

港湾技研資料

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

No. 463 Sept. 1983

大水深施工検査・海底探査技術の開発(その1)
—大水深海底探査実験装置の設計概要と予備実験—

木 原 純 孝
白 井 一 洋

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 海底探査実験水槽	4
2.1 海底探査実験水槽の必要性	4
2.2 海底探査実験水槽諸元の決定根拠	4
2.3 水 槽 本 体	5
2.4 付 属 設 備	6
2.5 実 験 棟	11
3. 加 圧 水 槽	14
3.1 加圧水槽の必要性	14
3.2 加圧水槽諸元の決定根拠	15
3.3 水 槽 本 体	16
3.4 付 属 設 備	18
4. 超音波実験装置	19
4.1 水中波動実験装置	20
4.2 シンクロスコープ	22
5. 海底探査技術開発のための予備実験	22
5.1 送受波器の指向特性	22
5.2 各種底質の超音波特性	23
5.3 吸音材の吸音特性実験	29
6. 海底探査技術開発のための現地実験	32
6.1 実 験 概 要	32
6.2 実 験 結 果	35
7. ま と め	38
8. あ と が き	47
参 考 文 献	47
記 号 一 覧 表	47
付 録	48

**Development of Ultrasonic Prospecting and Inspection Technics
for Offshore Underwater Constructions**
**“The Outline of the Design of Facilities for Submarine Prospecting
and A Few of Preliminary Experiments”**

Sumitaka KIHARA*
Kazuhiro SHIRAI**

Synopsis

This report describes the result of preliminary experiment for the development of ultrasonic prospecting and inspection technics for offshore underwater constructions, and also outline of design of these experimental facilities. These facilities began to be built from 1979, and the experiment were carried out in this year.

They are made up of a water tank and pressure tank. Typical characteristics of these facilities are:

Water tank	
diameter	5 m
height	10.5 m
shape	cylinder-type
pressure tank	
diameter	4m
maximum pressure	10 kgf/cm ²
shape	sphere-type

Some preliminary experiments were carried out in order to get some data for planning of model experiments in these facilities. This report is written for the purpose of keeping design data of these facilities and reference data of technical development.

* Senior Research Engineer, Machinery Division.

** Member of Working Craft Development Laboratory, Machinery Division.

大水深施工検査・海底探査技術の開発(その1)

—大水深海底探査実験装置の設計概要と予備実験—

木原 純孝*
白井 一洋**

要 旨

本報告は大水深施工検査・海底探査技術の開発研究用として、54年度に着工し、この程実験開始した大水深海底探査実験装置の設計概要と予備実験について記したものである。

本装置の研究対象は主として超音波を用いた大水深施工検査・海底探査技術の開発で、大水深下超音波特性の基礎研究、捨石均し面、床掘跡など施工面検測技術、機雷、砲爆弾など海底沈埋異常物探査技術、及び水中施工監視技術の性能向上に関する開発研究であるが、本装置のうち海底探査実験水槽は超音波センサーを水面付近で二次元的に走査することによって水槽内を三次元的に探査する実験に使用し、加圧水槽は大水深海底付近に超音波センサー部を設置して海中、海底を探査することを想定して、加圧濁水中の超音波の挙動や耐水圧性能、運動性能についての実験に使用する。

本装置の主要諸元として海底探査実験水槽は直径5m高さ1.05mの鋼製直立円筒形の水槽で、加圧水槽は直径4mの球状鋼製压力容器で静水圧10kgf/cm²まで連続可変できる水槽である。

その他、これらの実験装置を使用した模型実験を計画する際の参考データを得るため予備実験を行った。

本報告は本実験装置の設計資料の保存、及び技術開発のための参考資料としてとりまとめたものである。

1. ま え が き

港湾工事大水深化により、従来の潜水夫に依存した施工検査及び海底探査作業は水深が深くなるとともに潜水夫の作業能率の低下により大きな制約を受けることとなる。そこで大水深域における港湾等海洋工事の施工検査、監視、海底探査作業を経済的かつ安全、効率的に行うため、省力化、自動化、遠隔操作を基盤とした技術開発が緊急の課題となっている。したがって、主として水中音響技術を利用した施工検査、海底探査技術に関する開発実用化を目的として実験用水槽を整備して、昭和54年度から58年度までの5ヶ年計画で開発研究を実施中である。研究項目として下記5項目を重点的にとりあげている。

- (1) 大水深下での超音波特性に関する基礎研究
- (2) 施工面検測技術の開発研究
- (3) 海底沈埋異常物探査技術の開発研究
- (4) 水中施工監視能力の向上方策に関する研究
- (5) 施工検査及び海底探査技術のシステム化に関する研究

大水深における施工検査及び海底探査技術の開発のための実験方法には現地実験と室内実験が考えられる。しかし本開発研究で行おうとしている超音波特性、施工面検測技術、海底沈埋異常物探査技術ならびに水中監視技術の開発に関する研究課題の解明では、現地海域における海底模型作成の費用過多、波浪等厳しい自然条件下での精度の確保の困難性、環境条件の複雑性による各要素(水温、塩分、圧力、濁度、浮遊物等)による影響量の評価困難、計測方法の限定等の理由により、現地実験だけでは対応が困難であり室内実験が不可欠である。

そこで本研究を遂行するために必要な実験施設を昭和54年から57年にかけて整備した。

昭和54年度に本研究の室内実験に使用するために、海底探査実験水槽を整備した。高さ1.05m、直径5mの直立円筒形の鋼製水槽で内壁に残響防止用のゴム製くさび形吸音材が取付けてある。水槽壁には内部が観測できるように観測窓、照明装置がつき、水槽底部に底質出入口としてマンホールがある。その他付属設備として送受波器移動用計測台車、へどろ模型作成用攪拌装置、使用

* 機材部 主任研究官(水中検測担当)

** 機材部 特殊作業船開発室

水道水脱気用の減圧式脱気装置などがある。

昭和55年度には、海底探査実験水槽および加圧水槽を収納するための実験棟を整備した。付属設備として制御装置、土砂運搬装置、リフト、ホイスト等がある。

昭和57年度には、本研究において水深 100 mまでの大水深港湾工事を対象とするため、水深 100m相当の水圧 10 kgf/cm² まで連続的に変えて大水深下の海域環境条件が再現できる加圧水槽を整備した。水槽本体は、直径 4 mの球形鋼鉄製の压力容器で水槽内を監視できるように水中テレビカメラ、照明装置、観測窓がついている。また供試体を出し入れするマンホールが水槽正面及び上部についている。残響防止用としてゴム製のくさび形吸音材が内壁にとりつけている。また付属設備として加圧装置、監視制御装置などがある。

これらの海底探査実験水槽や加圧水槽における超音波伝搬、反射など超音波特性の模型実験を計画する際の基礎データを得るため、小型水槽で予め基礎的なモデル実験を行った。実験項目は、送受波器の指向特性、各種底質の超音波特性、吸音材の吸音特性である。また、現地実海域の超音波特性と室内模型実験における超音波特性との相似律を求めるとともに、三河港、四日市港で音波探査現地実験を行った。その結果、室内実験における海底模型作成上及び本実験水槽を用いた海底探査技術開発のための実験を行う上で、貴重なデータが得られた。

本報告は、本実験水槽の設計資料の保存、及び技術開発を進める上での参考資料になればと考え作成したものである。

2. 海底探査実験水槽

2.1 海底探査実験水槽の必要性

施工検査および海底探査技術の開発のための実験方法には現地実験と室内実験が考えられる。しかし、本特別研究で行おうとしている超音波特性、施工面検測技術、海底沈埋異常物探査技術、ならびに水中監視技術に関する研究課題の解明にあっては次の理由により現地実験だけでは対応が困難であり室内実験が不可欠である。

(1) 現地実験では、検測すべき海底、捨石マウンドの作成、異常物の埋設およびその測定に多額の費用を要し、しかも厳しい条件下で所要の精度を確保することが困難である。その点、室内実験ではこれらの作業をドライワークで行うことができる。

(2) 実海域では海中の環境条件が刻一刻変化し、かつたくさんの条件が重なりあっており、実験条件が非常に複雑で、各要素(水温、塩分濃度、圧力、濁度、浮遊物など)による影響量を個々に評価できない。その点室内

実験では環境条件を正確に制御することができる。

(3) 実験内容の監視および結果の計測方法が現地では限定され、しかも波浪等の影響を受け不安定なものとなる。その点、室内実験では種々の方向からの多面的かつ正確な監視計測ができる。

したがって、施工検査・海底探査技術開発のための実験を行うには底質を取替えることができ、環境条件を制御できる海底探査実験水槽が必要である。

2.2 海底探査実験水槽諸元の決定根拠

海底探査実験水槽の諸元決定では、対象とする実験の内容および計測のための方法等を考慮して、目的にあった実験が可能な最低限度の諸元を確保している。すなわち下記のとおりとした。

(1) 施工面検測実験の場合

図-1に示すように、水槽底に捨石マウンドの模型を設置して、検測実験を行う場合に、送受波器から対象物までの距離の選定が重要である。送波器から超音波を放射した場合、音源からの残響や音圧の距離による比例限界等直接的な影響を受け、事実上マスキングされる範囲を a (残響はパルス幅に比例し、音圧の距離による比例限界は送波器の直径の二乗に比例し、波長に反比例する。400kHzで2m程度だから $a = 2$ m)、放射音の強度を測定するための受波器を移動させる距離を b (1mおきに最低限3点必要だから $b = 3 \sim 4$ m)、実験の対象となる捨石等の構造物の高さを d ($= 3$ m) とすると、必要な水槽の高さ H は

$$\begin{aligned} H &= a + b + d \\ &= 2\text{m} + (3 \sim 4\text{m}) + 3\text{m} = 8 \sim 9\text{m} \end{aligned}$$

となる。

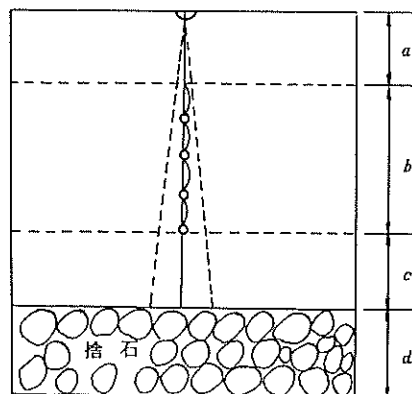


図-1 施工面検測実験の場合の水槽諸元の決定

(2) 海底沈埋異常物探査実験の場合

図-2 に示すように、水槽底に堆積どろを設置し、そ

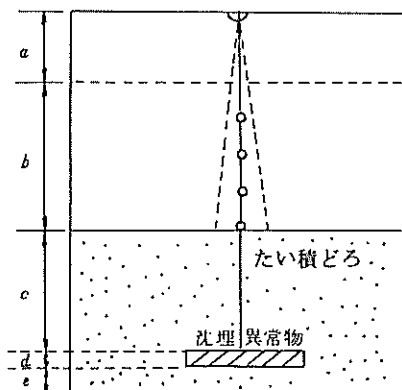


図-2 海底沈埋異常物探査実験の水槽諸元の決定

の中に沈埋異常物を埋設して探査実験を行う場合、送受波器から対象物までの距離および水槽の直径の決定が重要である。

a) 水槽高さの決定 (図-2)

音源からの残響等直接的影響を受け事実上マスキングされる範囲を a ($=2\text{m}$)、放射音波の強度測定に必要な距離 b (1m おきに最低限3点必要だから $b=3\sim 4\text{m}$)、沈埋物の平均埋没深さ c ($=4\sim 5\text{m}$)、沈埋物模型の直径を d ($=0.5\text{m}$)、水槽底部からの反射影響防止のための余裕空間を e (最低限 0.5m 必要) とすると、必要とする水槽の高さ H は、

$$\begin{aligned} H &= a + b + c + d \\ &= 2\text{m} + (3\sim 4\text{m}) + (4\sim 5\text{m}) + 0.5\text{m} + 0.5\text{m} \\ &= 10\sim 12\text{m} \end{aligned}$$

となる。

b) 水槽直径の決定 (図-3)

水槽壁からの残響を防止するために必要な吸音くさびの幅を a ($=0.5\text{m}$)、図-3において、A点を計測するために必要な余裕空間すなわち、音源から発せられた超音波が円すい状に広がることで必要となる距離を b ($=1\text{m}$)、沈埋物模型の長さを c ($=2\text{m}$) とすると、必要とする水槽の直径 L は、

$$\begin{aligned} L &= c + 2(a + b) \\ &= 2 + 2(0.5 + 1) = 5\text{m} \end{aligned}$$

となる。

上記1), (2)の理由によって海底探査実験水槽の高さを

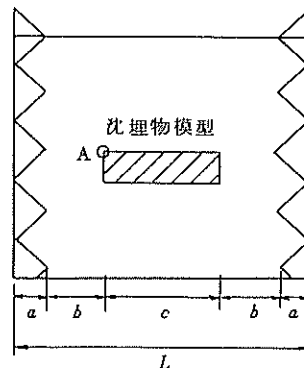


図-3 水槽直径の決定

10.5m 、直径 5m とした。

以上の海底探査実験水槽の決定根拠をふまえて、海底状況を任意に変えて音波探査実験のできる水槽を昭和54年度に整備した。図-4にその概略図を、写真-1にその外観を示す。

2.3 水槽本体

水槽本体の材質、形状は経済性、実験内容等を考慮して、鋼製直立円筒型とした。

水槽仕様は下記のとおりである。

- | | |
|--|------|
| (1) 材質：鋼製 | |
| (2) 形状：直立円筒型 | |
| (3) 寸法：高さ $10.5\text{m} \times$ 直径 5.0m | |
| (4) 観測窓： $1.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ | 1 箇所 |
| $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ | 1 箇所 |
| (5) 照明装置：水中照明灯 (400W) | 13 灯 |
| (6) マンホール：直径 0.7m | 1 箇所 |

水槽本体は鋼製直立円筒型で、直径 5m 、深さ 10.5m の水槽を製作据え付けもので、底板は径 6m の鋼板 9mm で側板を $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ の鋼板 9mm で支持させている。側板は下部より 4.5m まで 9mm 、これより 7.5m まで 8mm 、その上部 10.5m まで 6mm の鋼板を溶接して組立て、高さ 1.5m ごとに幅 125mm 、厚さ 12mm の鋼板リブを設けて補強している。組立、接合は全て溶接とし、鋼材は SS-41 を使用した。

観測窓 $1\text{m} \times 2\text{m}$ 1 箇所は鋼板 9mm および山形鋼 $L-100 \times 100 \times 13$ を使用して枠組し、平鋼 $100 \times 9\text{t}$ でガラス押えとなし、強化ガラス厚さ 12mm で所定水圧に耐えるようシーリング材を用いてボルトで固定している。上部観測窓 $500 \times 500\text{mm}$ も同様に設置した。

水槽下部の作業用マンホールは直径 700mm で鋼板により水圧に耐えるようリブで補強し、ボルトナットでふた(蓋)を固定する構造とした。

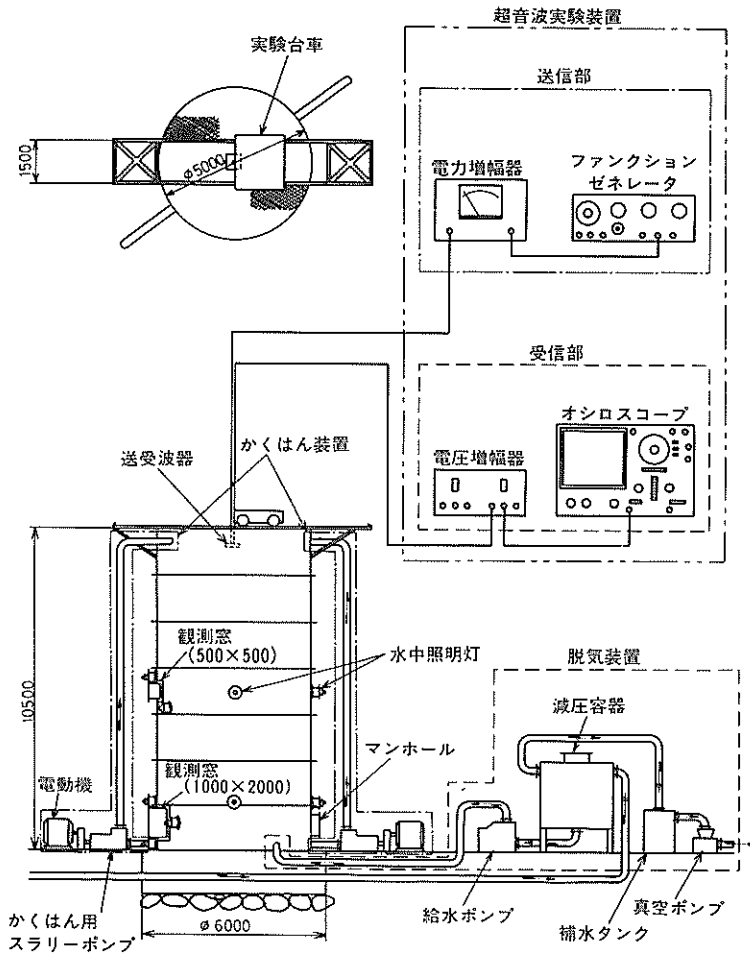


図-4 海底探査実験水槽

水槽の最上部には計測用台車を走行させるレール(6k)を幅1500mm、長さ7.5mにH形鋼H-100×100×6×8をベースとして取付け、槽より張り出しとなる部分はH形鋼H-100×100×6×8および山形鋼L-60×60×9で補強、走行振動の生じないように取付けている。

計測用台車レールの両側開口部は作業用プラットフォームとなるように縦鋼板6mmで山形鋼L-60×60×9を図-5のごとく枠組みし、材料搬入に際し全体を取りはづし出来る構造として取り付けている。

水中照明用として投光器(マルチメタルランプ400w)を図-5に示す位置に13灯取付けている。取り付けは水槽本体側壁に設けた窓に取付枠を設け、蝶番式金具を介して取り付けられている。

2.4 付属設備

海底探査実験水槽は、槽内に清水または濁水を入れ、情報伝達手段として、超音波を使用するため、波動伝搬の特性上、送波器より放射された波動は球面波として広がっていくため、側壁にあたって反射し、波動計測への障害となるおそれがある。また海底形状を記録図化するためには、送受波器を移動する必要があり、さらに海底沈埋異常物の探査実験では深さ5mくらいの海底土中に長さ2m、直径0.5m程度の機雷の模型を入れることができる構造となっている。したがって上記機能をもたせるために、下記のような付属設備を備えた。

(1) 吸音装置

水槽内における超音波実験においては、残響は有害であり極力排除しなければならない。このため、水槽の内壁に装備して残響を防止するための装置である。吸音材

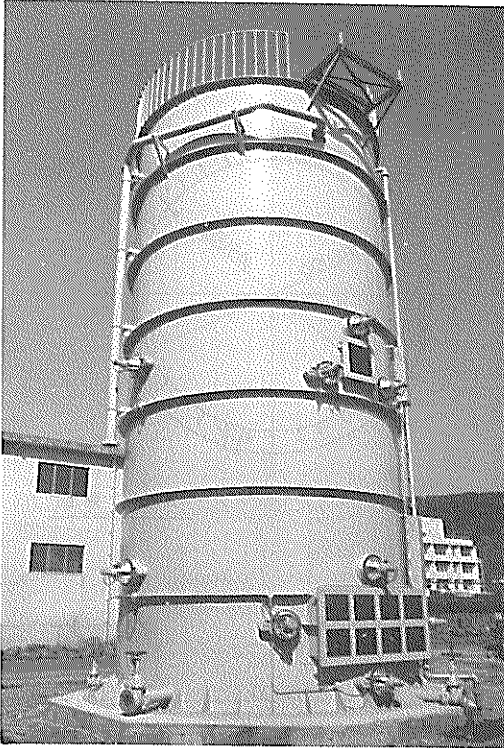


写真-1 海底探査実験水槽の外観

として、以前は松等の木材を用いた吸音楔を用いていたが、¹⁾木材の腐敗や手入れの必要性、更にヤニ等の融出による水の汚染等の問題があった。このような木材による欠点があるため吸音材に吸音ゴムを用いた。この吸音ゴムはドイツで1960年に発表され、我が国においても防衛庁技術研究本部・第5研究所にて実験・検討され、実用化されたものである。²⁾³⁾図-6および写真-2にその外観を示し、吸音特性を下記に示す。

$$\text{反射率} \left(20 \log \frac{\text{吸音ゴム反射音圧}}{\text{全反射音圧}} \right) : -38 \text{ dB 以下} \\ (\text{at } 10 \text{ kHz} \sim 200 \text{ kHz})$$

$$\text{透過率} \left(20 \log \frac{\text{吸音体透過音圧}}{\text{直接音圧}} \right) : -28.5 \text{ dB 以下} \\ (\text{at } 10 \text{ kHz} \sim 200 \text{ kHz})$$

(2) 計測台車(図-7)

送受波器移動用として水槽上部に計測台車を設置した。仕様は下記のとおりである。

- a) 形状寸法 : 長さ1m×幅1.8m
- b) 送受波器取付角度 : ±0°~30°
- c) 走行速度 : 10cm/sec

(3) 攪拌装置(写真-4)

土砂運搬装置により投入された土砂を攪拌し、濁りの条件を再現するもので、スラリポンプ2台で構成されている。その仕様は下記のとおりである。

- a) 攪拌ポンプ : 150mmスラリポンプ 2台
- b) 駆動電動機 : 3相200V 15kW 2台

(4) 脱気装置

液体媒質中に微量でも気泡が存在すると、音波の伝搬にはなほだしい影響を生ずる、これは気体の体積弾性率が液体のそれに比べて4ケタも小さいため、音圧によって気泡が激しく収縮・膨張の振動をするからであって、音波は散乱され、音波のエネルギーの一部は気泡によって消散され減衰する。

水中を通して超音波を送受して入出力電圧比の測定などを行う場合、水中に過飽和の空気が溶解していると、測定中に気泡が自然的に発生して、ときによってはなほだしい減衰異常を生ずることがある。防止法としては水槽の水を過熱するか減圧する方法によって水から空気を追い出して不飽和状態に保てばよい。

空気に接している水は普通空気を飽和溶解度まで溶かしているが、水温の上昇や静圧の低下によって飽和溶解度が減少して気泡が析出する。

図-8は飽和溶解度の温度特性を示したものである。静圧、1気圧の水について、空気溶解度が760mmHgの太い曲線より下の状態なら不飽和、上の状態なら気泡析出の危険性がある。飽和の度合を示す式として下記のような式がある¹⁾

$$S = \alpha_1 / \alpha_p \quad (1)$$

ここに S : 飽和度

α_1 : ある状態の水の空気溶解度

α_p : 1気圧に換算したときの水の飽和溶解度

水中に含まれている空気を除去するには、水温を上げるとかまたは減圧して飽和溶解度を下げた空気を追い出せばよい。

脱気処理の方法として加熱法と減圧法がある。加熱法は東北大学電気通信研究所で試作されたものであり¹⁾処理能力0.12m³/Hである。

減圧法は、防衛庁技術研究本部第5研究所で試作されたものがあり¹⁾処理能力は1.93m³/Hである。減圧してある容器の中に水を噴出させて水の中の空気を除く方法を用いており、常温で大量の水の連続脱気処理ができる点に特徴がある。したがって当所では大量の水の連続脱気処理できる減圧法を採用した。

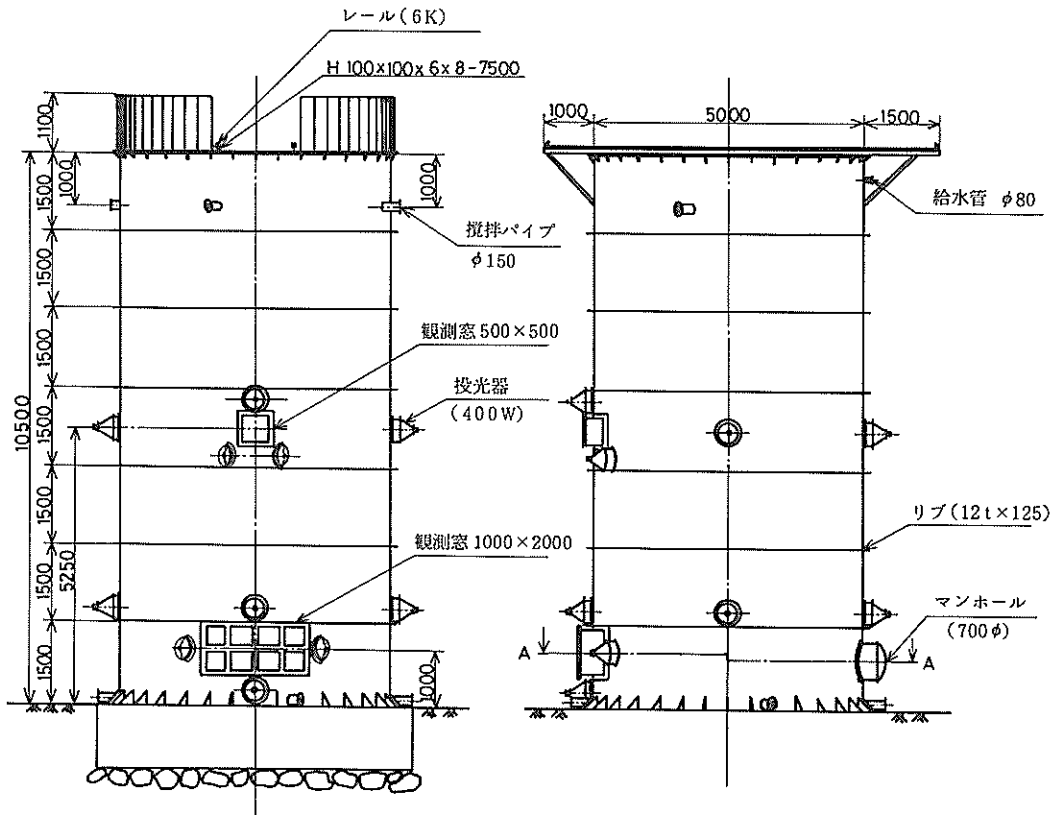
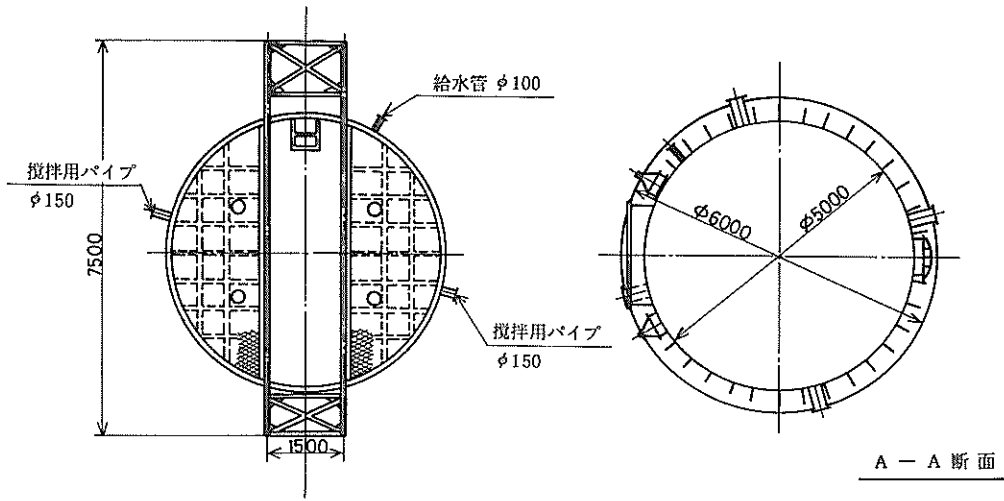
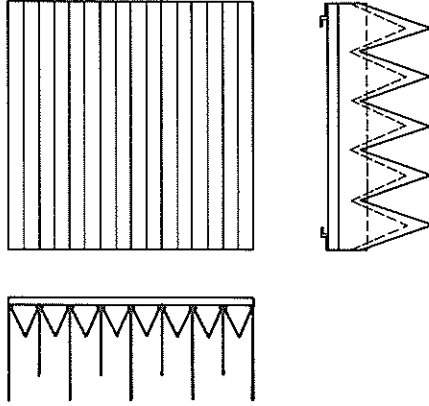


図-5 海底探査実験水槽外觀図

吸音材ユニット概要図
(500×500)



標準吸音材ユニット組立
(500×500)

尺度 $\frac{1}{4}$

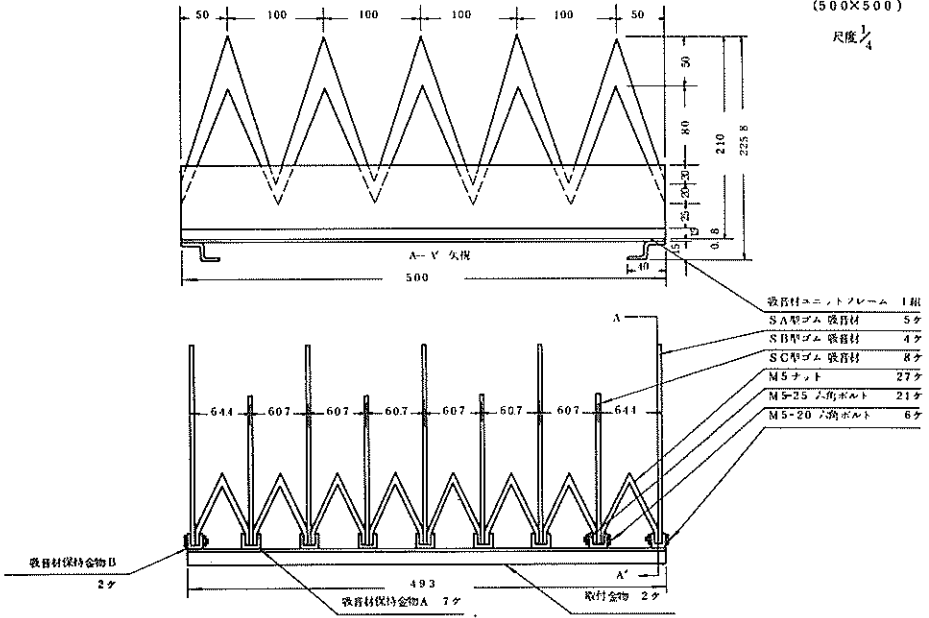


図-6 吸音材

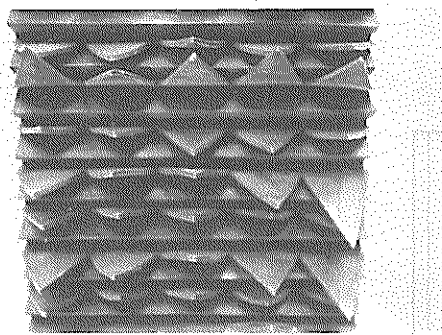


写真-2 吸音材

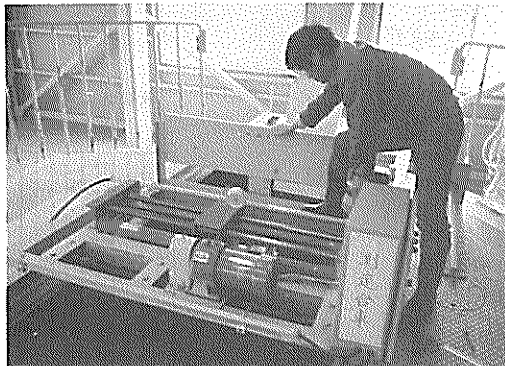


写真-3 計測台車

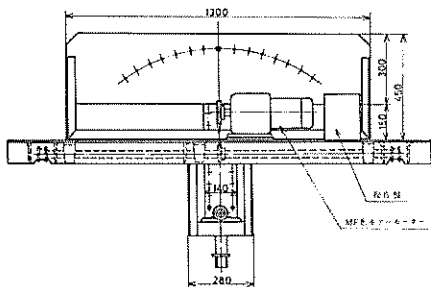


図-7-(a) 計測台車正面図

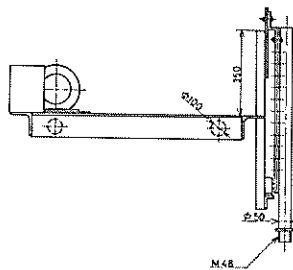


図-7-(b) 計測台車側面図

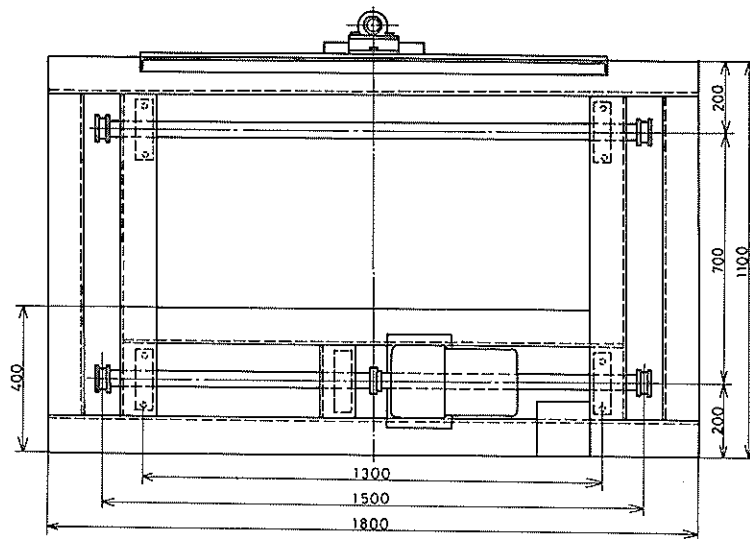


図-7-(c) 計測台車平面図

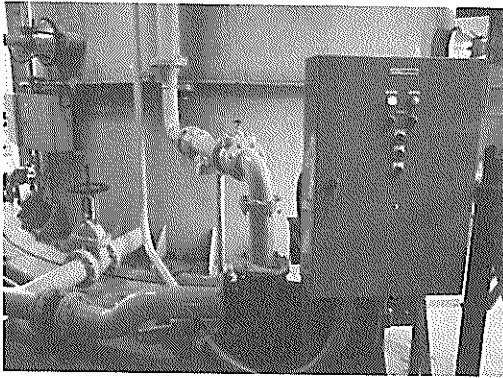


写真-4 攪拌装置

図-9に水温をパラメータとしたときの真空度に対する飽和度 S を示した。例えば水温 10°C のとき、減圧容器の中の真空度を 160 mmHg とした場合、 $\alpha_1 = 0.48\%$ 、 $\alpha_p = 2.22\%$ で飽和度 S が 0.216 となって、空気溶解度が脱気前に比べて 21.6% に減ったことがわかる。

製作した脱気装置は、水槽の中に給水する水の中に含まれている空気を除去し、音響特性実験における定量的測定に支障を生じさせないようにするものであって、水槽の大きさを考慮して脱気処理能力を大きくしている。その仕様は下記のとおりである。

- a) 減圧容器：鋼製円筒形、内径 1200 mm ×高さ 800 mm
- b) 水の噴出部：円錐台形、 45° の斜面に直径 1 mm の円孔 300 個を分散させてある。
- c) 真空ポンプ：排気速度 600 l/min 、 0.75 kW
- d) 給水用特殊ポンプ： $27\text{ m} \times 290\text{ l/min}$ 3.7 kW
管径 $80\text{ A} \times 65\text{ A}$
- e) 安全装置：真空度自動制御装置にて真空度範囲設定による自動運転可能。

電動弁およびフロートレススイッチ電極による自動給水。

図-10および写真-5にその外観を示す。

(5) その他の付属設備

制御装置：海底探査実験水槽の付属設備（計測台車、揚水ポンプ、脱気装置、攪拌ポンプ、土砂運搬装置）を運転制御するための電気設備であって、図-11にその系統図を示す。

つぎに、この装置の脱気性能について述べる。脱気能率は、減圧容器中の真空度を最高 160 mmHg 、最低 560 mmHg に変えて脱気運転ができ、空気含有率は、 1 気圧の清水の空気飽和溶解度の $\approx 20\%$ 以下におさえること

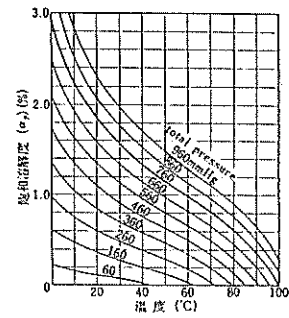


図-8 水の空気溶解度の温度特性¹⁾

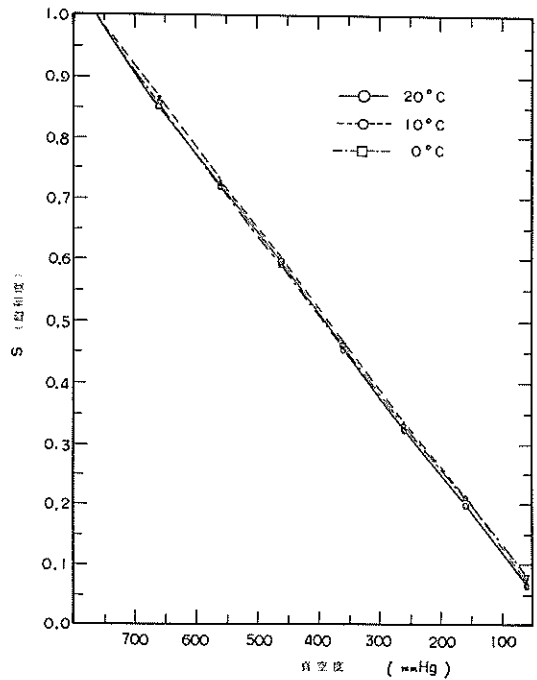


図-9 減圧容器中の真空度と水の空気溶解飽和度

ができた。また、水槽への満水になるまでの給水時間は、給水能力が 1 時間当たり約 10 m^3 で、水槽容量 196.25 m^3 だから、約 20 時間となる。

2.5 実験棟

海底探査実験水槽および加圧水槽を収納するための実験棟を昭和55年度に整備した。なお実験装置として高価で精密な電子機器を用いる関係で、直射日光、風雨等の影響を防止し、効率的で実効ある研究を行うために、探査制御室および計測機器検定室を水槽と一体となって整備した。その概要を図-12に、外観を写真-6に示す。

また海底探査実験水槽や加圧水槽を用いた超音波特性、

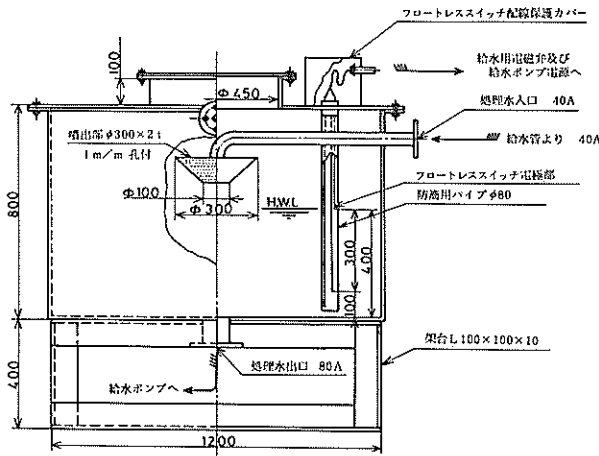
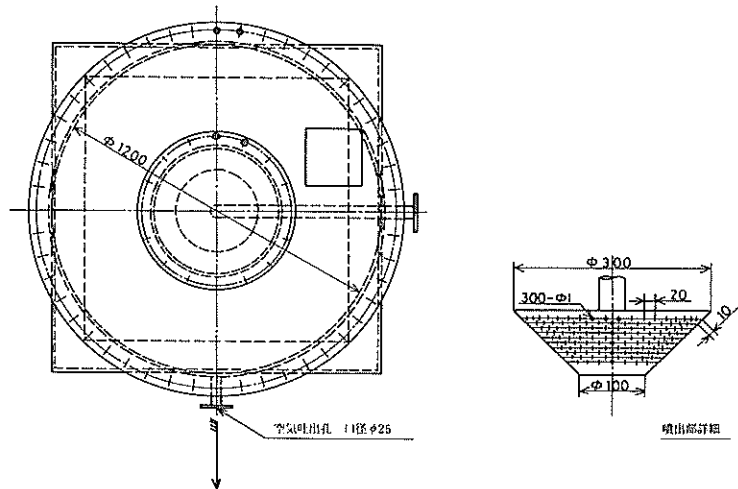


図-10 減圧式脱気装置

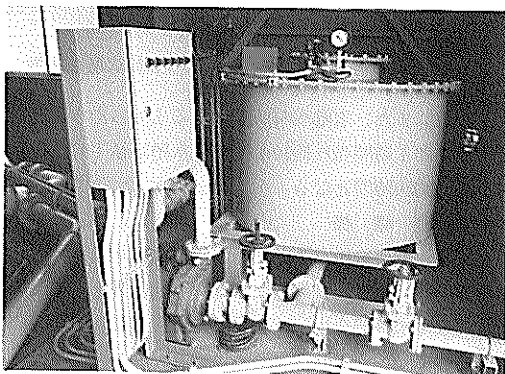


写真-5 脱気装置

施工面検測技術、海底沈埋異常物探査技術及び水中監視技術の開発に関する超音波実験では、水槽本体と一体となって機能する次に示すような付属設備を整備した。

a) 汚泥貯留槽及び汚水固形分離かき(掻)揚装置

海底探査実験水槽や加圧水槽を用いた実験では、実際の海域条件を極力再現するという意味で、濁水中での実験を行うこととしている。その場合、これら濁水を直接海洋へ放出するためには、土粒子等の分離処理しなければ水質汚濁防止法に抵触する。そこで排出泥水の中に含まれる懸濁土粒子及びゴミを沈降分離させるための汚泥貯留槽、泥水の中に含まれる懸濁土粒子及びゴミ等の固形分を沈降分離させた後、外へかきあげる汚水固形分離かき揚装置を整備した。図-13にその断面図を示し、写真-7にゴミ分離装置と沈澱汚泥かき揚装置の外観を示す。

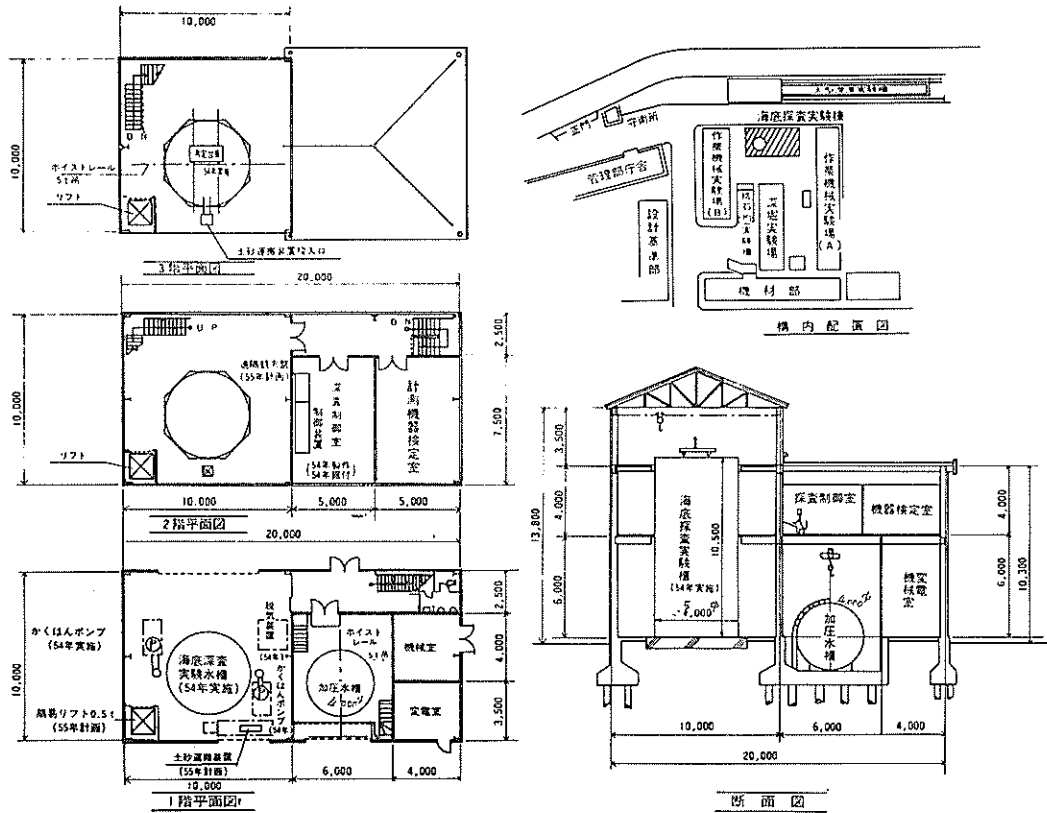


図-12 海底探査実験棟概要図



写真-6 実験棟

b) ホイスト及び簡易リフト

海底探査実験水槽や加圧水槽内の海底模型作成用ホイスト(5t)を各1台ずつ設置した。また海底探査実験水槽上部へ機材を運搬するのに要するリフト(500kgf)を整備した。

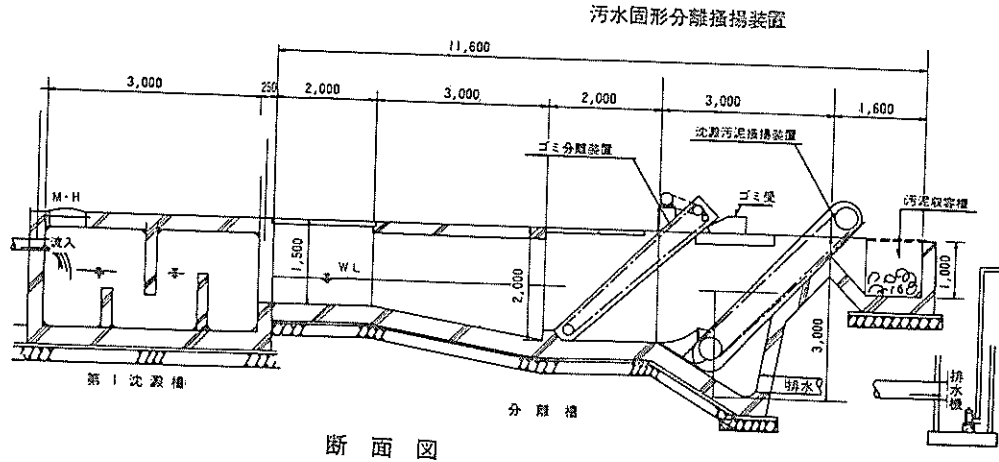
c) 土砂運搬装置

海底模型作成用の土砂を水槽上部へ運搬して投入するためのベルトコンベア式の土砂運搬装置がある。

3. 加圧水槽

3.1 加圧水槽の必要性

本開発研究は、水深30~100mの大水深港湾工事を対象としている。大水深下濁水中で使用される本開発研究に共通する超音波送受波器の開発では、加圧下濁水中での波動特性の実験が必要である。清水中の音波伝搬速度は水圧の関数であることが分かっているが濁りの影響は明らかでない。濁水中で実験的に確かめる必要がある。また送受波器からの音波放射圧と水圧との関係を解明することはキャビテーションを発生させずに強い超音波を発



断面図
図-13 汚水固形分離撈揚装置

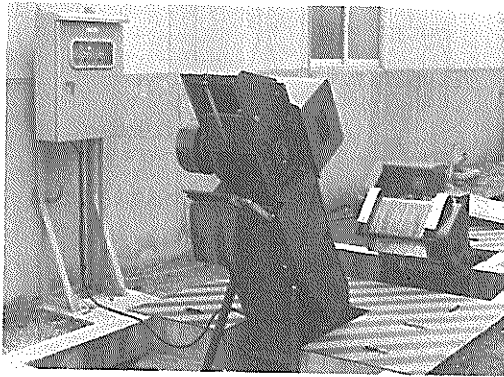


写真-7 ゴミ分離装置と沈泥汚泥撈揚装置

生させるために必要であり、大水深を想定した高圧下で実験する必要がある。海底沈埋異常物の探査では、海底面に送受波器を近づける必要から超音波送受波器の耐圧、耐水性能の実験や運動性能の実験が必要である。

以上の実験を現地にて行なうことが考えられるが、次の理由によって現地実験は困難である。

(1) 現地実験では実験船の調達、送受波器を大水深海底面上に近づける作業およびその測定に多額の費用を要し、しかも沖合波浪下で船上から所要の精度を確保することは困難である。その点室内実験ではこれらの作業をドライワークで行うことができる。

(2) 現地実験では海中の環境条件が非常に複雑で、各要素（水温、塩分濃度、圧力、濁度、浮遊物など）による影響量が個々に評価できない。その点室内実験では環境条件を正確に制御することができる。

(3) 実験の観察および計測方法が現地では限定され、

しかも測定機器が波浪等の影響を受け不安定なものとなる。その点、室内実験では種々の方向から多方面かつ正確な観察計測ができる。

したがって、本特別研究を実施するためには、水深0から100m相当の水圧10kgf/cm²まで連続的に変化させて、大水深下の環境条件を陸上で再現できる加圧水槽が必要である。

3.2 加圧水槽諸元の決定根拠

加圧水槽の諸元決定にあたっては、対象とする実験の内容および計測のための方法等を考慮して以下に示すとおり、目的にあった実験が可能な最低限度の諸元を確保している。

(1) 加圧濁水中の超音波特性実験の場合

図-14に示すように、送波器Sと受波器Rを対向させて送受波感度を測定する場合には、対向距離 x の選定が重要である。すなわち一般に送波器より超音波を放射する場合、音圧が距離に反比例する限界距離がある。この限界距離より近いと受波音圧の変動や音源からの残響など直接的影響を受け正確な測定ができない。この限界距離を x とすれば下記の式で示される¹⁾

$$x = \frac{(2a)^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{16} \quad (2)$$

ここに、 a ：送波器の半径

λ ：超音波の波長

表-1に当所所有の各種周波数の送受波器を使用する場合の限界距離 x を示す。この表から超音波周波数 f が400kHzの送受波器を使用して測定を行う場合の限界距離 x を求めてみると2.6mとなる。水槽の寸法 D は、水槽壁の吸音材の寸法 b が0.6m必要で、また音圧測定

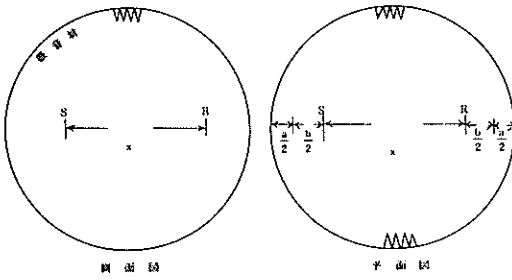


図-14 加圧濁水中の超音波特性実験の場合の水槽諸元の決定

ための送受波器移動距離 c が 0.8 m とすると、水槽の寸法 D は下記のようなになる。

$$D = b + c + x = 0.6\text{ m} + 0.8\text{ m} + 2.6\text{ m} = 4\text{ m}$$

すなわち、最低限水槽の寸法は 4 m となる。

(2) 海底沈埋異常物探査や水中監視実験の場合

大水深海底下に埋没している機雷など異常物を超音波を用いて探査する場合や、水中構造物建造など水中施工状況を監視する技術を開発するためには、超音波を送受波するセンサー部を大水深海底面上に近づけた場合の高圧濁水中の超音波の挙動や耐水圧性能及び超音波送受波器アレイを保持している架台の耐圧性能や視野拡大のための送受波器の旋回等運動性能をテストする必要がある。

図-15に、超音波送受波器アレイ架台の耐圧テストおよび音響特性実験を行うのに必要なスペースを示したものである。 S は送波器、 R は受波器で、 a は超音波送受波器アレイ架台の寸法で、残響などを考慮して 2 m 必要である。また b はこの架台の高さで残響やパルス幅による海底情報のマスキングを考慮して 1.5 m 必要である。

上記(1),(2)の理由によって加圧水槽本体の直径を 4 m とした。

以上の加圧水槽の諸元の決定根拠をふまえて、水深 100 m 相当の水圧 10 kgf/cm^2 まで連続的に変えて大水深下の海域環境条件が再現できる加圧水槽を昭和57年度に整備した。図-16にその概略図を示す。写真-8にその外観を示す。

3.3 水槽本体

水槽本体は、経済性を考慮して球形の鋼製压力容器とした。以下にその主要諸元を述べる。

- (1) 形状寸法：直径 4 m ，球形鋼鉄製，压力容器
- (2) 水槽内監視装置：水中テレビカメラ 1台
- (3) 照明装置：水中照明灯 (300 W) 3台
- (4) 観測窓：直径 200 mm 2箇

表-1 各種送波器の音圧が距離に反比例する限界距離

周波数 f (kHz)	波長 λ (cm)	送波器の半径 a (cm)	音圧が距離に反比例する限界距離 x (cm)
100	1.500	5.0	66.6
200	0.750	5.0	133.3
400	0.375	5.0	266.7
500	0.300	2.0	53.3

(超音波送受波器アレイ架台耐圧テスト及び音響特性測定)

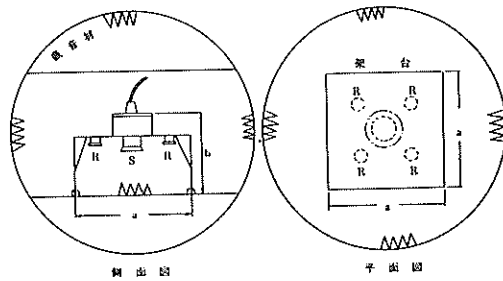


図-15 海底沈埋異常物探査実験や水中監視実験の場合の水槽諸元の決定

- (5) マンホール：直径 1000 mm 1箇，
直径 700 mm 1箇
- (6) 送受波器移動装置

水槽本体は压力容器用鋼板 SPV-32，板厚 13 mm を用いた。水槽上部には作業用出入口内径 $\phi 700\text{ mm}$ のマンホールにピタックドア（東京クラッチドア特製）を設けた。マンホール周囲に $2300 \times 2300\text{ mm}$ の正方形のプラットホームを設け作業が容易に出来るようにした。観測窓は2箇所設け、窓の内径 $\phi 200\text{ mm}$ とし板厚 19 mm の強化ガラスを2枚重ねて製作した。水槽下部側面には供試体を水槽内に搬入するための内径 $\phi 1000\text{ mm}$ のマンホールを設ける。このマンホールのふたも開閉の簡便な東京クラッチドア社製ピタロックドアを用いた。水槽内部には中心から 1300 mm の位置にエキスパンドメタル製の床を設け、供試体をマンホールまで移動できるよう台車用のレールを敷設した。密閉された水槽内の照明用として水圧 10 kgf/cm^2 以上に耐える 300 W の水中照明灯を3箇所配置した。加圧濁水中の超音波特性を測定するのに必要な送受波器移動装置は、水槽上部のマンホールから排水しなくても滑車でワイヤを引張る方法を用いた。水槽内を監視する装置として水中テレビカメラ

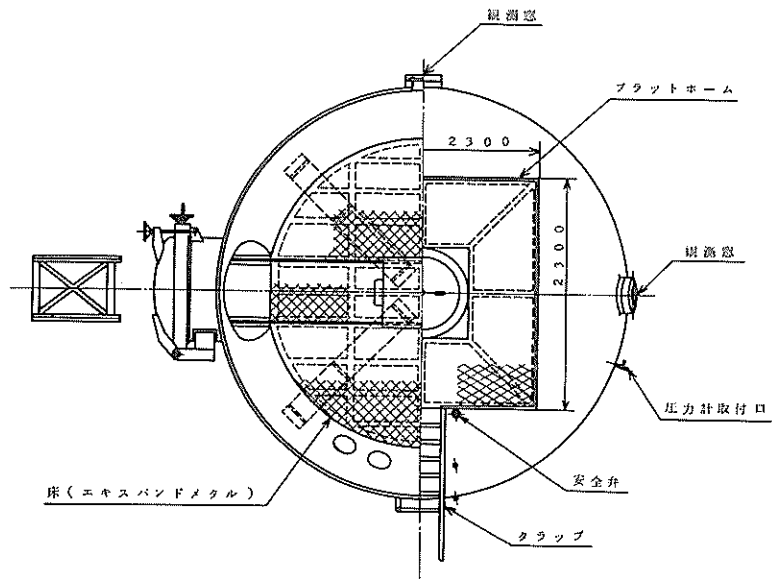
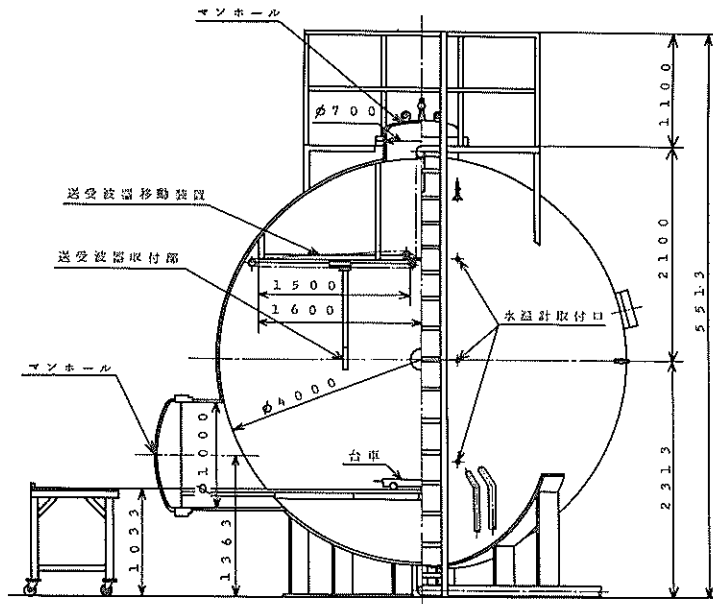


図-16 (a) 加圧水槽概略図

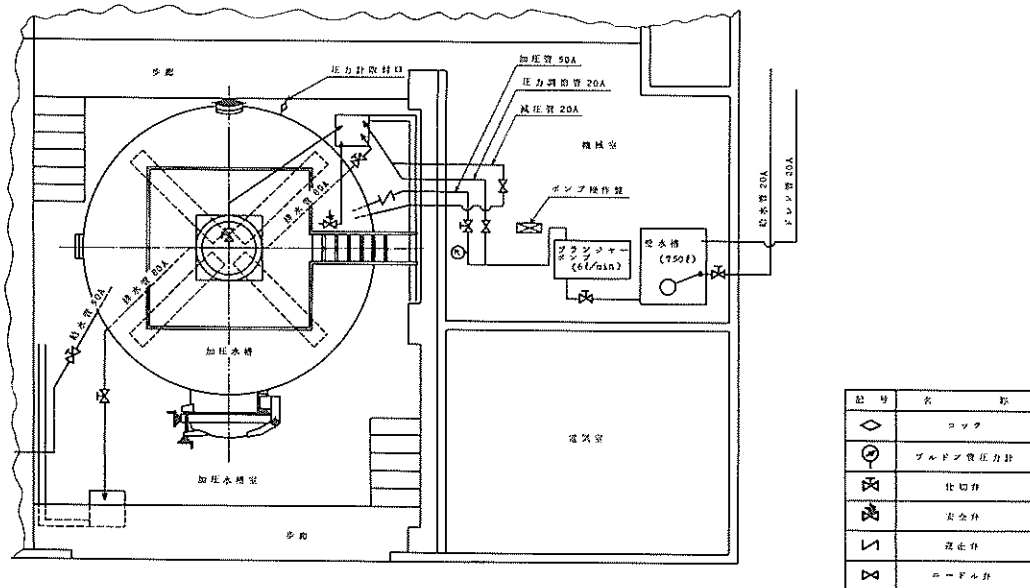


図-16-(b) 加圧水槽配置図

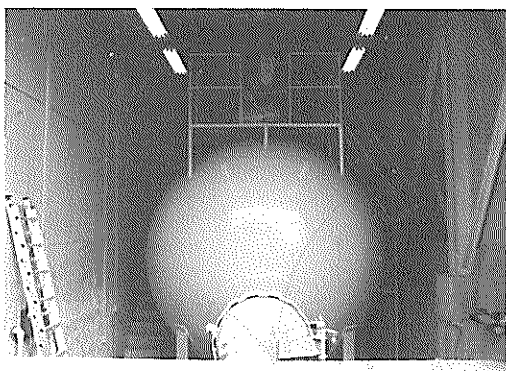


写真-8 加圧水槽

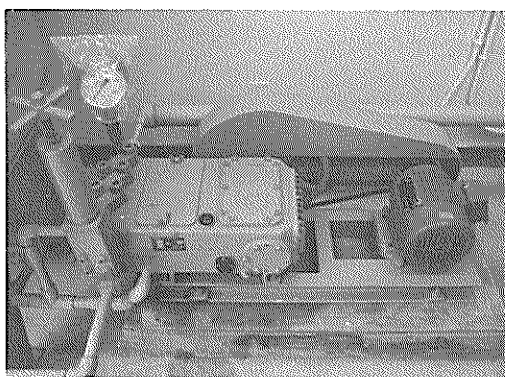


写真-9 加圧装置

を設置した。旋回装置を有し、上中左右任意の方向を観察できるようにした。水槽側壁には加圧水槽内の送受波器ケーブルおよび供試物体の歪み測定に使用するケーブル取り出し口をそれぞれ1箇所設け、外部から遠隔測定ができるようにした。

3.4 付属設備

加圧水槽の付属設備として下記の装置がある。

(1) 加圧装置

加圧水槽内の水圧を0から10 kgf/cm²まで連続的に加圧するのに必要なポンプを整備した。主要目は下記のとおりである。

プランジャー式ポンプ(0~50 kgf/cm², 6 l/min)

(2) 監視制御装置

加圧水槽内の水圧、水温、水質、供試体の状況、供試体の機械ひずみなどを遠隔監視し制御する装置を整備した。図-17に監視制御装置系統図を示す。主要目は次のとおりである。

- a) 水中テレビジョン(QA-226A) 1台
水中テレビカメラ, カメラ制御器, 旋回装置, 旋回装置操作盤, VTR
- b) 水圧計測記録装置 1台
圧力変換器(0~20 kgf/cm²), 自動平衡式指示計
- c) 水温計測記録装置 1台
温度センサ(4φ×300×3本), 切換器, 水温計

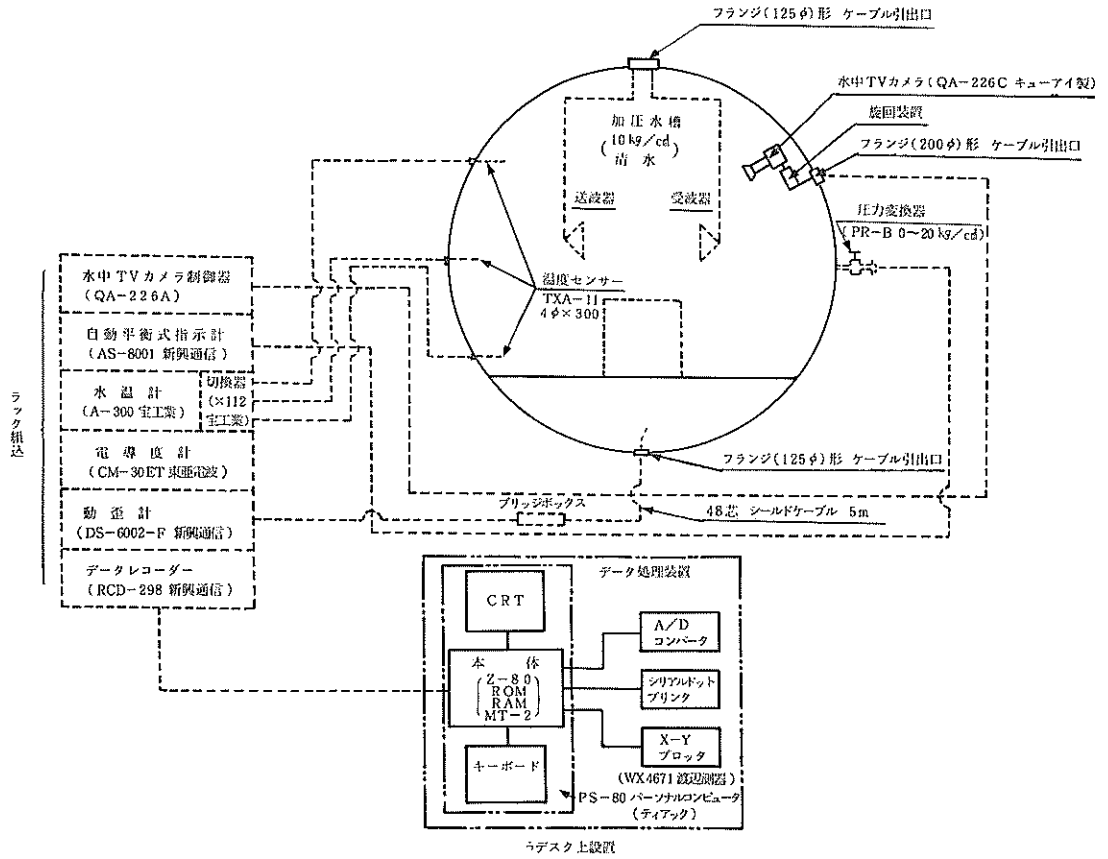


図-17 監視制御装置系統図



写真-10 監視制御装置

- d) 電導度計測記録装置 1台
- e) 動歪計測装置 1台
- f) データレコーダ 1台
- g) データ処理装置 1台

CRT, 本体, キーボード, A/D コンバータ, シリアルドットプリンタ, X-Yプロッタ

- (3) 吸音材(ゴム製吸音くさび) 1式

水槽壁からの音波の反射や残響を防ぎ、正確な音響特性を得るため、図-18および写真-11のように設置した。水槽の壁が球状であるので、じかに吸音材を取付けるのが困難であるため、図-18に示すように、角形の取付枠を設置し、その枠に図-6のような吸音板を着脱可能になるよう枠に掛ける方法で取付けた。

4. 超音波実験装置

大水深濁水中の検査および探査技術を開発するためには、水中における唯一の情報伝達手段としての超音波の伝搬特性、反射透過特性を海底探査実験水槽や加圧水槽

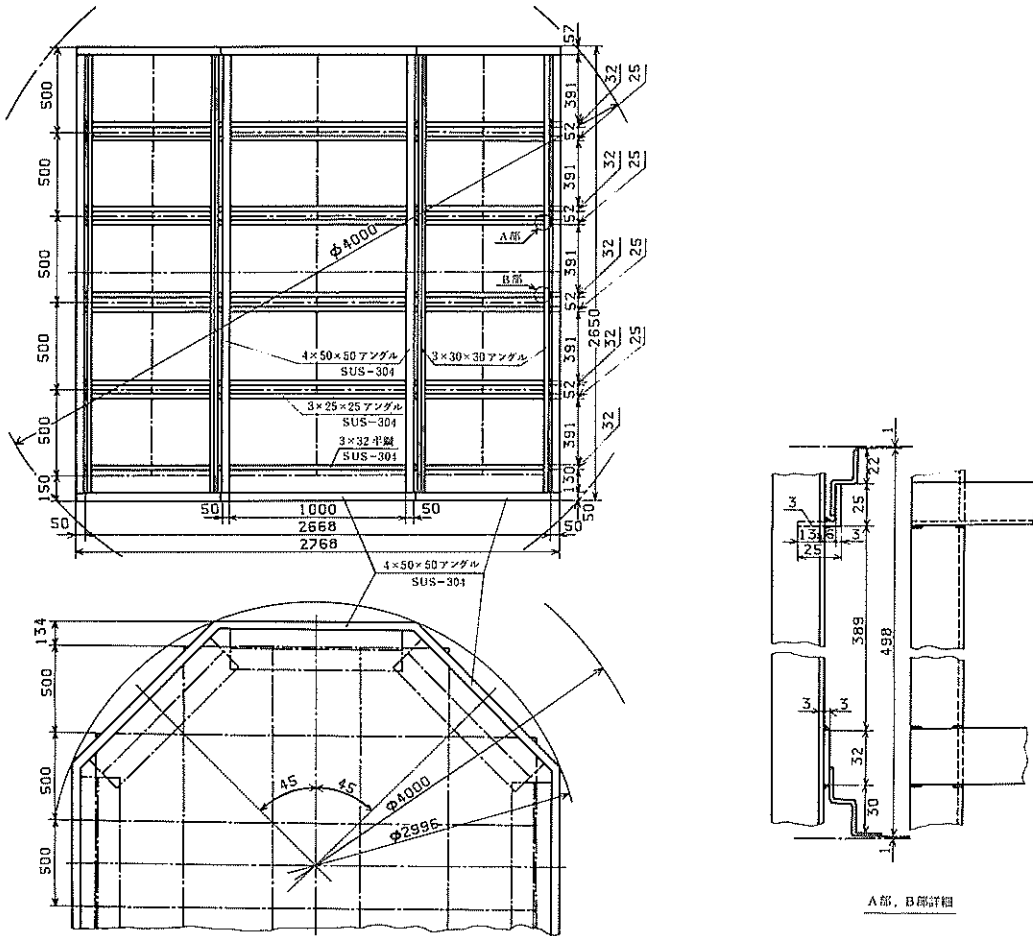


図-18 吸音材の水槽設置

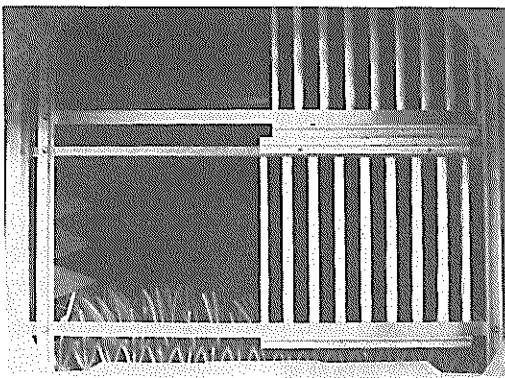


写真-11 加圧水槽吸音材取付状況

を用いた模型実験で検討する必要がある。そのために下記の超音波実験装置を整備した。

4.1 水中波動実験装置

本装置は下記の各機器より構成されている。図-19にそのブロック図を示し、写真-12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) : 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 : 周波数範囲は10 kHz~ 500kHz, 増幅度は55 dB である。

b) 電気音響変換部

- 100, 200, 400kHz 一般型送受波器 3組
- 100, 200, 400kHz 新方式ダイシング型送受波器 3組
- 校正用水中マイクロホン 10 kHz ~ 200kHz 3個

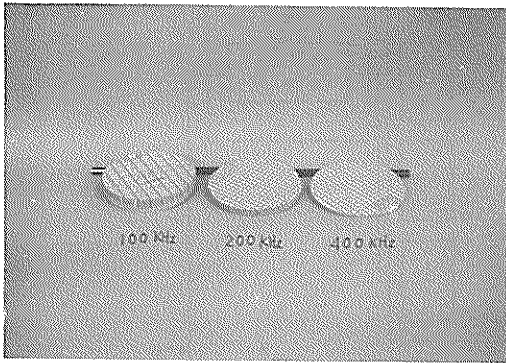


写真-13 ダイシング型送受波用振動子

表-2に水中波動実験装置の主要目を示す。

4.2 シンクロスコープ

超音波の波形を観測記録できる装置である。

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

5. 海底探査技術開発のための予備実験

大型実験水槽(海底探査実験水槽)や加圧水槽での超音波特性の模型実験を計画する際の基礎データを得るため、小型水槽であらかじめ基礎的なモデル実験を行った。実験項目は、送受波器の指向特性、各種底質の超音波特性、吸音材の吸音特性である。

5.1 送受波器の指向特性¹⁾

超音波パルス反射法を用いて、海底物体の探査を行う

序号	品名	数	備考
1	本体	1	アルミ
2	カバー	1	アルミ
3	振動子	1	PZT
4	緩衝材	1	キルクゴム
5	パッキン	2	キルクゴム
6	ボルトM35-11	1	B860-0750-X009A ストッパ
7	ワッシャー	1	
8	ゴム	1	CR
9	ゴム	1	CR
10	特殊ケーブル	1	

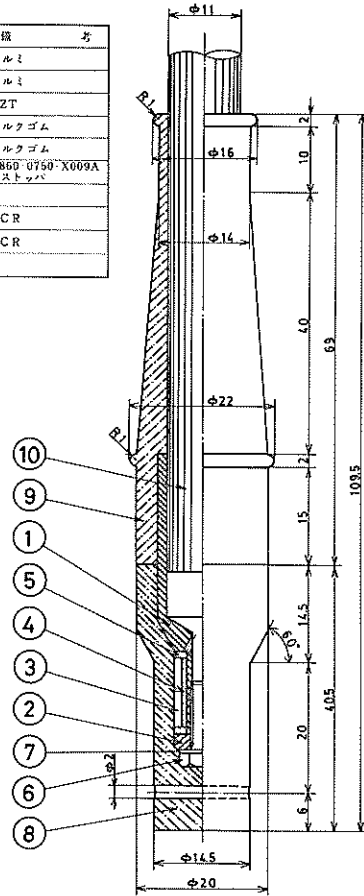


図-21 校正用マイクロホン構造図

表-2 水中波動実験装置主要目

品名	型式	規格	数量
ファンクションゼレクタ	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	HP 415A型	10Hz~1MHz 40dB	1 式
ユニバーサルカウンタ	ナショナル VP-4546A	DC~10MHz	1 式
D-Aコンバータ	ナショナル VP-49050A		1 式
レコーダ	ナショナル VP-6621A	2ペン式 DC1mV~5V	1 式
校正用マイクロホン	東和 TW-9103	10kHz~200kHz	3 個
一般用送受波器	東和 TW-9120	100, 200, 400kHz 各2個	3 個
ダイシング送受波器	東和 TW-9120	100, 200, 400kHz 各2個	3 組
発振器	ナショナル VP-7101A	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 溶解酸素(DO)	1 式

場合、水平方向の分解能が探査精度に影響をおよぼすので、超音波ビーム幅の形状を把握しておくことは実験を進めていくのに必要なことである。

一般に送受波器の指向性は、下記式で表わされる！

長さ L のラインアレイのビームパターン $b(r)$ は、

$$b(r) = \frac{\sin\left\{\frac{\pi L}{\lambda} \sin r\right\}}{\left(\frac{\pi L}{\lambda}\right) \sin r} \quad (3)$$

直径 $2a$ の円板アレイの場合は、

$$b(r) = \frac{2J_1\left\{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin r\right\}}{\left(2\pi a/\lambda\right) \sin r} \quad (4)$$

ここに、 $J_1\left\{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin r\right\}$ は $\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin r\right)$ に関する第 1 種の Bessel 関数で、 λ は波長、 r は垂直方向からの角度である。

なお、通常送受波器のビーム幅は -6 dB 減少点のビームパターンで表わされる。波長 λ で、線長 L のラインアレイの形成ビームパターンの -6 dB 減少点のビーム角度 θ (半減半角) は、約 $30\lambda/L$ で求められ、直径 $2a$ の円板アレイでは、 $40\lambda/2a$ として角度 θ が概算できる⁵⁾

また、-6 dB 超音波ビームの形状は、送受波器が点でなく、ある有限の寸法をもっているため、送受波器近傍では上記 1 式とはならず、図-22 に示すように、ある距離 D までは送受波器の長さ幅で進行し、 D 点で幅 l にビーム幅が極小となり、その後指向角のとおり拡散していく。この D および l は、波長 λ 、送受波器の長さを $2a$ とすると下式で示される⁶⁾

$$l = 0.46(2a) \quad (5)$$

$$D = \frac{1.485l^2}{\lambda} \quad (6)$$

そこで、実験に使用する円板型送受波器で、ビームの形状を実験的に確かめてみた。

次に実験内容を示す。

図-22 に示すように、FRP 製小型水槽 (900×900×1250mm) の水底にハイドロホンを設置し、送波器として $\phi 100$ mm の円板型 200 及び 400 kHz の振動子を使用した。測定方法は超音波ビーム放射軸がハイドロホンの中心軸に一致したときの受信音圧レベルを基準 (0 dB) として、送波器を水平方向に移動して受波レベルが 6 dB 低下した移動距離の 2 倍の距離をその水深での分解幅とした。この方法で各深度ごと測定し、各測定点を接続すると、超音波ビームの形状が得られる。図-22 に 200、400 kHz それぞれのビーム幅の実測値を示す。一点鎖線は計算値で示したビーム幅、実線が実測値である。

この図によれば、最小ビーム幅 l までの距離 D 以遠では、(5)、(6) 式に示す l および D や、ビーム幅はほぼ計算

値と一致することがわかり、計算値でもおおよそそのビーム形状を推定できることがわかった。

図-23 は、各深度ごとの超音波ビーム中心軸上の受波音圧レベル p_r (dB) *re μ ber* を示す。この図によれば、200、400 kHz も音源付近からビーム幅最小点の D まで除々に音圧 p_r が上昇し、 D 点で最高の音圧となって、それから距離に反比例して減少していくことがわかる。このことは、図-22 の超音波ビーム形状からうなづけることである。

5.2 各種底質の超音波特性¹⁾

現地海域で超音波探査機を用いて海底探査を行う場合、海底土質が多様多様であり、超音波の反射、透過特性がそれぞれ異なることが予測される。そこで海底土質として代表的な玉石、碎石、砂利、砂、どろなどをとり上げ室内実験にてその反射損失、伝搬損失、伝搬速度など音響特性を測定した。

(1) 玉石、碎石、砂利、砂の音響特性実験

使用した玉石、碎石、砂利、砂の性状を表-3 に示す。

図-24 に各供試材の粒度試験及び重量試験の結果を示す。この図から 1 個あたりの石の平均重量は、玉石で 71 gr、碎石で 31 gr、土砂の平均粒径は、砂利で 5 mm、砂は豊浦標準砂を使用して 0.2 mm であった。写真-14 に玉石、碎石、砂利の外観を示す。

測定は次のような方法で行った。小型水槽 ($\phi 500$ mm × 700mm のポリ容器) に、300mm の深さになるよう供試土砂を投入し、清水を満たし、反射特性の測定には、水槽上部に送受波器を、伝搬損失や伝搬速度を測定するときは、送波器と受波器の間に供試材をサンドイッチ状にはさんで、送波波形と受波波形をシンクロスコープで読みとることによって測定した。(写真-15)(写真-16)

超音波周波数は、反射特性にあつては、200 kHz、伝搬特性の測定では、10、20、40、50、60、80、100、200、400 kHz の 9 周波を使用した。

実験の結果は、図-25 に各種土質の超音波反射特性を、図-26 に各種土質の超音波伝搬特性を各周波数毎に示した。また図-27 には、各種土質中の超音波の伝搬速度を示す。

図-25 によれば、超音波反射損失は大きい方から砂 > 玉石 > 砂利 > 碎石の順であり、図-26 から超音波伝搬損失は、玉石 > 砂 > 砂利 > 碎石の順であった。その結果、碎石が超音波を反射しやすく、かつ透過しやすい。砂は反射しにくく、玉石は透過しにくいこと。砂利は中間の特性があることがわかった。また砂利、碎石の伝搬損失の周波数特性を求めてみると、両者とも周波数が大なる

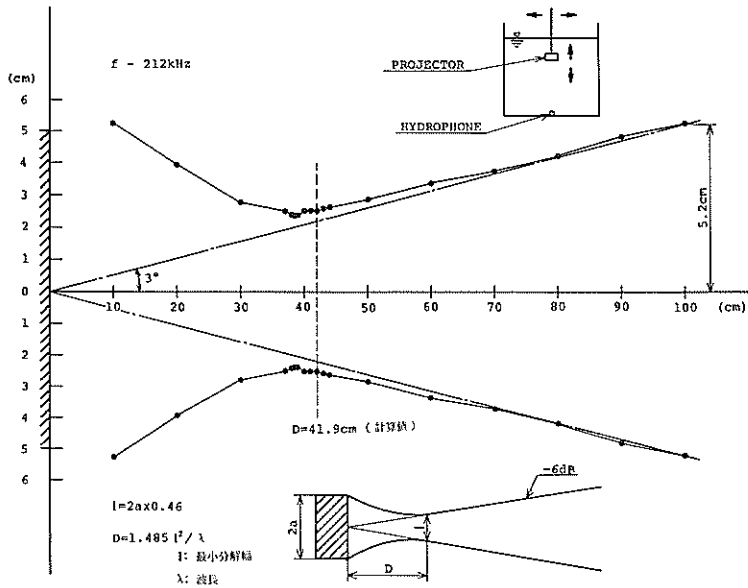


図-22-(a) 送受波器の大きさと最小分解幅及び深度 (212kHz)

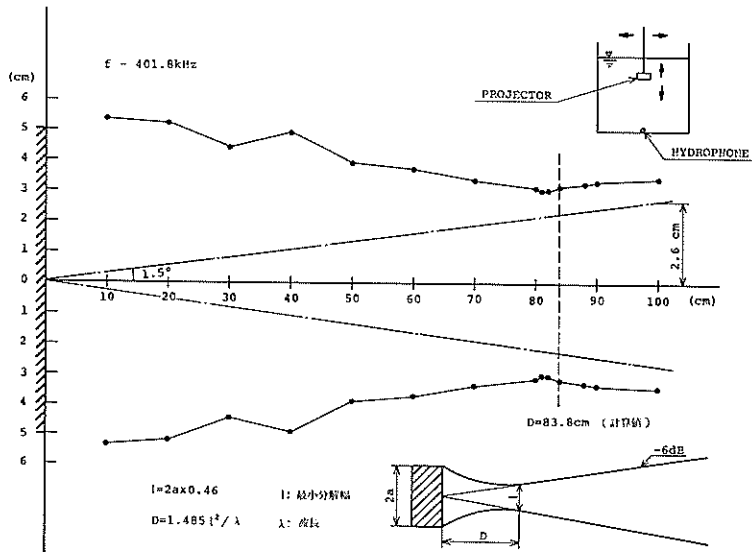


図-22-(b) 送受波器の大きさと最小分解幅及び深度 (401.8kHz)

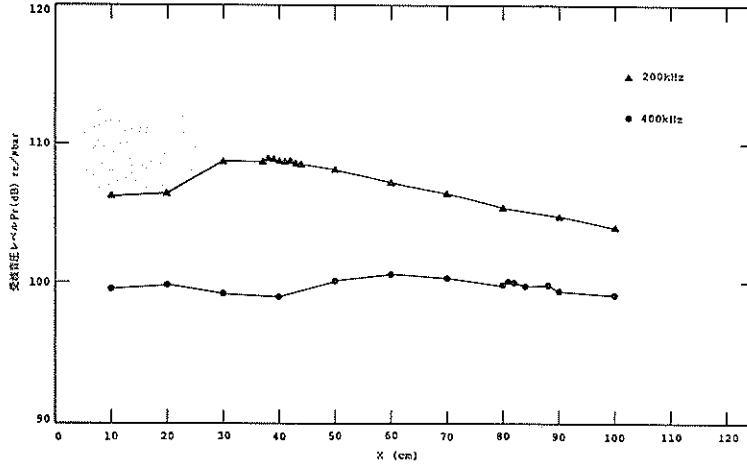


図-23 φ100mm円板型送受波器軸上各深度音圧レベル

表-3 供試材の物性

石の種類	真比重	含水比 (%)	間隙率 (%)
玉石	2.61	0.439	41.0
碎石	2.59	0.257	42.4
砂利	2.81	—	40.0
砂	2.66	14.93	—

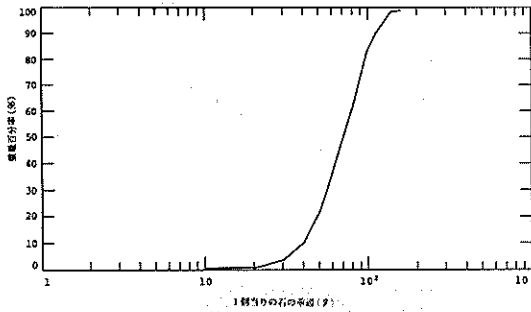


図-24-(a) 玉石の重量加積曲線

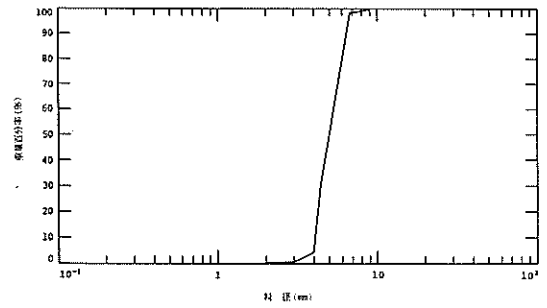


図-24-(c) 砂利の粒径加積曲線

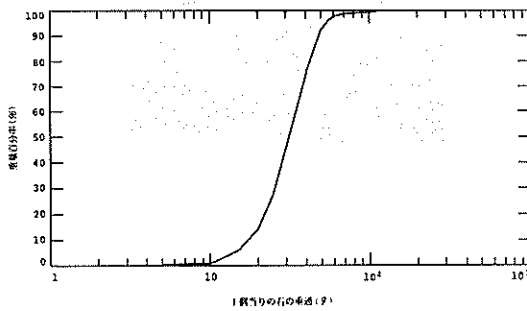


図-24-(b) 碎石の重量加積曲線

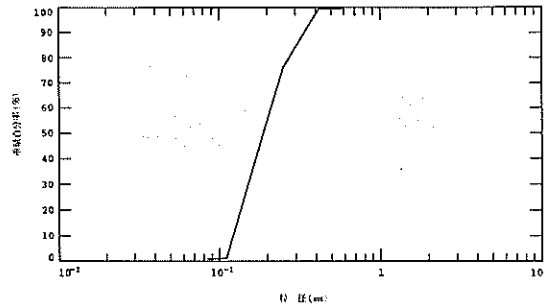


図-24-(d) 砂の粒径加積曲線

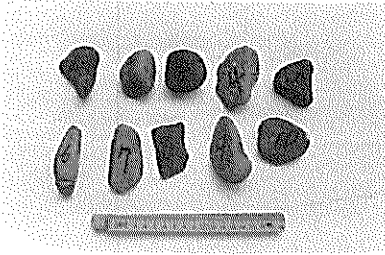


写真-14-(a) 玉石の外観

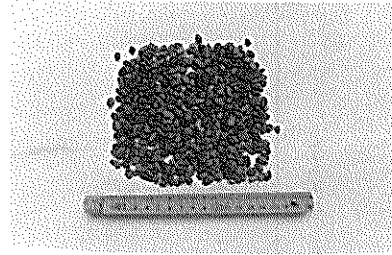


写真-14-(c) 砂利の外観



写真-14-(b) 碎石の外観

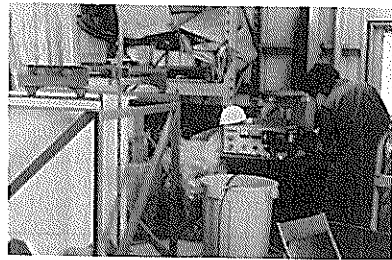
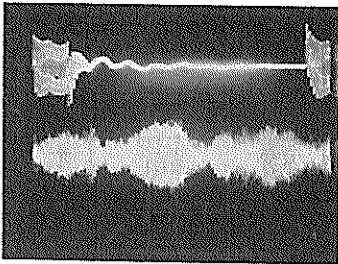
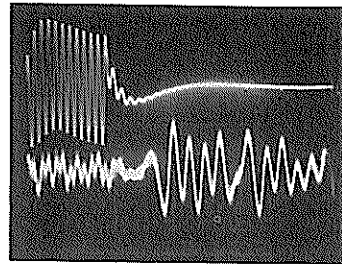


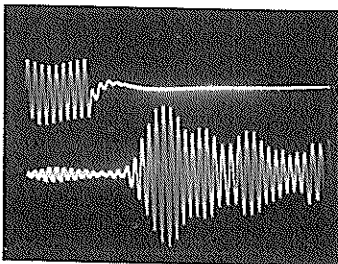
写真-15 予備実験状況



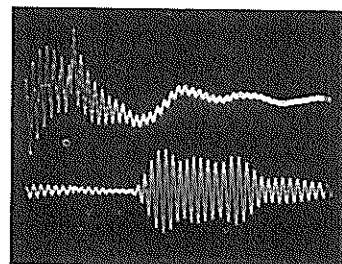
玉石 上:送波 $V_1=50\text{V/DIV}$ $H_1=50\mu\text{s}$
 $f=200\text{KHz}$ 下:受波 $V_2=50\text{mV/DIV}$ $H_2=50\mu\text{s}$



砂利 上:送波 $V_1=50\text{V/DIV}$ $H_1=20\mu\text{s}$
 $f=200\text{KHz}$ 下:受波 $V_2=2\text{mV/DIV}$ $H_2=20\mu\text{s}$



碎石 上:送波 $V_1=50\text{V/DIV}$ $H_1=20\mu\text{s}$
 $f=200\text{KHz}$ 下:受波 $V_2=10\text{mV/DIV}$ $H_2=20\mu\text{s}$



砂 上:送波 $V_1=50\text{V/DIV}$ $H_1=20\mu\text{s}$
 $f=200\text{KHz}$ 下:受波 $V_2=50\text{mV/DIV}$ $H_2=20\mu\text{s}$

写真-16 シンクロスコープによる送受波形

程、大きくなり、周波数依存性があることがわかった。

なお各底質における超音波の伝搬速度は図-27に示すとおりである。各底質とも非常にデータにばらつきが大きく、底質の含水比や間隙率に依存していると思われる。

(2) 軟泥（フライアッシュ懸濁液）の音響特性実験
軟泥の模型として、フライアッシュの懸濁液を用いて、

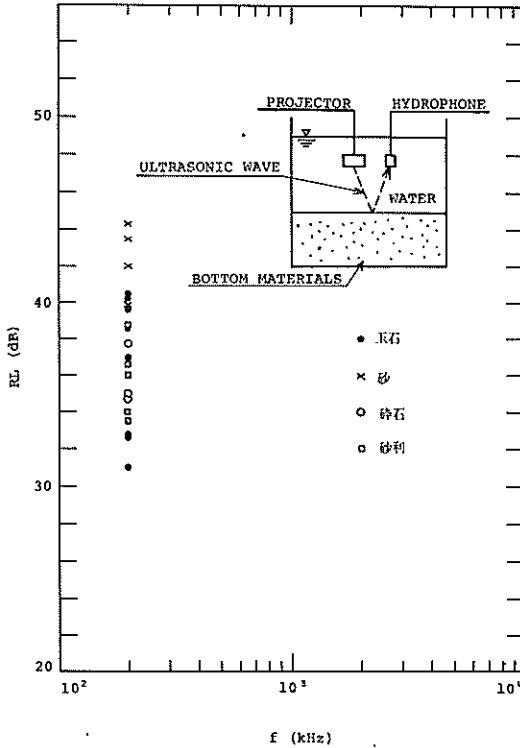


図-25 各種土質の超音波反射特性 (200kHz のとき)

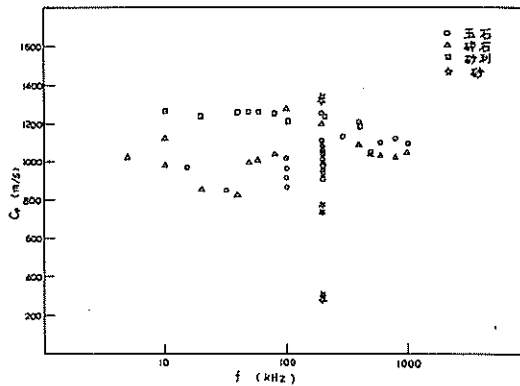


図-27 各種土質中の伝搬速度

その濃度と超音波減衰定数の関係を求める実験を行った。周波数として 100, 200, 400 kHz を使用し、送受波器を 150 mm 離して対向させ、その間の超音波減衰特性を測定しようとする器具を試作した。(写真-17)

実験は、 $\phi 500 \times 700$ mm の小型水槽に清水を入れ、その中に秤量したフライアッシュを投入してよく攪拌して均一な濃度の水とフライアッシュの懸濁液を作り、送波器から各種周波数の超音波パルスを放射して、媒質が水のとときの受波レベルを基準として、受波器での受波波形の振幅をシンクロスコープで測定記録することによって減衰定数を求めた。(写真-18)

測定の結果を図-28に示す。フライアッシュ懸濁液の濃度に比例して減衰定数 α (dB/m) が増加していることがわかる。このことから超音波の懸濁液中の減衰定数を

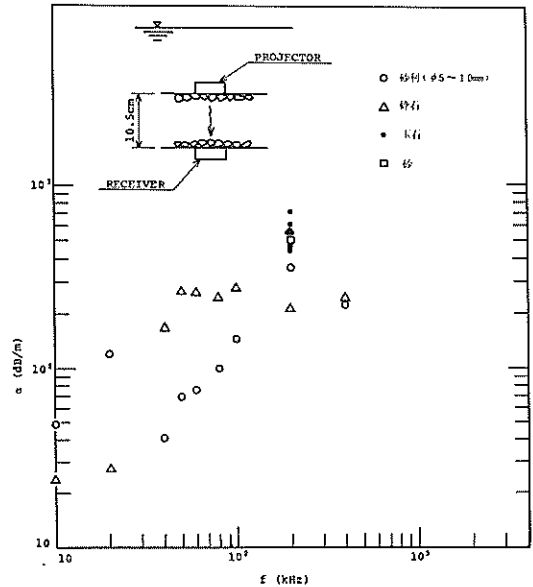


図-26 各種土質の超音波伝搬特性

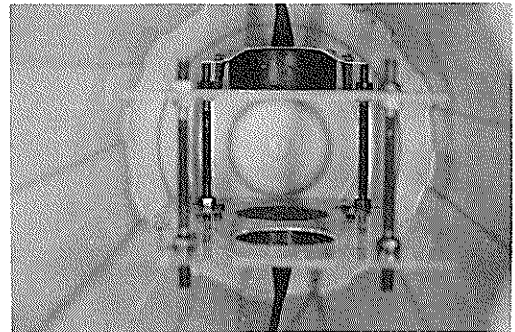
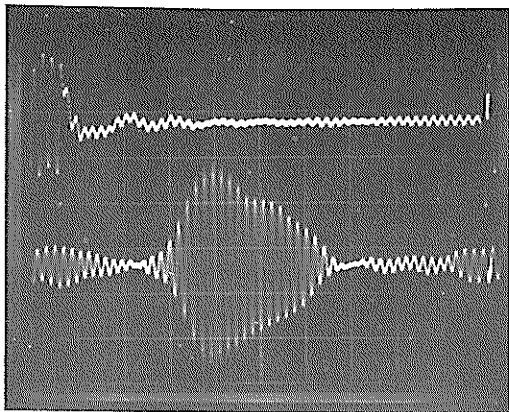
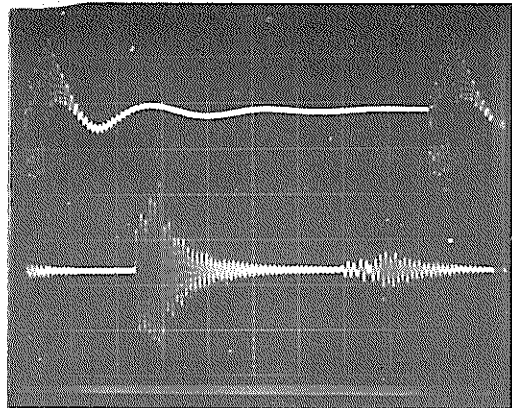


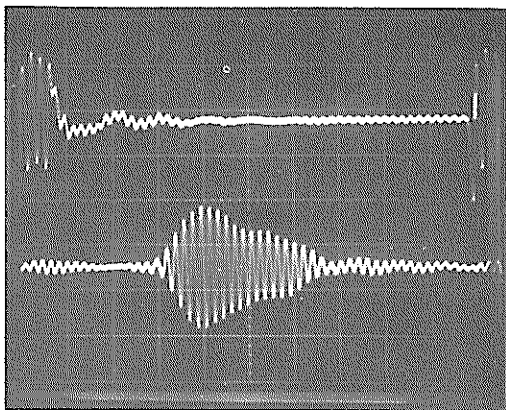
写真-17 超音波減衰特性測定器



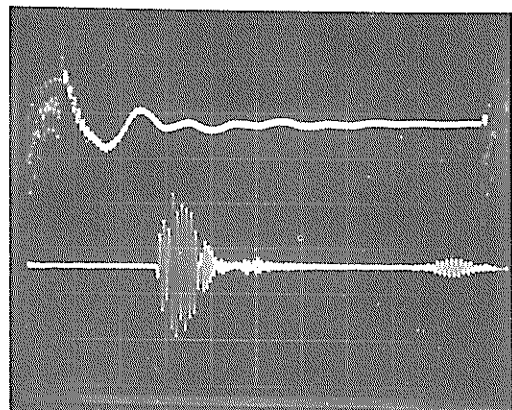
上: 50 V/DIV 50 μ s/DIV
下: 5 V/DIV



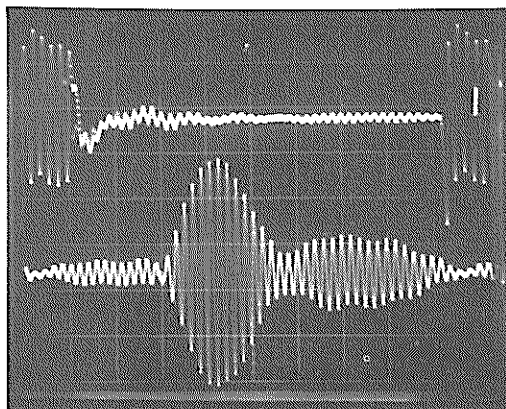
上: 50 V/DIV 50 μ s/DIV
下: 0.5 V/DIV



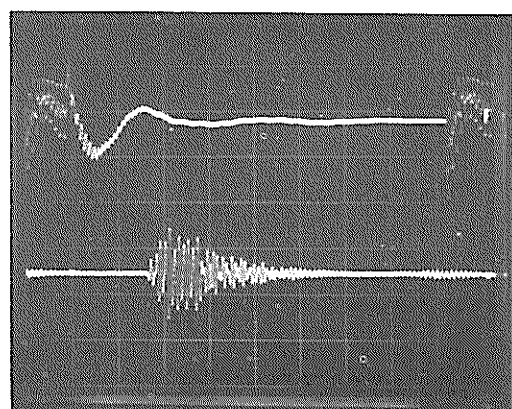
上: 50 V/DIV 50 μ s/DIV
下: 5 V/DIV
フライアッシュ: 100 gr



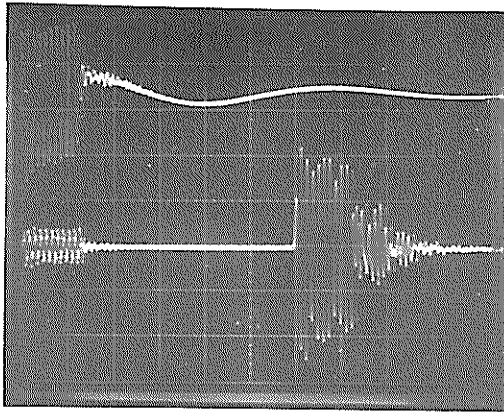
上: 50 V/DIV 50 μ s/DIV
下: 2 V/DIV
フライアッシュ: 100 gr



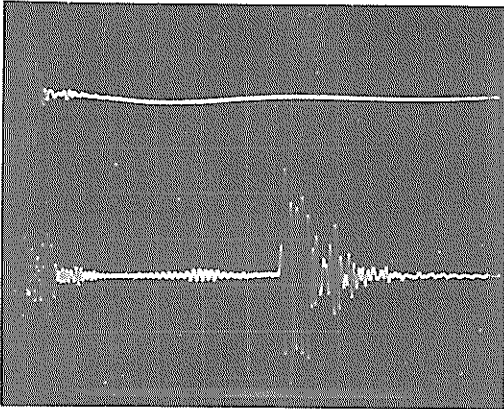
上: 50 V/DIV 50 μ s/DIV
下: 2 V/DIV
フライアッシュ: 1 kg
写真-18-(a) 100kHz のオシロ波形



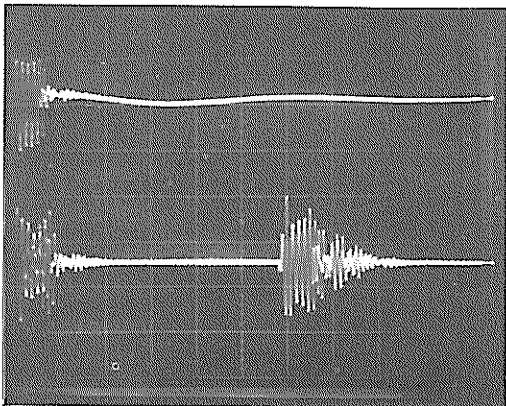
上: 50 V/DIV 50 μ s/DIV
下: 0.5 V/DIV
フライアッシュ: 1 kg
写真-18-(b) 200kHz のオシロ波形



上: 50 V/DIV 20 μ s/DIV
下: 0.2 V/DIV



上: 50 V/DIV 20 μ s/DIV
下: 0.2 V/DIV
フライアッシュ: 100 gr



上: 50 V/DIV 20 μ s/DIV
下: 0.2 V/DIV
フライアッシュ: 2 kg
写真-18-(c) 400kHz のオシロ波形

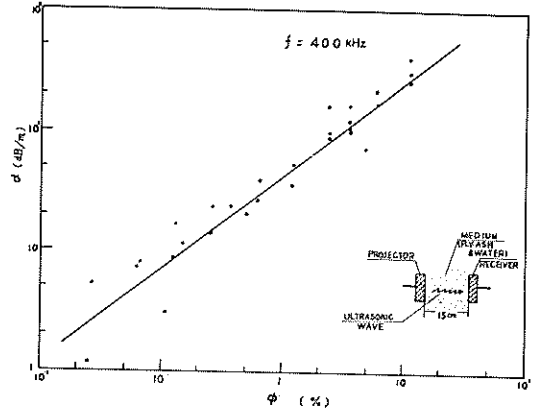


図-28 フライアッシュ懸濁液中の超音波の減衰

求めると、おおよその泥の濃度を求めることができる。

5.3 吸音材の吸音特性実験

大型実物大模型実験を行うための海底探査実験水槽（直径5m、高さ10.5m）の内壁に残響防止用のゴムの吸音くさびを用いた吸音材をとりつけた。そこでその吸音効果を調べるために小型水槽で吸音特性の実験を行った。

(1) 吸音板の吸音特性実験

長さ900mm、幅900mm、深さ1250mmのF.R.P製水槽の底に供試吸音材（ゴム製くさび付、500×500mm）を設置し、直径100mmの円板型送受波器を使用して、100、200、400kHzの周波数の超音波トーンバーストパルスによる吸音材の反射・透過損失をシンクロスコープの送受波パルス波形の振幅を読みとることによって行った。

測定は、送受波器の感度積から下記式を用いて反射損失(RL)を求めた。

$$RL = SL - 2TL - EL \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

ここに、 RL : 反射損失 (dB)

SL : 送波音圧レベル (dB-cm)

TL : 伝搬損失 (dB)

EL : 反射音圧レベル (dB)

表-4に反射損失の測定データを示す。

また透過損失(ATL)の測定は、水槽中央に吸音材を垂直に立て、吸音材の表側に送波器、裏側に hidroホンを設置し、送受波器の感度積から下記式を用いて測定した。

$$ATL = SL - TL - EL \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

ここに、 ATL : 透過損失 (dB)

表-4-(a) 吸音材の反射損失

	SL (dB-cm)	$2TL$ (dB)	EL (dB)	RL (dB)
kHz 100	153.8	38.7	61.1	54.0
	154.6	42.8	61.1	50.7
200	162.9	37.6	72.7	52.6
	162.3	37.3	71.9	53.1
400	144.4	38.1	55.3	51.0
	145.5	37.0	60.4	48.1

表-4-(b) 水槽底の反射損失

	SL (dB-cm)	$2TL$ (dB)	EL (dB)	RL (dB)
kHz 100	154.8	36.7	86.4	31.7
200	161.9	44.6	84.3	33.0
400	150.4	40.6	69.3	40.5
	150.0	43.5	69.9	36.6
	150.2	43.5	70.5	36.2

SL, TL, EL は(7)式と同じ

表-5に透過損失の測定データを示す。

図-29に各周波数毎の反射損失、透過損失を示す。また参考までに水槽底の反射損失も併記した。この図から吸音材の反射損失は、100kHzで52.4dB、200kHzで52.9dB、400kHzで49.6dBであり、吸音材がない場合に比べて、100kHzで20.8dB、200kHzで22dB、400kHzで11.8dB反射損失が大きくなったことがわかった。

また透過損失については、100kHzで58.2dB、200

表-5 吸音材の透過損失

	SL (dB-cm)	TL (dB)	EL (dB)	ATL (dB)
kHz 100	154.7	31.8	64.6	58.3
200	165.4	31.6	102.7	31.1
	164.0	32.0	102.4	29.6
	154.2	31.9	64.3	58.0
400	148.8	30.8	73.2	44.8
	148.4	30.8	70.0	47.6

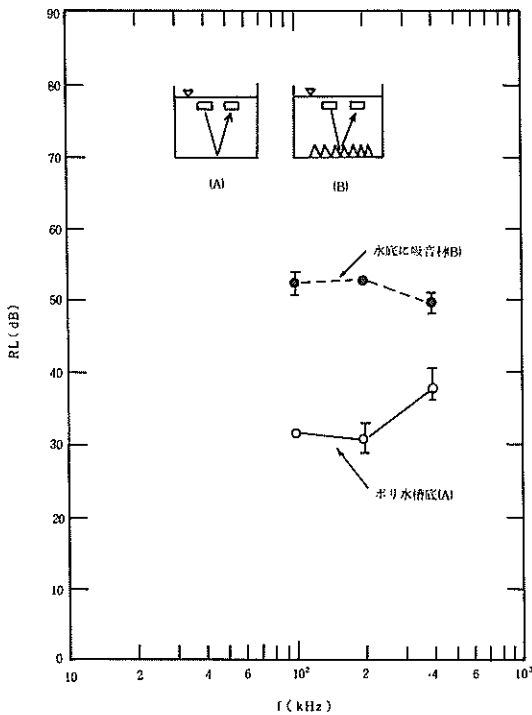


図-29-(a) 吸音材の音響特性(反射特性)

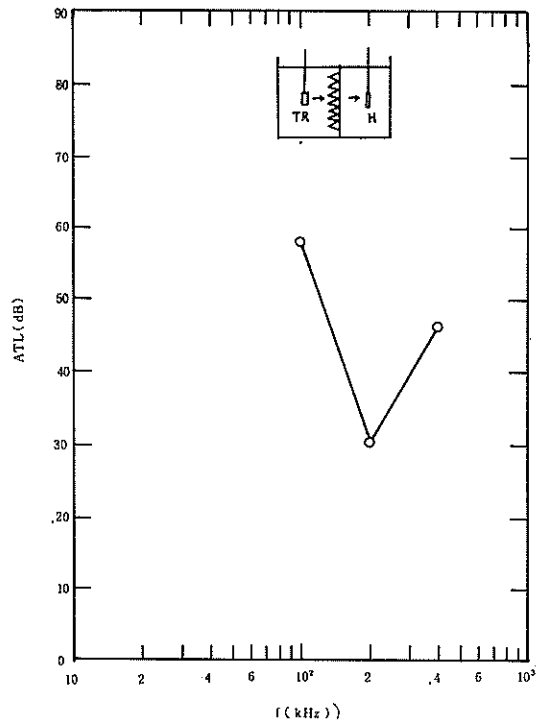


図-29-(b) 吸音材の音響特性(透過特性)

kHzで30.4dB, 400kHzで46.2dBの透過損失が求められ、吸音材は、100~400kHzについて吸音効果があることがわかった。

(2) 加圧水槽内吸音材超音波反射率測定実験

加圧水槽内に取付けた吸音材の音響特性を調べて今後の実験の基礎データとするため下記のような実験を行った。

a) 実験概要

加圧水槽内に吸音材を取り付け、水を充滿した後水中および吸音材に含有される微小気泡が消去した事を確認し、水槽内に送受波器を設置して、超音波パルスの直接波対反射波の比を求め音圧反射率を測定するとともに、トーンバースト波を用い水槽内の残響を写真撮影した。

b) 測定装置

本実験に使用した測定装置は下記のとおりである。

- i) 標準マイクロホン 1個
 - ii) 送波器(標準マイクロホンを使用) 1個
 - iii) 発振器(0.001Hz~5MHz) 1台
 - iv) 電力増幅器(10kHz~500kHz 55dB) 1台
 - v) 電圧増幅器(10Hz~1MHz 40dB) 1台
 - vi) シンクロスコープ(DC~50MHz) 1台
 - vii) 撮影装置(ポラロイドランドカメラ) 1台
- c) 測定要領
- i) 反射率測定

表-6 加圧水槽吸音材反射率測定

送受波器位置	周波数	反射率
A	100kHz	-16.5dB
B	100	-12.0
C	100	+2.7
D	100	-12.0
A	50kHz	-11.2dB
A	350	-16.5
A	500	-14.0

図-30に測定のためのブロック図を示す。Sは送波器で、Mは受波器である。送波器および受波器は被測定面(吸音材)からの反射波を分離しうる位置に置き、直接波と反射波との音圧比を求める。ここでは送波器Sを水槽中心におき、受波器を測定する対象面の方向に75cm離して設置した。図-31に送受波器の設置位置を水槽の平面図で示した。

ii) 残響測定

送受波器を加圧水槽の略々中央に置き、パルス幅500μsのトーンバースト波により残響の受信波形を測定した。

d) 測定結果

測定した結果を表-6にA, B, C, D方向にある吸音材の超音波周波数が100kHzのときの反射率を示す。

反射率Rは下記式で求めた。

$$R = 20 \log_{10} \frac{E_{RR}}{E_{RD}} \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

ここに E_{RD} : 直接波の受波レベル

E_{RR} : 反射波の受波レベル

またA方向における超音波周波数が50, 350, 500kHzのときの反射率も示した。この表でC方向の反射率が+になっているのは、水中テレビカメラが設置されていて吸音材が設置されていないためで反射率が異常に高くなったものと考えられる。A方向が反射率が小さく、B, D方向ともA方向よりも4.5dB大きくなっている。A方向における周波数特性は、50kHzが一番反射率が大きく、350kHzが50kHzよりも5.3dB小さいことがわかった。残響測定の結果は、残響ピークレベルが3.6mV、残響継続時間は、8msであった。

これらの測定結果から吸音材設置により-11.2dB~-16.5dBの反射率が得られ、吸音効果があることがわかった。指向性のある超音波を用いればもっと吸音効果が上るものと考えられる。

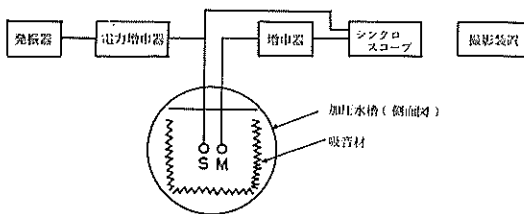


図-30 反射率測定ブロック図

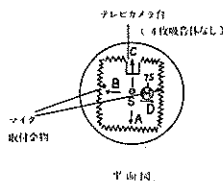


図-31 送受波器の設置位置

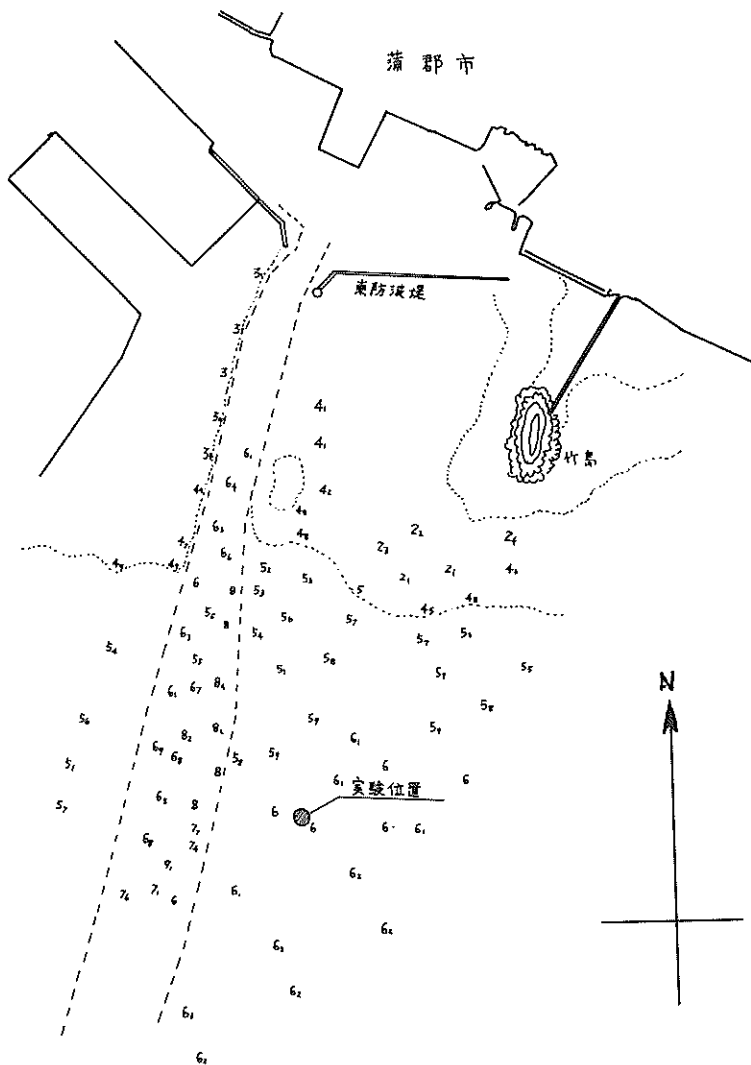


図-32-(a) 三河港現地実験海域平面図

6. 海底探査技術開発のための現地実験

軟泥層探査用や海底沈埋異常物探査用超音波装置開発のため海底探査実験水槽や加圧水槽を使用した室内実験を進める上での参考データを得ることを目的として、三河港および四日市港軟泥層海域において多周波超音波実験装置を用いて現地実験を行った。

6.1 実験概要

音波を用いた海底探査技術の開発を行うためには、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個所にしぼって実験を行った。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）の試作も行ったので、その実証実験も兼ねて行われた。

調査場所の選定には、土質が軟質土であり、比較的風波や潮流など海気象条件のよいことなどを考慮して、三河港蒲郡航路泊地および四日市港東防波堤付近の土質条件が既にわかっている軟泥層海域とした。

実験に使用した船は港湾工事用の監督測量船であり、

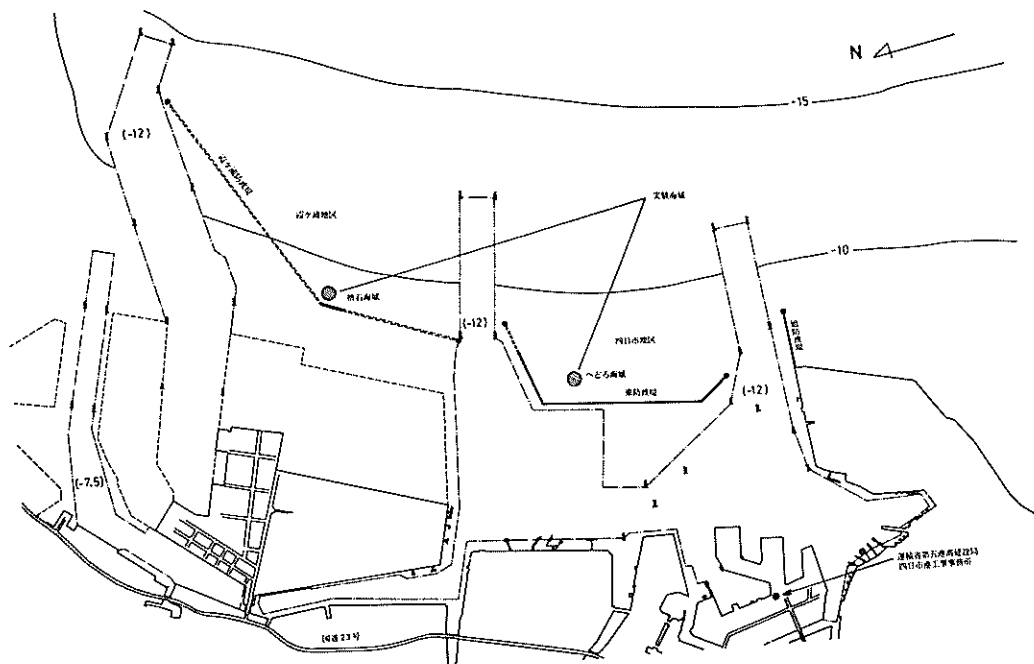


図-32-(b) 四日市港現地実験海域平面図

表-7 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。
	バッチェック	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
	ヒルドアップ特性	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 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

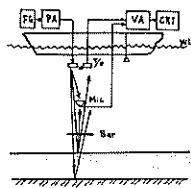


図-6-a) 音波探査実験

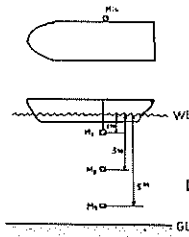


図-6-b) 海中雑音レベルの測定

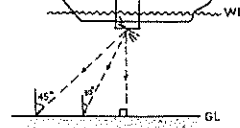


図-6-c) 超音波斜入射海底散乱強度の測定

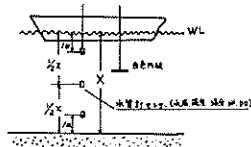


図-6-d) 海域環境条件の測定

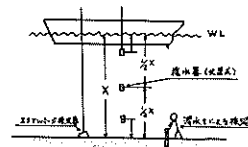


図-6-e) 採泥・採水要領

図-33 実験要領図

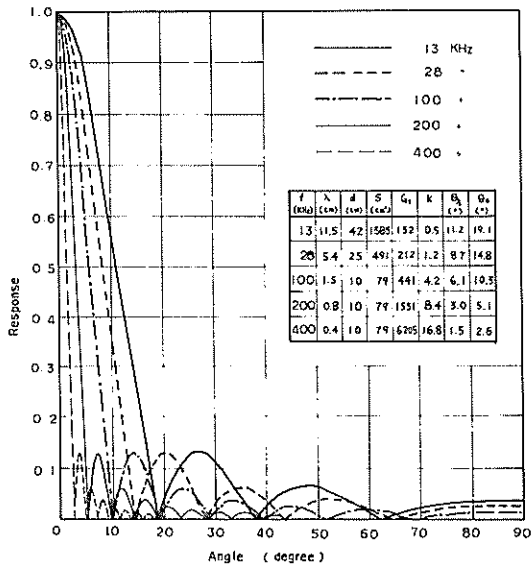


図-34 送受波器の理論指向性特性

超音波実験装置は、図-20に示すように周波数が13, 28, 100, 200, 400 kHzの5種類に切換えて発振でき、シンクロスコープで送受信波形を観測記録できるものである。

その他、パーチェック用の標準反射板、測深用の測鉛、水温、塩分など実験海域の環境条件を測定するための水質測定装置、海中雑音レベル測定用の水中音圧計、軟泥サンプル採取用の採泥器、採水器を用いた。

本実験での測定項目及び測定要領を表-7に示し、図

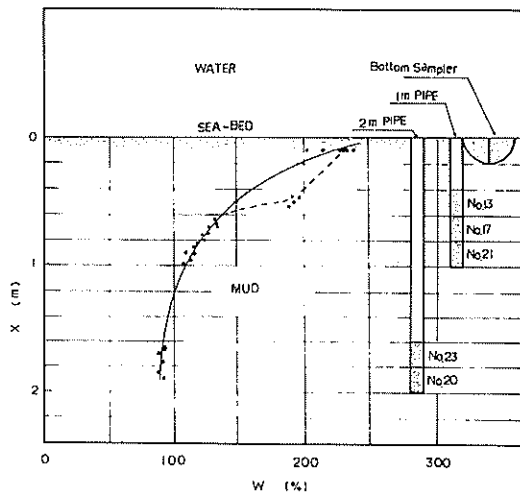


図-35 海底下の深度(x)と採取土の含水比(w)

-33に実験要領図を示す。音波探査実験では、13, 28 kHzのような低周波では、送波レベルの測定には、校正用マイクロホンを図のように吊り下げ、オシロスコープの波形振幅を読みとって求めた。100 kHz以上の高周波では、送受波器の感度積から送波レベルを求めた。

本実験に使用した送受波器の特性を図-34に示す。

また泥層中の超音波減衰定数の測定には、予備室内実験(P27)で使用した400 kHzの送受波器を対向させたものを潜水夫に持たせ、泥層中に沈下させることによって各深度ごとの減衰定数を測定した。

6.2 実験結果

図-35は採泥器を用いて潜水夫が採泥した軟泥サンプルを室内分析した結果の一例である。

図-36に三河港及び四日市港採取土の粒度試験結果を示す。この図によれば、三河港では各深度ごとの平均粒径(50%粒径)が9~20 μ mの範囲にばらついているが、四日市港では各深度とも10 μ mではほぼ均一粒径であることがわかる。

海底反射損失 RL (dB) は、海底が平滑な反射面と考えた場合の超音波反射によってエコーが生じるものとして解析した。

すなわち、

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

$$= 20 \log P_s - 20 \log 2x - 20 \log P_R \text{ (dB)}$$

(10)

マイク使用の場合は、

$$RL = 20 \log P_s - 20 \log (2x - x_0) - 20 \log P_R \quad (11)$$

ここに SL : 送波音圧レベル (dB)

TL : 伝搬損失 (dB)

EL : 反射音圧レベル (dB)

P_s : 送波音圧 (μP_s at 1m)

P_R : 受波音圧 (μP_s)

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)

(10), (11)式によって反射損失を求めた結果を図-37に示す。

次にエコーのパルス幅の延伸が垂直方向の分解能にいかに関与を及ぼすかを究明するために軟弱な海底地盤に超音波を入射した場合、エコーのパルス幅がどのように変化するかを各周波ごとに調べてみた。一般にエコーのパルス幅 τ_e は次式で示される。

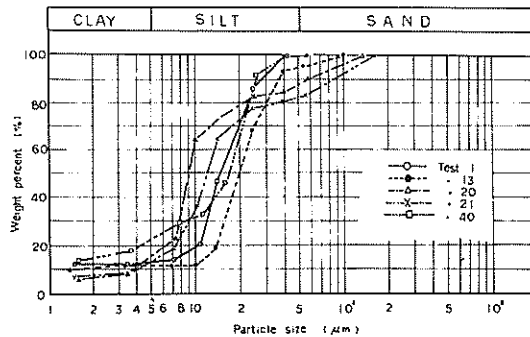


図-36-(a) 三河港(蒲郡地区)採取土の粒度試験結果

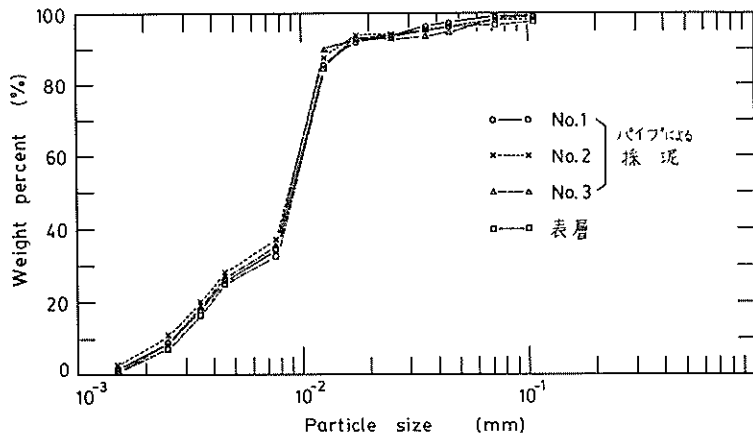


図-36-(b) 四日市港採取土の粒度試験結果

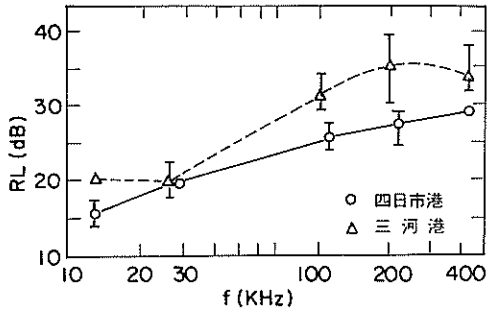


図-37 軟泥の反射損失

$$\tau_e = \tau_0 + \Delta t + \tau_B \quad (12)$$

ここに、 τ_0 : 送信パルス幅 (μs)
 Δt : 指向幅による延伸 (μs , 指向角からの計算値)
 τ_B : 海底残響による延伸 (μs)

実験の結果を、図-38 に示す。これらから周波数が低くなるほど海底残響によるパルス幅の延伸が大きくなるのがわかる。

表層 0.5 m までの軟泥中の超音波減衰定数 α_s を、400 kHz 送受波器を一定間隔に対向させ海水水中の伝搬の受波器出力を基準として両測定値の比をとることによって測定した。その結果、400 kHz で平均 150 dB/m であり、

α_s を周波数 f (kHz) の関数で表わせば、 $\alpha_s = 0.375 f$ で Hamilton⁹⁾ のデータ α_s (dB/m) = (0.04~0.6) f kHz = 16~240 (dB/m) の範囲にはほぼ収まっている。(表-8)

図-39 に、Hamilton の堆積層における超音波減衰定数の周波数特性を示す。矢印が本実験による測定結果である。

次に、一般型の円形振動子を用いた送受波器と新型のダイシング型送受波器⁷⁾ とのパルス立上り特性の比較実験を行った結果、表-7 のとおりとなり、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方が、他のものに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。

海底下の地層や海底下に沈埋している物体等を探索する超音波探査装置の開発に必要な海中雑音レベルを水中音圧計を使用して、三河港、四日市港の海底がへどろ及び捨石の海域において測定した。使用した水中音圧計 (沖電気製, SW-1007) の主要目は次のとおりである。

- (1) 周波数範囲: 10Hz ~ 50 kHz
- (2) 測定音圧範囲: 0 ~ 80 dB (0 dB re 1 μ bar)

測定した結果を、図-40 及び表-9 に示す。これらの図表から各海域とも海面より 1 m 付近に送受波器を吊下して、超音波探査を行う場合、1 kHz 以上の超音波を使用する場合には最大 144 dB (0 dB = 1 μP_a) の受波音圧が必要となるのがわかる。図-41 に、船舶のエンジン運転中の水中雑音からエンジン停止中の暗雑音を引いた、

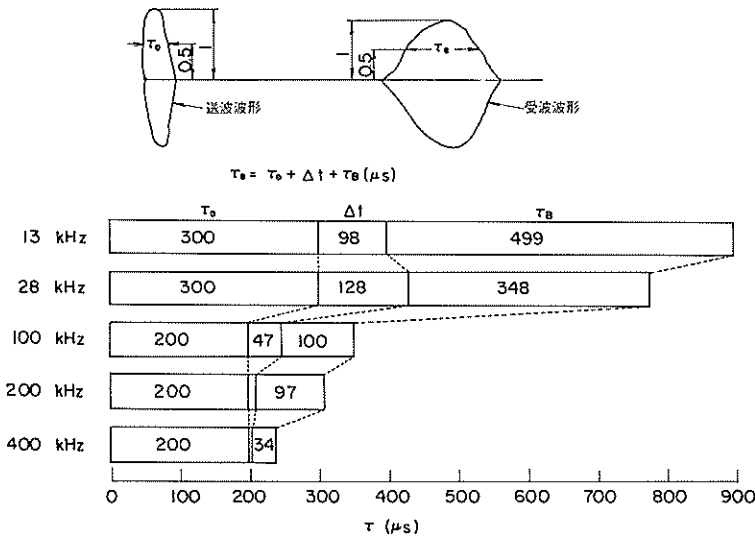


図-38 エコーパルス幅の延伸

表-8 軟泥層超音波減衰定数測定結果

	深 度 (m) (へどろ面から)	受信電圧 E_m (V)	E_m/E_w	$20 \log V_m/V_w$ (dB)	α (dB/m)
第一回	10.0	3.30	0.1082	-19.32	128.80
	28.0	2.40	0.0787	-22.08	147.21
	32.9	2.50	0.0820	-21.73	144.85
	平均	2.733			140.29
第二回	10.0	3.10	0.1016	-19.86	132.39
	30.0	2.30	0.0754	-22.45	149.68
	42.9	2.35	0.0771	-22.26	148.43
	平均	2.583			143.50
第三回	10.0	1.90	0.0623	-24.11	160.74
	30.0	1.85	0.0607	-24.34	162.28
	28.9	1.65	0.0541	-25.34	168.91
	平均	1.800			163.98
第四回	10.0	3.20	0.1049	-19.58	130.53
	30.0	2.40	0.0787	-22.08	147.21
	35.9	1.15	0.0377	-28.47	189.81
	平均	2.250			155.85
第五回	10.0	3.40	0.1115	-19.06	127.04
	30.0	2.10	0.0689	-23.24	154.94
	33.9	2.00	0.0656	-23.67	157.77
	平均	2.500			146.58
総平均		2.373			150.04

$f = 430 \text{ kHz}$

送受波器間隔 $d = 15 \text{ cm}$

海水送信電圧 $E_s = 305 \text{ V}$

海水受信電圧 $E_w = 30.5 \text{ V}$

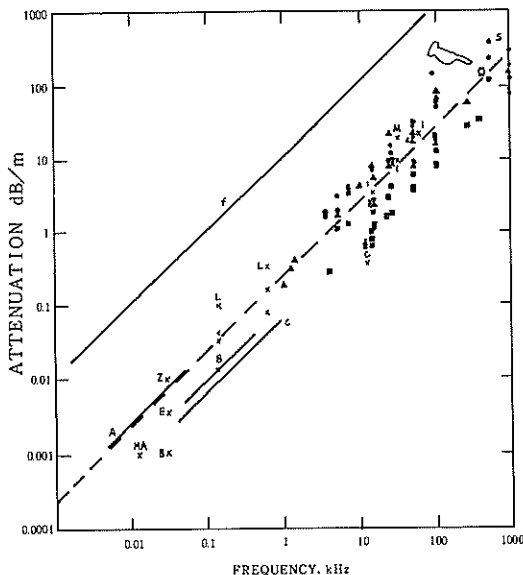


図-39 堆積層における超音波減衰定数の周波数特性

自己雑音レベルの各深度ごとの値を示す。この図から海底土質がへどろの場合は海面付近がレベルが高く、海底付近が低くなっているが、海底が捨石の場合は、海面、海底付近ともほとんど同じレベルであるが、中間は低くなっていることがわかる。これは、へどろは音波を吸収し易く、捨石は逆に音波を吸収しにくく散乱波を放射しているため、海底付近の雑音レベルが高くなったものと推測される。

図-42は、水中雑音波形をシグナルアナライザ(岩崎通信機製、SM-2100)(写真-19)で波形解析を行い、X-Yプロットで記録したものである。解析した波形は海面から1m、中間、海底付近で、それぞれ測量船のエンジン停止時、エンジン運転時の水中雑音で、海底がへどろ及び捨石海域で得られたデータである。図は原波形とスペクトラムで表示した。このスペクトラム表示図をみると、海面付近の卓越周波数は、へどろ海域暗雑音50Hz、暗雑音+自己雑音でも50Hzである。捨石海域では暗雑音100Hz、自己雑音に加わると30Hzがピークと

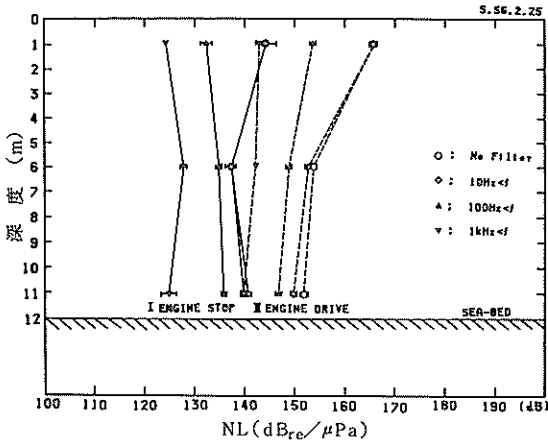


図-40 (a) 海中雑音レベルの深度分布
(四日市港へどろ海域)

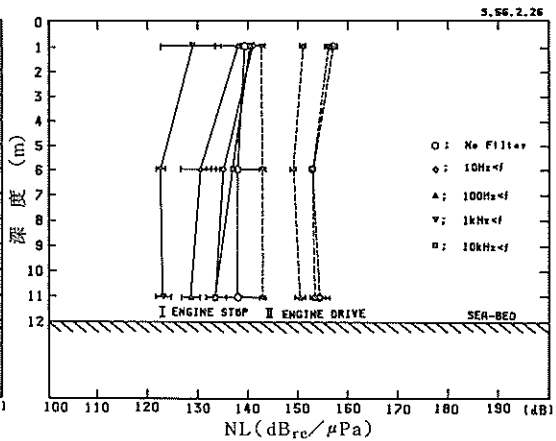


図-40 (b) 海中雑音レベルの深度分布
(四日市港捨石海域)

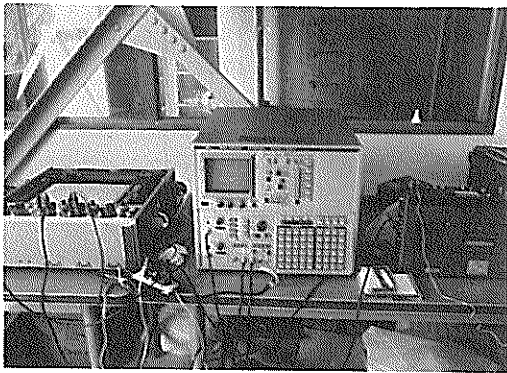


写真-19 水中雑音の波形解析

なっている。海底付近では、へどろ海域で暗雑音、自己雑音に加わった状態でも100Hzがピークである。捨石海域では、暗雑音は50Hz、自己雑音に加わった状態でも80Hzがピークとなっている。

次に、音波探査現地実験の結果を検討する。

図-43に深度ごとの海底土の含水比、土質柱状図、音測の記録深度を示す。海底土の性状は、三河港で表層0.5mまで沈泥、それ以降は粘土質シルト層であり、四日市港では、表層0.2mまで沈泥、それ以降4mまで粘土質シルト層で、その下は砂層である。粒度組成から四日市港の方が複雑な地層を形成していることがわかる。表層における超音波の反射損失は、比較的含水比の小さい締まった状態の軟泥である四日市港の方が反射損失が小さいことがわかる。また軟泥中の超音波の反射位置を音測機の記録から求めてみると、図-43に示すように、両港とも400, 200kHzで表層を、28, 13kHzで沈泥の下面を記録しており、高低周波の記録差で沈泥の厚さを

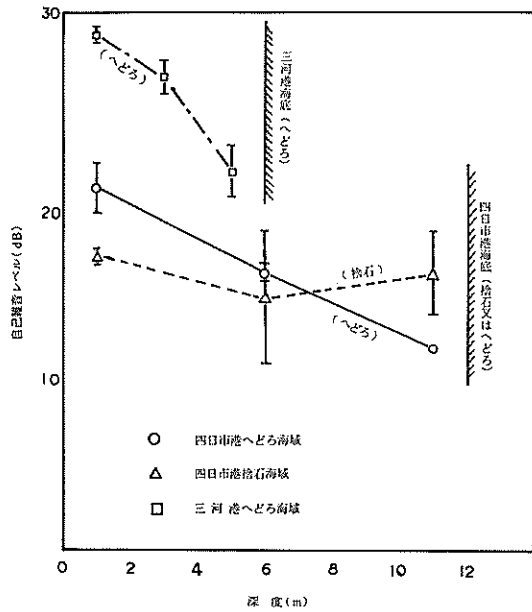


図-41 海底土質と自己雑音レベル

計測できる。また四日市港では、13, 28kHzで地層を記録している。

7. まとめ

本実験装置の設計にあたって最も苦心した事項について各実験装置についてとりまとめてみる。

海底探査実験水槽では、開発すべき大水深施工検査、海底探査技術が、捨石均し面等施工面検測技術、機雷等海底沈埋異常物探査技術、施工管理用水中監視技術等、超音波を利用した水中検測探査技術が多岐にわたるため、

表-9-(a) 海中雑音レベルの測定値(へどろ海域)

S.56.2.25

深度	フィルター	① 周囲雑音レベル (dB) (エンジン停止時の暗雑音)	② 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と②のレベルの差 (dB)
1 m	フィルターなし	142.3 ~ 146.3	165.3 ~ 166.3	23 ~ 20
	10 Hz以上	142.3 ~ 146.3	165.3 ~ 166.3	23 ~ 20
	100Hz以上	131.3 ~ 133.3	153.3 ~ 154.3	22 ~ 21
	1 kHz以上	124.3 ~ 124.3	142.3 ~ 143.3	18 ~ 19
6 m	フィルターなし	136.3 ~ 138.3	153.3 ~ 154.3	17 ~ 16
	10 Hz以上	136.3 ~ 138.3	152.3 ~ 154.3	16 ~ 16
	100Hz以上	134.3 ~ 135.3	148.3 ~ 149.3	14 ~ 14
	1 kHz以上	127.3 ~ 128.3	142.3 ~ 142.3	15 ~ 14
11 m	フィルターなし	139.3 ~ 140.3	151.3 ~ 152.3	12 ~ 12
	10 Hz以上	140.3 ~ 141.3	149.3 ~ 150.3	9 ~ 9
	100Hz以上	135.3 ~ 136.3	146.3 ~ 147.3	11 ~ 11
	1 kHz以上	123.3 ~ 126.3	139.3 ~ 140.3	16 ~ 14

表-9-(b) 海中雑音レベルの測定値(捨石海域)

S.56.2.26

深度	フィルター	① 周囲雑音レベル (dB) (エンジン停止時の暗雑音)	② 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と②のレベルの差 (dB)
1 m	フィルターなし	138.3 ~ 140.3	156.3 ~ 157.3	18 ~ 17
	10 Hz以上	139.3 ~ 142.3	155.3 ~ 156.8	16 ~ 14.5
	100Hz以上	133.3 ~ 142.3	150.3 ~ 151.3	17 ~ 9
	1 kHz以上	123.3 ~ 134.3	141.8 ~ 143.3	18 ~ 9
	10kHz以下	137.3 ~ 141.3	155.3 ~ 157.3	18 ~ 16
6 m	フィルターなし	133.3 ~ 142.3	152.3 ~ 153.3	19 ~ 11
	10 Hz以上	132.3 ~ 137.3	152.3 ~ 153.3	20 ~ 16
	100Hz以上	126.3 ~ 134.3	148.3 ~ 149.3	22 ~ 15
	1 kHz以上	121.3 ~ 123.3	142.3 ~ 143.3	21 ~ 20
	10kHz以下	131.3 ~ 142.3	152.3 ~ 153.3	21 ~ 11
11 m	フィルターなし	133.3 ~ 142.3	152.3 ~ 156.3	19 ~ 14
	10 Hz以上	131.3 ~ 135.3	153.3 ~ 155.3	22 ~ 20
	100Hz以上	126.3 ~ 130.3	149.3 ~ 151.3	23 ~ 21
	1 kHz以上	121.3 ~ 124.3	142.3 ~ 143.3	21 ~ 19
	10kHz以下	130.3 ~ 136.3	152.3 ~ 154.3	22 ~ 18

多目的に使用できる水槽を計画することであった。そのため、実験に便利かつ経済性を考慮して、形状を直立円筒形とし、海底模型や対象物の形状寸法を考慮して最小限の諸元を備えている。付属設備として濁水中の超音波特性を検討するのに必要な、泥水攪拌装置を備え、光学式水中テレビのテストに使用できるよう照明装置をつけている。その他、水中超音波特性の測定には、水に含まれている気泡は有害である。そこで水槽に供給する水道

水の脱気処理方法を検討する必要が生じた。国内の研究機関で使用されている脱気処理装置を調査した結果、加熱法と減圧法があるがいずれも小規模のもので、当所的大型水槽には不適當であった。そのため、その中で比較的処理能力の大きい減圧法を用いた脱気処理装置の大型のものを製作することにした。この装置の設計で苦心したことは、脱気した水を吸気せずに水槽内に供給する方法であった。これはマグネットポンプを使用して、水槽

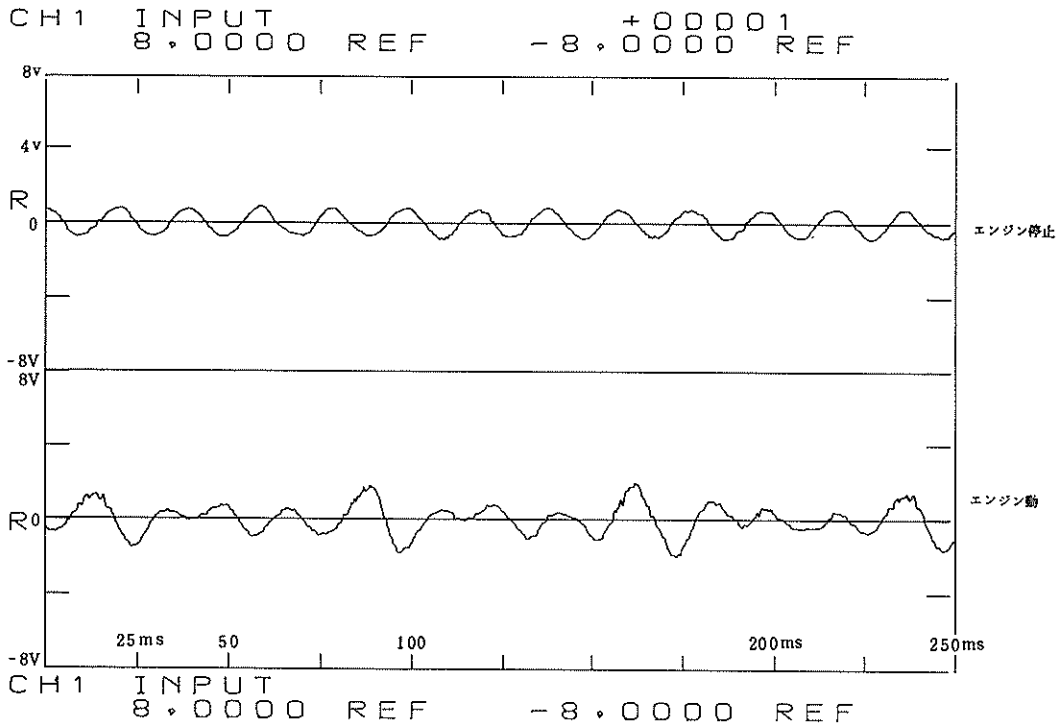


図-42-(a) へどろ海域の海中雑音(海面から1m)

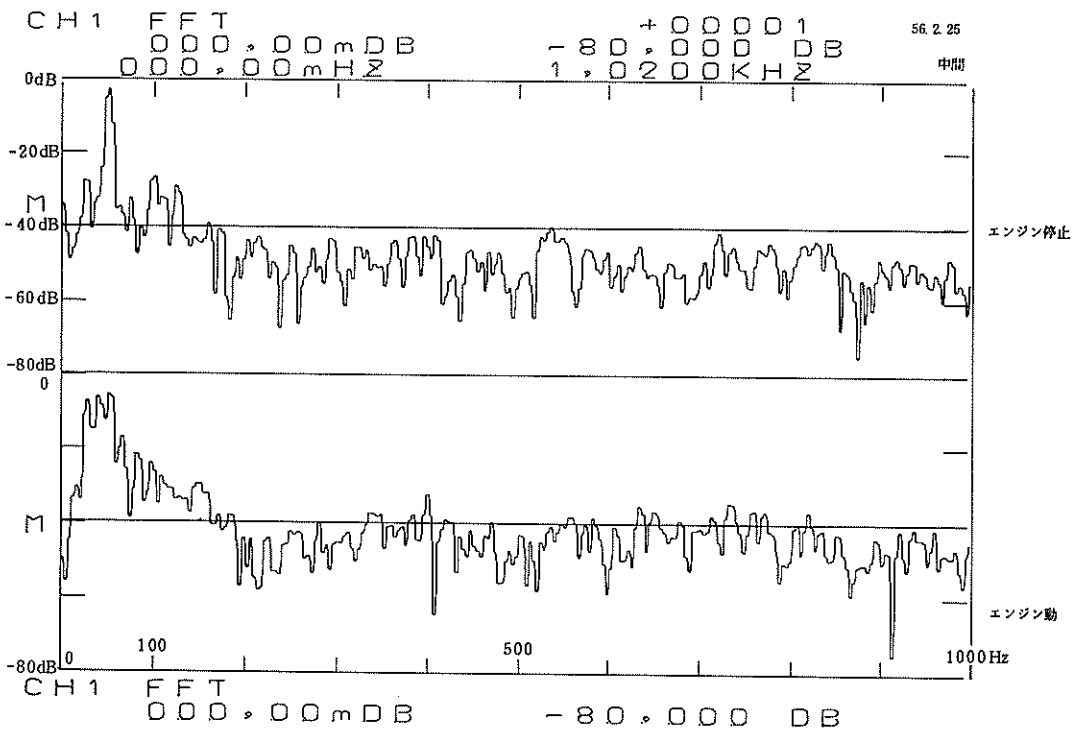


図-42-(b) へどろ海域の海中雑音スペクトラム(海面から1m)

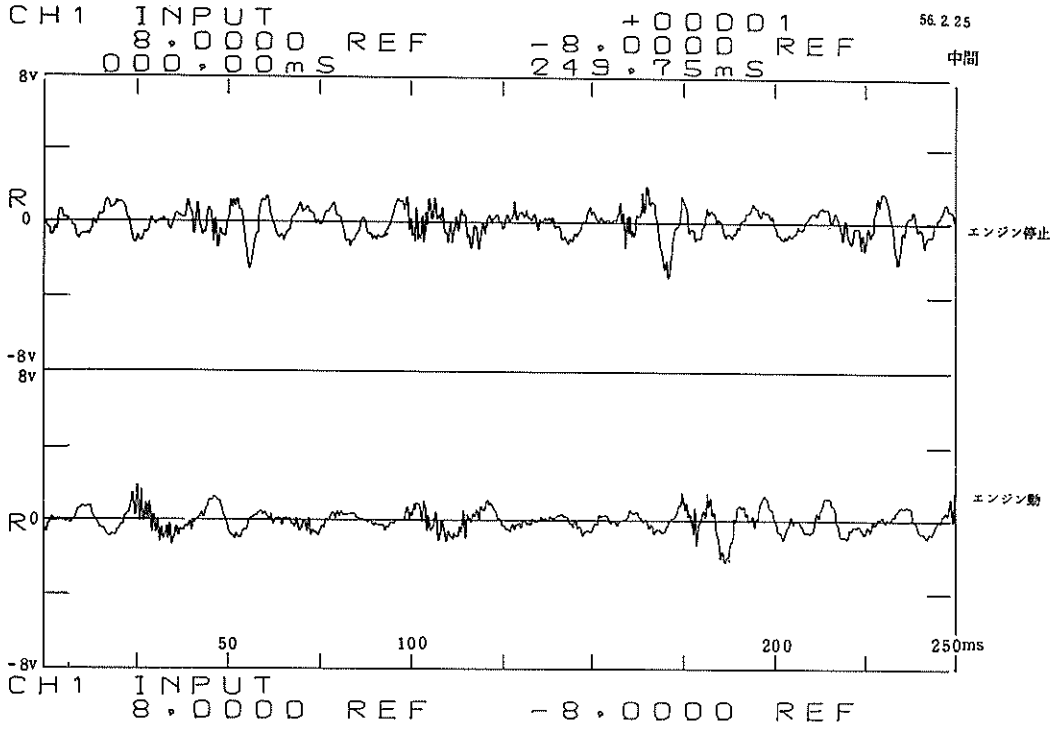


図-42-(c) へどろ海域の海中雑音(中間)

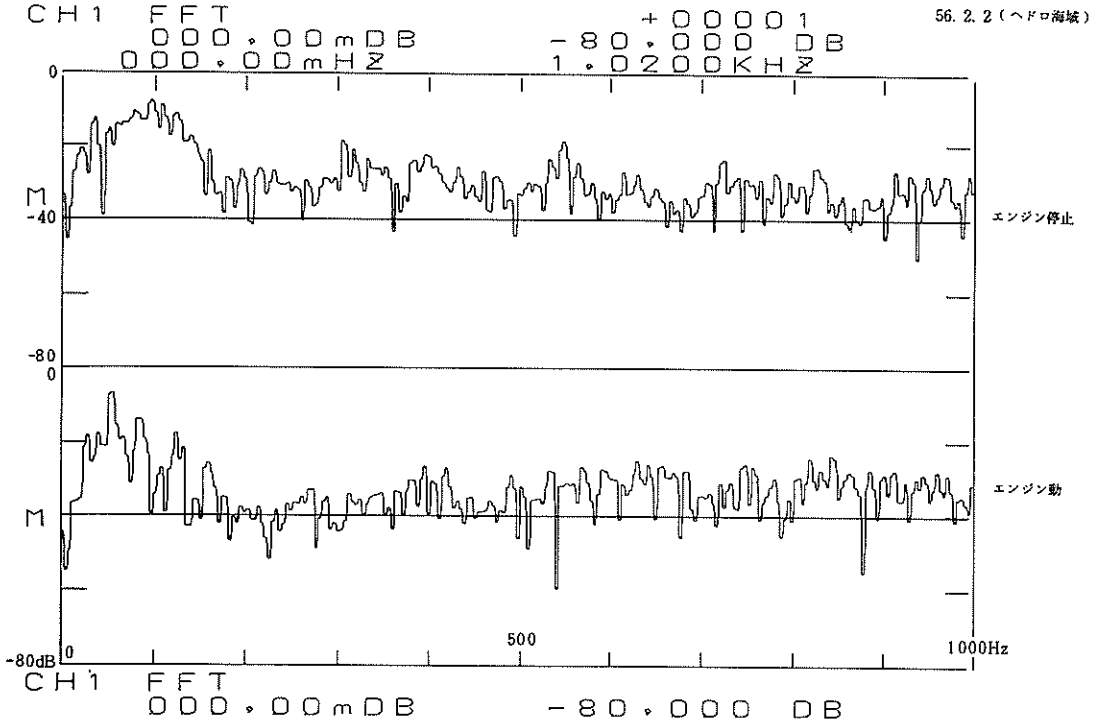


図-42-(d) へどろ海域の海中雑音スペクトラム(中間)

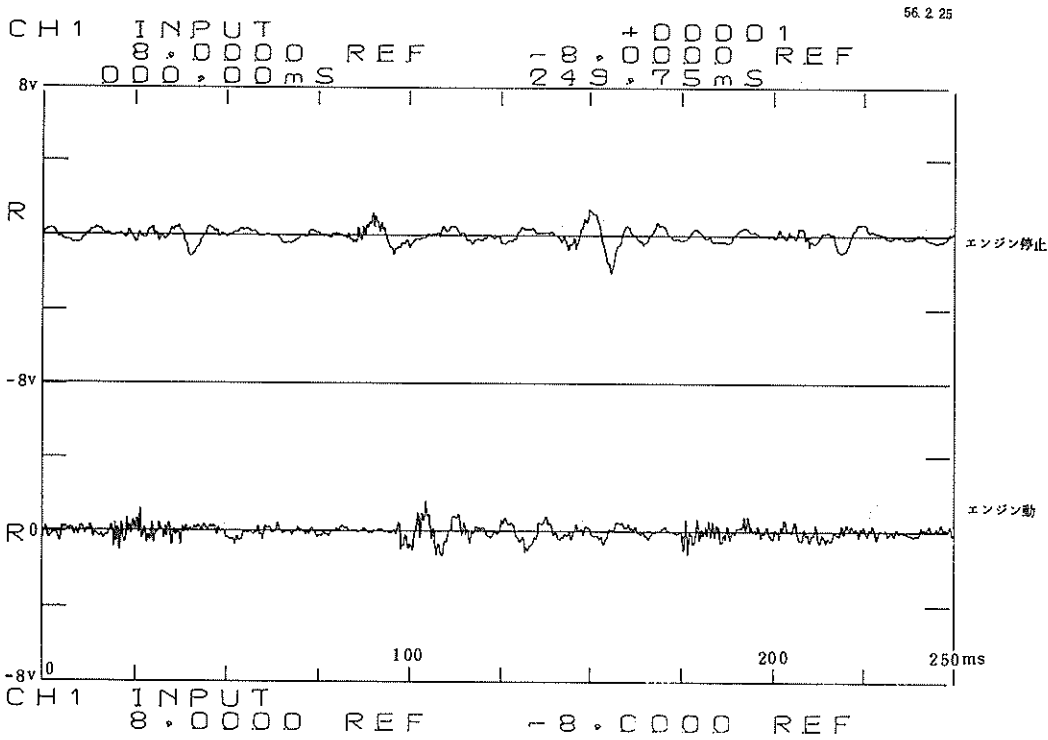


図-42-(e) へどろ海域の海中雑音(海底)

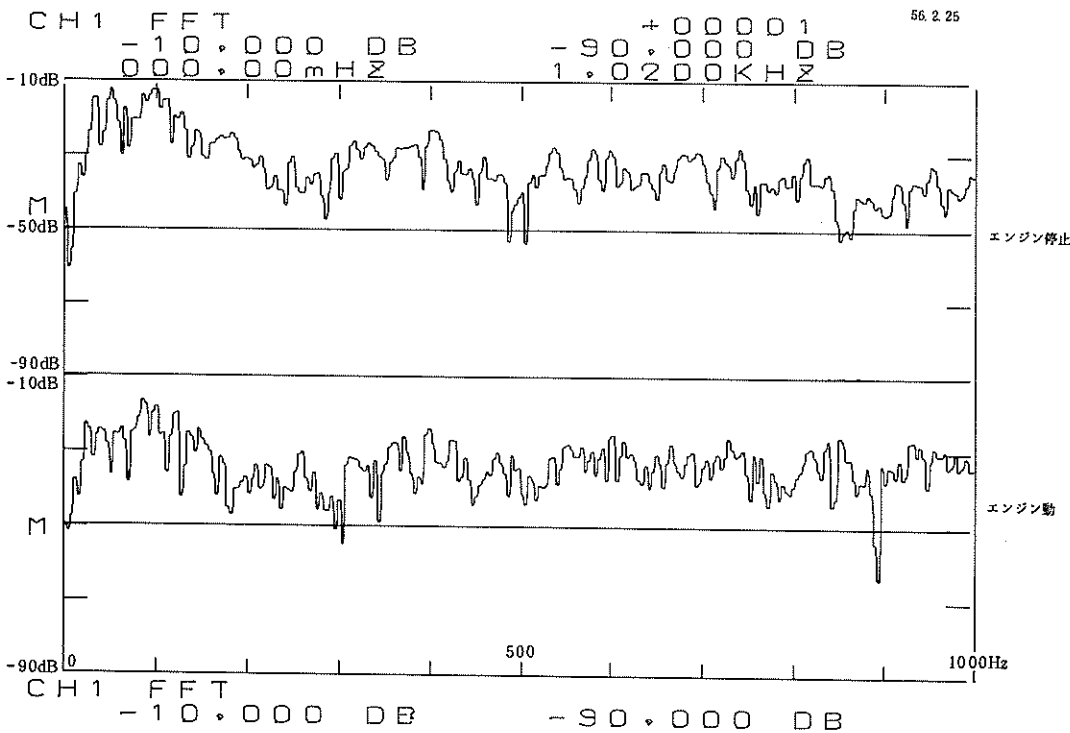


図-42-(f) へどろ海域の海中雑音スペクトラム(海底)

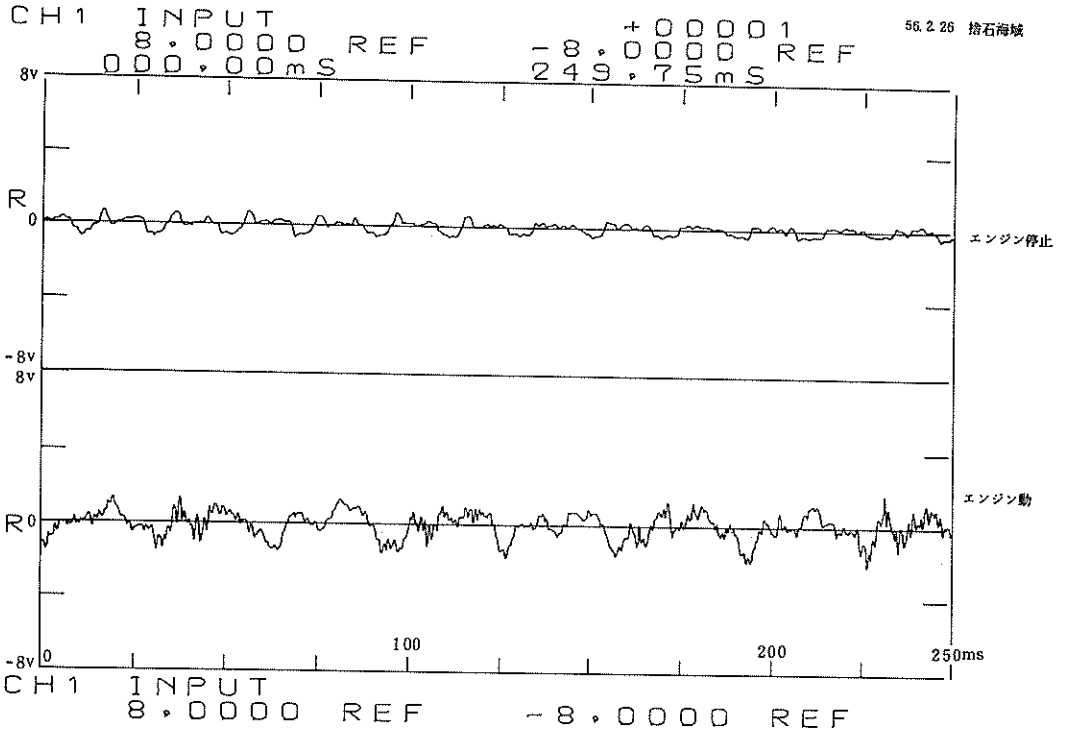


図-42-(g) 捨石海域の海中雑音(海面から1m)

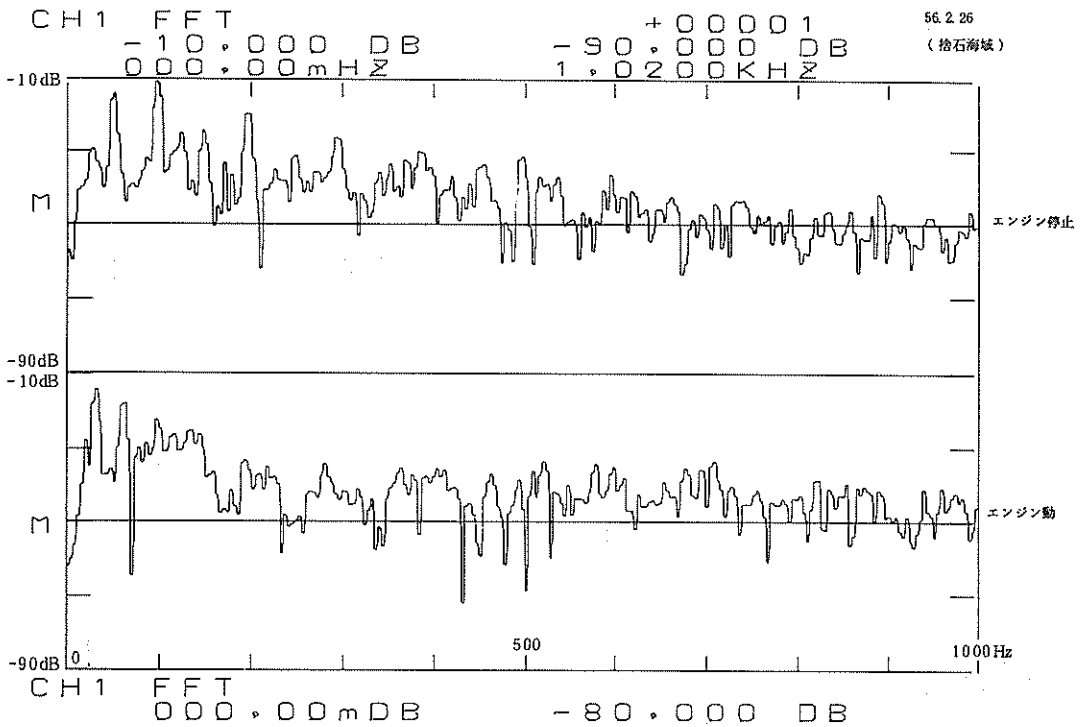


図-42-(h) 捨石海域の海中雑音スペクトラム(海面から1m)

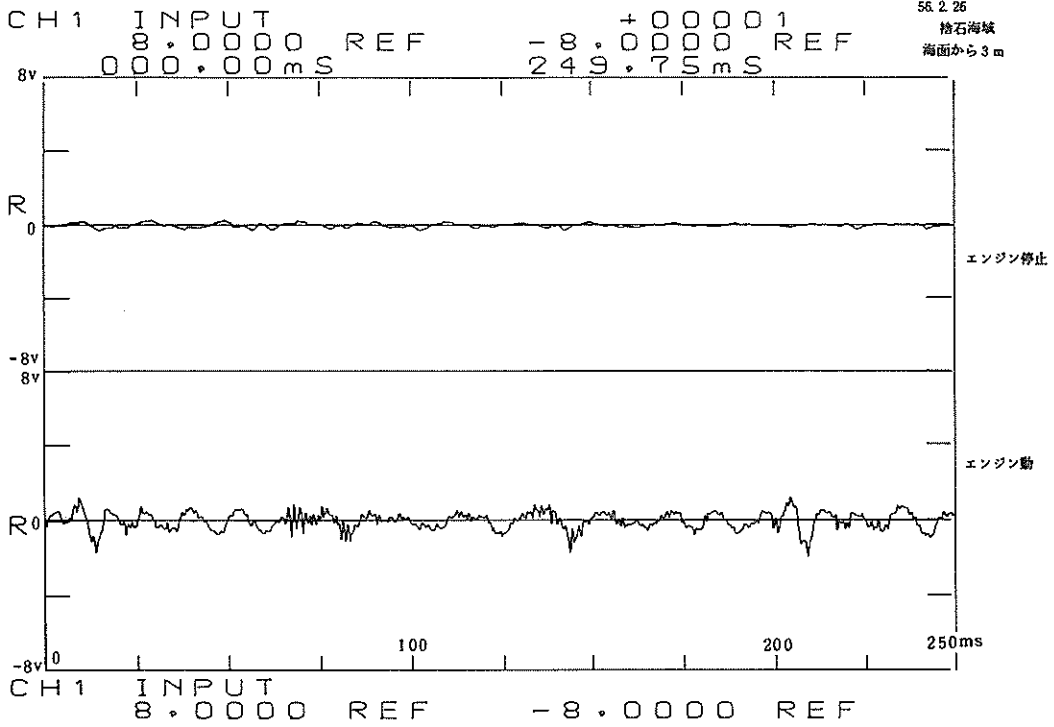


図-42-(i) 捨石海域の海中雑音(中間)

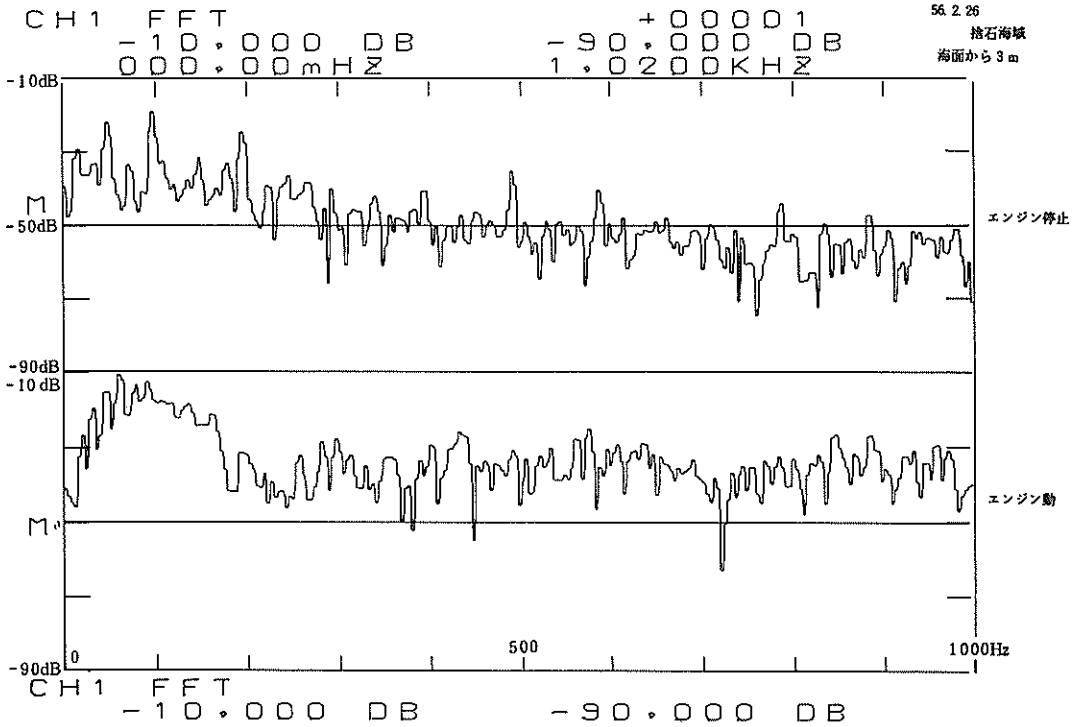


図-42-(j) 捨石海域の海中雑音スペクトラム(中間)

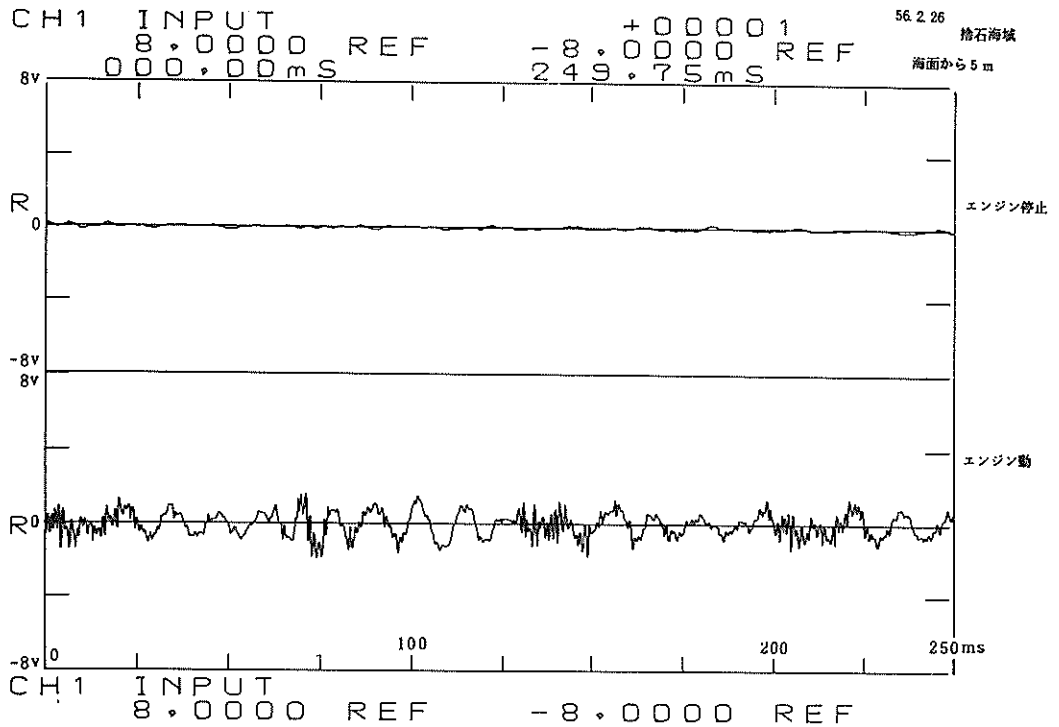


図-42-(k) 捨石海域の海中雑音(海底)

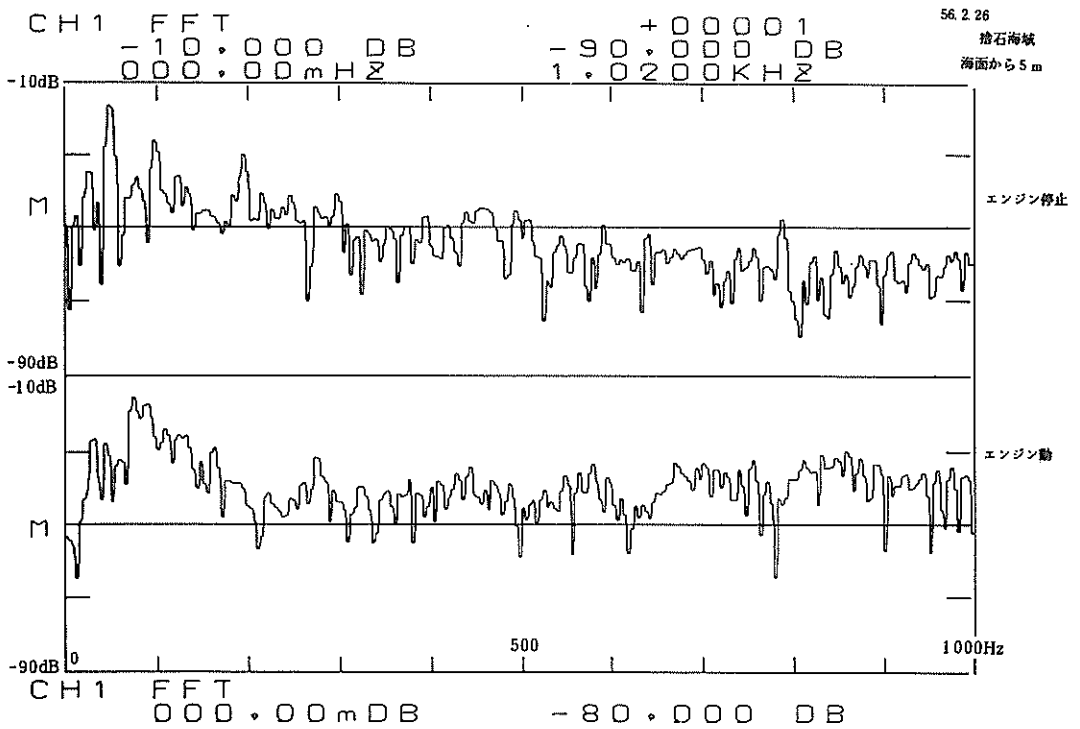


図-42-(l) 捨石海域の海中雑音スペクトラム(海底)

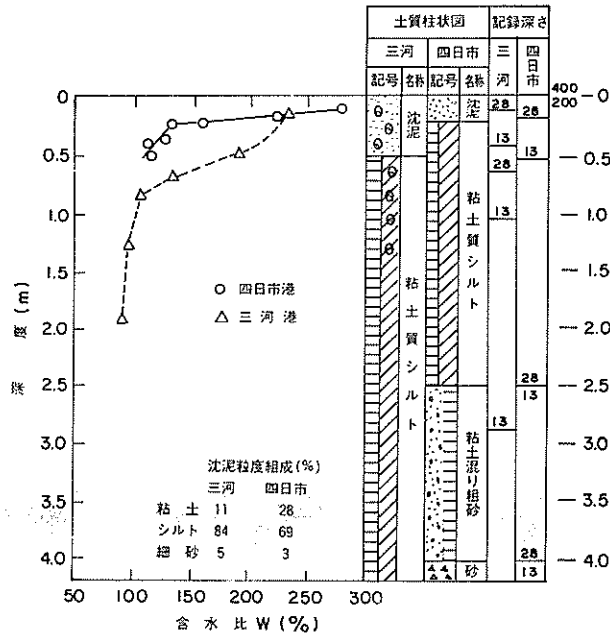


図-43 海底土の性状と記録深度

底から給水することで解決した。また、水槽内の残響は超音波計測に影響を生ずる。そこで水槽内壁に吸音材を取付けて超音波を反射させないようにする必要があった。内外の試験研究機関で使用されている吸音材の材質を調査した結果、ゴム製のくさび形吸音材が吸音特性及び価格の面から有利なため、この吸音材を採用することにした。

加圧水槽では、直径が4 mの球形の圧力容器を用いた無響加圧水槽は、内外ともに珍らしく、設計に苦心した。送受波超音波の加圧濁水中の挙動特性を調べるため、水槽中心部に水平スライド方式の送受波器移動装置を備え、水槽上部のマンホールからワイヤー操作により、水を抜かなくても水平移動できるようにした。また吸音材の取付けには、球面壁に取付け困難なので、多面体の枠に取付ける方法を用いた。その他、加圧濁水中の水槽内の挙動を監視制御するための装置も工夫して取付けている。なお、供試送受波器のケーブルを水槽外に取出す方式として、水槽壁にフランジを取付け、そのフランジにケーブル着脱可能となるようにした。

次に、室内予備実験、現地実験についてとりまとめる。まず小型水槽を用いた室内予備実験の中、送受波器の指向特性実験では、実験値と計算値とほぼ一致し、計算値でもおおよその超音波ビームの形状を推定できることがわかった。このことは超音波パルス反射法を用いて、海

底施工面の探査を行う場合、計算値で超音波ビームの形状を把握でき、実験を進めていくのに有効なことである。各種底質の超音波特性実験では、各種土質の超音波反射損失や伝搬損失の測定の結果、碎石が超音波を反射しやすく、かつ透過しやすい。砂は反射しにくく、玉石は透過しにくいこと、砂利は中間の特性があることがわかった。また砂利、碎石及びフライアッシュ懸濁液の伝搬損失の周波数特性を求めると、周波数依存性のあることがわかった。各底質における超音波の伝搬速度は各底質ともデータに非常にばらつきが大きく、底質の含水比、間隙率及び空気含有量に依存していると考えられる、これらの成果は今後海底探査実験水槽を用いた超音波による海底探査実験における、海底土質の模型作成や探査データの解析に有効な参考資料となる。吸音材の吸音特性実験では、海底探査実験水槽や加圧水槽の内壁に取付けているゴム製くさび形吸音材の超音波反射損失、透過損失を測定した結果、100～400 kHzの範囲内で吸音効果があることがわかり、実験水槽を用いた超音波計測の精度の向上に資することができる。

現地実験では、三河港、四日市港の軟泥層海底における超音波探査実験で、反射、伝搬特性の周波数依存性を確かめた。また超音波エコーのパルス幅の周波数依存性を求めた結果、低周波ほど海底残響の影響で長くなることがわかった。また、パルス立上り特性がよく測深精度

のよい新方式のダイシング型送受波器を軟泥層海底の探査に使用してみると従来の送受波器に比較して立上り特性がよく、精密測深に有効であることがわかった。超音波探査装置の開発に必要な海中雑音レベルを三河港、四日市港のへどろ及び捨石海底で測定した結果、1 kHz以上の超音波を使用する場合の受波音圧レベルのしきい値が推定できた。また船舶から放射する自己雑音レベルは海底がへどろの場合は海面の方が海底付近よりレベルが高くなっているが、海底が捨石の場合は、海面、海底付近ともレベルが高く、中間が低くなっていることがわかった。これらのデータは、海中超音波機器を設計する際の参考データとなる。なお、軟泥層音波探査の測深記録によると、高い周波数で軟泥表面を、低い周波数で軟泥下面を記録しており、多周波音波で軟泥層の厚さを計測できることが確認された。しかし、比較的薄い軟泥層を低い周波数で探知できないので、パルス幅の短い、狭ビーム超音波を発生しうる高分解能送受波器を開発する必要がある。

8. あとがき

大水深における施工検査及び海底探査技術の開発研究に使用する大水深海底探査実験装置の設計概要と開発研究を進める上での参考データとするための予備実験について述べた。当所としては、大水深水中音響測定用の大型実験水槽や加圧水槽の整備は初めてのことである。この種の水槽として我が国では海洋科学技術センターと防衛庁技術研究本部第五研究所にあるが、いずれもへどろの堆積、にごり等港湾工事が行われる海況を再現することができない。したがって港湾用超音波測定用水槽としては、我が国唯一のものといっても過言ではない。

大水深下水中超音波検測探査技術の開発を図るには、大水深下濁水中での水中超音波の挙動の解明、海底情報の映像化など多くの解決すべき課題が山積している。これらの課題の解決には、この大水深海底探査実験装置は必要不可欠なものであり、開発研究のための実験にとって大いに利用価値のあるものと考えられる。また実用化にあたっては、模型実験結果と現場の挙動との対比など、色々な面で今後も現場の温かい理解と協力をお願いする次第である。

(1983年6月30日受付)

謝 辞

本装置の計画・設計に当って、東京工業大学精密工学研究所、防衛庁技術研究本部第五研究所、海洋科学技術センターから、多くの情報提供並びに助言を載いている。

また本装置完成にあたり事務担当各位の協力を得た。

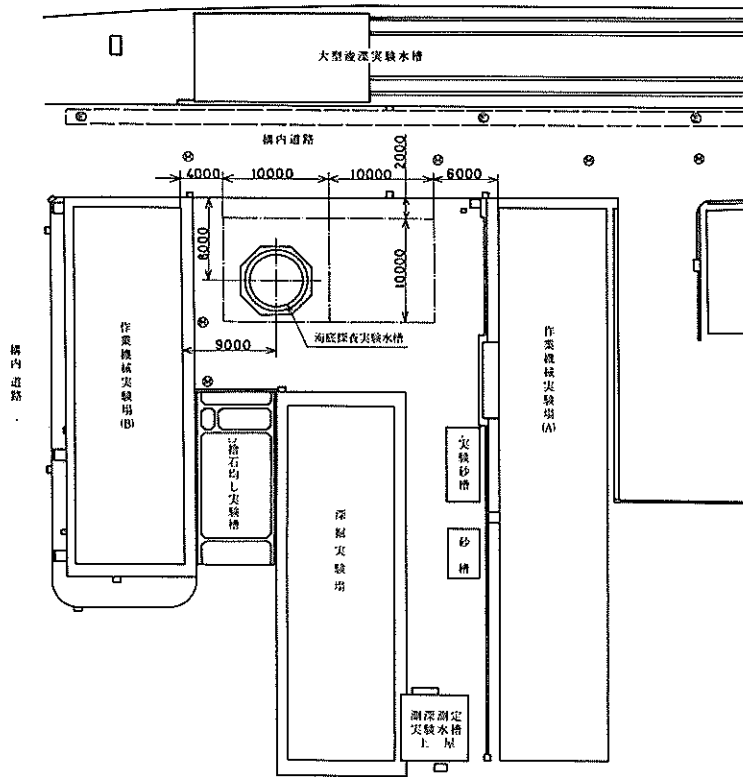
現地実験に際しては、第五港湾建設局機械課、衣浦港工事事務所、四日市港工事事務所の協力をいただいた。なお実験装置細部設計にあたり、機材部各位の助言を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

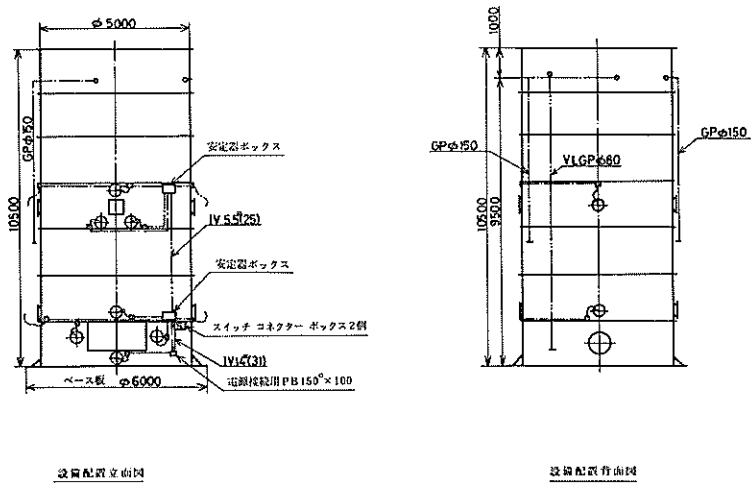
- 1) 実吉純一ほか：超音波技術便覧，日刊工業新聞社 昭和53年新訂版
- 2) 伊藤豊ほか：気孔入り吸音ゴムの吸音特性，日本音響学会講演論文集，昭和40年10月
- 3) 実吉純一・奥島基良：実験水槽内の気泡発生による超音波の減衰異常とその防止法，日本音響学会誌第14巻4号 1958年，p.310.
- 4) 木原純孝：超音波による海底探査技術の開発について，昭和57年度港湾技術研究所講演会講演集，1982年12月.
- 5) R. J. ユーリック，土屋明訳：水中音響の原理，共立出版KK，1978年.
- 6) 奥島基良：探触子の横方向分解能，超音波医学第2巻第3号，1975年.
- 7) 木原純孝・白井一洋・松本茂・村上幸敏：音波探査現地実験報告，—三河港における軟泥層探査実験—，港湾技術資料No 359，1980年，p.40.
- 8) 木原純孝・早乙女保二：海底軟泥層における音波探査実験，日本音響学会講演論文集，1982年3月.
- 9) E. L. Hamilton, "Sound attenuation as a function of depth in the seafloors" J. Acoust. Soc. Am. 59, pp. 528~535 (1976)

記号一覧表

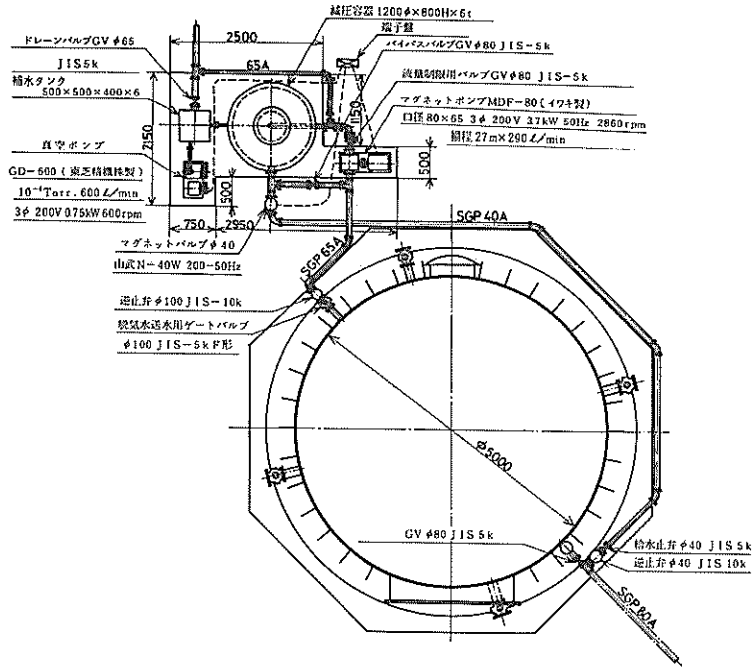
a	: 振動子の半径 (cm)
c	: 音の伝搬速度 (m/s)
D	: ビーム幅が極小となる距離 (m)
EL	: 反射音圧レベル (dB)
E_{RD}	: 直接波の受波レベル
E_{RR}	: 反射波の受波レベル
J_1	: 第1種のBessel関数
l	: ビーム幅 (cm)
P_R	: 受波音圧 (μP_a)
P_s	: 送波音圧 (μP_a at 1m)
RL	: 反射損失 (dB)
SL	: 送波音圧レベル (dB)
s	: 飽和度
TL	: 伝搬損失 (dB)
w	: 泥の含水比 (%)
x	: 距離 (m)
α_1	: ある状態の水の空気溶解度
α_p	: 1気圧に換算したときの水の飽和溶解度
α_s	: 軟泥中の超音波減衰定数 (dB/m)
γ	: 角度
λ	: 波長 (m)



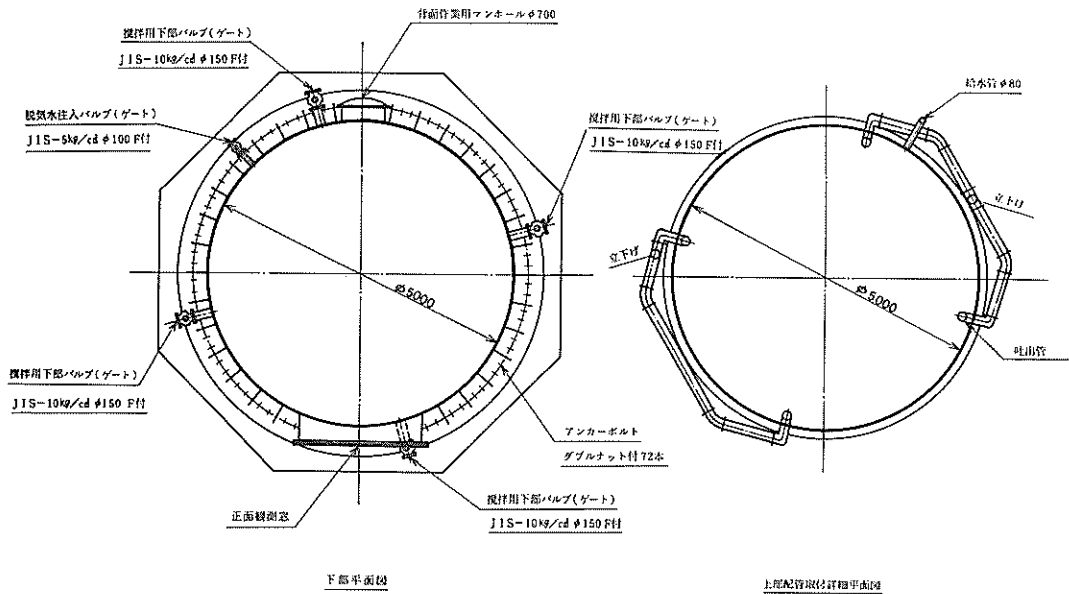
付図-1 海底探査実験水槽位置図



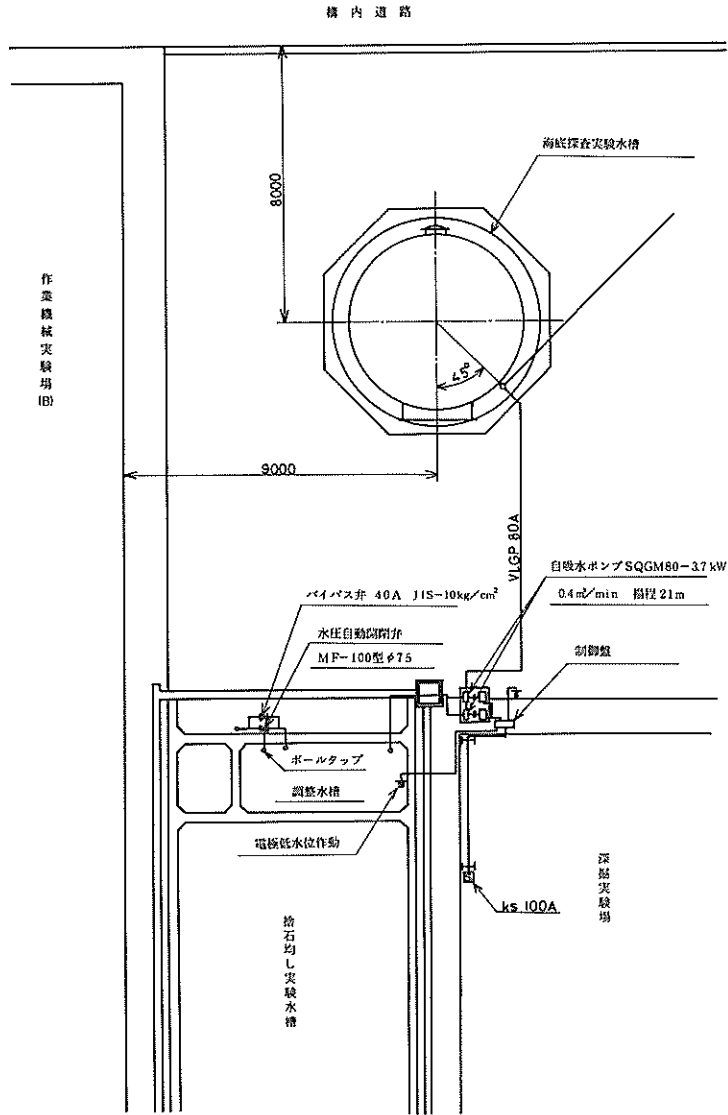
付図-2 海底探査実験水槽配置図



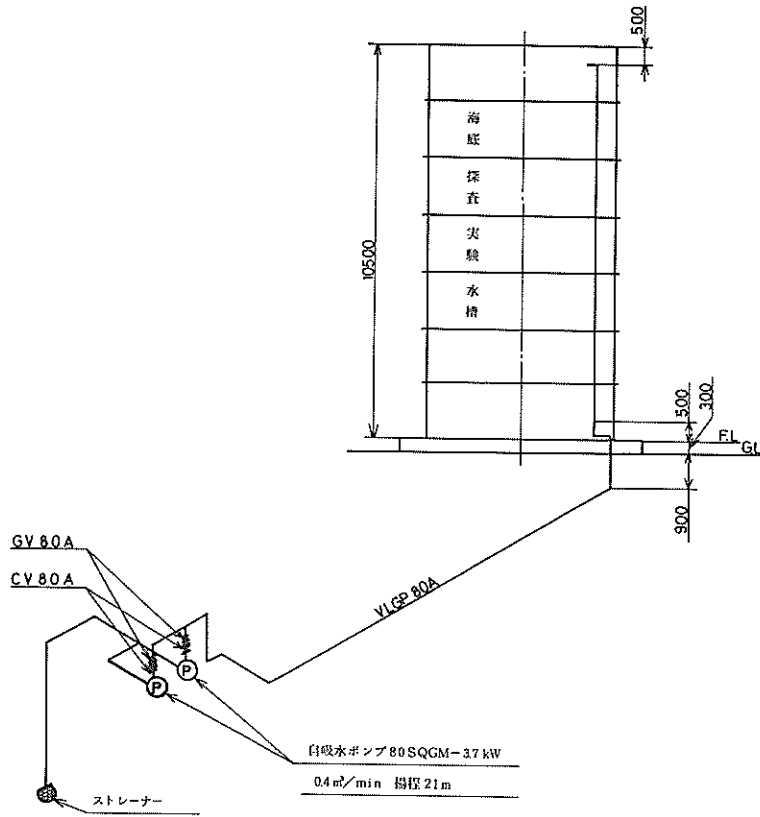
付図-3 海底探査実験水槽及び附属設備（平面図）



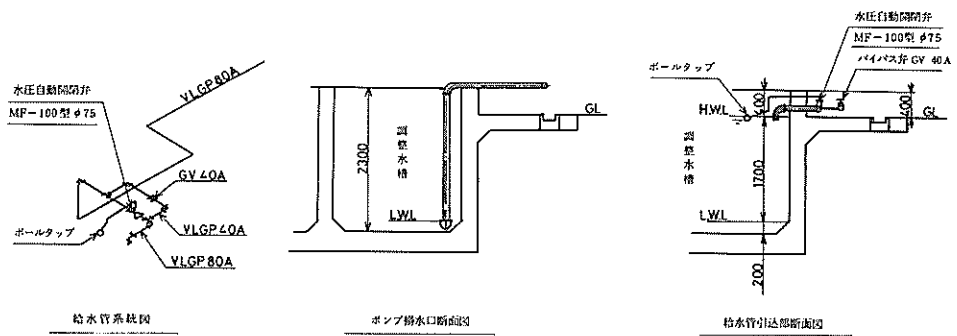
付図-4 海底探査実験水槽平面図



付図-5 給水設備配置図



付図-6 ポンプ給水設備系統図



付図-7 給水管配置図

港 湾 技 研 資 料 No.463

1 9 8 3 · 9

編 集 兼 發 行 人 運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所

發 行 所 運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所
 橫 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号

印 刷 所 日 青 工 業 株 式 會 社

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