

港 灣 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 359 Dec. 1980

音波探査現地実験報告
—三河港における軟泥層探査実験—

木	原	純	孝
白	井	一	洋
松	本		茂
村	上	幸	敏

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 実 験 概 要	3
2.1 実験目的と日程	4
2.2 実験用測量船の概要	5
2.3 実験装置の概要	5
2.4 実 験 条 件	7
2.5 実 験 概 要	9
3. 実験結果と考察	11
3.1 海底土の物性	11
3.2 探査海域の水質	14
3.3 音波探査実験	18
3.4 超音波斜入射による海底散乱強度の測定	32
3.5 海中雑音レベルの測定	32
4. ま と め	36
5. あ と が き	36
参 考 文 献	37
記 号 表	37
附 録	38

A Field Experiment on the Ultrasonic Prospecting
— Ultrasonic Prospecting Characteristics in Soft Mud Layer at Mikawa Port —

Sumitaka KIHARA*
Kazuhiro SHIRAI**
Shigeru MATSUMOTO**
Yukitoshi MURAKAMI***

Synopsis

In order to develop the ultrasonic devices for prospecting sediments and buried objects, as well as profiling the sea-bed, we made a field experiment on the reflection and transmission characteristics of the ultrasonic waves to soft mud sea-bottom.

With the test of common type transducers having a frequency of 13kHz, 28kHz, 100kHz, 200kHz and 400kHz respectively, we also investigated the characteristics of new type transducers with same frequency.

The results of the experiment are summarized as follows:

It was possible to distinguish the surface of soft mud layer with the high frequency transducers, and the bottom with low frequency ones. As for the reflection characteristics of ultrasonic waves from the soft mud layer, we recognized that a reflection loss increased in proportion to the frequency, and the reflection seemed to be a secondary sound source caused by the scattering waves rather than the specular reflection.

The diced transducers have better build up characteristics than the common ones.

Through this experiment, we could conclude that it was possible to design the ultrasonic devices with high accuracy by measuring the sea noise and the reflection level of the oblique incident ultrasonic waves.

* Senior Research Engineer, Machinery Division
** Member of the Working Craft Development Laboratory, Machinery Division
*** Member of the Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

音波探査現地実験報告

—三河港における軟泥層探査実験—

木原純孝*
白井一洋**
松本茂**
村上幸敏**

要 旨

海底探査用超音波装置開発の一環として、海底がへどろ等軟泥層から成り立っている海域において超音波の反射・伝搬特性について現地実験を行った。

実験海域は、三河港蒲郡海域で、実験に使用した船は港湾工事用の監督測量船である。

供試超音波実験装置は、周波数が13, 28, 100, 200, 400kHzの5周波であり、新方式の送受波器の実証実験も兼ねて行なった。

実験の結果、高周波の超音波で軟泥表面を、低周波で軟泥下面を探査することができた。また軟泥層からの超音波の反射特性は、高周波になるほど反射損失が増大し、鏡面反射とするよりは散乱波に起因する二次音源とみなすことができる。

新方式のダイシング送受波器はパルス立上り特性がよいことがわかり、また海中雑音や超音波斜入射の測定によって、海底探査装置設計のための基礎データを得ることができた。

1. ま え が き

近年、船舶の大型化や安全性の向上あるいは環境保全等港湾をとりまく社会的要請の高度化、多様化により最近ますます港湾の大水深化の傾向が顕著になってきている。一方、港湾やその周辺海域は、工場廃液、生活排水の大量流出により汚染され、へどろが海底に堆積しているのが現状で、早急な除去が望まれている。

この大水深化傾向に対しては、従来の潜水土に替わる、水中施工監視、検査、海底探査システムの開発が、へどろの除去にあっては、へどろの実態調査に必要なへどろ探査装置の開発が対策の一つとして要請されている。

これらの海底探査システムを開発するためには、海中情報の無線遠隔伝達媒体として有望な超音波の利用が考えられる。超音波を利用した海底探査装置として音響測深機が従来から港湾工事に使用されてきているが、大水深やへどろ探査に対処できる探査法は現状では十分でなく多くの問題をかかえている。特に大水深での超音波ビームの拡がりによる方位分解能の低下、へどろ探査や機

雷探査等海底下の地層や沈埋物を探知する際の長いパルス幅に起因する距離分解能の低下等、精度上の問題を重点的に開発研究する必要がある。

そこで今回はこれら超音波を用いた海底探査技術開発のための基礎的資料を得るために、軟泥層海域において音波探査実験を行なった。

2. 実 験 概 要

音波を用いた海底探査技術の開発を行なうためには、海底土質における超音波反射損失、伝搬損失、残響特性、周囲海中雑音等音響的周囲条件と、海底土質、水質等海域環境条件との相関性を究明する必要がある。今回は調査期間その他の制約もあって、調査場所を土質条件が既にわかっている軟泥層海域一箇所にしぼり、音響特性も反射損失及び音響的周囲条件を選び、海域環境条件との相関性を調べた。なお今回は特に超音波受波立上り特性のよい送受波器素子(100, 200, 400kHz)の試作も行なったので、その実証実験も兼ねて行なわれた。

調査場所の選定には、土質が軟質土であり、比較的風

* 機材部主任研究官
** 機材部特殊作業船開発室
*** 機材部流体輸送研究室

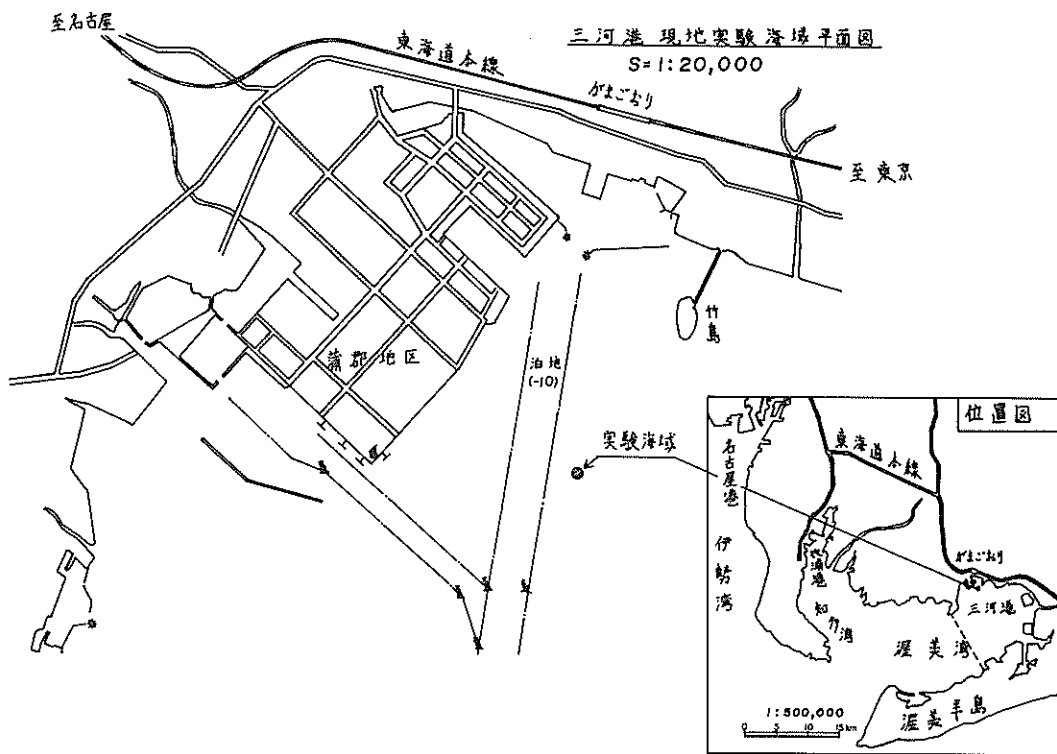


図-1 実験海域位置図

波や潮流等海気象条件のよいこと、さらには調査日程も考慮して、三河港蒲郡航路泊地を選定した。図-1に実験海域およびその周辺地域の概略図を示す。

2.1 実験目的と日程

(1) 実験目的

本実験の目的は、すでにまえがきに述べたように軟泥層の超音波海底探査技術開発のために行なうものであって、以下実験項目毎にその目的を述べる。

a) 音波探査関係

底質が軟泥の海域でへどろ層の厚さを探査したり、海底下に埋没している機雷、爆弾等沈埋異常物を検出する超音波探査装置を開発するためには、軟泥層の超音波特性(反射損失、伝搬損失、伝搬速度、残響、海中雑音等)を現地で定量的に把握する必要がある。そのために低周波から高周波までの超音波を発生できる超音波発生装置と、深度のチェックに使用する反射板、レッド、および送受波波形のレベル、パルス幅、パルス立上り特性を観測・記録するブラウン管オシロスコープ等を用いて実験を行う。また、受波レベルしきい値の設定には、海中雑音レベルの測定を行ない海底が傾斜している所での測深で、直下の海底からの反射波を問題にするときや、海底

に水平方向又は斜め方向に音波を放射する際の海底からの残響妨害の程度を把握したい場合には、超音波を海底に斜めに入射したときの散乱特性を測定する必要がある。

b) 海域環境関係その他

超音波の海中での伝搬特性(吸収、音速度等)は、海域の水質、即ち、水温、塩分、濁度に、影響され海底反射特性は堆積土の含水比、粒径等に依存するので、音波実験と同時に、これらを測定し、試料を採取して分析する必要がある。

その他、測深値の補正、海中暗雑音には、潮位、風向、風速、波高等海気象条件が影響するので、同時にこれらのデータを把握して、音波探査データとの相関性を検討する必要がある。

(2) 実験日程

実験は、実験海域の波浪などを考慮して、昭和55年2月19日～2月22日の4日間で行い、そのうち20、21日を実験日、他は実験準備日とした。

表-1に実験日程を示す。19日午後、三河港から蒲郡岸壁に回航されてきた衣浦港所属監督測量船「みか村」に乗船し、実験用機材の組立、設置等、実験のための準備を行った。実験は20、21日の2日間行った。蒲郡岸

表 - 1 実 験 日 程

	作 業 内 容
2月19日	実験準備, 機材取付 (実験船)
2月20日	音波探査実験 (100, 200, 400kHz 一般型送受波器) 水質測定 (水温, 電導度, 濁度, pH, DO) 採 水 採 泥 (表層土) 透明度測定 (白色円板)
2月21日	パルス立上り特性比較実験 (100, 200, 400kHz ダイシング型) 音波探査実験 (13, 28kHz) レッド深度と測深記録の比較 超音波斜入射による散乱強度の測定 海中周囲雑音の測定 採 水 採 泥 (表層土および下層土) 水 質 測 定 (水温, 電導度, 濁度, pH, DO) 透明度測定 (白色円板)
2月22日	機材撤去, 跡片付

壁を停泊基地として, 毎日 1.5km 離れた実験海域へ航行して実験を行い, 終了後再び蒲郡岸壁に停泊することにした。22日は機材の撤去, 跡片付, 荷造発送の日であった。

2.2 実験用測量船の概要

実験に使用された測量船の主要目を次に示す。写真-1にその外観を示す。

船 種	監督測量船
船 名	みかわ
所 属 港	衣浦港



写真-1 実験に使用した測量船

船 体 寸 法	L×B×D=13.15m×6.12 m × 1.93m
喫 水	0.65m
材 質	耐食アルミ
航 行 区 域	平 水
総 屯 数	4.157 t
主 機 馬 力	260ps × 2 (D.E)
速 力	17Kt
音響測深装置	4 素子 (200kHz)
定 員	乗組員 2 名, その他 12 名

2.3 実験装置の概要

本実験で使用した実験装置の概要を次に示す。

(1) 水中波動実験装置

本装置は海底探査技術の開発研究において, 超音波の伝搬, 反射, 吸収等波動の挙動特性を実験的に検討するために試作されたものである。本装置は下記の各機器により構成されている。図-2にそのブロック図を示し, 写真-2にその外観を示す。

a) 送信部

ファンクションゼネレータ (FG) と電力増幅器から構成されており, ファンクションゼネレータは 0.001Hz~5 MHz の方形波, 三角波, 正弦波を発生できる。電力増幅器はファンクションゼネレータから発生された微小信号を大きな信号に増幅するものであって, 周波数範囲は

10kHz～500kHz，増幅度は55dBである。

b) 電気音響変換部

電気信号を超音波に変換したり，またその逆をするもので，100，200，400kHzの一般形送受波器が3組，新しい方式のダイシング形送受波器が3組，その他校正用として10kHz～200kHzの水中マイクロホンがある。

c) 受信部

水中対象物からの微弱な超音波反射波を増幅する部分で，周波数帯域が10Hz～1MHz，増幅度40dBの電圧増幅器から構成されている。

d) 記録表示部

送信された超音波の周波数やレベルおよび受信レベルまたは超音波の伝達時間を表示したり，記録する部分で，ユニバーサルカウンタとレコーダから構成されている。

その他，送受波器振動子のインピーダンス測定のため

の試験計測部，海水の水質を計測する水質チェッカから構成されている。

表-2に水中波動実験装置の主要目を示す。

(2) オシロスコープ

水中波動実験装置に接続して使用する表示計測機器で，超音波の波形を観測して，超音波の減衰，伝搬速度，反射損失が解析できる。その主要目は次のとおりである。

- a) 感 度 2mV/DIV～5V/DIV
- b) 周波数帯域幅 DC～50MHz 以上

(3) 音響測深機

連続して測深探査する記録用として下記の音響測深機を使用した。

a) 送受波器：13kHz，28kHz，200kHz，400kHzの4周波

b) 記録方式：乾式放電破壊記録方式

(4) 標準反射板

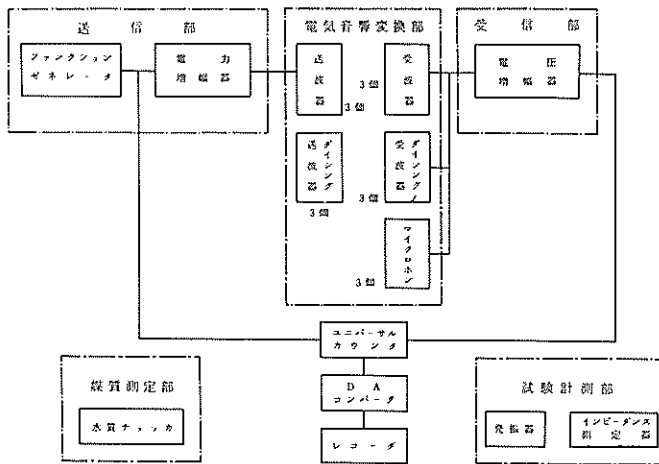


図-2 水中波動実験装置構成図

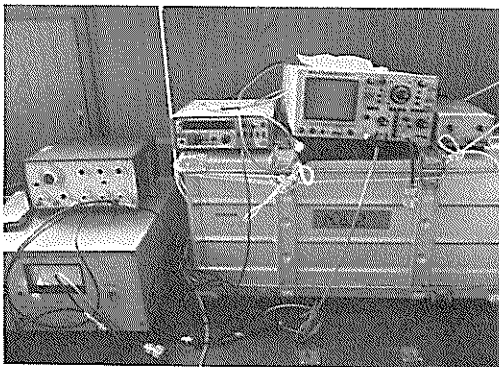


写真-2 超音波実験装置の外観



写真-3 送受波器の架台組立

表-2 水中波動実験装置主要目

品名	型式	規格	数量
ファンクションゼネレータ	ナショナル VR-7402A型	0.001Hz ~ 5MHz	1式
電力増巾器	アステックENI型7040L型	10kHz~500kHz 55dB	1式
電圧増巾器	A HP 415 A型	10Hz ~ 1MHz 40dB	1式
ユニバーサルカウンタ	ナショナルVP-4546 A	DC ~ 10MHz	1式
D-Aコンバータ	ナショナルVP-49050 A		1式
レコーダ	ナショナルVP-6621 A	2ペン式 DC 1mV ~ 5V	1式
校正用マイクロホン	東和 TW-9103	10kHz ~ 200kHz	3個
一般用送波器	東和 TW-9120	100, 200, 400kHz各2個	3組
ダイシング送波器	東和 TW-9120	100, 200, 400kHz各2個	3組
発振器	ナショナルVP-7101 A	10Hz ~ 1MHz	1式
インピーダンス測定器	安藤電気DRZ-4号	0 ~ 1000Ω 0 ~ ±90° 1kHz ~ 1MHz	1式
水質チェッカ	東亜電波WQC-2A	温度, 電導度, 濁度 pH 溶存酸素 (DO)	1式

バーチェック用として250φ, 500φ, 1000φの3種類
の反射板を用いた。

(5) 測鉛

測深用として3.3kg皿付(300φ), 3.3kg, 6.3kg, 12.7kg
kgのものを使用した。

(6) 水中音圧計

周囲雑音レベル測定用として水中音圧計を使用した。

a) 周波数範囲: 10Hz ~ 50kHz

b) 測定音圧範囲: 0 ~ 80dB (0 dB.re 1μbar)

(7) 総合水質測定装置

水温, 濁度, 塩分等, 実験海域の環境条件を測定する
ために用いた。

a) 測定項目: 深度, 水温, 濁度(透過率), 塩分,
pH, 溶存酸素量(DO)



写真-4 水質測定装置

b) 構成: 本体, 検知部, デジタルプリンタ 水
中ケーブル(50m)

(8) 採泥器: エクマンバージ20cm 角形

(9) 採水器: 北原式 1000cc

(10) 発動発電機

測量船に予備のAC100V電源を持たないため, 下記の
発動発電機を使用して実験装置の電源とした。

a) 電圧 100/200V 1φ60Hz

b) 容量 28kVA × 2台

2.4 実験条件

(1) 音波探査実験海域および海底土質

音波探査海域は, 図-1に示すように, 蒲郡港, 東防
波堤から南へ約1.5kmの, -10m航路の端の過去にボー
リングを行ったことのある海域である。その詳細図を図
-3に示してある。水深が6m程度で, 海底地形がほぼ
平坦な海域である。

図-4に昭和41年に行われたボーリング施工による
土質柱状図を示す。この図によると, 水深は6.10mで,
表層0.5mは沈泥が堆積していることがわかる。その下層
約5mの厚さで貝殻混りの粘土質シルトの層があり, 海
底表面から, 5.5m下までは, N値が0の非常に軟らかな軟
泥層が堆積していることがわかる。

(2) 測定条件

音波探査のための送受波器等センサー部の船体への取
付位置は図-5に示すとおりである。測定はすべて実験
船を止め, 波浪, 潮流に流されないよう船首尾ともにア
ンカーを投入して, 船体を固定した。

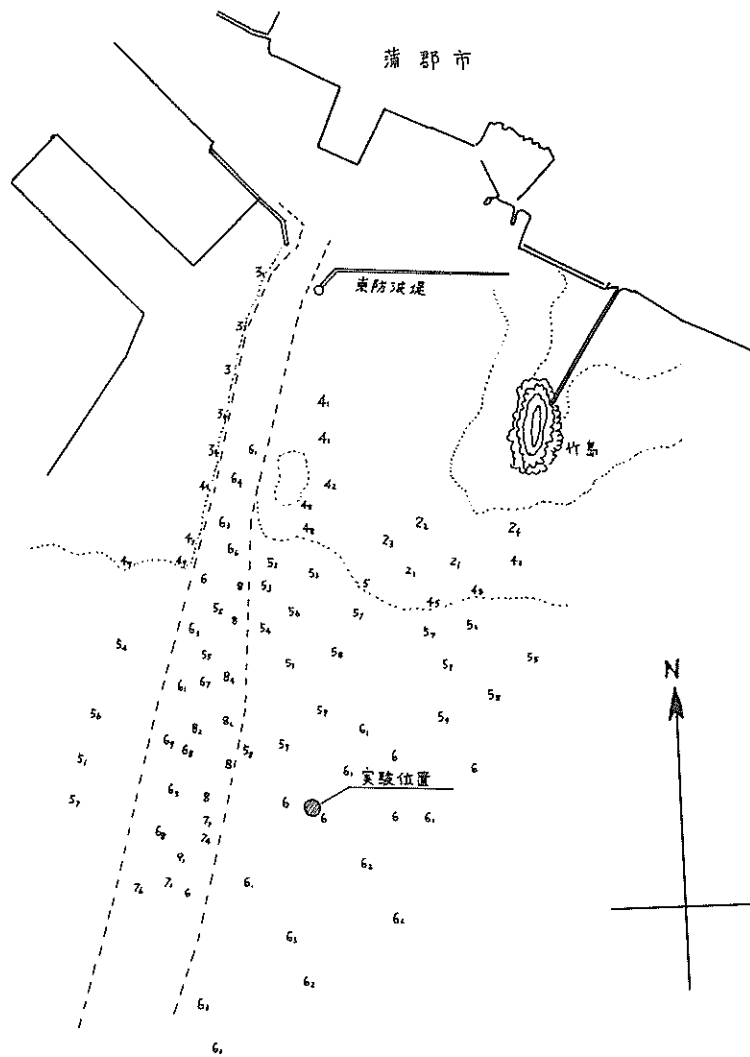


图-3 实验位置详细图

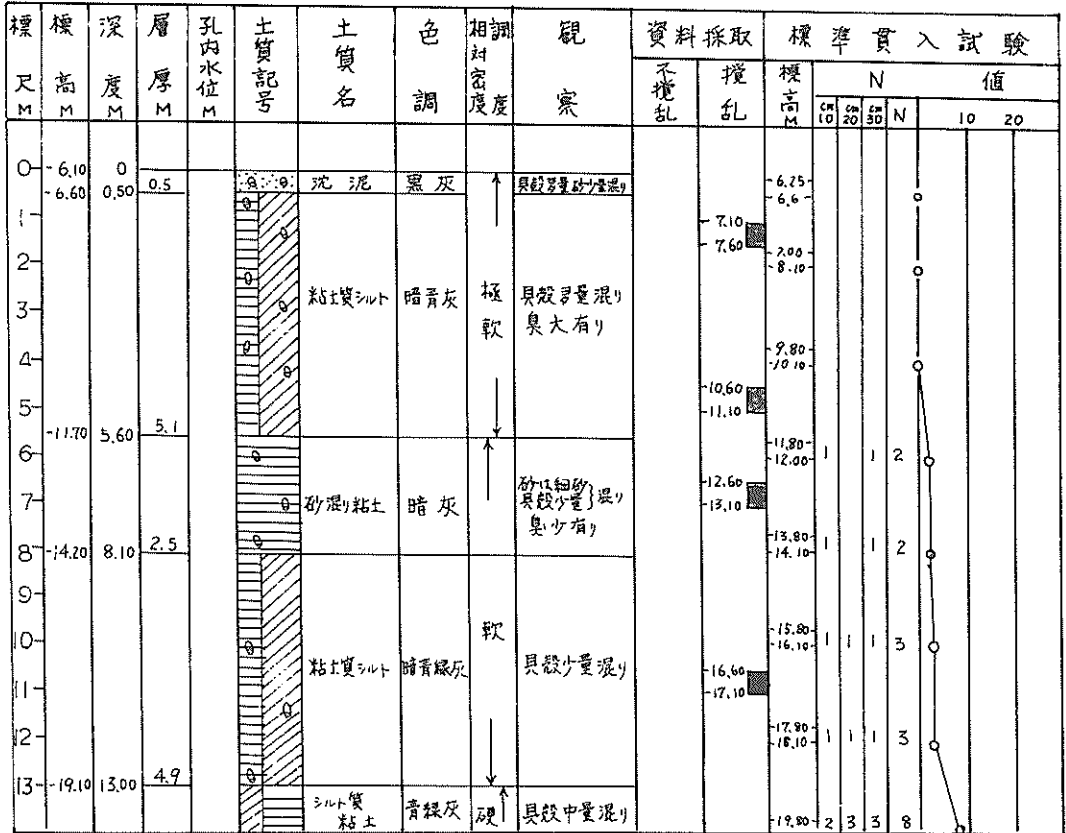


図-4 土質柱状図

(3) 海気象関係

実験期間中の海気象記録を附表-1に示す。実験期間中、晴天に恵まれたが、午後若干の強風、波浪にみまわれた他、全般的に平穏であった。潮流は特に測定しなかったが、レッド測深の際、レッドが流されたので、潮流があったと思われる。

2.5 実験概要

(1) 測定項目および測定要領

測量船を探查海域に止め、船首尾にそれぞれ投錨して船体が潮に流されないように固定した後、表-3に示すような音波探查関係、および海域環境条件等の各項目を以下の要領で測定した。

なお、図-6に実験要領図を示す。図-6のa)は水中波動実験装置を用いた音波探查実験、b)は海中雑音レベルの測定実験、c)は超音波斜入射海底散乱強度の測定実験、d)は海域環境条件の測定、e)は採泥、採水の要領を示す。

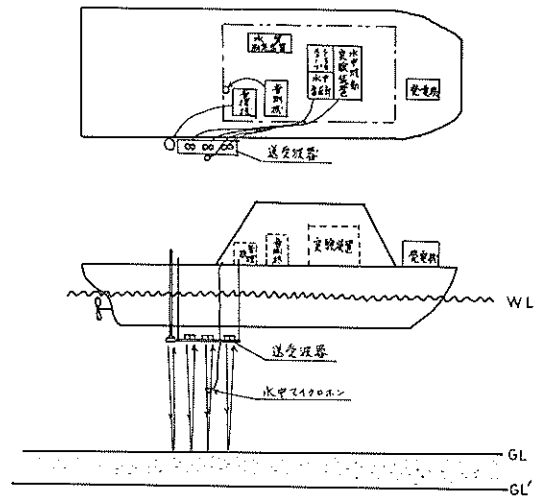


図-5 測定機器配置図

表 - 3 測定項目及び測定要領

測定項目	使用機器	測定要領	
音波探査関係	海底反射損失	水中波動実験装置 音響測深機 オシロスコープ	5周波(13, 28, 100, 200, 400kHz)の送波レベルと海底面反射波受波レベルをオシロスコープにて測定記録する。
	バーチェック	同上 及び標準反射板	オシロ波形の記録
	水深	同上 又はレッド	測深機自動記録 随時測定
	ビルドアップ特性	水中波動実験装置 オシロスコープ	一般型とダイシング型送受波器のオシロ波形の記録
	海底散乱強度	同上	送受波器を傾斜させて受波レベルを記録
	周囲雑音レベル	水中音圧計	各深度毎にエンジン停止, 作動の場合にわけて測定
海域環境関係	採水 採泥	採水器 採泥器	深度を3段階に分けて採水 表層の泥は採泥器, 海底下の泥は潜水士による採泥
	透明度 水温, 濁度, 塩分 pH, DO	30cmφ 白色円板 総合水質測定装置	随時測定 10分毎自動記録
その他	汐位 風向・風速		観測記録

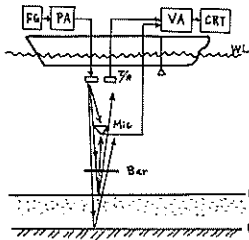


図-6-a) 音波探査実験

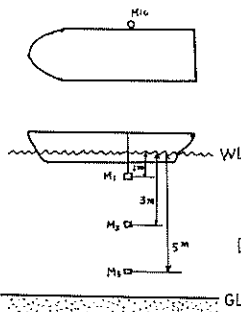


図-6-b) 海中雑音レベルの測定

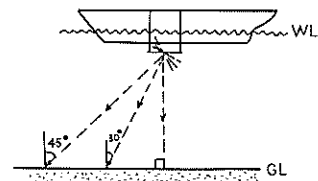


図-6-c) 超音波斜入射海底散乱強度の測定

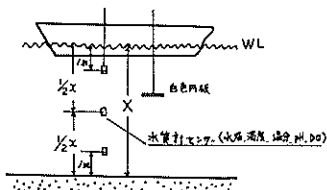


図-6-d) 海域環境条件の測定

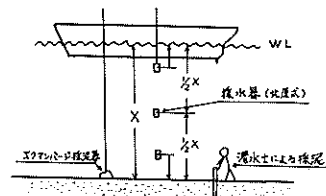


図-6-e) 採泥・採水要領

(2) 音波探査関係

音波探査に關係する測定項目は、海底反射損失、パッチェック、水深、立上り特性、海底散乱強度、海中周囲雑音レベルである。これらの中、海底反射損失、パッチェック、海底散乱強度は図-6-a)の実験ブロックに示すように、水中波動実験装置および音響測深機とオシロスコープを用いて超音波送受信波形をポラロイドカメラで撮影記録した。波形撮影方法は各テスト毎に、送信波のパルス幅およびレベルを計るための送信波形の大きさ、対象物までの伝搬速度を計るための送信波形と受信波形の間隔、およびパルス立上りを調べるための拡大された受信波形などの3枚を撮ることとした。

送波レベルの測定には、校正用マイクロホン(10kHz)~200kHz)を図-6-a)のように吊下げ、オシロスコープの波形振幅を読みとった。本実験に使用した送受波器の特性を表-4に、その理論指向性特性を図-7に示した。特に今回は、測探精度に關係するパルス立上り特性が、一般の送受波器よりもすぐれているダイシング

型送受波器を100, 200, 400kHzの3周波に使用した。写真-5にダイシング型送受波器振動素子の外観を示す⁴⁾

ダイシング型送受波器というのは、PZT等電歪磁器振動子の音波放射面から厚み方向に碁盤目状の切り込みを振動子厚みの3/4以上の溝を切ったもので、普通の振動子よりも厚み方向の振動モードが強くなるので、指向性副極が低く、指向性がシャープとなる。また機械的Qが小さいためパルス立上り特性がよくなり、方位、距離共に分解能がよくなる利点があるといわれている。⁴⁾

表-5に各送受波器、校正用マイクロホンの音響的諸定数を示す。この表で(N)は普通型の送受波器を、(D)はダイシング型送受波器を示す。

(3) 海域環境関係およびその他

海域環境關係の測定項目は、探査海域における測量船上からの採水、採泥と水深、透明度、水温、濁度(透過率)、塩分、pH、DO、潮位、風向、風速などの測定である。図-6-d), (e)に採水、採泥および水質測定位置を示す。

表-4 送受波器の特性

周波数 f (kHz)	外形寸法 (mm)	音響放射面寸法 (mm)	半減全角 (度)	備考
13	450	420	20	
28	260	250	24	
100	130	100φ	12	円板型
100	130	100φ	12	円板ダイシング型
200	130	100φ	6	円板型
200	130	100φ	6	円板ダイシング型
400	130	100φ	3	円板型
400	130	100φ	3	円板ダイシング型

採水には、北原式の採水器を用い、採水位置は図-6-e)に示すように海面から1mの深さの点、海面と海底の間点、海底附近の3箇所です時採水した。採泥は、エクマンバージ式採泥器を用いて表層土の採取を行い、下層土の採泥は、潜水士によって直径5cm、長さ1mおよび2mの2種類のパイプを海底にさし込み、それぞれ海底下1mおよび2mの泥を採取した。

3. 実験結果と考察

3.1 海底土の物性

音波探査における超音波の伝搬、反射特性に影響をおよぼす重要な要因の一つは海底土の性質である。特に濁りや、海底に堆積している沈泥等の粒度組成はもちろん、

含水比など堆積土の物性を十分に把握しておく必要がある。

探査海域の土質は、図-4に代表されると思われる。実験中に採取した実験海域の表層土および海底下2mまでの堆積土の含水比、粒度の分析を行った。図-8および図-9に含水比および粒度組成を示す。採泥土は表層分に採泥時、強い腐泥臭があり、黒色であったが、下層土は、特に強い腐泥臭はなく、灰色であった。図-9によれば海底面(No.1 No.40)の泥は均等係数が大で、シルト以下の粒径の土が広範囲に分布していることがわかる。海底下(No.20, No.21)〔1.0m, 2.0m〕の泥は均等係数が4以下で各粒径とも均等に分布していることがわかる。

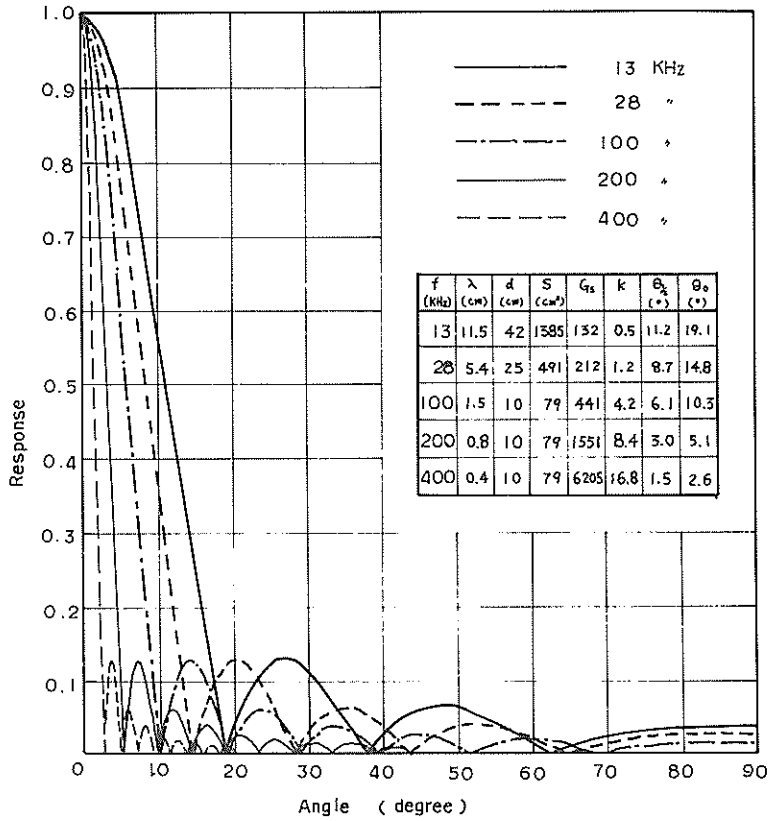
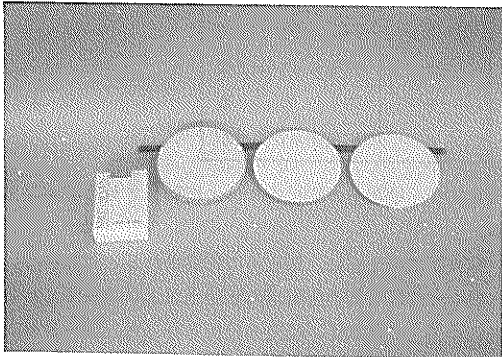
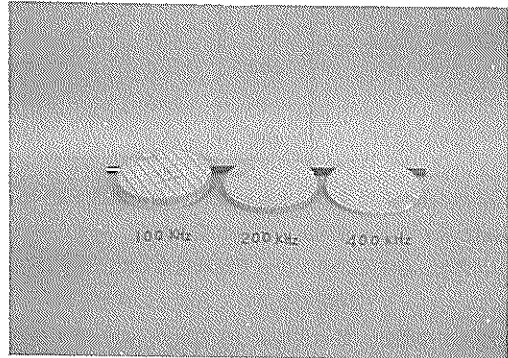


図-7 送受波器の理論指向性特性



(表)



(裏)

写真-5 ダイシング型送受波器用振動素子の外観

表-5 各送受波器及びマイクロホンの音響的諸定数

周波数 f (kHz)	13.5	27.3	103.18 (M)	966.7 (D)	2000 (M)	2176 (D)	4301.3 (W)	4136.5 (D)
送信電圧 E (V)	500	500	300	300	300	300	300	400
パルス幅 τ_0 (μ s)	300	300	200	200	200	200	200	200
送波器電圧感度 (dB) (μ bar/Vm)			68.2	64.1	80.0	76.2	74.4	63.2
受波器電圧感度 (dB) (V/ μ bar)			-81.1 (881×10^{-5})	-82.0 (79×10^{-5})	-90.0 (3.16×10^{-5})	-97.9 (1.27×10^{-5})	-94.1 (1.97×10^{-5})	-106.4 (4.78×10^{-6})
送波音圧 P_s (dB-m)			118	114.1	130	126.2	124.4	115.2
指向半減全角 ($^\circ$)	20	24	12	12	6	6	3	3
音響放射面直径 (cm)	42	25	10	10	10	10	10	10
校正用マイクの受波感度 (V/ μ bar)	-113 (2.2×10^{-6})	-113 (2.2×10^{-6})	-113.5 (2.11×10^{-6})	-113.5 (2.11×10^{-6})	-112.5 (2.37×10^{-6})	-112.5 (2.37×10^{-6})	-129 (3.55×10^{-7})	-129 (3.55×10^{-7})

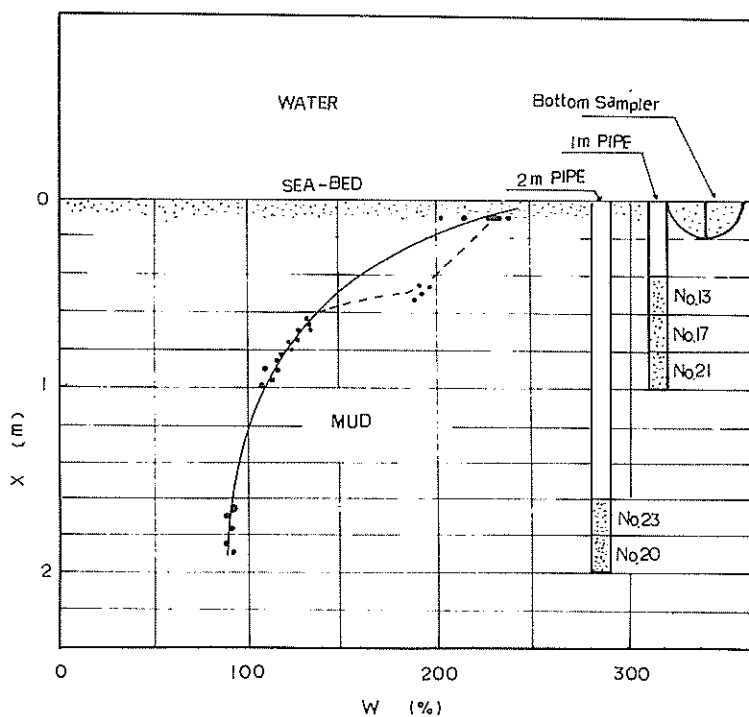


図-8 海底下の深度 (x) と採取土の含水比 (W)

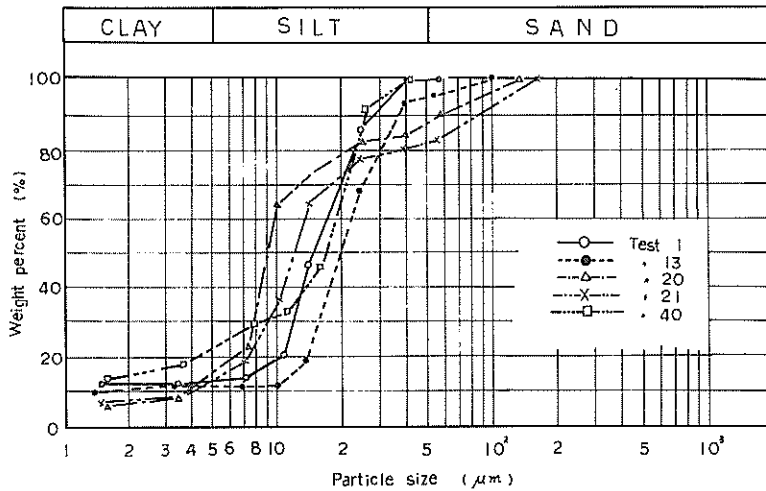


図-9 三河港(蒲郡地区)採取土の粒度試験結果

3.2 探査海域の水質

超音波が海水中を伝搬する場合、伝搬速度、吸収等の伝搬特性におよぼす要素は、水温、塩分、濁度、水圧などである。その他、海洋環境の水質の目安として、pH、DOを総合水質測定装置で同時測定記録することにした。この中で、特に、水温、塩分、透過率が、音波伝搬速度に影響をおよぼすので、これらを十分に把握しておく必要がある。

探査海域の水質(測定水深Dm、水温T℃、透過率T₀%、塩分S‰、pH、DO ppm)を測定した結果は、表-6、図-10に示すとおりである。

採取した海水は港研に持ち帰り、濁度(ppm)の垂直分布を把握するために、水質チェッカにて濁度、pH、水

温を測定した。その結果を表-7、図-11に示す。なお、参考のために久里浜湾の海水の濁度、pH、水温などを測定してみた。表-7から濁度は、海底付近で最高の59.4 ppmを除いて平均値7.4 ppmであり、海底から3 m付近で2 ppm、3 m以上海面までは1.5 ppmであった。

探査海域の濁りの程度をみるために、30 cmφ白色円板を用いて透明度を測定した。その結果、平均値として実験第1日目は2.8 m、第2日目は3.3 mであった。

現地海域での白色円板を用いた透明度測定値と透過率の相関をみるため、図-12のようにプロットすると直線的な関係があることがわかった。これも今後海底探査技術開発を進める上において重要な設計指標となるであろう。

表-6 海域環境条件測定データ (1)

D: 深度 S: 塩分
T: 水温 pH: ペーハー
T₀: 濁度(透過率) DO: 溶存酸素

S. 55. 2. 20

時刻 項目	10-39	10-40	10-41	11-18	11-28	11-38	11-48	11-58	12-08	12-28	12-38
D (m)	1.10	6.92	3.62	0.68	0.73	0.72	0.75	0.72	0.76	6.28	5.84
T (℃)	5.09	5.27	5.09	5.18	5.19	5.19	5.18	5.19	5.18	5.16	5.14
T ₀ (‰)	64.30	0.17	65.27	63.92	-	63.70	62.56	62.37	61.59	47.03	0.04
S (‰)	31.52	31.56	31.56	31.51	31.50	31.48	31.47	31.47	31.47	31.54	31.55
pH	8.26	8.24	8.27	8.30	8.29	8.30	8.30	8.31	8.31	8.15	8.29
DO (ppm)	15.45	15.72	15.35	10.40	9.92	10.04	9.34	8.96	9.32	13.78	14.14

表-6 海域環境条件測定データ(2)

時刻 項目	13-18	13-28	13-38	13-48	13-58	14-08	14-18	14-28	14-38	14-48	14-58
D (-m)	5.42	5.44	4.13	4.00	4.18	4.07	4.21	4.01	1.93	2.12	1.98
T (℃)	5.16	5.20	5.20	5.20	5.21	5.22	5.22	5.23	5.23	5.23	5.23
T _b (‰)	43.38	23.77	59.87	59.76	60.88	61.13	60.53	61.35	60.70	60.28	61.50
S (‰)	31.52	31.47	31.49	31.48	31.48	31.48	31.48	31.48	31.47	31.47	31.48
pH	8.76	8.49	8.41	8.37	8.36	8.35	8.34	8.34	8.34	8.34	8.34
DO (ppm)	10.54	10.05	9.67	9.37	9.55	8.89	9.23	9.30	9.32	9.31	8.67

時刻 項目	15-08	15-18	15-28	15-38	15-48	15-58	16-08	16-18	16-28	平均	総平均
D (-m)	2.12	1.96	2.22	1.98	2.03	2.08	1.92	2.18	2.22	上 1.272 中 4.031 下 5.980	3.761
T (℃)	5.25	5.26	5.26	5.26	5.26	5.27	5.29	5.29	5.29	上 5.227 中 5.196 下 5.186	5.203
T _b (‰)	61.25	60.40	60.11	61.13	60.32	58.77	60.00	61.17	62.15	上 61.457 中 61.256 下 22.878	48.530
S (‰)	31.47	31.47	31.48	31.47	31.46	31.47	31.46	31.45	31.46	上 31.475 中 31.493 下 31.528	31.499
pH	8.33	8.32	8.32	8.34	8.33	8.32	8.31	8.30	8.30	上 8.314 中 8.349 下 8.386	8.350
DO (ppm)	9.69	10.85	10.29	10.34	10.95	10.80	11.27	12.31	13.24	上 10.551 中 10.194 下 12.846	11.197

S.55. 2. 21

時刻 項目	9-58	10-08	10-18	10-28	10-38	10-48	10-59	11-08	11-18	11-28	11-38
D (-m)	1.17	1.17	1.18	1.09	1.14	1.11	6.74	6.67	6.70	6.63	6.66
T (℃)	5.29	5.29	5.31	5.30	5.32	5.32	5.30	5.31	5.33	5.32	5.23
T _b (‰)	66.37	65.49	66.42	66.11	65.24	65.20	39.10	65.29	37.12	63.98	63.98
S (‰)	31.60	31.59	31.58	31.51	—	—	—	—	—	—	—
pH	8.34	8.34	8.33	8.33	8.75	8.65	8.50	8.41	8.36	8.34	8.33
DO (ppm)	11.77	11.99	10.89	9.56	8.83	8.75	12.42	11.53	9.60	9.10	9.09

時刻 項目	11-48	12-56	13-06	13-16	13-26	13-36	13-46	14-43	14-53	15-03	15-13
D (-m)	3.54	3.40	3.40	3.50	3.20	3.40	3.30	3.40	3.30	3.40	3.30
T (℃)	5.32	5.37	5.37	5.34	5.35	5.32	5.36	5.51	5.51	5.49	5.45
T _b (‰)	63.03	67.00	67.00	66.00	66.00	65.00	65.00	60.00	60.00	61.00	65.00
S (‰)	—	31.35	31.33	31.33	31.32	31.32	31.32	31.35	31.34	31.34	31.33
pH	8.33	8.51	8.44	8.40	8.38	8.36	8.36	8.34	8.34	8.34	8.33
DO (ppm)	8.93	7.89	7.81	8.24	8.48	8.57	8.62	9.09	8.78	8.72	8.70

時刻 項目	15-23	平均	総平均
D (-m)	3.40	上 1.143 中 3.378 下 6.680	3.734
T (℃)	5.45	上 5.305 中 5.403 下 5.298	5.335
T _b (‰)	66.00	上 65.805 中 64.253 下 53.894	61.317

時刻 項目	15-23	平均	総平均
S (‰)	31.33	上 31.570 中 31.333	31.452
pH	8.33	上 8.457 中 8.372 下 8.388	8.406
DO (ppm)	8.68	上 10.298 中 8.543 下 10.348	9.730

S55.2.20

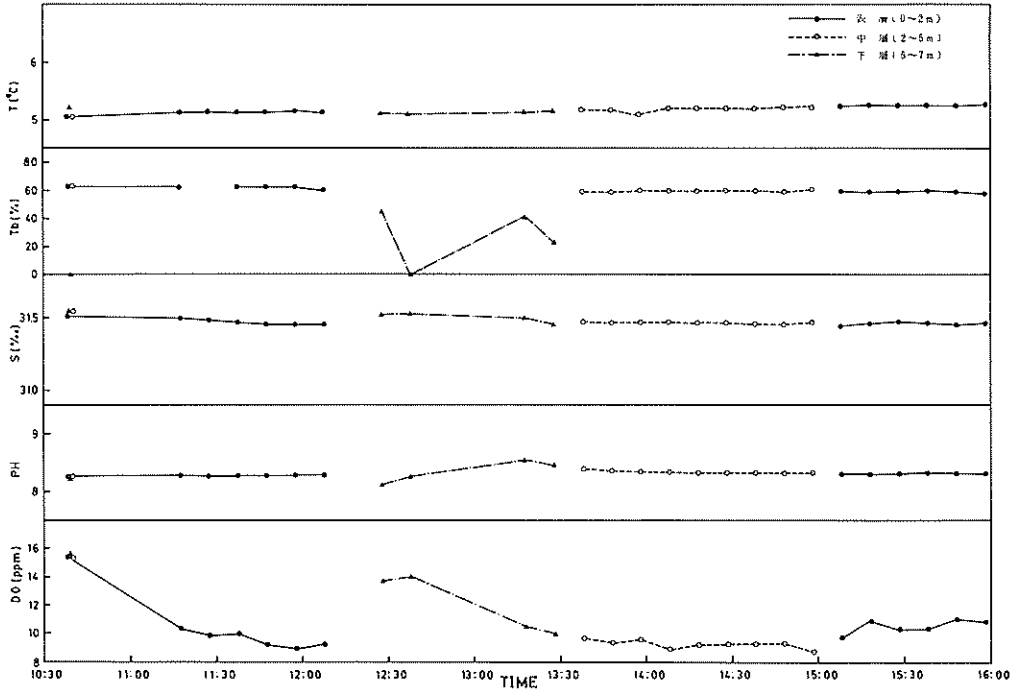


図-10 海域環境条件測定データ (その1)

S55.2.21

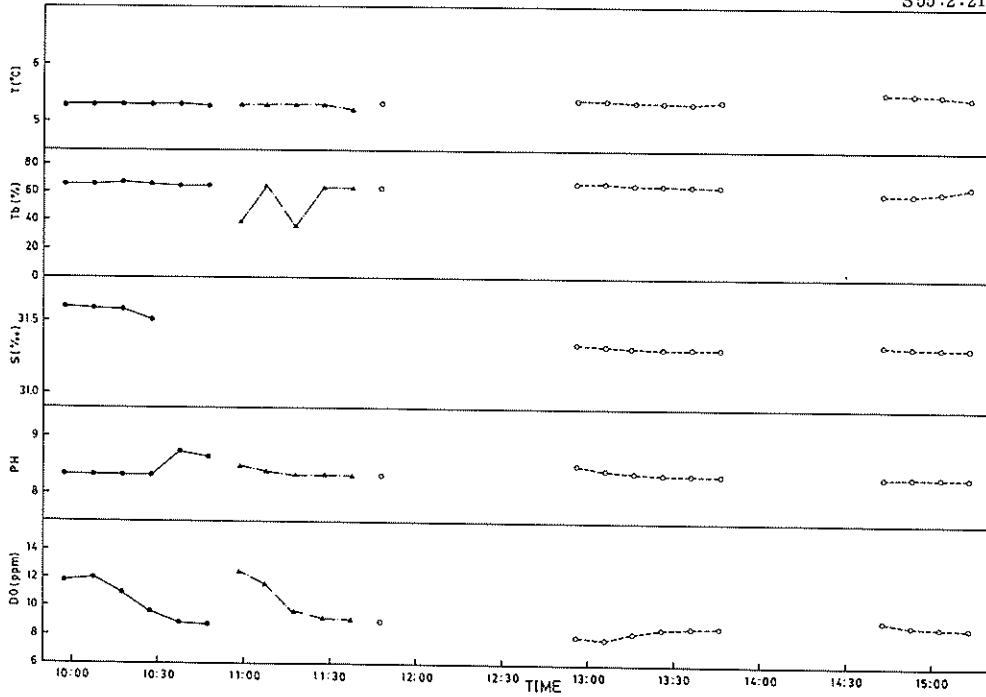


図-10 海域環境条件測定データ (その2)

表-7 採水試料室内分析結果

No	濁度 ppm	pH	温度 ℃	採水深度	採水日	備考
2	1.0	7.73	21.2	-3.5m	2/20	11:58
3	6.5	7.81	22.0	海底	20	11:55
4	2.0	7.75	21.7	-1.0m	20	12:00
5	8.0	7.71	20.9	海底(-6.5m)	20	13:24
7	2.0	7.79	21.5	-3.5m	20	13:35
8	1.5	7.79	21.5	-1.0m	20	13:40
10	8.0	7.79	21.4	海底	20	14:40
14	4.0	7.79	21.4	海底	21	14:15
16	4.0	7.85	20.9	-3.0m	21	14:15
18	59.0	7.43	21.2	海底	21	10:04
24	1.0	7.81	20.8	-8.0m	21	11:25
25	1.0	7.78	21.2	-1.0m	21	10:10
30	2.0	7.75	21.2	-4.0m	21	11:25
31	0	7.82	21.7	-1.0m	21	11:25
32	2.0	7.85	21.3	-4.0m	21	10:09
34	1.0	7.85	21.4	-3.5m	20	14:40
42	2.0	7.81	21.7	-1.0m	20	14:41
47	7.0	7.75	21.7	海底	20	15:32
48	0	7.81	22.0	-3.0m	20	15:34
49	1.0	7.81	21.8	-1.0m	20	15:36
50	0	7.83	22.0	-1.0m	21	14:15
海水	7.5	7.65	20.1	表面	5月20日	久里浜湾

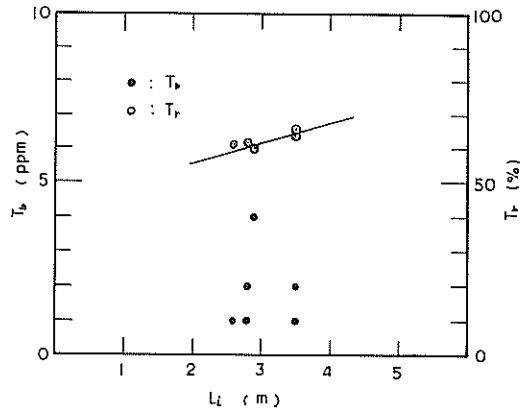
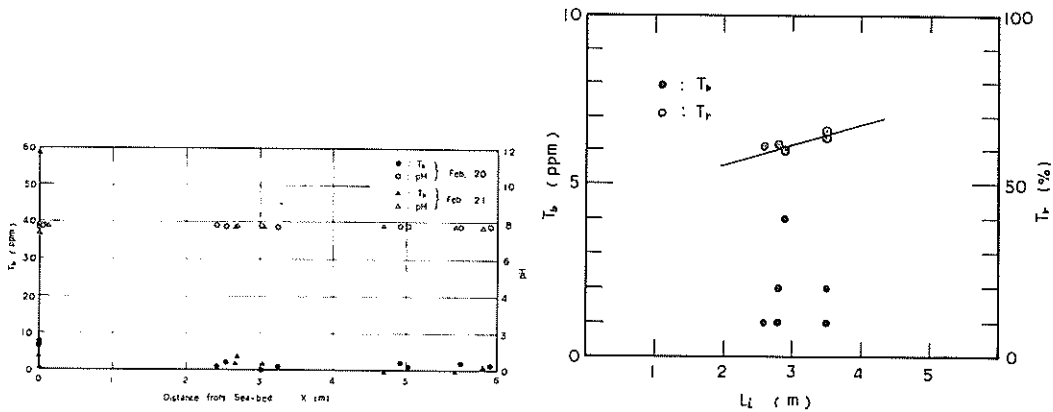
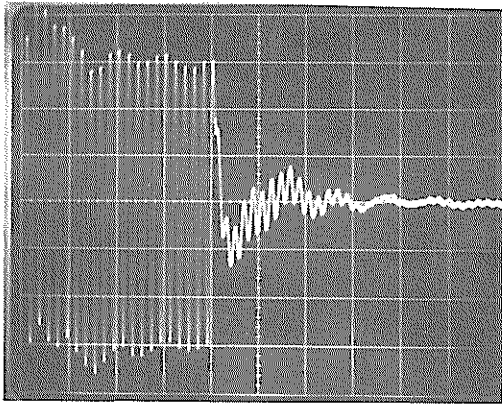
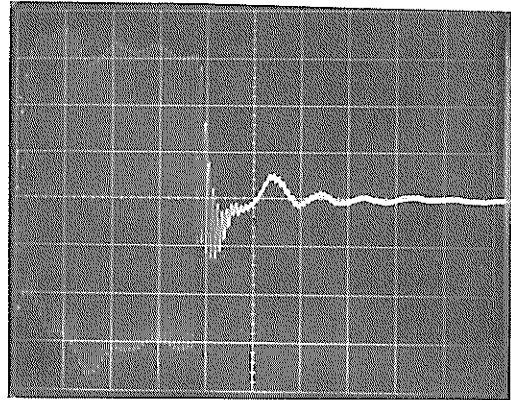


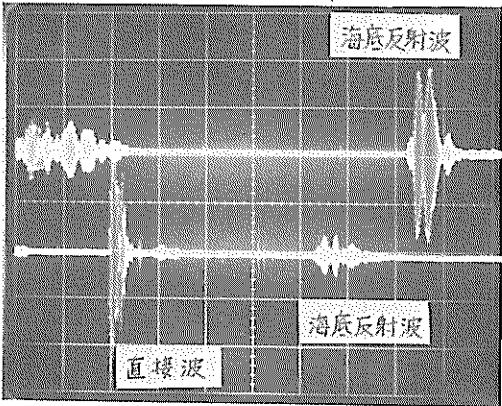
図-11 海底からの距離と濁度・pHの関係 図-12 透明度(L_i)と濁度(ppm), 透過率(T_r)の関係



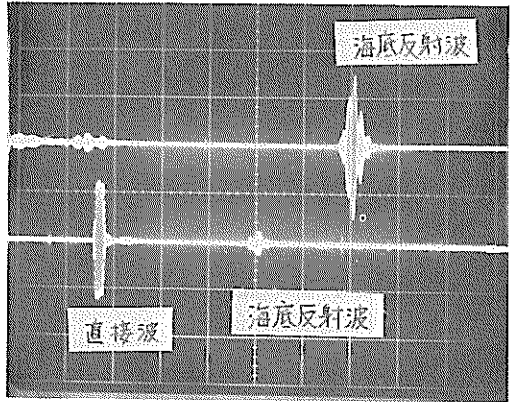
a) 送信波形
 $(E_s = 300V)$ $H = 50 \mu s/DIV$
 $(\tau_0 = 200 \mu s)$ $V = 50 V/DIV$



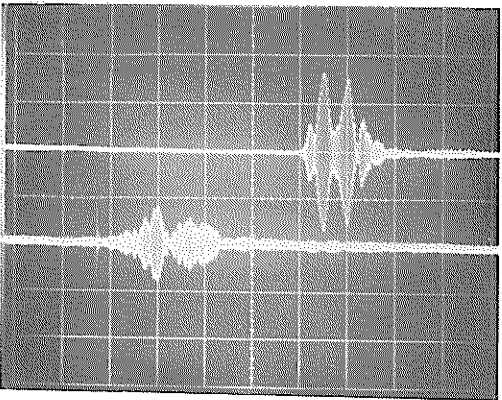
a) 送信波形
 $(E_s = 300V)$ $H = 50 \mu s/DIV$
 $(\tau_0 = 200 \mu s)$ $V = 50 V/DIV$



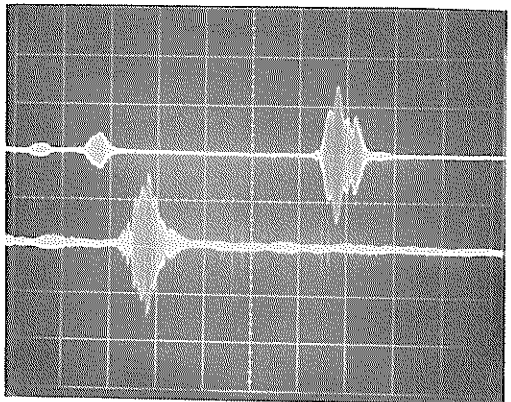
b) TR受波波形(上)と $H = 1ms/DIV$
 マイク受波波形(下) $V_1 = 20mV/DIV$
 $V_2 = 5mV/DIV$



b) TR受波波形(上)と $H = 1ms/DIV$
 マイク受波波形(下) $V_1 = 50mV/DIV$
 $V_2 = 20mV/DIV$



c) TS受波波形(上)と $H = 500 \mu s/DIV$
 マイク受波波形(下) $V_1 = 20mV/DIV$
 (拡大) $V_2 = 2mV/DIV$



c) TR受波波形(上)と $H = 500 \mu s/DIV$
 マイク受波波形(下) $V_1 = 50mV/DIV$
 (拡大) $V_2 = 2mV/DIV$

図-13-c) 100kHz オシロ波形

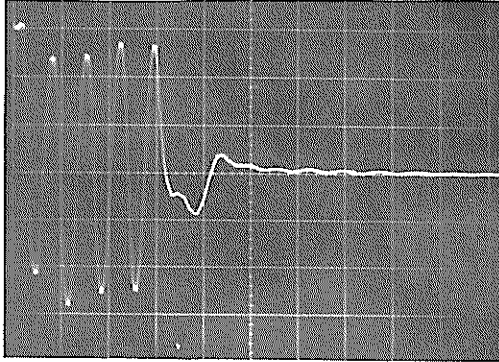
図-13-d) 200kHz オシロ波形

3.3 音波探査実験

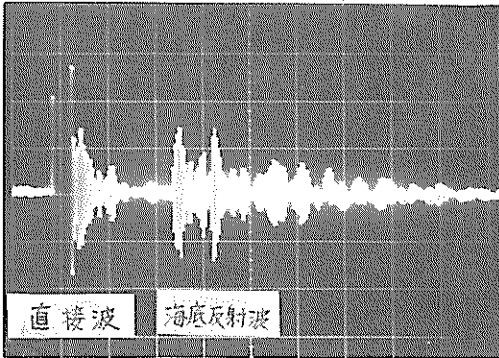
(1) 海底表面反射損失の測定¹⁾²⁾

図-5に示すように、測量船の舷側に、13, 28, 100, 200, 400kHz 5周波の送受波器を取付け、送受波レベルを測定するために、校正用水中マイクロホンを送受波

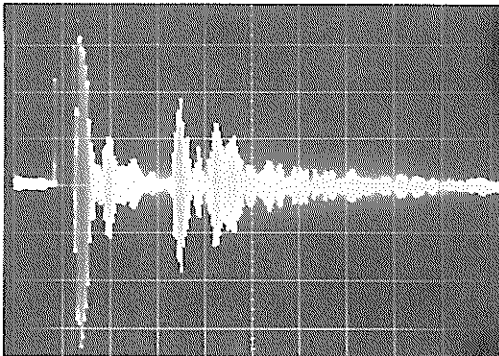
器の直下にくるように吊り下げた。それぞれの周波数を放射して受信した結果ブラウン管オシロスコプの波形から算出した反射特性の代表例を表-8に示し、図-13にはその記録波形を示す。



a) 送信波形
 $(E_s = 500 \text{ V})$ $H = 100 \mu\text{s}/\text{DIV}$
 $(\tau_0 = 300 \mu\text{s})$ $V = 100 \text{ V}/\text{DIV}$

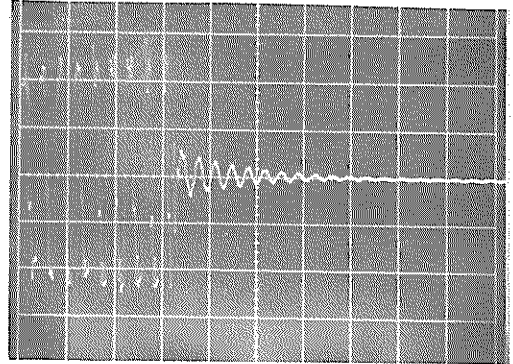


b) マイク受波波形 $H = 2 \text{ ms}/\text{DIV}$
 $V = 50 \text{ mV}/\text{DIV} - 40 \text{ dB}$

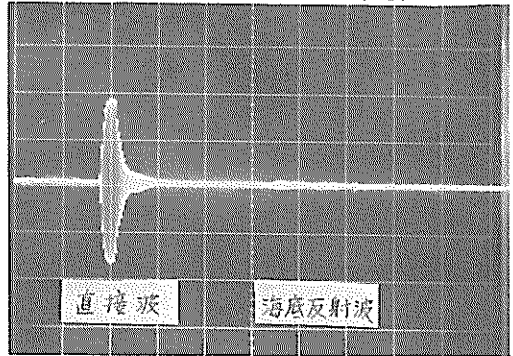


c) マイク受波波形 $H = 2 \text{ ms}/\text{DIV}$
 $V = 50 \text{ mV}/\text{DIV} - 40 \text{ dB}$

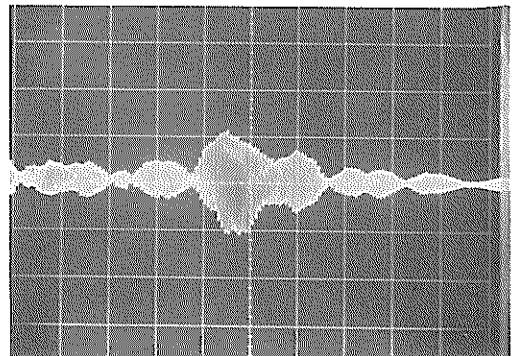
図-13-a) 13kHz オシロ波形



a) 送信波形
 $(E_s = 500 \text{ V})$ $H = 100 \mu\text{s}/\text{DIV}$
 $(\tau_0 = 300 \mu\text{s})$ $V = 100 \text{ V}/\text{DIV}$

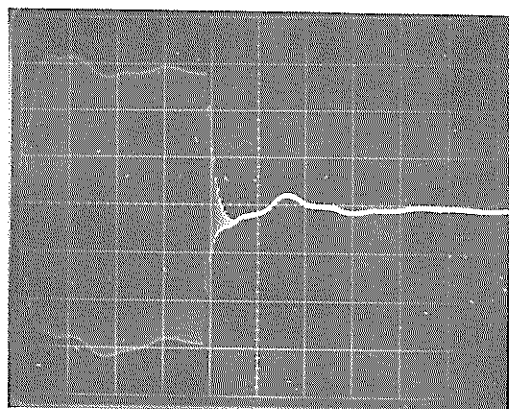


b) マイク受波波形 $H = 1 \text{ ms}/\text{DIV}$
 $V = 5 \text{ V}/\text{DIV} - 40 \text{ dB}$

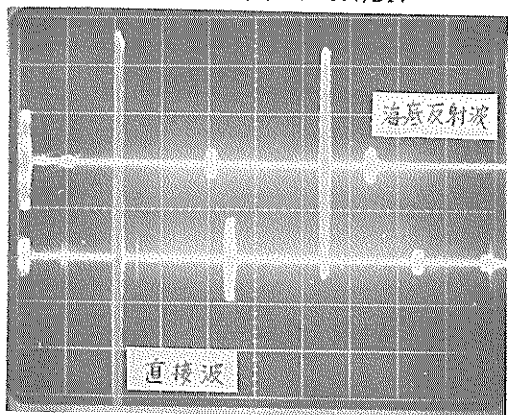


c) マイク受波波形 $H = 500 \mu\text{s}/\text{DIV}$
 (拡大) $V = 0.2 \text{ V}/\text{DIV} - 40 \text{ dB}$

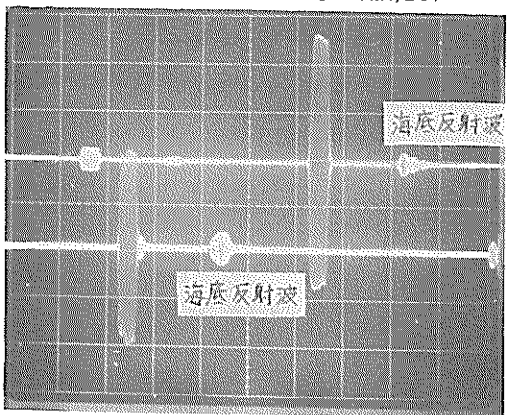
図-13-b) 28kHz オシロ波形



a) 送信波形
 $(E_s = 300 \text{ V})$ $H = 50 \mu\text{s}/\text{DIV}$
 $(\tau_0 = 200 \mu\text{s})$ $V = 50 \text{ V}/\text{DIV}$



b) TR受波波形(上)と $H = 1 \text{ ms}/\text{DIV}$
 マイク受波波形(下) $V_1 = 50 \text{ mV}/\text{DIV}$
 $V_2 = 5 \text{ mV}/\text{DIV}$



c) TR受波波形(上)と $H = 500 \mu\text{s}/\text{DIV}$
 マイク受波波形(下) $V_1 = 50 \text{ mV}/\text{DIV}$
 (拡大) $V_2 = 2 \text{ mV}/\text{DIV}$

図-13-e) 400kHz オンシロ波形

海底表面の反射損失を求める方法として下記の計算方法によった。図-14に示すように、縦軸に送受波器および校正用マイクロホンの送受波感度から求めた音圧レベル、横軸に対数目盛で音源からの距離を表わすグラフを作成する。13,28kHzの2周波は、水中に吊り下した校正用マイクロホンで送波器からの直接波を受波し、得られた音圧レベルを、グラフ上の音波伝搬距離の位置(A点)にプロットする。この点から+6dB/d.d.の直線、いわゆる球面拡散による減衰曲線を引き、音源からの距離が1mの位置で交わる点(B点)がその送波器の送波音圧レベルである。次に、海底反射波のマイクロホン受波音圧をグラフ上の音源からの距離の点(C点)にプロットする。このC点の上にある球面拡散減衰の直線上の点(D点)の音圧レベルからC点の音圧レベルを差し引いたレベル差が、その海底表面の反射損失である。また、100,200,400kHzの3周波では、指向性がシャープなため、超音波ビーム軸中心に校正用マイクロホンを設置することが難しいため、送受波器の感度で音圧レベルを求めた。送波音圧レベル P_s は、送波感度と送波電圧の関係(附図-1参照)から算出した。以下、上記マイクロホンで求めたと同じ方法で海底反射損失を求めた。

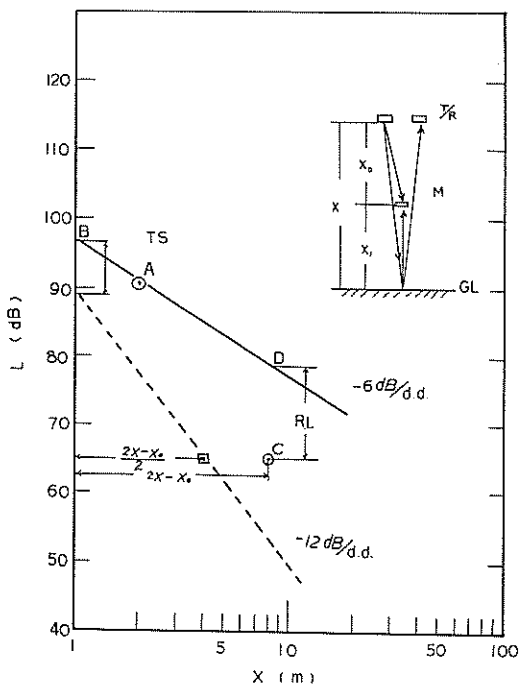


図-14 反射損失、ターゲットストレングスの求め方

これを、式で書き表わすと下記のとおりとなる。
 反射損失 RL (dB) は、

$$RL = 2TL + EL - SL$$

$$= 20 \log 2x + 20 \log P_r - 20 \log P_s \text{ (dB)} \quad (1)$$

マイク使用の場合は、

$$RL = 20 \log(2x - x_0) + 20 \log P_r - 20 \log P_s \text{ (dB)}$$

$$(2)$$

ここに

- TL : 伝搬損失 (dB)
- EL : 反射音圧レベル (エコーレベル) (dB)
- SL : 送波音圧レベル (dB)
- x : 音源から海底までの距離 (m)
- x_0 : 音源からマイクまでの距離 (m)
- P_r : 受波音圧 (μbar)
- P_s : 送波音圧 (μbar at 1m)

以上の方法は、海底を平滑な反射面と考えた場合の超音波反射の過程、すなわち“鏡面反射”によってエコーが生じるものとして解析した。³⁾

一方、海底が非常に細かな粒径の土粒子から成り立っている軟泥に超音波を入射した場合は、波長に比べ小さい曲率半径をもつ土粒子の突起、縁および角のような不規則性は、反射というよりも散乱によって音波をはね返す。換言すれば、泥粒子それぞれ“二次音源”となって、球面波を再放射するといわれている。³⁾⁵⁾

(3)式は、海底が二次音源とみなした場合の方程式である。

一般に、ターゲットからの散乱強度を表示するのに、ターゲットストレングス TS (dB) を用いる。

送受波器使用の場合の TS (dB) を(3)式に示す。

$$TS = 2TL + EL - SL$$

$$= 40 \log x + 20 \log P_r - 20 \log P_s \text{ (dB)} \quad (3)$$

マイク使用の場合のそれを(4)式に示す。

$$TS = 40 \log \left(\frac{2x - x_0}{2} \right) + 20 \log P_r$$

$$- 20 \log P_s \text{ (dB)} \quad (4)$$

上記の式によって、測定データをプロットして図示したのが図-15である。表-8、図-16に反射損失およびターゲットストレングスを各周波数毎に求めた結果を示す。図-16によれば、反射損失およびターゲットストレングス共に、周波数が高くなる程、増大することが判

る。しかし 200kHz を境にして、それ以上周波数が高くなると、かえって減少する傾向がある。これは周波数が高いほど散乱強度が大きいためであると考えられる。⁵⁾⁶⁾

(a) 海底表層土の音速度

本実験による測定データを用いて海底表層土の音速度を求めてみる。

海底表層土の音速度 c_0 は

$$c_0 = \frac{1}{(\rho_0 \kappa_0)^{1/2}} \quad (5)$$

で表わされる。³⁾⁷⁾

この式で

$$\rho_0 = \rho_2 \beta + \rho_1 (1 - \beta) \quad (6)$$

$$\kappa_0 = \kappa_2 \beta + \kappa_1 (1 - \beta) \quad (7)$$

ここに ρ_0 : 海底表層土の密度 (g/cm^3)

ρ_1 : 海水の密度 (g/cm^3)

ρ_2 : 土粒子の密度 (g/cm^3)

κ_0 : 海底表層土の圧縮率 ($cm^2/dyne$)

κ_1 : 海水の圧縮率 ($cm^2/dyne$)

κ_2 : 土粒子の圧縮率 ($cm^2/dyne$)

β : 海底表層土中の土粒子の体積比

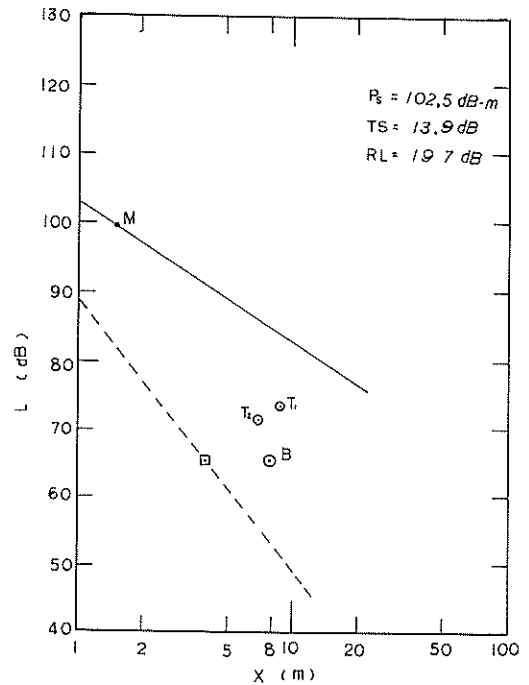


図-15-a) 軟泥の反射損失、
 ターゲットストレングス (13kHz)

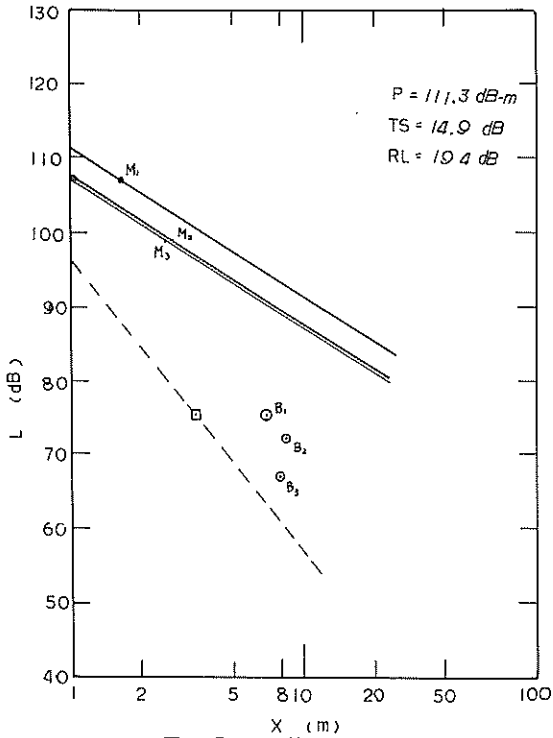


図-15-b) 軟泥の反射損失,
ターゲットストレングス (28kHz)

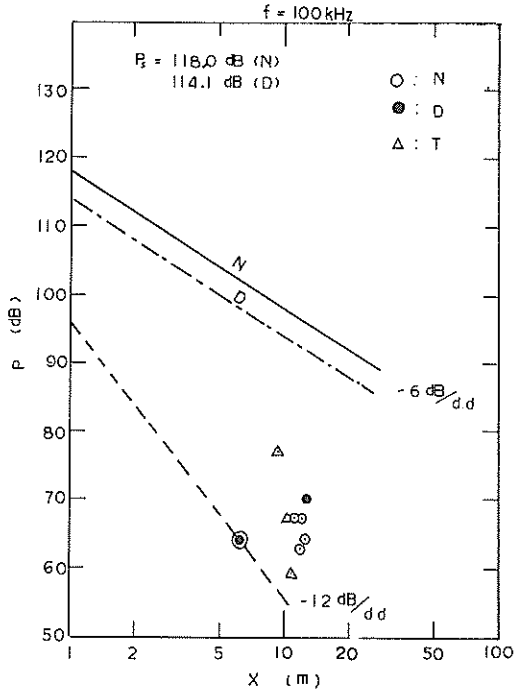


図-15-c) 軟泥の反射損失,
ターゲットストレングス (100kHz)

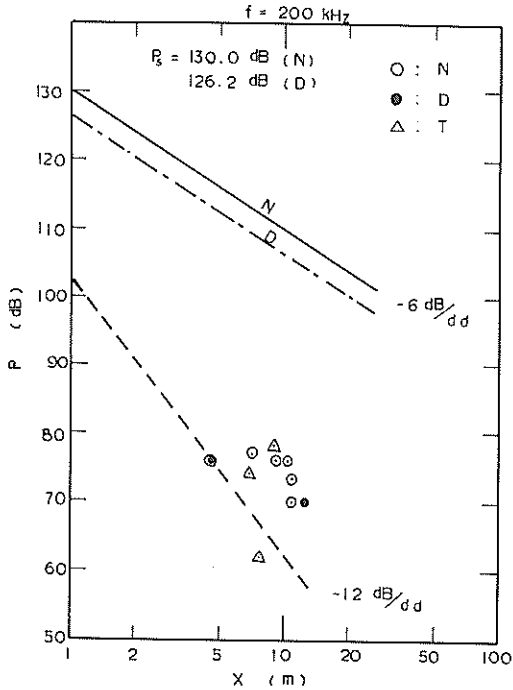


図-15-d) 軟泥の反射損失,
ターゲットストレングス (200kHz)

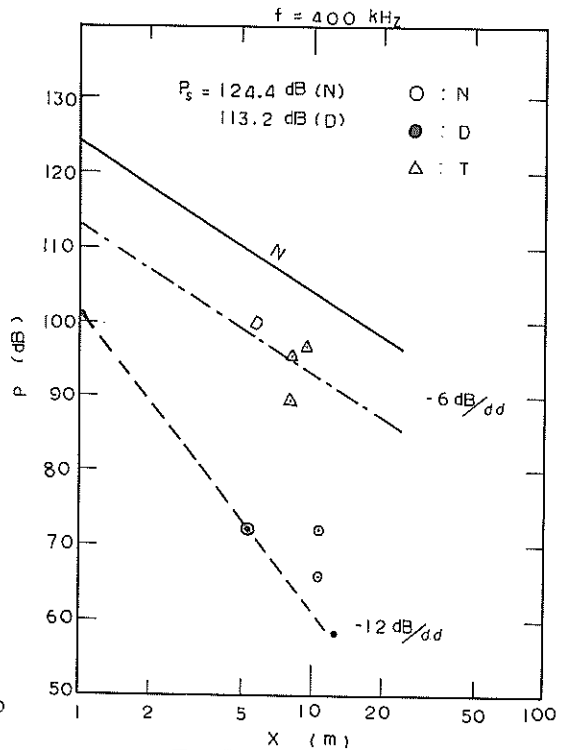


図-15-e) 軟泥の反射損失,
ターゲットストレングス (400kHz)

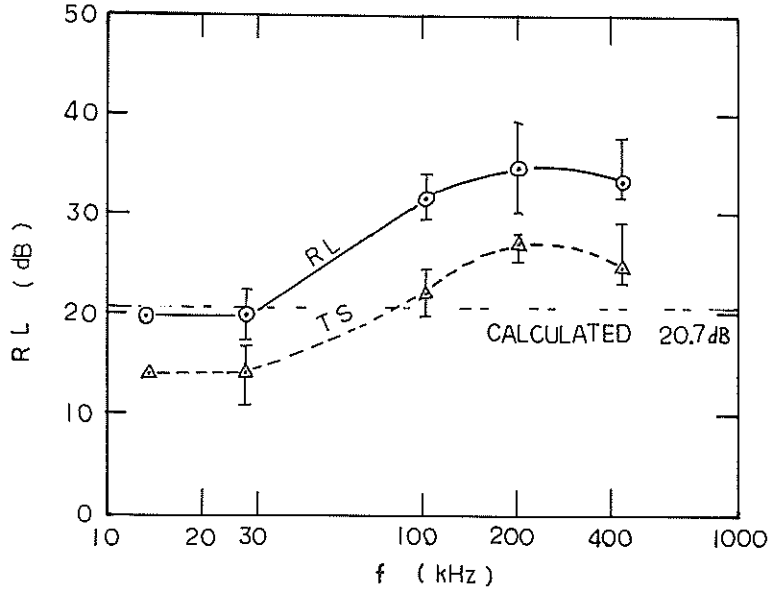


図-16 反射損失，ターゲットストレングスの周波数特性

表-8 各周波数毎の反射特性

テスト No.	T-1-7	T-2-7	T-3-6(N)	T-5-6(N)	T-7-2(N)	T-4-6(D)	T-6-6(D)	T-8-6(D)
周波数 f (kHz)	13.5	27.3	103.18	200.0	430.13	96.67	217.6	413.65
送信電圧 E_S (V)	500	500	300	300	300	300	300	400
パルス巾 (μ s)	300	300	200	200	200	200	200	200
送波器感度 k_{ST} (dB)			68.2	80	74.4	64.1	76.2	63.2
受波器感度 k_{mT} (dB)			-81.1	-90	-94.1	-82.0	-97.9	-106.4
送波音圧 P_S (dB-m)			118.0	130.0	124.4	114.1	126.2	113.2
校正用マイク距離 D_1 (m)	1.50	1.65						
受信電圧 e_m (V)	0.2(99dB)	0.5(107dB)						
校正マイク感度 k_{MM}		-113						
送波音圧 P'_S (dB-m)	102.5	111.3						
海底距離 x (m)	4.65	4.20	6.23	4.58	5.33	6.38	6.23	6.23
反射電圧 E_R (mV)	4.0	13	140	200	80	250	40	4
反射音圧 P_R (dB)	65.0	75.3	64.0	76.0	72.2	70.0	70.0	58.5
反射損失 (dB)	19.7	19.4	32.1	34.8	31.6	22.0	34.3	32.8
TS (dB)	-13.9	-14.9	-22.1	-27.6	-23.2	-15.0	-24.4	-22.9

従って海底表層土の音速度 c_0 は

$$c_0 = \{ [\rho_2 \beta + \rho_1 (1 - \beta)] [\kappa_2 \beta + \kappa_1 (1 - \beta)] \}^{-1/2} \quad (8)$$

で表わされる。⁷⁾

次に本実験における海底表層土の音速度 c_0 を求めてみる。

海水の音速度は水温、塩分の実測値から求めると、

1467m/sである。海水の密度 ρ_1 を 1.025 g/cm^3 として、その圧縮率 κ_1 を求めてみる。海水の音速度は、(5)式で表わされるから、圧縮率 κ_1 は、

$$\kappa_1 = \frac{1}{\rho_1 c_1^2} \quad (9)$$

で表わされる。この式に $\rho_1 = 1.025 \text{ g/cm}^3$, $c_1 = 1467 \times 10^5 \text{ cm/s}$ を代入して κ_1 を求めてみると、 $4.55 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{dyne}$ となる。

(8式に、 $\rho_1 = 1.025 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 2.6 \text{ g/cm}^3$ $\kappa = 4.55 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{dyne}$, $\kappa_2 = 2.29 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dyne}$, $\beta = 0.13$ を代入して、軟泥表層土の音速度 c_0 は、

$$c_0 = 1428 \text{ m/s} \text{ を得る。}$$

したがって、海中の音速度 c_w との比 $c_0/c_w = 0.9734$ で、2.66% の誤差を許容すれば、海中の音速度と軟泥中の音速度とは、同じ速度とみても実用上支障ないものと考えられる。

(b) 海底表層土の反射損失の理論計算

次に、理論的に海底表面の反射損失を求めてみる。

海底が波長に比べて十分に平滑な平面であるとして、平面波が垂直に入射すると仮定すれば、音圧の反射率 R_P は、

$$R_P = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (10)$$

ここに ρ_1 : 海水の密度 (g/cm^3)

ρ_2 : 海底表層土の密度 (g/cm^3)

c_1 : 海水の音速度 (cm/s)

c_2 : 海底表層土の音速度 (cm/s)

で表わされる。

この (10) 式に $\rho_1 = 1.025 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 1.2 \text{ g/cm}^3$, $c_1 = 1.467 \times 10^5 \text{ cm/s}$, $c_2 = 1.427 \times 10^5 \text{ cm/s}$ を代入して R_P を計算すると、

$$R_P = 0.09203$$

となる。

反射損失 RL (dB) は、

$$RL = 20 \log_{10} R_P \\ = -20.7 \text{ (dB)}$$

となる。この値は超音波の周波数に依存しない。

図-16の実測による反射損失とこの計算値を比較してみると、13kHz および 28kHz の低周波では、ほぼ一致している。100kHz 以上ではかなりの開きがあることがわかる。100kHz 以上では、二次音源で解析したターゲットストレングス TS の値に近いことが図からわかる。

したがって、海底からの反射は 28kHz 以下の低周波では鏡面反射として、また、100kHz 以上の高周波では散乱波に起因する二次音源として考えることができよう。

(2) 音響測深機による探査記録

軟泥層海底からの超音波反射が、音響測深機放電破壊式記録紙にどのように記録されるかを調べるため、4周波について実験を行った。この探査結果を図-17に示す。図-17について(a)図は 400kHz の探査記録であって、海底表面のみが記録されている。(b)図は 200kHz の記録で、やはり海底面のみが記録されている。中間の線は、水中

マイクおよび標準反射板の反射である。(c)図は、ダイソング型送受波器を用いた 200kHz の記録で、(b)図の一般型の送受波器を使用した記録に比べて、海底面記録のパルスレングスが短くなっている。(d)図は 28kHz の記録で、海底表面とその下の層の 2 段に記録されている。上層と下層の厚さを、泥層中の音速を海中のそれと同じと考えて算出してみると³⁾ 約 0.5m である。表層の沈泥層が探知されたものと思われる。(e)図は、13kHz の記録で、海底表層の厚さは探知されず、もっと深い層が探知されている。この厚さを計ってみると約 2.5m であった。これは 13kHz の方が 28kHz に比較して、軟泥中の音波の吸収損失が小さいため、泥層の深い部分まで音波が透過し、かつ減衰少なく受波器へ音波が帰着したものと推定される。¹⁾ (f)図は、28kHz と 400kHz の送受波器を同一位置に設置して、同時記録させたものであって、400kHz の記録海底位置が 28kHz のそれに比べて約 0.2m 程、浅く記録されている。(g)図は 28kHz と 200kHz の同時記録の例で、やはり 200kHz の比較的高い周波数の方が約 0.1m 浅く記録されているが、その差は前者よりも小さい。これは送受波器の超音波パルス立上り特性、すなわち高周波ほど、パルスの立上りがよいため、低周波に比して浅く記録されたものと考えられる。¹⁾ また、海底表面の浮遊泥粒子による超音波の散乱強度が、高い周波数ほど大きく、低いほど小さいことによる音波反射波の受波レベルの差によるものと考えられ、これも理論と一致する。^{3), 5), 6)} (h)図および(i)図は 13kHz と 200kHz の同時記録の例であり、(h)図には標準反射板 (1m ϕ) によるパーチェックのエコーが記録されている。やはり、200kHz の高い周波数の方が、13kHz に比較して約 0.4m 位浅く記録されている。これも上記の例と同じ理由によるものと考えられる。

これらの探査記録をみると、一般に 400kHz の超音波よりも 28kHz, 13kHz など、比較的周波数の低い超音波の方が、エコーのパルス幅が長く 0.5m から 1m までのへどろ層厚の分離が困難である。低周波でパルス幅が短かくて、距離分解能のよい送受波方式の開発が望まれる。

(3) 送受波器深度とエコーパルス幅の関係

一般に指向幅 $2\theta^\circ$ の超音波ビームで海底を測深する場合、送受波器と海底との距離 x によって海底を探査する幅が異なるため、図-18のようにビーム中心軸から離れるにしたがって海底面へ到達するに要する距離は、中心軸距離 x よりも Δx だけ長くなる。したがって全体として、パルスレングス l は

$$l = \frac{c\tau}{2} + \Delta x \quad (11)$$

となる。

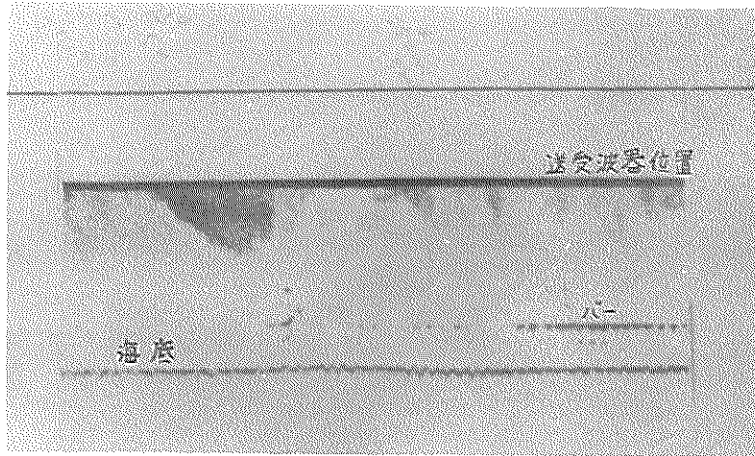


図-17-a) 軟泥層海底における音波探査記録(400kHz)

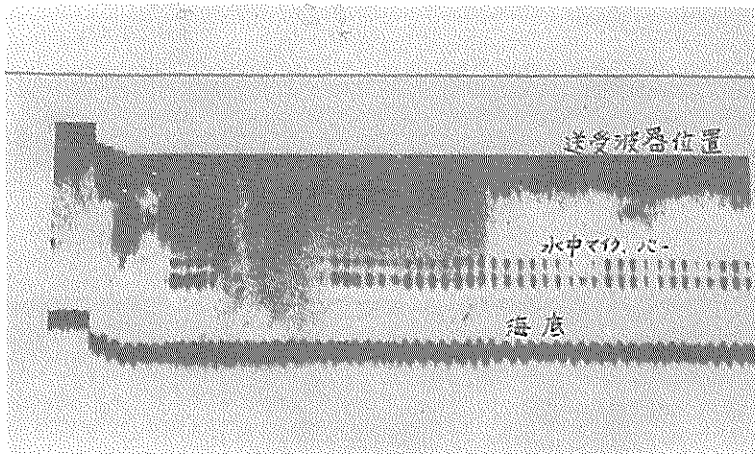


図-17-b) 軟泥層海底における音波探査記録(200kHz)

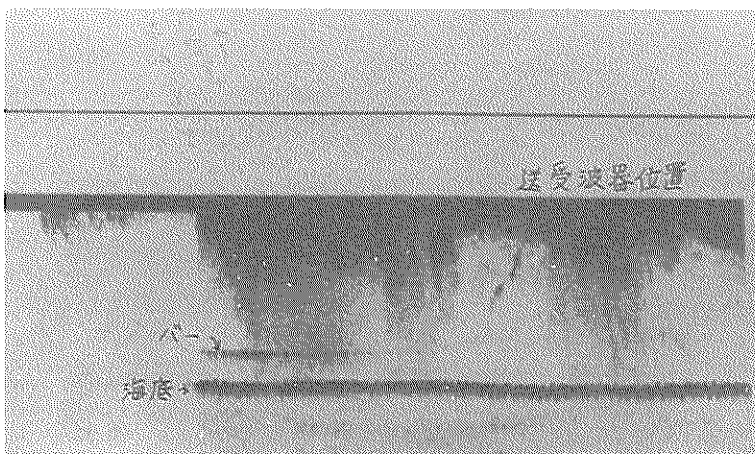


図-17-c) 軟泥層海底における音波探査記録(ダイビング型200kHz)

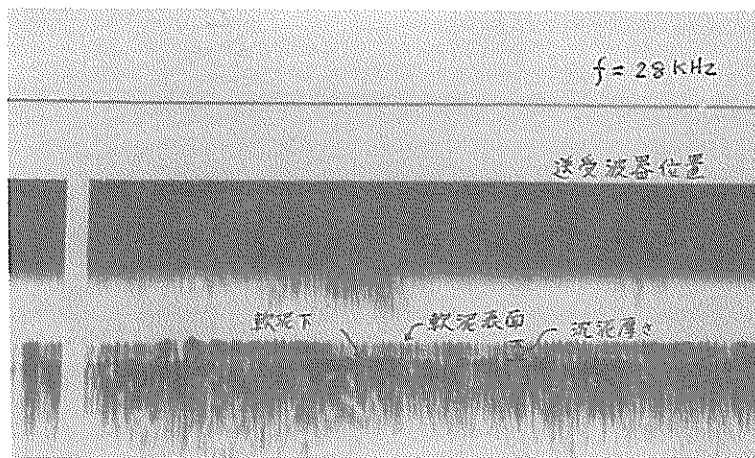


図-17-d) 軟泥層海底における音波探査記録 (28kHz)

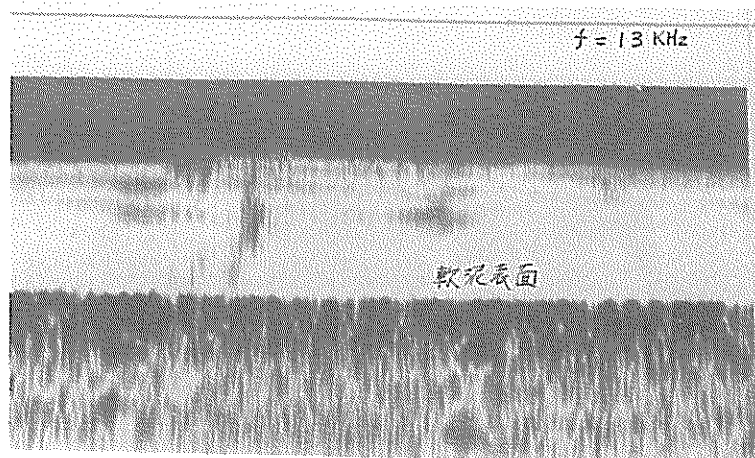


図-17-e) 軟泥層海底における音波探査記録 (13kHz)

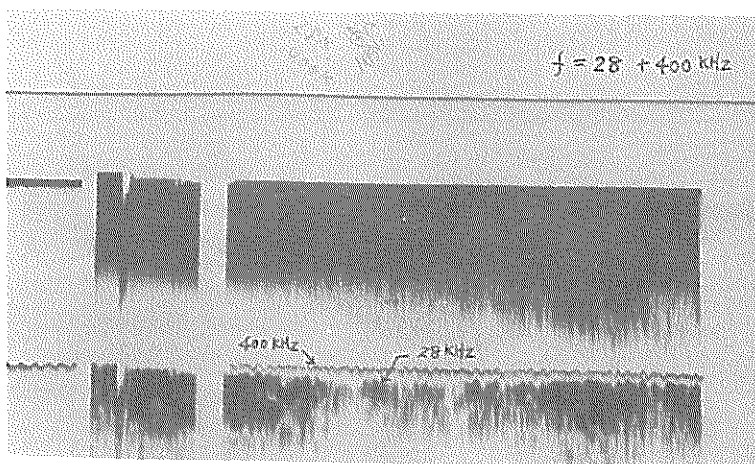


図-17-f) 28kHz と 400kHz の同時記録

$$f = 28 + 200 \text{ kHz}$$

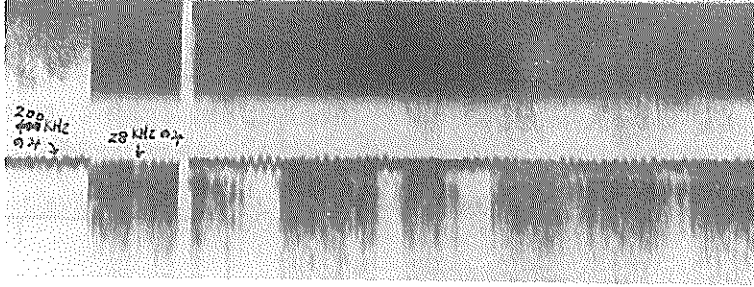


図-17-g) 28kHzと200kHzの同時記録

$$f = 13 + 200 \text{ kHz}$$

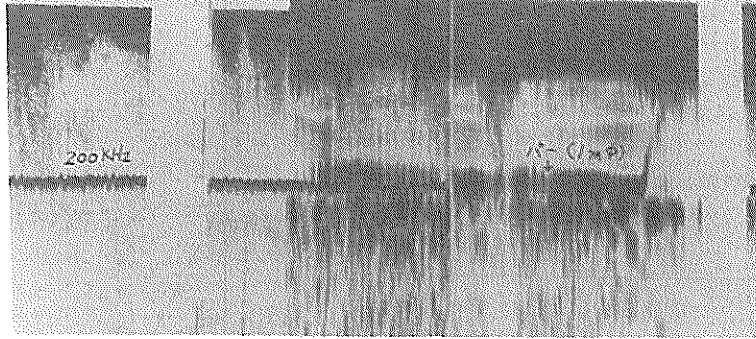


図-17-h) 13kHzと200kHzの同時記録
(標準反射板1mφによるパーチェック)

$$f = 13 + 200 \text{ kHz}$$

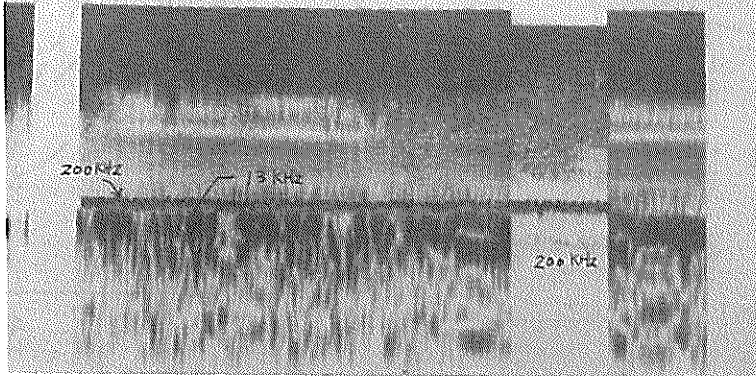


図-17-i) 13kHzと200kHzの同時記録

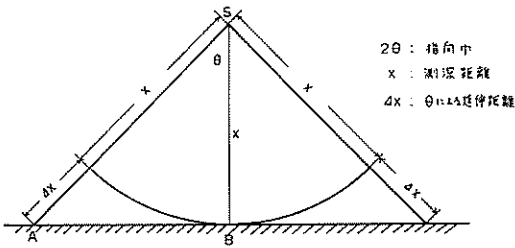


図-18 指向幅とパルスレングスの延伸

ここに c : 音速 (m/s)

τ : パルス幅 (S)

上式の Δx は次のように表わすことができる。

$$\Delta x = x \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (12)$$

従って、パルスレングス l は

$$l = \frac{c\tau}{2} + x \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (13)$$

で表わされる。

図-19に、送受波器と海底との距離 x を 3.5m から 5.14m 変えたとき、パルス幅 τ_e は x が 3.0m のとき 600(μ s)であったが、 x が 5.15m になると τ_e が 850 (μ s) となって約 1.4 倍パルス幅が長くなっていることがわかる。

すなわち、一般に測定深度が増大すると、探査幅が広がるため、エコーのパルス幅が長くなることがわかった。

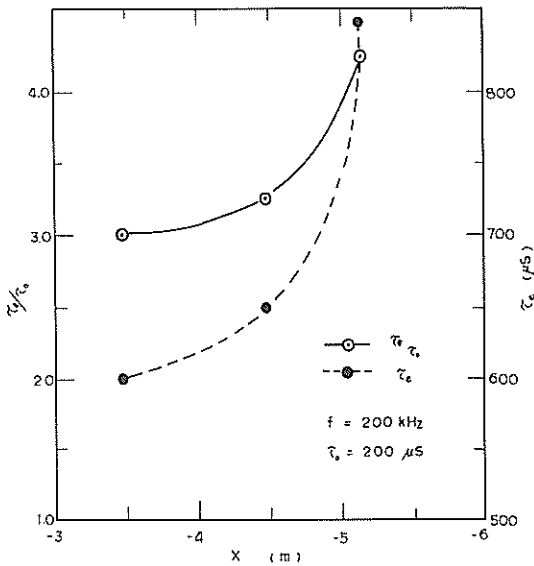


図-19 送受波器深度とエコーのパルス幅および τ_e/τ_0 の関係

(4) 海底反射波のパルス幅

軟弱な海底地盤に超音波を入射した場合、エコーのパルス幅はどのように変化するかを、各周波数毎に調べてみた。結果は図-20および図-21に示す。図-20-aは、振幅が0のときのパルス幅であり、図-20-bは振幅が0.5に立上ったときのパルス幅である。いずれも、送信パルス幅 τ_0 よりも長くなっていることがわかる。図-21は送信パルス幅 τ_0 とエコーのパルス幅 τ_e の比を各周波数毎に示す。この図から、周波数が低いほど τ_e/τ_0 が大きく、エコーのパルス幅が長くなることがわかる。

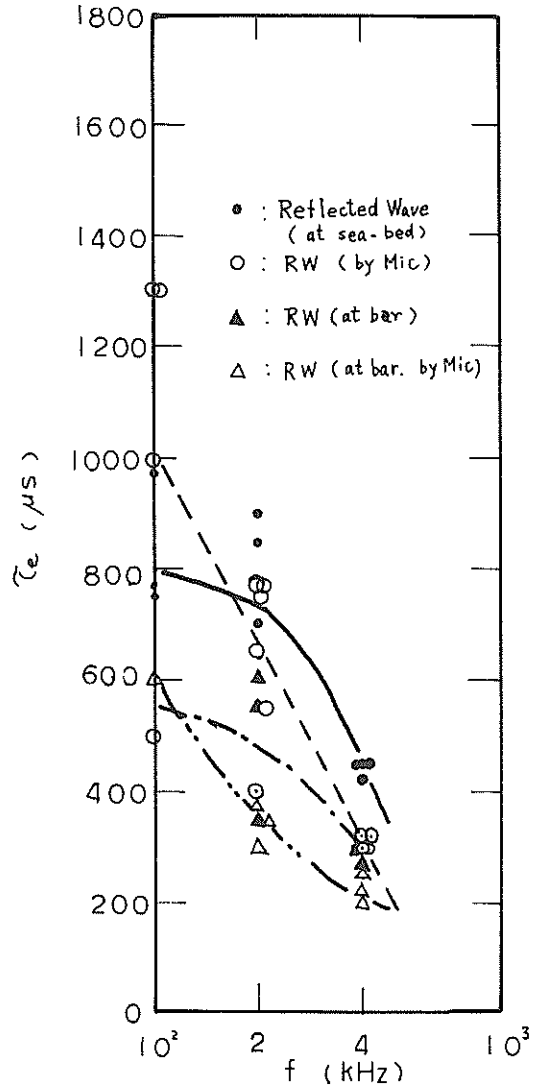


図-20-a) エコーのパルス幅 τ_e の周波数特性

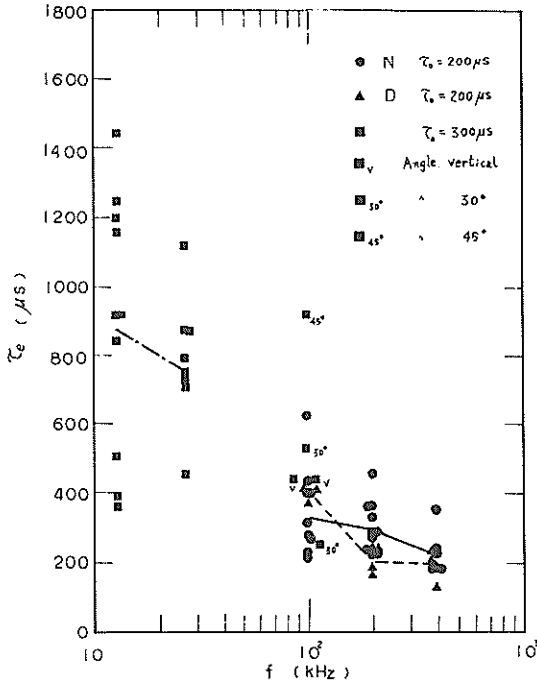


図-20-b) エコーのパルス幅
(半値幅) τ_e の周波数特性

(5) 海底反射波の立上り特性

測深記録の精度に影響をおよぼすパルス立上り特性を、各周波数毎にプロットして示したのが 図-22 である。一般に送信パルス波の立上りよりも海底面からの立上り時間の方が遅い。また、周波数が高いほど、立上り時間は短かくなっていることがわかる。

一般に音響測深の原理を用いた超音波機器の測深精度は、超音波受信波形の立上り特性に依存する。超音波受波器には過渡応答特性があり、波形の応答の遅れが生じる。図-23 に示すように矩形の送信パルス波形に対する受波出力波形には立上り、立下りに応答の遅れがある。

いま、図-23 で包絡線 x (< 1) まで減衰する間に存在する振動の回数を求めてみよう。それには次の関係がある。

$$x = e^{-\frac{t}{T_e}} \quad (14)$$

ここに T_e は時定数であって次のような関係がある。

$$T_e = \left(\frac{1}{\delta}\right) T_f$$

$$\left\{ \begin{aligned} \delta &= \frac{\pi R}{\omega_f L} = \frac{\pi}{Q} \end{aligned} \right.$$

δ : 対数減衰率

T_f : 自由振動の周期

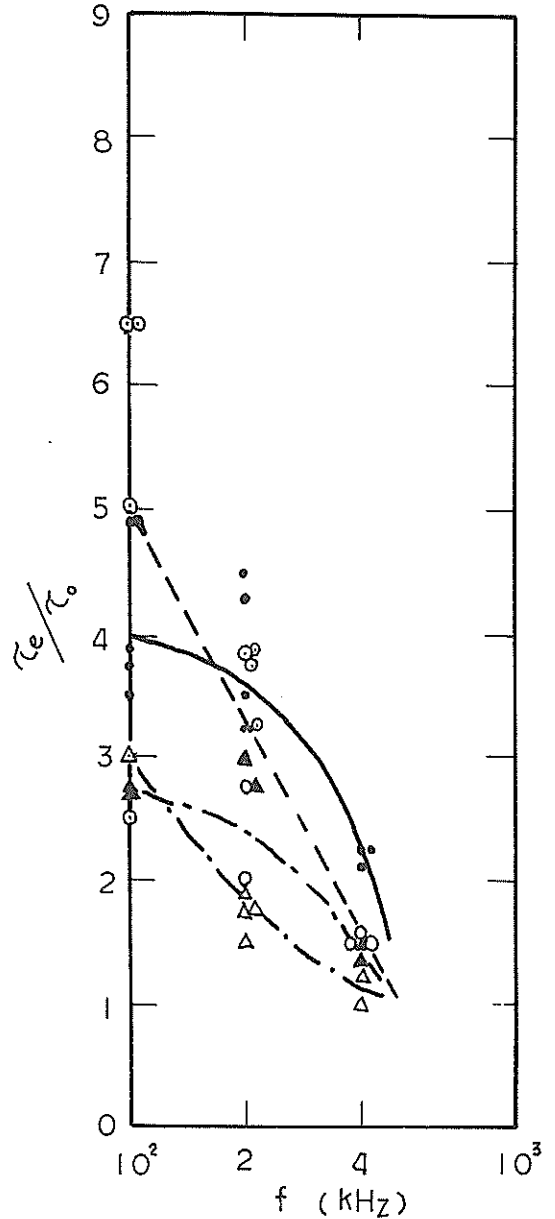


図-21 τ_e/τ_0 の周波数特性

$$= \frac{2\pi}{\omega_f} = \frac{1}{f}$$

Q : 共振の鋭さ

上記関係により

$$T_e = \frac{1}{\pi} Q \cdot T_f \quad (15)$$

したがって、

$$x = e^{-\frac{\pi t}{QT_f}} \quad (16)$$

となる。

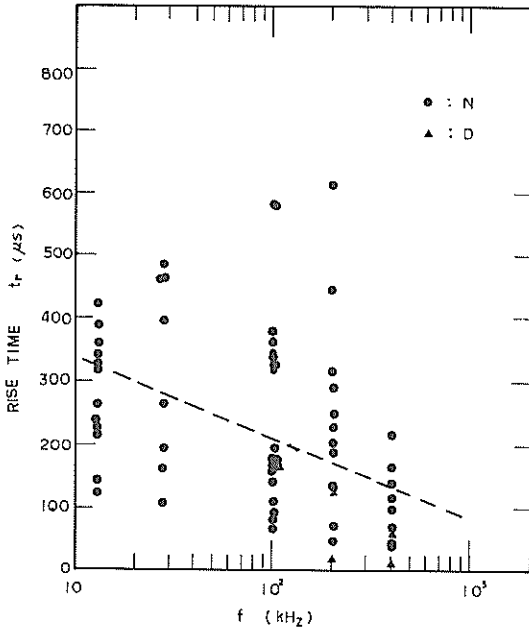


図-22 海底反射波の立上り特性

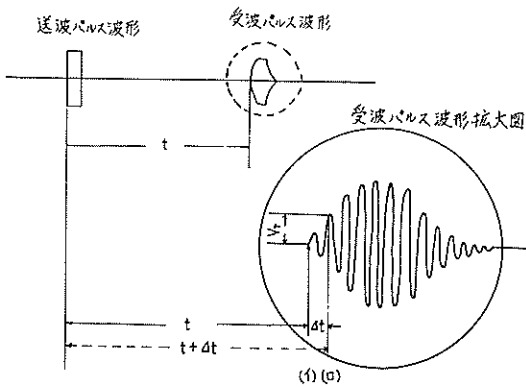


図-23 伝搬時間の計測と応答遅れ

このことから過渡応答立上り特性は、振動子の共振の鋭さを \$Q\$ とすると次式で示される。

$$AQ = \left(1 - e^{-\frac{\pi}{Q} \cdot \frac{t}{T_f}} \right) \quad (17)$$

- ここに \$A\$: 定常振動
 \$Q\$: 振動子の共振の鋭さ
 \$T_f\$: 振動周期
 \$t\$: 過渡応答経過時間

この式によって、受信波形の立上りを良くするには、振動子に \$Q\$ の小さなものを使用し、振動周期 \$T_f\$ が小さいこと、すなわち周波数を高くすればよいことがわかる。超音波パルスを発射してから反射波が戻ってくるまでの

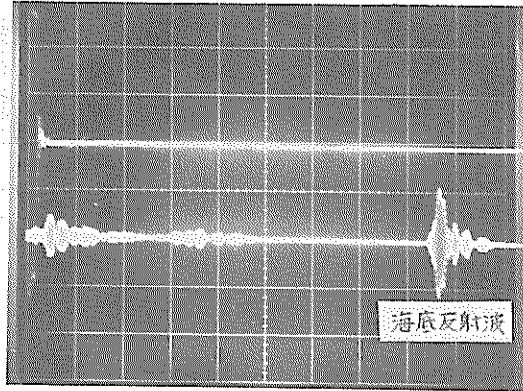
時間 \$t\$ は図-23で、受波波形拡大図の \$I\$ 点までの時間が正確であるが、電氣的に検出するためには一定レベル \$V_t\$ (トリガレベル) に到達したとき始めて反射波の存在が検出される。したがって受波波形開始からトリガレベルまでに達するに要する時間 \$\Delta t\$ が時間計測の誤差となる。

(6) 一般型とダイシング型送受波器とのパルス立上り特性の比較実験

100, 200, 400kHz 周波数の一般型送受波器と、今回試作したダイシング型送受波器により発生させた超音波パルスを同一軟泥層海底に放射して、その受波パルスの立上り特性をシンクロスコープにて観測記録した。図-24-a)~c) にそのオシロ波形を、図-24-d) に受波波形立上り特性を、表-9 に立上り特性を比較した表を示す。パルス立上り特性の比較は、波形の振幅が 10 ~ 90% までに立ち上るのに要する時間 \$t_r\$ (\$\mu s\$) をオシロスコープ波形からそれぞれ直読して比較することとした。その結果、ダイシング型送受波器は、一般型に比較して、立上り時間 \$t_r\$ がほぼ 1.3 ~ 1.7 倍の速さで立ち上ることがわかった。したがって、ダイシング型送受波器を使用した測深機の方が、他のもの比べて精度のよい測深記録が得られるものと期待される。

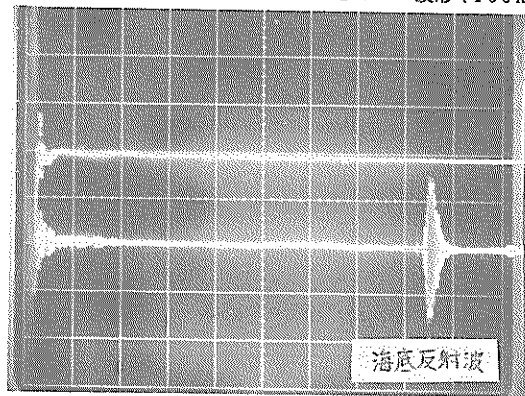
(7) 音波探査記録と海底環境条件との関係

各周波数の超音波が、海底軟泥層のどの含水比の位置から反射しているかを定量的に検討するために、図-8の採取土の海底下深度毎における含水比データから、図-25のように、各周波毎の反射位置を記入して、軟泥の濃度分布曲線と超音波反射位置の関係がわかる図を作成した。この図によれば、含水比が 400% 以上の浮泥層で 400kHz の反射が、280% 付近で 200kHz、230% 付近で 28kHz の反射が、200% で 13kHz の反射があることがわかる。図-4の土質柱状図を見ると、海底表層 0.5m 厚さに沈泥があることがわかるが、13kHz の反射は、この沈泥の下側からのものであると思われる。また 28kHz の海底下の反射の深度も、ほぼこの層からの反射と思われる。13kHz では更に 1m の位置および 3m 附近からの反射が記録されている。このことから 400, 200kHz の比較的高い周波数は軟泥表面を、28kHz では沈泥層の厚さが探知でき、13kHz のより低い周波数では、沈泥とともに、採泥資料がないので確定したことは言えないが、3m 下の比較的硬い層まで探知できることがわかる。



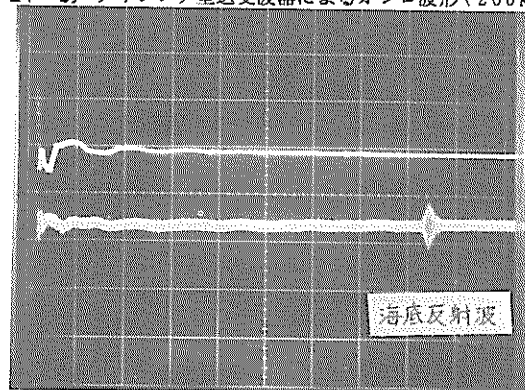
a) 100 KHz 送受信波形 $H = 1\text{ms}/\text{DIV}$
 $V_1 = 50\text{V}/\text{DIV}$
 $V_2 = 50\text{mV}/\text{DIV}$

図-24-a) ダイシング型送受波器によるオシロ波形 (100kHz)



b) 200 KHz 送受信波形 $H = 1\text{ms}/\text{DIV}$
 $V_1 = 50\text{V}/\text{DIV}$
 $V_2 = 10\text{mV}/\text{DIV}$

図-24-b) ダイシング型送受波器によるオシロ波形 (200kHz)



c) 400 KHz 送受信波形 $H = 1\text{ms}/\text{DIV}$
 $V_1 = 50\text{V}/\text{DIV}$
 $V_2 = 2\text{mV}/\text{DIV}$

図-24-c) ダイシング型送受波器によるオシロ波形 (400kHz)

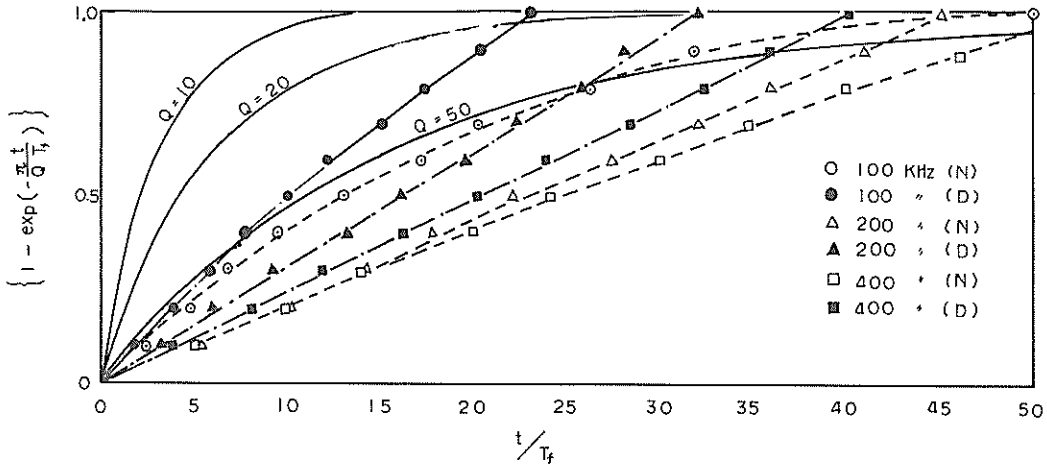


図-24-d) 受波波形立上り特性

表-9 一般型とダイシング型送受波器との立上り特性の比較

周波数 (kHz)	(A) 一般型送受波器の 立上り時間(μs)	(B) ダイシング型送受波器 の立上り時間(μs)	(A)/(B)
100	315.5	185.0	1.705
200	177.0	123.5	1.433
400	102.0	79.8	1.278

3.4 超音波斜入射による海底散乱強度の測定

垂直に測深するソナーが、海底が急傾斜しているときの直下の海底からの反射波を問題とする場合、水平に放射するソナーが、海底に平行に近い角度で入射し、散乱反射して受波器にもどる反射波の妨害(残響)の場合や、あるいは海底地形を広範囲に探査する場合、サイドルッキングソナーのように超音波を海底に斜めに入射させた場合の後方散乱強度を測定してみた。使用周波数は100kHzである。斜入射角 θ は、 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の3種類とした。入射角度は、送受波器架台の一端の吊下ロープを上下することによりセットした。図-26に斜入射によるオシロスコープ波形を示す。入射角が大きくなると、受波パルス波形の振幅が減少し、パルス幅が増大しているのがわかる。図-27に横軸に入射角をとり、海底斜入射反射音圧および垂直入射時の反射音圧レベルを0dBとした音圧レベル差との関係曲線を示す。この図から垂直入射時の反射音圧と 45° 入射角時のそれとの音圧レベル差は、 -23.5 dBであることがわかる。入射角の

変化によるパルス幅の変化は、図-20-bに示すように、入射角 θ が大になる程、エコーのパルス幅 τ_e が大きくなり、 45° で垂直入射の4.5倍となる。受波パルスの立上り時間 t_r は図-22に示すように 45° 入射では垂直入射に比べて4倍長くなっている。

3.5 海中雑音レベルの測定

へどろ探査装置や機雷探査装置のように海底下の地層や物体を探知する超音波探査装置を開発するためには、使用海域の海中周囲雑音(暗雑音)や、測量船の自己雑音レベルの測定が必要である。

実験に用いた測定器は、水中音圧計(沖電気製、SW-1007)である。測定方法は図-6-cに示すとおり、舷側にハイドロホンを設置し、深度は海面から1m、3m、5mの3段階とした。まず、暗雑音を測定するために、停船しかつ船のエンジン等騒音発生源を停止して、水中音圧計の周波数帯域も、フィルタなしで全周波数帯域を通過させる場合、10Hz以上の周波数を通過させる場合、100Hz以上の周波数を通過させる場合、1kHz以上の周波数を通過させる場合、10kHz以下の周波数を通

過させる場合の5段階に切替えて測定した。

次に、船の発生する雑音レベルを測定するために、船を止めたままエンジンを作動させながら、上記と同様な方法で測定した。

測定時の海気象条件としては、風向はNW、風速、8.0 m/s、波高は目測では1 mであり、かなり厳しい海況であった。

表-10、図-28に測定結果を示す。この結果、海中雑音レベルは最大値として水深1 mの所で、暗雑音が138 dB (0 dB = 1 μ Pa)、自己雑音放射中で165 dB (0 dB = 1 μ Pa)であり、そのレベル差は約30 dBあることがわかった。また、海中雑音レベルは海底よりも海面近くの方がレベルが大きく、暗雑音では約6 dB、自己雑音放射中では約14 dBのレベル差があった。

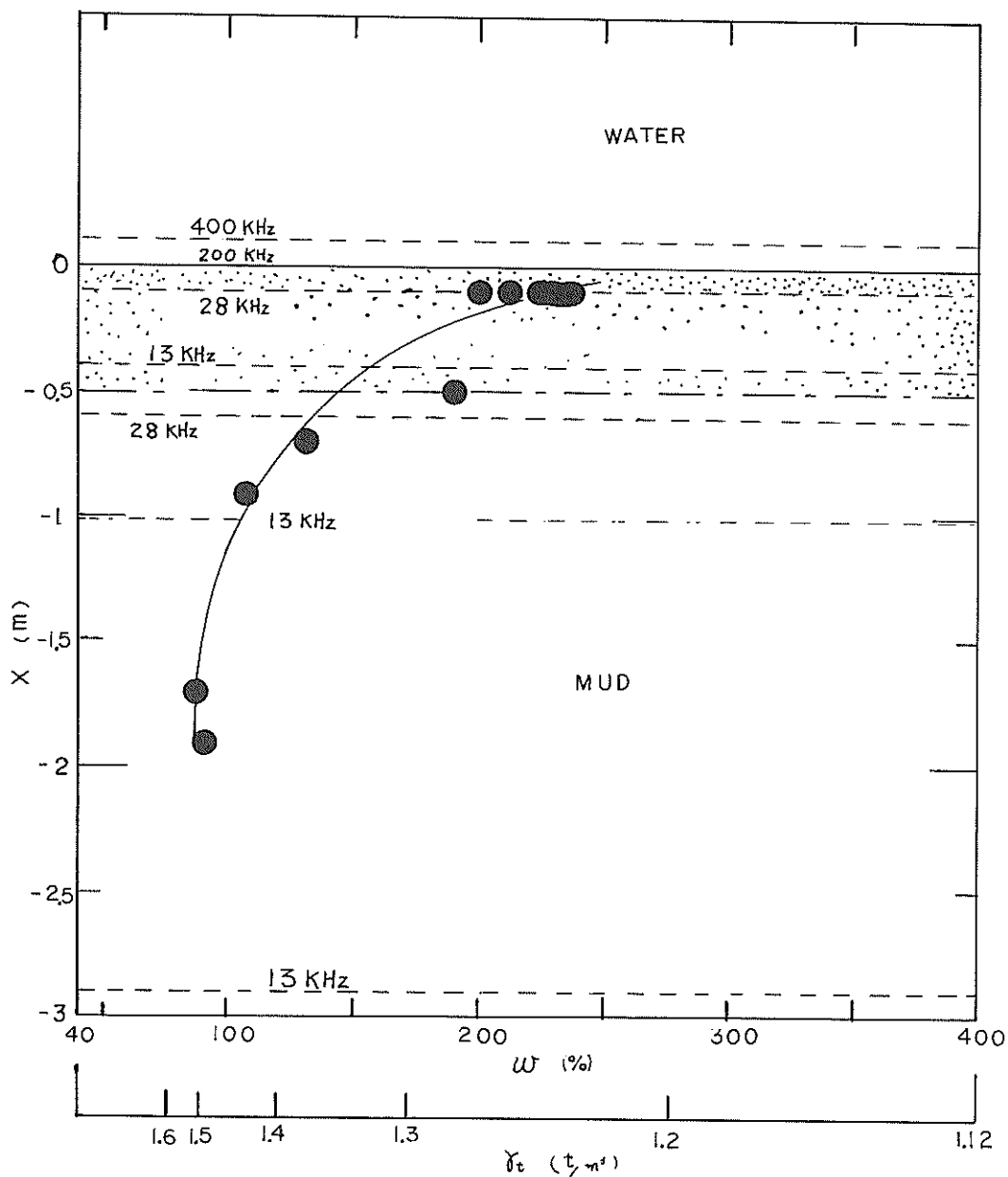
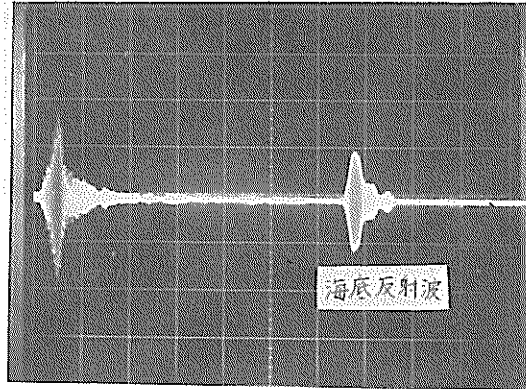
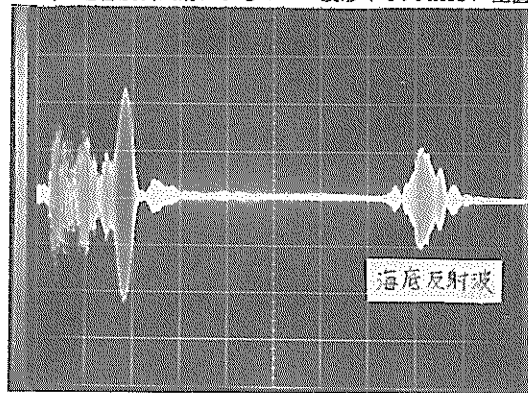


図-25 軟泥の土質性状と超音波の反射位置



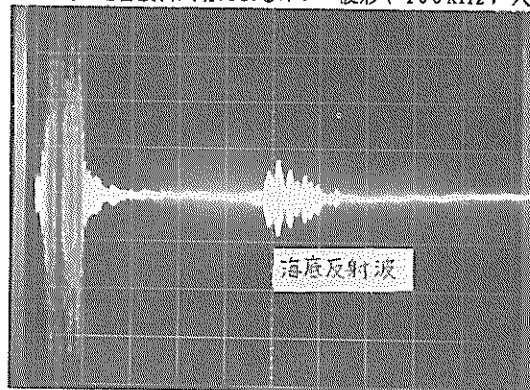
a) 垂直入射 $H = 1\text{ms}/\text{DIV}$
 $V = 50\text{mV}/\text{DIV}$

図-26-a) 超音波斜入射によるオシロ波形 (100kHz, 垂直入射)



b) 入射角(30°) $H = 1\text{ms}/\text{DIV}$
 $V = 20\text{mV}/\text{DIV}$

図-26-b) 超音波斜入射によるオシロ波形 (100kHz, 入射角 30°)



c) 入射角(45°) $H = 2\text{ms}/\text{DIV}$
 $V = 10\text{mV}/\text{DIV}$

図-26-c) 超音波斜入射によるオシロ波形 (100kHz, 入射角 45°)

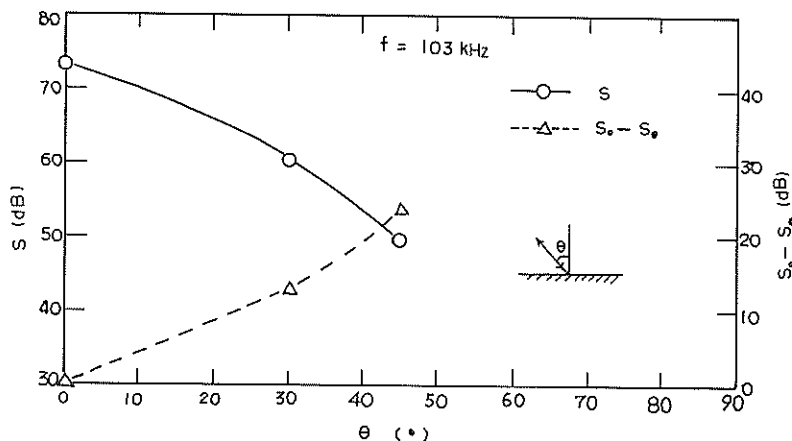


図-27 超音波斜入射による海底散乱強度

表-10 海中雑音レベルの測定値

(dB re 1 μ P_a)

深度	フィルター	①	②	①と②のレベル差 (dB)
		周囲雑音レベル (dB) (エンジン停止時の暗雑音)	周囲 + 自己雑音レベル (dB) (エンジン運転中の暗雑音 + 自己雑音)	
1 m	フィルターなし	125 ~ 133	155 ~ 164	30 ~ 31
	10Hz 以上	125 ~ 138	157 ~ 165	32 ~ 27
	100Hz 以上	120 ~ 123	150 ~ 153	30 ~ 30
	1 kHz 以上	114 ~ 120	143 ~ 144	29 ~ 24
	10kHz 以下	125 ~ 136	155 ~ 160	30 ~ 24
3 m	フィルターなし	120 ~ 127	149 ~ 154	29 ~ 27
	10Hz 以上	120 ~ 125	157 ~ 165	37 ~ 40
	100Hz 以上	116 ~ 122	150 ~ 153	34 ~ 31
	1 kHz 以上	110 ~ 114	139 ~ 140	29 ~ 26
	10kHz 以下	124 ~ 130	147 ~ 152	23 ~ 22
5 m	フィルターなし	121 ~ 126	145 ~ 147	24 ~ 21
	10Hz 以上	120 ~ 124	146 ~ 147	26 ~ 23
	100Hz 以上	115 ~ 120	143	28 ~ 23
	1 kHz 以上	110 ~ 114	138 ~ 139	28 ~ 25
	10kHz 以下	120 ~ 124	149	29 ~ 25

したがって海面より1m附近に送受波器を吊下して、超音波探査を行う場合、1kHz以上の超音波を使用するときには最大144dB (0 dB = 1 μ P_a)の受波音圧が必要となることわかる。

一般に、浅海や港湾における雑音レベルは大きな変動があり、浅海の雑音源は時間と場所によって非常に多様性があるといわれている。⁵⁾

浅海の雑音源は次の3種類の混合されたものとみなされる。

- (1) 船舶航行と工事雑音等いわゆる人工雑音。
- (2) 風や潮流、波浪等自然現象による雑音。
- (3) 魚介類が発生させる生物雑音。

このように港湾内の浅海では、時間と場所によって大きな変動性があるため、大まかな雑音レベルの値しか示すことができない。したがって、本実験による海中周囲雑音レベルの測定値も、時刻や季節を変えて測定した値とは当然異なったものになると考えられる。

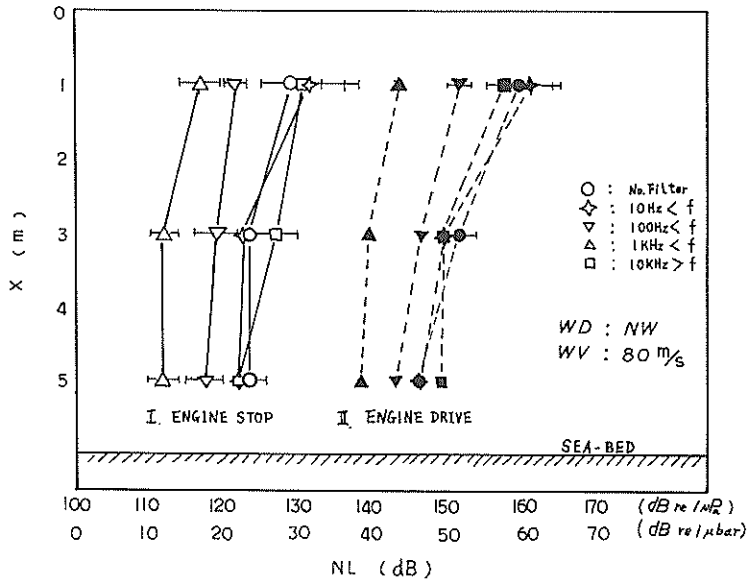


図-28 海中雑音レベルの深度分布

4. ま と め

本実験の範囲内で実験結果をまとめれば次のとおりである。

(1) 実験海域の海底土の性状は、表面0.5m位の厚さに沈泥、その下に、軟泥層が5mの厚さで堆積している。音波探査の結果、400kHzおよび200kHzなどの高周波で沈泥表面を、28kHz、13kHzなど低周波で軟泥下面を探知することができ、音波で軟泥層の厚さを探知しうることが実証された。

(2) 立上り特性について、一般型の送受波器と、ダイシング型送受波器について、比較実験を行い、後者の方がパルス立上り特性がよく、測深精度がよいことがわかった。

(3) 軟泥層海底表面の反射損失を測定した結果、200kHzまでは、周波数が高くなるほど、増大するが、200kHzを境にして、それ以上の周波数では、減少する傾向がある。

(4) 軟泥表面の超音波反射は、100kHz以上の高周波については、鏡面反射とするよりは、泥粒子からの散乱波に起因する二次音源による反射とみなすことができる。

(5) 海底下の地層や物体等を探知する超音波探査装置の開発に必要な海中雑音レベルを測定した結果、海中雑音レベルは海底よりも海面附近の方が雑音レベルが高いことがわかった。したがって1kHz以上の超音波を使用して音波探査を行う場合の受波器位置における最低限の

受波音圧レベルが推定できた。

(6) 超音波斜入射による散乱強度測定の結果、入射角が大になればなるほど、海底後方散乱強度は小さくなる。また反射波のパルス幅およびパルス立上り時間は増大する。

(7) 測深距離が長くなると、海底探査幅が大きくなり、エコーのパルス幅が長くなって、その結果、記録紙上のパルスレンジも長くなることがわかった。

5. あとがき

本現地実験は、特別研究「大水深における施工検査および海底探査技術の開発に関する研究」の一環として実施したものである。

この現地実験によって、軟泥層性状と超音波特性についておおよその傾向はつかめたと思われるが、へどろの性状は地域により異なるため、この実験の結果を代表的なデータとして取り上げることはできない。この種の実験の積み重ねが必要と思われる。しかしながら、多周波超音波でへどろなど軟泥層の厚さを計測しうることが実証され、また、軟泥層表面の超音波の反射特性や、海中雑音などの測定により、へどろ探査装置や機雷など海底沈埋異常物探査装置開発のための基礎資料が得られ、今後、海底探査技術の開発を進める上で、大きな成果が得られたものと考えられる。

今後はこれら現地海域における実験データを基に、室内実験水槽による模型実験を行い、海底土質と超音波特

性の相関性を定量的に把握する必要がある。

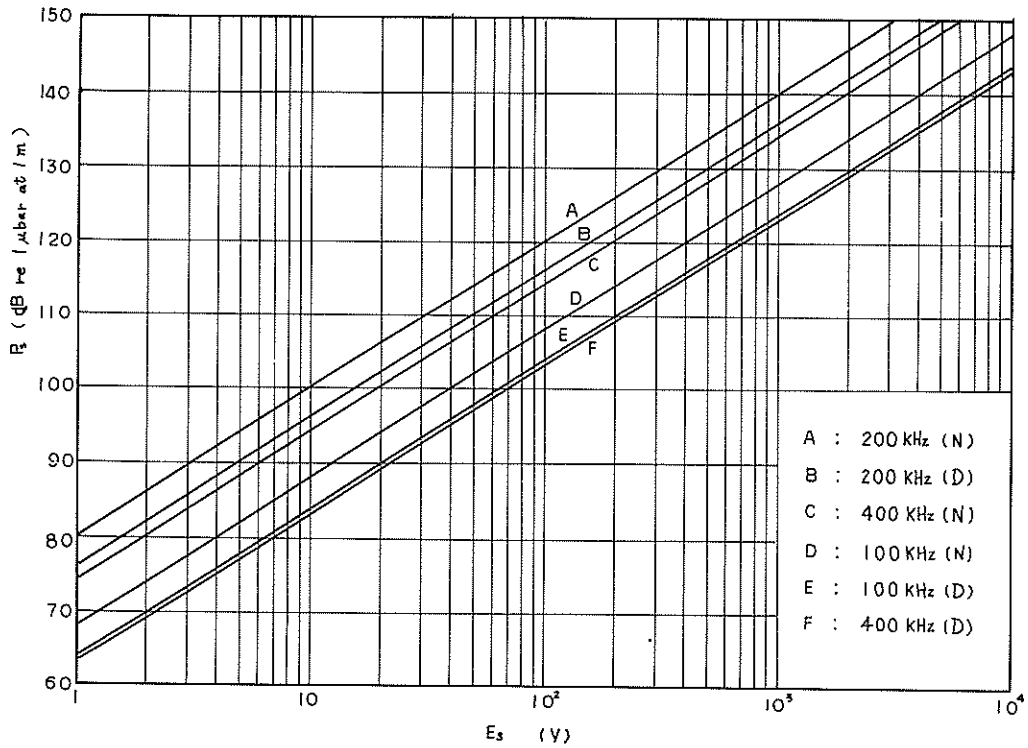
終りに本実験に当り終始御協力いただいた第五港湾建設局機械課、衣浦港工事事務所、測定機材を提供していただいた名古屋港工事事務所の関係各位に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

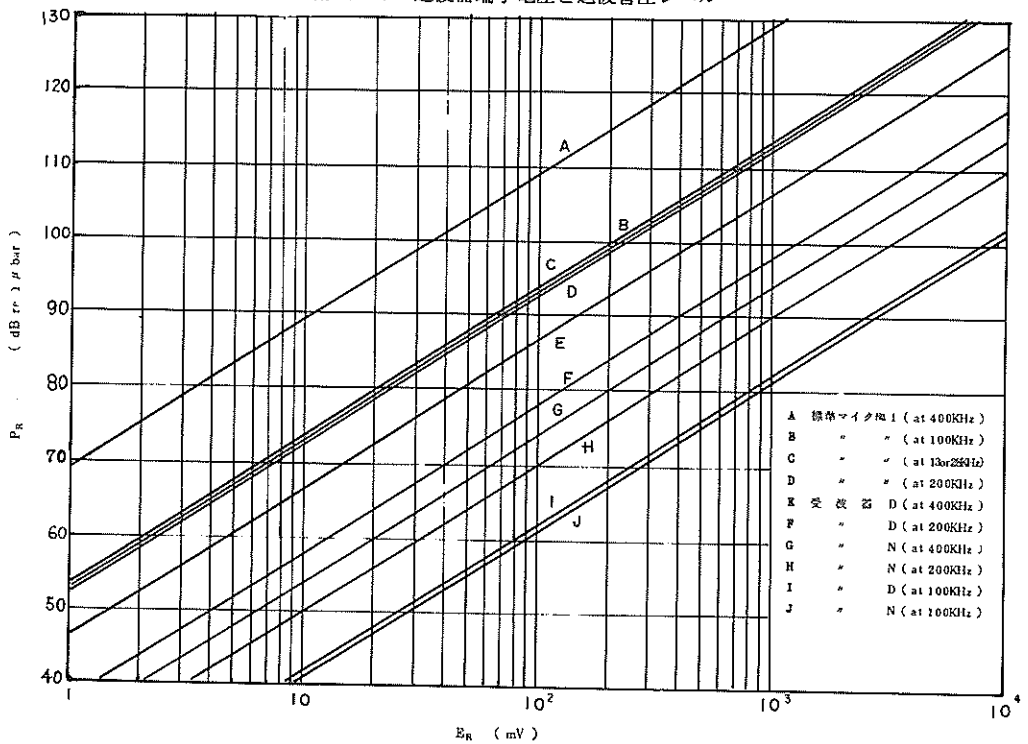
- 1) 木原純孝：音響測深機による軟泥層探知実験，第2回港湾技術研究所研究発表会講演概要，1964年，pp. 151～163.
- 2) 木原純孝：軟底質における超音波の反射透過特性，港湾技術研究所報告，第9巻第1号，1970年，pp. 275～306.
- 3) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，1966年.
- 4) 鎌田弘志・大垣正勝：ダイス化トランスジューサ，電子通信学会，1976年.
- 5) R・J・ユーリック著，土屋明訳：水中音響の原理，共立出版株式会社，1978年12月，pp. 133～139.
- 6) 木原純孝：懸濁粒子の沈降挙動と超音波の反射吸収特性，港湾技術研究所報告，第11巻，第2号，1972年2月，pp. 309～328.
- 7) LOYD.D.HAMPTON：Acoustic Properties of Sediments, The Journal of the Acoustical Society of America, vol, 42, No.4, 1967.

記号一覧表

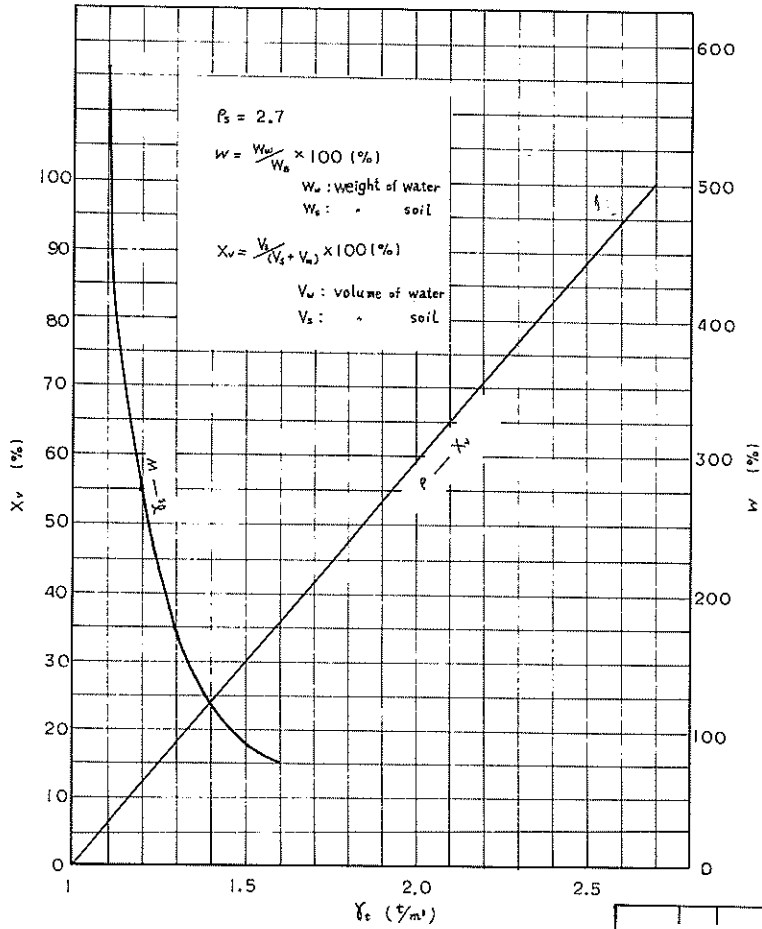
c	：音の伝搬速度 (m/s)
d	：振動子の直径 (cm)
E_s	：送波器端子電圧 (V)
E_R	：受波器端子電圧 (V)
f	：周波数 (kHz)
G_s	：指向性利得
k	：波長定数
L	：音圧レベル (dB)
P_r	：受波音圧 (μ bar)
P_s	：送波音圧 (μ bar at 1 m)
Q	：振動子の共振の鋭さ
R_p	：音圧の反射率
RL	：反射損失 (dB)
S	：振動子の面積 (cm ²)
TL	：伝搬損失 (dB)
TS	：ターゲットストレングス (dB)
w	：泥の含水比 (%)
x	：音源からの距離 (m)
X_v	：泥の体積濃度 (%)
β	：海底表層土の土粒子の体積比
γ	：角 度
θ	：角 度
κ	：圧縮率 (cm ² /dyne)
ρ	：密 度 (g/cm ³)
r_t	：湿潤単位体積重量 (t/m ³)



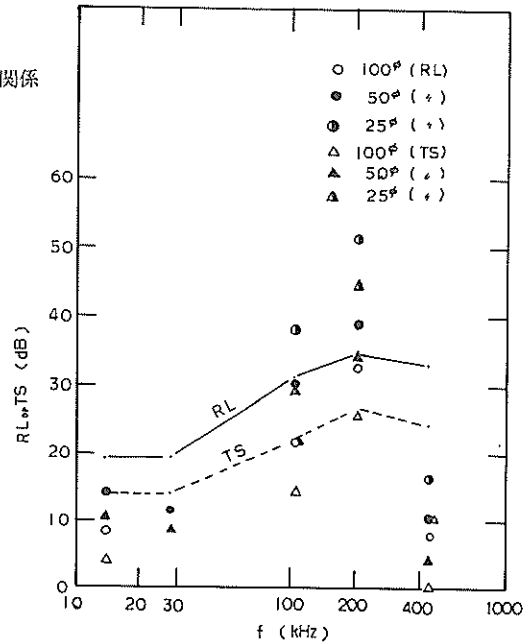
附図-1 送波器端子電圧と送波音圧レベル



附図-2 受波器端子電圧と受波端音圧レベル



附圖-3 軟泥の湿潤単位体積重量と体積濃度，含水比の関係



附圖-4 ターゲットの反射損失とTS

附表 - 1 実験時の風向, 風速及び潮位

※ 潮位は三河港工事用基準面 (T.P-1m420) 上の値である。

月日	時間	潮位	月日	時間	潮位	月日	時間	潮位	月日	時間	潮位	月日	時間	風向	風速
2/20	8:00	2.03	2/20	13:00	0.60	2/21	8:00	1.78	2/21	13:00	0.81	2/20	8:00	NW	4 m
	10'	2.05		10'	0.53		10'	1.82		10'	0.76		9:00	NW	3.5m
	20'	2.09		20'	0.44		20'	1.87		20'	0.73		10:00	NW	3.0m
	30'	2.10		30'	0.37		30'	1.92		30'	0.65		11:00	NW	3.2m
	40'	2.10		40'	0.34		40'	1.93		40'	0.62		12:00	NW	6.5m
	50'	2.10		50'	0.32		50'	1.94		50'	0.57		13:00	NW	5.0m
	9:00	2.10		14:00	0.28		9:00	1.94		14:00	0.53		14:00	NW	6.0m
	10'	2.07		10'	0.25		10'	1.94		10'	0.49		15:00	NW	7.0m
	20'	2.05		20'	0.22		20'	1.93		20'	0.45		16:00	NW	7.0m
	30'	2.01		30'	0.19		30'	1.92		30'	0.43		17:00	NW	8.0m
	40'	1.98		40'	0.18		40'	1.90		40'	0.38		18:00	NW	6.0m
	50'	1.93		50'	0.18		50'	1.89		50'	0.34				
	10:00	1.87		15:00	0.17		10:00	1.86		15:00	0.31	2/21	8:00	NW	3.2m
	10'	1.81		10'	0.20		10'	1.81		10'	0.29		9:00	NNW	4.2m
	20'	1.75		20'	0.23		20'	1.76		20'	0.29		10:00	NNW	5.0m
	30'	1.68		30'	0.27		30'	1.71		30'	0.29		11:00	NW	4.5m
	40'	1.61		40'	0.32		40'	1.66		40'	0.29		12:00	NW	4.2m
	50'	1.55		50'	0.36		50'	1.62		50'	0.28		13:00	NW	5.0m
	11:00	1.46		16:00	0.39		11:00	1.59		16:00	0.26		14:00	NW	8.0m
	10'	1.40		10'	0.43		10'	1.52		10'	0.28		15:00	NW	8.0m
	20'	1.34		20'	0.49		20'	1.47		20'	0.32		16:00	NW	8.0m
	30'	1.26		30'	0.56		30'	1.40		30'	0.34		17:00	NW	7.5m
	40'	1.18		40'	0.63		40'	1.32		40'	0.36		18:00	NW	7.0m
	50'	1.10		50'	0.73		50'	1.25		50'	0.40				
	12:00	1.02		17:00	0.81		12:00	1.19		17:00	0.44				
	10'	0.94		10'	0.85		10'	1.14		10'	0.48				
	20'	0.86		20'	0.92		20'	1.08		20'	0.55				
	30'	0.82		30'	0.99		30'	1.02		30'	0.60				
	40'	0.76		40'	1.05		40'	0.95		40'	0.62				
	50'	0.68		50'	1.11		50'	0.88		50'	0.69				

港湾技研資料 No.359

1980.12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 日青工業株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.