

# 港湾技研資料

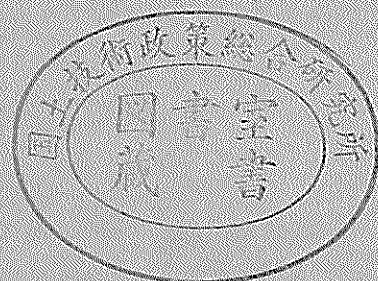
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.620 June 1988

水中監視実験装置の濁水透視に関する実験

木原純孝  
白井一洋  
篠原文人

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	3
2. 濁水中の超音波伝搬 .....	3
2.1 ソナー方程式 .....	3
2.2 濁水中の超音波の伝搬損失 .....	4
3. 実験方法 .....	5
3.1 実験装置 .....	5
3.2 実験方法 .....	5
4. 測定結果と考察 .....	8
4.1 浮遊粒子の粒径分布 .....	8
4.2 濁度 .....	8
4.3 減衰定数 .....	9
4.4 濁度ごとの立体表示 .....	12
4.5 探査限界 .....	14
5. まとめ .....	18
6. あとがき .....	19
参考文献 .....	19
記号一覧表 .....	19

# Experiment on Ultrasonic Underwater Imaging System in Turbid Water

Sumitake KIHARA\*

Kazuhiro SHIRAI\*\*

Taketo SHINOHARA\*\*\*

## Synopsis

This report describes that the experiment on ultrasonic underwater imaging system in the turbid water. The turbid water used in this experiment is made up of water and clay(The medium size of particles is 0.02mm).

The effect of turbidity on ultrasonic underwater images is examined by the experiment. The experiment is carried out in the cylindrical tank, in order to determine the attenuation constant of ultrasonic (500kHz) in the turbid water and observe the change of ultrasonic images with turbidity.

Using sonar equation, the relation between maximum sounding range and turbidity on rubble mound and soft mud layer is obtained.

The experimental result is as follows;

1. The attenuation constant ( $\alpha$ ) in the turbid water is  
$$\alpha = 0.0263 + 0.17387 \times 10^{-2} \times (\text{turbidity (ppm)}) \quad \text{dB/m}$$
2. It is confirmed that the ultrasonic images in the turbid water as well as in the clear water are drawn by the ultrasonic underwater imaging system.
3. The relation between maximum sounding range and turbidity on rubble mound and soft mud layer is shown in the figure.

**Key Words:** Ultrasonic Image, Turbid Water, Acoustic Attenuation, Ultrasonic Measurement

---

\*Chief of the Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

\*\*Member of Machinery Section, Machinery Division

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

# 水中監視装置の濁水透視に関する実験

木原純孝\*  
白井一洋\*\*  
篠原丈人\*\*\*

## 要 旨

水中施工監視技術を濁度の高い施工海域に適用するため、濁度が超音波水中監視装置の水中映像に及ぼす影響について実験で検討した。

実験は、試作した超音波水中監視装置（超音波周波数 500 kHz）を使用し、海底探査実験水槽（ $\phi$  5m $\times$ 10.5 m）において、濁水模型として木節粘土（50%中央粒径、0.02 mm）、反射体として鋼管（ $\phi$  50 mm）4本を使用して室内実験を行った。

実験の結果、濁度が 200 ppm の濁水中でも超音波水中監視装置は十分使用出来ることがわかった。

キーワード：超音波画像、泥水、音波減衰、超音波応用計測

## 1. まえがき

昭和58年度までに水中施工監視技術を研究開発し、59年度から大水深施工海域における水中監視システムとして実用化した 500 kHz トーンバースト超音波を用いたクロスアレイ式電子セクター走査型の超音波水中監視装置は、透明度の比較的良い水深が-50m程度の大水深で、かつ、海底が捨石マウンドの時、室内実験、現地実証実験において有用性が確かめられた。

一方、海底が軟弱で、浮泥のある透明度の非常に悪い海域での港湾工事においても、施工海底の状況を監視しながら施工すれば、作業能率が向上するため、自動監視システムの開発実用化の必要性が増大している。そこで、捨石マウンド検測監視用に開発したクロスアレイ式電子セクター走査型の超音波水中監視装置が、透明度の悪い軟弱海底地盤施工海域での実用性の可否を検討するため室内模型実験を行った。

実験は、直径 5m、高さ 10.5m の直立円筒形鋼製水槽に濁りの模型として木節粘土（50%中央粒径、0.02 mm）の懸濁液を用い、超音波装置として超音波水中監視実験装置を使用して、平均濁度 0-200 ppm の濁水中での 500 kHz 超音波の減水損失や、水底に設置された

対象物の映像におよぼす影響について測定した。

その結果、濁度が 200 ppm の濁水中でも、超音波水中監視装置は、十分使用できることがわかった。

## 2. 濁水中の超音波伝搬

濁水中の超音波の伝搬を以下に示すソナー方程式により表すこととする。

2.1 ソナー方程式<sup>1)</sup> 水中音響測深機の設計や性能の予測をする場合に、ソナー方程式を使用する方法がある。ここでは、ソナー方程式を使って濁水中での濁度に対する水中監視実験装置の最大探知距離を求めることにする。ソナー方程式に使用する基本パラメータとして以下のものがあげられる。ただしこれらのパラメータは、平面波の強さ  $1\mu\text{bar}$  を基準とした dB 表示である。

装置により決定されるパラメータ

音源の送波レベル	: SL
自己雑音レベル	: NL
受波指向性利得	: DI
探知域値	: DT

媒質により決定されるパラメータ

伝搬損失	: TL
------	------

\*機材部 特殊作業船開発室長

\*\*機材部 機械課 第一設計係長

\*\*\*機材部 特殊作業船開発室

残響レベル : RL  
 背景雑音レベル : NL  
 反射体によって決定されるパラメータ  
 ターゲットストレングス : TS  
 反射音源レベル : SL

付表-1に各パラメータの定義を示す。

水中の送波器から超音波が送波されたときの送波器から1mの位置の送波レベルをSL dBとすると反射体に到達したときのレベルは、その間の伝搬損失TLだけ失われ

$$SL - TL \dots\dots\dots(1)$$

となる。反射体により反射された超音波の受波器方向へ反射体から1mの距離のレベルは、反射体のターゲットストレングスをTSとすると

$$SL - TL + TS \dots\dots\dots(2)$$

となる。

受波器位置における反射波のレベルは、その間の伝搬損失だけ減少するので

$$SL - 2TL + TS \dots\dots\dots(3)$$

となる。

水中に存在する雑音が、どの方向から到達するレベルも等しい等方性雑音であり、そのレベルをNLとすると、受波器位置での雑音レベルは、

$$NL$$

となる。

ここで、受波器に入力するレベルは、受波器の指向性利得分だけ減少するため受波器端子における雑音出力レベルは

$$NL - DL \dots\dots\dots(4)$$

となる。

ただし、送受波器は反射体の方向を向いているので反射波に対して送受波器の指向性利得を考慮する必要はない。よって受波器端子における反射波対雑音比(SN比)は、

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI) \dots\dots\dots(5)$$

となる。

探査機において、表示装置は、任意の基準値以上のときの入力信号を表示するようになっておりSN比が、ある適当な値より大きい場合に観測者は反射体があると判断し、小さい場合に反射体がないと判断する。このように反射体があると判断される境界のSN比を検出域値DTとすると

$$DT = SL - 2TL + TS - (NL - DI) \dots\dots\dots(6)$$

$$2TL = SL + TS - (NL - DI) - DT \dots\dots\dots(7)$$

となる。

上式より右辺の各値を、測定又は、適当に仮定することにより伝搬損失TLを求め、この値から最大探知距離を知ることができる。

## 2.2 濁水中の超音波の伝搬損失

濁水中を伝搬する超音波について、先に述べた伝搬損失TLを細かく分解すると次式のようになる。

$$TL = L_W + L_D + L_S \dots\dots\dots(8)$$

ここで  $L_W$  : 海水による吸収損失

$L_D$  : 拡散による減衰損失

$L_S$  : 海中に浮遊する砂粒子による減衰損失

以下、各損失について述べる。

### (1) 海水による吸収損失

海水による吸収損失は、超音波の振動エネルギーが熱として失われるもので、海水の粘性と海水中に微量に含まれる硫酸マグネシウムの解離反応の遅れによる分散によるとされている。吸収損失について実測がなされ、いくつかの実験式が示されているが、実測値の変動幅が大きく実験式による計算値も式ごとにかんがりのくい違いがある。実験式の例として計算の簡単な式を示す。

$$\alpha_1 = (0.22f + 0.000175f^2) \times 10^{-3} \dots\dots\dots(9)$$

$\alpha_1$  : 吸収係数 (dB/m)

f : 周波数 (kHz)

上式によれば、周波数500 kHzで  $\alpha_1 = 0.15375$  dB/mとなる。伝搬距離をXmとすれば海水による吸収損失  $L_W$  は

$$L_W = \alpha_1 \cdot X \dots\dots\dots(10)$$

となる。

### (2) 拡散による減衰損失

送波器から送波された超音波は、球面波として伝搬すると考えると、超音波は、送波器を中心として放射状に広がり、波面の面積は送波器からの距離の2乗に比例して増大する。他の損失がない場合、超音波の強度は距離の2乗に反比例する。また音圧振幅の2乗は強度に比例するため音圧振幅は、音源からの距離に反比例して小さくなる。送波器から基準点までの距離  $X_0$  その点の音圧を  $P_0$  として、距離Xの点の音圧を  $P_x$  とすれば拡散損失は、

$$L_D = 20 \log (P_x / P_0) \\ = 20 \log (X / X_0) \dots\dots\dots(11)$$

基準点までの距離  $X_0$  は、通常  $X_0 = 1m$  とされ

$$L_D = 20 \log X \dots\dots\dots(12)$$

で示される。

### (3) 海中に浮遊する砂粒子による減衰損失

濁水中を伝搬する超音波は、浮遊粒子により散乱、吸収されるため浮遊粒子を含まない水中を伝搬するときと

比べて減衰がかなり多くなる。減衰損失は、浮遊粒子の直径、水中に含まれる割合、超音波周波数に關係する。砂による濁水中での超音波の減衰については、奥島<sup>3)</sup>により理論計算が成されており、それによれば、濁水中の砂の粒子径が単一の場合

$$ka \geq 1.18$$

のとき

$$\alpha = \phi (65.1/20a) \dots\dots\dots(13)$$

$$ka \leq 1.18 \text{ で}$$

$$(\omega \cdot \rho_1 / 2\eta)^{1/2} \cdot a >> 1$$

のとき

$$\alpha = \phi (712 \times 10^{-24} f^4 (20a)^3 + 0.143 \times 10^{-3} \times f^{1/2} / 20a) \quad (14)$$

- ここで  $\alpha$  : 減衰定数 (dB/cm)  
 $k$  : 波長定数  $k = 2\pi/\lambda$   
 $\lambda$  : 波長 (cm)  
 $a$  : 粒子の半径 (cm)  
 $\omega$  : 角速度  
 $\rho_1$  : 水の密度  $1\text{g/cm}^3$   
 $\eta$  : 水の粘性係数  $1.15 \times 10^{-2} \text{g/s}\cdot\text{cm}$   
 $f$  : 超音波周波数 (Hz)  
 $\phi$  : 濁水中に占める砂の体積の割合

図-1に $\alpha/\phi$ の周波数特性を示す。図より浮遊粒子に対する減衰特性は、超音波の周波数と浮遊粒子径に大

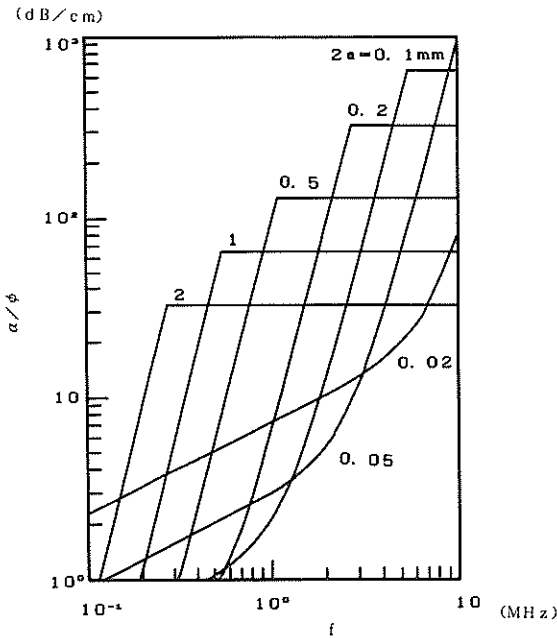


図-1  $\alpha/\phi$ の周波数特性

きく影響され、周波数が高くなるほど減衰定数は増大し、また、粒子径による影響は、周波数の高い範囲では粒子径が小さいほど減衰定数が小さく、周波数の低い範囲では粒子径が大きいほど減衰定数が小さくなることがわかる。また、式(13)、(14)より減衰定数 $\alpha$ は、濁水中に占める砂の体積の割合 $\phi$ (濁度)に比例することがわかる。

減衰定数を $\alpha$  dB/m、伝搬距離を $X$  m とすれば海中に浮遊する砂粒子による減衰損失 $L_s$ は、

$$L_s = \alpha \cdot X \dots\dots\dots(15)$$

となる。

### 3. 実験方法

濁水中の超音波の減衰定数は超音波の周波数と浮遊粒子径に大きく影響されることが理論的に証明されていることを上で示した。ここでは、特定の周波数(500 kHz)、特定の粒径分布の浮遊粒子(木節粘土)による濁水中での減衰定数を実験により測定し、濁水中での水中監視実験装置<sup>4)</sup>の超音波映像の変化を確かめた。減衰定数の測定は、1.クロスアレー送受波器正面にマイクロホンを設置し直接波を受波する方法、2.クロスアレー送受波器により鋼管からの反射波を受波する方法によった(図-2参照)。また、水中超音波映像用の反射体には、4本の鋼管を使用した。

#### 3.1 実験装置

図-3に実験装置の概要、図-4に鋼管の配置を示す。水槽底に設置したコンクリートブロック上に本装置の分解能測定をかねて鋼管を4本水平に高さを変えて配置し、水槽底中心部の鋼管上にマイクロホンを固定した。クロスアレー送受波器は水槽上部の走行台車に取り付け水槽上部を移動可能とした。

主要な実験装置を以下に示す。

- 水中監視実験装置(クロスアレー送受波器) 1式
- マイクロホン 1本
- 濁度計
- 透過光方式 1台
- 散乱光方式 1台
- 採水器 3本
- 反射体(鋼管  $\phi$  50 mm) 4本
- 海底探査実験水槽(鋼製  $\phi$  5m, 高さ 10.5 m) 1式
- 攪拌ポンプ(200 V 15 kw) 2台
- 濁水(水道水と木節粘土)

#### 3.2 実験方法

以下に示す1-8までの手順にしたがい1回の測定を

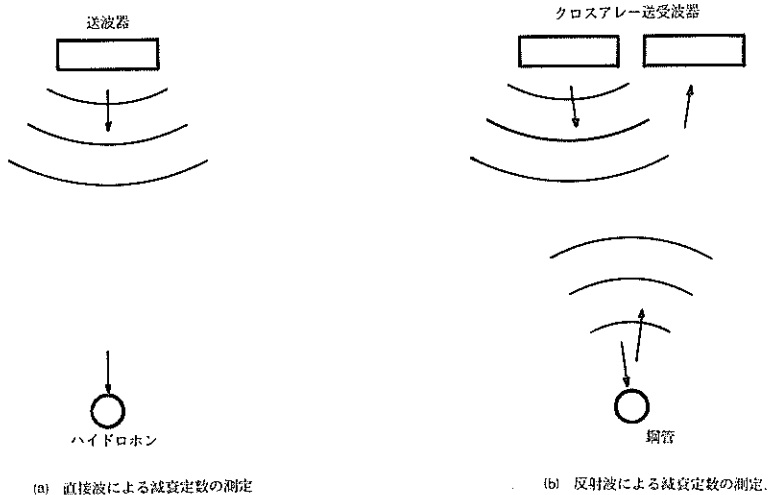


図-2 減衰定数の測定

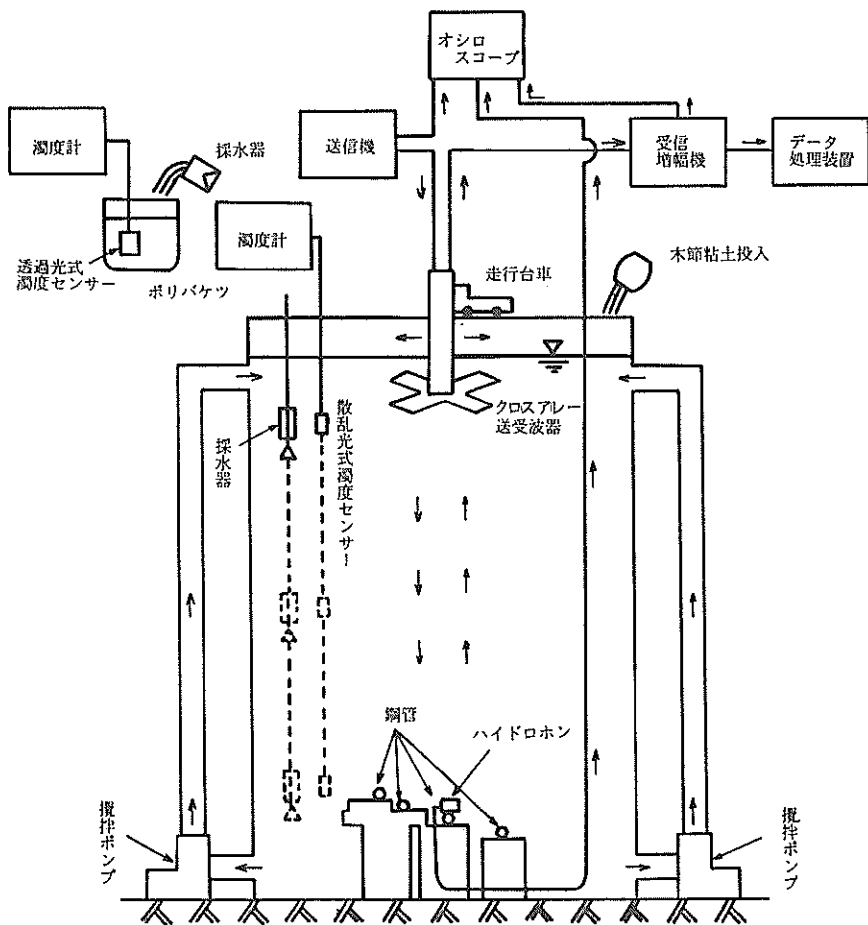


図-3 実験装置概要

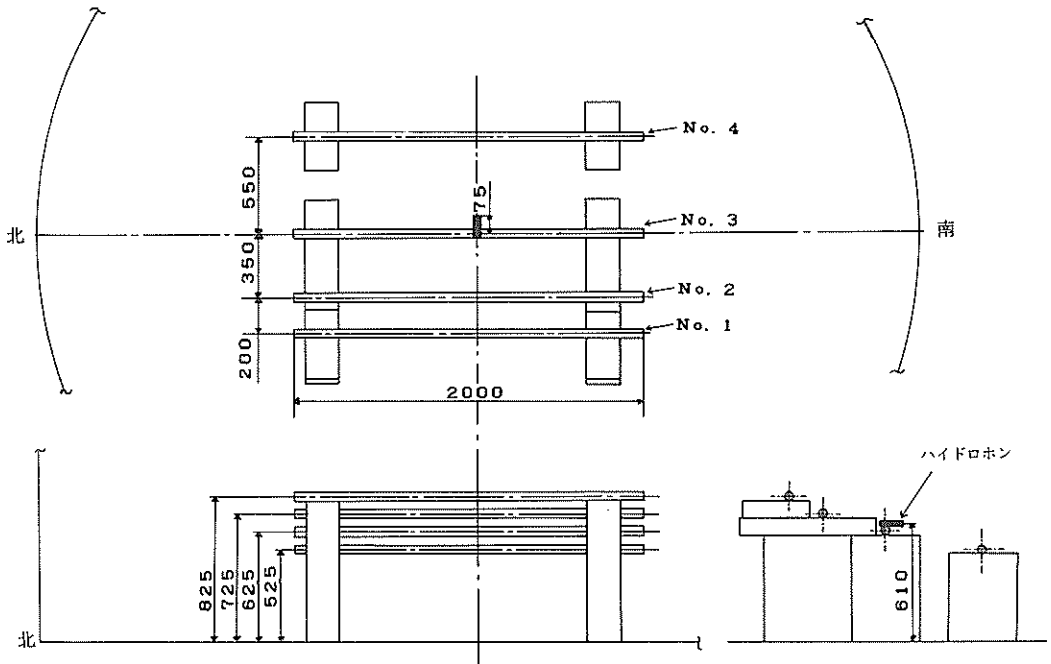


図 - 4 鋼管の配置図

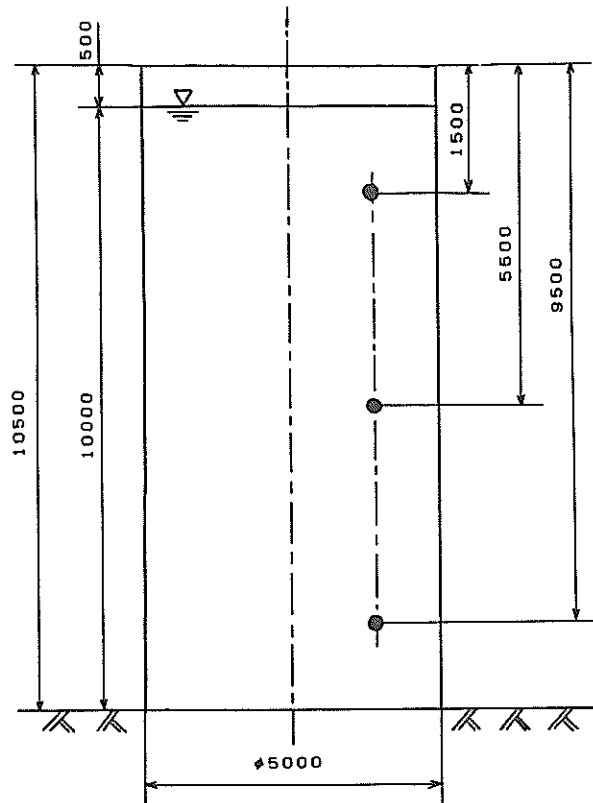


図 - 5 濁度測定位置



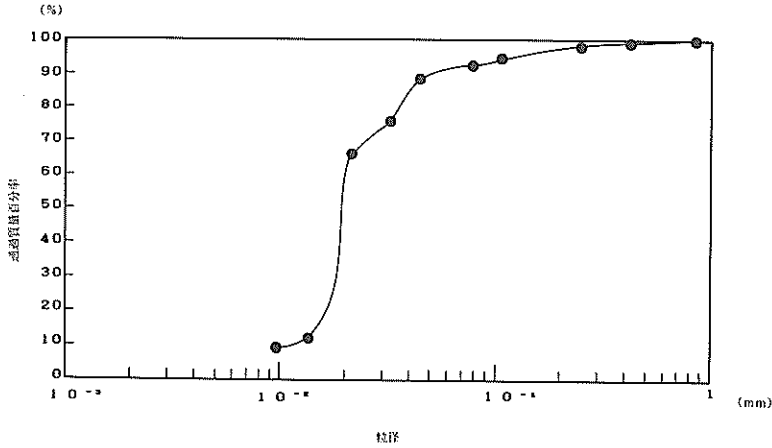


図 - 6 木節粘土の粒径加積曲線

行った。

#### 実験手順

1. クロスアレー送受波器がハイドロホンの真上に来るように台車を移動、停止させる。
2. 攪拌ポンプを運転し水を循環させる。
3. 木節粘土を攪拌しながら所定量投入する。
4. 濁度を測定する。
5. 送波電圧を測定する。
6. 受波電圧を測定する。
7. 台車を停止させたまま立体像を作成する。
8. 台車を走行させ立体像を作成する。

送波電圧は、送波装置のモニター電圧から求め、受波電圧と伝搬距離は、水槽底のハイドロホンで受波した直接波とクロスアレーにより受波した銅管からの反射波をオシロスコープでの波形観測により測定した。濁度の測定は、透過光方式と散光方式の2種類の濁度計を使用し図-5に示す3点の位置での濁度を測定した。ただし、透過光方式の濁度計は、構造上センサー部を直接投入できないものであったため採水により測定し、散乱光方式の濁度計は、水槽内に直接投入して測定した。

#### 4. 測定結果と考察

4.1 浮遊粒子の粒径分布 濁水を作るための水槽に投入した木節粘土の粒径加積曲線を図-6に示す。50%粒径は0.02mmで比重は2.66であった。

##### 4.2 濁度

表-1に透過光方式、散乱光方式の各センサーによる濁度の測定結果と平均値、標準偏差を示す。

##### (1) 濁度計による濁度差

図-7に横軸を測定No.、縦軸を3測定点(水槽の上段(水深1m)、中段(水深5m)、下段(水深9m))の平均濁度として透過光方式、散乱光方式の各センサーによる測定結果を示す。濁度計による差は平均値に関して、ほとんどないことがわかる。また、一回目の実験終了後に数回濁度を測定したが、ほとんど差がなく実験中の浮遊粒子の沈降は、少ないものと考えられる。図-8に測定点の平均濁度と標準偏差に関する各濁度計の測定結果を示す。透過光方式の方が散乱光方式よりもばらつきが大きいことがわかる。図-9は、横軸を透過光方式と散乱光方式による各水深(透過光方式3点+散乱光方式3点=6点)の濁度の平均値、縦軸を各水深ごとの濁度計間の差の割合

$$\frac{(\text{透過光方式による濁度}) - (\text{散乱光方式による濁度})}{(\text{6点の濁度の平均値})}$$

として各水深ごとにプロットしたものである。点が、ほぼ±10%以内に集まっており、プラス方向に多いことから透過光方式と散乱光方式による濁度測定値の差は10%程度で透過光方式の方が高い値を示すと言える。

##### (2) 水深による濁度差

図-10に各測定水深に対する濁度をセンサーごとに示す。濁度の高い値では、粘土の沈降が早く水面付近の濁度が他の部分と比較してかなり低くなっており均一になっていない。しかし、150ppm以下では、線がほぼ水平となっており、水槽内の濁度がほぼ均一になるように攪拌できている。図-8からも、平均濁度150ppm以下で標準偏差が約10ppm以下になっており水槽内の濁度がほぼ均一になっているのがわかる。

以上のことから水槽内の濁度は、2種類の濁度計によ

表 - 1 濁度

No		測定位置			濁度計ごとの		全体の	
		上	中	下	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1	透過光式	50	85	90	75.0	17.80	79.2	13.67
	散乱光式	80	80	90	83.3	4.71		
2	透過光式	56	60	71	62.3	6.34	58.7	5.88
	散乱光式	57	54	54	55.0	1.41		
3	透過光式	41	51	39	43.7	5.25	42.0	4.08
	散乱光式	40	41	40	40.3	0.47		
4	透過光式	125	245	250	206.7	57.78	213.3	65.17
	散乱光式	120	260	280	220.0	71.18		
5	透過光式	100	200	200	166.7	47.14	163.3	52.17
	散乱光式	80	200	200	160.0	56.57		
6	透過光式	170	200	190	186.7	12.47	180.0	11.55
	散乱光式	180	170	170	173.3	4.71		
7	透過光式	74	69	71	71.3	2.05	69.5	2.69
	散乱光式	69	69	65	67.7	1.89		
8	透過光式	108	95	89	97.3	7.93	92.7	7.45
	散乱光式	89	85	90	88.0	2.16		
9	透過光式	65	80	87	77.3	9.18	69.2	10.45
	散乱光式	60	62	61	61.0	0.82		
10	透過光式	84	82	84	83.3	0.94	83.8	0.90
	散乱光式	84	85	84	84.3	0.47		
11	透過光式	97	124	150	123.7	21.64	124.0	16.17
	散乱光式	115	125	133	124.3	7.36		
12	透過光式	140	155	125	140.0	12.25	140.0	10.41
	散乱光式	130	150	140	140.0	8.16		

る3測定点(上, 中, 下段)の全データ(6点)の平均値で表すこととし, 150 ppm以下の濁度が水槽内でほぼ均一となっているため, 濁度150 ppm以下のときの測定値から減衰定数を求めることとした。

#### 4.3 減衰定数

表-2に送波電圧, クロスアレーにより受波された鋼管からの反射波の受波電圧, ハイドロホン(マイク)により受波された直接波, 音速と伝搬時間から算出した距離(マイクの場合はクロスアレーからマイクまで, クロスアレーの場合はクロスアレーから鋼管まで), 濁度, 減衰定数を示す。送波電圧, 受波電圧, 伝搬距離からソ

ナー方程式により減衰定数を求めた。ここで, 送波電圧, 受波電圧をソナー方程式に代入するために送波電圧感度と受波電圧感度を導入する。

(1) 送波電圧感度<sup>2)</sup>

送波器が単位入力電圧により自由空間の指定された方向, 指定された距離に生じる音圧の大小で送波電圧感度を表す。

$$S_s = P_d / E_s \quad \dots\dots\dots (16)$$

$S_s$ : 送波電圧感度

$P_d$ : 距離  $d$  における音圧

$E_s$ : 入力電圧

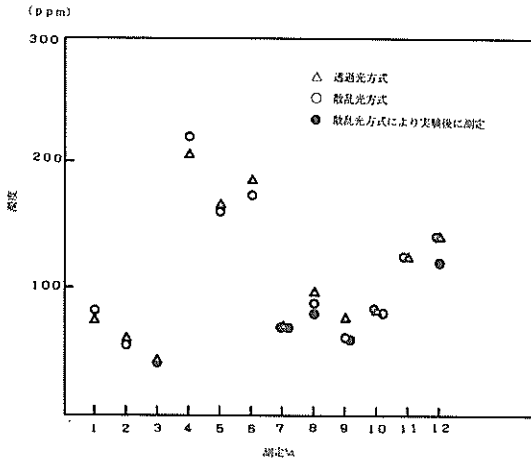


図-7 センサーごとの平均濁度

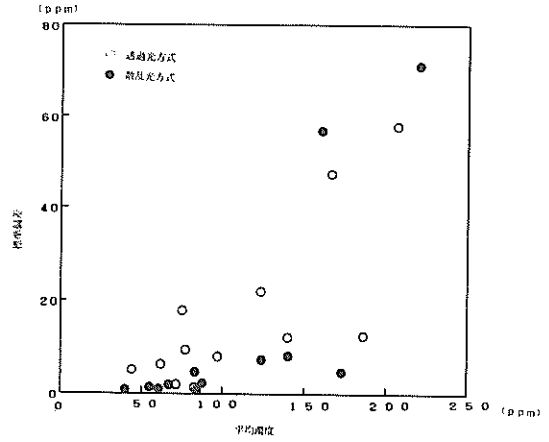


図-8 濁度の平均値と標準偏差

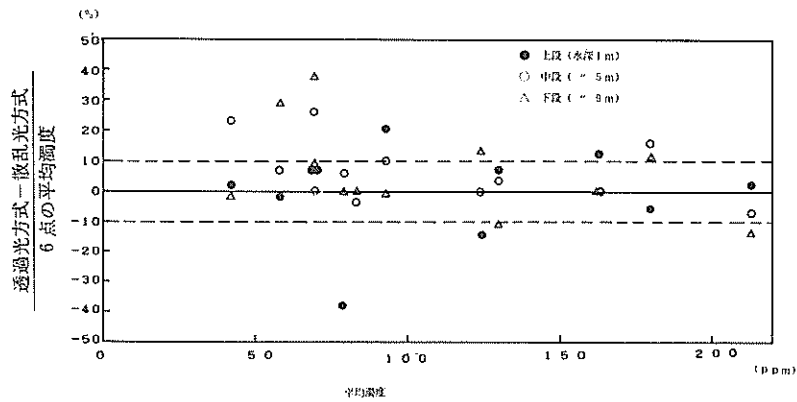


図-9 平均濁度とセンサー間の測定値の差

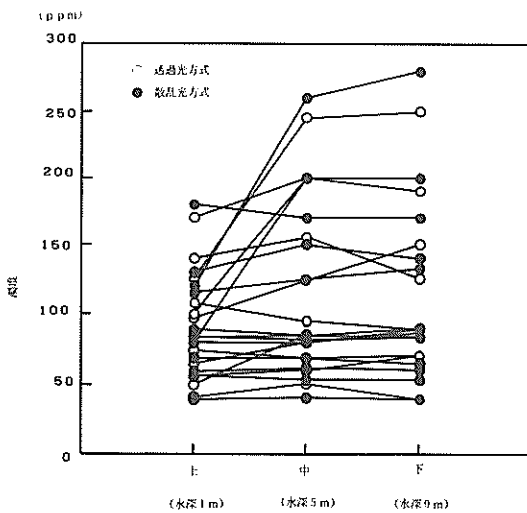


図-10 各測定水深に対する濁度

(2) 受波電圧感度<sup>2)</sup>

単位音圧の平面進行波の自由音場に音波の到来方向に受波器の指定された方向を向けたときに得られる開放誘起電圧の大小で受波電圧感度を表す。

$$M_0 = E_0 / P_0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

$M_0$ : 受波電圧感度

$E_0$ : 開放誘起電圧

$P_0$ : 音場音圧

(3) 直接波による減衰定数の計算

図-2のマイクに到達したときの音圧レベルは、(1)式より

$$SL - TL$$

となる。

この音圧レベルは、(1)式の音場音圧レベルと等しいの

表 - 2 平均濁度と減衰定数

濁度 (ppm)		送波電圧 (V)		マイク	鋼管 1	鋼管 2	鋼管 3	鋼管 4
平均	清水	20	受波電圧 (mV)	2.8	670.0	660.0	975.0	480.0
標準偏差	清水		距離 (m)	9.27	9.22	9.21	9.32	9.49
平均	79.2	20	受波電圧 (mV)	2.6	520.0	480.0	930.0	520.0
標準偏差	13.67		距離 (m)	9.28	9.18	9.30	9.34	9.39
			減衰定数 (dB/m)	0.069	0.120	0.149	0.022	-0.037
平均	58.7	25	受波電圧 (mV)	3.4	570.0	540.0	930.0	520.0
標準偏差	5.88		距離 (m)	9.28	9.18	9.27	9.90	9.41
			減衰定数 (dB/m)	0.027	0.182	0.199	0.119	0.066
平均	92.7	27	受波電圧 (mV)	3.4	500.0	520.0	880.0	390.0
標準偏差	7.45		距離 (m)	9.26	9.19	9.24	9.32	9.48
			減衰定数 (dB/m)	0.117	0.289	0.262	0.196	0.241
平均	69.2	26	受波電圧 (mV)	3.6	460.0	520.0	940.0	510.0
標準偏差	10.45		距離 (m)	9.30	9.20	9.28	9.39	9.49
			減衰定数 (dB/m)	0.019	0.306	0.239	0.143	0.097
平均	124.0	27	受波電圧 (mV)	3.4	395.0	440.0	680.0	345.0
標準偏差	16.17		距離 (m)	9.28	9.16	9.25	9.34	9.39
			減衰定数 (dB/m)	0.116	0.402	0.340	0.316	0.300
平均	140.0	28	受波電圧 (mV)	3.3	500.0	550.0	680.0	600.0
標準偏差	10.41		距離 (m)	9.25	9.17	9.26	9.35	9.46
			減衰定数 (dB/m)	0.173	0.298	0.243	0.324	0.052

で

$$SL - TL = 20 \log P_0$$

$$= 20 \log (E_0/M_0) \dots\dots\dots (18)$$

また、(16)式より

$$SL = 20 \log P_i$$

$$= 20 \log (S_s \cdot E_s) \dots\dots\dots (19)$$

(8)式に(10)、(12)、(19)式を代入して

$$TL = a_1 \cdot X + 20 \log X + \alpha \cdot X \dots\dots\dots (20)$$

(18)式に(19)、(20)式を代入して

$$T = 20 \log (E_s/E_0)$$

$$= -20 \log S_s - 20 \log M_0$$

$$+ a_1 \cdot X + 20 \log X + \alpha \cdot X \dots\dots\dots (21)$$

ここで、Tを総合損失とする。

清水の場合の総合損失をT<sub>0</sub>とすると、α = 0である

ので

$$T_0 = -20 \log S_s - 20 \log M_0$$

$$+ a_1 \cdot X + 20 \log X \dots\dots\dots (22)$$

(21)式から(22)式を引いて

$$\alpha = (T - T_0)/X \dots\dots\dots (23)$$

(23)式により、清水と濁水中での各送波電圧と受波電圧を測定することによって減衰定数を求めることができる。

(4) 反射波による減衰定数の計算

図 - 2 に示す受波器に到達したときの反射波の音圧レベルは、(3)式より

$$SL - 2TL + TS$$

となる。

同様に総合損失Tを求めると

$$T = -20 \log S_s - 20 \log M_0 - TS$$

$$+ 2 \cdot a_1 \cdot X + 40 \log X + 2 \cdot \alpha \cdot X \dots\dots\dots (24)$$

ただし、Xは、送受波器から反射体までの距離とする。

よって

$$\alpha = (T - T_0)/(2 \cdot X) \dots\dots\dots (25)$$

となる。

(5) 減衰定数

図-11と表-2に測定結果(送受波電圧と伝搬距離)から(23)、(29)式により求めた減衰定数と平均濁度を示す。濁度の増加にともない減衰定数も増加しているのがわかる。図中の直線は、図のデータから最小2乗法により求めたものである。

直線の式は、濁度をTB ppmとすると

$$\alpha = 0.0263 + 0.17387 \times 10^{-2} \times TB \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。

(26)式を、周波数500kHzの超音波の木節粘土の浮遊粒子による減衰定数 $\alpha$ とした。

4.4 濁度ごとの立体表示

図-12-1に清水状態でクロスアレーを鋼管上に停止

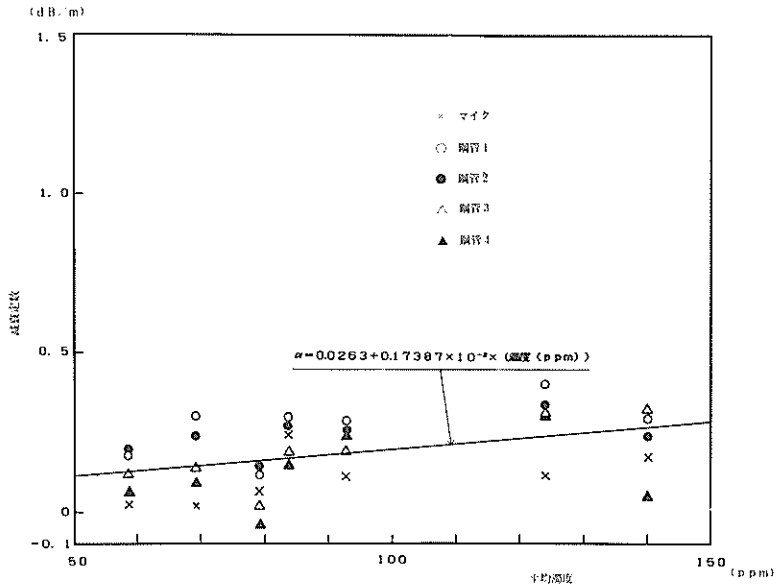


図-11 減衰定数と平均濁度

448213

清水

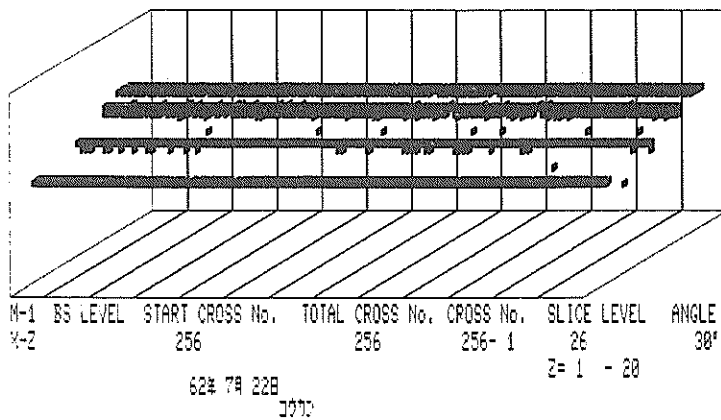


図-12-1 立体図 台車停止

濁水

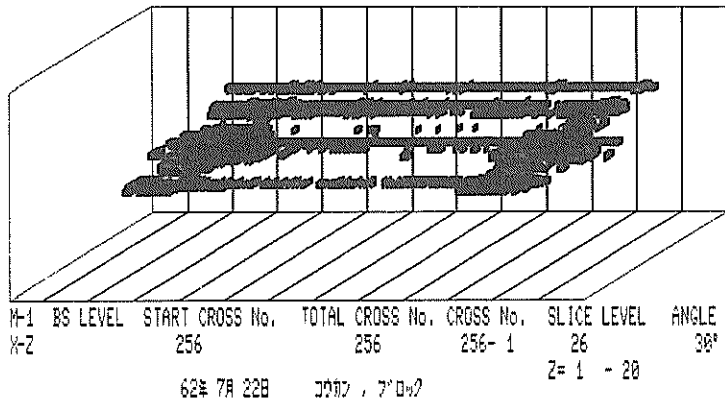


図-12-2 立体図 台車走行

濁度

透過光方式 74, 69, 71 ppm  
 散乱光方式 69, 69, 65 ppm

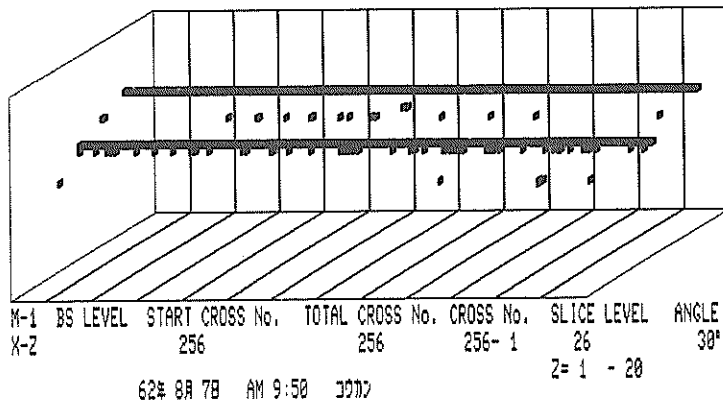


図-13-1 立体図 台車停止

させて作成した立体図を、図-12-2に水槽上部をクロスアレーを移動させて作成した立体図を示す。クロスアレーを移動させて作成した立体図は、台車の走行によりクロスアレーが振動するためノイズや欠測が僅かに発生している。

水中監視実験装置による立体図の作成方法は、1回の送受波により得られる32方向×30水深の受波電圧データをAD変換し、パーソナルコンピュータに入力する際にパーソナルコンピュータで処理しやすいように、入力可能最大電圧を255等分し、各受波電圧に対応する0-255

までの整数値に置き換えて入力しフロッピーディスクに記録する。立体図を作成する際に、立体図の下に表示されている〔SLICE LEVEL〕を0から255までの範囲の整数で指定し、フロッピーディスクからデータを読んで〔SLICE LEVEL〕と比較し〔SLICE LEVEL〕以上のデータの位置を画面に表示し立体図を作成する。よって、鮮明な立体図を作成するためには、表示される画像がノイズが少なく、探査物体の形状が認識できるように〔SLICE LEVEL〕を適当に変えて最適値を決める必要がある。

濁度

透過光方式 74, 69, 71 ppm  
 散乱光方式 69, 69, 65 ppm

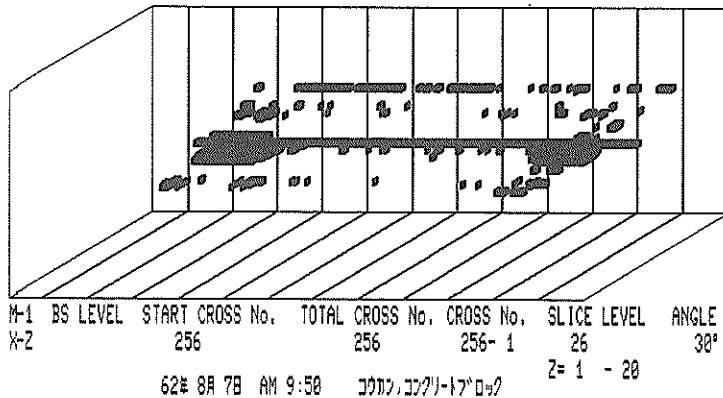


図-13-2 立体図 台車走行

44R003

濁度

透過光方式 74, 69, 71 ppm  
 散乱光方式 69, 69, 65 ppm

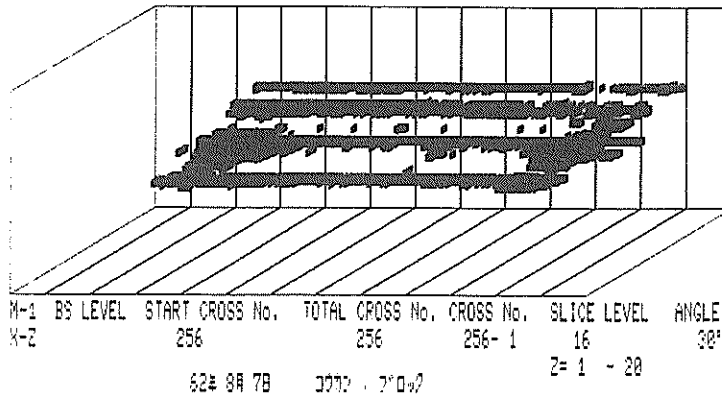


図-13-3 立体図 台車走行

清水時の立体図を作成する際の〔SLICE LEVEL〕を26としたので、濁度変化に対する立体図の変化を見るために〔SLICE LEVEL〕を26に固定して平均濁度69.5 ppmと213.3 ppmのときのクロスアレーを停止させた場合と、移動させた場合の立体図を図-13-1, 13-2, 14-1, 14-2に示す。濁度が高くなるに従って、表示される鋼管の数が4本から2本1本と少なくなり、濁りによる影響が顕著に表れている。しかし、〔SLICE LEVEL〕を適当に選ぶことにより図-13-3

((〔SLICE LEVEL〕=16), 図-14-3 ((〔SLICE LEVEL〕=13))に示すように、清水時とはほぼ同様の立体図が得られることがわかる。

#### 4.5 探査限界

2.1で示したように(7)式を使用して最大探知可能距離を求める。(7)式に(2)式を代入して

$$2(a_1 + a) X + 40 \log X \\ = SL + TS - (NL - DI) - DT \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2)式により海底探査実験水槽内での濁水中の鋼管探査

濁度

透過光方式 125, 245, 250 ppm  
 散乱光方式 120, 260, 280 ppm

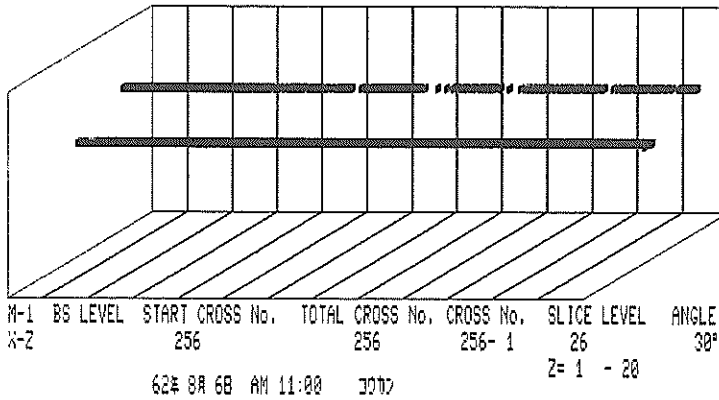


図 - 14 - 1 立体図 台車停止

濁度

透過光方式 125, 245, 250 ppm  
 散乱光方式 120, 260, 280 ppm

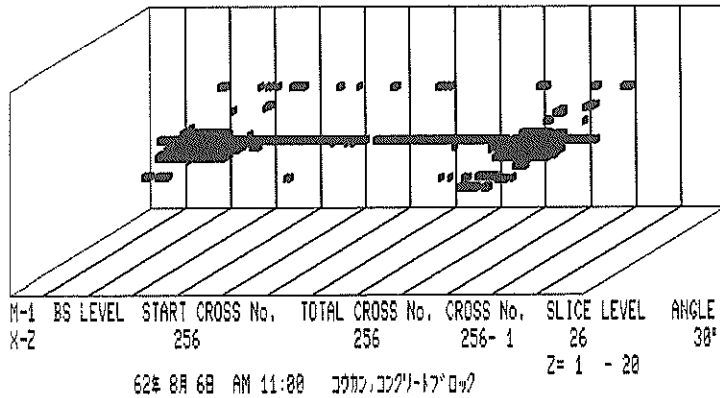


図 - 14 - 2 立体図 台車走行

を行う場合の水中監視実験装置の最大探知距離と濁度の関係を求めてみる。各変数には、以下に示す数値を代入する。

$$\alpha_1 = 0 \text{ dB/m}$$

$$\alpha = 0.0263 + 0.17387 \times 10^{-2} \times \text{TB} \text{ dB/m}$$

(TB : 濁度 ppm)

$$\text{SL} = 111.7 \text{ dB}$$

クロスアレー送受波器の送波感度 68.2 dB/V-m,  
 最大送波電圧 150 V

$$\text{SL} = 68.2 + 20 \log 150$$

$$= 111.7 \text{ dB}$$

$$\text{TS} = -13.6 \text{ dB}$$

鋼管 3 のターゲットストレングスを次のように求めた表 - 2 の受波電圧は、アンプを通して 83.4 dB 増幅後の STC 電圧  $E_{\text{STC}}$  であるので受波器端子出力  $E_0$  は、

$$20 \log E_0 = 20 \log E_{\text{STC}} - 83.4$$

$$= -83.62 \text{ dB}$$



HARDC3

濁度

透過光方式 125, 245, 250 ppm  
 散乱光方式 120, 260, 280 ppm

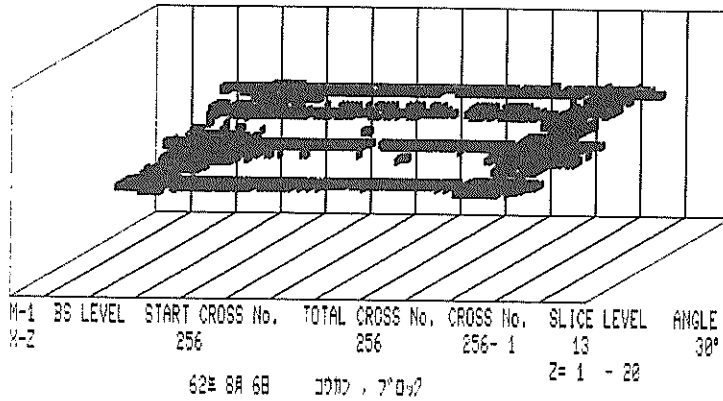


図-14-3 立体図 台車走行

TS は、④式より

$$\begin{aligned} TS &= -T - 20 \log S_s - 20 \log M_0 + 40 \log X \\ &= -20 \log 20 - 83.62 - 68.2 + 125.5 + 40 \log 9.32 \\ &= -13.6 \text{ dB} \end{aligned}$$

(NL-DI) = 0.71 dB

STC 出力におけるノイズレベル  $NL_{STC}$  を表-3 に示す。これを受波器面でのノイズレベル (NL-DI) に換算するには、アンプによる増幅度と受波電圧感度を引けばよい。

$$\begin{aligned} (NL-DI) &= NL_{STC} - 83.4 - 20 \log M_0 \\ &= -41.39 - 83.4 + 125.5 \\ &= 0.71 \text{ dB} \end{aligned}$$

DT = 0 dB

DT は、信号レベルとノイズレベルが同じになる点まで測定できるとすると

$$\begin{aligned} DT &= 20 \log \frac{\text{信号レベル}}{\text{ノイズレベル}} \\ &= 20 \log 1 \\ &= 0 \text{ dB} \end{aligned}$$

図-15に水槽内での鋼管探査の場合の最大探知距離と濁度の計算結果を示す。クロスアレイと鋼管の距離が10 m の時、濁度 1637 ppm まで水中監視実験装置により鋼管が探知できることがわかる。

測深においては、反射体がヘドロ面のような広い平滑な海底面で鏡面反射をする場合があり、この時には(7)式は成立しなくなる。図-16に示すように(7)式が成立する

表-3 STC No. 0 におけるノイズレベル (1V=0 dB)

No.	受波電圧 (mV)	ノイズ (dB)
1	20.00	-33.98
2	11.69	-38.64
3	11.34	-38.91
4	10.26	-39.78
5	5.26	-45.58
6	12.24	-38.24
7	4.10	-47.74
8	3.90	-48.18
9	4.87	-46.25
10	6.92	-43.20
11	6.67	-43.52
12	5.00	-46.02
平均	8.52	-41.39

場合は、散乱の場合で反射波が反射体を中心とする球面波と考えられるときであり、鏡面反射の場合は、反射面と送波器の距離と等距離の反射面の後方に置かれた仮想送波器を中心とする球面波と考えられるので、(7)式の TL と TS の項が異なる。(7)式では TL の拡散損失が 40

log X となっているが、図-16からわかるように、仮想送波器を中心とする球面波の拡散損失は  $20 \log (2 \cdot X)$  となる。TS は、反射体を中心にして再放射される反射波について考えたものなので、鏡面反射では、TS にかわる反射損失 L を用いる。

$$L = 10 \log \frac{\text{海底面への入射音の強さ}}{\text{海底面から音源方向へ 1 m の距離の反射音の強さ}}$$

鏡面反射の場合のソーナー方程式は

$$2(\alpha_1 + \alpha)X + 20 \log (2 \cdot X)$$

$$= SL - L - (NL - DI) - DT \quad \text{.....(2)}$$

となる。

ここで、(2)式（鏡面反射）により海中における捨石面と軟泥面の探査について、各変数を以下の値として濁度と最大探査可能距離の関係を図-17に実線で示す。また、

$$TS = -L$$

として(2)式（散乱）による結果を破線で示す。

$$\alpha_1 = 0.15375 \text{ dB/m}$$

$$\alpha = 0.0263 + 0.17387 \times 10^{-2} \times TB \text{ dB/m}$$

(TB : 濁度 ppm)

$$SL = 111.7 \text{ dB}$$

$$L = 33 \text{ dB (軟泥面の反射損失)}^{5)}$$

$$= 3.7 \text{ dB (捨石面の反射損失)}^{6)}$$

$$(NL - DI) = 0.71 \text{ dB}$$

実海域において水中監視実験装置による雑音測定は

していないので、海底探査実験水槽内での測定値を使用した。

$$DT = 0 \text{ dB}$$

超音波は、捨石面では、散乱と考えられるので、濁度 10 ppm で約 79 m まで、平滑な軟泥面では、鏡面反射

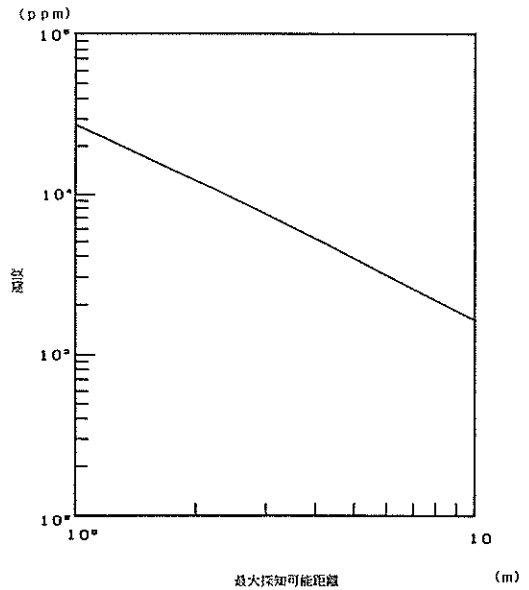


図-15 水槽内での鋼管の最大探知距離

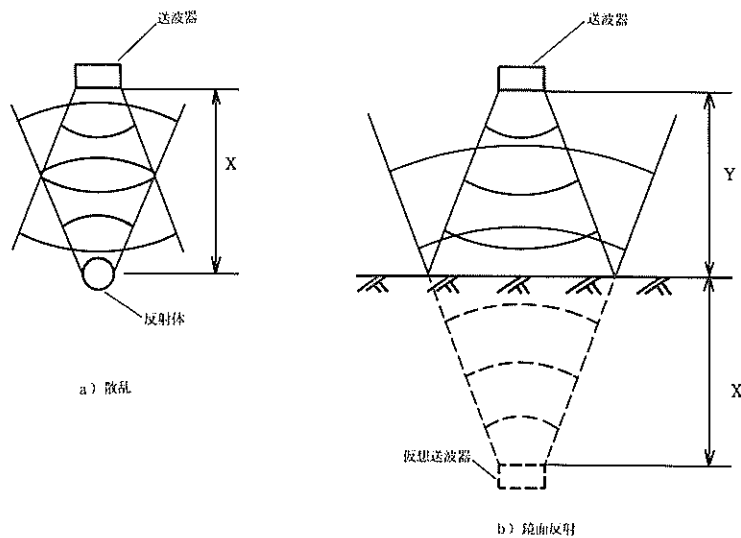


図-16 散乱と鏡面反射

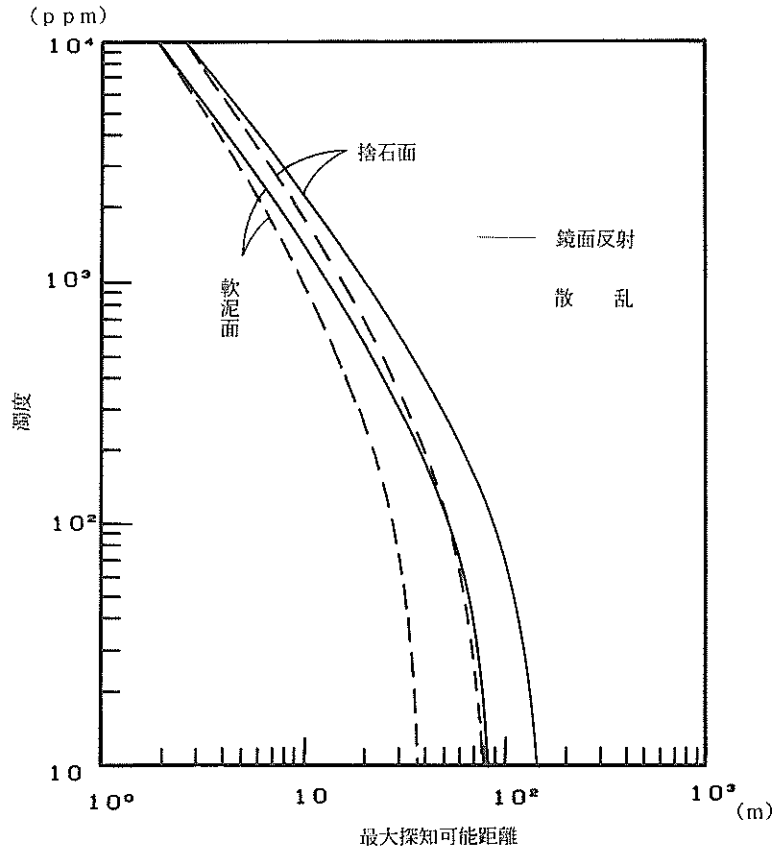


図-17 濁度と最大探知距離

と考えられるので、約85 mまで測深可能であることが、図からわかる。しかし、この値は、2.2で示したように濁水中の浮遊粒子が、実験に使用した粘土と同一の時だけ成立し、また、反射損失、ノイズレベルは、場所によって異なるため、この値は、装置の性能を表す参考程度に考えるべきである。

## 5. まとめ

ソナー方程式により濁水中での探深限界を求め次のような結果が得られた。

- (1) 木節粘土 (50%中央粒径  $\phi$  0.02 mm) の濁水中での500 kHzの超音波の減衰定数  $\alpha$  は、濁度をTB ppmとすると  

$$\alpha = 0.0263 + 0.17387 \times 10^{-2} \times TB \text{ dB/m}$$
 となる。
- (2) 水槽内における木節粘土の濁水中では、水中監視実験装置によるクロスアレイ送受波器からの距離

10 mの位置における鋼管の探査は、濁度1637 ppmまで可能であることが、ソナー方程式により示された。

- (3) 木節粘土の濁水の海中における、水中監視実験装置による測深可能距離は、捨石面では、10 ppmで約79m、軟泥面では、約85mであることが、ソナー方程式により示された。
- (4) 水槽内での鋼管探査、海洋での捨石面探査及び軟泥面探査について濁度変化に対する最大探知可能距離を求めグラフに表した。
- (5) 水中監視実験装置により得られる鋼管の超音波3次元立体映像は、濁度の増加にもなると不鮮明となるが、本実験における最高濁度213.3 ppmにおいて、[SLICE LEVEL]を適当に選択することにより清水時と同様な鮮明な映像が得られることを確認した。

## 6. あとがき

超音波を用いた水中監視装置の濁水透視に関する実験を行った結果、従来の光学式テレビでは映像化できない濁水中でも監視対象物を装置の受信用スライズレベルを変えることによって映像化可能であることが確かめられた。

しかしながら今回の実験では、実験水槽内に作った模擬濁水中で行った室内模型実験であるため、実際の施工海域とは濁水の性質が異なり、かつ音響特性も相違しているものと考えられる。したがって、今後は汚濁した海底が軟弱な地盤である施工海域において実用化できるよう測量船等曳航体に搭載した場合の動揺、測位の問題、海底形状と測深精度、海底掘削中の汚濁水の乱流による超音波特性への影響等、室内及び実海域において実験を行い実用化のためのデータを収集する必要があると考えられる。

(1988年3月31日受付)

### 参 考 文 献

- 1) J. R. ユーリック著・土屋明訳：水中音響の原理，共立出版，1978，pp. 18-22
- 2) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，1966年，pp. 459-460
- 3) 奥島基良：砂による濁水中での超音波の反射と減衰についての計算，日本音響学会昭和44年度秋期研究発表会公演論文集，1969年10月，pp. 22-28
- 4) 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2）——超音波水中監視装置の開発——，港湾技研資料No. 518，1985年
- 5) 木原純孝・白井一洋・松本茂・村上幸敏：音波探査現地実験報告——三河港における軟泥層探査実験——，港湾技研資料No. 359，1980年
- 6) 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——，港湾技術研究所報告，第23巻，第1号，1984年3月

### 記 号 一 覧 表

a	粒子の半径	(cm)
DI	受波指向性利得	(dB)
DT	探知域値	(dB)
E <sub>0</sub>	開放誘起電圧	(V)
E <sub>s</sub>	入力電圧	(V)
f	超音波周波数	(kHz)
k	波長定数	(1/cm)
L	反射損失	(dB)
L <sub>D</sub>	拡散による減衰損失	(dB)
L <sub>w</sub>	海水による吸収損失	(dB)
L <sub>s</sub>	海中に浮遊する砂粒子による減衰損失	(dB)
M <sub>0</sub>	受波電圧感度	(V/ $\mu$ bar)
NL	自己雑音レベル，背景雑音レベル	(dB)
P <sub>0</sub>	基準点の音圧	( $\mu$ bar)
P <sub>o</sub>	音場音圧	( $\mu$ bar)
P <sub>d</sub>	距離 d における音圧	( $\mu$ bar)
P <sub>x</sub>	距離 X の点の音圧	( $\mu$ bar)
RL	残響レベル	(dB)
SL	音源の送波レベル，反射音源レベル	(dB)
S <sub>s</sub>	送波電圧感度	(V/ $\mu$ bar)
T	総合損失	(dB)
T <sub>0</sub>	清水の場合の総合損失	(dB)
TB	濁度	(ppm)
TL	伝搬損失	(dB)
TS	ターゲットストレングス	(dB)
X	伝搬距離	(m)
X <sub>0</sub>	送波器から基準点までの距離	(m)
$\alpha$	減衰定数	(dB/cm)
$\alpha_1$	吸収係数	(dB/m)
$\eta$	水の粘性係数	(g/s $\cdot$ cm)
$\lambda$	波長	(cm)
$\rho_1$	水の密度	(g/cm <sup>3</sup> )
$\phi$	濁水中に占める砂の体積の割合	
$\omega$	角速度	(rad/s)

付表 - 1 各パラメータの定義

パラメータ	記号	基準位置	定義
送波レベル	SL	音軸上で音源から1m	$10 \log \frac{\text{音源の強さ}}{\text{基準の強さ}}$
伝搬損失	TL	音源から1mおよびターゲットまたは受波器位置	$10 \log \frac{1 \text{ mの距離の信号の強さ}}{\text{ターゲットまたは受波器位置での信号の強さ}}$
ターゲットストレンジス	TS	ターゲットの音響中心より1m	$10 \log \frac{\text{ターゲットから1mの距離のエコーの強さ}}{\text{入射音の強さ}}$
雑音レベル	NL	受波器位置	$10 \log \frac{\text{雑音の強さ}}{\text{基準の強さ}}$
受波指向性利得	DI	受波器端子	$10 \log \frac{\text{等価無指向性受波器より発生する雑音出力}}{\text{実際に用いられる受波器により発生する雑音出力}}$
残響レベル	RL	受波器端子	$10 \log \frac{\text{受波器端子における残響出力}}{\text{基準の強さの信号により発生する出力}}$
探知閾値	DT	受波器端子	$10 \log \frac{\text{ある条件の機能をちょうどはたす信号出力}}{\text{受波器端子における雑音出力}}$

港 湾 技 研 資 料      No. 620

1 9 8 8 · 7

編集兼発行人      運輸省港湾技術研究所

発 行 所      運輸省港湾技術研究所  
                 横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所      奥村印刷株式会社

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