

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

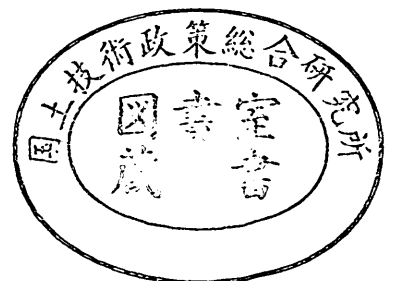
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 23

NO. 1

MAR. 1984

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第23巻第1号 (Vol. 23, No. 1), 1984年3月(Mar. 1984)

目 次 (CONTENTS)

1. 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘
——底質の移動機構に着目した研究——
……………入江 功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次…… 3
(Two Dimensional Seabed Scour in Front of Breakwaters by Standing Waves
—A Study from the Standpoint of Bedload Movement—
……………Isao IRIE, Kazuo NADAOKA, Takamichi KONDO and Kenji TERASAKI)
2. 波力発電ケーソンに働く波力特性に関する実験
——波エネルギーに関する研究 第2報——
……………小島朗史・鈴木諭司……53
(Wave Forces on a Pneumatic-type Wave Power Extractor Utilizing Caisson
Breakwaters —A Study on Development of Wave Power 2nd Report—
……………Roushi OJIMA and Satoshi SUZUMURA)
3. 有限要素法による地盤の安定解析……………小林正樹……83
(Stability Analysis of Geotechnical Structures by Finite Elements
…………… Masaki KOBAYASHI)
4. 二重矢板式構造物の力学的特性に関する研究
……………大堀晃一・荘司喜博・高橋邦夫・上田 寛
原 道彦・川井 豊・塩田啓介…………… 103
(Static Behavior of Double Sheet Pile Wall Structure
……………Kouichi OHORI, Yoshihiro SHOJI, Kunio TAKAHASHI, Hiroshi UEDA,
Michihiko HARA, Yutaka KAWAI and Keisuke SHIOTA)
5. 大水深施工検査・海底探査技術の開発(第1報)
——捨石マウンド等施工面検測技術の開発研究——
……………木原純孝・白井一洋… 153
(Development of Ultrasonic Prospecting and Inspection Technics for Offshore
Underwater Constructions —Development of the Technics for Sounding Seafloor
Stone Mound— …………… Sumitaka KIHARA and Kazuhiro SHIRAI)

5. 大水深施工検査・海底探査技術の開発(第1報)

—捨石マウンド等施工面検測技術の開発研究—

木原純孝*・白井一洋**

要 旨

本報告は大水深施工検査・海底探査技術開発の一環として、超音波を用いた捨石マウンド等施工面検測装置を開発し、この装置を用いて室内及び現地実験で開発研究を行ったのでその結果をとりまとめたものである。

超音波を用いた港湾工事における施工面(捨石マウンド面、海底形状等)の検測技術を大水深(100m未満)においてより向上させるためには高分解能の超音波送受波方式を開発する必要がある。

技術開発の基本条件として水深50mで送受波器の水平、垂直分解能は両方とも25cm以下とし、これに適合した送受波方式を理論的、実験的に検討した。

そこで200kHz、500kHzの送受波器のユニットを用いてクロス式及び多素子式の送受波器を試作し、10分の1の対象物を用いた室内モデル実験や実物大模型実験を行った結果、対象物に超音波ビームの焦点を結ばせた凹面配置のクロスアレイ型送受波器を使用し、かつ受波出力の処理で水平分解能や傾斜物体の検出能力が向上することがわかった。

また四日市港、横須賀港の捨石マウンド海域において現地実験を行い、500kHz凹面配置クロスアレイ型送受波器が捨石面検測に適していることがわかり実用化の可能性を得た。

* 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

**5. Development of Ultrasonic Prospecting and Inspection
Technics for Offshore Underwater Constructions**

“Development of the Technics for Sounding Seafloor Stone Mound”

Sumitaka KIHARA*

Kazuhiro SHIRAI**

Synopsis

This report describes the indoor and outdoor experiments for the development of ultrasonic technics of sounding seafloor stone mound.

The basal conditions of development are as follows;

At the depth of 50m, both horizontal and vertical resolution of ultrasonic transducers are less than 25cm.

Using some arrays made up of 200kHz or 500kHz transducer units, we carried out the indoor experiment with models of actual and 1/10 sizes.

From the result of this experiment, we found out that the use of the concave cross array type ultrasonic transducer and data processing improve the power of resolution and detection of rough and sloping targets.

At the outdoor experiment, we knew that the concave cross array type ultrasonic transducer is suitable for sounding seafloor stone mound in offshore underwater constructions.

* Senior Research Engineer, Machinery Division.

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

目 次

要 旨	153
1. ま え が き	157
2. 超音波施工面検測方式の理論的検討	157
2.1 超音波放射の理論的検討	157
2.2 分解能向上のためのデータ処理	160
3. 捨石における超音波の反射特性	163
4. 室内実験	164
4.1 施工面検測のための予備モデル実験	164
4.2 大型実験水槽による実物大模型実験	169
5. 現地実験	174
5.1 四日市港捨石マウンド検測実験	174
5.2 横須賀港捨石マウンド検測実験	176
6. 実験結果とその考察	180
6.1 室内実験	180
6.2 現地実験	185
6.3 施工面検測方式の検討	187
7. ま と め	187
7.1 室内実験	187
7.2 現地実験	188
7.3 総合評価	188
8. あとがき	188
参考文献	188
記号一覧表	188
付 録	190

1. ま え が き

港湾工事大水深化により従来の潜水夫を主体とした施工法は非能率となり潜水夫にかわる新しい施工検査、海底探査法など水中施工管理システムの開発実用化の必要性が増大した。そこで港湾技術研究所では、水中伝搬で光など電磁波より有利な水中超音波を利用した施工検査海底探査技術の開発実用化を目的として、昭和54年度から58年度の5か年計画で特別研究「大水深における施工検査及び海底探査技術の開発に関する研究」を実施中である。この開発研究の一環として昭和55年度から57年度にかけて捨石マウンド等施工面検測技術の開発研究を行った。本報告はこの開発研究の結果をとりまとめたものである。

超音波による施工面（捨石マウンド面、海底形状等）の検測技術を大水深（100m未滿）においてより向上させるためには、垂直分解能、水平分解能の向上を図らねばならない。したがって新しい高分解能の超音波送受波方式を開発する必要がある。技術開発の基本条件として次に示すとおりである¹⁾。

検測対象物：捨石マウンド面

目標の精度：水深50mにて

水平分解能 25cm以下

垂直分解能 25cm以下

なお、上記分解能は捨石マウンド荒ならし精度 ± 30 cmを考慮して決定した。

上記の技術開発の基本条件をふまえ、下記のような超音波検測技術開発のための理論的、実験的研究を行った。

防波堤など水中構造物の基礎としての捨石マウンド面を超音波パルス反射法を用いて、大水深海域において計測するには捨石マウンド面で超音波の反射特性の把握と、垂直分解能、水平分解能の向上をはかる必要がある。

分解能を向上するためにはできるだけ超音波パルス幅を短くし、かつ超音波ビームの指向角を小さくして、捨石面における分解幅を狭くすると分解能が向上し、この問題を解決できるものと考えられる。

そこで筆者らは送受波指向幅を対象物でクロスさせることによって水平分解能が向上すると考え、200kHz及び500kHzの送受波器ユニットを組み合わせることによってクロス式及び多素子式の送受波器を試作し、10分の1の対象物を用いた室内モデル実験や、実物大模型実験を行った。その結果、対象物までの距離を曲率半径とした凹面配置のクロスアレイ型超音波送受波器を使用して

対象物にビームの焦点を結ばせる方式で狭ビーム化し、受波出力の処理によって、さらに水平分解能が向上し、かつ傾斜物体の検出能力が向上することがわかった²⁾。

またクロスアレイ型送受波器の実用性を実証するため四日市港及び横須賀港の捨石マウンド海域において現地実験を行い、検測精度及び受波レベルの面から500kHz凹面配置クロスアレイ型送受波器が捨石検測に最適であることがわかった。

2. 超音波施工面検測方式の理論的検討

超音波による港湾工事における水中施工面（捨石ならし面、海底形状、水中構造物等）の検測技術を大水深（100m未滿）においてより向上させるためには、距離分解能及び方位分解能の向上を図らねばならない。その場合、距離分解能に超音波のパルス幅が、方位分解能に超音波ビームの指向幅がそれぞれ関係し、音波の減衰には周波数が関係する。この中で距離分解能は高い周波数では5cm以下の短いパルス幅を保障しうるので、分解能の向上には方位分解能の向上、すなわち超音波ビームの指向幅を狭くしうる送受波方式の開発が必要となる。

しかしながら、現状のパルスによる送受波方式を用いて指向角を小さくして水平分解能を向上させるのには限度があるので、対象物の音響特性（指向特性、反射損失等）のデータを収集し、目標精度（水深50mで分解幅25cm以下）に近づける方法についても検討する必要がある。

そこで送受波系において水平分解能の向上を図るためには①“多素子方式”と②“クロス方式”がある。

①の“多素子方式”というのは、一つの振動素子だけでは所要の大きさの送受波器が作れないため、複数個の振動素子を組み合わせ、超音波放射面積を大きくして指向角を小さくした送受波方式である。(図-1) ②の“クロス方式”は帯状の送波器と受波器をクロス状に配置し、それぞれファンビームの指向性を持ち、海底面でそれぞれの分解面積をクロスさせることによって、実効的に分解面積の重なった部分が総合的な分解面積になるようにして狭ビーム化した送受波方式である。(図-2)

また、受波系で分解能を向上させる方法として、①和／差方式と②対象物表面受波レベル／基準面受波レベル方式がある。

以下、これら狭ビーム化超音波送受波方式について理論的に検討してみる。

2.1 超音波放射の理論的検討

(1) モデル実験用送受波器

本研究で、狭ビーム送受波器を開発するため、室内実

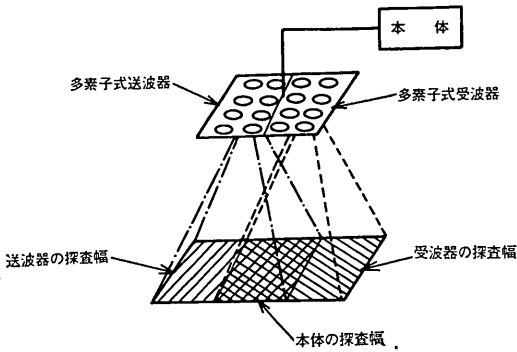


図-1 送受波器多素子配列方式

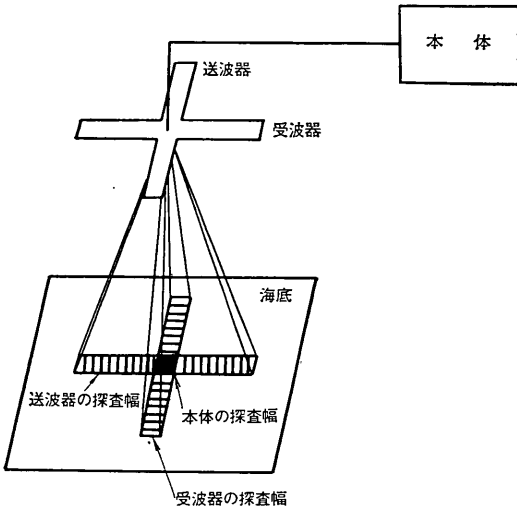


図-2 送受波器クロス配列方式

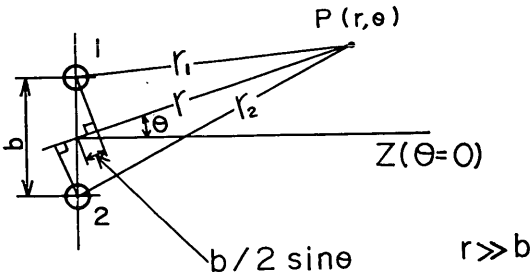


図-3 2個の点音源の音場

実験用送受波器を試作し、この送受波器の配列を各種組み合わせ合わせて“多素子方式”と“クロス方式”を構成して実験に供した。以下、この実験用送受波器の超音波放射のようすを理論的に検討してみる。この送受波器は振動素子2個を1組として送受波器ユニットを構成している。

そこで図-3のように理想化して理論的検討を行ってみる。

図-3に示すように、それぞれ同じ強さで同位相の点音源①と②が間隔 b (m) で置かれたとき、点 $P(r, \theta)$ における音圧は、

音源①と観測点 P との距離 r_1 は、

$$r_1 = r - \frac{b}{2} \sin \theta \quad \dots\dots\dots(1)$$

であるから、 P 点における音圧 P_1 は、

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{A}{r_1} e^{-jkr_1} e^{j\omega t} \\ &= \frac{A}{r} e^{-jkr} e^{+j\frac{kb}{2} \sin \theta} e^{j\omega t} \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

ここで、 $r \gg b$ であるから、 $r_1 = r$

音源②による音圧は、

$$P_2 = \frac{A}{r} e^{-jkr} e^{-j\frac{kb}{2} \sin \theta} e^{j\omega t} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。

これら両音源による合成音場音圧は両者の和をとって、

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 = \frac{A}{r} e^{-jkr} \cdot e^{-j\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta} \cdot e^{j\omega t} \\ &\quad + \frac{A}{r} e^{-jkr} \cdot e^{-j\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta} \cdot e^{j\omega t} \\ &= \frac{A}{r} \cdot e^{-jkr} \cdot e^{j\omega t} (e^{+j\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta} + e^{-j\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta}) \\ &= \frac{2A}{r} \cdot e^{-jkr} \cdot e^{j\omega t} \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \end{aligned}$$

音圧の大きさに着目して絶対値 $|P|$ は、

$$|P| = \frac{2|A|}{r} \left| \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \right| \quad \dots\dots\dots(4)$$

で表される。

(4)式で $| \cdot |$ 内の項はこの送波器の指向性を表す式である。すなわち

$$D(\theta) = \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。

実際の送受波器素子は、ある大きさを持つため超音波放射に指向性を有している。このことを考慮して検討する必要がある。

送受波器の配列全体の各音源素子を点音源（完全無指向性音源）でおきかえた場合のその系の指向性関数を $R_1(\theta)$ とし、実際の音源素子の1個が単独に存在する場合の指向性関数を前と同一座標軸に関して $R_0(\theta)$ とすれば、この二つの音源の指向性関数 $R(\theta)$ は、指向性重畳法則⁴⁾、すなわち、

$$R(\theta) = R_0(\theta) \times R_1(\theta) \quad \dots\dots\dots(6)$$

と与えられる。

ここで使用している送受波器振動素子は円板であるので、円板の指向性関数³⁾

$$R_0(\theta) = \left| \frac{2J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right| \quad \dots\dots\dots(7)$$

を使用して、二つの音源の指向性関数 $R(\theta)$ は、

$$R(\theta) = R_0(\theta) \times R_1(\theta) = \left| \frac{2J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta} \cdot \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \right| \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。図-4に200kHz及び500kHz送受波器の指向性を示す。送受波器ユニットの2個の振動素子の端から端までの長さ l が9cmの方向の指向性を示したもので指向性関数 $R(\theta)$ が-6dB低下する指向半減半角 $\theta_{1/2}$ は200kHzで2.7度、500kHzで1.1度である。

(2) 実物大模型実験用送受波器

施工面検測用超音波送受波器の開発研究用として、送受波器取付板上記送受波器ユニットを組み合わせて、8素子、16素子のクロス方式や多素子方式の2方式の送受波器アレイの実物大模型実験に供した。以下、この実験用送受波器の超音波放射のようすを理論的に検討してみる。

a) クロス方式送受波器

クロス方式の送受波器は直線配列の送受波器を直交させて組み立てるので、指向性として直線配列(リニアアレイ)についての指向性を検討すればよい。

図-5のように同一特性の n 個の点音源が等しい間隔 d で一直線に配列された場合の指向性はX軸に対して対称であるから、X軸を含む面内ならば全く同一特性である。今、XZ面内でZ軸より θ の方向の指向性関数を求めると

$$R_1(\theta) = \left| \frac{\sin\left(n \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)} \right| \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる⁴⁾。

実際の音源は円板振動子を使用しているので、(6)式の重量法則を用いて、

$$R(\theta) = R_0(\theta) \times R_1(\theta) = \left| \frac{2J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right| \times \left| \frac{\sin\left(n \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)} \right| \quad \dots\dots\dots(10)$$

と与えられる。

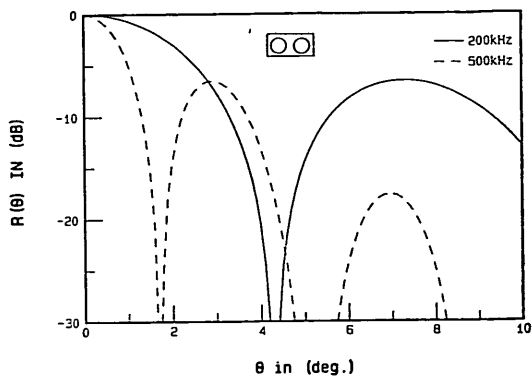


図-4 送受波器ユニットの指向性

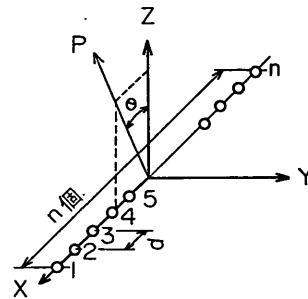


図-5 直線配列群音源

図-6に、 $n=4, 8$ で、周波数 $f=200\text{kHz}$ 及び 500kHz の場合の指向性を示す。

図-6(a)は200kHzのクロスアレイ型送受波器の指向性で振動素子の数4個(振動子の端から端までの長さ $l=24\text{cm}$)の場合の指向半減角 $\theta_{1/2}$ (-6dB低下の角度)は1.03度、振動素子の数8個($l=44\text{cm}$)の場合の指向半減角 $\theta_{1/2}$ は0.58度である。

図-6(b)は500kHzのクロスアレイ型送受波器の指向性を示し、振動素子の数4個($l=24\text{cm}$)の場合の指向半減角 $\theta_{1/2}$ は0.43度、振動素子の数8個($l=44\text{cm}$)の場合の指向半減角 $\theta_{1/2}$ は0.26度である。

b) 多素子方式送受波器

多素子方式の送受波器は、送受波用振動子をく(矩)形面に配列するためこの場合の指向性を考える。

図-7のように、点音源器を縦に n 個、横に m 個、それぞれ d_1 及び d_2 の間隔でく形面上に配列した場合の指向性関数 $R_1(\alpha, \beta)$ は⁵⁾

$$R_1(\alpha, \beta) = \left| \frac{\sin\left(n \frac{\pi d_1}{\lambda} \cos \alpha\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d_1}{\lambda} \cos \alpha\right)} \cdot \frac{\sin\left(m \frac{\pi d_2}{\lambda} \cos \beta\right)}{m \sin\left(\frac{\pi d_2}{\lambda} \cos \beta\right)} \right| \quad \dots\dots\dots(11)$$

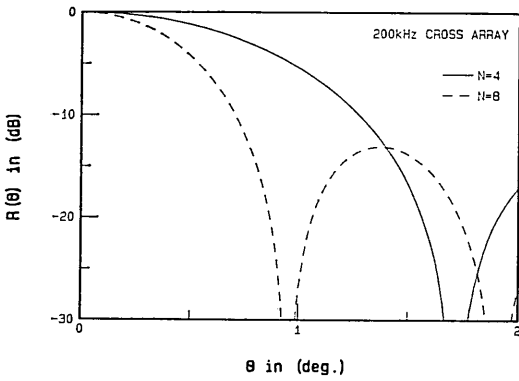


図-6-(a) クロスアレイ型送受波器の指向性(200kHz)

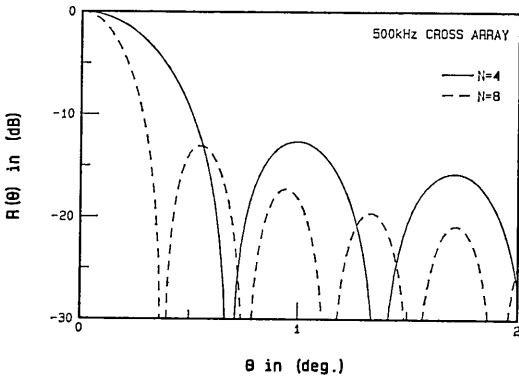


図-6-(b) クロスアレイ型送受波器の指向性(500kHz)

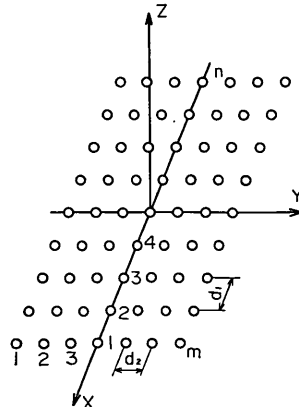


図-7 平面配列群音源

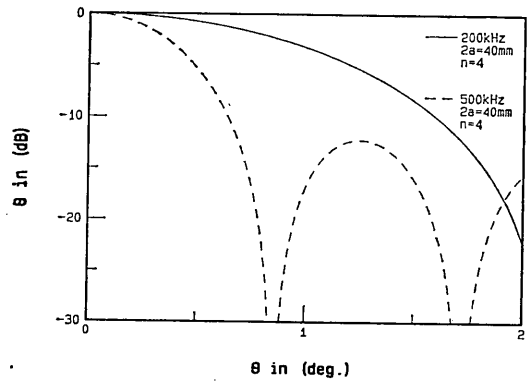


図-8 多素子方式送受波器の指向性

ただし α 及び β は X 軸及び Y 軸からの角度

実際は円板振動子を使用しているため(6)式の重量法則を適用して、多素子方式の指向性関数 $R(\alpha, \beta)$ は

$$R(\alpha, \beta) = R_0(\theta) \times R_1(\alpha, \beta)$$

$$= \left| \frac{2J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right|$$

$$\times \left| \frac{\sin\left(\frac{n\pi d_1}{\lambda} \cos \alpha\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d_1}{\lambda} \cos \alpha\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{m\pi d_2}{\lambda} \cos \beta\right)}{m \sin\left(\frac{\pi d_2}{\lambda} \cos \beta\right)} \right|$$

.....(12)

と与えられる。

なお、形面の辺に平行な方向、すなわち XZ 面または YZ 面内の指向性はそれぞれ $\beta = \pi/2$, $\alpha = \pi/2$ のようにどちらか一定で式の積の一方は常に 1 となり直線配列の場合と同じである。図-8 に、形面の辺に平行な方向、

すなわち、XZ 面または YZ 面内の指向性を、素子数 $n=4$ 、及び周波数 f が 200kHz、500kHz について示した。この図で多素子方式の送受波器の一边が 4 素子の振動素子で構成された長手方向の指向性を示したもので、送受波器の端から端までの長さが 19cm である。指向性関数 $R(\theta)$ が -6dB に低下する角度いわゆる指向半減角は 200kHz で 1.3 度、500kHz で 0.53 度である。

2.2 分解能向上のためのデータ処理

測深精度に影響を及ぼす分解能の向上を図るためには前述の狭ビーム送受波器の開発とともに、受波系でのデータ処理が有効である。受波系でのデータ処理の方式として、複数の受波用振動素子を 2 群に分け、それぞれの群を一まとめにしてリード線を出し、受波増幅器入力端子の接続を和にした場合の出力と、差に接続した場合の出力の比をとるいわゆる和/差方式で受波ビームを狭くする方法と、対象物からの受波レベルを基準面(たとえば海底)の受波レベルで除して微弱な対象物の受波レ

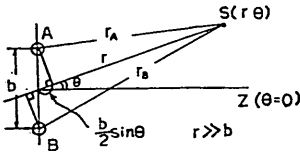


図-9(a) 二つの受波器による点音源の受波

ベルを強調して分解能を向上させる方法がある。以下これらのデータ処理について検討する。

(1) 受波音圧の和/差方式の原理

この和/差方式は受波系のレベル情報と位相情報を利用して分解能を向上させる方式で、その原理を下記に示す。

a) 受波音圧の和接続

図-9に示すように受波器A、Bが間隔b(m)で置かれているとき、中心からの距離rの位置に点音源s(r, theta)があるときのA及びB音圧を求めてみる。

A、B両受波器の中心を原点0とし、図のように観測点の方向thetaを決めれば、点音源の原点からの距離rが受波器間隔bに比べて十分大きい場合、音源pと受波器Aとの距離r_Aは

$$r_A = r - \frac{b}{2} \sin \theta \quad (r \gg b) \quad \dots\dots\dots(13)$$

であるからA点における音圧p_Aは

$$p_A = \frac{A_+}{r_A} e^{-jk r_A} \cdot e^{j\omega t} \\ = \frac{A_+}{r} e^{-jk(r - (b/2)\sin\theta)} \cdot e^{j\omega t} \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここに音圧の大きさに関係するr_Aについてはr ≫ bであるからr_A = r、位相に關係しているe^{-jk r_A}については省略できないため、r_A ≙ rとなる。

受波器Bにおける音圧p_Bも同様に

$$p_B = \frac{A_+}{r} e^{-jk(r + (b/2)\sin\theta)} \cdot e^{j\omega t} \quad \dots\dots\dots(15)$$

であるから、これら両受波音圧による合成受波音圧は両者の和をとって

$$p = p_A + p_B = \frac{2A_+}{r} e^{-jk r} e^{j\omega t} \cdot \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right)$$

音圧の大きさに着目すれば

$$|p| = \frac{2|A_+|}{r} \left| \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \right| \quad \dots\dots\dots(16)$$

受波指向性関数R(theta)は

$$R(\theta_+) = \left| \cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \right| \quad \dots\dots\dots(17)$$

で与えられる。

b) 受波音圧の差接続

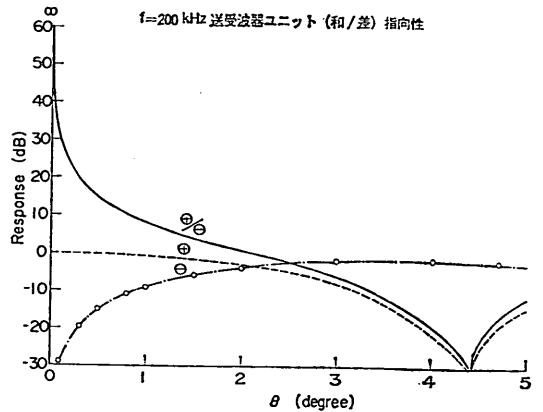


図-9(b) 送受波器ユニット(和/差)の指向性(200kHz)

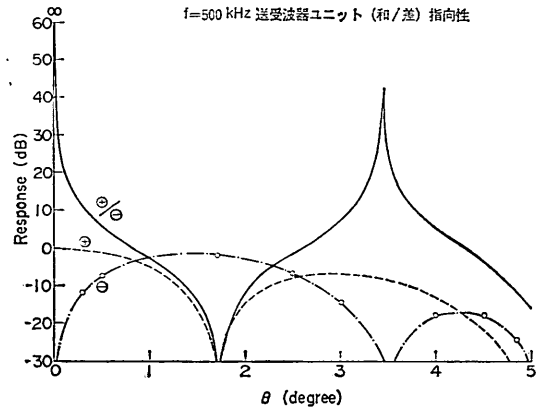


図-9(c) 送受波器ユニット(和/差)の指向性(500kHz)

この場合は、式(15)を逆位相にして式(14)に加えてやればよい。

$$p = p_A - p_B = j \frac{2A_+}{r} e^{-jk r} e^{j\omega t} \sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \quad \dots\dots\dots(18)$$

受波指向性関数R(theta)は

$$R(\theta_-) = \left| \sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \right| \quad \dots\dots\dots(19)$$

となる。

c) 和接続と差接続の比

和接続と差接続の比の指向性関数R(theta_+, theta_-)は

$$R(\theta_+/\theta_-) = \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right)} \right| \quad \dots\dots\dots(20)$$

で与えられる。

図-9(b)及び(c)に和接続、差接続及び和接続と差接続の比の指向性を200kHz及び500kHzについて示す。⊕が和接続、⊖が差接続、⊕/⊖がこれらの比で表

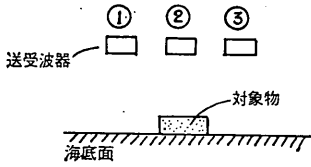


図-10 対象物の探知

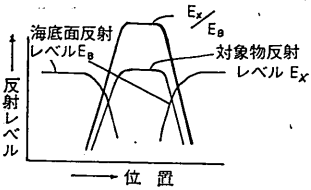


図-11 対象物受波レベル/海底受波レベル方式の原理

したもので音響中心軸上では ∞ のレスポンスが得られ超音波ビームがシャープになることがわかる。

(2) 対象物受波レベル/海底受波レベル方式の原理

このデータ処理方式は、捨石等のように反射率が小さいため受波レベルの低下する対象物の情報を強調する手法である。その原理は下記のとおりである。

海底上に対象物があると対象物のため超音波対象物から反射し、その下方の海底面の反射レベルが低くなることに着目し、受波系において海底面の反射レベルとの比をとることによって対象物の情報が強調される。すなわち図-10に示すように送受波器が①→②→③に移動し、③の位置の下方に対象物が海底面上にあるとすると、

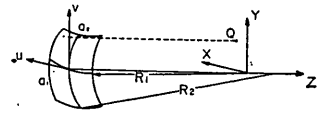


図-13 長方形凹面振動子

図-11に示すように、海底面の反射レベル E_B と対象物の反射レベル E_x は変化する。いま E_x/E_B をとると図-11の E_x/E_B のように強調される。すなわち海底面反射レベル E_B を常に一定とすると対象物が強調されて受信されることとなる。

d) 凹面配置クロスアレイ送受波器の超音波放射

水平方向の分解能を向上させるために、a)のクロスアレイ送受波器の振動素子を図-12のように超音波ビームが対象物に焦点が結ぶように曲率半径 R で配列する方法がある。以下凹面配置クロスアレイ送受波器のビーム形状について検討する。

図-13に示すような長方形凹面振動子のビーム幅の計算式は、奥島ら⁹⁾によって求められている。

すなわち、 x 方向の規準化ビーム幅を $2B_1$ とすると、

$$2B_1 = \left(\frac{4}{\sqrt{\pi}}\right) \left(\frac{A_1}{P_{1A}}\right) \dots\dots\dots(2)$$

ここに

$$B_1 = b_1 / \sqrt{\lambda R_1}$$

b_1 : x 方向のビーム幅の1/2

R_1 : x 方向の曲率半径

λ : 波長

$$A_1 = a_1 / \sqrt{\lambda R_1}$$

A_1 : 長方形振動子の規準化辺長の1/2

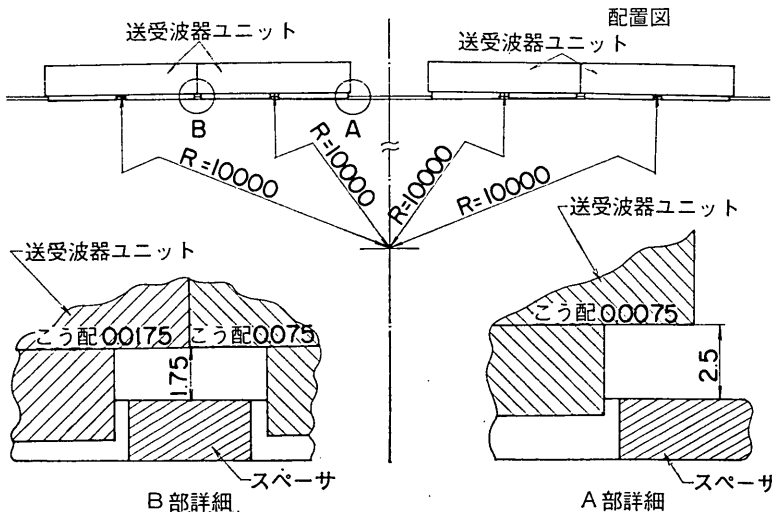


図-12 凹面配置クロスアレイ送受波器

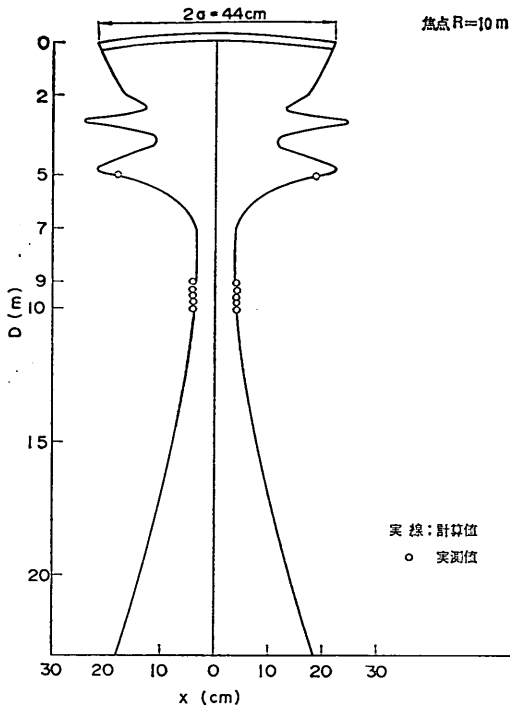


図-14 凹面配置クロスアレイ (16素子) のビーム幅

a_1 : 辺長の 1/2

$$P_{1A} = \frac{2}{|1-z_1|} \left\{ C^2 \left(\frac{\pi}{2} \alpha_1^2 \right) + S^2 \left(\frac{\pi}{2} \alpha_1^2 \right) \right\}$$

ただし $\alpha_1 = \sqrt{S r_1} |1 - Z_1| / 2 Z_1$

$$S r_1 = 4 A_1^2, \quad Z_1 = z / R_1$$

$C(x)$ および $S(x)$ は Fresnel の積分

$$C(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{\cos t}{\sqrt{t}} dt, \quad S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{\sin t}{\sqrt{t}} dt$$

P_{1A} : x 方向軸上の $P_0 = \rho c v$ で規準化した放射音圧

$P = p / p_0$ p : 観測点における音圧の大きさ

p_0 : 振動子面上の平均音圧の大きさ = $\rho c v$

アレイの長さ $2a_1$ が 44cm, 焦点距離 10m, 周波数 500 kHz のときの式によるビーム幅の計算値を図-14 に示す。図で横軸は cm で表した水平方向の距離 x であり, 縦軸は水深 (D) である。水深 5 m までは近接音場で複雑なビーム幅となっているが 5 m から焦点 10 m までのビーム幅は, 7 m で最小となり, それ以後はゆるやかにビーム幅が広がっていき, 焦点 10 m で 8 cm のビーム幅となっている。アレイ長さの約 5 分の 1 のビーム幅となり, 焦点付近 (10m) に対象物をおいた場合は非常に精度よく検出できることを示している。

3. 捨石における超音波の反射特性

捨石 1 個の形状を曲率半径が大きく滑らかな凸面体として考え, 図-15 の (a) に示すように音波が OP 線を通して点 P でこの物体に垂直入射しているものとする。ただし, 下記の条件があるものとする。

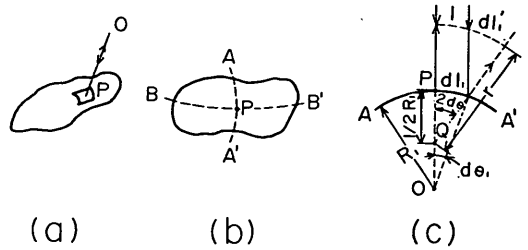


図-15 捨石のターゲットストレングス

- (1) 小さな曲率半径をもつ突起物, 縁及び角がない。
- (2) 剛体であって音波ビームの照射によって変形しない。
- (3) 不動であって音場中で音響的運動をしない。
- (4) 波長に比べて大きい。

図-15 の (b) は P における平面の図で AA' 及び BB' が主鉛直断面である。また 図-15 の (c) は AA' に沿った断面で, R_1 は曲率半径, O はその中心, Q は O と P の中間に位置する音響中心である。ここで P がひとつの頂点となっていて, 各辺の長さが dl_1 及び dl_2 の微小長方形を考える。強さ I_1 の平面波がこの微小面に入射したとすると, この面によってさげられるパワー dP は,

$$dP = I_1 dl_1 dl_2$$

ここで $dl_1 = R_1 d\theta_1$ である。

同様に BB' を含む垂直平面は

$$dl_2 = R_2 d\theta_2$$

であるから, 結局さげられるパワーは

$$dP = I_1 R_1 R_2 d\theta_1 d\theta_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

凸面体からの反射において, このパワーは音響中心 Q からの距離 r において次式で与えられる面上に分布する。

$$dA = dl_1 dl_2 = 2r d\theta_1 2r d\theta_2$$

そこで r における強さは

$$I_r = \frac{dP}{dA} = \frac{I_1 R_1 R_2}{4r^2} \quad (3)$$

となる。

さらにターゲットストレングス TS は

$$TS = 10 \log \frac{I_r}{I_t} \Big|_{r=1} = 10 \log \frac{R_1 R_2}{4} \dots \dots \dots (24)$$

となる⁹⁾。

実際の捨石からの超音波の反射は、より複雑で、上記のように大きな曲率半径をもつ曲面からの鏡面反射の他に、波長に比べて小さい曲率半径をもつ突起、縁及び角のような不規則性をその物体の表面上にもっているため、散乱波を生じ、反射波としては鏡面反射波と散乱波との合成されたものとみることができよう。

したがって理論的に捨石の反射特性を求めるのは不可能であるので実験的に確かめる必要がある。

4. 室内実験

防波堤など水中構造物の基礎としての捨石マウンド面を超音波パルス反射法を用いて、大水深海域において計測するには捨石マウンド面での超音波の反射特性の把握と、距離分解能、方位分解能の向上を図る必要がある。

分解能を向上させるためには、できるだけ超音波パルス幅を短くし、かつ超音波ビームの指向角を小さくして、捨石面における分解幅を狭くすると分解能が向上しこの問題を解決できるものと考えられる。

そこで筆者らは 図-16 のような 200kHz 及び 500kHz の送受波器ユニットを 図-17 のような取付板に配置することによって、多素子方式送受波器、クロス方式送受波器を組み立てて室内実験を行った。以下にその実験の概要を述べる。

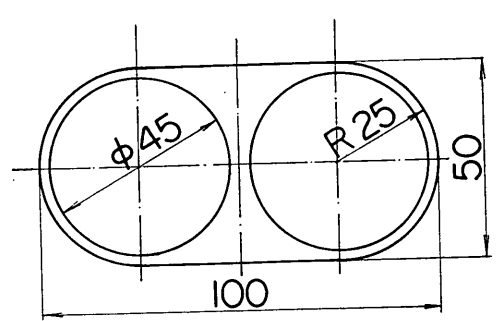
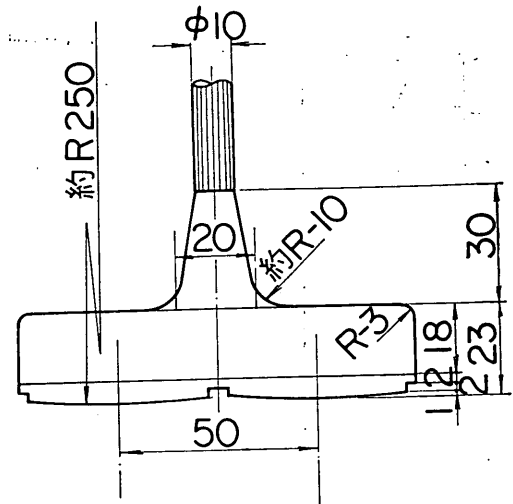


図-16 送受波器ユニット外形図

4.1 施工面検測のための予備モデル実験

大型水槽による実物の大模型実験のための予備実験として、小型水槽を用いた予備モデル実験を行った。実験項目は送波器の超音波ビームの分解幅、コンクリート製長方形ブロックの10分の1縮尺モデルによる分解能測定実験及び10分の1縮尺捨石モデル検測実験である。

(1) 送波器の超音波ビームの分解幅の測定

超音波ビームの幅（-6 dB 減少位置）がいちばん狭い深度（送波器と施工面の距離）に施工面を置いて水平分解能を上げて実験を行うため、送波器の指向幅の測定を行った。図-18 にその測定装置及び測定方法を示す。

送波器として 図-16 の 200 及び 500kHz 用の送受波器ユニットを用い、受波器として水槽底に標準ハイドロホンを設置した。

測定方法は、超音波ビーム放射軸が標準ハイドロホンの中心軸に一致したときの受信レベルを基準（0 dB）として、送波器を水平方向に移動して受信レベルが 6 dB 下がった移動距離の 2 倍の距離をその水深での分解幅とした。この方法を各深度ごとに行った。

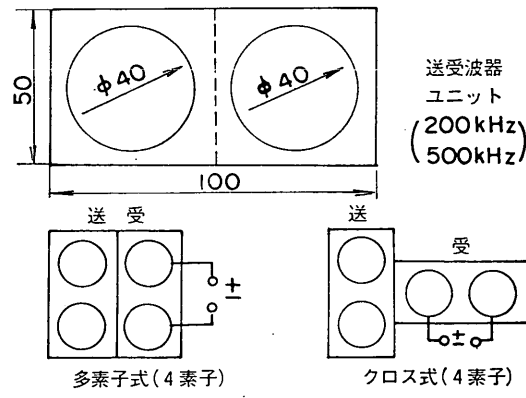


図-17 モデル実験用送受波器

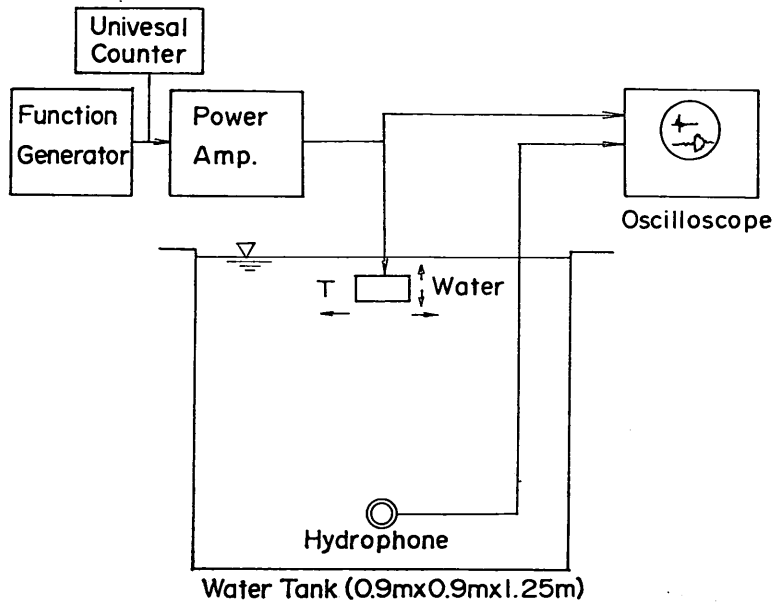


図-18 送波器の分解幅測定

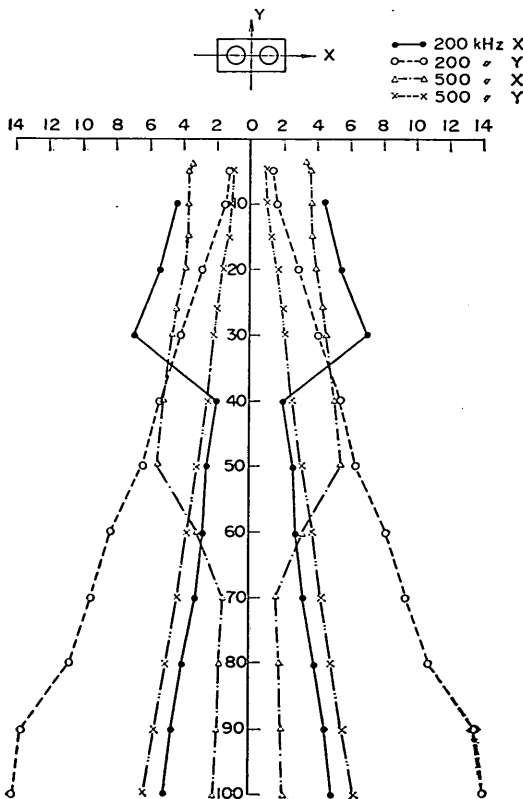


図-19 送受波器ユニットの分解幅

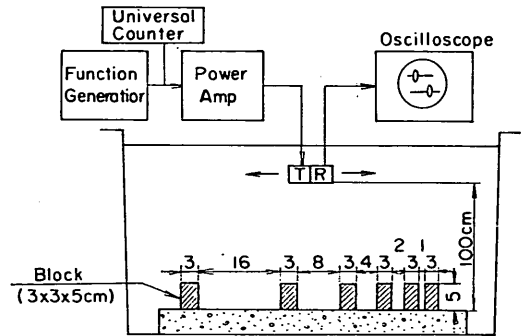


図-20 測定装置の概要

測定の結果を図-19に示す。この図から各送波器の最小分解幅になる深度を送受波器測定深度とした。表-1に各送波器の測定深度と分解幅を示す。

(2)長方形コンクリートブロックによるモデル予備実験
送受波器の分解能及び対象物の形状による反射特性を検討するため、小型水槽(900×900×1,250mm)において10分の1縮尺対象物モデルとして、長方形コンクリートブロック(30×30×50mm)を用いて検測実験を行った。実験は水平分解能、垂直分解能、斜入射反射レベルの測定である。写真-1に測定状況を示す。

a) 水平分解能測定²⁾⁷⁾

図-20に測定装置の概要を示す。供試コンクリートブロックは、図-21-(a)写真-2に示すように水底に間隔を

表-1 各送波器の測定深度と分解幅

	500kHz		200kHz	
	クロス	多素子	クロス	多素子
測定深度 D (m)	1.0	0.7	0.5	0.4
分解幅 l (cm)	4.00×0.95	3.20×3.60	5.20×1.40	4.00×5.80

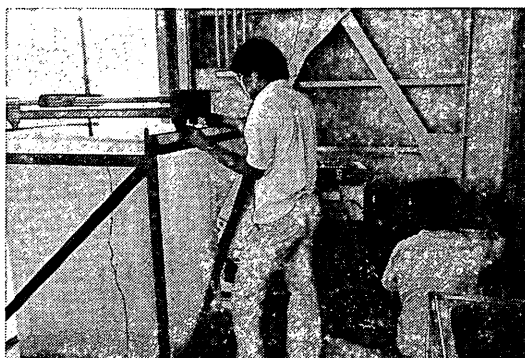


写真-1 モデル予備実験状況

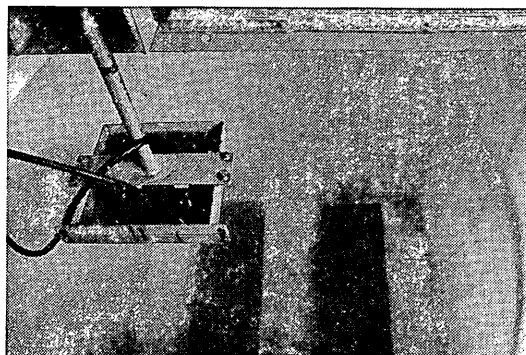
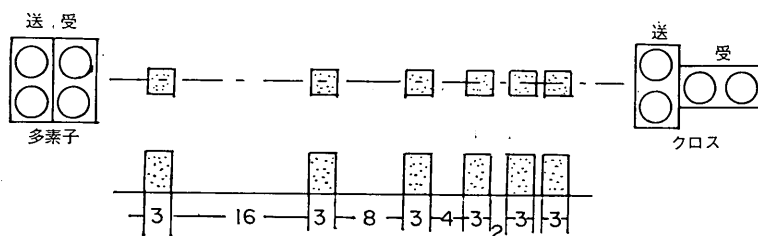
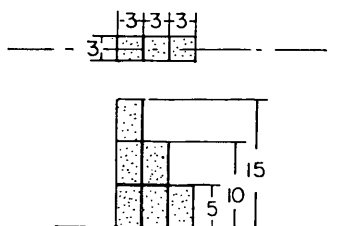


写真-2 送受波器とブロックの設置状況



(a) 水平分解能測定

図-21(a) 分解能測定要領



(b) 垂直分解能測定

図-21(b) 分解能測定要領

あけて設置し、送受波器は指向性軸が対象物の中心軸にくるようにセットした。測定は、送受波器を水平移動し、ブロック表面の深度及び水槽底面の深度に受波レベル (E_{RX} , E_{RB}) を、測定間隔 1 cm ごとで行った。測定

深度は 4.1 (1) で求めた送受波総合指向性におけるビーム幅が最小になる距離に設定した。実験結果の一例を横軸に指向性中心位置、縦軸に受信レベルで表した図-22に示す。

b) 垂直分解能測定

図-21(b)に示すように垂直方向の分解能を測定するために供試用コンクリートブロックを積み上げて階段状のブロックを形成した。測定方法は水平分解能測定と同様に行った。実験の結果を図-23に示す。図で横軸に超音波ビームの指向性中心位置 x (cm)、縦軸に受波レベル E_R を受信電圧 1 mV を 0 dB として dB 表示とした。受波レベル E_R は、上段ブロック 1 を実線、中段ブロック 2 を点線、下段ブロック 3 を一点鎖線、水底 B を二点

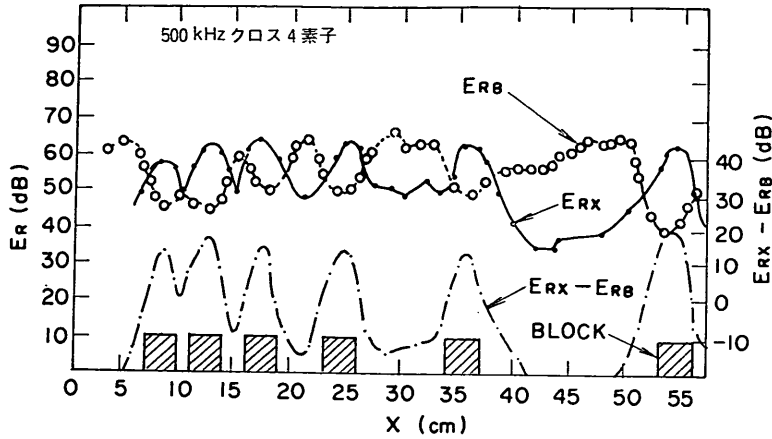


図-22 水平分解能測定結果の一例

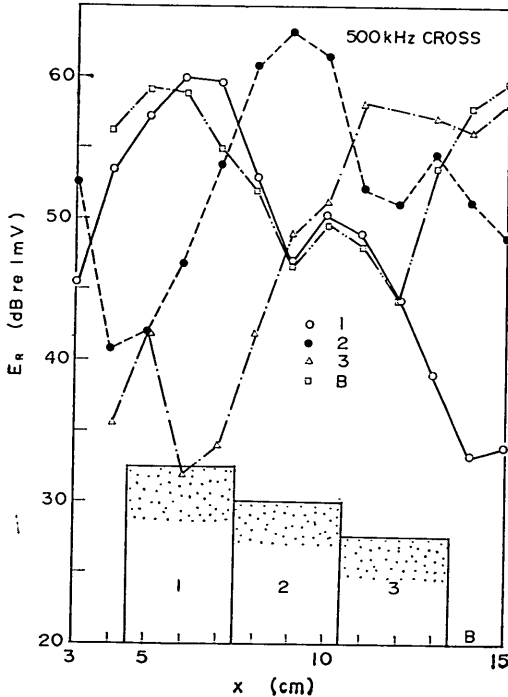


図-23(a) 垂直分解能測定結果(500kHz クロス)

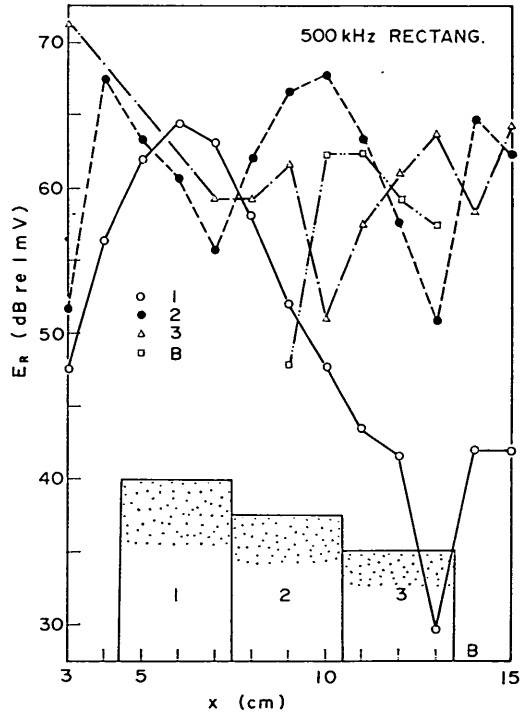


図-23(b) 垂直分解能測定結果(500kHz 多素子)

鎖線で描いてある。送受波方式に 500kHz クロス式, 500kHz 多素子式, 200kHz クロス式, 200kHz 多素子式を用いた。いずれも超音波パルスに、パルス幅 50 μ s, 送信電圧 100V_{P-P}を使用した。

これらの図から垂直分解能のいちばん良いのは、500 kHz, クロス式, いちばん悪いのは 200kHz, 多素子であることがわかる。

c) 斜入射反射レベルの測定²⁷⁾

図-24 及び写真-3 に示すように水槽底にブロックを 0°, 10°, 20°, 30° の傾斜で設置し, その中心上を 1cm 間隔で送受波器を移動させて, 受波レベルを測定した。500kHz クロス方式送受波器を用いた場合の実験の結果を図-24 に示す。図で E_{RX} はブロック表面からの受波レベル, E_{RB} は水槽底からの受波レベルである。ブロッ

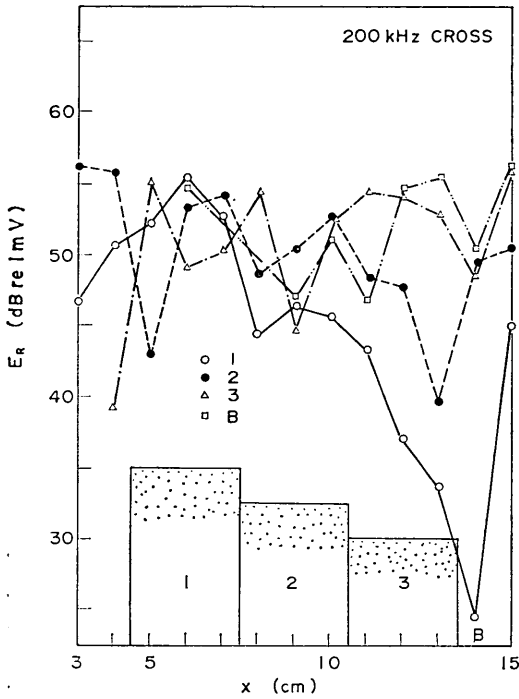


図-23(c) 垂直分解能測定結果(200kHz クロス)

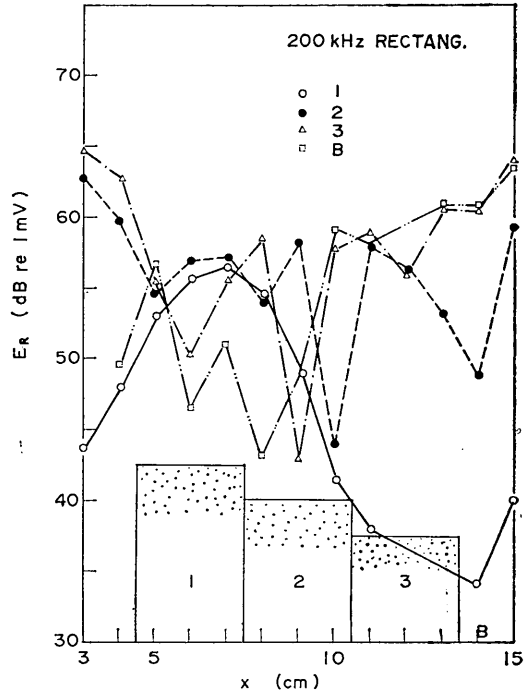


図-23(d) 垂直分解能測定結果(200kHz 多素子)

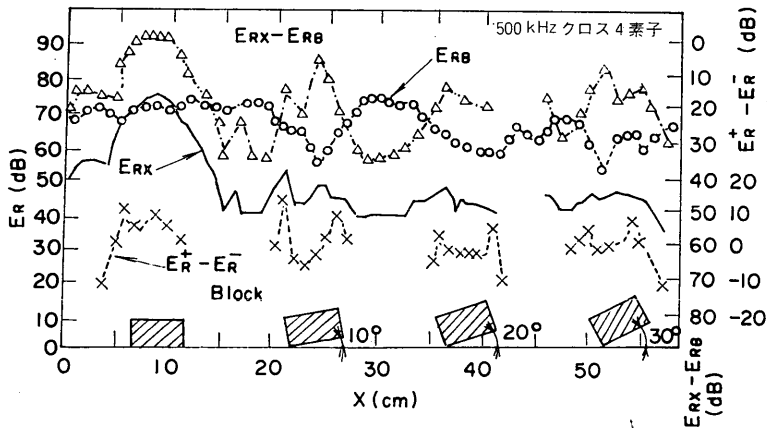


図-24 斜入射反射レベルの測定結果

クが水平の場合の受波レベル E_{RX} が 76dB であったのが、ブロックが 10° 傾いたときの E_{RX} は 54~45dB 程度になり水平のときに比較して 22~31dB 低下している。また 20° 以上傾斜ではピーク値がほぼ 50dB 程度となり対象物を検出することが非常に困難となっている。

次に、図-25 に示すように水底に 2 個のブロックを異方向に 30° の傾斜角で設置した場合と、同方向に 30° の傾斜角で設置した場合の受波レベルを測定した。図-25

に実験の結果を示す。

(3) 捨石モデル検出実験

海底施工面が捨石の場合の超音波の反射特性を求めるために、小型水槽による 10 分の 1 縮尺の捨石モデルを用いた検出実験を行った。

図-26 に測定の概要を示す。使用した捨石モデルは、寸法が 70mm×70mm×10mm の碎石を用い、送受波器に分解能のよい 500kHz クロス方式を使用した。写真-4

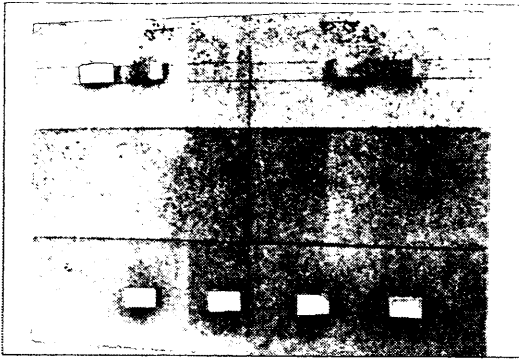


写真-3 斜入射レベル測定のためのブロック設置状況

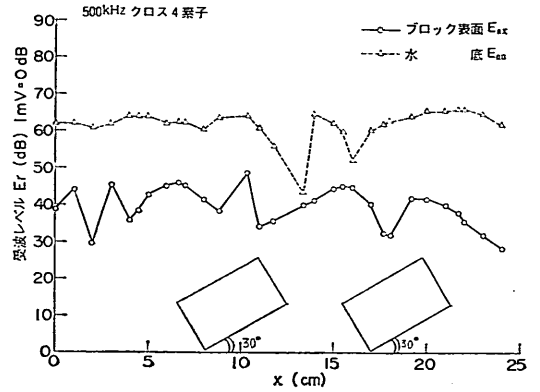


図-25(c) 斜入射による反射特性(α=30°同方向傾斜)

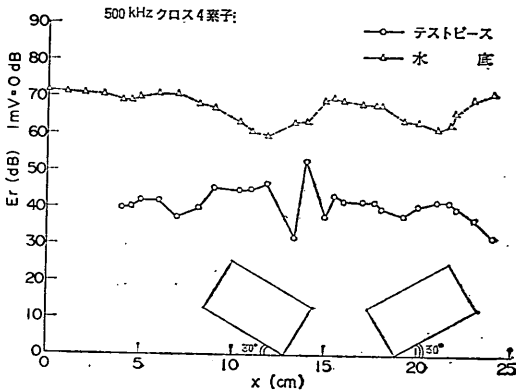


図-25(a) 斜入射による反射特性(α=30°異方向傾斜)

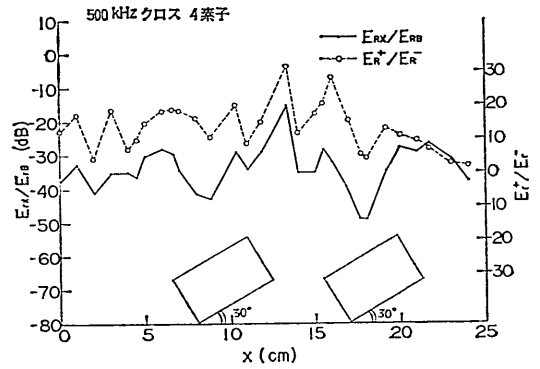


図-25(d) 斜入射による反射特性同方向傾斜(α=30°)のデータ処理

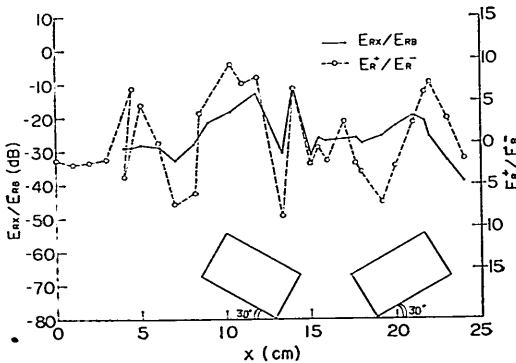


図-25(b) 斜入射による反射特性(α=30°異方向傾斜)のデータ処理

に供試石の設置状況を示す。砕石表面の形状の参考データとして直径が14mmのナットを重錘がわりに水糸に吊したものをスケールとして送受波器と石表面までの距離を1cm間隔で測定した。測定点数は一測線が46

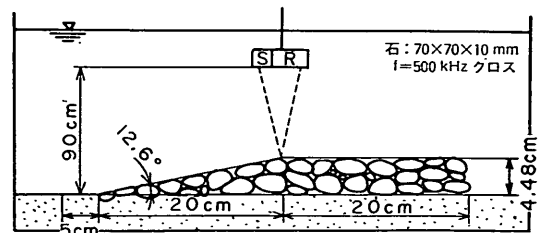


図-26 捨石モデル検測実験

点で、10測線あるので合計460点である。実験結果の一例を図-27に示す。図で実線が音波で、点線がレッドで測定した値である。横軸は測点で-5~-1点までが底質が砂、0~20点までが法面(傾斜角12.63°)、21~40点までは平坦面の石である。図-28は、レッド及び音測値を三次元で表示したものである。

4.2 大型実験水槽による実物大模型実験²⁷⁾

直径5 m, 高さ10.5 mの大型実験水槽³⁾において実物大の模型を用い, 主として各種送受波器の分解能確認

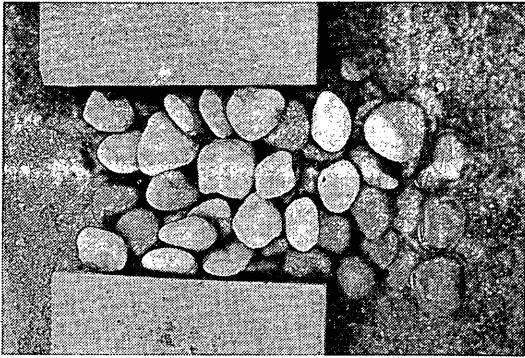


写真-4 捨石モデルの設置状況

のための室内実験を行った(写真-5)。

使用した送受波器は, 図-16の送受波器ユニット, 8ユニット(16素子)を取付板にそれぞれ組み合わせて, 多素子, クロスアレイ型, 凹面配置クロスアレイ型の3種類とした。写真-6に各送受波器の外観を示す。また超音波ビームの分解幅を変えて分解能に及ぼす影響を調べるために, 振動素子の数を16及び8素子の2種類に変えて実験した。

(1) 各送受波器の超音波ビームの分解幅測定

送受波器より放射される超音波ビームの分解幅を測定するため図-18のような測定法で実験した。すなわち, 水槽底に標準用 hidroホンを設置し, 水槽上部の計測台車に供試送受波器を取付け, 音響軸における hidroホンの受信レベルを基準(0 dB)として, 送受波器を水平方向に移動して受信レベルが6 dB下がった移動距離の

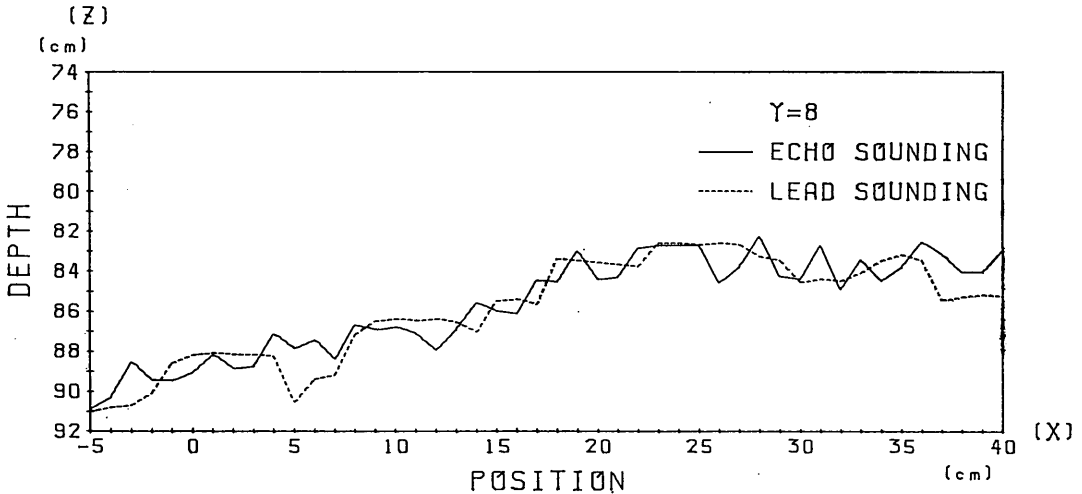


図-27 捨石モデル検測実験結果の一例

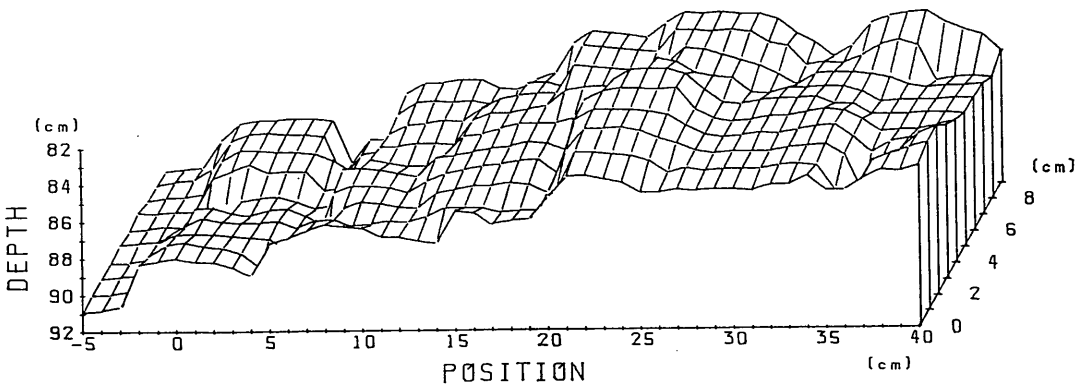


図-28(a) 捨石モデル検測値の三次元表示 (レッド計測)

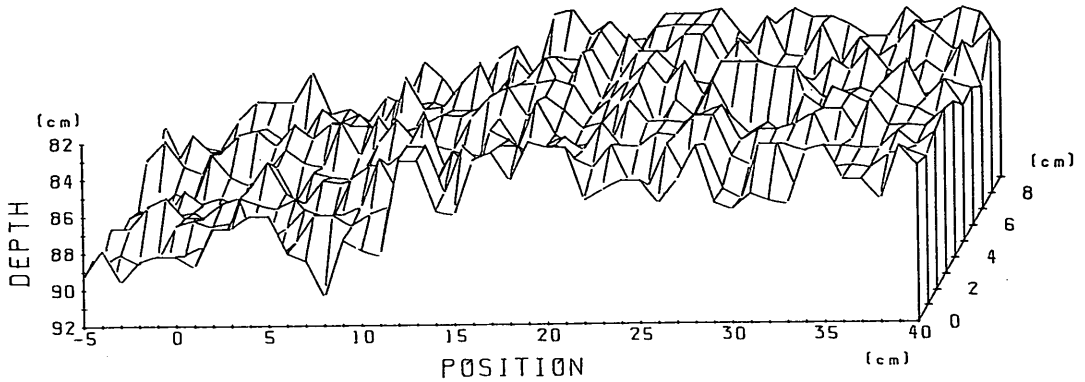
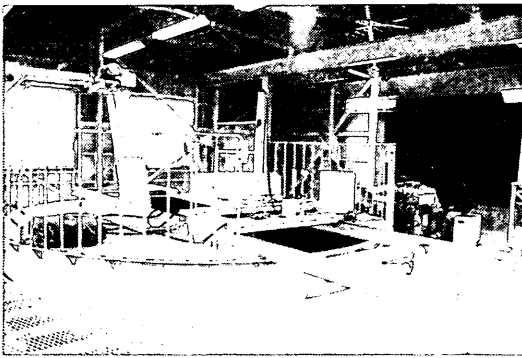
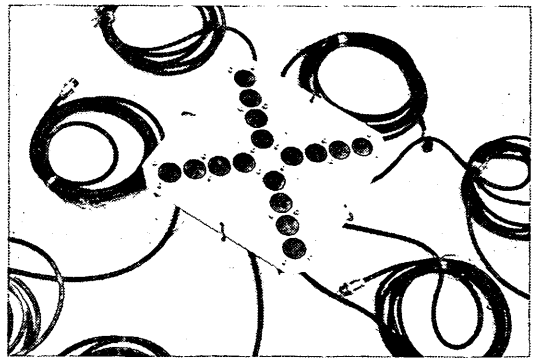


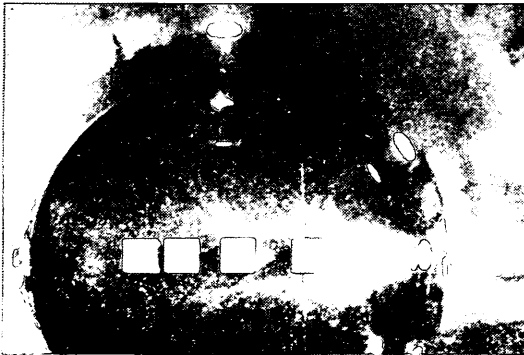
図-28-(b) 捨石モデル検測値の三次元表示 (音測)



(a) 水槽上部の実験状況

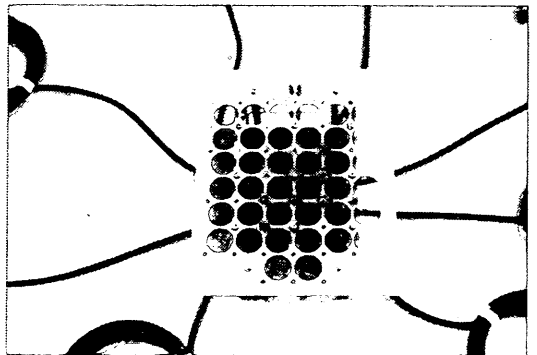


(a) クロスアレイ型



(b) 水槽底の実物大模型の設置状況

写真-5 大型実験水槽による実物大模型実験



(b) 多素子型

写真-6 送受波器の外観

2倍の距離をその水深での分解幅とした。この方法を各深度ごとに行った。図-29に測定結果の一例を示す。多素子方式の送受波器では、送波器のX軸方向及びY軸方向の分解幅を測定した。クロス方式の送受波器ではY軸方向の分解幅は振動子直径の指向性により決定され既知

であるので、送波器のX軸方向の分解幅だけを測定した。

(2) コンクリートブロックによる実物大模型実験

直径5m、高さ10.5mの大型実験水槽において実物大の模型(38×39×50cmコンクリートブロック)を用

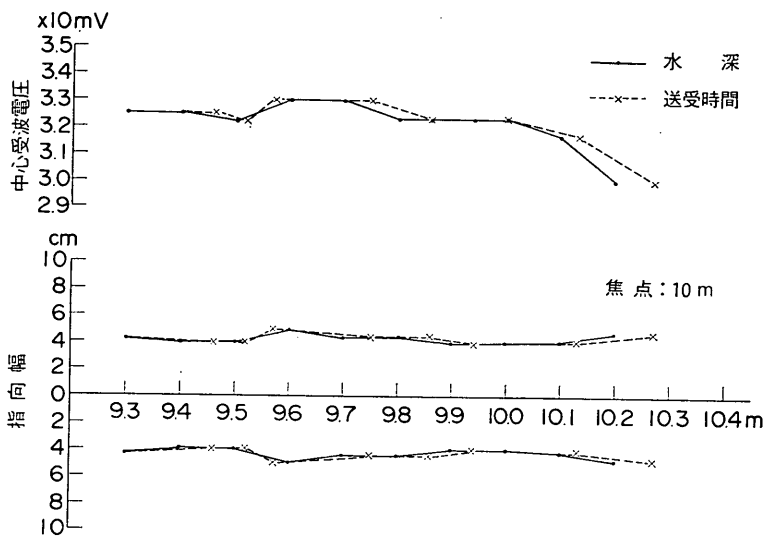


図-29 送受波器の分解幅の一例 (凹面配置クロスアレイ 16 素子)

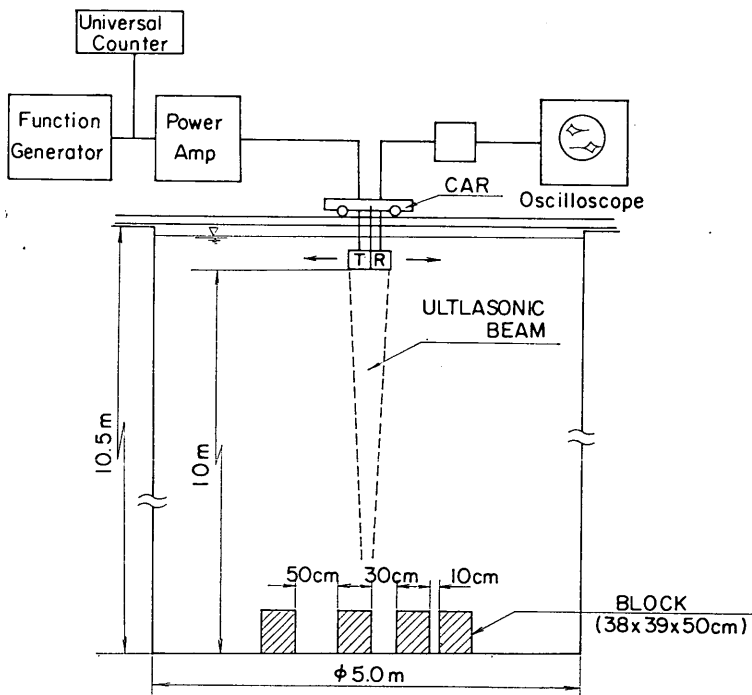


図-30 実物大模型実験の概要

い、主として各種送受波器の分解能確認のための室内実験を行った。実験は図-30に示すように水槽底に施工面として、コンクリートブロックを図のような間隔で設置し、台車に取付けた送受波器を水平移動しながら10cm間隔で、ブロック表面及び水槽底面における受波レベル

(E_{RX} , E_{RB})を測定した。実験結果の一例を図-31に示す。この図はクロスアレイ送受波器の実験結果を示したもので●印が平面配置クロスアレイ16素子のブロック表面からの受波レベル E_{RX} , ○印はデータ処理(ブロック表面の受波レベル E_{RX} を水底の受波レベル E_{RB} との

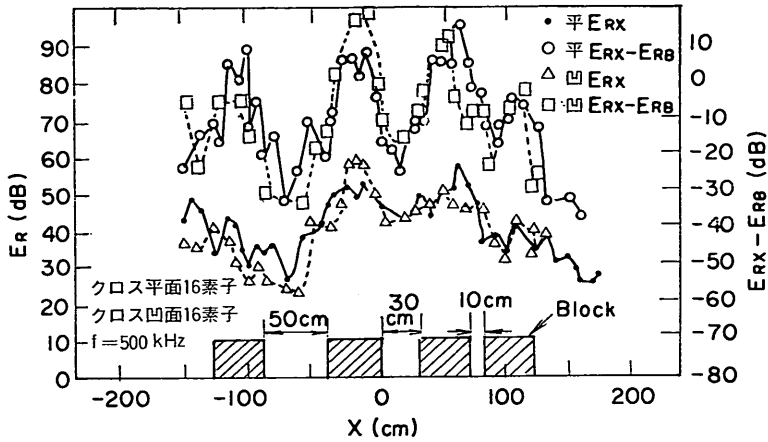


図-31 実物大模型実験結果の一例

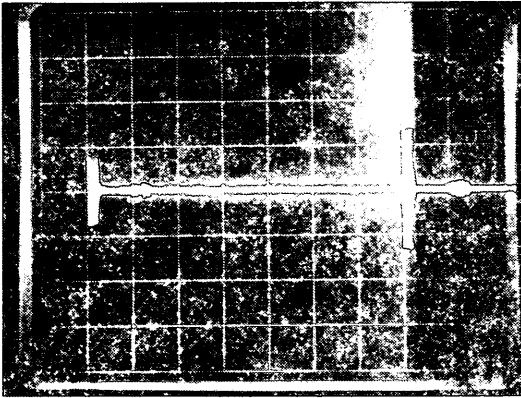
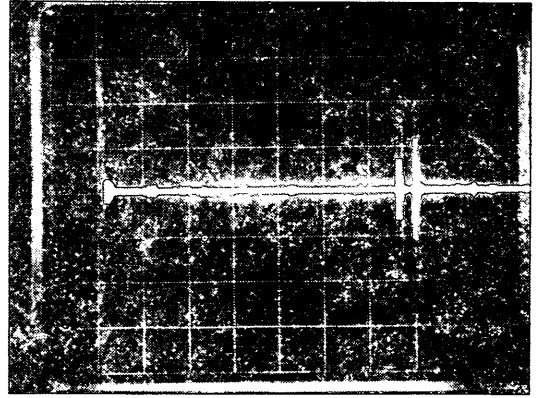
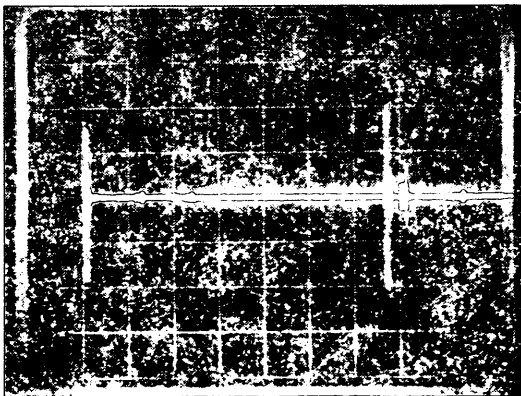


写真-7 500kHz 凹面配置クロスアレイ送受波器によるオシロ波形

(a) ブロックのない場所の受波オシロ波形



(c) ブロックの角における受波オシロ波形



(b) ブロックの真上の受波オシロ波形

差 ($E_{RX} - E_{RB}$) で表現したもの), Δ 印は凹面配置クロスアレイ 16 素子のブロック表面の受波レベル E_{RX} , \square 印はこれをデータ処理 ($E_{RX} - E_{RB}$) したものである。これを見ると生のデータ E_{RX} では受波レベルが低く、対象物と対象物との間隔をはっきり分離して検出できないが、データ処理すればレベルが上昇し、10cm 間隔でもよく分離して検出できることがわかる。特に凹面配置クロスアレイ 16 素子のほうがその効果が大きいことがわかった。

写真-7 に受信電圧のオシロ波形を示す。送信電圧 E_s は 200V_{P-P}, パルス幅 300 μ s で、写真-7(a) はブロックのない場合の水底からの受信波形、写真-7(b) はブロック真上に音波を入射したときの受信波形、(c) はブロックの角に音波が入射したときの受信波形で、ブロックの受波レベルと水底からの受波レベルがほぼ等しいことがわ

かる。

5. 現地実験

室内実験で試作した多素子及びクロスアレイ送受波器の検測性能を現地海底捨石マウンドにおいて確認するため、四日市港及び横須賀港捨石マウンド海域において現地実験を行った。

5.1 四日市港捨石マウンド検測実験⁷⁾

海底捨石の音響特性及び新方式送受波器の性能確認のための現地実験を四日市港霞が浦防波堤捨石投入海域で試作した施工面検測実験装置を用いて行った。

図-32に捨石マウンドの形状を示す。実験を行った捨石マウンドは既設防波堤の港外側の天端面で捨石の大きさは約300kgf/1個である。

(1) 実験用機材

使用した施工面検測実験装置は下記のとおりである。

送受波周波数は、従来の送受波方式(200kHz使用)と性能の比較検討するために、従来方式と同じ200kHzを使用した。新方式送受波器は次のとおりである。

- a) クロスアレイ (16素子)
- b) クロスアレイ (8素子)
- c) 多素子アレイ (16素子)
- d) 多素子アレイ (8素子)

その他、従来方式の送受波器として、円板型送受波器(100φ)を使用した。なお記録器として下記のものを使用した。

e) デジタル測深機

周波数: 200kHz, 半減全角: 6°, デジタル4桁

f) 2ペンレコーダ

DC 1mV~5V

写真-8に使用した施工面検測装置の外観を示す。

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、濁度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等を用いた。

(2) 実験概要

実験は、実験船を防波堤の港内側、±30cmにならし

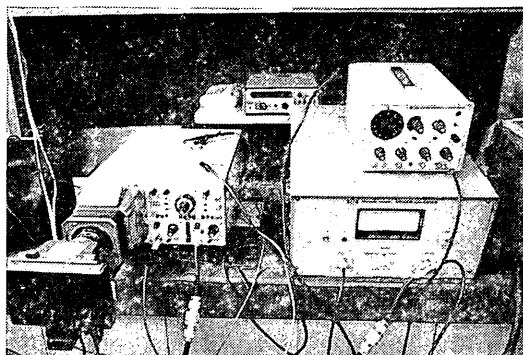


写真-8 施工面検測装置の外観

ずみの被覆石の平坦部、防波堤から約7mはなれた場所に係船し、げん側に送受波器を取付けて検測実験を行った。

送受波器の組み合わせは、①円板型送受波器、②送信が円板型、受信がクロス(8素子)③送信が円板型、受信がクロス(4素子)④クロス(16素子)⑤クロス(8素子)⑥多素子(16素子)、多素子(8素子)の7種類である。

測定は、送信電圧、受信電圧をシンクロスコープの波形振幅を読みとることによって行い、送受波器感度積から、下式により反射損失を求めた。

海底捨石面反射損失 RL (dB)は

$$RL = TL - (k_s \cdot k_m + SL) \quad \dots\dots\dots(25)$$

ここに

TL : 伝搬損失 $20 \log E_R / E_S$ (dB)

E_R : 受信電圧(V)

E_S : 送信電圧(V)

$k_s \cdot k_m$: 感度積 (dB)

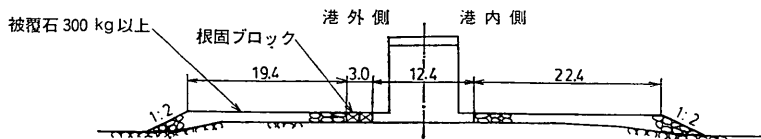
k_s : 送波感度 (dB re $\mu\text{bar}/\text{V}\cdot\text{m}$)

k_m : 受波感度 (dB re $\text{V}/\mu\text{bar}$)

SL : 拡散損失 $20 \log 1/2x$ (dB)

x : 水深(m)

表-2にその結果を示す。この表からクロス式と多素



標準断面図 u : m

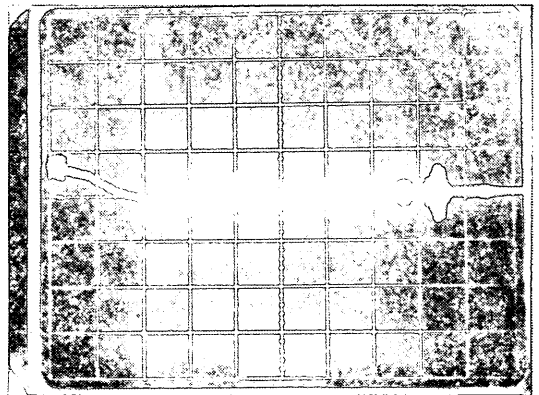
図-32 捨石面検測実験場所

表-2 海底捨石面の反射損失

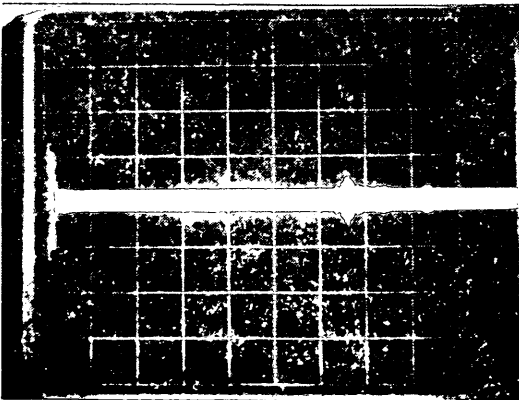
送波器種別 \ 項目	感度積 $k_s \cdot k_m$ (dB)	伝搬損失 TL (dB)	拡散損失 SL (dB)	反射損失 RL (dB)	水深 D (m)
200kHz クロス16素子	-21.10	-49.54	-19.44	-9.00	4.690
200kHz クロス 8素子	-15.60	-46.02	-19.63	-10.79	4.793
200kHz 多素子16素子	-11.00	-42.69	-19.38	-12.31	4.657
200kHz 多素子 8素子	-9.89	-46.02	-19.24	-16.90	4.581
200kHz 円板型(送) 200kHz クロス 8素子(受)	-20.60	-69.54	-20.76	-28.18	5.456
200kHz 円板型φ100(送受)	-25.00	-49.54	-20.27	-4.27	5.160
200kHz 円板型(送) クロス 4素子(受)	-14.60	-72.64	-20.27	-37.77	5.156



写真-9 送受信電圧のオシロ波形
(a) 200kHz クロスアレイのオシロ波形



(c) 200kHz 円板型送受波器のオシロ波形



(b) 200kHz 多素子アレイのオシロ波形

子式の反射損失を比較するとクロス式のほうが反射損失が小さい。すなわち反射率がよいことがわかった。写真-9に送受信電圧のオシロ波形を示す。

その他、捨石マウンド海域の環境条件を調べるために水質（水温、電導度、濁度、pH、DO）を水質測定装置にて測定した。その結果を図-33に示す。

次に、測量船を走らせながら、捨石ならし面を検測した場合の測深記録に及ぼす影響について検討するため、走航測量実験を行った。使用した測深機はデジタル測深機で送受波器は周波数が200kHzの直径100mm円板型である。（写真-10）

測量海域は、霞が浦防波堤港外側防波堤より約8m離れた捨石マウンド面（水深4.5m、距離60m）を測量し

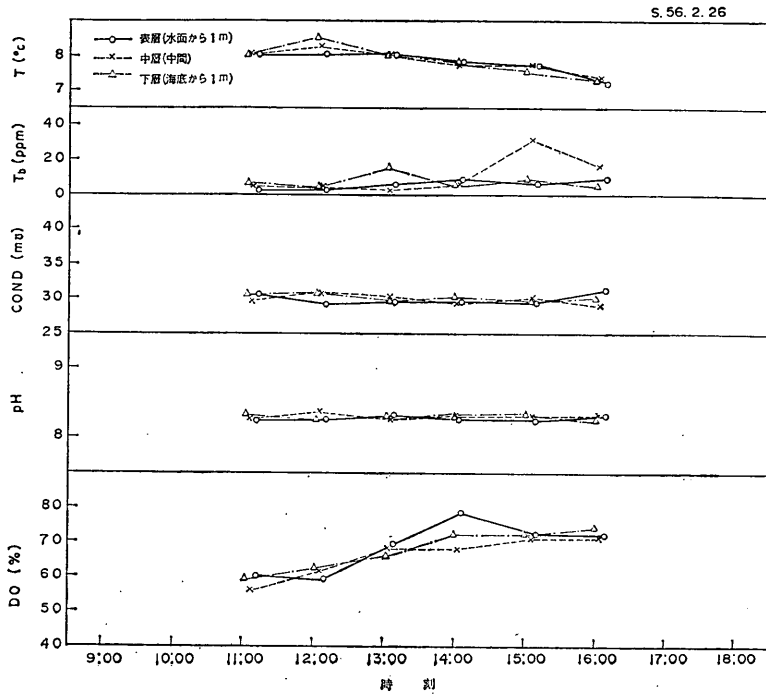


図-33 水質測定結果

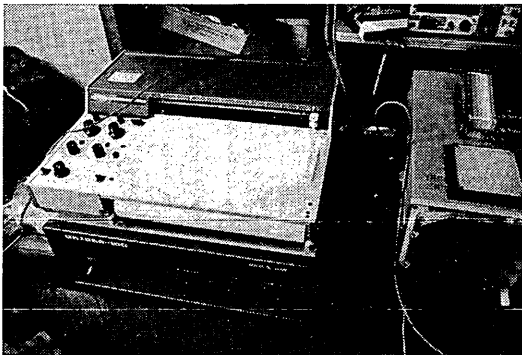


写真-10 デジタル測深機の外観

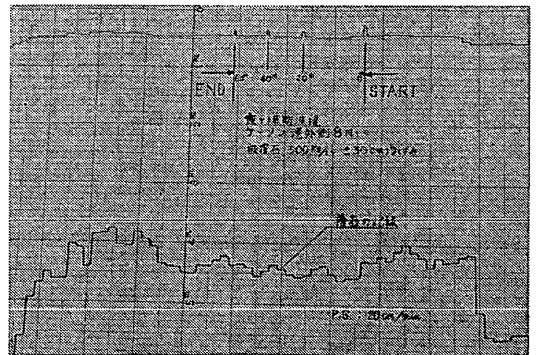


写真-11 捨石面検出記録

た。その結果の一例を写真-11に示す。この記録は、デジタル信号をD-Aコンバータでアナログ信号に変換して、ペンレコーダで水深を記録したものである。この記録によれば、従来の放電破壊記録紙による記録と比較して、超音波パルス幅による記録の延伸に起因する読み取りにくさがなく水深が明瞭に判読でき、読み取り誤差も少なくなる利点があることがわかる。

5.2 横須賀港捨石マウンド検出実験

室内実験及び四日市港における現地実験によってクロスアレイ方式、特に周波数が500kHzで超音波ビームの

焦点を対象物に結んだ凹面配置クロスアレイ方式の送受波器が捨石マウンド等施工面検測に有効であることが判明したので、この方式の送受波器を用いて横須賀港新港-10m岸壁捨石マウンドにおいて現地実験を行った。

(1) 実験用機材

超音波実験装置として下記の装置を用いた。

a) 500kHz 凹面配置クロスアレイ型送受波器

16素子, 焦点距離10m

b) ファンクションゼネレータ

0.001Hz~5MHz

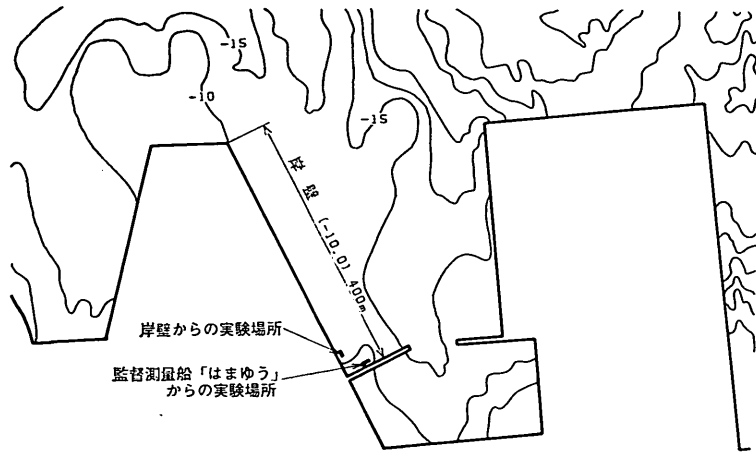


図-34 横須賀港捨石マウンド検測実験場所

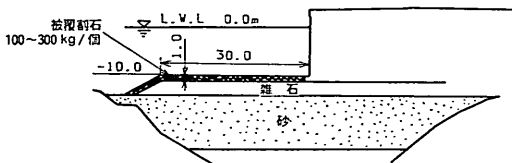


図-35 供試捨石マウンド断面図

c) 電力増幅器

10kHz~500kHz 55dB

d) オシロスコープ

DC~50MHz 2mV~5V/DIV

e) 送受波器取付金物(合金製はしご, 鋼管)

その他, 海域環境条件(水温, 電導度, 濁度等)を測定するための水質計, 採水器, 透明度板, 測鉛を使用した。

(2) 実験概要

実験場所は, 断面形状が既知でならしずみの捨石マウンドで, 比較的風波や潮流等海象条件のよいこと, 地理的条件や調査日程を考慮して, 横須賀港新港-10m岸壁の基礎マウンドを選定した。(図-34)(図-35)

実験は, 超音波実験装置の送受波器を, 岸壁及び調査船(横須賀港監督測量船「はまゆう」)のげん側から吊り下し, 捨石マウンド面からの超音波の反射強度, 残響特性をオシロスコープにて観測記録すると同時に水深の参考データとするためレッド(3.2kg 測鉛に10cmφの円板付属)測深を行った。

また, 海域環境条件調査のため, 採水を行い水温, 電導度, 濁度, ペーパー等の水質を測定した。

a) 岸壁からの測定

送受波器の動揺による測定値の変動を防ぐために, 送

受波器を岸壁から吊り下げて実験を行った。測定位置は, 図-36に示すように岸壁から1m離れた地点より, 幅1mの範囲を20cmの間隔で, 超音波及びレッドで測定した。送受波器は図-37のように鋼管の先端に取付け, この鋼管をはしごに固定しこれを錘で押えた。またレッドはロープをパイプに結び, 海底へ吊り下げることによって水深を測定した。測定中, 30分ごとに海水を表面, 中間, 海底の3点から採水し, バケツに移して, 水質計により水温, 濁度, 電導度, ペーパー, DO(溶存酸素)を測定した。超音波測定の最初と最後に音速度補正のためのパーチェックを行った。(写真-12)

b) 調査船からの測定

調査船を図-38のように捨石マウンド面に係留し, 調査船のげん側から送受波器を下ろし超音波計測を行った。同時にレッドを用い, 同一地点の水深を計測した。また水質計で水質を測定した。(写真-13)

超音波計測では, 船の動揺により受波レベルが変動するので, その最高, 最低の振幅を読みとった。

(3) 実験結果

a) 岸壁からの測定

岸壁からの超音波計測の結果を表-3に示す。送信電圧は200V_{P-P}, パルス幅50μsの超音波パルスを放射し, 受信電圧 $E_R(V)$, E_R を1mVを基準レベルとした受波レベル $E'_R(dB)$, 超音波の往復伝搬時間 $T(ms)$, パーチェックまたは水温, 塩分補正による音測深度, レッドによる深度について記入している。

実験海域の水深が予想に反して5m程度と浅いため, 10mに焦点がくるように作ってある凹面配置クロスレイ送受波器では, 超音波ビームがまだ絞られない分解幅の広い位置で測定したことになり, 分解能低下によりあ

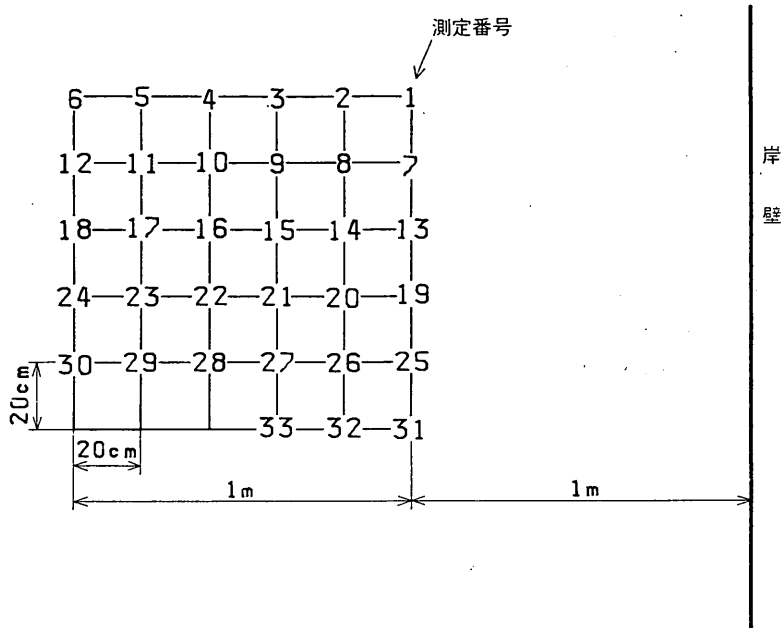


図-36 測定位置

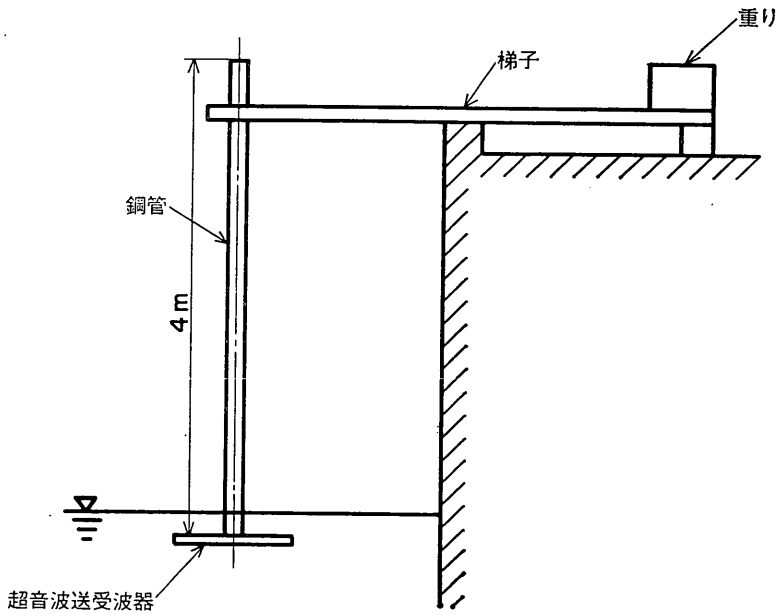


図-37 送受波器設置状況

まり精度よく測定することができなかつた。図-14に室内実験により水深5m附近の分解幅を求めた結果を示す。この図から本現地実験の水深5.5m附近では、分解幅は約24cmとなり、焦点10mの分解幅約8cmに比べて分解能が低下していることがわかつた。

またレッド測深については、実験位置が岸壁と防波堤とが接続されたところで、沖側から打ち寄せる波が岸壁や防波堤に当たり、その反射された波が、次の打ち寄せ波と衝突し、複雑な波や、流れを作つたため、測深のために海中に投入されたレッドは押し流されて、超音波で

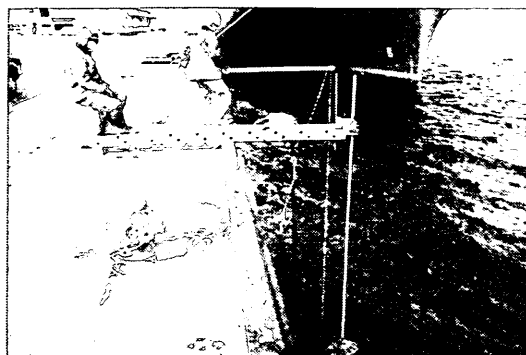


写真-12 捨石面検測実験状況 (横須賀港-10m岸壁)

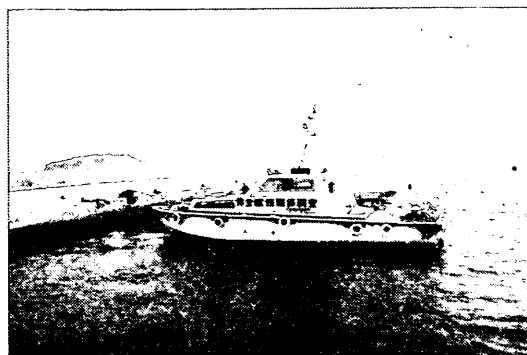


写真-13 調査船による検測

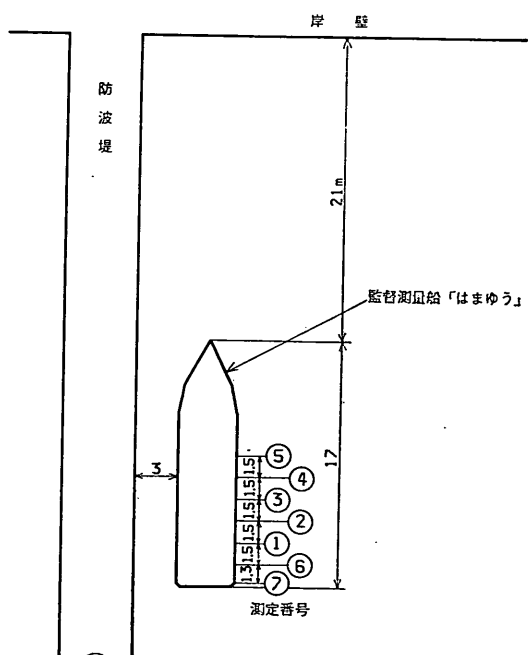


図-38 調査船による測定位置

計測した地点を必ずしも計っているかどうかは、海上からでは海水が濁っているため確認できなかった。したがって、レッド測深値を真値として超音波計測値と比較して測深の精度を判定することはできなかった。

海域の水質を測定するため水質計で、水温、電導度、濁度、pH、DOを測定した。この中で電導度は塩分(%)に換算し、水温とともに音速補正表²⁾で補正音速を求め、音測水深を補正した。

超音波測深には、海底捨石マウンドからの反射波の受信レベルがあることが欠測なく計測することには必要不

可欠である。そこで表-3のデータを用い、式で捨石面における超音波の反射損失 RL (dB)を求めた。表-4に各計測点の反射損失を示す。33計測点の平均値は水深5.453mで-3.694dBであった。

b) 調査船からの測定

調査船からの超音波計測とレッド計測の結果を表-5に示す。送信電圧 E_S が200(V_{P-P})、パルス幅50(μs)、送波音圧113.6(dB-m)の超音波パルスを放射し、受信電圧 E_R (V_{P-P})、 E_R 1 mVを基準レベルとした受信レベル E_R' (dB)、超音波の往復伝搬時間 T (ms)、パーチェックまたは水温、塩分補正による音測深度、レッドによる深度について記述している。レッド測深による深度は、海底捨石の状態が海上から目視できないため、超音波計測位置とレッド測深位置のずれや、石と石との隙間にレッドが入り込んで見掛け上水深が深く測られたりしているものと考えられ、超音波計測値と一致しないデータがみられる。したがってレッド測深値はその計測点での参考データであって、超音波計測値の精度の判定のための真値として使用できないと考えられる。

超音波計測の分解幅は、水深が6.5m程度であるので、図-14から10cmであり比較的精度よく計測できたものと考えられる。

船の動揺による超音波受波レベルは、動揺計を使用しなかったため船の傾斜角と受波レベルを定量的に明らかにすることはできないが、船舶停止時の長周期のうねりによる船体動揺は受波レベルを表-6に示すように最大値と最小値で最高4倍程度変動することがわかった。

表-6に捨石面における超音波の反射損失を示す。反射損失の平均値は、最大値で-1.17dB、最小値で-9.36dBであり、欠測なく計測できることが確かめられた。

写真-14⁴⁾に受信電圧のオンロ波形を示す。受波波形部分を拡大したもので、パルス立上り部分や複雑な捨石面

表-3 捨石マウンド計測結果(岸壁)

位 置	受 波 レ ベ ル		超音波の往復伝搬時間 T (ms)	測 深 値	
	E_R (V _{P-P})	E_R (dB)		超音波計測 x (m)	レッド計測 x' (m)
1	0.200	-46.02	7.40	5.511	5.534
2	0.280	-48.94	7.50	5.586	5.514
3	0.190	-45.58	7.50	5.586	5.544
4	0.160	-44.08	7.50	5.583	5.564
5	0.140	-42.92	7.50	5.583	5.574
6	0.140	-42.92	7.50	5.583	5.524
7	0.040	-32.04	7.30	5.434	5.544
8	0.205	-46.24	7.50	5.583	5.574
9	0.250	-47.96	7.53	5.605	5.524
10	0.150	-43.52	7.53	5.605	5.534
11	0.240	-47.60	7.50	5.583	5.684
12	0.120	-41.58	7.55	5.620	5.724
13	0.110	-40.83	7.20	5.363	5.318
14	0.040	-32.04	7.20	5.363	5.288
15	0.080	-38.05	7.30	5.194	5.258
16	0.096	-39.65	7.40	5.507	5.288
17	0.140	-42.92	7.40	5.507	5.288
18	0.156	-43.86	7.40	5.507	—
19	0.100	-40.00	7.20	5.350	5.238
20	0.060	-35.56	7.20	5.350	5.258
21	0.046	-33.26	7.10	5.276	5.258
22	0.080	-38.06	7.30	5.425	5.268
23	0.120	-41.58	7.30	5.424	5.328
24	0.136	-42.67	7.30	5.424	—
25	0.160	-44.08	7.20	5.350	5.158
26	0.144	-43.17	7.20	5.350	5.168
27	0.096	-39.65	7.20	5.350	5.408
28	0.070	-36.90	7.20	5.350	5.148
29	0.156	-43.86	7.35	5.458	5.598
30	0.144	-43.17	7.25	5.384	5.178
31	0.156	-43.86	7.20	5.347	5.168
32	0.128	-42.14	7.25	5.384	5.328
33	0.156	-43.86	7.30	5.421	5.418

からの超音波の反射の様相をうかがいすることができる。

6. 実験結果とその考察

以上の室内実験, 現地実験の結果をとりまとめ考察する。

6.1 室内実験

(1) 予備モデル実験

a) 水平分解能測定

水平分解能良否の目安として, 二つのブロック対象物

からの受波レベルが形成する山と山との間隔をエコーの間隔として, 実際の対象物の間隔と比較する方法が考えられる。図-22の実験結果から各送受波器の対象物の間隔に対するエコーの間隔を求めた結果を図-39に示す。図-41で横軸に水底に設置したブロック対象物の間隔 l (mm) を, 縦軸にエコーの間隔 l' (mm) を示す。図の45°の傾斜で引いた斜線は, l と l' が等しい点で, この線より上の位置に l' があれば二つの対象物を分離して検出できることを示す。この図から, 500kHz クロス方式は, どの間隔でも斜線より上にあって水平分解能が

表-4 捨石面における反射特性（岸壁より計測）

位 置	水 深 $x(m)$	送信電圧 $E_s(V)$	受信電圧 $E_R(V)$	伝搬減衰 $TL(dB)$	送 受 波 器 感 度 積 $k_s \cdot k_m (dB)$	拡散損失 $SL(dB)$	反射損失 $RL(dB)$
1	5.511	200.0	0.200	-60.00	-39.80	-20.85	0.65
2	5.586	200.0	0.280	-57.08	-39.80	-20.96	3.68
3	5.586	200.0	0.190	-60.45	-39.80	-20.96	0.31
4	5.583	200.0	0.160	-61.94	-39.80	-20.96	-1.18
5	5.583	200.0	0.140	-63.10	-39.80	-20.96	-2.34
6	5.583	200.0	0.140	-63.10	-39.80	-20.96	-2.34
7	5.434	200.0	0.040	-73.98	-39.80	-20.72	-13.45
8	5.583	200.0	0.205	-59.79	-39.80	-20.96	0.97
9	5.605	200.0	0.250	-58.06	-39.80	-20.99	2.73
10	5.605	200.0	0.150	-62.50	-39.80	-20.99	-1.71
11	5.583	200.0	0.240	-58.42	-39.80	-20.96	2.34
12	5.620	200.0	0.120	-64.44	-39.80	-21.02	-3.62
13	5.363	200.0	0.110	-65.20	-39.80	-20.61	-4.79
14	5.363	200.0	0.040	-73.98	-39.80	-20.61	-13.57
15	5.194	200.0	0.080	-67.96	-39.80	-20.33	-7.83
16	5.507	200.0	0.096	-66.38	-39.80	-20.84	-5.74
17	5.507	200.0	0.140	-63.10	-39.80	-20.84	-2.46
18	5.507	200.0	0.156	-62.16	-39.80	-20.84	-1.52
19	5.350	200.0	0.100	-66.02	-39.80	-20.59	-5.63
20	5.350	200.0	0.060	-70.46	-39.80	-20.59	-10.07
21	5.276	200.0	0.046	-72.77	-39.80	-20.47	-12.50
22	5.425	200.0	0.080	-67.96	-39.80	-20.71	-7.45
23	5.424	200.0	0.120	-64.44	-39.80	-20.71	-3.93
24	5.424	200.0	0.136	-63.35	-39.80	-20.71	-2.84
25	5.350	200.0	0.160	-61.94	-39.80	-20.59	-1.55
26	5.350	200.0	0.144	-62.85	-39.80	-20.59	-2.46
27	5.350	200.0	0.096	-66.38	-39.80	-20.59	-5.99
28	5.350	200.0	0.070	-69.12	-39.80	-20.59	-8.73
29	5.458	200.0	0.156	-62.16	-39.80	-20.76	-1.60
30	5.384	200.0	0.144	-62.85	-39.80	-20.64	-2.41
31	5.347	200.0	0.156	-62.16	-39.80	-20.58	-1.78
32	5.384	200.0	0.128	-63.88	-39.80	-20.64	-3.44
33	5.421	200.0	0.156	-62.16	-39.80	-20.70	-1.66
平均値	5.4529	200.0	0.1360	-63.350	-39.80	-20.753	-3.694

よいことがわかる。また分解能がよくないのは 200kHz クロス及び多素子方式で l が 10mm では l' が 0 となって分解できないことを示す。これは、超音波ビームの対象物位置における分解幅 l_0 が 500kHz の送受波器に比べて大きい二つの対象物にまたがって超音波ビームが照射され、同時に二つの対象物からのエコーが重なって受波されたものと考えられる。

次に 2.3 で述べたデータ処理による分解能向上の効果について考察する。図-22 で得られた対象物からの受波

レベル E_{RX} から水槽底から得られた受波レベル E_{RB} を割って得られた値を 1 mV を基準レベルとした dB 表示に直して示したのが、図-22 の $E_{RX}-E_{RB} (dB)$ である。各送受波器の中でいちばん分解能のよい 500kHz クロス式送受波器の一例を示したものである。この図によれば、処理前の対象物からの受波レベル $E_{RX}(dB)$ に比較して、処理後の $E_{RX}-E_{RB}(dB)$ の値は、二個の対象物の間に形成する受波レベルの山と谷の深さすなわちレベル差が大きくなって二個の対象物の受波レベルが強調

表-5 調査船による計測結果

位 置	受 波 レ ベ ル		超音波の往復伝搬時間 T (ms)	測 深 値	
	E_R (V _{P-P})	E'_R (dB)		超音波計測 x (m)	レッド計測 x' (m)
1	0.220	46.85	9.0	6.701	6.700
2	0.100	40.00	8.4	6.254	6.320
3	0.150 0.060	43.52 35.56	9.1	6.704	6.730
4	0.160 0.804	44.08 38.06	8.4	6.252	6.200
5	0.150 0.040	43.52 32.04	8.5	6.332	6.330
6	0.140 0.060	42.92 35.56	9.0	6.257	6.150
7	0.160 0.040	44.08 32.04	8.6	6.704	7.100

表-6 捨石面における反射特性 (調査船より計測)

位 置	水 深 x (m)	送信電圧 E_s (V)	受信電圧 E_r (V)	伝搬減衰 TL (dB)	送受波器積感度 $k_s \cdot k_m$ (dB)	拡散損失 SL (dB)	反射損失 RL (dB)
1	6.706	200.0	0.220	-59.17	-39.8	-22.54	3.17
2	6.254	200.0	0.100	-66.02	-39.8	-21.94	-4.28
3	6.704	200.0	0.150 0.060	-62.50 -70.46	-39.8	-22.55	0.15 -8.11
4	6.252	200.0	0.160 0.080	-61.94 -67.96	-39.8	-21.94	-0.20 -6.22
5	6.332	200.0	0.150 0.040	-67.96 -73.98	-39.8	-22.05	-6.11 -12.13
6	6.257	200.0	0.140 0.060	-63.10 -70.46	-39.8	-21.95	-1.35 -8.71
7	6.704	200.0	0.160 0.040	-61.94 -73.98	-39.8	-22.55	0.41 -11.63

され、結果として水平分解能の向上に役立っていることがわかる。

b) 垂直分解能測定

図-23 から垂直分解能のよい送受波方式を順番に並べると、①500kHz クロス方式、②500kHz 多素子方式、③200kHz クロス方式、④200kHz 多素子方式の順であることは一目瞭然にわかることであるが、これを定量的に評価する方法として、対象物からの受波レベルの波形

と、他の受波レベルの波形で囲まれた面積の大きさを比較して面積が大ほど分解能がよいとするものである。

この方法でそれぞれ各送受波方式の面積を求めてみると図-23 に示すとおりとなる。面積の単位は mm² である。この結果から、垂直分解能のよい順位は上記のとおりであることが定量的に把握できる。このことから、垂直分解能は高周波ほど、超音波ビーム幅が狭いほどよいことがわかった。

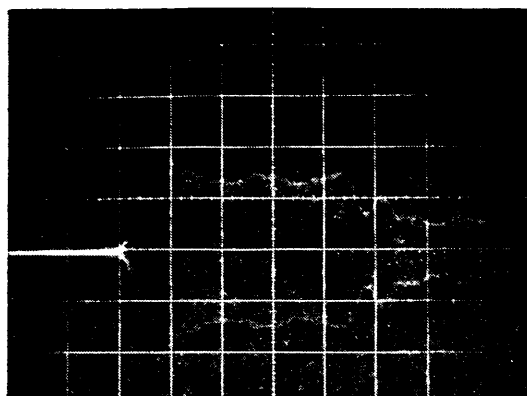


写真-14 受信電圧のオシロ波形の一例

c) 斜入射反射レベルの測定

図-24によると、対象物の傾斜角が大きくなればなるほど、水平のときに比べて受波レベルが小さくなり検出が困難となることがわかる。そこで2.3に示したような分解能向上のためのデータ処理を施してみる。まず、受波音圧の和/差方式を用いた結果を示すと、図-24の E_R^+ が和接続、 E_R^- が差接続した場合の受波レベルで、その和接続の受波レベルと差接続の受波レベルの比、すなわち、dB表示ではその差となって $(E_R^+ - E_R^-)$ で表されることになる。図-24で×印で示したのがその値で、これによると、対象物が水平の場合は処理しない受波レベルと同じであるが、対象物が傾斜した場合の $(E_R^+ - E_R^-)$ の値は対象物の角や縁からの受波レベルが顕著となるこ

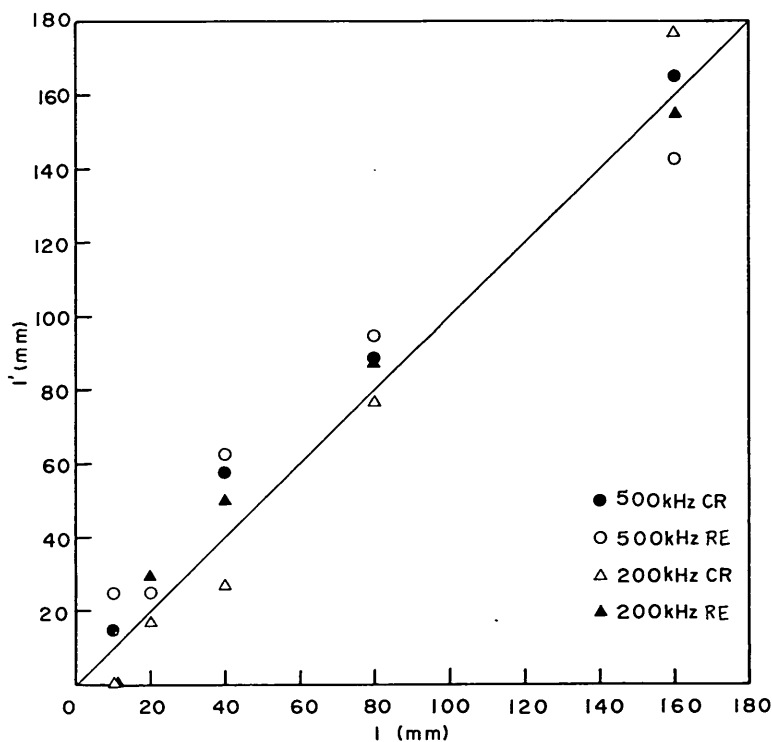


図-39 対象物の間隔とエコーの間隔 (予備モデル実験)

表-7 捨石モデル検測の精度

測定位置	標準偏差		平均			$\frac{(B)-(A)}{(B)} \times 100$
	音測値	レッド計測値	音測値(A)	レッド計測値(B)	(B)-(A)	
砂面(-5~-1)	0.00774 ^m	0.00869 ^m	0.8961 ^m	0.9021 ^m	0.0060 ^m	0.6651%
石法面(0~20)	0.01898	0.00164	0.8623	0.8699	0.0076	0.8737
石天端面(21~45)	0.00884	0.00755	0.8380	0.8382	0.0002	0.0239

とがわかった。また、対象物表面の受波レベル E_{RX} を水底の受波レベル E_{RB} との差 ($E_{RX}-E_{RB}$) で表現すると 図-24 に示すとおり対象物が傾斜していても対象物からの受波レベルが顕著となり水平分解能も向上することがわかった。

d) 捨石モデル検測実験

測点が -5~-1 点までの砂底質、0~20 点までの石の法面、21~45 点までの石の天端面それぞれの超音波計測値及び錘りによる計測値の平均値と標準偏差を求めると 表-7 のようになる。標準偏差は砂底質では音測値とレッド計測値はほとんど等しく、石の法面では音測値のほうが1桁大きく、石の天端面では両者ともほとんど等しいことがわかる。すなわち、法面では音波の散乱による音測値の変動が大きく影響したのではないかと考えられる。レッド計測値と音測値の平均値の差、すなわち (B)-(A) を求めてみると、砂底質では 6mm 音測値が浅く計測され 0.67% の誤差、石の法面では 7.3mm 音測値が浅く計測され 0.87% の誤差、石の天端面では 0.2 mm 音測値が浅く計測され 0.02% の誤差となる。これは砂底質では錘りの重量による砂中への沈下が、石の法面では、音波斜入射により誤差を生じ、石の天端面では

音波垂直入射で、超音波ビーム幅と錘りの寸法がほぼ等しかったから測深値の差が生じなかったと考えられる。

(2) 大型実験水槽による実物大模型実験

各種送受波器の水平分解能良否の判定法として、予備モデル実験で行った方法を用いる。すなわち二つのブロック対象物からの受波レベルが形成する山と山との間隔をエコーの間隔として、実際の対象物の間隔と比較する方法である。図-31 の実験結果から各送受波器の対象物の間隔に対するエコーの間隔を求めた結果を図-40 に示す。

クロス式送受波器それぞれの受波レベル (E_{RX}) によるエコー間隔及びデータ処理 ($E_{RX}-E_{RB}$) によるエコー間隔を求めた結果、図-40 からわかるように 45° の線から下にある 500kHz 平面クロス 16 素子の送受波器がいちばん分解能が悪く、45° の線の上側で線に近い 500 kHz 凹面クロス 16 素子が一番分解能がよいことがわかる。また、データ処理 ($E_{RX}-E_{RB}$) すれば、500kHz 平面クロス 16 素子の送受波器のように未処理の場合、対象物の間隔が 10cm の場合分解できなかったのが、データ処理することによって分解できるようになったのがわかる。

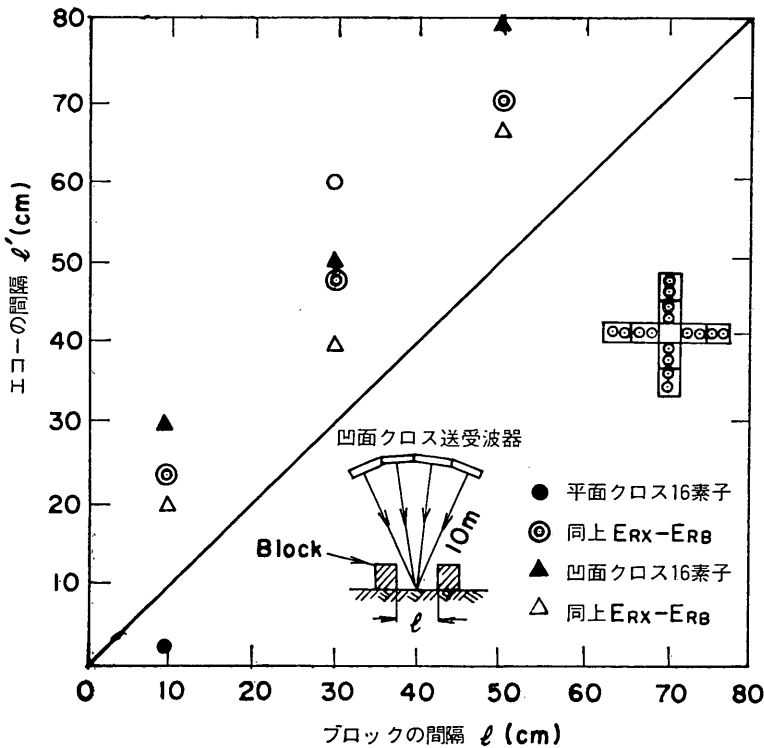


図-40 ブロックの間隔とエコーの間隔 (実物大実験)

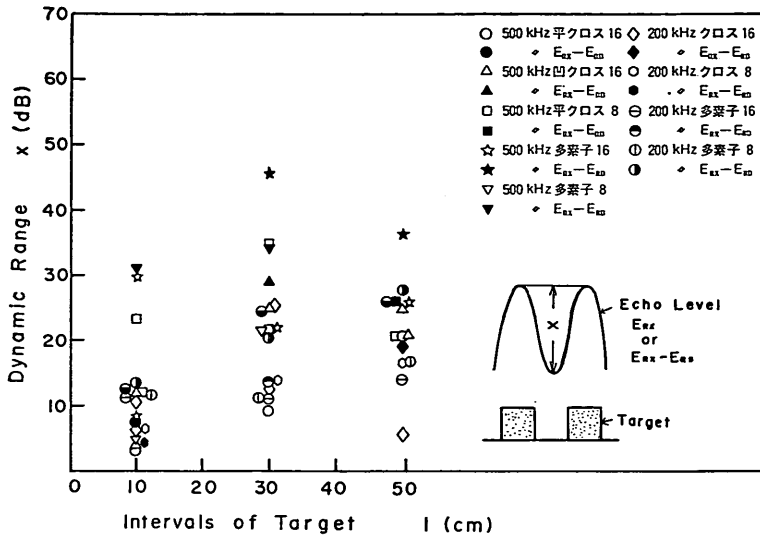


図-41 対象物の間隔とダイナミックレンジ

表-8 海底捨石面検測の精度

実験場所	標準偏差		平均値			$\frac{(B)-(A)}{(B)} \times 100$
	音測値	レッド計測値	音測値(A)	レッド計測値(B)	(B)-(A)	
岸壁からの測定 (天端面)	0.11622 ^m	0.17033 ^m	5.4521 ^m	5.3935 ^m	-0.0586 ^m	-1.0865%
船による測定 (法面)	0.23109	0.34799	6.4577	6.5043	0.0466	0.7164

また水平分解能良否の目安として、受波レベルの谷の深さ、すなわちダイナミックレンジ x (dB) で表す方法がある。これは受波レベルの山と谷の深さ、すなわちレベル差が大きいほど分解能がよいとみなすものである。この方法で各送受波器の各対象物間隔ごとにダイナミックレンジ x (dB) をグラフに表したのが図-41である。この図から、データ処理 ($E_{Rx} - E_{Rb}$) を行えば、ダイナミックレンジ x (dB) が大となり、分解能が向上することがわかる。図-31に500kHzクロス平面16素子及びクロス凹面16素子の受波レベル E_{Rx} 及びデータ処理後の受波レベル ($E_{Rx} - E_{Rb}$) を示す。この図からデータ処理すれば水平分解能向上に有効であることがわかる。

6.2 現地実験

(1) 四日市港捨石マウンド検測実験

超音波検測に不可欠な捨石面における超音波反射損失の測定結果は表-2に示すとおり、200kHz円板型送受波器がいちばん小さく、200kHzクロス(16素子)、クロス(8素子)、200kHz多素子(16素子)、多素子(8素子)

子)、送信が円板型受信、受信がクロス(8素子)、送信が円板型、受信がクロス(4素子)の順に大きくなっている。クロス式と多素子式を比較してみると、クロス式が約-10dBで反射損失がよいことがわかり、欠測なく超音波検測ができることが確かめられた。送信が円板型、受信がクロス式送受波器は、送受別々で音響中心位置がずれているためと、捨石面における分解面積が広いため、反射損失が大きく、約-28~-38dBで実用性に問題があることがわかった。

走航中の捨石面の音響測深記録では、デジタル測深機を使用したため記録面の読み取り誤差は少なくなるが、船速とサンプリングの周期、トリガレベルの設定など今後検討する必要があるだろう。

(2) 横須賀港捨石マウンド検測実験

岸壁からの検測実験では、前に述べたようにレッドによる計測は波及び潮流によって満身に計測できなかったが、レッド計測を仮に真値として音測値とレッド計測値の平均値及び標準偏差を求めてみると表-8に示すよう

表-9 各送受波器の特性と検測効率

項目 送受波器種別	$k_a \cdot k_m$ (dB)	TL (dB)	SL (dB)	RL (dB)	水深 Z(m)	分解幅 (cm)	対象物	検測効率 (dB)	実験種別
500kHz クロス4素子	-4.80	-39.25	-5.58	-28.87	0.950	1×4 (4cm ²)	コンクリートブロック 3×3×5cm	-40.92	モデル実験
500kHz 多素子4素子	-4.80	-32.33	-2.28	-25.25	0.650	3.2×3.6 (11.52cm ²)	"	-46.48	"
200kHz クロス4素子	-12.00	-46.02	0.92	-34.94	0.450	5.2×1.4 (7.28cm ²)	"	-52.18	"
200kHz 多素子4素子	-12.00	-41.51	3.10	-32.61	0.350	4.0×5.8 (23.2cm ²)	"	-59.92	"
500kHz クロス16素子 (平面)	-40.00	-61.84	-25.58	3.74	9.500	27×27 (729cm ²)	コンクリートブロック 39×38×50cm	-53.51	実物大実験
500kHz " (凹面)	-39.80	-61.44	-25.58	3.94	9.500	8×8 (64cm ²)	"	-32.18	"
500kHz " 8素子(平面)	-31.20	-52.04	-25.58	4.74	9.500	14×14 (196cm ²)	"	-41.11	"
500kHz " (凹面)	-29.00	-51.54	-25.58	3.05	9.500	14×14 (196cm ²)	"	-42.80	"
500kHz 多素子16素子	8.40	-52.04	-25.58	-34.86	9.500	33.2×17.2 (571cm ²)	"	-89.99	"
500kHz " 8素子	12.60	-46.38	-25.58	-33.40	9.500	33.2×33.2 (1,102cm ²)	"	-94.24	"
200kHz クロス16素子	-21.10	-37.95	-25.58	8.73	9.500	20×20 (400cm ²)	"	-43.31	"
200kHz " 8素子	-15.60	-40.45	-25.58	0.73	9.500	33×33 (1,089cm ²)	"	-60.01	"
200kHz 多素子16素子	-11.00	-29.37	-25.58	7.21	9.500	20×20 (400cm ²)	"	-47.07	"
200kHz " 8素子	-9.90	-41.41	-25.58	-5.93	9.500	33.6×32.6 (1,062.8cm ²)	"	-54.60	"
200kHz クロス16素子	-21.10	-49.54	-19.44	-9.00	4.690	24×24 (576cm ²)	捨石面 300kgf/1個	-64.21	現地実験
200kHz " 8素子	-15.60	-46.02	-19.63	-10.79	4.793	16.7×16.7 (278.9cm ²)	"	-59.70	"
200kHz 多素子16素子	-11.00	-42.69	-19.38	-12.31	4.657	33.9×21.1 (715.8cm ²)	"	-69.40	"
200kHz " 8素子	-9.89	-46.02	-19.24	-16.89	4.581	33.2×43.2 (1,434.2cm ²)	"	-80.03	"
200kHz 円板型(送) 200kHz クロス8素子(受)	-20.60	-69.54	-20.76	-28.18	5.456	54.1φ(送) 143.7×23(受)	"	-90.56	"
200kHz 円板型φ100 (送受信)	-25.00	-49.54	-20.27	-4.27	5.160	54.1φ (2,297.6cm ²)	"	-71.50	"
200kHz 円板型(送) クロス4素子(受)	-14.60	-72.64	-20.27	-37.77	5.156	54.1φ 135.8×18.0	"	-97.52	"
500kHz クロス16素子 (凹面)	-39.80	-63.35	-20.75	-2.80	5.453	24×24 (576cm ²)	"	-58.01	"
500kHz クロス4素子	-4.80	-59.04	-4.67	-49.52	0.856	1×4 (4cm ²)	玉石 7×7×1cm	-61.56	捨石 モデル実験
"	-4.80	-62.84	-5.09	-52.96	0.898	1×4 (4cm ²)	砂	-65.00	"

になる。この表で標準偏差はレッド計測値のほうが大きくなっているのは超音波ビームの分解幅が22cmと広がっているため10cm直径の円板をつけたレッド計測のほうが凹凸が大きくなったものと考えられる。また計測値の平均値は音測値のほうが約5cmほど深くなっているのは、レッド計測位置とのずれによるものと考えられる。計測の精度は-1.1%で検測条件が悪かったにもかかわらずいいほうであろう。なお欠測なく検測するために必要な捨石面の反射損失は、平均値が-3.694dBで約65%の超音波の音圧が受波器に帰着するため捨石検測には支障がないことがわかった。

調査船による法面の検測では、レッド計測値と音測値の平均値と標準偏差は表-11に示すとおりで標準偏差はやはりレッド計測値のほうが大きい。多分レッド先端が10cmφしかないため、石と石との隙間や凹部に落下して見掛け上凹凸があるように計測されたものと考えられる。深さの平均値はレッド計測のほうが音測に比べて4.7cmほど深く計られ、レッド計測値を真値と仮定した場合の平均的誤差は、0.72%でありかなりよい精度で計測できたと考えられる。次に検測に不可欠な捨石面の反射損失は、船の動揺のため受波レベルが変動し、最低が平均、-1.17dB、最高が-9.36dBであり、8.19dBの差すなわち2.6倍の変動である。最低値で34%の音圧が反射して受波器に帰着するので欠測の心配はないことがわかる。

6.3 施工面検測方式の検討

室内及び現地実験の結果、送受波方式がクロス方式と多素子方式、使用周波数が200kHz及び500kHzの送受波器の中で、500kHzクロスアレイ方式が捨石マウンド等施工面検測用送受波方式に適していることがわかったが、これを定量的に検討してみる。

いま、分解能の目安として下記のような検測効率を定義してみる。

$$\begin{aligned} \text{検測効率 } \eta &= \frac{\text{超音波の反射率 } (R_p)}{\text{超音波ビームの分解面積 } (S)} \\ &= 20 \log \frac{R_p}{S} \\ &= \{ \text{超音波の反射損失 } (RL) \} \\ &\quad - \{ 20 \log (\text{超音波ビームの分解面積 } (S)) \} \text{ (dB)} \quad \cdots \cdots \cdots \text{ (例)} \end{aligned}$$

すなわち、対象物からの超音波の反射率 R_p が大きいほど（反射損失 RL が小さいほど）エコーレベルが高いので検測の精度は向上する。また超音波ビームの分解面積（送波分解幅 × 受波分解幅）は小さいほど水平分解能が向上する。したがって検測効率 η が大きいほど、

検測の精度がよいことがわかる。

この方法で実験の結果を整理してみると、表-9に示すようになる。モデル実験で4種類の送受波器を使用した。500kHzクロス4素子が-40.92dBで検測効率がいちばんよい。実物大実験では10種類の送受波器を使用した。500kHzクロス16素子（凹面）が-32.18dBでいちばん検測効率がよい。現地実験では、四日市港においては周波数を200kHzに統一して7種類の送受波器を使用した。やはり200kHzクロス8素子が-59.7dBでいちばん検測効率がよいことがわかる。また横須賀港においては500kHzクロス16素子（凹面）一種類の送受波器を用いたが検測効率は岸壁計測で-58.9dB、船からの計測で最高が、-41.17dB、最低で-49.36dBで他の現地実験で使用した送受波器よりもよく、凹面配置500kHzクロスアレイ式の送受波方式が捨石面検測に最適であることがわかる。

7. ま と め

本開発研究の結果をとりまとめてみると次のようになる。

7.1 室内実験

(1) 予備モデル実験

a) 多素子式、クロス式の水平分解能を比較すると分解幅の狭いクロス式のほうが水平分解能がよいことがわかった。

b) ブロック表面の受波レベル E_{RX} を水底の受波レベル E_{RB} との差で表現するとブロックの存在が顕著となることがわかった。

c) 垂直分解能は高周波で超音波ビーム幅の狭い、500kHzクロス方式の送受波器がよいことがわかった。

d) 2個の受波器素子の和出力 E_{RX}^+ と差出力 E_{RX}^- との差をとるデータ処理をすると、対象物が斜めになっている場合、対象物の角や縁からの受波レベルが顕著となることがわかった。

e) 捨石モデル検測実験では、音測値はレッド計測値と比較すると、傾斜角約12°の法面で0.87%の誤差、天端面では0.02%の誤差で高精度に測定できることがわかった。

(2) 大型実物大実験

a) 送受波器のユニット配置を多素子式とした場合とクロス式にした場合の水平分解能を測定した結果500kHz、凹面クロス16素子がいちばんよいことがわかった。

b) 対象物の受波レベル E_{RX} と水底の受波レベル E_{RB} との差をとるデータ処理をすると、対象物の受波レ

ベルが強調され、分解能向上に有効であることがわかった。

7.2 現地実験

a) 四日市港捨石マウンド検測実験では、捨石面における超音波の反射損失はクロス式が -10dB と小さく欠測なく超音波検測ができることがわかった。

b) デジタル測深機を用いた走航検測実験では、記録面の読み取り誤差は少なくなるが、船速とサンプリング周期、トリガレベルの設定等今後検討する必要がある。

c) 横須賀港捨石マウンド検測実験では、 500kHz 凹面配置クロスアレイ方式の送受波器を用いて、初めて実海域の捨石マウンドの検測実験を行ったが、検測条件が悪かったにもかかわらず、検測精度は水深 5.5m で -1.1% 、反射損失 -3.694dB でこの方式で精度よく適確に検測できることがわかった。

d) 調査船を用いた法面検測では、精度は水深 6.5m で 0.72% あり、かなり良い精度で検測できた。また船の動揺による受波レベルの変動は、最低反射損失が -9.36dB で最高値の 2.6 分の 1 になるが欠測なく検測できることがわかった。

7.3 総合評価

以上の実験で使用した各種送受波方式の分解能の目安として検測効率 η を定義してそれぞれ η を求めてみると、モデル実験、実物大実験、現地実験ともに、クロス式、特に超音波ビームの焦点を結んだ。 500kHz 凹面配置クロスアレイ方式の送受波器が、捨石面検測に最適であることがわかった。

8. あとがき

本開発研究は、特別研究「大水深における施工検査及び海底探査技術の開発に関する研究」の一環として行ったものである。

この開発研究によって捨石マウンド等施工面検測に使用する送受波器として凹面配置型クロスアレイ送受波器が捨石検測に有効であることがわかった。また受波系でデータ処理することも分解能向上に資することがわかり、施工面検測技術開発のための貴重なデータが得られた。

しかしながら、この開発のための室内及び現地実験ではすべて送受波器を停止して検測実験を行ったものであり、実用とは異なった条件であるため、今後は測量船に搭載して、現地捨石マウンド海域において走航しながら検測実験を行い、送受波器の耐波性能、船体動揺と検測精度について究明する必要があると考えられる。

なお、横須賀港捨石検測実験において特殊作業船開発

室の山谷弘幸研究官が実験の一部を担当した。(特許出願中)

(1983年11月30日受付)

謝 辞

本現地実験に当たり終始御協力いただいた第二港湾建設局機械課、横須賀港工事事務所、横浜機械整備事務所、並びに第五港湾建設局機械課、四日市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) 日本作業船協会：施工面検測実験装置設計基本調査報告書及び資料集，1980年。
- 2) 木原純孝・早乙女保二：海底捨石マウンド検測用狭ビーム超音波送受波器の試作と実験，日本音響学会講演論文集，1982年3月，pp. 737~738。
- 3) 実吉純一・菊地喜充・能本乙彦：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，昭和53年新訂版。
- 4) 菊池喜充：磁歪振動と超音波，コロナ社，昭和36年。
- 5) 奥島基良・大槻茂雄：凹面振動子のビーム幅の近似評価法と可変開口振動子，超音波医学 Vol. 5, No. 2(1978)
- 6) R. J. ユーリック，土屋明訳 水中音響の原理，共立出版KKK，1978年，
- 7) 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) pp. 227~286。
- 8) 木原純孝・白井一洋 大水深施工検査・海底探査技術の開発(その1)，一大水深海底探査実験装置の設計概要と予備実験一，港湾技研資料 No. 463，1983年。p. 51。

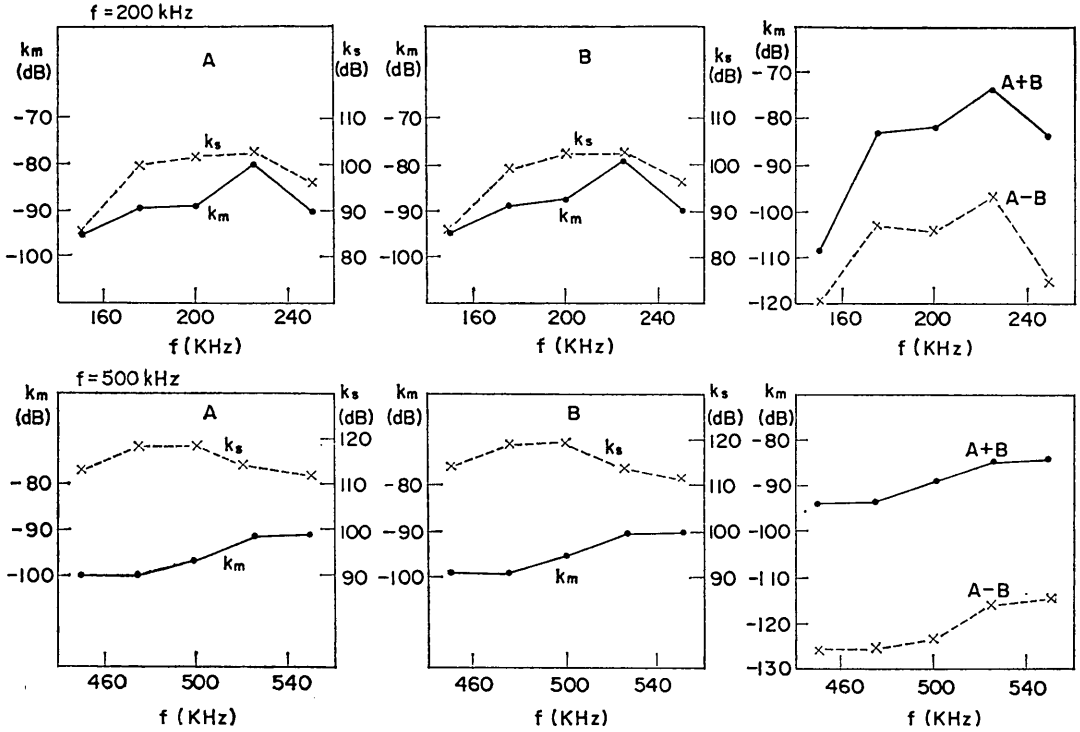
記 号 一 覧 表

- a : 振動子の半径 (cm)
 b : 振動子の辺長の 2 分の 1 (cm)
 c : 音の伝搬速度 (m/s)
 d : 振動子の間隔 (cm)
 E_R : 受信電圧 (V)
 E_S : 送信電圧 (V)
 f : 周波数 (Hz)
 J_1 : 第1種の Bessel 関数
 k_S : 送波感度 (dB re $\mu\text{bar}/\text{V}\cdot\text{m}$)
 k_m : 受波感度 (dB re $\text{V}/\mu\text{bar}$)
 m : 振動子の個数
 n : 振動子の個数
 p : 音圧 (μbar)
 r : 距離 (m)
 R : 凹面体の曲率半径 (m)
 RL : 反射損失 (dB)
 SL : 拡散損失 (dB)
 TL : 伝搬損失 (dB)

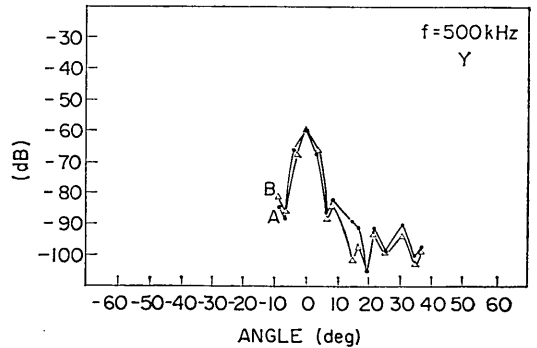
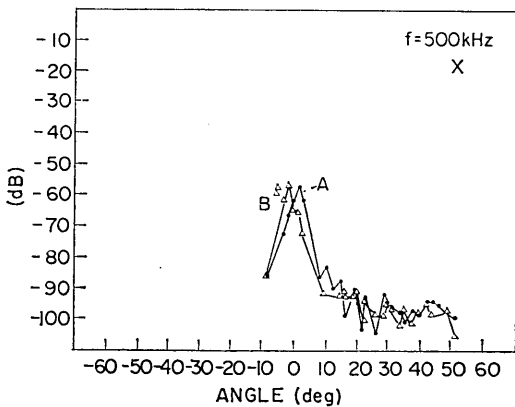
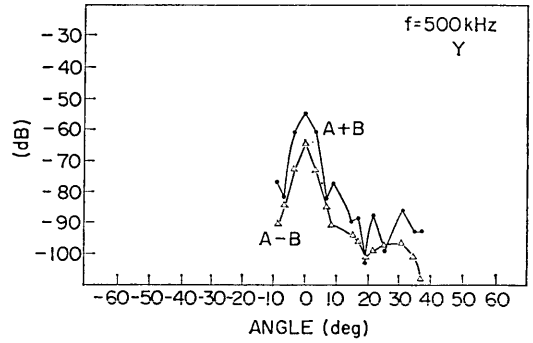
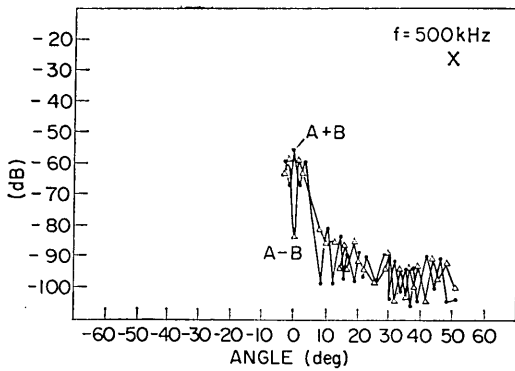
捨石マウンド等施工面検測技術の開発研究

x : 距離 (m)
 α : 角度 (°)
 β : 角度 (°)

γ : 角度 (°)
 θ : 角度 (°)

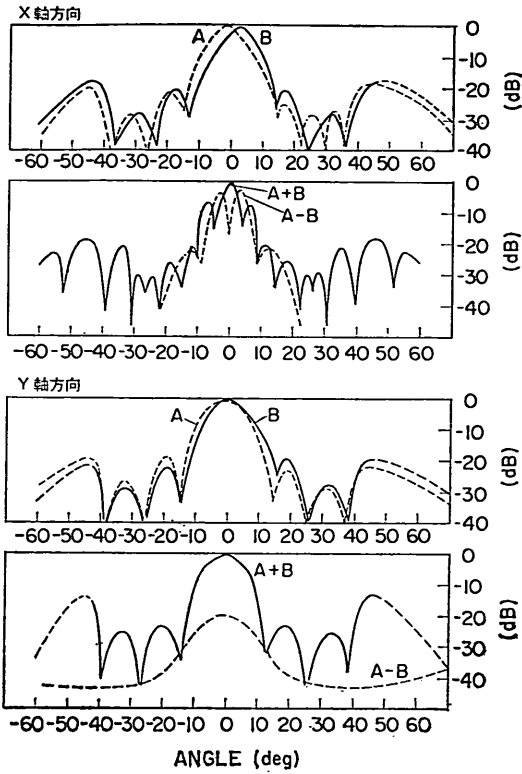


付図-1 送受波器ユニットの送波感度と受波感度

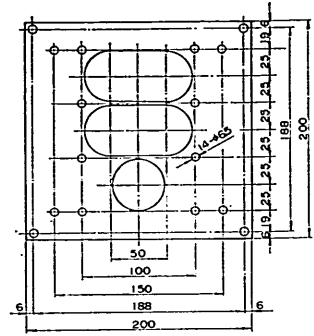


付図-2 500kHz 送受波器ユニットの指向性 (X軸)

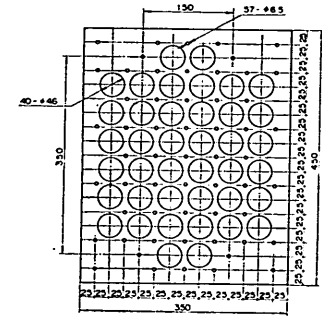
付図-3 500kHz 送受波器ユニットの指向性 (Y軸)



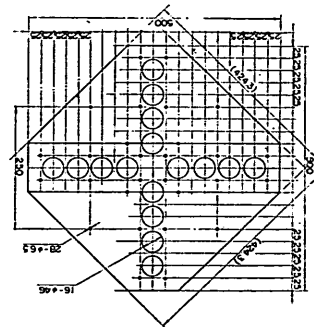
付図-4 200kHz 送受波器ユニットの指向性



付図-5 狭ビーム多素子送受波器モデル実験用取付板



付図-6 狭ビーム多素子送受波器水槽実験用取付板



付図-7 狭ビームクロス送受波器水槽実験用取付板