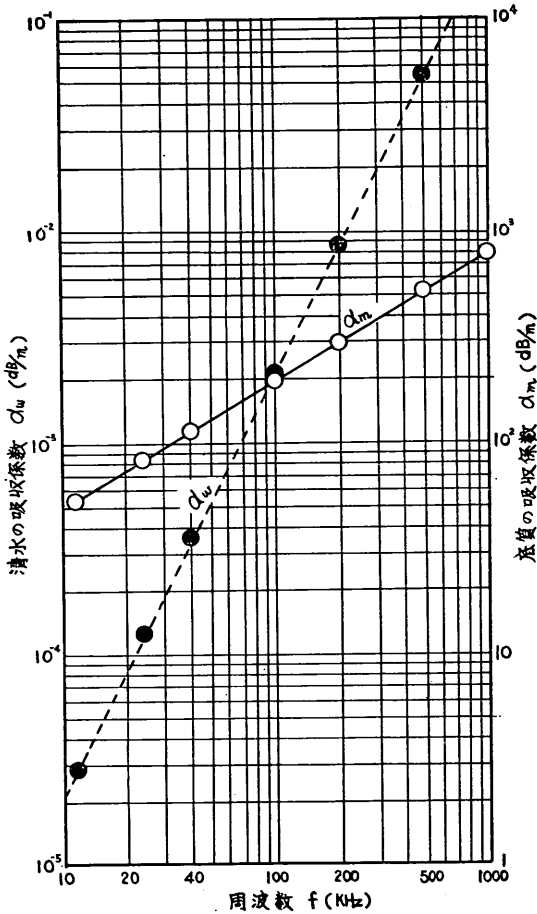


図-19 吸収係数の周波数特性

中の伝搬に関する損失 L_{w1} を求めると、

$$L_{w1} = T_m + 20 \log(S_S R_S) + 20 \log(M_R R_R) + 20 \log L_m$$

$$= 132.9 + 86.8 - 81.2 - 12 = 126.5 \text{ (dB)}$$

したがって、図-7の曲線群から周波数 f が 1 MHz のときの探知可能距離を求めてみると、約 100 m 以下であることがわかる。

(2) 泥層厚探知の場合

総合損失の式(42)の第1項、第2項は既知であり、泥層の透過損失、第二の層(ここでは水槽底)の反射損失が既知であれば、これらを差し引いて水中および泥層中の伝搬に関する損失

$$L_w = 20 \log\left(\frac{2x}{x_0}\right) + 2\alpha_w(x-h) + 2\alpha_m h \text{ (dB)}$$

$$= T_b + 20 \log(S_S R_S) + 20 \log(M_R R_R) + 20 \log L_T + 20 \log L_S \quad (41)$$

の許容最大値が定まる。

(41)式を次のように変形し

$$L_w = 20 \log\left(\frac{2x}{x_0}\right) + 2\alpha_w x + 2(\alpha_m - \alpha_w)h \quad (42)$$

のようにする。

この(42)式を次のように二つに分けて、それぞれ L_{w1} を図-7に、 L_{w2} を図-20に示すような曲線図を作成する。

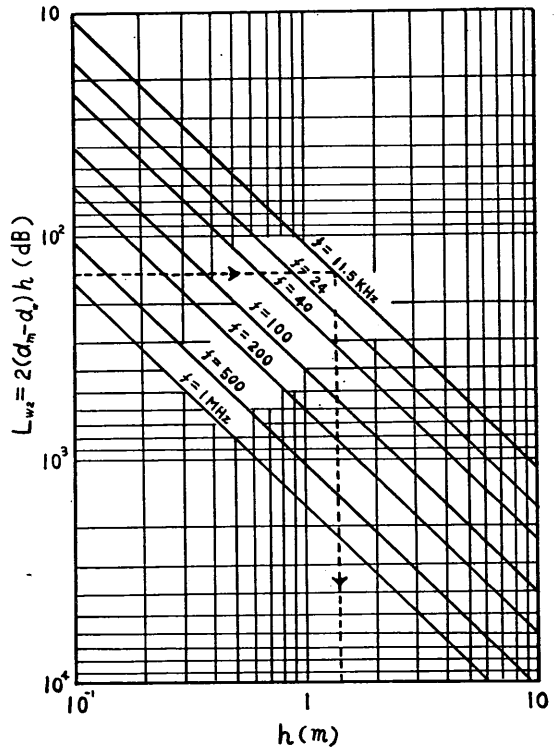


図-20 泥層厚と吸収減衰

$$L_{w1} = 20 \log\left(\frac{2x}{x_0}\right) + 2\alpha_w x \quad (43)$$

$$L_{w2} = 2(\alpha_m - \alpha_w)h \quad (44)$$

$$L_w = L_{w1} + L_{w2} \quad (45)$$

これらの図の曲線群から、探知可能深度 x と、泥層厚さ h を求めることが出来る。

いま、数値例として、周波数 f が 11.5 KHz 、受信増幅度が 150 dB 、送波器端子電圧 E_s が 500 (V) 、泥層の透過損失 L_T が -4.4 dB 、水槽底の反射損失が 0.9 dB とし、測定深度 x が 10 m のときの探知しうる軟底質の厚さを求めてみる。

受電端の最低入力電圧 E_R は、記録器の記録可能限界出力電圧 E_2 を $50(V)$ とすると、受信増幅度 $150(dB)$ から受電端最低入力電圧 E_R は、 $1.58 \times 10^{-6}(V)$ となり、したがって開放端電圧 E_{R0} は、 E_R の2倍であるから、 $3.16 \times 10^{-6}(V)$ になる。総合伝送損失 T_b は、

(36)式であらわされるから、この式に E_s と E_{R0} を代入して求めると、 $164(dB)$ が得られる。

次に透過損失 L_T が $-4.4(dB)$ 、水槽底の反射損失 L_s が $-0.9(dB)$ 、底質中の吸収係数 α_m が $54(dB/m)$ の水底を指向性の軸の方向で探知する場合には、水中お

表-9 探知可能深度と泥層厚との関係

f (KHz)	I_{SI} (W/cm ²)	P_{SE} (W)	E_s (V)	E_{R0} (V)	T_b (dB)	$20\log(S_s R_s)$ (dB)	$20\log(M_{RR} R_R)$ (dB)	$20\log L_T$ (dB)	$20\log L_s$ (dB)	L_w (dB)	L_{w1} (dB)	L_{w2} (dB)	h (m)	x (m)
11.5	3.3×10^{-1}	125.0	500.0	3.16×10^{-6}	164.0	62.9	-46.3	-4.4	-0.9	175.3	26.0	149.3	1.40	10
24	7.1×10^{-1}	200.0	1000.0	3.16×10^{-6}	170.0	59.5	-48.2	-4.4	-0.9	176.0	26.0	150.0	0.91	10
40	5.9×10^{-1}	201.0	250.0	3.16×10^{-6}	158.0	71.5	-64.6	-3.3	-0.9	160.7	26.0	134.7	0.60	10
100	1.69	928.0	400.0	3.16×10^{-6}	162.0	71.9	-77.3	-2.5	-0.9	153.2	26.3	127.0	0.32	10
200	1.04	218.0	150.0	3.16×10^{-6}	153.5	78.3	-81.4	-1.9	-0.9	147.6	26.5	121.1	0.21	10
500	2.00	112.0	200.0	3.16×10^{-6}	156.0	78.7	-78.2	-1.2	-0.9	154.4	27.4	127.0	0.12	10
1000	29.0	450.0	300.0	3.16×10^{-6}	159.5	86.8	-81.2	-0.6	-0.9	163.6	30.7	132.9	0.08	10

- 註 1) 受信増幅度 $A=150(dB)$
 2) 水中雑音, SN 比を無視した。

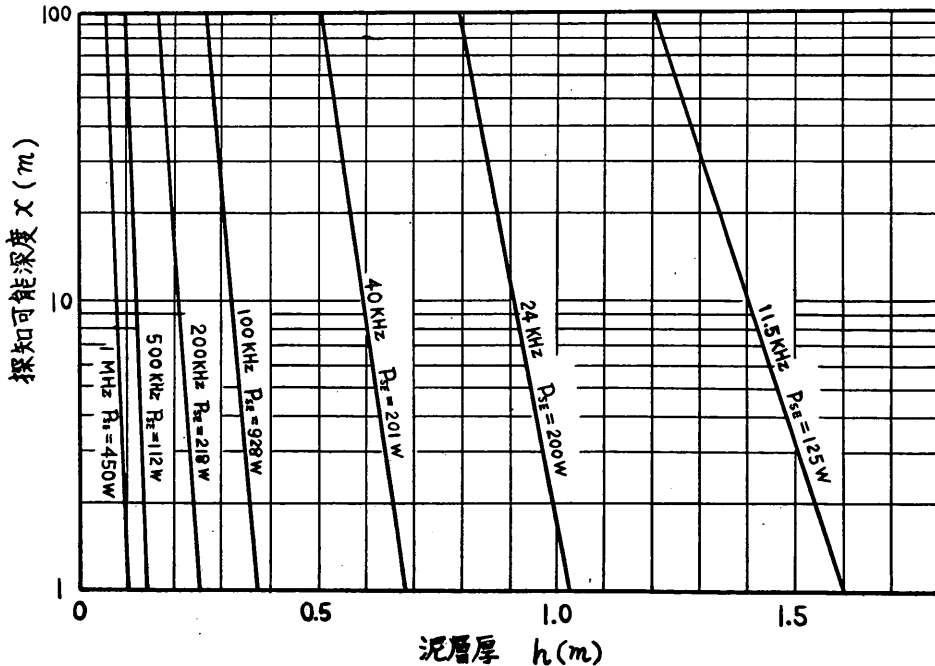


図-21 泥層厚と探知可能深度

軟底質における超音波の反射透過特性

よび泥層中の伝搬損失の許容最大値 L_w は(41)式より、総合伝送損失 T_b と送波器変換損失、受波器変換損失、泥層表面の透過損失、水槽底における反射損失の和で表わされる。表-8の周波数が11.5KHzの数値をそれぞれ代入すると、 L_w は175.3(dB)となる。

測定深度 x すなわち送受波器から水槽底までの距離が10mとすると、図-7の曲線から11.5KHzにおける往復の水中伝搬減衰 L_{w1} が26(dB)として得られる。式(45)から泥層中の吸収減衰 L_{w2} は、 L_w から L_{w1} を引いて149.3(dB)が求められる。

図-20の泥層厚と吸収減衰の曲線群から11.5KHzにおける泥層厚さ $h(m)$ が約1.4mとして求めることが出来る。

以上のような計算方法や図式解法で各周波数毎に求めて表に示したのが表-9の探知可能深度と泥層厚との関係である。この表は、超音波探査機を用い、各周波数共、最大出力、最大受信利得のときの、底質がフライッシュ(見掛け比重約1.5)における探知可能深度と泥

層厚との関係を示したものである。但し水中雑音、SN比等を無視した。

図-21には、横軸に泥層厚 h 、縦軸に探知可能深度をとり、周波数をパラメータとして示したものである。この図によれば、見掛け比重1.5で厚さ0.4mのフライッシュ底質の厚さを探知するには、40KHz以下の周波数を使用しなければならないことがわかる。

勿論、送信出力や受信感度を上げれば、それに比例して探知可能深度や探知可能泥層厚さが伸びるものと考えられる。図-22にその関係を参考のために示す。又、泥層の見掛け比重が異なって、吸収係数 α_m が変われば、当然探知可能距離や、探知可能泥層厚さが変わるものと考えられる。

したがって、これらの図を泥層の吸収係数毎に作成しておけば、泥層厚さと探知可能深度の関係や、送信出力と泥層厚の関係が一目でわかり、軟泥探知測深機的设计に利用出来よう。

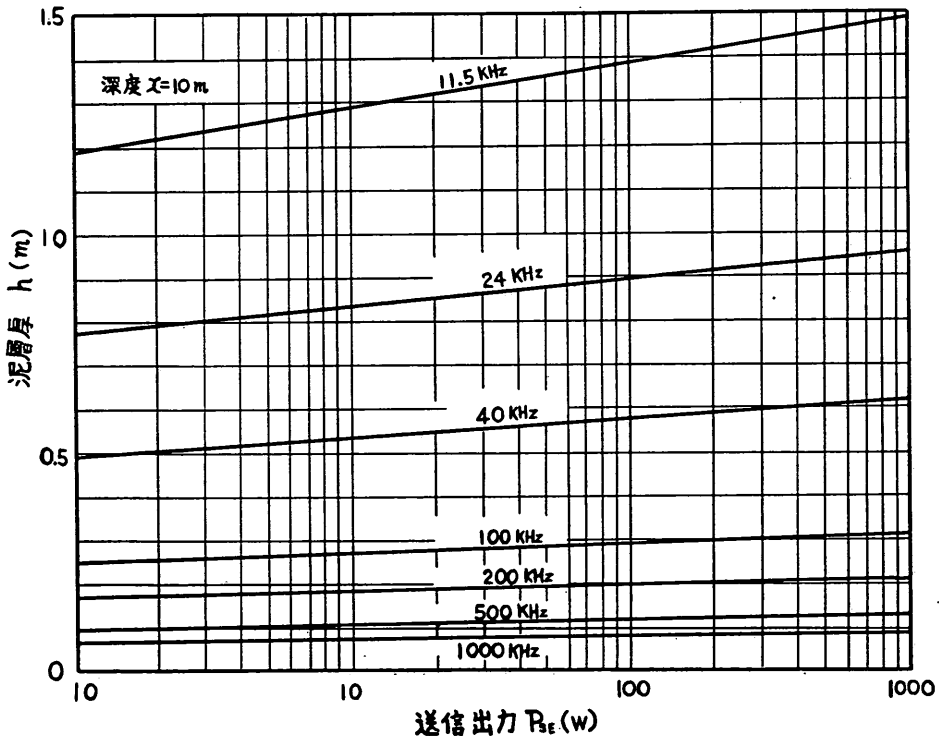


図-22 送信出力と泥層探知可能厚さの関係

4. 結 論

以上の実験結果および考察によって明らかになった事項を要約すると次のようになる。

- (1) 見掛け比重約 1.5 のフライッシュ底質の超音波の反射損失の周波数特性は、周波数のほぼ 0.3 乗に比例し、吸収損失は周波数の 0.6 乗に比例する。
- (2) 超音波の水中伝搬や、フライッシュ底質中の透過吸収、水底での反射等について、ソナー方程式を適用し、各周波数毎の総合伝送損失を求めることによって泥層探知用音響測深機的设计に利用することが出来る。
- (3) 総合伝送損失の式と水中伝搬に許しうる減衰と水深の関係曲線、および泥層厚と吸収減衰の関係曲線を用いて、周波数と泥層探知厚さの関係や、泥層厚さと探知可能深度を求めることが出来る。

5. あとがき

軟底質としてフライッシュ底質を用いた超音波の反射透過特性に関する室内実験について述べたが、実際の海底にある浮泥、ヘドロ等の軟泥とは、当然、物理的性質は勿論化学的組成も異なっているはずであり、この実験の結果をそのまま現地の軟泥層探知に適用することは出来ない。しかしながら、粒径および見掛け比重が一定の水底に沈澱しているたい積底質の超音波の反射透過の周波数特性が明らかとなり、発信音波の周波数と探知可能深度や泥層の探知可能厚さの関連性を定量的に究明することが出来た。この結果、この解析方法や結果を現地における軟泥層探知実験に適用すれば、軟泥と超音波周波数との関連性を究明する糸口が見つかるものと思われる。今後は実際の浮泥、ヘドロ等の試料を使って室内実験を行ない、それと併行して現地において軟泥層探知実験を行なう必要がある。

なお、今回の実験は、土粒子が水底に完全に沈澱した状態で行なったものである。今後は土粒子が水中を浮遊している過渡状態で実験を行ない、浮泥密度と超音波周波数の透過・吸収特性について究明する予定である。

終りに本研究に際し、超音波探査機、水中受波器の製作、改良に御協力を頂いた海上電機株式会社の関係者各位、この報告書作成にあたり、各種の御助言を戴いた八木流体輸送研究室長、実験に協力して頂いた、当研究室の津村悦夫技官、篠田幸雄、寺田一生の両君に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 第14回港湾機械技術研究会資料 1967年
- 2) 第16回直轄港湾技術研究会資料 1967年
- 3) 木原純孝：「音響測深機に関する研究——4周波音測機による室内および現地実験について——」港研資料№45, 1968年
- 4) 木原純孝：「音響測深機に関する研究——超音波放射と反響記録特性——」港研報告第8巻第1号
- 5) 実吉、菊池、能本編：「超音波技術便覧」日刊工業新聞社、昭和41年改訂新版
- 6) J.M.M. Pinkerton. Proc. Phys. Soc. B62(1949)
- 7) 渡辺隆：「土質調査および土質試験」技報堂 1963年
- 8) 第7回港湾技術研究所発表会講演概要 1969年
- 9) 第16回港湾機械技術研究会資料 1969年 (1969. 12. 24受付)

記 号 表

- A : 力係数
 A_R : 受波用振動子の放射面積
 A_S : 送波用振動子の " "
 a : 振動子の半径
 B : サセプタンス
 c : 音の伝搬速度
 D : 水槽の直径
 d : 振動子の直径
 E_S : 送信電圧
 E_{R0} : 受電端開放電圧
 E_R : 受信増幅器入力電圧
 E_2 : 記録可能限界出力電圧
 f : 周波数
 G_{f0} : 自由コンダクタンス
 G_S : 指向性利得
 h : 底質の厚さ
 I_{S1} : 送波指標点における送信波強度
 j : 虚数単位 ($=\sqrt{-1}$)
 k : 波長定数 $2\pi/\lambda$
 L_w : 往復の伝搬損失
 L_m : 反射損失(底質表面)
 L_S : " (水槽底表面)
 M : 反響余裕値
 M_R : 受波器の電圧感度音場校正値
 m : 振動子の等価質量
 n : 間隙率
 P_a : 音響出力
 P_{SE} : 送信出力
 P : 音圧
 R : 指向性関数
 S_S : 送波器の電圧感度
 S : 振動子の等価スチスネフまたは飽和度
 r : " 機械抵抗

軟底質における超音波の反射透過特性

- r_a : 等価放射抵抗
 r_r : 放射抵抗($\neq \rho C$)
 L_T : 透過損失
 T : 総合伝送損失
 V : 電圧の単位または体積
 w : 含水比
 W : 電力の単位
 X : リアクタンス, 混合率(濃度)
 x : 距離または水深
 Y_{fo} : 自由アドミッタンス
 Y_d : 制動アドミッタンス
 Y_{m0} : 水中における動アドミッタンス
 Y_{m00} : 空中における動アドミッタンス
 Z_0 : 自由インピーダンス
 α : 水の吸収係数
 β : 角度
 γ : 角度または単位体積重量
 $r^{1/2}$: 指向半減角
 η : 能率
 θ : 位相角
 λ : 波長
 ρ : 比重

附表-1 フライアッシュ底質の含水比試験

試料 No	湿った土 + 容器の重量 $W_1(gr)$	炉乾燥した土 + 容器の重量 $W_2(gr)$	容器の重量 $W_c(gr)$	湿潤土の重量 $W(gr)$ $= W_1 - W_c$	炉乾燥重量 $W_s(gr)$ $= W_2 - W_c$	水の重量 $W_w(gr)$ $= W - W_s$	含水比 $w = \frac{W_w}{W_s} \times 100$ (%)
1	639.67	475.72	96.66	543.01	379.06	163.95	43.2
2	676.17	507.83	101.22	574.95	406.61	168.34	41.4
3	655.57	486.16	108.86	546.71	377.30	169.41	44.9
4	394.79	269.49	48.11	346.68	221.38	125.30	56.6
5	727.00	550.69	121.19	605.81	429.50	176.31	41.1
6	644.79	479.92	106.49	538.30	373.43	164.87	44.2
7	623.98	460.83	110.34	513.64	350.49	163.15	46.5
8	656.79	467.87	106.30	550.49	361.57	188.92	52.2
9	670.06	488.87	110.21	559.85	378.66	181.19	47.9
10	639.21	467.45	105.46	533.75	361.99	171.76	47.5
平均値	623.14	455.82	91.82	531.32	364.00	167.32	46.6

附表-2 水中受波器の感度

周波数 $f(KHz)$	指向性利得 G_s	自由インピー ダンス $ Z_0 (\Omega)$	自由抵抗 $R_{fo}(\Omega)$	自由アドミ ッタンス $ Y_0 (m\Omega)$	自由コンダ クタンス $G_{fo}(m\Omega)$	電気音響変 換能率 $\eta_{ea}(\%)$	送波電圧 感度 $S_E(\mu bar/V)$	受波電圧 感度 $M_E(V/\mu bar)$
11.5	1.81	31.7	9.8	—	—	50.0	1.05×10^3	5.79×10^{-5}
24	5.14	19.5	4.7	—	—	25.6	1.82×10^3	2.97×10^{-5}
40	1.43	250.0	250.0	—	—	10.8	8.2×10	1.02×10^{-5}
100	17.5	—	—	1.50	0.76	40.8	2.54×10^2	3.39×10^{-5}
200	69.9	—	—	3.02	0.39	15.1	2.23×10^2	7.39×10^{-6}
500	108.5	—	—	1.08	2.66	18.0	6.19×10^5	2.29×10^{-2}
1000	436.0	—	—	25.0	15.2	14.2	3.35×10^3	2.68×10^{-6}

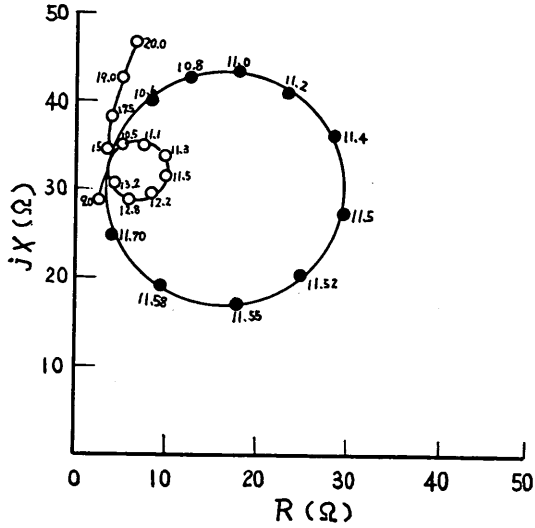
附表-3 水中受波器の能率算定表

測定量	11.5KHz		24KHz		40KHz		100KHz		200KHz		500KHz		1MHz	
	空气中	水中	空气中	水中	空气中	水中	空气中	水中	空气中	水中	空气中	水中	空气中	水中
f_R (KHz)	11.5	11.5	24.0	24.0	40.0	40.0	100.0	100.0	200.0	200.0	500.0	500.0	1000.0	1000.0
f_1 (KHz)	11.04	11.10	22.7	22.2	39.93	39.87	96.70	97.60	197.90	197.50	492.0	400.0	981.0	984.0
f_2 (KHz)	11.58	12.80	24.47	24.55	40.09	40.15	102.30	102.40	202.0	204.0	515.0	530.0	1018.0	1014.0
$Q=f_R/(f_2-f_1)$	21.3	6.8	13.6	10.2	250.0	143.0	17.9	20.8	48.8	30.8	21.7	3.9	27.0	33.4
$\left(\begin{array}{l} Z_{m00} , Z_{m0}(\Omega) \\ Y_{m00} , Y_{m0} \\ (m\Omega) \end{array} \right)$	26.0	6.5	5.0	2.0	280	250	(1.24)	(0.6)	(0.24)	(0.13)	(2.0)	(0.8)	(8.6)	(4.4)
η_{em} (%)	66.4		42.6		100.0		79.0		33.0		30.1		29.0	
η_{ma} (%)	75.0		60.0		10.8		51.6		45.8		60.0		48.9	
η_{ea} (%)	50.0		25.6		10.8		40.8		15.1		18.0		14.2	

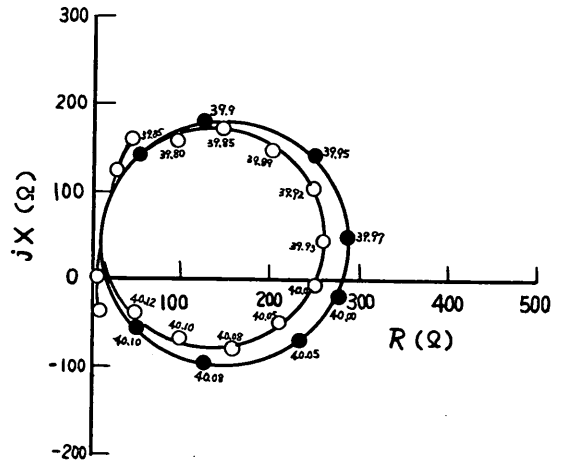
附表-4 水中受波器の音響的諸定数

共振周波数 f_R (KHz)	反共振周波数 f_A (KHz)	第1象限周波数 f_1 (KHz)	第2象限周波数 f_2 (KHz)	象限周波数の差 Δf (KHz)	Q	受波面積 A_R (cm ²)	力係数 A (dyne/V)	等価質量 m (g)	等価スチフネス S (dyne/cm)	機械抵抗 r (dyne/kine)	自由インピーダンス Z_0 (Ω)	位相角 θ (度)
11.5	14.0	11.10	12.80	1.70	6.8	24.5	1.79×10^7	46.0	2.4×10^{12}	4.91×10^6	31.7	72.0
24	26.0	22.20	24.55	2.35	10.2	16.0	8.93×10^6	27.2	6.23×10^{12}	4×10^6	19.5	76.0
40	40.5	39.87	40.15	0.28	143.	16.0	2.34×10^8	1.26×10^4	8.01×10^{14}	2.22×10^7	250.0	-1.0
100	107.0	97.60	102.40	4.8	20.8	3.14	7.4×10^4	30.2	1.19×10^{13}	9.12×10^5	667.0	-59.0
200	208.0	197.50	204.0	6.5	30.8	3.14	3.67×10^4	253	4.06×10^{13}	1.04×10^6	331.0	-82.5
500	530.0	400.0	530.0	130.0	3.9	0.785	3.97×10^4	1.93×10^4	1.91×10^9	1.966×10^5	927.0	-75.0
1000	1050.0	984.0	1014.0	30.0	33.4	0.785	1.03×10^5	1.29	5.11×10^{13}	2.41×10^5	40.0	-53.0

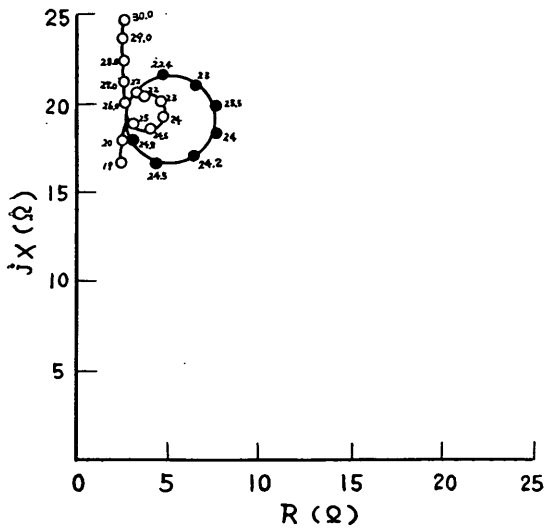
軟底質における超音波の反射透過特性



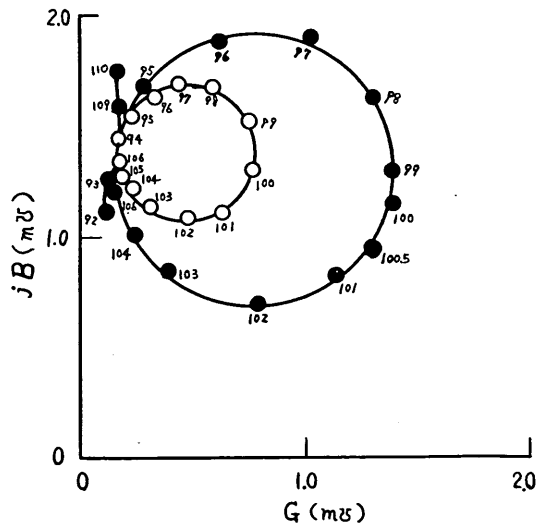
附図-1 11.5KHz 水中受波器インピーダンス特性



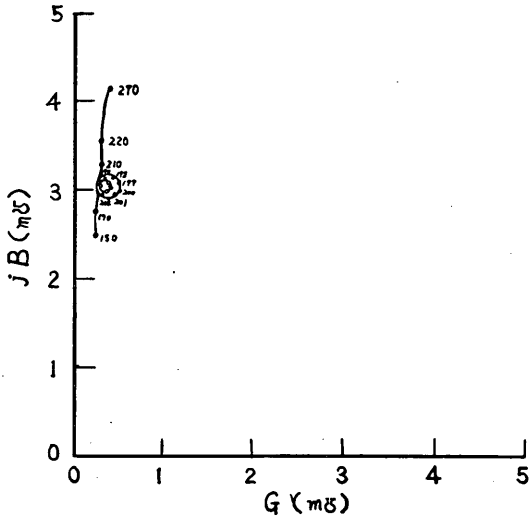
附図-3 40KHz 水中受波器インピーダンス特性



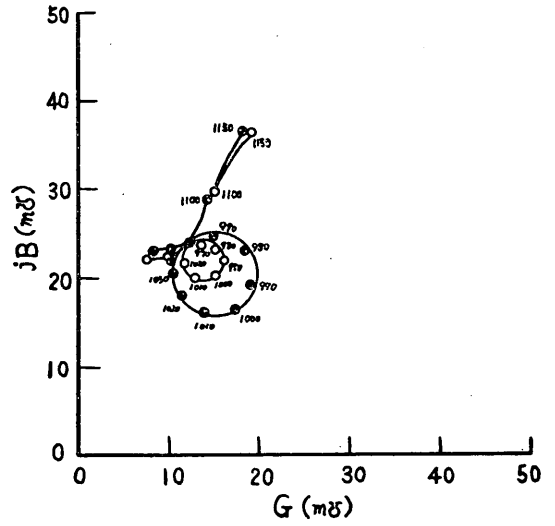
附図-2 24KHz 水中受波器インピーダンス特性



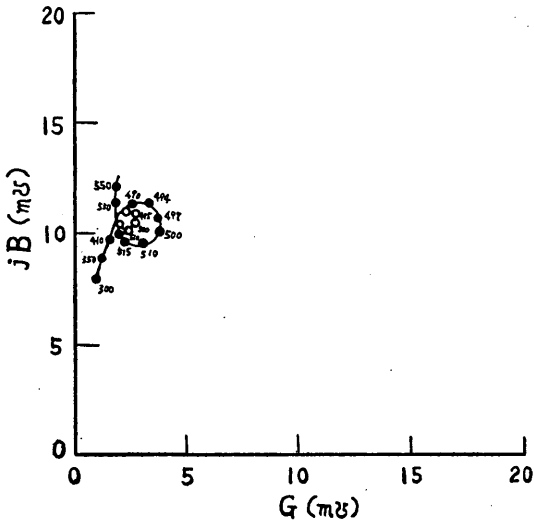
附図-4 100KHz 水中受波器アドミッタンス特性



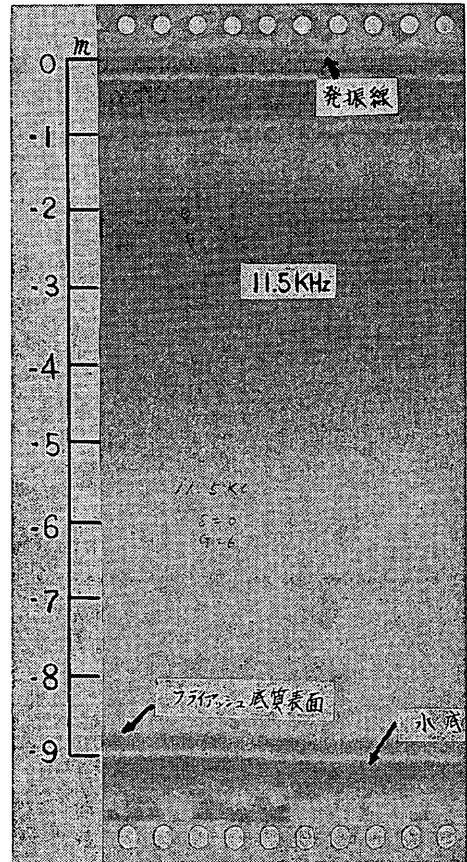
附図-5 200KHz 水中受波器アドミッタンス特性



附図-7 1MHz 水中受波器アドミッタンス特性

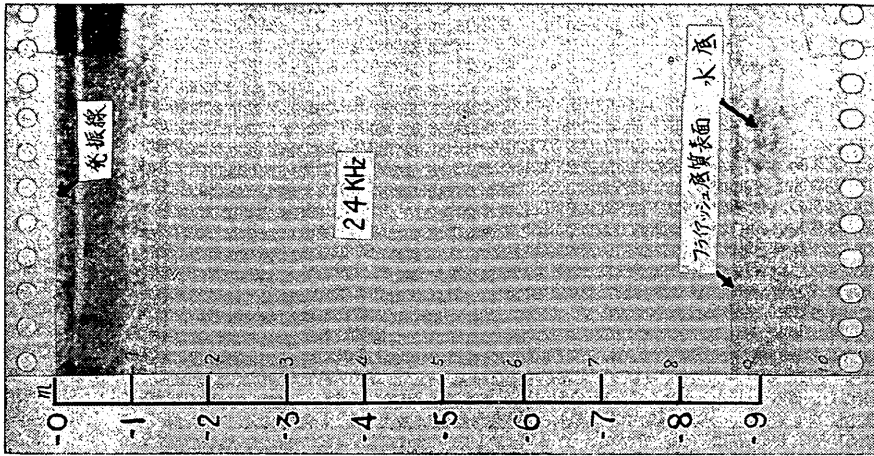


附図-6 500KHz 水中受波器アドミッタンス特性

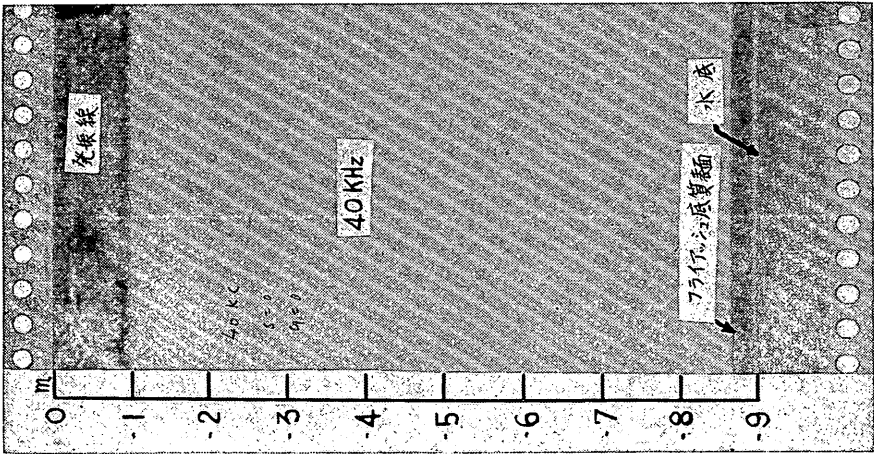


附写-1 11.5KHz 測深記録例

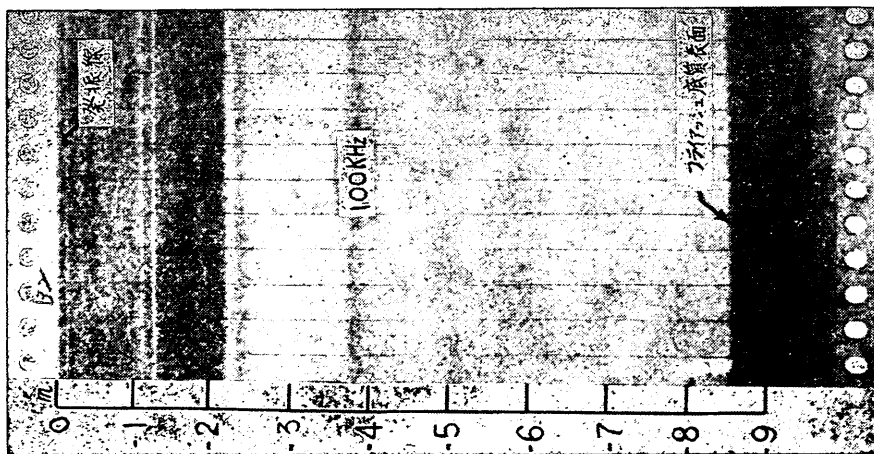
軟底質における超音波の反射透過特性



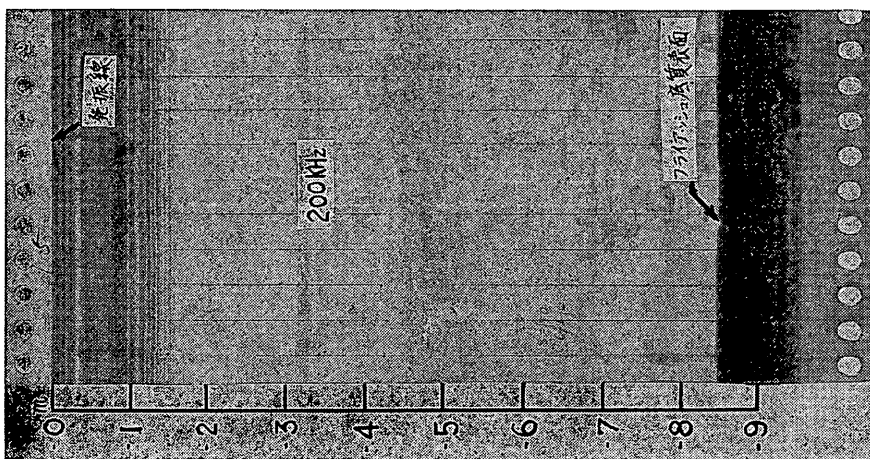
附写-2 24KHz 測深記録例



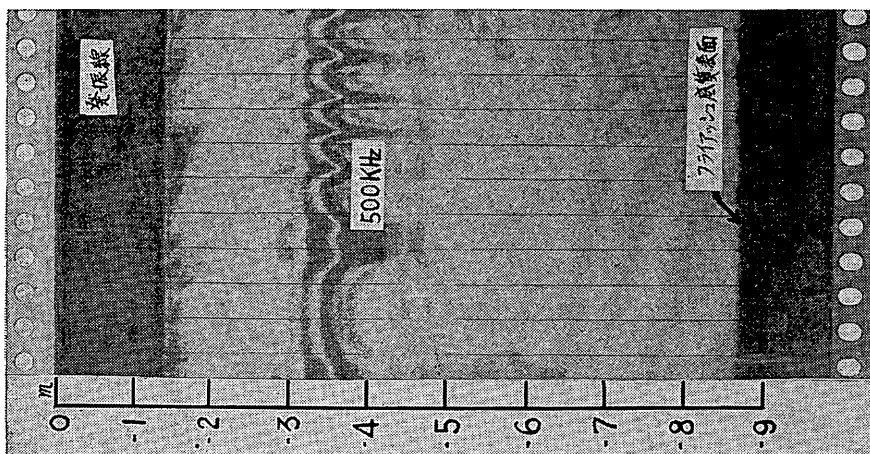
附写-3 40KHz 測深記録例



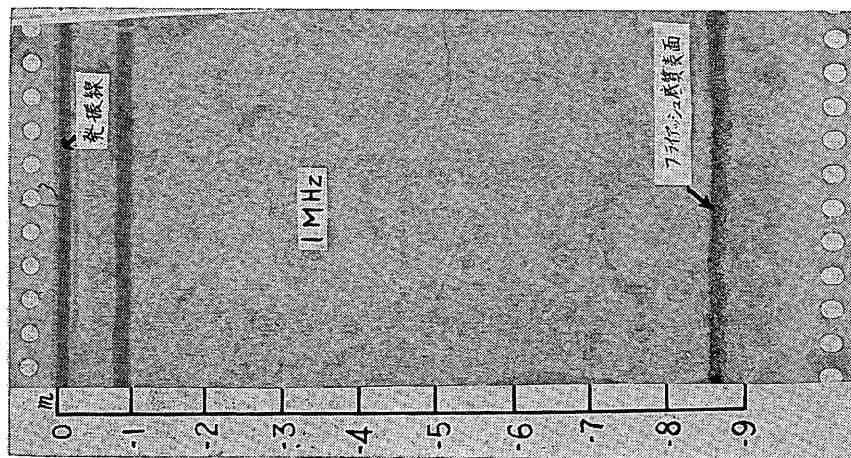
附写-4 100KHz 測深記録例



附写-5 200KHz 測深記録例



附写-6 500KHz 測深記録例



附写-7 1MHz 測深記録例