

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

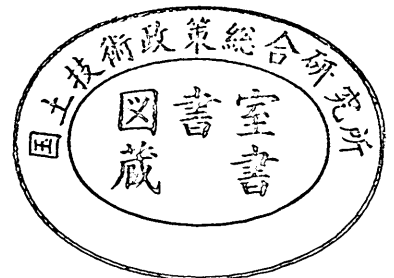
---

VOL. 23

NO. 4

DEC. 1984

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第23巻 第4号 (Vol. 23, No. 4) 1984年12月 (Dec. 1984)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Effects of Wind Shear and Waves on the Structure of Turbulent Streams.....Hiroichi TSURUYA, Hiroya TERAKAWA  
and Yoshikuni MATSUNOBU..... 3  
(流れの乱れに及ぼす風と波の効果.....鶴谷広一・寺川博也・松延嘉國)
2. 振動単純せん断試験による粘性土の繰返し強度特性について  
.....大根田秀明・梅原靖文・樋口嘉章.....71  
(Cyclic Strength Properties of Normally Consolidated  
Clays under Simple Shear Conditions.....Hideaki OHNEDA,  
Yasufumi UMEHARA and Yoshiaki HIGUCHI)
3. 大水深施工検査・海底探査技術の開発 (第2報)  
——海底沈埋異常物探査技術の開発研究——.....木原純孝・白井一洋.....95  
(Development of Ultrasonic Prospecting and Inspection  
Technics for Offshore Underwater Constructions (2nd Report)  
——Development of the Technics for Detecting Underwater  
Buried Objects——.....Sumitaka KIHARA and Kazuhiro SHIRAI)

### 3. 大水深施工検査・海底探査技術の開発(第2報) —海底沈埋異常物探査技術の開発研究—

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、超音波を用いた機雷・砲爆弾等海底沈埋異常物探査装置を開発し、この装置を用いて室内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。

港湾工事においては、安全確保の見地から工事に先立ち、機雷、砲爆弾等海底異常物の有無を確認することになり、海底埋設物探査技術の開発が要請されている。従来よりこれらの形状探査には音波方式が開発されてきたが、超音波の放射にトーンバースト波を用いたため、低周波数での分解能が低下し、海底埋設物特に傾斜埋設物を探知することは困難であった。そこで超音波の放射に電磁誘導型送波器によるモノパルス波を、送波器に凹面配置クロスアレイ方式を用い分解能の向上を図るとともに、受波出力を処理しうる三方向断層像表示装置を開発した。

実験の結果、海底埋設物の三方向断層形状を映像化することができ実用化の可能性を得た。

---

\* 機材部 主任研究官

\*\* 機材部 特殊作業船開発室

**3. Development of Ultrasonic Prospecting and Inspection  
Technics for Offshore Underwater Constructions  
“Development of the Technics for Detecting Underwater  
Buried Objects”**

**Sumitaka KIHARA\***  
**Kazuhiro SHIRAI\*\***

**Synopsis**

This report describes the experiment for the development of ultrasonic technics of detecting underwater buried objects (a mine, a shell, or a bomb).

These objects must be detected and removed before the construction in the sea, to carry out safely it. With this point as background, it has been required to develop the ultrasonic technics of detecting underwater buried objects. This detective technics to use the toneburst ultrasonic waves have been used so far. But on account of the low resolution of the low frequency range of this method, it is difficult to detect the slant objects.

We improved the resolution with the concave cross-array type ultrasonic transducer and the mono-pulse ultrasonic waves to use the electromagnetic induction type transmitter. And we developed the three-direction tomography display apparatus to process the received signal.

At the experiment, we could obtain the three-direction tomography of the underwater buried objects.

---

\* Senior Research Engineer, Machinery Division.

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

## 目 次

要 旨	95
1. まえがき	99
2. モノパルス超音波の放射	99
2.1 電磁誘導型送波器	99
2.2 モノパルス超音波発生原理	100
2.3 駆動力と遠距離音場音圧	100
3. 実験装置の試作	101
3.1 海底沈埋異常物探査実験装置の仕様	101
3.2 従来技術と新技術の比較	104
3.3 電磁誘導型凹面配置クロスアレイの焦点における水平方向音圧分布の計算	104
4. 室内模型実験	106
4.1 予備実験	108
4.2 水中模擬機雷探査実験	109
4.3 砂中模擬機雷探査実験	116
4.4 各種形状対象物水中探査実験	123
4.5 モノパルス超音波の加圧特性実験	128
5. 実験結果と考察	131
6. 結 論	138
7. あとがき	140
参考文献	140
記号一覧表	140

## 1. まえがき

大水深施工検査・海底探査技術の開発の一環として、昭和56年度から58年度にかけて、機雷、砲爆弾等「海底沈埋異常物探査技術の開発」<sup>1)</sup>を行った。

海底下に沈埋している機雷、砲爆弾等磁気異常物の形状を超音波を用いて、海上から適確に探知しうる技術を開発するためには、海底土中の超音波透過率の向上、及び垂直分解能、水平分解能の向上をはかる必要がある。海底土中の超音波の伝搬については、超音波の散乱、吸収を極力減少させるということで、周波数と出力が関係し、分解能を向上させるということで、パルス幅、周波数、指向幅が関係する。また超音波を有効に海底土中の異常物に到達させるため、送波器部を大水深の海底面上に近づける必要があるということで、送受波器の耐水圧性能、音波放射にともなうキャビテーションなどが関係する。

このようなことから、海底磁気異常物の形状、海底土質、埋設深度など種々の条件下において最適な周波数、出力、パルス幅及び指向幅の選定をすることが重要な研究課題である。そこで、探査の精度を向上させるには垂直分解能、水平分解能の向上をはかる必要がある。垂直分解能については、従来、各種底質の海底下探査の問題点として、パルス幅の関係で、垂直分解能が50cmでかなり長く、海底面から50cm以下に埋まっている機雷、砲爆弾など磁気異常物を検出できないことになる。したがって、パルス幅を極力短くして、垂直分解能を向上する技術を開発する必要がある。このような短いパルスを発生させる方式として、電磁誘導型方式によるモノパルスの発生装置<sup>2),3)</sup>がある。

一方、水平分解能の向上には、前回報告した「施工面検測技術の開発研究」<sup>1),4),5)</sup>で開発した“凹面配置クロスレイ方式”を用いればよいと考えられる。

周波数は高いほど土中の超音波の散乱、吸収損失が増大するので10kHz~75kHzとした。

上記の技術開発のための基本条件を考慮して、海底沈埋異常物探査実験装置を製作し、海底探査実験水槽において技術開発のための室内実験を行った結果、水中及び砂中でも対象物の三次元画像化が可能で、画像処理により画像の忠実性が向上し、対象物が10度以上傾斜していても探知でき、また対象物が海底に浅く埋没していても、海底面と対象物表面との距離が短くても分離して画像化できることがわかり開発実用化の可能性があった。

## 2. モノパルス超音波の放射

### 2.1 電磁誘導型送波器

水中に強力なモノパルス超音波を放射する電磁誘導型送波器の原理を図-1に示す。図でエネルギー源はコン

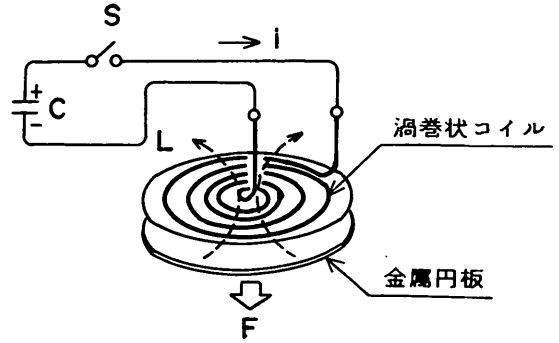


図-1 モノパルス音源の概要

デンサCに蓄えられた高圧直流電圧で、このエネルギーが渦巻状に平板に巻かれたコイルLに瞬間的に放電される。このコイルに接して導電性の円板がおかれると電磁誘導により円板の中に渦電流が流れる。この渦電流によって発生する磁力線の方向とコイルの磁力線の方向は互いに逆方向であるので、コイルと円板の間には強力な反発力が働く。コイル側の質量を大きくしておけば円板は前方に押され水中に音圧を発生する。比較的小型な金属で数100Hz~数10kHzの周波数スペクトルを含むモノパルスが得られる特長がある。

図-2に電磁誘導型送波器の等価回路を示す。R及びLはそれぞれ送波器のコイルとケーブルの合成抵抗及び

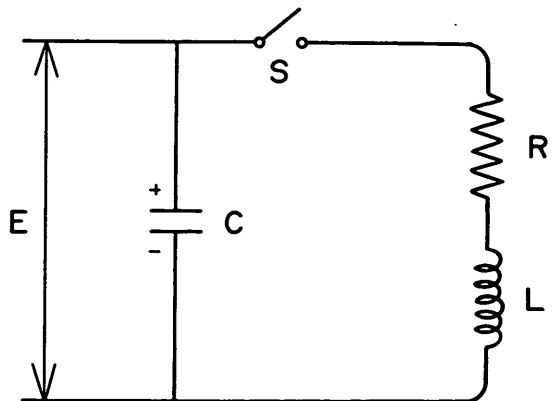


図-2 等価回路

インダクタンスである。Cはコンデンサーであり、EはCに蓄えられた高圧直流電圧で、SはコンデンサーCに蓄えられた高圧直流電圧を送波器コイルに放電させるスイッチである。そのときに流れる電流*i*及び電荷*q*は次式で示される。

$$i = \frac{E}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ここに } \omega = \frac{\sqrt{4L/C - R^2}}{2L}$$

$$f = \frac{\sqrt{4L/C - R^2}}{4\pi L}$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$q = CE e^{-\alpha t} \left\{ \cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right\} \dots\dots\dots (2)$$

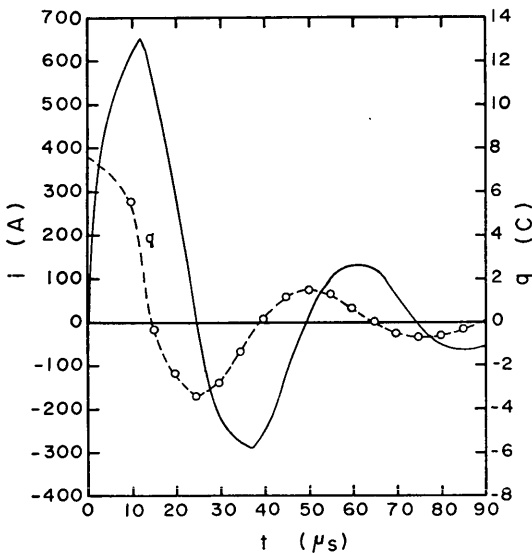


図-3 電磁誘導型音源の放電電流*i*と電荷量*q*

図-3に、 $4L/C > R^2$ の場合の放電電流*i*、電荷*q*を示す。いずれも $\omega/2\pi$ なる周波数で自由振動をし、図のように振幅は時間と共に $e^{-\alpha t}$ に比例して減少していく。

2.2 モノパルス超音波発生原理

次に電磁誘導型送波器より発生されるモノパルス超音波発生原理を示すと次のとおりである。

送信用高圧電源装置内のコンデンサの容量Cと電磁誘導型送波器のインダクタンスLとによって発生する放電

周波数を*f<sub>e</sub>*とすると、

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \dots\dots\dots (3)$$

すなわち

$$t_e = \frac{1}{f_e} = 2\pi\sqrt{L \cdot C} \dots\dots\dots (4)$$

の時間幅*t<sub>e</sub>*を有する電気エネルギーで送波器の振動板は駆動される。

いま送波器の振動板を付けない時のコイルのインダクタンスを*L<sub>0</sub>*とすると、振動板を付けた時のインダクタンス*L<sub>V</sub>*は、

$$L_V = \frac{L_0}{\beta} \dots\dots\dots (5)$$

となる。 $\beta$ は実験的に約6~7の値をとる。

コイルのインダクタンス*L<sub>0</sub>*は、

$$L_0 = n^2 \cdot a \cdot \mu_0 \cdot 0.558 \dots\dots\dots (6)$$

ここに *n* : コイルの巻数

*a* : コイルの半径

$\mu_0$  : 透磁率 ( $1.26 \times 10^{-8}$  CGS)

として求められる。

これにケーブルが付くとケーブルのインダクタンス*L<sub>C</sub>*が直列に付く。

すなわち

$$L = L_V + L_C \dots\dots\dots (7)$$

となる。

このときの送波音圧のピーク値*P<sub>1</sub>*は

$$P_1 = \frac{N}{C_P} \cdot \frac{\mu_0}{d} \cdot \frac{n^2}{L_V} \cdot f_e \cdot 0.483$$

$$= \frac{CV_c^2}{2C_P} \cdot \frac{\beta \cdot f_e \cdot 0.483}{a \cdot 0.558} \times 10 \mu \text{ bar-m} \dots\dots\dots (8)$$

ただし *N* :  $CV_c^2/2$ .....駆動エネルギー

*V<sub>C</sub>* : コイルに印加する電圧

*C<sub>P</sub>* : 音速度

で求められる音圧が送出される。

2.3 駆動力と遠距離音場音圧

電磁誘導型送波器の振動板に加わる駆動力*F<sub>P</sub>*は、Eisenmenger<sup>9)</sup>により次式で与えられる。

$$F_P = F_0 \exp(-\alpha t) \sin^2 \omega t \dots\dots\dots (9)$$

$$F_0 = N \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot n^2 / L$$

ここに *N* : コンデンサの充電エネルギー  $CV^2/2$

(*C*はコンデンサ容量、*V*は充電電圧)

- $n$  : コイルの巻数
- $L$  : コイルや導線など電気回路の全インダクタンス
- $\mu_0$  : 真空透磁率  $1.26 \times 10^{-6}$  (VS/Am)
- $\omega_e$  : コイルに流れる減衰振動する電流の角周波数では  $1/\sqrt{L \cdot C}$  に等しい。

駆動力  $F_P$  をインパルス駆動力とみなせる程度とするため  $\alpha$  を下記のようにする。

$$\alpha = \frac{2\omega_e}{\pi} = \frac{\omega_e}{2Q_e} \dots\dots\dots(10)$$

このとき  $F_P$  の最初のピーク値は  $F_0 e^{-1}$ 、2番目のピーク値は  $F_0 e^{-2}$  となる。

また、 $Q_e = \pi/4$  のとき、(10) 式を満足する。したがって、電磁誘導型送波器の振動板に加わる駆動力  $F_S$  は、

$$F_S = F_0 \exp\left(-\frac{2}{\pi} \omega_e t\right) \sin^2 \omega_e t \dots\dots\dots(11)$$

となる。

次に、駆動力と遠距離音場音圧の関係を求めてみる。距離  $d$  における音圧を  $P_1$  とすると、

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{2\pi C_P d} \cdot \frac{dF_S}{dt} \\ &= \frac{F_0}{2\pi C_P d} \cdot \frac{d}{dt} \left\{ \exp\left(-\frac{2}{\pi} \omega_e t\right) \sin^2 \omega_e t \right\} \\ &= \frac{N\pi\mu_0}{C_P d} \cdot \frac{n^2}{L} f_e \sqrt{1 + \frac{1}{\pi^2}} \exp\left(-\frac{2}{\pi} \omega_e t\right) \\ &\quad \cdot \left\{ \sin\left(2\omega_e t + \tan^{-1} \frac{1}{\pi}\right) - \frac{1}{\sqrt{1 + \pi^2}} \right\} \\ &= \frac{N\mu_0}{C_P d} \cdot \frac{n^2}{L} f_e \times 0.483 \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

となる。

次の負の音圧ピーク値  $-P_2$  は、

$$-P_2 = -P_1 \frac{\sqrt{1 + \pi^2} + 1}{\sqrt{1 + \pi^2} - 1} \exp(-1) = -0.69 P_1 \dots\dots\dots(13)$$

$P_3$ 、 $-P_4$  の値はそれぞれ  $P_1$ 、 $-P_2$  の値の  $\exp(-2) \div$

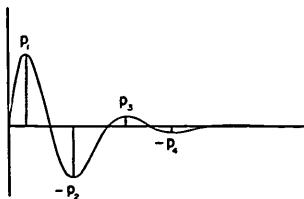


図-4 放射音波の理論的波形

$1/8$  の大きさに減衰する。  
すなわち図-4 に示すようになる。

### 3. 実験装置の試作

以上の技術開発のための理論的検討をもとに、次のような仕様の海底沈埋異常物探査実験装置を製作した<sup>1)</sup>。

#### 3.1 海底沈埋異常物探査実験装置の仕様

##### (1) 構成

○送信用高圧電源装置	1台
○電磁誘導型送波器	1組
○送波器取付金物	1式
○ハイドロホン	4組
○信号処理器	1台
○波形記録装置	1台
○デジタルメモリスコープ	1台
○定電圧装置	1台
○磁気記録器	1台

図-5 に本実験装置の構成図を示す。

##### (2) 機能

次に本実験装置の機能を記述する。

この装置は、図-6 に示す系統により接続され、送信用高圧電源装置によりコンデンサーに蓄積された電気エネルギーの放電により、電磁誘導型送波器を駆動し、大勢力の約  $40\mu\text{S}$  のパルス幅を有するモノパルスを送出する。

電磁誘導型送波器は6個のユニットで構成されており、取付金物によりハイドロホンユニットとクロスに配列され、送受波によって2.5mに焦点に持つように製作されている。海底および沈埋異常物からの反射波は、ハイドロホンユニット群で受波され、信号処理器に入り、増幅し、対数圧縮されて波形記憶装置に送出される。

波形記憶装置においては、8 bit のレベルを判定し、それぞれの番号メモリに記憶され、垂直断面像として、シンクロスコープに表示できるようになっている。垂直断面像の表示は、受信情報をレベルによる濃淡表示と情報を量子化して表示するおのおの2種類の表示ができる機能を有している。

次に各部のおもな性能を列記してみると次のようになる。

##### (3) おもな性能

###### a) 送信用高圧電源装置

- 高圧電圧 DC 1500 V 以上
- 容量器 容量  $10\mu\text{F}$  以下、耐圧 3000 V 以上
- 充電特性 1秒以内、最大電流 20 mA



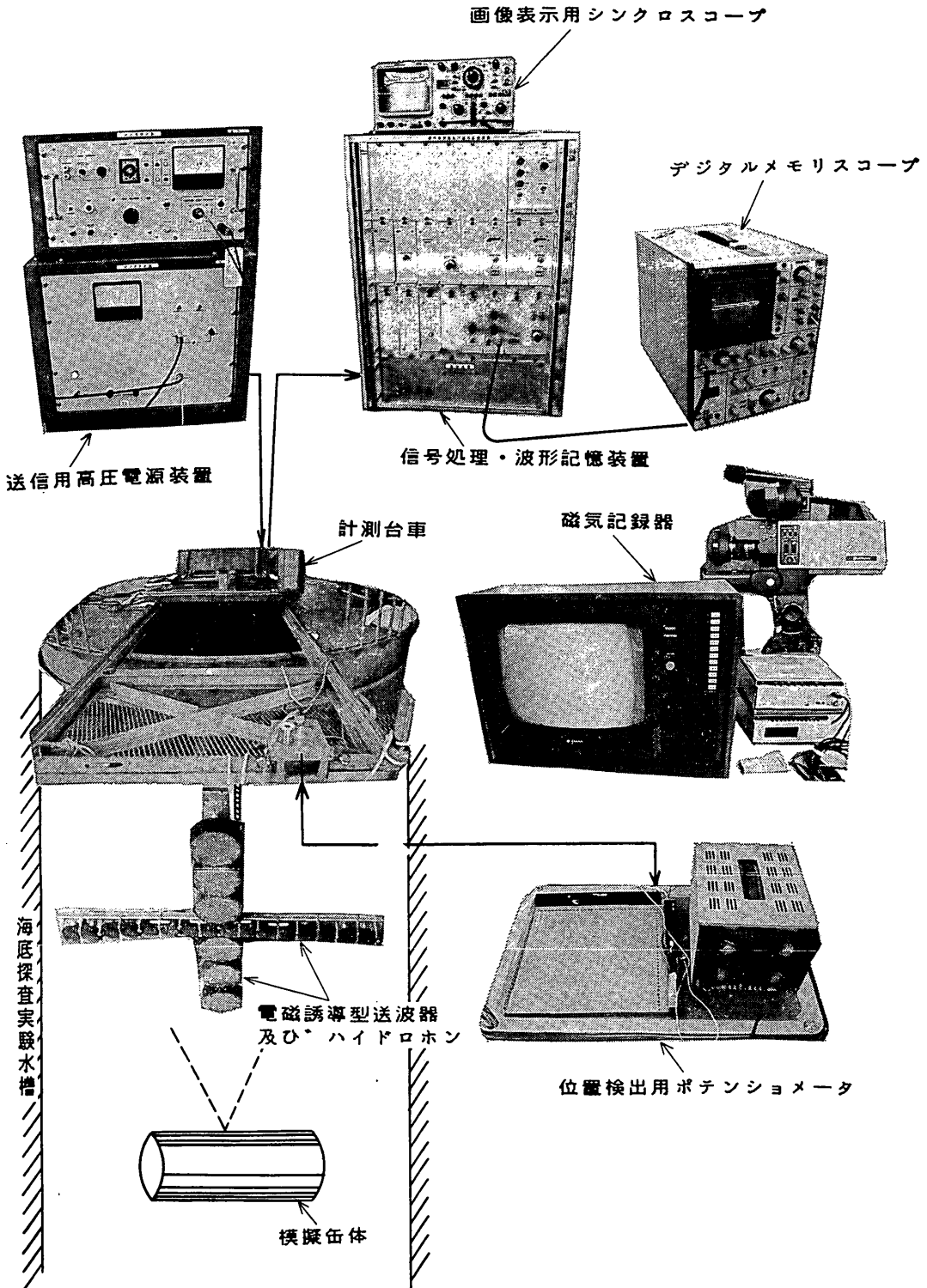


図-5 海底沈埋異常物探査実験装置の構成

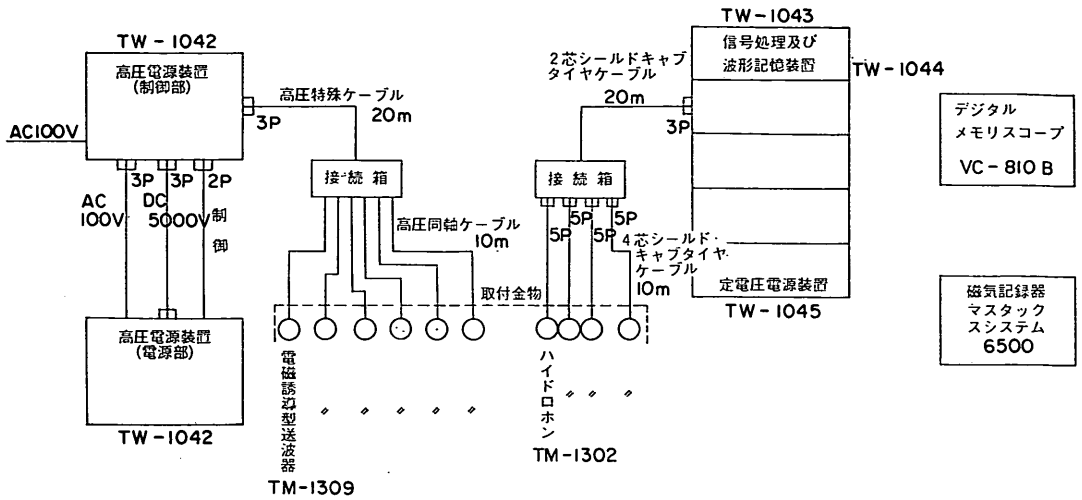


図-6 海底沈埋異常物探査実験装置系統図

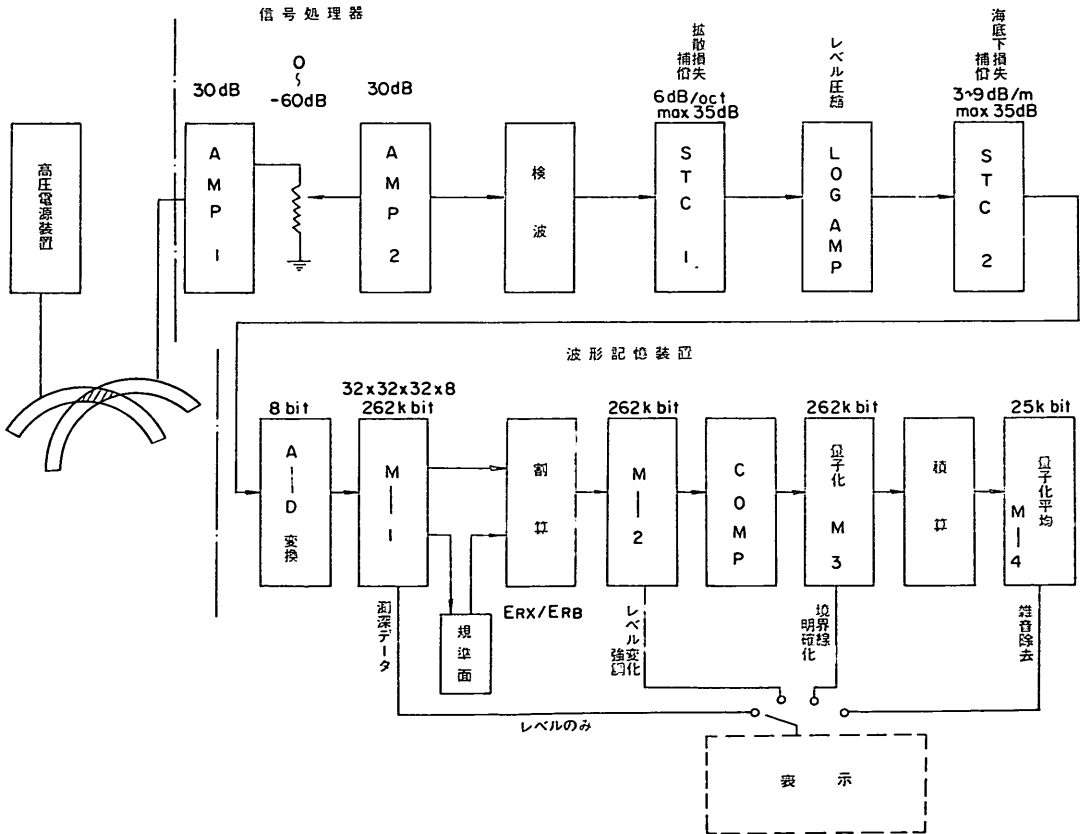


図-7 海底沈埋異常物探査実験装置ブロック図

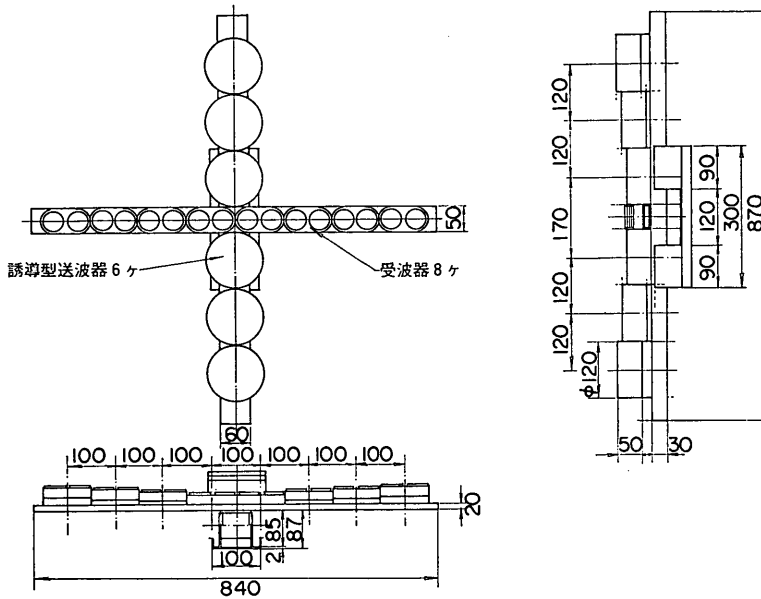


図-8 送受波器の外形図

- 放電方式 サイリスタ制御による手動及び外部制御
- 電 源 AC 100 V, 50/60 Hz/1 φ
- b) 電磁誘導型送波器
  - 焦点距離 2.5 m
  - 最大駆動電圧 1500 V
  - 送波周波数 約 25~50 kHz
  - 駆動電流周波数 約 25 kHz
  - 入力電力 約 10 Joule 以上
  - 出力音圧 約 80 dB 以上
  - 耐 水 圧 10 kgf/cm<sup>2</sup> 以上
  - ケーブル長さ 30 m
- c) ハイドロホン
  - 共振周波数 500 kHz±10%
  - 容 量 約 4500 pF×2 以上
  - 電圧受波感度 約-100 dB
- d) 信号処理器
  - 高周波増幅 周波数帯域 30 kHz~600 kHz  
増幅度 約 60 dB
  - 検 波 直線検波方式
  - STC-1 コントロール範囲 6 dB/oct
  - LOG 増幅 圧縮度 40 dB 以上
  - STC-2 コントロール範囲 3.2 dB~8 dB/m

e) 波形記憶装置

- 一次メモリアドレスコントロールユニット(8 bit)
- 一次メモリユニット (32×32×32 W×8 bit)
- 二次メモリ/量子化メモリアドレスコントロールユニット  $R_X/R_B$  レベル比較指令
- 二次メモリユニット (32×32×32 W×8 bit)
- 量子化メモリユニット (32×32×32 W×8 bit)
- 量子平均化メモリアドレスコントロールユニット
- 量子平均化メモリユニット (30×30×30×5 bit)
- 画像処理ユニット

図-7 にブロック図を, 図-8 に送受波器の外形図を示す。

3.2 従来技術と新技術の比較

今回開発した装置は, 新しい技術を多数取入れている。表-1 に新技術を用いた実験装置の特徴を示し, 従来技術と新技術の比較を示した。この表から, 従来技術よりも今回開発した新技術は, 高分解能送受波方式(モノパルス超音波及び凹面配置クロスアレイの使用)や新しい画像処理方式(割算処理, 量子化, 量子平均化処理)を用いることによって, 探査精度や機能面においてすぐれていることがわかる。

3.3 電磁誘導型凹面配置クロスアレイの焦点における水平方向音圧分布の計算

試作した実験装置の電磁誘導型凹面配置クロスアレイ

表-1 海底沈埋異常物探査実験装置の特徴

探査技術の 問題点	対 応 策	
	従 来 技 術	新 技 術
(1) 垂直方向分解能の向上	トーンバースト波を使用するので低周波では、パルス幅が長くなり、分解能が低下する。	モノパルスを使用するので分解能が向上する。
(2) 対象物の反射率が悪くて他の物体（例えば海底）と判別がつかない場合がある。	実施例なし	対象物のレベル ( $E_{RA}$ ) と海底のレベル ( $E_{RB}$ ) の比 ( $E_{RA}/E_{RB}$ ) をとって、対象物のレベルの強調 $E_{RA} > E_{RB}$ ポジ $E_{RA} < E_{RB}$ ネガ
(3) 対象物が傾斜した場合探知困難	実施例なし	量子化処理 (或る一定のレベルと比較され、そのレベルより大きい小さいかの1ビットデータとして量子化される) 例えば対象物が斜めの場合、中間レベルを基準とすれば全体が強調され、一つの物体として画像化される。
(4) 対象物附近に小石などがあり、これの散乱波により対象物の信号がマスクされる。	実施例なし	量子平均化処理 (測定アドレスを中心としてその上下左右27アドレスの加算) 対象物附近の小石など孤立した雑音などを消す作用がある。
(5) 海底下での音波の減衰	実施例なし	STC の採用
(6) 画像表示	垂直 (XZ), 水平 (XY) 断面二方向表示	垂直二方向 (XZ, YZ), 水平 (XY) 断面の三方向表示ができ、夫々5 cm毎任意の断層像を表示できる。

モノパルス超音波の焦点における水平方向音圧分布を計算してみる。

図-9 で、6個の電磁誘導型送波器（直径10 cm） $S_1 \sim S_6$  を、アレイ中心軸上 2.5 m 下に超音波ビームの焦点がくるように、凹面状に配置したときの焦点位置における水平方向音圧分布の計算を行う。

いま点  $x$  における音源  $S_1$  による音圧  $P_1$  は、送波器超音波がモノパルスとすると、2.3の式 (12) となる。

音源  $S$  は円板型振動子のピストン超音波放射であるため指向性をもっている。音源  $S$  の指向角  $\text{LOS } \alpha$  を  $\beta$  とすると、その角度における指向性関数は  $D(\beta)$  となる。

したがって  $x$  における音圧  $P_1$  は、

$$P_1 = K \cdot D(\beta_1) \left[ \pi \sqrt{1 + \frac{1}{\pi^2}} \exp\left(-\frac{2}{\pi} \omega_e t\right) \cdot \left\{ \sin\left(2 \omega_e t + \tan^{-1} \frac{1}{\pi}\right) - \frac{1}{\sqrt{1 - \pi^2}} \right\} \right] \dots\dots\dots(14)$$

となる。

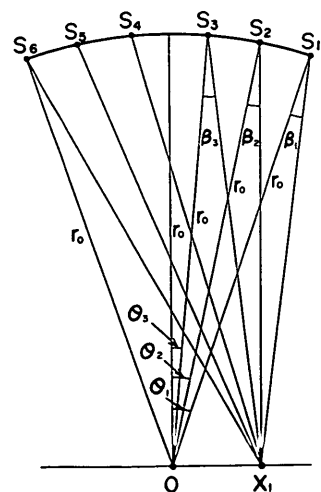


図-9 電磁誘導型凹面配置クロスアレイの焦点位置における水平方向音圧分布の計算

ここに

$$K : \frac{N \cdot \mu_0}{C_P r_1} \cdot \frac{n^2}{L} \cdot f_e \dots \dots \dots \text{送波音圧のピーク値}$$

$r_1$  : 音源  $S_1$  から  $x$  までの距離

$$= \sqrt{r_0^2 + x^2 - 2 r_0 x \cos(\pi/2 \mp \theta_1/2)}$$

以下同様に、音源  $S_2 \sim S_6$  による  $x$  位置における音圧  $P_2 \sim P_6$  は、

$$P_2 = K \cdot D(\beta_2) \left[ \pi \sqrt{1 + \frac{1}{\pi^2}} \exp\left(-\frac{2}{\pi} \omega_e t\right) \left\{ \sin\left(2 \omega_e t + \tan^{-1} \frac{1}{\pi}\right) - \frac{1}{\sqrt{1 - \pi^2}} \right\} \right]$$

⋮

$$P_6 = K \cdot D(\beta_6) \left[ \pi \sqrt{1 + \frac{1}{\pi^2}} \exp\left(-\frac{2}{\pi} \omega_e t\right) \left\{ \sin\left(2 \omega_e t + \tan^{-1} \frac{1}{\pi}\right) - \frac{1}{\sqrt{1 - \pi^2}} \right\} \right]$$

$x$  位置における合成音圧  $P$  は、

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \dots \dots \dots (15)$$

で表される。

図-10 に、式 (14)、(15) を用いて、 $x$  位置におけるモノパルス超音波の水平方向音圧分布を計算した結果を示す。横軸に受波音圧到達時間からの経過時間  $t$  ( $\mu\text{S}$ ) を、縦軸に  $x$  位置における単位音圧  $P/K$  を示す。この図によれば、音響中心 0 点から 0.125 m はなれた  $x$  位置における到達時における単位音圧  $P/K$  は約 3 となり、音響中心位置 0 点の  $P/K$  が 6 であるので、その半分、すなわち  $x = 0.125 \text{ m}$  の位置が音波ビームの  $-6 \text{ dB}$  ビーム幅に一致することがわかる。

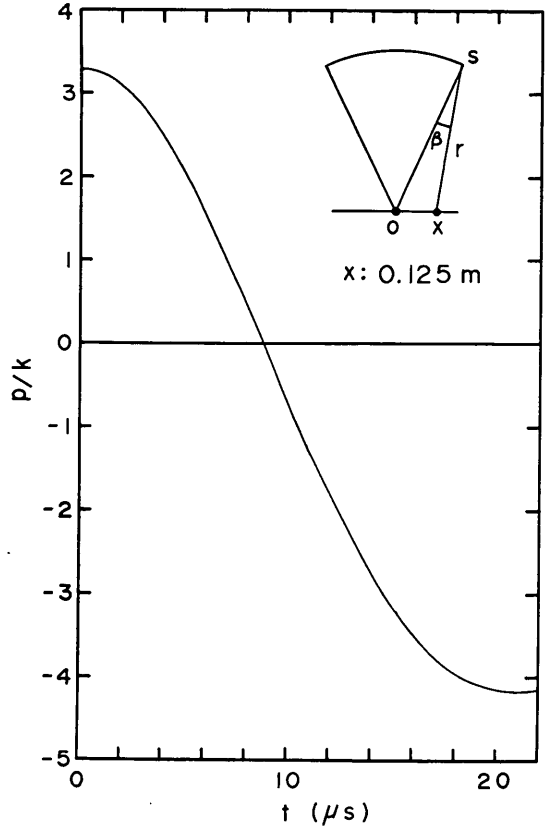
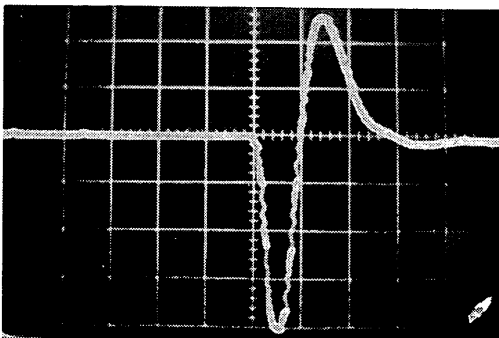


図-10 凹面配置クロスアレイモノパルス超音波の焦点付近の水平方向音圧分布

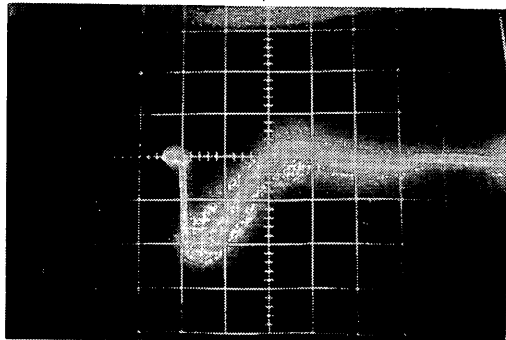
#### 4. 室内模型実験

前述の海底沈埋異常物探査実験装置を用いて探査技術開発のための室内模型実験を行った。実験は、予備実験、水中模擬機雷探査実験、砂中模擬機雷探査実験、各



20  $\mu\text{S}/\text{DIV}$ , 10 mV/DIV

(a) 送波音圧波形



10  $\mu\text{S}/\text{DIV}$ , 2 V/DIV

(b) 送信電流波形

写真-1 モノパルスのオシロスコープ波形

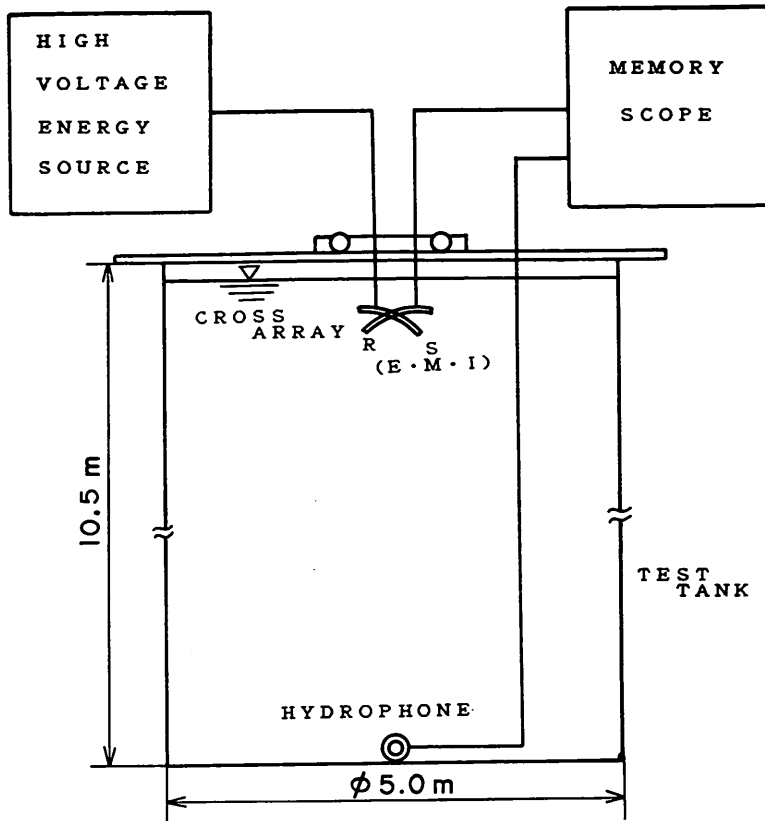


図-11 予備実験測定概要

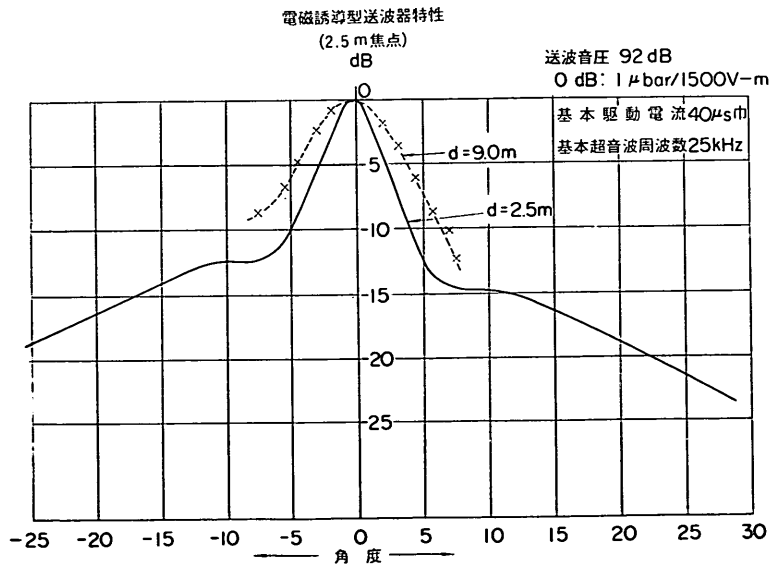


図-12 送波器の指向性

種形状対象物水中探査実験，加圧特性実験である<sup>1),7)</sup>。

4.1 予備実験

本実験に入る前に，海底探査実験水槽で，海底沈埋異常物探査実験装置の音響特性を調べる予備実験を行った。実験項目は，電磁誘導型送波器の送波出力，周波数，パルス幅，指向性，分解幅，反射特性などである。

送波器に電磁誘導型送波器を6個，受波器は，8ユニットをクロス状，焦点距離2.5mになるようそれぞれ凹面に配置して，海底探査実験水槽の上部にある計測台車に設置した。

送波出力や焦点位置の指向性，分解幅の測定では，標準ハイドロホンを送波器から2.5mの位置に設置し，底質の反射特性測定の場合は，水槽底に設置し，送受波波形をデジタルメモリスコープに観測記録する方法で実験を行った。図-11にその測定概要を示す。

送波器の指向性や分解幅の測定では，送波器を水平方向に移動させ，音響中心軸の音圧レベルの半分，-6dB減衰した位置を分解幅として送波器の指向性を求めた。

実験の結果，音響出力はパルス幅，約40μs，超音波周波数25kHz，送波音圧92dB(0dB:1μbar/1500V-m)のモノパルスで放射されていることが確認できた。

写真-1に音響出力のオシロスコープ波形を示す。写真の(a)は，送波超音波波形で単一のパルスで放射されていることがわかる。写真の(b)は，電流波形で，やはり単一パルスで流入していることがわかる。

図-12は，送波器の指向性を求めた結果で，半減半角約3度，図-13は各深度の水中分解幅の測定結果で，焦点距離2.5mで25cmであることがわかった。

また，凹面配置クロスアレイ狭ビームモノパルス超音波の対象物からの反射特性の測定に必要な超音波拡散損失を測定した結果，距離6.5mで-16dBとなり，ほぼ理論値と一致した。(図-14)

次に，対象物の反射特性を求めるために，代表的対象物としてコンクリートと鉄の反射特性を求めてみた。鉄底質として水槽底を，コンクリート底質としてコンクリートブロックを用いた。送受波器からの距離は，コンクリートブロックまでが9.0m，水槽底までが9.5mである。

対象物の反射損失RL(dB)は，下記の式を用いた。

$$RL = SL - 2TL - EL \text{ (dB)} \dots\dots\dots(16)$$

ここに SL: 送波音圧 20 log Ps = 92 dB/1500 V-m

2 TL: 拡散損失 20 log 2 x (dB) x = 距離

25.1 dB(コンクリートボックス)

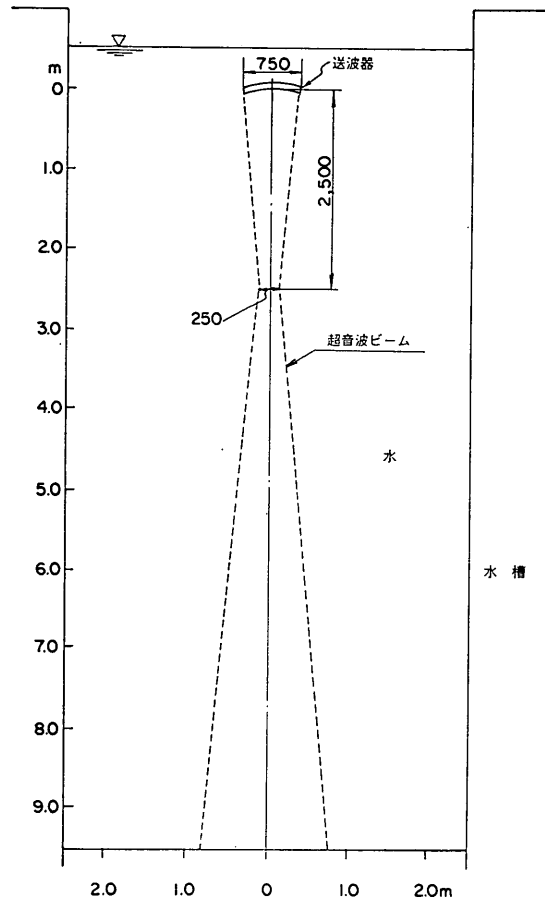


図-13 各深度の水中分解幅

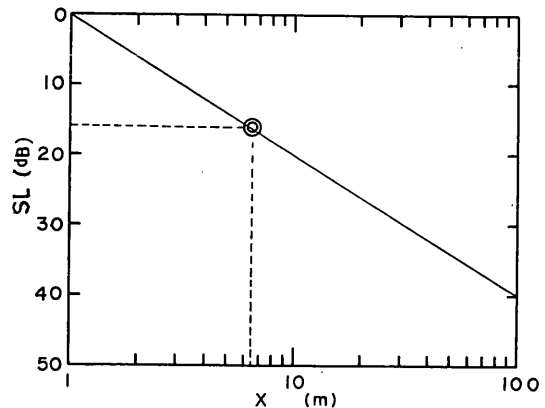


図-14 モノパルス超音波の拡散損失

表-2 コンクリートブロックと鉄板の反射特性

	ブ ロ ッ ク				鉄 板			
	$E_R$ (mV)	$20 \log E_R$ (dB)	$EL$ (dB) $=20 \log P_R$	$RL_1$ (dB)	$E_R$ (mV)	$20 \log E_R$ (dB)	$EL$ (dB) $=20 \log P_R$	$RL_2$ (dB)
1	5.20	-45.68	67.32	-0.43	11.00	-39.17	73.83	-7.41
2	7.20	-42.85	70.15	-3.26	4.00	-47.90	65.04	1.38
3	8.60	-41.31	71.69	-4.80	9.56	-40.39	72.61	-6.19
4	6.16	-44.21	68.79	-1.90	11.70	-38.64	74.36	-7.94
5	2.40	-52.40	60.60	6.29	21.00	-33.56	79.44	-13.02
6	8.28	-41.64	71.36	-4.47	13.80	-37.20	75.80	-9.38
7	2.40	-52.40	60.60	6.29	8.96	-40.95	72.05	-5.63
8	2.80	-51.06	61.94	4.95	8.40	-41.51	71.49	-5.07
9	4.40	-47.13	65.87	1.02	5.20	-45.68	67.32	-0.90
10	7.60	-42.38	70.62	-3.73	10.20	-39.83	73.17	-6.75
11	6.00	-44.44	65.56	1.33	10.80	-39.33	73.67	-7.25
12	8.60	-41.31	71.69	-4.80	9.40	-40.54	72.46	-6.04
13	7.00	-43.10	69.90	-3.01	4.00	-47.96	65.04	1.38
14	5.40	-45.35	67.65	-0.76	11.00	-39.17	73.83	-7.41
15	7.80	-42.16	70.84	-3.95	10.00	-40.00	73.00	-6.58
16	4.40	-47.13	65.87	1.02	5.00	-46.02	66.98	-0.47
17	3.00	-50.46	62.54	4.35	8.96	-40.95	72.05	-5.85
18	2.40	-52.40	60.60	6.29	9.00	-40.92	72.08	-5.66
19	8.40	-41.51	71.49	-4.60	14.20	-36.95	76.05	-9.63
20	2.50	-52.04	60.96	5.93	21.00	-33.56	79.44	-13.02
平均				0.088				-6.072

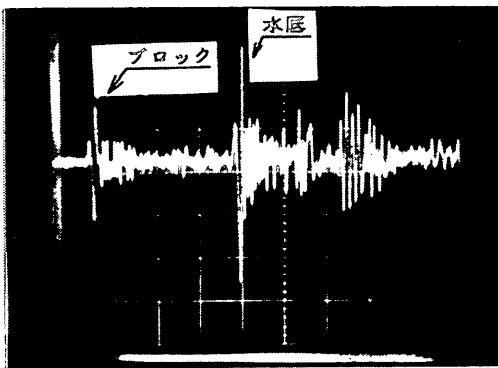


写真-2 ブロック及び水底からの反射波形  
(200  $\mu$ S/DIV, 2 mV/DIV)

25.6 dB (水底底, 鉄材)

$EL$ : 受波レベル  $20 \log P_R$ (dB)

測定した結果を表-2 に示す。

写真-2 は、ブロック及び水底からの反射波のオシロスコープ波形の一例である。最初の波形がコンクリー



写真-3 ドラム缶水中吊下状況  
(600  $\phi$   $\times$  900 mm)

トブロックからの受波波形、二番目の波形が水底からの波形である。

#### 4.2 水中模擬機雷探査実験

海底探査実験水槽に模擬機雷としてドラム缶(600  $\phi$   $\times$  900 mm)を図-15 (a) 及び写真-3 のように水中に



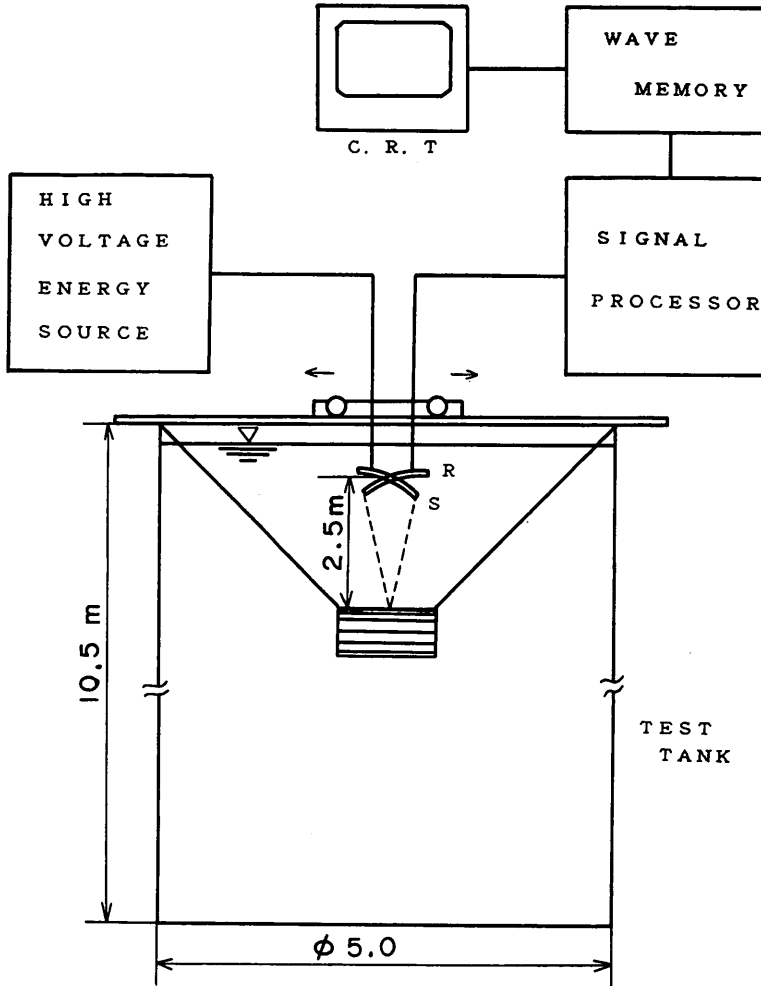


図-15(a) 水中模擬機雷探査実験の概要

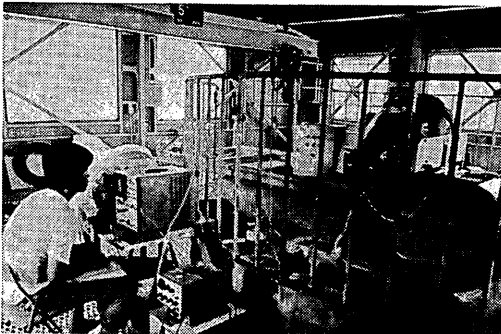


写真-4 測定状況

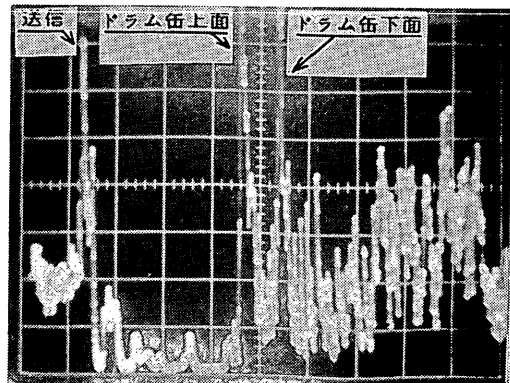


写真-5 水中吊下げドラム缶のオシロスコープ波形 (1 mS/DIV, 1 V/DIV)

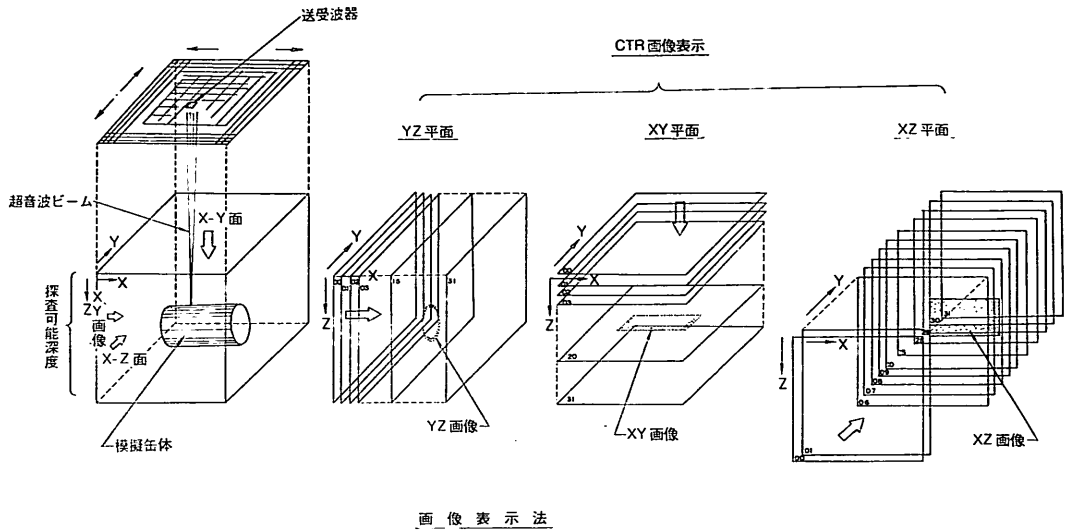


図-15(b) 模擬機雷探査実験と画像表示

吊下げ，焦点距離 2.5m に対象物がくるように送受波器を設置して探査実験を行った。

実験は，計測台車に電磁誘導型送波器を取付け，送受波器の台車進行方向（X軸）の位置は，ポテンションメータで検出できるようにした。Y軸は1mの幅を5cm間隔で送受波器を動かしながら探査できるようにした。（写真-4）

探査画面は，図-15(b)に示すようにX軸2.8m，Y軸1.0m，Z軸1.5mになるよう送受波器を走査しながら探査した。画素数は $30 \times 30 \times 30$ 個である。

実験は，対象物（ドラム缶）が，水平状態， $7^\circ$ ， $20^\circ$ ， $35^\circ$ 傾斜した状態の4形態でのXY，XZ，YZ平面の三方向断層画像を求めた。

送波音圧は，90 dB-m-1500 V で，パルス幅  $40 \mu\text{S}$ ，卓越周波数 25 kHz である。

写真-5 にドラム缶中央部を探査した場合のオシロスコープ波形を示す。

データ処理は，対象物の受波レベル  $R_x$  と基準レベル  $R_B$  の比のメモリーデータ  $M_2$ ，量子化処理メモリーデータ  $M_3$ ，量子平均化処理メモリーデータ  $M_4$  であり，それぞれに表示し，ポラロイドランドカメラや磁気記録器で画像を記録した。

実験の結果を図-16～20 に示す。図-16 はドラム缶を水平に吊下した場合の映像で，上から XY 面，XZ 面，YZ 面の断層像を示す。光点の間隔は X 軸が 10 cm，Y 軸，Z 軸とも 5 cm である。光点の数を数えることに

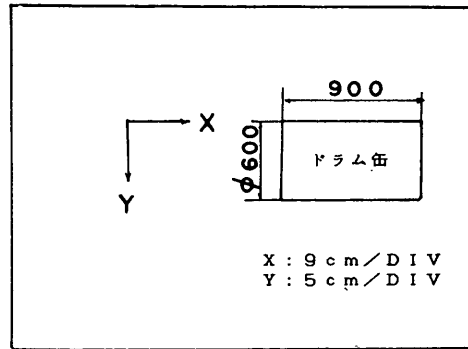
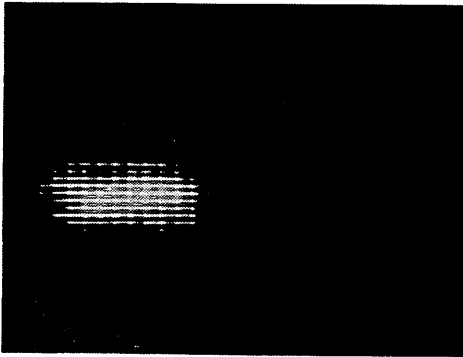
より，映像の寸法が実物とはほぼ一致していることがわかる。XZ 面ではドラム缶の上面と下面が映像化されている。YZ 面ではドラム缶の軸方向からみた映像で，超音波をドラム缶上面から放射している関係で，ドラム缶の上面及び下面は映像化されるが，両側は音波に平行であるため映像化されないことがわかる。この実験により，XY，XZ，YZ 画像ともほぼ実物の形状を忠実に再現していることが確認できた。

図-17 は，ドラム缶を  $7^\circ$  傾けた場合の映像を示す。上の写真は，XY 面の映像でドラム缶の両端が中央部に比べて反射強度が大きいことがわかる。中央の写真は，XZ 面の映像で，ドラム缶の映像の上部，下部とも右側に  $7^\circ$  傾斜していることがわかる。下の写真は，ドラム缶軸側からみた YZ 面の映像で，ドラム缶上部と下部を映像化している。

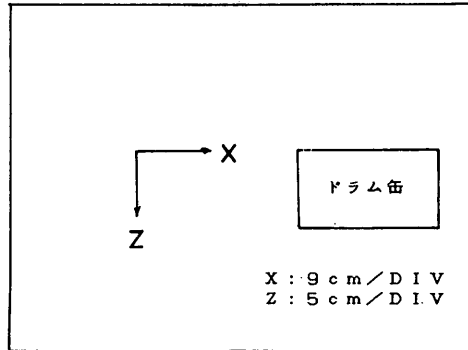
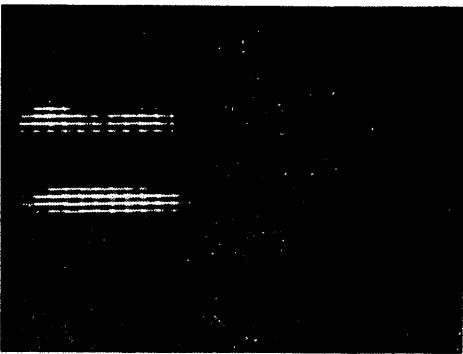
図-18 は，ドラム缶を  $20^\circ$  傾けた場合の映像を示す。上の写真は XY 面の映像でドラム缶の右側先端部が映像化されている。中央の写真は XZ 面の映像で，断片的ではあるがこれら光点を結びと，ドラム缶の上面，下面の輪郭がえがかれ，その水平に対する角度は  $20^\circ$  であることが確認された。下の写真は，ドラム缶を軸に鉛直に輪切りにした YZ 面の映像で，楕円形の断面を映像化していることがわかる。

図-19 は，ドラム缶を  $35^\circ$  傾けた場合の映像を示す。上の写真が XY 面の映像で，中央部に比して両端部の映像が強調されていることがわかる。中央の写真は XZ 面

X-Y 画面



X-Z 画面



Y-Z 画面

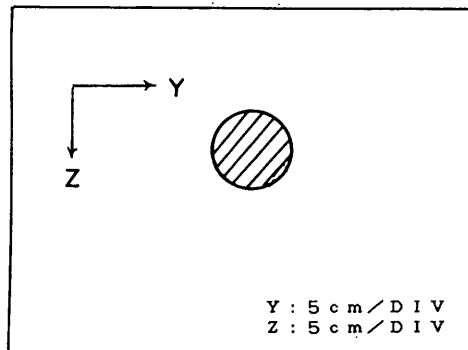
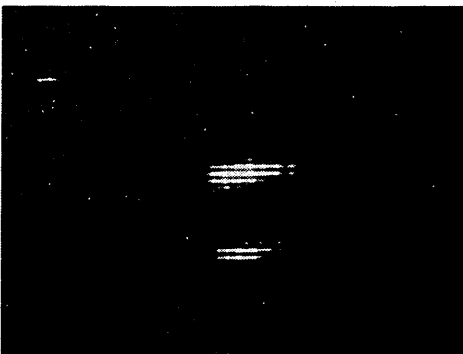
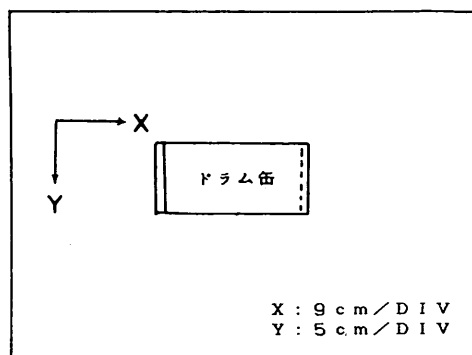
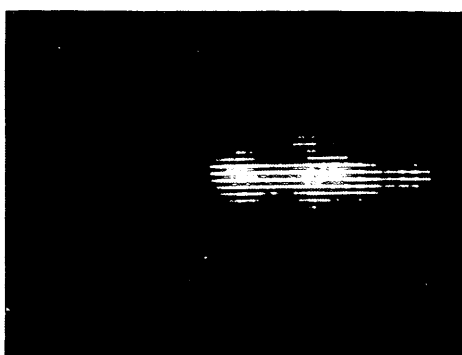
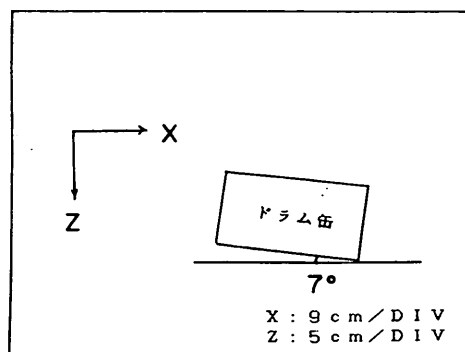
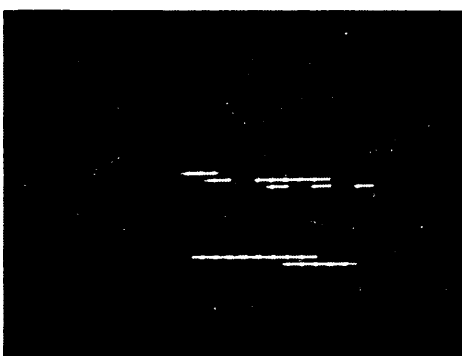


図-16 ドラム缶の水中映像（水平）

X-Y 画面 (15)



X-Z 画面 (15)



Y-Z 画面 (15)

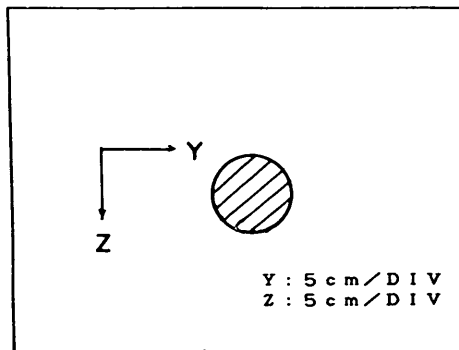
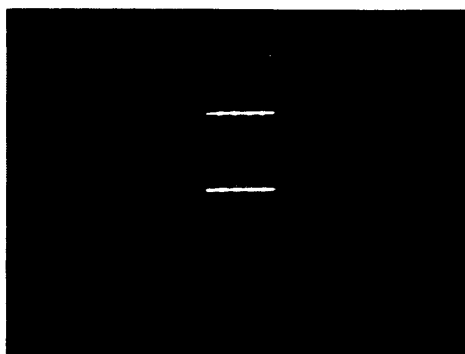
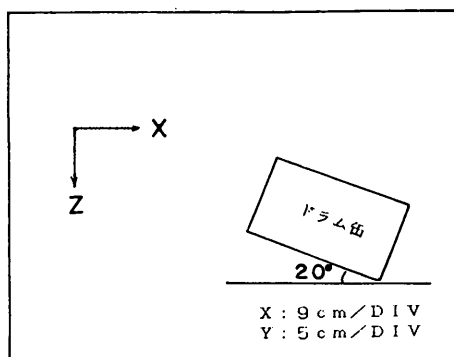
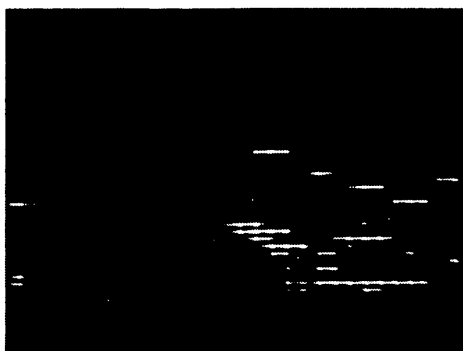
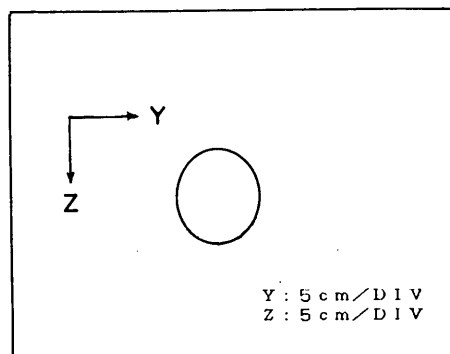
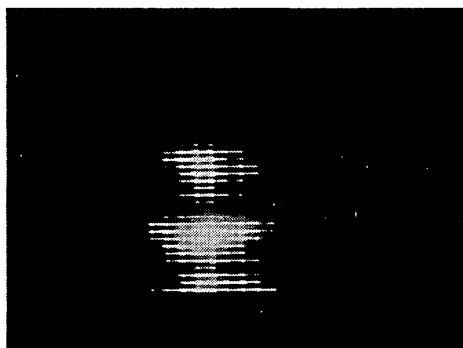


図-17 ドラム缶の水中映像（7度傾斜）

X-Z 画面 (14)



Y-Z 画面 (13~22)



Y-Z 画面 (19)

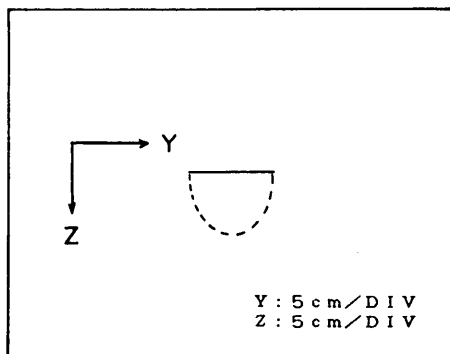
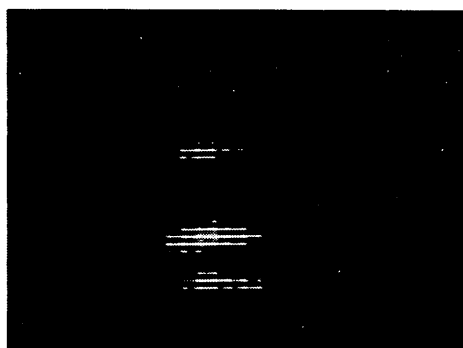
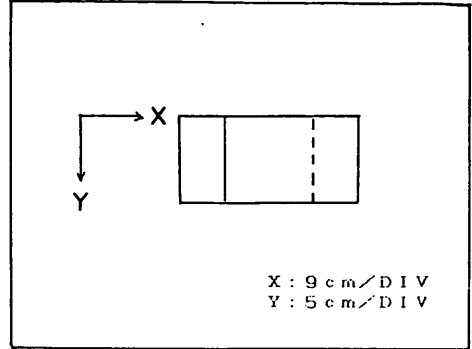
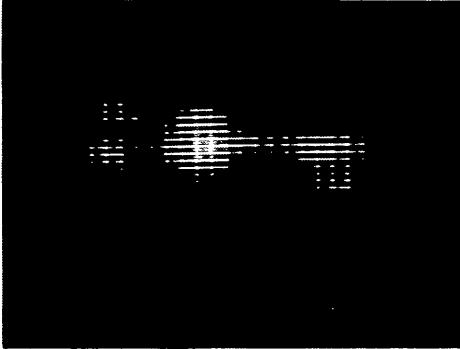
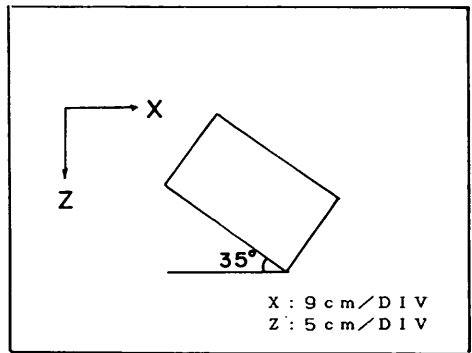
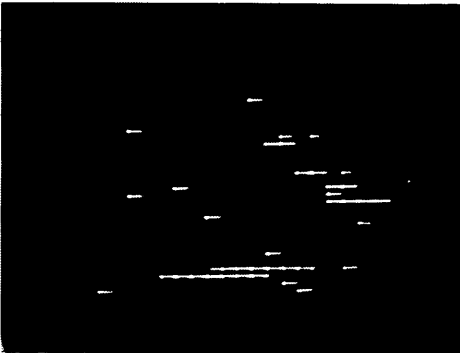


図-18 ドラム缶の水中映像 (20度傾斜)

X-Y 画面 (15)



X-Z 画面 (17)



Y-Z 画面 (14)

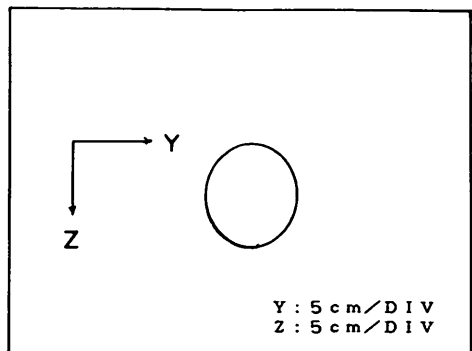
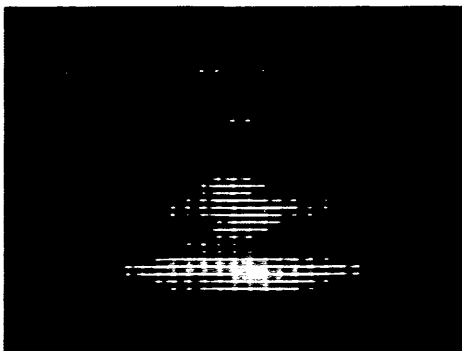


図-19 ドラム缶の水中映像 (35度傾斜)

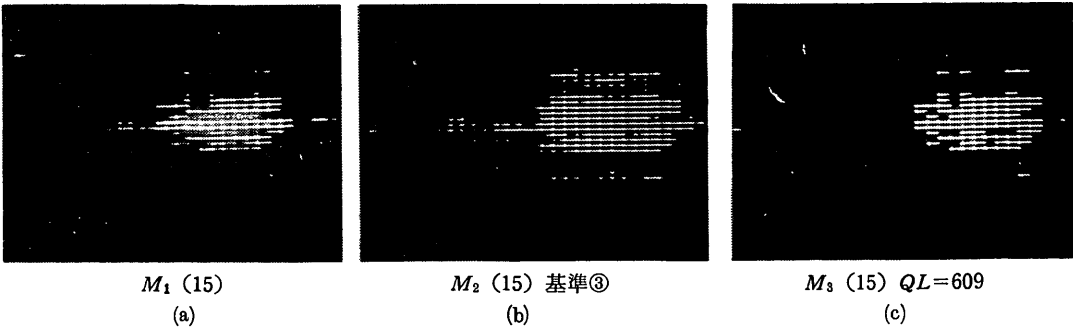


図-20 画像処理による映像の変化 (X-Y画面)

の映像で、光点を結ぶとドラム缶の上面、下面の輪郭となり、水平面に対して 35° 傾いていることがわかる。下の写真は YZ 面の映像で、残響で形はくずれているが、ほぼ楕円形の断面を映像化していることがわかる。

図-20 は、現波形のメモリデータ  $M_1$ 、データ処理後のメモリデータ  $M_2$ 、 $M_3$  による映像を示し、データ処理すれば、実物の形状を忠実に画像化することがわかる。

特に顕著なことは、従来技術<sup>8),9)</sup>では探査不可能な、傾斜角度10度以上でも忠実に映像化されていることである。また、XY, XZ とともに YZ 方向からみた映像も観察できることなど、従来の音波探査にみられないことであり、画期的な成果であるといえよう。

### 4.3 砂中模擬機雷探査実験

海底下に沈埋している機雷探査の模擬実験として、海底探査実験水槽の水底に、砂を約 1 m の高さに入れ、模擬機雷としてのドラム缶を砂表面に設置した場合、ドラム缶を砂の中に半分埋没させた場合、砂表面から 25 cm の位置にドラム缶を水平に設置した場合の 3 ケースについて行った。(写真-6)

#### (1) 砂面上ドラム缶探査実験

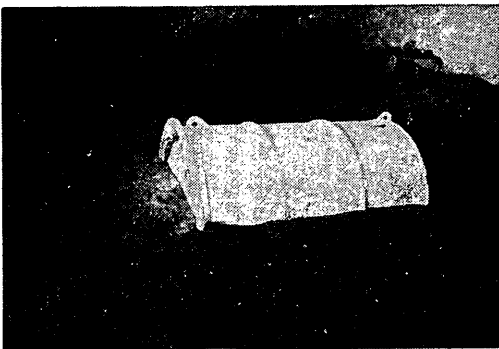


写真-6 ドラム缶砂中埋設状況

図-21 に示すように、砂面上にドラム缶を設置し、送受波器はドラム缶に超音波ビームの焦点がくるようにドラム缶上 2.5 m の位置にセットした。

探査実験は、水中模擬機雷探査実験と同じ要領で行った。データ取込位置は送受波器から 2.25 m の位置である。

実験の結果を写真-7 (a)~(e) に示す。(a) はドラム缶表面の XY 面の映像で、形状を忠実に再現していることがわかる。(b) はドラム缶底面の XY 像で、ネガであるがかなり形状を忠実に映像化している。(c) は XZ 像で、ドラム缶の表面と砂面を明瞭に映像化していることがわかる。(d) は YZ 像で、超音波ビームの分解幅の関係でドラム缶の上部が円弧にならず直線になっているが、砂とドラム缶の位置関係は識別できる。(e) はドラム缶中央部に超音波ビームを放射したときの送受波状況をオシロスコープ波形で示したものである。超音波の減衰を軽減するため STC を缶表面位置からかけている。ドラム缶表面と砂表面 (ドラム缶下部) からの反射波がかなりのレベルで受信されていることがわかる。

#### (2) 半埋没ドラム缶探査実験

図-22 に示すようにドラム缶を砂の中にその直径のほぼ半分近くを埋没させた場合の探査実験を行った。ドラム缶の内容物のモデルとして、流体の場合は水、固体の場合は砂を詰込み、それぞれ探査実験を行った。

##### a) 缶内容物が水の場合

写真-8 (a)~(i) に実験の結果を示す。データ取込位置は送受波器から 2.25 m、対象物からの距離は 0.25 m である。STC は送受波器から 2.7 m の位置でかけている。写真-8 (a) にドラム缶表面の XY 面の映像で形状をかなり忠実に再現していることがわかる。(b) は砂表面の XY 面の映像で、砂表面が光っているが、ドラム缶は、周囲に影ができかつ砂表面の受波レベルよりも高いので砂表面とドラム缶は識別できる。(c) はドラム缶底部付近の

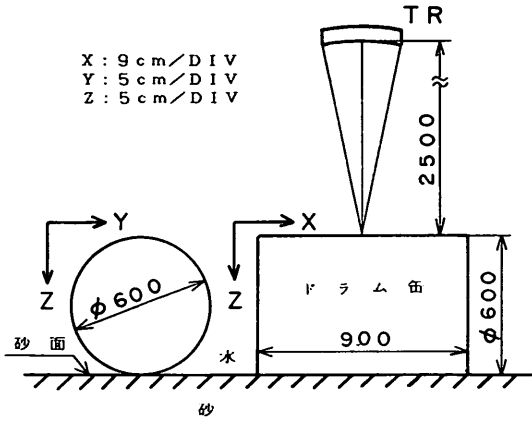
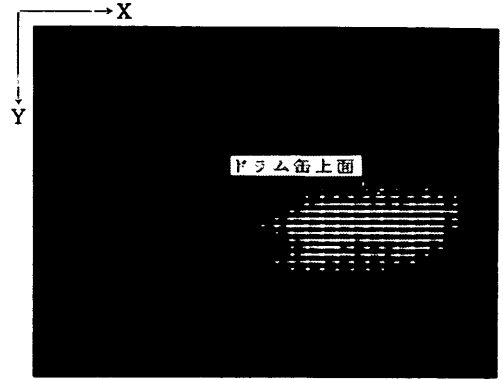
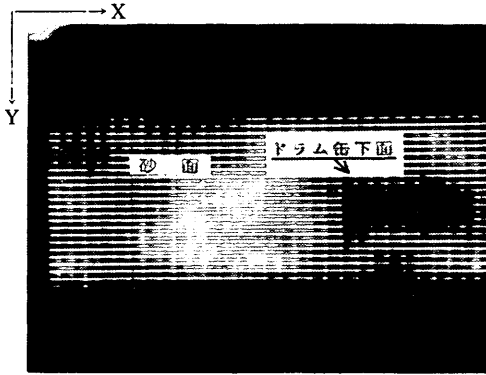


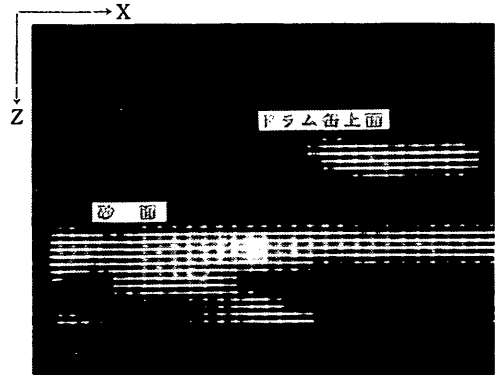
図-21 砂面上ドラム缶探査実験



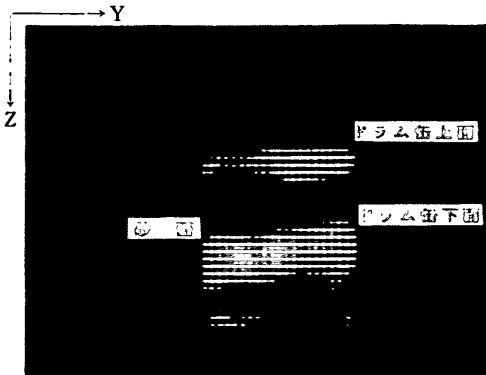
(a) X-Y像 (6/0)



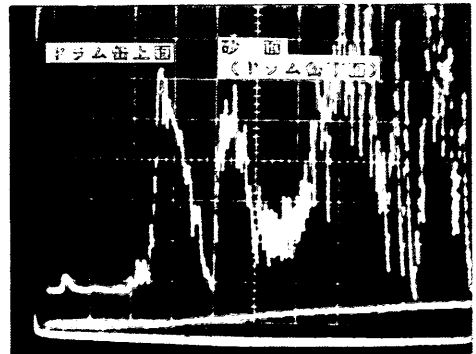
(b) X-Y像 (18/0)



(c) X-Z像 (15/0)



(d) Y-Z像 (18/0)



(e) オシロスコープ波形 (0.5 mS/DIV, 1 V/DIV)

写真-7 砂面上ドラム缶探査の場合の映像



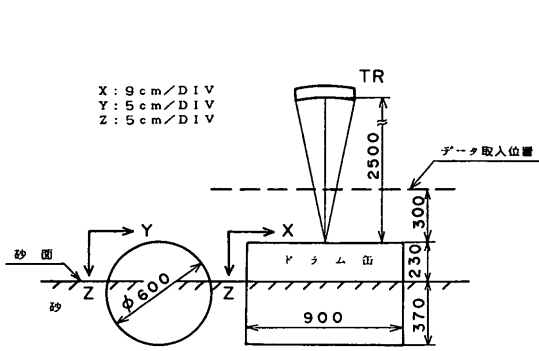
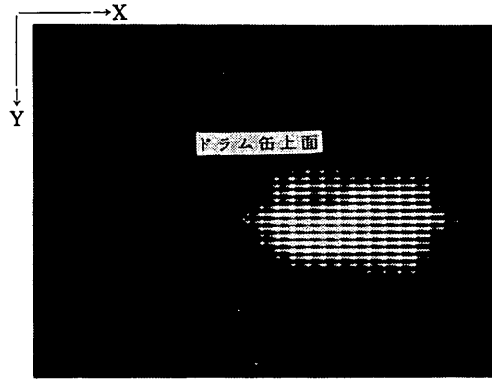
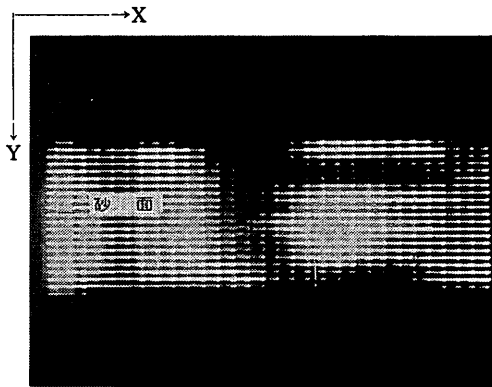


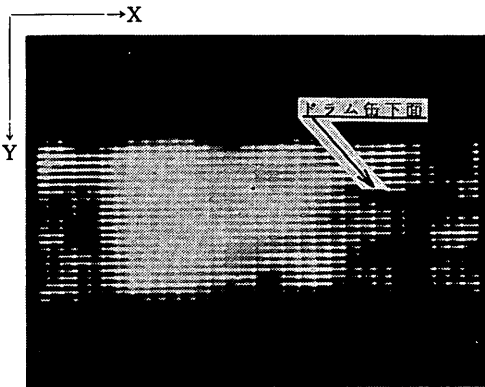
図-22 半埋没ドラム缶探査実験



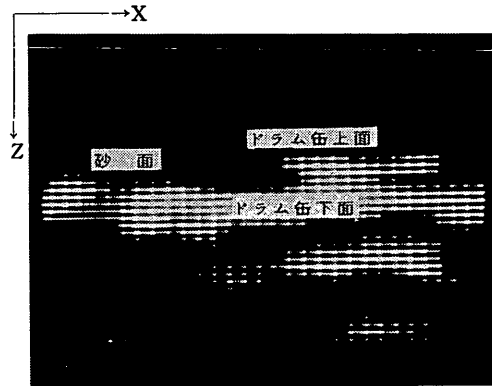
(a) X-Y像 (5/0)



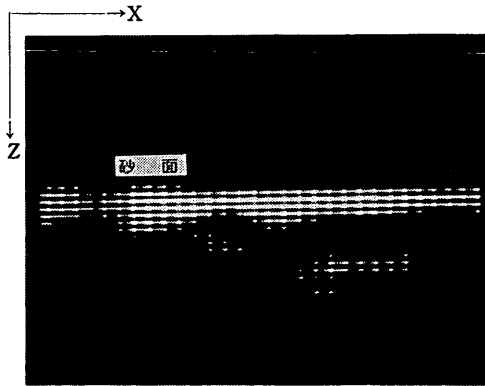
(b) X-Y像 (9/0)



(c) X-Y像 (15/0)

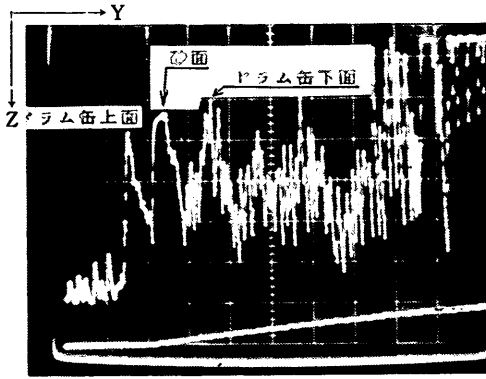


(d) X-Z像 (15/0)

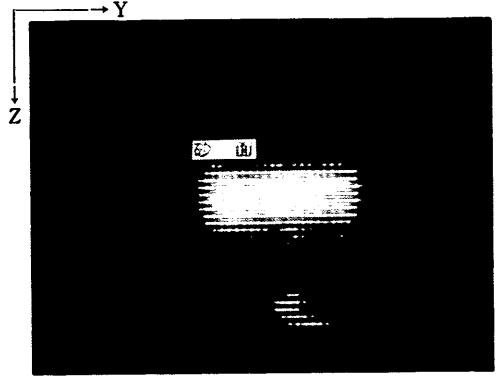


(e) X-Z像 (5/0)

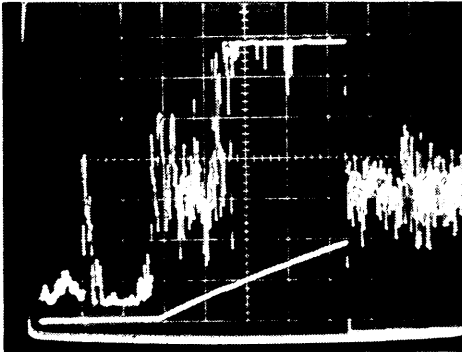
写真-8 半埋没ドラム缶探査（ドラム缶の中は水）の映像



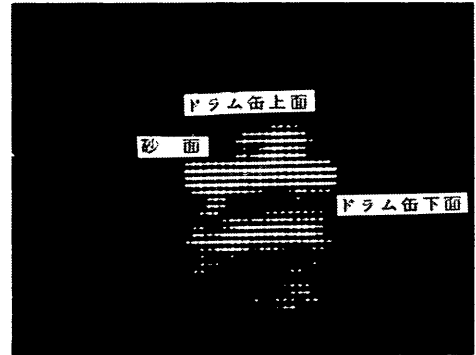
(f) Y-Z 像 (18/0)



(g) Y-Z 像 (5/0)



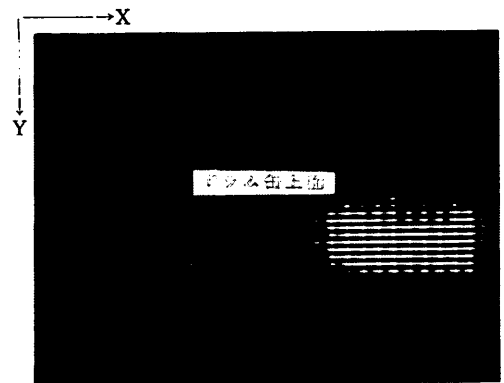
(h) オシロスコープ波形 (2 mS/DIV, 2 V/DIV, 1 V/DIV)



(i) オシロスコープ波形 (0.5 mS/DIV, 2 V/DIV, 1 V/DIV)

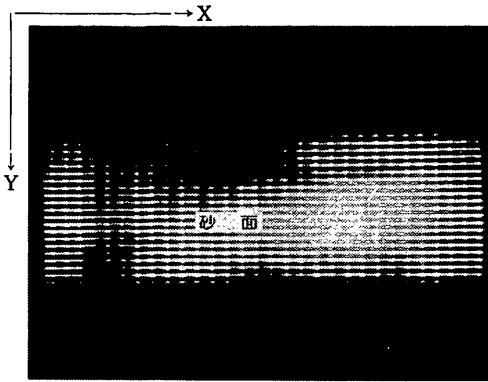
写真-8 半埋没ドラム缶探査（ドラム缶の中は水）の映像

XY 面の映像で、砂部分の受波レベルが高く、ドラム缶底部はネがとなって表示されている。(d)は XZ 面を中央部でスライスした映像で、ドラム缶が砂面上にある部分、砂中にある部分を明瞭に表示している。光点の数によってドラム缶の形状寸法を算出してみると、実物の寸法と相違ないことがわかった。(e)は、(d)の位置から10断面すなわち 50 cm 離れた位置の XZ 面の映像で、ドラム缶のない位置であり、ドラム缶が映像化されていないことがわかる。(f)は YZ 面を中央付近でスライスした映像で、砂面上にドラム缶の砂面上の部分が映っていることがわかる。形状寸法もほぼ実物と一致している。砂中部のドラム缶下部はシャドウができ、ドラム缶下部の埋設部分の位置が推定できる。(g)は、(f)の位置から13断面

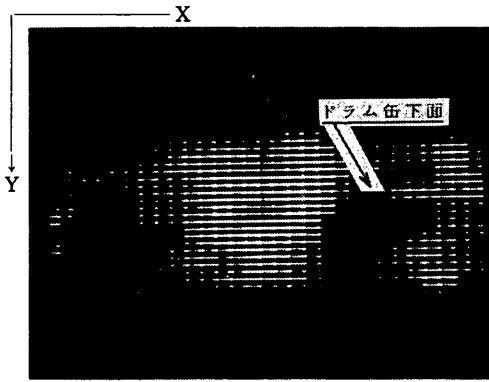


(a) X-Y 像 (5/0)

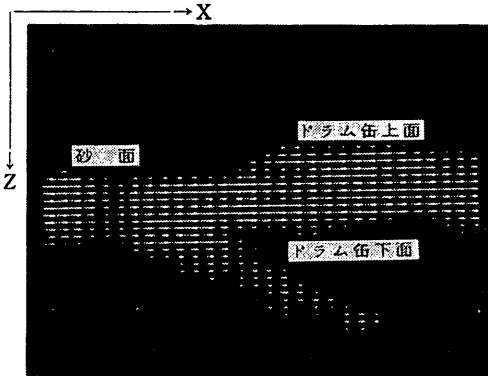
写真-9 半埋没ドラム缶探査（ドラム缶の中は砂）の映像



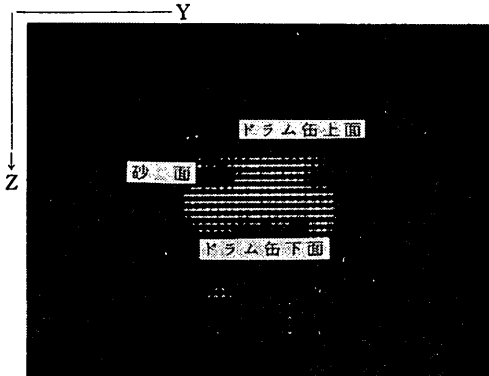
(b) X-Y像 (9/0)



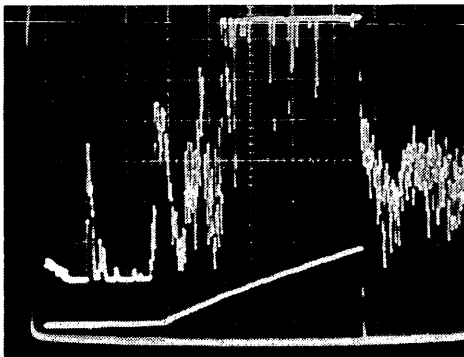
(c) X-Y像 (23/0)



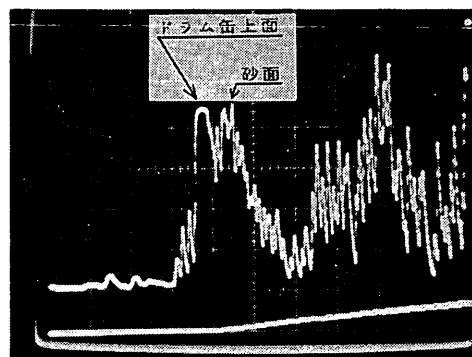
(d) X-Z像 (15/0)



(e) Y-Z像 (18/0)



(f) オシロスコープ波形 (2 mS/DIV, 2 V/DIV, 1 V/DIV)



(g) オシロスコープ波形 (0.5 mS/DIV, 2 V/DIV, 1 V/DIV)

写真-9 半埋没ドラム缶探査 (ドラム缶の中は砂) の映像

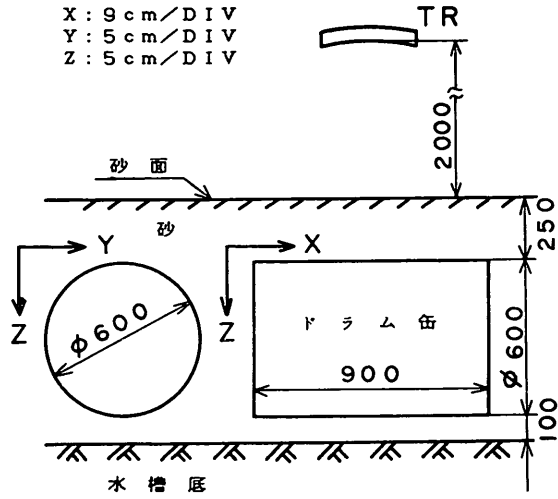
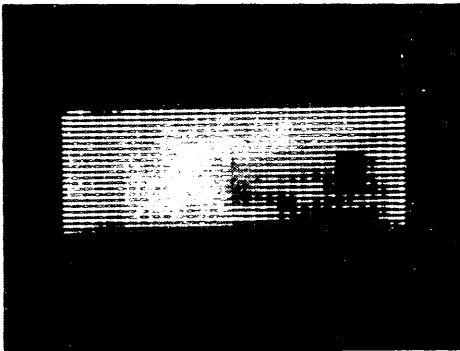
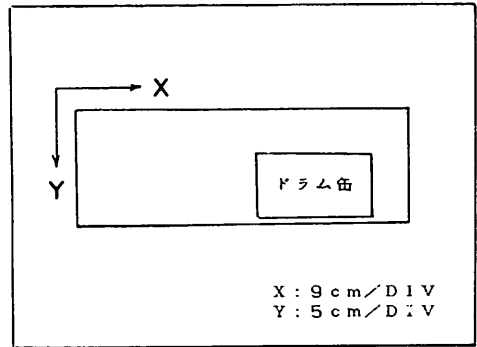


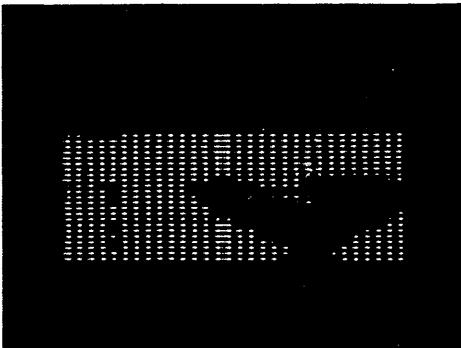
図-23 砂中埋設ドラム缶探査実験



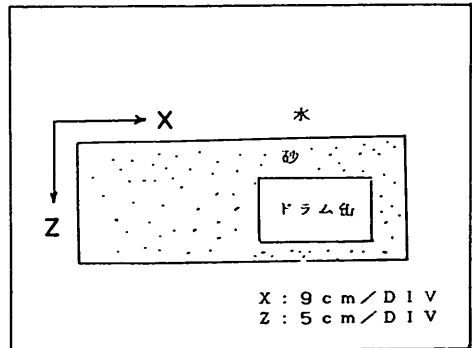
(a) X-Y像



X-Y画面 (22)

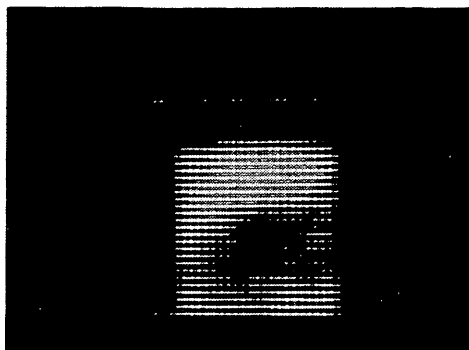


(b) X-Z像

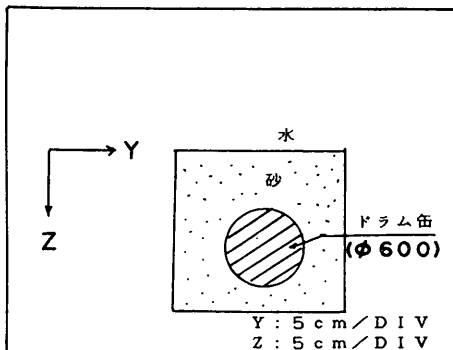


X-Z (18)

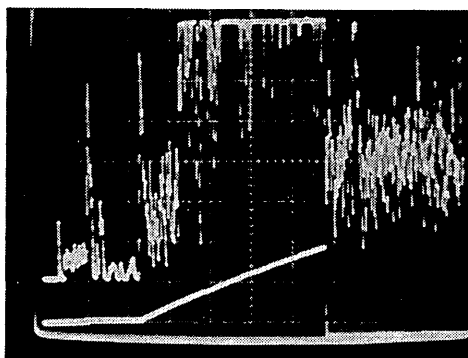
写真-10 砂中埋設ドラム缶探査の場合の映像



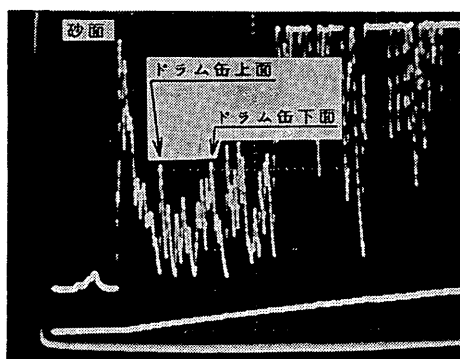
(c) Y-Z



Y-Z画面 (24)



(d) オシロスコープ波形 (2 mS/DIV, 2 V/DIV, 1 V/DIV)



(e) オシロスコープ波形 (0.5 mS/DIV, 2 V/DIV, 1 V/DIV)

写真-10 砂中埋設ドラム缶探査の場合の映像

すなわち 65 cm 離れた位置の YZ 面の映像で、ドラム缶がなく砂面だけが映っているのがわかる。(h)はモノパルス超音波の送受信波形を示す。下の曲線は STC をかけた状態で、送受信器から 2.7m の位置からかけていることがわかる。(i)は(h)の受信波形の時間軸を 4 倍に拡大したもので、ドラム缶の表面、砂面、ドラム缶の底部がよく分離されて受信されていることがわかる。

#### b) 缶内容物が砂の場合

次にドラム缶の内容物が砂の場合の実験の結果を写真-9 (a)~(g)に示す。実験条件はすべて a) の缶内容物が水の場合とはほぼ同じである。写真-9 の (a)はドラム缶表面の XY 面の映像である。ほぼ実物形状と一致していることがわかる。(b)は砂表面の XY 面の映像で、砂表面全体が光っているが、ドラム缶の部分は砂よりも受波レベルが高く識別できる。(c)はドラム缶底部附近の XY 面の

映像であるが砂の超音波吸収損失のため、ドラム缶底部はネガとなって表示されている。(d)は XZ 面を中央部でスライスした映像で、ドラム缶の砂面上に出ている部分 (約 25 cm) 及び埋設部分 (約 35 cm) を明瞭に表示している。特にドラム缶下部にシャドウができるのが特徴である。(e)は YZ 面を中央付近でスライスした映像で、超音波ビームの分解幅の関係でドラム缶上部に横方向の帯が入っているが、ほぼドラム缶形状を映像化している。(f)及び(g)は送受信波形のオシロスコープ波形で(g)は(f)の受信波形の時間軸を 4 倍に拡大したものである。

#### (3) 砂中埋設ドラム缶探査実験

次に海底下に埋没している機雷等異常物を探査する実験を行った。砂表面から 25 cm の位置に模擬機雷としてドラム缶を水平に設置した。送受信器は砂面から 2 m の位置にセットし対象物に送受信器の焦点がくるようにし

た。(図-23)

探査実験は、上記各種探査実験と同じ要領で行い。データ取込位置は、送受波器から 1.65 m の位置である。土中の超音波の減衰を補償する STC は送受波器から 2 m の位置すなわち砂表面からかけている。

実験の結果を写真-10 の(a)~(e)に示す。伝搬減衰の大きな砂中の対象物の映像であるため、未処理の映像では、対象物の形状が不明瞭であるが、処理することによって、その形状が明瞭になってくることがわかった。写真の(a)はドラム缶中央附近の XY 面の映像である。砂の超音波反射率が大きくて、ドラム缶の反射率が小さいため、基準面 0 で割算処理するとドラム缶の像はネガで表示されている。(b)はドラム缶中央附近の XZ 面の映像で、砂中の超音波伝搬減衰により像の下部が縮小しているが、砂面下 25 cm でも砂面のエコーと缶体の上面エコーとが、はっきり分離されていることがわかる。(c)は YZ 面の映像でドラム缶を中心軸から眺めた映像でややひずんだ像であるがドラム缶の円形がネガとして確認できた。(d)及び(e)は送受信波のオシロスコープ波形で(e)は受信波形の時間軸を 4 倍拡大したオシロスコープ波形である。

#### 4.4 各種形状対象物水中探査実験

機雷、砲爆弾等沈埋異常物のように形状が円筒形の対象物と他の各種形状の対象物が識別可能かどうか検討するために、三角柱、四角柱、鉄板、コンクリートブロック等を対象物として水中探査実験を行った。

探査実験は、水中模擬機雷探査実験と同じ要領で行った。

##### (1) 対象物が三角柱の場合

図-24 及び写真-11 に示すように海底探査実験水槽に三角柱 (520△×900mm) を吊下げ、三角柱の上部に超音波ビームの焦点がくるように送受波器を設置して探査

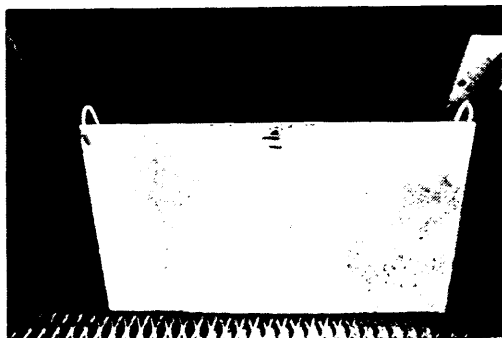


写真-11 三角柱ターゲットの外観

実験を行った。データ取込位置は送受波器から 2.25 m の位置である。

実験の結果を写真-12 の(a)~(e)に示す。(a)は三角柱上部の XY 面の映像を示したもので、超音波ビームの分解幅の関係で幅広く帯状の映像がでていますが、ほぼ三角柱上部の形状を映像化しうることがわかった。(b)は三角柱底部の XY 面の映像で、分解幅の関係で多少映像が広くなっているがほぼ実物形状を映像化しているものと考えられる。(c)は三角柱中央部の XZ 面の映像で、三角柱の上部と下部が映し出されている。一番下の像は二重反射の像と思われる。(d)は三角柱中央附近の YZ 面の映像で、三角形の断面を映像化したものである。三角形の頂点と底辺の像は出ているが、両側の斜辺からの映像がない。多分鏡面反射によって受波器への信号が微弱であったためと考えられる。一番下の像は二重反射による像と思われる。(e)は送受信波のオシロスコープ波形である。

##### (2) 対象物が四角柱の場合

図-25 及び写真-13 に示すように海底探査実験水槽に四角柱 (420□×900mm) を吊下げ、四角柱の上部に超音波ビームの焦点がくるように送受波器を設置して探査実験を行った。データ取込位置は送受波器から 2.25 m の位置である。

実験の結果を写真-14 の(a)~(e)に示す。(a)は四角柱上部の XY 面の映像を示したもので、ほぼ実物の形状寸法と同一の映像が得られている。(b)は四角柱中央部の XZ 面の映像で、四角柱の上部と下部が映し出されている。(c)は四角柱中央附近の YZ 面の映像で、四角形の断面を映像化したものである。四角柱の上部と下部が映像化されているが分解幅の関係で映像が長くなっているがほぼ実物の形状を映像化していると思われる。(d)及び(e)は送受信波のオシロスコープ波形であり、(e)は(d)の受信波形の時間軸を 2 倍に拡大したオシロスコープ波形である。

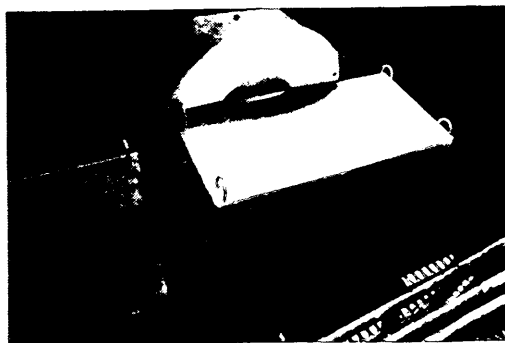


写真-13 四角柱ターゲットの外観

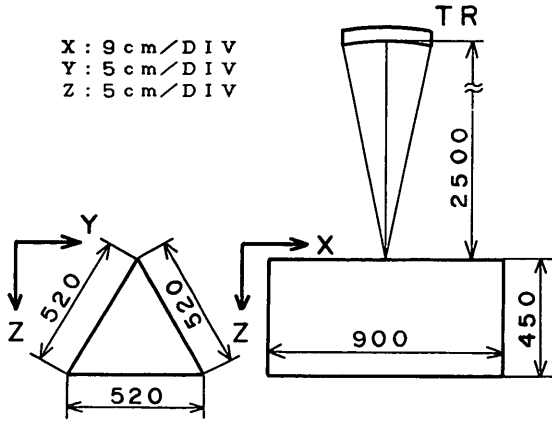
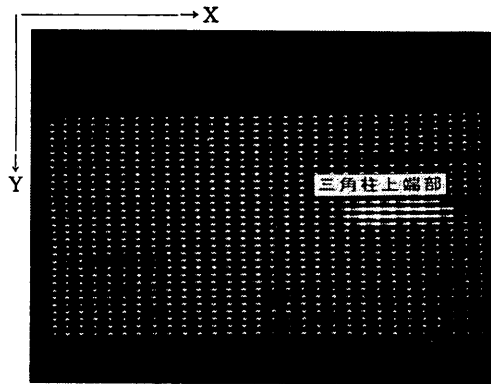
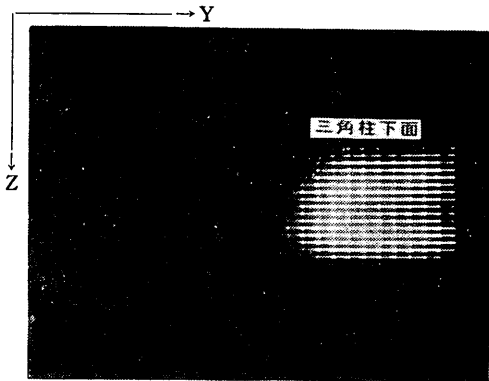


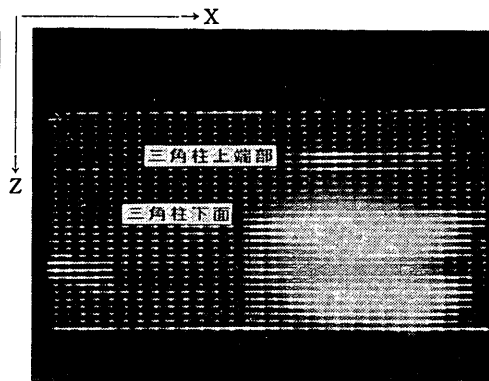
図-24 対象物が三角柱の場合の探査実験



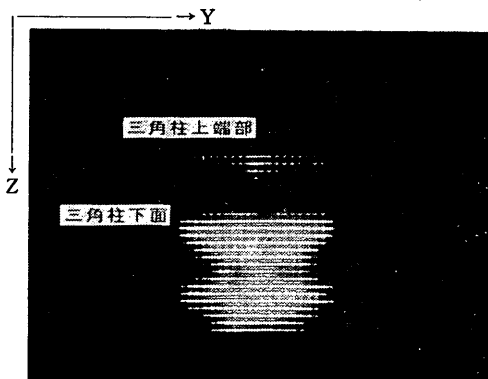
(a) X-Y像 (5/0)



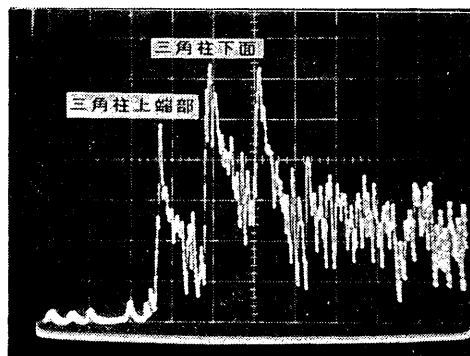
(b) Y-Z像 (15/0)



(c) X-Z像 (14/0)



(d) Y-Z像 (20/0)



(e) オシロスコープ (0.5mS/DIV, 1V/DIV)

写真-12 対象物が三角柱の場合の映像

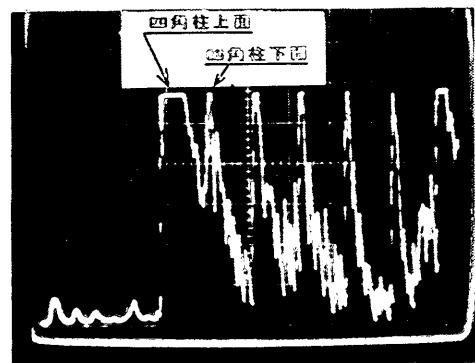
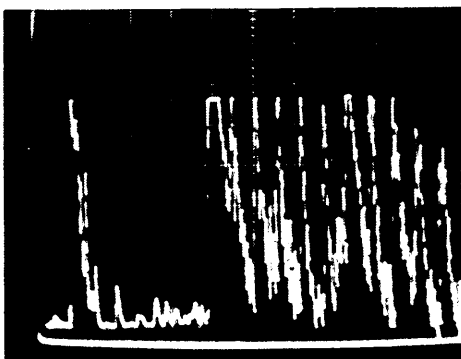
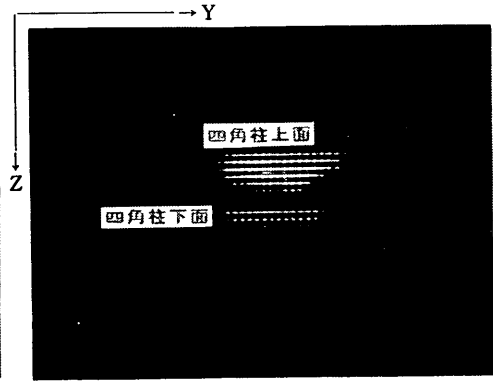
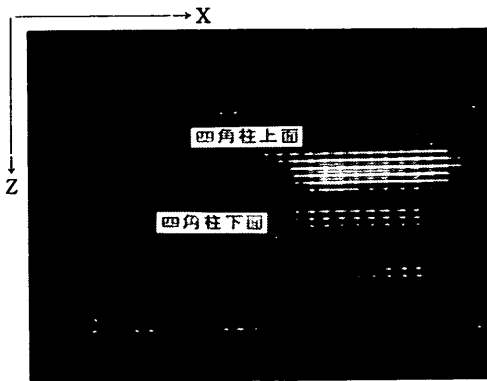
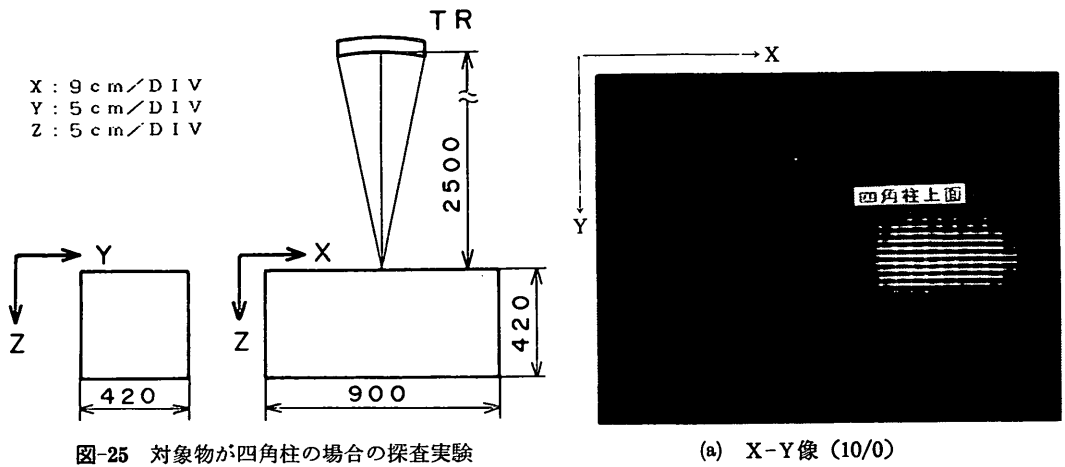
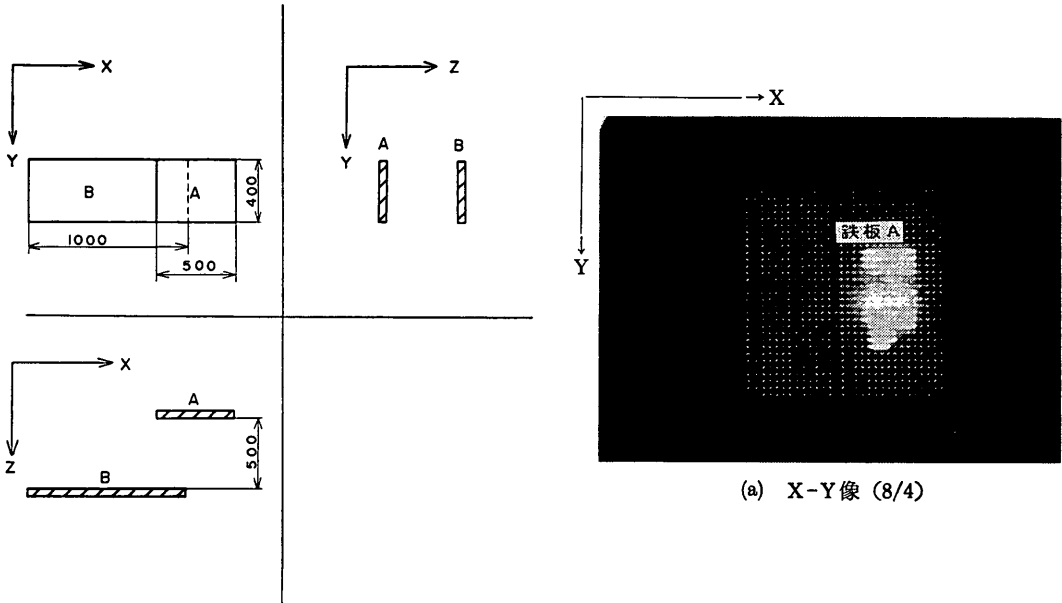


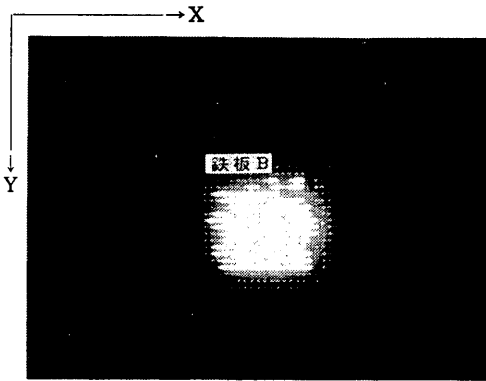
写真-14 対象物が四角柱の場合の映像



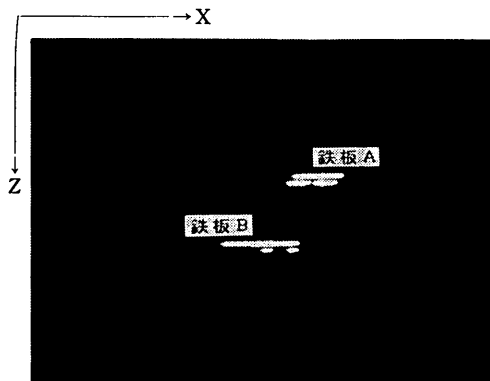


(a) X-Y像 (8/4)

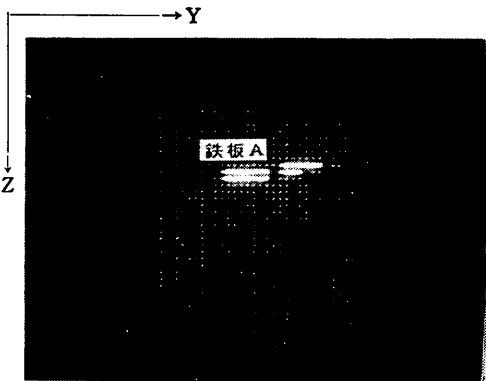
図-26 対象物が鉄板の場合の探査実験



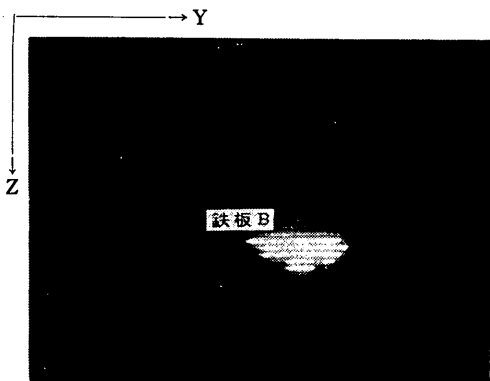
(b) X-Y像 (20/4)



(c) X-Z像 (10/4)



(d) Y-Z像 (20/4)



(e) Y-Z像 (11/4)

写真-15 対象物が鉄板の場合の映像

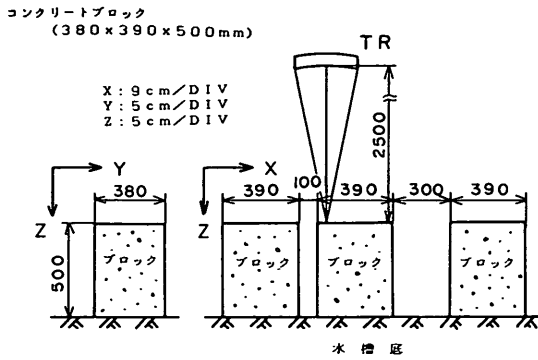


図-27 対象物がコンクリートボックスの場合の探査実験

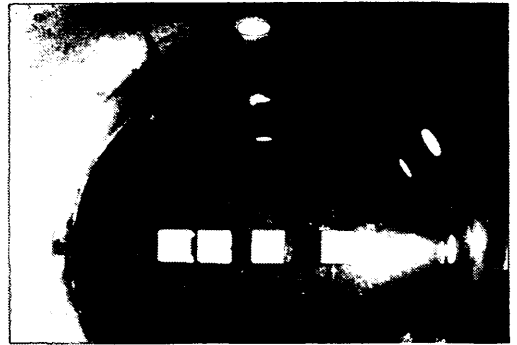
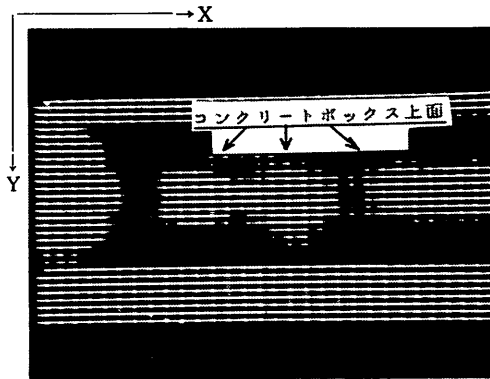
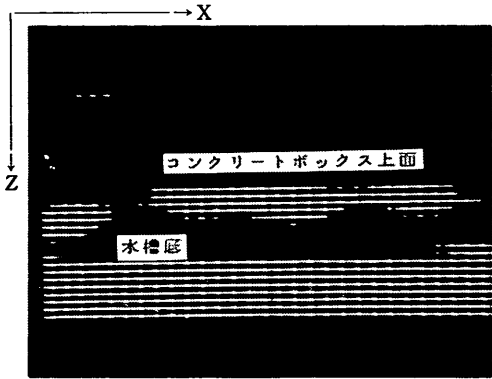


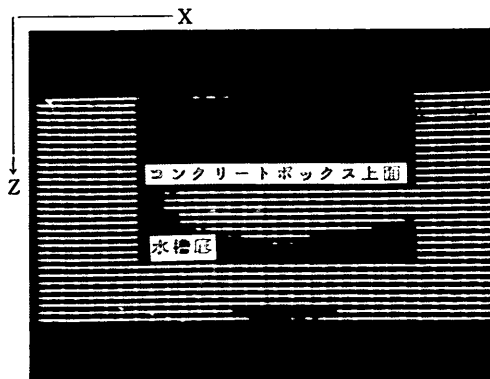
写真-16 コンクリートブロックの設置状況



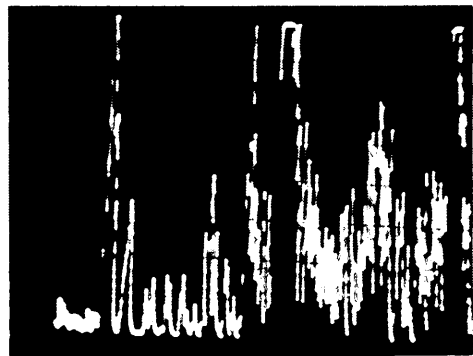
(a) X-Y像 (19/0)



(b) X-Z像 (19/0)



(c) X-Z像 (15/0)



(d) オシロスコープ波形 (1mS/DIV, 1V/DIV)

写真-17 対象物がコンクリートボックスの場合の映像

(3) 対象物が鉄板の場合

図-26 に示すように 海底探査実験水槽に鉄板 A (500×400mm) 及び B (1000×400mm) を上下の間隔0.5m をおいて吊下し、鉄板 A に超音波ビームの焦点がくるように送受波器を設置して探査実験を行った。

実験の結果を写真-15 の(a)~(e)に示す。(a)は上部の鉄板を(b)は上部の鉄板の XY 面、(c)は XZ 面、(d)は上部鉄板の YZ 面、(e)は下部鉄板の YZ 面の断層像をそれぞれ示す。

(4) 対象物がコンクリートボックスの場合

海底探査実験水槽の水底に図-27 及び写真-16 に示すようにコンクリートブロック (長さ 390×幅 380×高さ 500mm) を設置し、ブロック表面に超音波ビームの焦点がくるように送受波器を設置し探査実験を行った。

写真-17 (a)~(d)に実験の結果を示す。(a)はブロックを水平面でスライスした XY 面の映像を示す。ほぼ実物の形状を映像化していることがわかる。(b)はブロック中央部の XZ 面の映像でブロックそれぞれの表面のみが映像化されていることがわかる。(c)は中央のブロックの YZ 面の映像で、データ取込位置から13枚目すなわち 65cm の位置にブロック表面の像が映っていることがわかる。またブロック表面から10枚目 50 cm の位置に水底の像が映っているのがわかる。(d)は送受信波のオシロスコープ波形で、ブロック表面と水底からの受信波が明確に記録されている。

4.5 モノパルス超音波の加圧特性実験

港湾工事の大水深化によって、30m以深の比較的深い海底の探査を行う必要が増大してきた。このため、効率的に適確に探査を行うために探査システムの送受波器部を海底附近に設置することが必要である。

送受波器部を大水深海底附近に設置した場合の問題点として深度に比例した高水圧による機器の耐水圧性能は勿論のこと、高水圧が超音波特性に及ぼす影響を検討する必要がある。

そこで水深 100m までの海底の環境条件を再現できる加圧水槽でモノパルス超音波の加圧特性実験を行った。

(1) 実験装置

使用した実験装置は次のとおりである。

a) 加圧水槽<sup>10)</sup>

直径 4 m, 球形鋼鉄製, 压力容器  
水圧 0~10 kgf/cm<sup>2</sup> 連続可変

b) 海底沈埋異常物探査実験装置

c) 校正用マイクロホン

周波数範囲 10 kHz~200 kHz  
受波電圧感度 -113 dB (0 dB : 1 V/ $\mu$  bar)

d) デジタルメモリスコープ

メモリ容量 4000ワード/チャンネル  
感度 5 mV~5 V/div  
1 mV~1 V/div (×5 拡大器使用)  
周波数帯域 DC~15 MHz

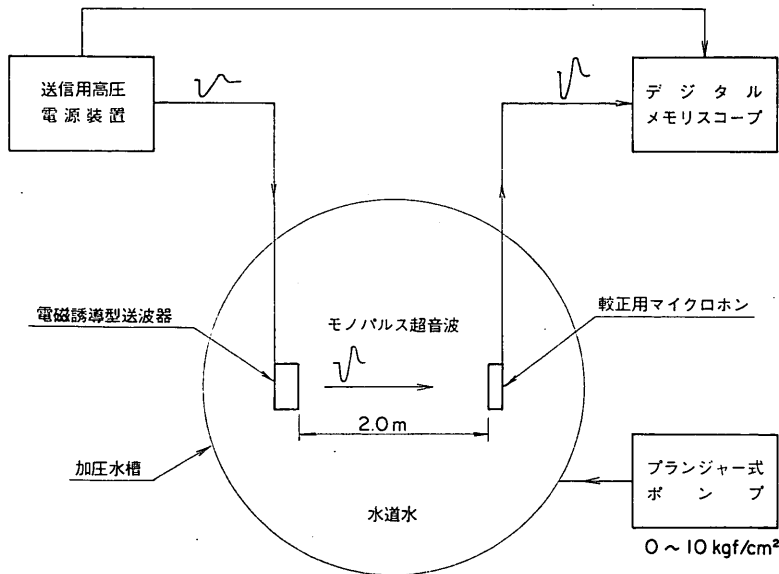


図-28 モノパルス超音波の加圧特性実験ブロック図

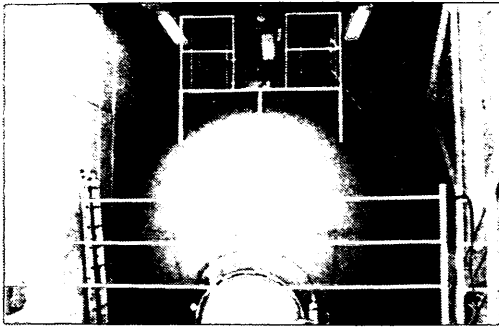
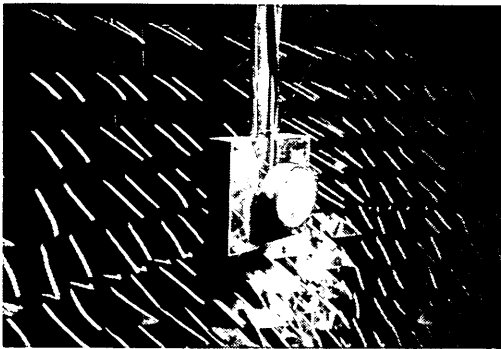


写真-18 加圧水槽の外観



(a) 電磁誘導型送波器



(b) ハイドロホン

写真-19 送受波器の設置状況

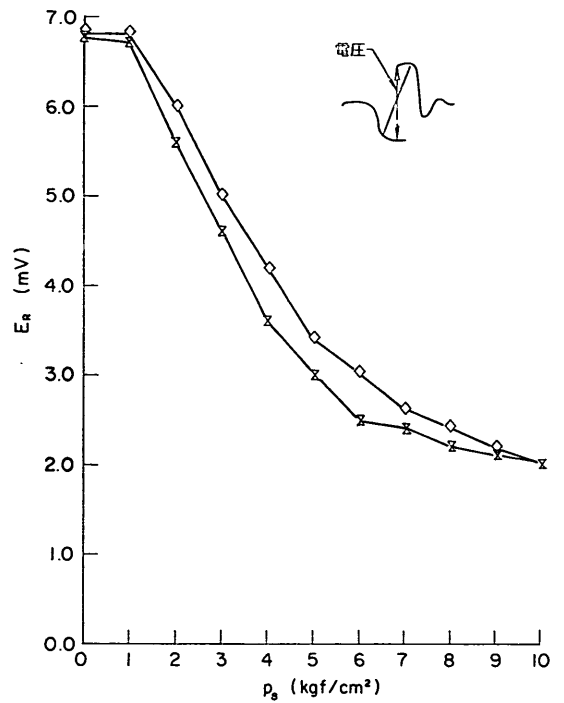


図-29 静水圧と受波電圧

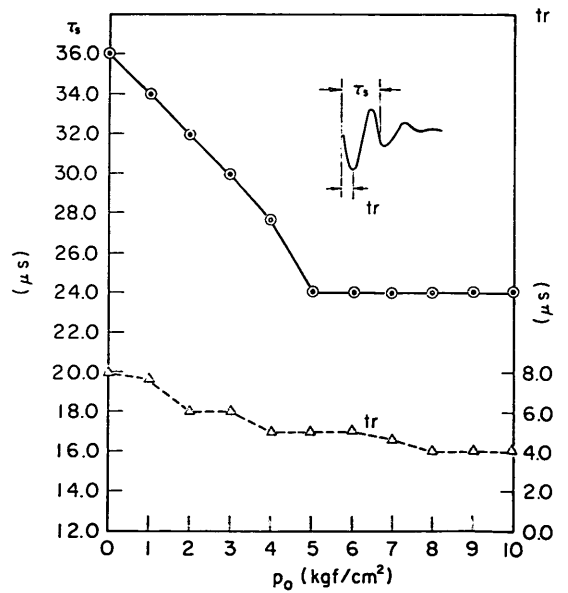
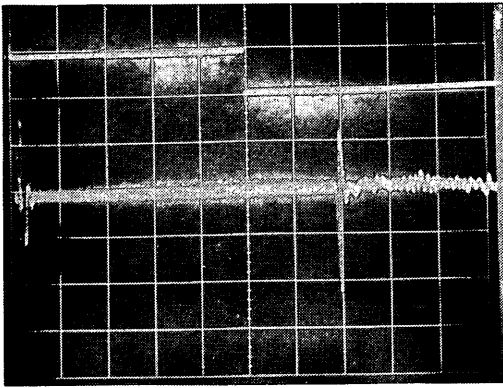
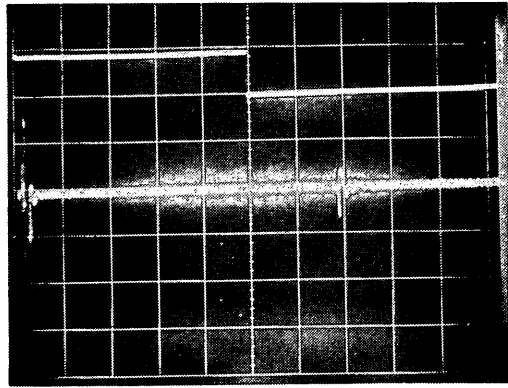


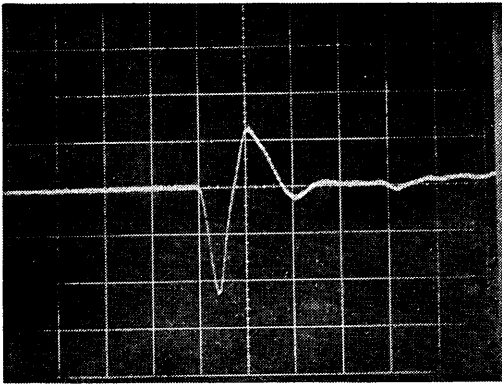
図-30 静水圧とパルス幅及びパルス立上り時間の関係



(0.2 ms/DIV, 5 V/DIV, 2 mV/DIV)

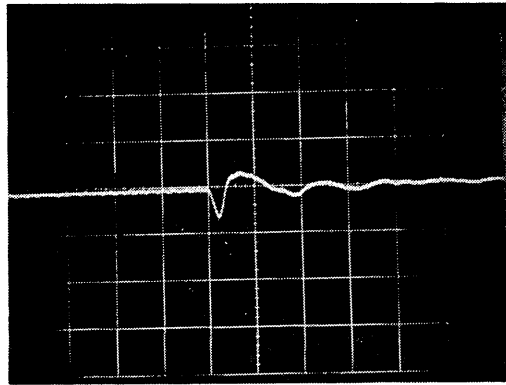


(0.2 ms/DIV, 5 V/DIV, 2 mV/DIV)



(20  $\mu$ S/DIV, 2 mV/DIV)

(a) 静水圧 0 kgf/cm<sup>2</sup> のとき



(20  $\mu$ S/DIV, 2 mV/DIV)

(b) 静水圧 10 kgf/cm<sup>2</sup> のとき

写真-20 加圧時のモノパルス超音波のオシロスコープ波形

## (2) 実験概要

図-28 に示すように、海底沈埋異常物探査実験装置の電磁誘導型送波器 6 個のうちの 1 個を加圧水槽の中に設置し、他の 5 個は同時に送波するため水を入れたポリバケツに設置した。加圧水槽内の電磁誘導型送波器から中心軸上 2 m 離れた位置に校正用マイクロホンを設置した。写真-18 に加圧水槽を、写真-19 に送波器及びマイクロホンの設置状況を示す。

実験は送信用高圧電源装置で直流 1500 V の電圧でモノパルス電流を発生させ、電磁誘導型送波器を駆動してパルス幅 40  $\mu$ S、超音波周波数 25 kHz、繰り返し周期 1 秒のモノパルス超音波を放射した。このモノパルス超音波を 2 m 離れた校正用マイクロホンで受波し、デジタルメモリスコープでその波形を観測、記録した。以上の

実験を水槽内の清水の圧力をプランジャー式ポンプで、0 ~ 10 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲を 1 kgf/cm<sup>2</sup> ごとに変化させて行った。

実験の結果を図-29 に水圧と受波電圧の関係、図-30 に水圧とパルス幅及びパルス立上り時間の関係について示す。また写真-20 にオシロスコープ波形を示す。

図-29 によるとモノパルス超音波の校正用マイクロホンによる受波電圧は、圧力が増加すればするほど低下することがわかる。

また図-30 によればモノパルス超音波のパルス幅及びパルス立上り時間は圧力が増加すると小さくなっていくことがわかった。

写真-20 の(a)は水圧 0 kgf/cm<sup>2</sup> のとき、(b)は水圧 10 kgf/cm<sup>2</sup> のときの受信波形でそれぞれ下の写真は拡大

波形である。水圧が大となれば振幅が小となることわかる。

5. 実験結果と考察

以上の各室内実験の結果をとりまとめ考察する。

(1) 予備実験

モノパルス超音波放射特性実験の結果を用いて、探知可能距離、水平及び垂直分解能、対象物識別能力について考察する。

a) 探知可能距離

超音波周波数 25 kHz, 送波音圧 92 dB (0 dB: 1 μbar/1500 V-m) を用い、図-31 のような条件すなわち送受波器から海底までの距離 2 m, 海底面からの対象物までの距離 x m, 対象物の高さ 0.6 m とした場合の探知可能距離を求めた。ただし超音波伝搬の条件として、水中の減衰定数 0 dB/m, 海底面及び対象物境界面の透過損失 C=1 dB, 対象物の反射損失 RL=20 dB, 砂中の減衰定数を Hamilton<sup>11)</sup> の堆積層における超音波減衰定数の周波数特性から求めて、α<sub>S</sub>=1 dB/m, 7 dB/m, 15 dB/m の 3 種類とした。

探知可能距離を算出した結果を図-32 に示す。一点鎖線は α<sub>S</sub>=1 dB/m, 実線は α<sub>S</sub>=7 dB/m, 点線は α<sub>S</sub>=15 dB/m である。各曲線の上の線は対象物の下部を, 下の線は対象物の上部を探知する際の超音波伝搬損失を示す。なお拡散損失や, 砂中の伝搬損失を補償するため

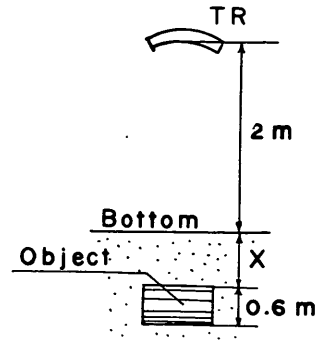


図-31 海底探査の条件

に, STC を, α<sub>S</sub>=1 dB/m 以外にかけている。計算式は下記の式を用いた。

対象物の上部を探知する場合

$$2 TL + RL = S_P L + 2 \alpha_S x_2 + 2 C \dots \dots \dots (17)$$

対象物の下部を探知する場合

$$2 TL + RL = S_P L + 2 \alpha_S (x_2 + x_3) + 4 C \dots \dots \dots (18)$$

ただし α<sub>S</sub>=7 及び 15 dB/m では, STC で損失補償している。

ここに, 2 TL: 往復の伝搬損失 (dB)

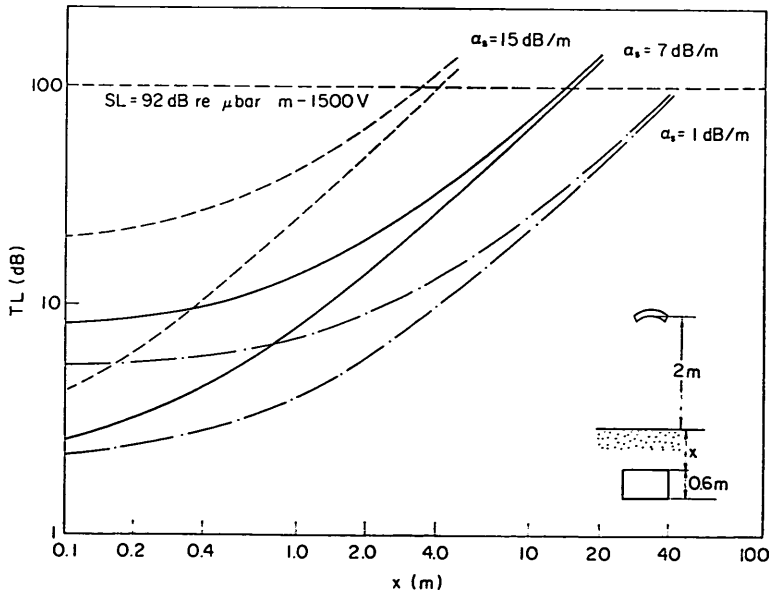


図-32 伝搬損失と探知可能距離

$RL$  : 反射損失 (dB)

$SPL$  : 拡散損失 (dB) =  $20 \log 2x$

$\alpha_S$  : 砂中の超音波減衰定数 (dB/m)

$x_2$  : 海底から対象物までの距離 (m)

$x_3$  : 対象物の高さ (m)

$C$  : 海底又は対象物境界面の透過損失 (dB)

計算の結果、パルス長  $l$  は、3 cm となる。したがって、上下に 3 cm 以上の距離で離れている対象物は分離して探知できることがわかる。

c) 対象物識別能力

対象物の材質によって反射エコーレベルの相違によって識別できるかどうかを検討してみる。表-2によると反射損失の平均値は、コンクリートブロックが、0.088 dB、鉄板が -6.072 dB となっていることがわかる。そのレベル差をとってみると、最高値が 8.22 dB、最低値が、4.91 dB、平均値は 6.16 dB となり、最高 2.6 倍、最低 1.8 倍、平均約 2 倍のレベル差があることがわかり、エコーレベルの強さ、すなわち、鉄板からの超音波パルスの反射強度がコンクリートのそれよりも 2 倍程度大きいので、そのレベル差で対象物の材質が推定できることがわかった。

図-32 で、各曲線群と点線の交点の距離  $x$  が探知可能距離である。すなわち送波音圧  $SL=92$  dB と伝搬損失  $2TL+RL$  (dB) が一致した距離が、減衰定数  $\alpha_S$  のときの探知可能距離である。この図から探知可能距離を求

めてみると  $\alpha_S=1$  dB/m のときは約 40 m 以下、 $\alpha_S=7$  dB/m のとき約 15 m 以下、 $\alpha_S=15$  dB/m のとき約 4 m 以下であることがわかる。

b) 水平及び垂直分解能

図-13 の各深度ごとのモノパルス超音波ビーム水中分解幅が、焦点距離 2.5 m で 25 cm であるため、水中または海底にある二つの対象物が 25 cm 以上離れていれば、分離して探知することが可能であることがわかる。

また、モノパルス超音波ビームのパルス幅が  $40 \mu\text{S}$  であるので、水中または土中の音速度が 1500 m/S と仮定すると、パルス長  $l$  は下記の式で表すことができる。

$$l = C\tau_S/2 = 750\tau_S \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 $C$  は音速度、 $\tau_S$  はパルス幅である。

(2) 水中模擬機雷探査実験

ドラム缶 (600φ×900mm) を水中に吊下した場合の超音波の反射、透過の様子を検討してみる。

図-32 は、ドラム缶の X-Y 断面を示したものであり、ドラム缶の内部の媒質を外部の媒質と同じく水とする。ドラム缶の板厚  $l$  は 6 mm、水の固有音響インピーダンス  $Z_1$  は  $1.45 \times 10^8$  dyne·S/cm (1 気圧, 0°C)、鉄の固有音響インピーダンス  $Z_2$  は、 $4.9 \times 10^8$  dyne·S/cm として反射率及び透過率を求めてみる。強さの反射率  $R_I$  及び強さの透過率  $T_I$  は下記のとおりである。

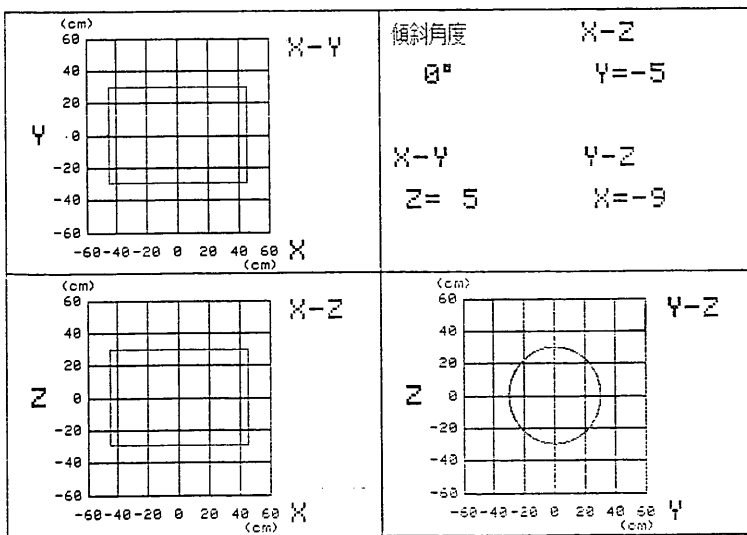


図-33(a) 傾斜角度  $0^\circ$  のときのドラム缶の三方向断面図形

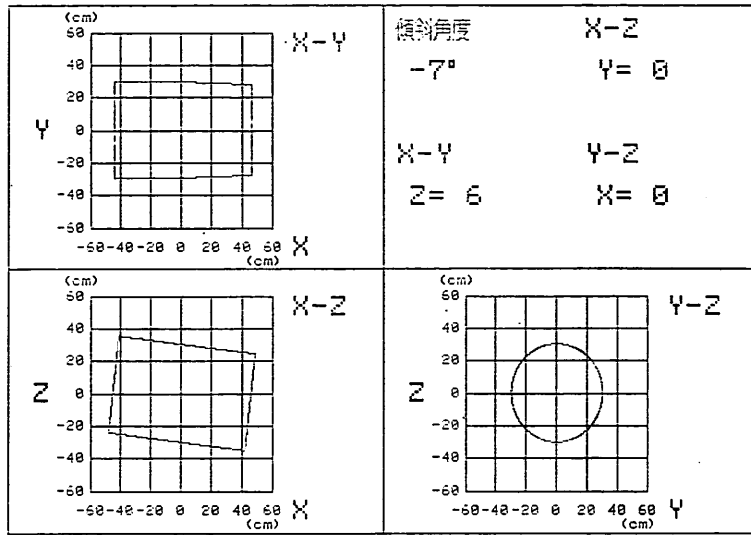


図-33(b) 傾斜角度 7° のときのドラム缶の三方向断層図形

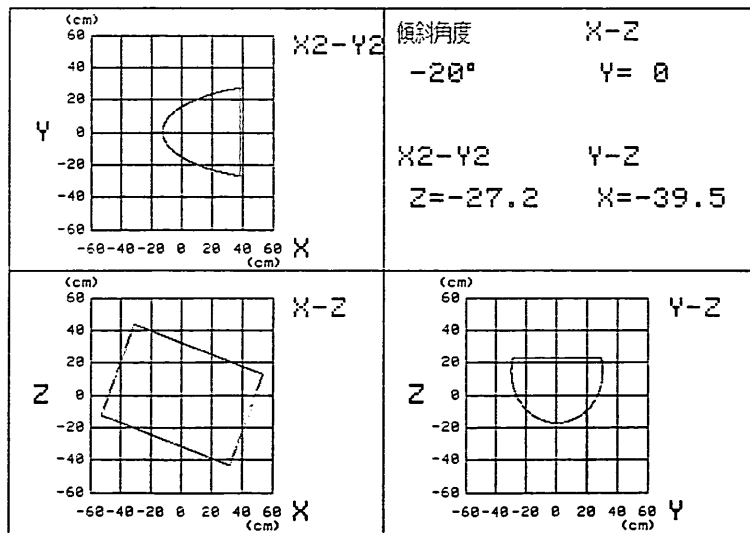


図-33(c) 傾斜角度 20° のときのドラム缶の三方向断層図形  
(Z = 27.8 cm のとき)



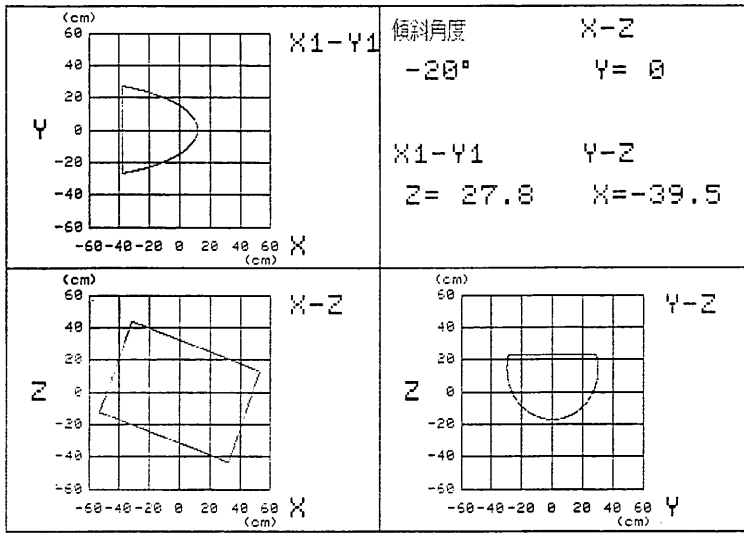


図-33(d) 傾斜角度 20° のときのドラム缶の三方向断層図形  
(Z = -27.2 cm のとき)

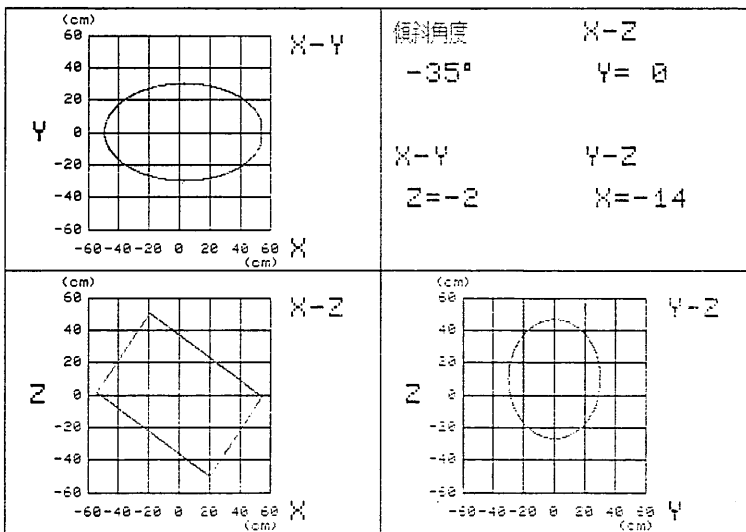


図-33(e) 傾斜角度 35° のときのドラム缶の三方向断層図形

表-3 各種形状対象物探査による反射特性

		$x$ (m)	$t$ (ms)	$\tau_R$ (ms)	STC (V)	$E_R$ (mV)	SL (dB)	2 TL (dB)	EL (dB)	RL (dB)
砂中埋設 ドラム缶	砂表面(上)	2.00	2.66	0.20	0	13.0	92.00	-12.04	-62.28	-17.68
	缶表面(上)	2.25	3.16	0.05	0.2	6.2	"	-13.06	-55.25	-23.09
	缶表面(下)	2.85	3.81	1.00	0.3	6.1	"	-15.12	-55.71	-21.17
	水底	2.95	4.30		0.5	7.1	"	-15.42	-57.03	-19.55
半埋設 ドラム缶 (中は水)	缶表面(上)	2.50	3.24	0.1	0	8.52	92.00	-13.98	-58.61	-19.41
	砂表面	2.73	3.59	0.325	0.2	9.2	"	-14.74	-59.28	-17.98
	缶表面(下)	3.10	4.19	0.15	0.3	6.76	"	-15.85	-56.60	-19.55
	水底	3.20			0.35	9.75	"	-16.12	-59.78	-16.10
同上 ドラム缶 (中は砂)	缶表面(上)	2.50	3.20	0.20	0	9.2	92.00	-13.98	-59.28	-18.74
	砂表面	2.73	3.50	0.20	0.18	9.02	"	-14.74	-59.10	-18.16
	缶表面(下)	3.10	4.60		0.4	6.8	"	-15.85	-56.65	-19.50
	水底	3.20			0.5	11.1	"	-16.12	-60.91	-14.97
砂上設置 ドラム缶 (中は砂)	缶表面(上)	2.50	3.36	0.40	0	5.6	"	-13.98	-54.96	-23.06
	缶表面(下) (砂表面)	3.10	4.11	0.40	0.1	5.1	"	-15.85	-54.15	-22.00
コンクリート ブロック	ブロック(上)	2.50	3.48	0.20	0	7.9	"	-13.98	-57.95	-20.07
	水底	3.00	4.15	0.60	0	7.9	"	-15.56	-57.95	-18.49
三角柱	三角柱(上)	2.50	3.40	0.50	0	5.0	"	-13.98	-53.98	-24.04
	三角柱(下)	2.95	3.98	1.00	0	6.5	"	-15.42	-56.26	-20.32
四角柱	四角柱(上)	2.50	3.47	0.40	0	5.80	"	-13.98	-55.27	-22.75
	四角柱(下)	2.95	4.07	1.00	0	5.90	"	-15.33	-55.42	-21.25

$$R_I = \frac{\text{反射波の強さ}}{\text{入射波の強さ}} = \frac{\left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2}{4 \cot^2 \frac{2\pi l}{\lambda_2} + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2} \dots\dots\dots(20)$$

$$T_I = \frac{\text{透過波の強さ}}{\text{入射波の強さ}} = 1 - R_I \dots\dots\dots(21)$$

計算した結果、反射率  $R_I$  は 0.994 (-0.025 dB)、透過率  $T_I$  は 0.006 (-22.22 dB) となり、ほとんどドラム缶表面で反射することがわかる。したがって、送波音圧レベル  $SL$  が 92 dB の音源で水中のドラム缶の下面を探知するには、92 dB - (22.22 × 2) dB = 47.56 dB のエコーレベル  $EL$  で受信することができる。

次に X-Y, X-Z, Y-Z 断層像と実物形状との比較検討を行ってみる。

図-33 は、実験装置で映像化したドラム缶の三方向断

層像と同じ断面をマイクロコンピュータで処理して、その輪廓を図形化して示したものである。この断層像とコンピュータで図形化したものとを比べてみると、雑音を多少含んでいるが、ほぼ同じ様な形状で映像化していることがわかる。

(3) 砂中模擬機雷探査実験

砂に埋設した模擬機雷探査における超音波特性について検討する。

探査の際に得られたオシロスコープ波形の振幅、すなわち受信電圧から下記式を用いて対象物における反射損失を求めた。

反射損失  $RL$  (dB) は、

$$RL = SL - 2 DL - EL \\ = 20 \log P_S - 20 \log 2x - 20 \log P_R \text{ (dB)} \dots\dots\dots(22)$$

ここに、  $SL$  : 送波音圧レベル (dB)

$DL$  : 拡散損失 (dB)

$EL$  : 受波音圧レベル (dB)

$P_S$  : 送波音圧 ( $\mu P_a$  at 1 m)

$P_R$  : 受波音圧 ( $\mu P_a$ )

$x$  : 音源から海底までの距離 (m)

(22) 式によって反射損失を求めた結果を表-3 に示す。

ただし、反射損失には減衰損失、透過損失を含む。

表-3 から砂表面の反射損失は約 18 dB, 水中にあるドラム缶表面の反射損失は約 19 dB, 砂中に埋設されたドラム缶の表面の反射損失は約 23 dB であることがわかる。

これらの値から砂の減衰定数を求める。すなわち、砂中ドラム缶の反射損失 23 dB から水中ドラム缶反射損失 19 dB を引いた値 4 dB を埋設深度 0.25m の 2 倍, 0.5m で割ると砂中の超音波減衰定数  $\alpha_s$  は 8 dB/m が得られる。ただしここでは水と砂との境界層での透過損失を 0 として計算した。

また、ドラム缶の下面の反射損失は各ケースで最高 22.00 dB, 最低 19.50 dB, 平均 20.75 dB であり、十分に探知可能である。

(4) 各種形状対象物水中探査実験

三角柱, 四角柱, 鉄板, コンクリートブロック等を対象物として水中探査実験を行った結果について検討する。

a) 三角柱

三角柱を対象物とした場合、オシロスコープの波形記録によると、三角柱上部からの受信波は非常にパルス幅が小さいことがわかる。これは対象物の受波面が小さいことを示している。また三角柱底面で音波が多数回反射しているが、二回反射以降のレベルが順次低下している。これは三角柱で側面の板に斜めに入射するための屈折により受波器方向への反射波が順次小さくなっていくためと考えられる。三角柱の上部と下部からの反射損失の差をとってみると、前者の反射損失は、24.04 dB, 後者のそれは 20.32 dB で、その差は 3.72 dB あり、受波

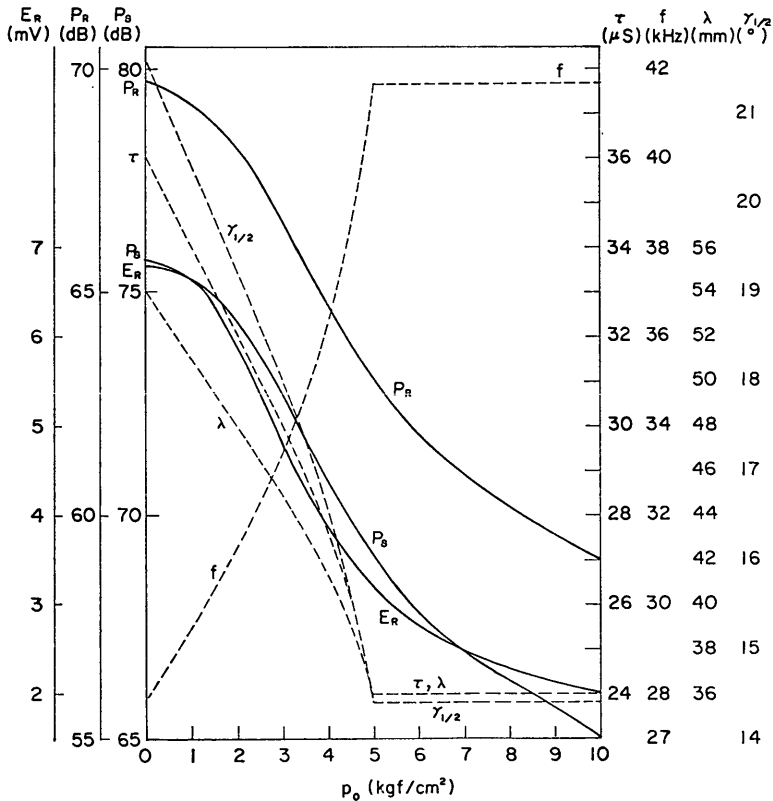


図-34 静水圧とモノパルス超音波の波形

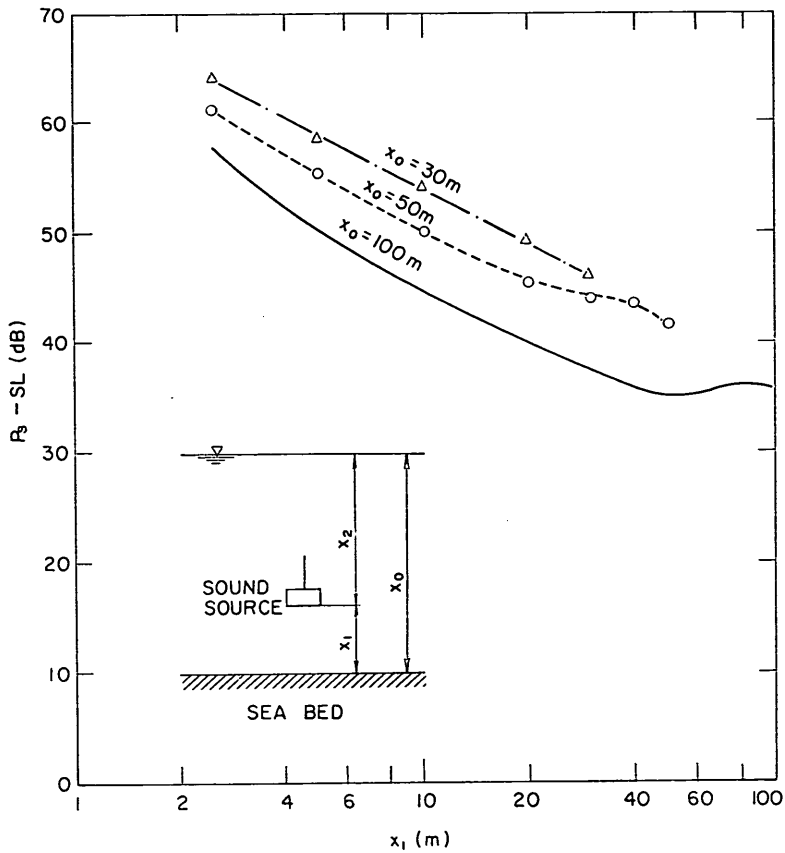


図-35 送波器の海底からの距離と海底面における受波レベルの関係

面積の小さな上部が反射損失が大、すなわち反射率が小さくなったものと考えられる。

三角柱の映像は、X-Y面は三角柱上部、下部とも実形を忠実に再現しているが、超音波ビームの分解幅の関係でエッジ部が多少不明確な部分がある。X-Z面、Y-Z面の映像とも形状寸法を忠実に再現しているが、対象物内の二回反射と残響が大きいのが特徴である。

b) 四角柱

オシロスコープの波形記録によると、対象物上面からの受信波はパルス幅が長くなっている。これは受波面が広がりがあがる（板状）ことを示していると考えられる。対象物上面からの反射損失は、22.75 dB、下面からの反射損失は 21.25 dB でほぼ同じであるので同一形状（板状のもの）と推定できる。また対象物内部の多重反射のレベルはほぼ等しく、上下とも板状のため反射による減衰が小さいためと考えられる。

四角柱の映像は、X-Y面はほぼ忠実に形状寸法を再

現している。X-Z面、Y-Z面とも実形を忠実に再現しているが、三角柱と比較して四角柱上面の映像の幅が大きい。これは受波面が三角柱に比して大きいためと考えられる。

c) 鉄板その他

2枚の鉄板を垂直方向に0.5mずらして吊った状態の映像は、X-Z面の映像で2枚の鉄板の水平及び垂直方向の位置関係や形状寸法を忠実に再現している。X-Y面の映像も縁部分に超音波ビームの分解能の関係で不鮮明な部分があるが、ほぼ実物の形状寸法を忠実に映像化している。Y-Z面からみた映像も2枚の鉄板の位置関係を映像化しており、X-Y、X-Z、Y-Z面の画像を並べてみると2枚の鉄板の水中に吊さげている状況を立体的に把握できる。

対象物にコンクリートブロックを3個、水底に一定間隔に設置した場合の映像は、三方向断面像ともほぼ再現している。

(5) モノパルス超音波の加圧特性実験

水深 100m までの海底にモノパルス超音波放射用電磁誘導型送波器を設置して海底探査を行う場合を想定して、深度による静水圧の増加がモノパルス超音波の送波特性に及ぼす影響について考察する。

a) 静水圧が送波レベルに及ぼす影響

図-29 によれば静水圧が増加すればモノパルス超音波の受波レベル  $E_R$ (mV) が低下することがわかる。実験式を求めてみると下記のとおりとなる。

$$E_R = 7.85 p_0^{-0.572} \dots\dots\dots(23)$$

ここに  $p_0$ : 静水圧 (kgf/cm<sup>2</sup>)

ただしこの式の適用範囲は  $p_0$  が 1~10 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲である。受波レベル  $E_R$ (mV) は静水圧  $p_0$ (kgf/cm<sup>2</sup>) の平方根にはほぼ反比例することがわかる。

これらの実験値から送波器のモノパルス超音波送波レベル  $P_S$  ( $\mu$  bar at 1m) を下記式から求めてみると、図-34 に示すようになる。

$$\begin{aligned} P_S &= P_R + 20 \log 2 \\ &= P_R + 6.02(\text{dB}) \dots\dots\dots(24) \end{aligned}$$

ここに  $P_R$ : 受波音圧  $20 \log E_R + k_m = -113(\text{dB})$

$k_m$  = マイクの受波感度

$20 \log 2$  = 送受波器間の拡散損失 (dB)

すなわち静水圧の増加によって電磁誘導型送波器から放射されるモノパルス超音波の送波音圧レベルは低下することがわかった。

b) 送波器設置深度と海底面受波レベルの関係

a) の静水圧とモノパルス超音波送波音圧レベルの関係を用いて最も送波音圧レベルが高く効率よく探査できる最適深度を検討してみる。図-35 に示すように横軸に送波器から海底までの距離  $x_1$ (m)、縦軸に海底面の受波音圧レベルすなわち送波音圧レベル  $P_S$  から拡散損失  $SL$  を引いた  $P_S - SL$ (dB) をとり、プロットした結果、水深  $x_0$  が 30, 50, 100m いずれにおいても送波器を海底近くに設置した方が、送波音圧レベルが低下するにもかかわらず海底面の受波音圧レベルが大きくなって探査効率が高くなることがわかった。このことからいかなる水深でも送波器は海底近くに設置した方がよいことがわかった。

c) 静水圧とモノパルス超音波の波形

図-30 に静水圧とモノパルス超音波のパルス幅  $\tau_S$ ( $\mu$ S) とパルス立上り時間  $t_r$ ( $\mu$ S) を示す。

パルス幅  $\tau_S$  は静水圧  $p_0$ (kgf/cm<sup>2</sup>) が 0~5 kgf/cm<sup>2</sup> までほぼ直線的に短くなり、その後で一定値となってい

る。実験式を求めてみると下記ようになる。

$$\tau_S = -3.2 p_0 + 36.4 \quad (p_0 = 0 \sim 5 \text{ kgf/cm}^2) \dots\dots(25)$$

$\tau_S$  が短くなると必然的に周波数  $f$ (kHz) が高くなり、また波長  $\lambda$ (mm) は短くなる。なお  $f$  が変わると超音波ビームの指向半減角  $\gamma_{1/2}(0)$  も小さくなる。その関係を図-34 に示す。

周波数  $f$  が高くなり、波長  $\lambda$  が短くなることや指向半減角  $\gamma_{1/2}$  が小さくなることは分解能が向上し精度が良くなるので好ましいことであるが、他方、周波数  $f$  が高くなり、波長  $\lambda$  が短くなることは海底土中に超音波を透過させる際伝搬損失が増加し、超音波探知距離が短くなることが考えられる。一般に海底堆積層中の超音波の減衰定数  $\alpha_S$ (dB/m) は、周波数  $f$ (kHz) に比例して増加する。したがって静水圧が 0 のとき周波数が 27.8(kHz) の超音波は静水圧が 5(kgf/cm<sup>2</sup>) 以上増加すると 41.7(kHz) となり、1.5倍高くなっている。

6. 結 論

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。

(1) 予備実験

試作した海底沈埋異常物探査実験装置を海底探査実験水槽に設置して音響特性実験を行った結果、下記のことわかった。

- a) 超音波周波数 25 kHz, パルス幅 40  $\mu$ S, 送波音圧 92 dB (0 dB : 1  $\mu$  bar/1500 V-m) のモノパルスが放射され、超音波ビームの焦点距離 2.5m, その位置におけるビーム幅 25 cm, 送波器の指向性は半減半角で約 3 度であることが確認できた。
- b) 本実験装置の探知可能距離を求めてみると、堆積層における超音波減衰定数  $\alpha_S$  が 1 dB/m のときは約 40m 以下,  $\alpha_S$  が 7 dB/m のときは約 15m 以下,  $\alpha_S$  が 15 dB/m のときは約 4 m 以下であることがわかった。
- c) 本実験装置のモノパルス超音波ビームの分解能は水平方向が 25 cm, 垂直方向は 3 cm である。
- d) 対象物からの反射レベルの相違によって対象物の材質を識別できるかどうかを検討した結果、対象物が鉄とコンクリートでは 2 倍程度のレベル差があるため識別できることがわかった。

(2) 水中模擬機雷探査実験

模擬機雷としてドラム缶を用い、海底探査実験水槽の水中に、水平状態、7°, 20°, 35° 傾斜した状態の 4 形態に吊下して、探査実験を行った結果、CRT に X-Y,

X-Z, Y-Z 平面の三方向断層画像を求めることができた。なお生データでは画像化できなくても割算処理、量子化処理、量子平均化処理することによって忠実に実形を画像化できることが確認された。また、従来技術では探査不可能な傾斜角10度以上の対象物でも忠実に映像化されることがわかった。

(3) 砂中模擬機雷探査実験

ドラム缶を砂に埋設した模擬機雷探査実験を行った結果、下記のことがわかった。

a) 砂面上ドラム缶探査実験

砂面上にドラム缶を設置した場合、各断層像とも、実形を忠実に映像化しており、砂面とドラム缶の位置関係は識別できることがわかった。

b) 半埋没ドラム缶探査実験

ドラム缶を砂の中にその直径のほぼ半分近くを埋設させた場合の探査実験を行った結果、ドラム缶の中に水を入れた場合と砂を入れた場合いずれでも各断層像とも実形を忠実に映像化することが確認された。また X-Z 及び Y-Z 断層像で、ドラム缶の下にシャドウが出現し、ドラム缶の中に砂が入っている場合の方がより顕著に現れることがわかった。

c) 砂中埋設ドラム缶探査実験

ドラム缶を砂表面から 25cm の位置に埋設して探査実験を行った結果、伝搬減衰の大きな砂中の対象物の映像であるため、未処理の映像では、対象物の形状が不明瞭であるが、処理することによって、その形状が明瞭になってくることがわかった。また砂の超音波反射率が大きくて、ドラム缶の反射率が小さいため、基準面 0 で割算処理するとドラム缶の像がネガで表示されることもわかった。なおドラム缶の下面の反射損失は平均 36.22 dB あり、十分に探知可能であることが確認できた。

(4) 各種形状対象物水中探査実験

機雷・砲爆弾等沈埋異常物のように形状が円筒形の対象物と他の各種形状の対象物が識別可能かどうか検討する実験を行った。その結果、次のことがわかった。

a) 三角柱を対象物とした場合、反射波のオシロスコープ波形によれば三角柱上部からの受信波のパルス幅は短く、三角柱底面からの受信波は多重反射しているのがわかった。

また、三角柱の映像は、超音波ビームの分解能の関係でエッジ部が多少不明確な部分があるが、三方向断層像は実形を忠実に映像化しているが、対象物内の二回反射と残響が大きいのが特徴である。

b) 四角柱の対象物では、オシロスコープ波形によれば対象物上面が板状のため受信波はパルス幅が長く

かつ対象物上面と下面は反射損失がほぼ同じである。また対象物内部の多重反射のレベルはほぼ等しい。

四角柱の映像は、三角柱と比較して四角柱上面の映像の幅が大きい。これは受波面が三角柱に比して大きいためと考えられる。

c) 2枚の鉄板を水中に吊った状態の映像は、X-Y, X-Z, Y-Z 断層像を対比してみることによって2枚の鉄板の形状や位置関係を立体的に把握できる。また対象物にコンクリートブロックを用いた場合の映像もほぼ実形を再現している。

(5) モノパルス超音波の加圧特性

水深 100m までの海底にモノパルス超音波放射用電磁誘導型送波器を設置して海底下探査を行う場合を想定して、深度による静水圧の増加がモノパルス超音波の送波特性に及ぼす影響について検討した結果、次のようなことがわかった。

a) 静水圧を 0 ~ 10 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲内で増加させていくとモノパルス超音波の受波レベルは静水圧の平方根にはほぼ反比例して低下することがわかった。すなわち静水圧の増加によって電磁誘導型送波器から放射されるモノパルス超音波の送波音圧レベルは低下することがわかる。

b) 送波器設置深度と海底面受波レベルの関係を検討した結果、送波器を海底附近に設置した方が、送波音圧レベルが低下するにもかかわらず海底面の受波音圧レベルが大きくなって探査効率が高くなることがわかった。

c) 静水圧の増加がモノパルス超音波の波形に及ぼす影響について検討した結果、パルス幅は静水圧が 0 ~ 5 kgf/cm<sup>2</sup> までほぼ直線的に短くなり、その後一定値になることがわかった。またパルス立上り時間もほぼ同様の傾向を示す。

d) 静水圧の増加によってパルス幅が短縮した結果、卓越周波数が増大し、超音波ビームの指向性が良くなる反面、海底土中の吸収減衰による損失が増大し、対象物の探知可能距離が短縮されることになり、低周波を使用する必要がある。

以上各項目ごとの結論をとりまとめると下記の様になる。

送波周波数 25 kHz, 送波パルス幅 40 μS, 送波レベル 92 dB (0 dB : 1 μ bar/1500 V-m) のモノパルスを発生し、音源から 2.5m に焦点を結ぶ送波器群に電磁誘導型を、受波器群に圧電素子を用いた凹面配置クロスレイ送受波方式と三方向断層像表示装置を用いて室内実験

を行った結果、対象物が円柱、三角柱、四角柱、板、等いずれの形状のものでも、ほぼ実形を三方向断層像で忠実に再現することができた。また機雷等円柱対象物が海底下 50cm 以下に埋設している場合も適確に埋設深度、位置、形状寸法を探知できた。

なお大水深下の海底探査では入力エネルギー一定の場合の送受波器の耐水圧性能や音響特性についても明らかとなった。

## 7. 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」(昭和54年度～昭和58年度)の一環として行ったものである。

この開発研究によって機雷・砲爆弾等海底沈埋異常物探査に使用する超音波送受波方式として距離方向の分解能を向上するためにモノパルス超音波を採用し、水平方向の分解能を向上するために凹面配置型クロスアレイ送受波器が海底沈埋物探査に有効であることがわかった。また受波系でデータ処理をし、XYZ三方向断層像としてCRTに画像表示することによって海底下に埋設している機雷等の対象物、特に海底下50cm以下の比較的浅い位置にある物体や、傾斜して埋設している対象物の埋設深度、位置、形状寸法等を探知しうる事が確認できた。なお、機雷・砲爆弾等のように円筒形対象物と他の形状の物体とは画像表示の特性で識別可能であり、大水深下の海底探査では送受波器部の耐水圧性能や音響特性についても問題はないことがわかり実用化の可能性を得た。

今後の研究課題としては、対象物映像の輪郭の明確化、各種海底土質における画像特性、画像の三次元立体表示、送受波器の保持方式等周辺技術の開発が考えられる。特に海底下に埋没している沈埋異常物を探査するには、海底土質の音響特性に及ぼす影響が大きいので、室内及び現地実験でのデータの積み重ねが必要であると考えられる。

(1984年9月21日受付)

## 謝 辞

本論文に述べた研究は、昭和56年より昭和58年にわたって行われた「海底沈埋異常物探査に関する開発研究」である。

本開発研究にあたり、終始御指導、御助言を賜った。東京工業大学精密工学研究所教授、奥島基良博士をはじめ、同助教授、大槻茂雄博士、千葉工業大学助教授、本岡誠一博士に厚く御礼申し上げます。

また本開発研究を進めるにあたり、種々の御援助を頂いた前運輸省港湾技術研究所長佐藤昭二博士、元機材部長早乙女保二氏、前機材部長坂本武司氏に深謝いたします。

なお実験装置の製作にあたり御協力頂いた沖電気工業株式会社、(株)東和製作所の関係各位に感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 奥島基良・本岡誠一：電磁誘導型による水中強力パルス音波の発生、電気通信学会超音波研究会資料、1966年.
- 3) 本岡誠一・奥島基良：電磁誘導型集束音源を用いた砂中の探知、電子通信学会、1980年.
- 4) 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.
- 5) 木原純孝・白井一洋：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一、港湾技術研究所報告 Vol. 23, No. 1, 1984年3月、pp. 153~191.
- 6) W. Eissenmenger: Elektromagnetische Erzeugung von ebenen druckstossen in flüssigkeiten *Acoustica*, Vol. 12 (1962) p. 185.
- 7) 木原純孝・坂本武司・白井一洋：狭ビームモノパルス超音波による海底埋設物探査実験、日本音響学会講演論文集、1983年3月、pp. 703~704.
- 8) 日本作業船協会：磁気異常物回収船調査研究報告書、1974年、1975年、1976年、1977年、1978年.
- 9) 日本作業船協会：磁気異常物回収船試設計報告書、1979年3月.
- 10) 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)―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.
- 11) 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

$A$	: 電流の単位
$a$	: 振動子の半径
$C$	: コンデンサの容量 ( $\mu\text{F}$ )
$c$	: 音の伝搬速度 (m/S)
$D$	: 深度 (m)
$E$	: 電圧 (V)
$F_0$	: 振動板に加わる駆動力
$f$	: 周波数 (Hz)
$i$	: 電流 (A)
$K_S$	: 送波感度 (dB re $\mu\text{bar/V-m}$ )
$k_m$	: 受波感度 (dB re $\text{V}/\mu\text{bar}$ )

大水深施工検査・海底探査技術の開発（第2報）

$L$ : インダクタンス ( $\mu\text{H}$ )	$t$ : 時間 (S)
$l$ : 長さ (m)	$V$ : 電圧 (V)
$N$ : コンデンサの充電エネルギー $CV^2/2$ (Joul)	$x$ : 距離 (m)
$n$ : コイルの巻数	$\alpha$ : 減衰定数 (dB/m)
$p$ : 音圧 ( $\mu\text{bar}$ )	$\beta$ : 角度 ( $^\circ$ )
$q$ : コンデンサの電荷量 (coulomb)	$\gamma$ : 角度 ( $^\circ$ )
$R$ : 電気抵抗 ( $\Omega$ )	$\theta$ : 角度 ( $^\circ$ )
$r$ : 距離 (m)	$\lambda$ : 波長 (mm)
$RL$ : 反射損失 (dB)	$\mu$ : 透磁率
$SL$ : 拡散損失 (dB)	$\pi$ : 円周率
$TL$ : 伝搬損失 (dB)	$\omega$ : 角周波数



# 港湾技術研究所報告 第23巻 索引

論文名・著者名

巻号 頁

## 水工部

- 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 23. 1. 3～ 52
- 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 23. 1. 53～ 81
- 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力(第2報)  
 ——現地観測波圧データの解析——……………高橋重雄・谷本勝利 23. 2. 3～ 25
- 三次元の経験的固有関数による深浅図解析法……………加藤一正・吉松 晃 23. 2. 27～ 47
- 反射定常波による多段沿岸砂州の形成……………加藤一正 23. 3. 3～ 46
- 防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究  
 ……………谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行 23. 3. 47～ 99

## 海洋水理部

- 海域底泥中のリンの挙動モデルについて……………堀江 毅・細川恭史 23. 2. 49～ 74
- 流れの乱れに及ぼす風と波の効果……………鶴谷広一・寺川博也・松延嘉國 23. 4. 3～ 70

## 土質部

- 有限要素法による地盤の安定解析……………小林正樹 23. 1. 83～101
- 砂地盤における地中杭の横抵抗に関する実験的研究……………荘司喜博 23. 2. 75～179
- 波の繰返しを受ける防波堤基礎地盤の安定性に関する研究(第1報)  
 ——過剰間隙水圧の挙動解析——……………善 功企 23. 2. 181～206
- 共振振動三軸試験装置の開発と混合土の動的変形特性  
 ……………善 功企・梅原靖文・大根田秀明・樋口嘉章 23. 3. 101～126
- 波の繰返し載荷を受ける粘性土地盤の安定性に関する実験的研究  
 ……………大根田秀明・梅原靖文・樋口嘉章・入澤一明 23. 3. 127～151
- 振動単純せん断試験による粘性土の繰返し強度特性について  
 ……………大根田秀明・梅原靖文・樋口嘉章 23. 4. 71～ 94

## 構造部

- 水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究……………上部達生・楢垣典弘 23. 3. 153～186

## 設計基準部

- 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 23. 1. 103～151

座標式工程表による工程計画手法の開発……………	奥山育英・佐藤恒夫	23. 3.	187～234
港湾経済効果の計測手法（第3報）——利用効果の帰属……………	稲村 肇	23. 3.	235～250
港湾工事の産業連関分析……………	稲村 肇・米澤 朗・高橋淳弘	23. 3.	251～334

#### 機 材 部

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	23. 1.	153～191
連続水ジェットによる岩盤掘削機構……………	岩崎峯夫・秋園純一	23. 2.	207～220
大水深施工検査・海底探査技術の開発（第2報）			
海底沈埋異常物探査技術の開発研究——……………	木原純孝・白井洋一	23. 4.	95～141

# Index of Report of P. H. R. I. Vol. 23

	Vol. No.	pp.
<b>Hydraulic Engineering Division</b>		
Two Dimensional Seabed Scour in Front of Breakwaters by Standing Waves—A Study from the Standpoint of Bedload Moment— .....Isao IRIE, Kazuo NADAKA, Takamichi KONDO and Kenji TERASKI	23. 1.	3~ 25
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	23. 1.	53~ 81
Uplift Forces on a Ceiling Slab of Wave Dissipating Caisson with a Permeable Front Wall (2nd Report)—Field Date Analysis— ..... Shigeo TAKAHASHI and Katsutoshi TANIMOTO	23. 2.	3~ 25
A New Method of Three-Dimensional Empirical Eigenfunction Analysis for Contour Maps .....Kazumasa KATOH and Akira YOSHIMATSU	23. 2.	27~ 47
Multiple Longshore Bars Formed by Long Period Standing Waves .....Kazumasa KATOH	23. 3.	3~ 46
Experimental Study of Random Wave Forces on Upright Sections of Breakwaters.....Katsutoshi TANIMOTO, Shigeo TAKAHASHI and Kazuyuki MYOSE	23. 3.	47~ 99
<b>Marine Hydrodynamics Division</b>		
Modelling of the Behaviors of Phosphorus in Sea Mnd ..... Takeshi HORIE and Yasushi HOSOKAWA	23. 2.	49~ 74
Effects of Wind Shear and Waves on the Structure of Turbulent Streams.....Hiroichi TSURUYA, Hiroya TERAOKAWA and Yoshikuni MATSUNOBU	23. 4.	3~ 70
<b>Soils Division</b>		
Stability Analysis of Geotechnical Structures by Finite Elemets ..... Masaki KOBAYASHI	23. 1.	83~101
Experimental Study on Lateral Resistance of a Pile with Embedded Head in Sand..... Yoshihiro SHOJI	23. 2.	75~179
Study on the Stability of Subsoil under Breakwaters Subjected to Cyclic Wave Loading (1st Report) —Analysis on Wave-Induced Excess Pore Water Pressure— .....Kouki ZEN	23. 2.	181~206

Development of Resonant-cyclic Triaxial Testing Apparatus and Dynmic Deformation Characteristics to Mixtures ..... Kouki ZEN, Yasufumi UMEHARA, Hideaki OHNEDA and Yoshiaki HIGUCHI	23. 3.	101~126
Experimental Studies on Model Clay Ground Subjected to Cyclic Wave Loading.....Hideaki OHNEDA, Yasufumi UMEHARA, Yoshiaki HIGUCHI and Kazuaki IRISAWA	23. 3.	127~151
Cyclic Strength Properties of Normally Consolidation Clays Under Simple Shear Conditions.....Hideaki OHNEDA, Yasufumi UMEHARA and Yoshiaki HIGUCHI	23. 4.	71~ 94
<b>Struchures Division</b>		
An Experimental Study on Sliding Block in Water During Earthquake ..... Tatsuo UWABE and Norihiro HIGAKI	23. 3.	153~186
<b>Design Standard Division</b>		
Static Behavior of Double Sheet Pile Wall Structure .....Kouichi OHORI, Yoshihiro SHOJI, Kunio TAKAHASHI, Hiroshi UEDA, Michihiko HARA, Yutaka KAWAI and Keisuke SHIOTA	23. 1.	103~151
Scheduling Model Using a Two-Dimentional Coordinate Chart in Japanese ..... Yasuhide OKUYAMA and Tsuneo SATO	23. 2.	187~234
Measuring the Economic Benefits of Port Development .....Hajime INAMURA	23. 3.	235~250
The Economical Impact Analysis of Port Construction Works by Input-Output Analysis.....Hajime INAMURA, Akira YONEZAWA and Atushiro TAKAHASHI	23. 3.	251~334
<b>Machinery Division</b>		
Development of Ultrasonic Prospeping and Inspection Technics Offshore Underwater Constructions—Development of the Technics for Sounding Seafloor Stone Mound— ..... Sumitaka KIHARA and Kazuhiro SHIRAI	23. 1.	153~191
A Consideration of Rock Excavation Mechanism with Water Jets ..... Mineo IWASAKI and Junichi AKIZONO	23. 2.	207~220
Development of Ultransic Prospecting and Inspection Technics for Offshore Underwater Constructions—Development of the Technics for Detecting underwater Buried Objects— ..... Smitaka KIHARA and Kazuhiro SHIRAI	23. 4.	95~141