

運輸省港湾技術研究所

= 2-2 コレクション

# 港湾技術研究所 報告

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

資料係  
文献複写  
禁持出

VOL. 10

10

NO. 3

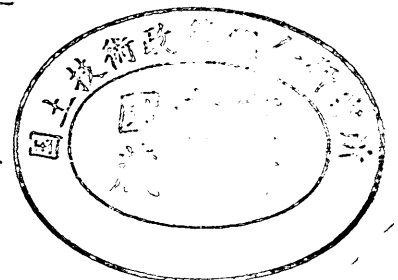
3

SEPT. 1971

MAR.

1971

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。  
報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第10巻 第3号 (Vol. 10, No. 3), 1971年9月 (Sept. 1971)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 来島海峡潮流模型実験 (第1報)  
..... 木村久雄・宮原英治・須藤 茂  
柴山煒彦・浜田徳一..... 3  
(A Model Experiment on a Tidal Current at the Kurushima Strait (1st Report)  
..... Hisao KIMURA, Hideharu MIYAHARA, Shigeru SUDO, Akihiko  
SHIBAYAMA and Tokuichi HAMADA)
2. クイの負の周面摩擦についての近似計算法..... 沢口正俊..... 67  
(Approximate Calculation of Negative Skin Friction of a Pile  
..... Masatoshi SAWAGUCHI)
3. 砂質土の現場 CBR と室内 CBR の関係  
..... 須田 澁・佐藤勝久・吉田富雄..... 89  
(The Relations between Field and Laboratory CBR Values of Sandy Soils  
..... Hiroshi SUDA, Katsuhisa SATO and Tomio YOSHIDA)
4. 砂杭を打設した粘性土地盤の挙動  
——衣浦港における実験について——..... 木庭宏美・堀江宏保.....135  
(Behavior of Cohesive Soil Stratum with Driven Sand Piles  
—On the field tests at Port of KINUURA—  
..... Hiromi KOBAYASHI and Hiroyasu HORIE)
5. コンテナ埠頭の規模および荷役方式に関する考察  
..... 奥山育英・中井典倫子・久保重美.....159  
(Study on Determination of Container Yard Requirements and Container Handling  
System..... Yasuhide OKUYAMA, Noriko NAKAI and Shigemi KUBO)
6. 浚渫土質と掘削機構に関する研究 (第1報) ..... 岩田尚生.....237  
(Study on the Soil to be Dredged and the Mechanism of an Excavation (The first  
report) ..... Hisao IWATA)
7. 超音波斜入射が測深精度と反響記録特性に及ぼす影響について  
..... 木原純孝・奥出 律.....265  
(Study on Echo-Sounder—Effect of Oblique-Incident Ultrasonic wave on Echo-  
Sounding precision and Echo-Recording Characteristics—  
..... Sumitaka KIHARA and Tadasu OKUDE)

## 7. 音響測深機に関する研究

——超音波斜入射が測深精度と反響記録特性に及ぼす影響について——

木原 純 孝\*・奥 出 律\*

### 要 旨

港湾工事における音響測深機を用いた深浅測量上の問題点の解決や海底地形を能率的にかつ精度よく把握する超音波測深機を開発するには、周波数や送受波用振動子の指向角に応じて、海底からの超音波の反射伝搬特性や超音波を海底に斜めに入射させたときの測深精度や探知可能距離におよぼす影響を究明する必要がある。このような事から、7周波方式の超音波探査機を用い、深さ5m×長さ5m×幅4mの角形コンクリート水槽で室内実験を行なった。供試振動子は11.5kHz(半減指向半角 $\gamma_{1/2}=18^\circ$ )、100kHz( $\gamma_{1/2}=6.1^\circ$ )、200kHz( $\gamma_{1/2}=3.1^\circ$ )、500kHz( $\gamma_{1/2}=2.4^\circ$ )、1MHz( $\gamma_{1/2}=1.2^\circ$ )の5素子を用い、斜入射角 $\theta$ が $0\sim 30^\circ$ の範囲で水底がコンクリートの場合の各振動子毎の反響記録特性を求めた。その結果は次の通りである。

- 1) 測深誤差は振動子の半減指向半角が大きいほど、また斜入射角が大きいほど大となる。
- 2) 半減指向半角が小さいほど、海底形状を忠実に記録することが出来る。
- 3) 斜入射角に比例して反射損失が大きくなる。

\* 機材部 流体輸送研究室

## 7. Study on Echo-Sounder

### —Effect of Oblique-Incident Ultrasonic Waves on Echo-Sounding Precision and Echo-Recording Characteristics—

Sumitaka KIHARA\*

Tadasu OKUDE\*

#### Synopsis

In order to solve problems of echo-sounding the depths of the sea bottom in harbour works and develop an echo-sounder capable of ascertaining the bottom profile efficiently and precisely, it is necessary to study the effects of oblique incident ultrasonic waves on the reflection and propagation characteristics, the echo-sounding precision, and the allowable distance of detection.

Here authors have conducted laboratory experiments on the acoustic characteristics of the ultrasonic echo-sounder, in which ultrasound was radiated obliquely to the water bottom with the incident angle of 0 to 30 degrees and the effect of echo-sounding precision and echo-recording characteristics were studied.

The test water tank made of concrete is of 5 m in depth, 5 m in length and 4 m in width. The echo-sounding apparatus used in the experiment was manufactured for this purpose, which has the frequency range of 11.5 to 1000 kHz and sounds the depth up to 10 m. The types of transducers are 11.5 kHz ( $\gamma_{1/2}=18^\circ$ ), 100 kHz ( $\gamma_{1/2}=6.1^\circ$ ), 200 kHz ( $\gamma_{1/2}=3.1^\circ$ ), 500 kHz ( $\gamma_{1/2}=2.4^\circ$ ) and 1 MHz ( $\gamma_{1/2}=1.2^\circ$ ), where  $\gamma_{1/2}$  is the beam angle of half power.

The results of the study are as follows:

- 1) Sounding errors increase in proportion to the beam angle of half power and the incident angle.
- 2) Comparatively high-frequency ultrasonic waves with sharp beam angle will give accurate configuration of the sea bottom.
- 3) The ultrasonic reflection increases in proportion to the incident angle.

---

\* Member of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

## 目 次

要 旨	265
1. ま え が き	269
2. 実験装置および実験概要	269
2.1 実験装置および計測機器	269
2.2 実験概要	270
3. 実験結果および考察	272
3.1 超音波斜入射による反射特性と測距精度	272
3.2 ソナー方程式を用いた総合伝送損失の理論	280
3.3 探知可能深度	283
3.4 超音波斜入射が測深精度に及ぼす影響	289
4. 結 論	292
5. あとがき	293
参考文献	293
記号表	293
附 録	294

## 1. まえがき

港湾工事における深浅測量業務には主として測量船に音響測深機を装備して行なわれるのが一般的となってきた。現在、通常行なわれている音響測深機を用いた海底の深浅測量方法は、測量船の船底または舷側に超音波送受波器を取付けて、測量船を走航させながら測深を行なっているが、従来の音響測深機は送受波器が固定されていて、送受波器の直下の海底の点を測深の対称としているため、測量船の走航方向の線の測深しかできないので、ある海域の海底面を測量するためには、測量船の走航線を少しづつずらして、測量船を何回も往復させなければならない、船位誤差の増加による測深測位誤差の増大とあいまって、時間および労力が非常にかかり能率が悪い欠点がある。また、最近多素子音響測深法と称する、測量船の舷側にバーを出しそれに多数個の送受波器を取付けて測量船を走らせながら測深する方式が使用されつつあるが、この方式では航行船舶の少ない海域では支障はないが、船舶の輻輳する港湾では交通妨害となり、使用が制約される欠点がある。

一方、水中土木工事、例えば防波堤の基礎工事の事前調査や完成後のマウンドの検査などでは、潜水夫を海中にもぐらせて、潜水夫の肉眼で観察した結果を作業船上の作業関係者に口頭で伝達するため、作業関係者は詳細的確に状況を把握し難い欠点があり、また、航路や泊地の浚渫にあたっては、適当な海底観測器がないため、掘削作業過程では推測で浚渫作業を行なっている状態である。

このような現状から、海底地形を的確に能率よく測量記録する装置の開発が要請されている<sup>1)</sup>。

このような必要性を満たすべき一方法として、従来から当研究所で開発を進めている回転送受波式超音波測深装置（特許出願中）は、海底形状を適確に二次元的に把握するのを目的とし、その原理は、鋭い超音波ビームを海底に向けて斜め入射させ、海底からの反響を捕捉して記録装置に記録しながら、送受波器を回転させ、船の進行方向に対して直角な垂直断面を記録するものである。この装置を開発するためには、超音波パルスを海底に斜めに入射させた場合、超音波周波数、出力、超音波ビームの指向角、パルス幅および海底土質をパラメータとしたときの反響記録特性を理論的、実験的に究明する必要がある。

以上のような事から、港湾の深浅音響測量における音響測深機使用上の問題点を究明するためと、海洋開発や水中土木工事における調査計測機器としての海底形状を二次元的に、かつ能率よく把握し測深する機器の改良開発のための基礎的研究の一環として、昭和43年度に製作した水中超音波計測用実験装置において、音響装置として7周波方式の超音波探査機を使用し、各周波数毎の超音波斜入射による反響記録特性を求める室内実験を行なった。

本報告は第1報として底質がコンクリートの場合の超音波斜入射による反響記録特性、特に指向半減角が測深精度や反射損失におよぼす影響や、探知可能距離を求め、深浅測量上の問題点の究明や、適合した機器開発のための基礎資料を得るための実験について記述したものである。

## 2. 実験装置および実験概要

実験に使用した水槽は、超音波を水底に向けて斜めに入射させるように製作した。水槽上部に実験台車を載せ、壁面に吸音材を取付けたコンクリート製の実験水槽である。また音響装置として7周波方式の超音波探査機を使用した。次に本実験に使用した実験装置の主要目を示す。

### 2.1 実験装置および計測機器

#### (1) 水中超音波計測用実験装置

- a) 水槽：コンクリート製、深さ 5.0m×幅 4.0m×長さ 5.0m
- b) 吸音材：ゴム製 厚さ 2cm×高さ 3.0m×長さ 15.8m
- c) 媒質：清水（水道水）
- d) 計測台車：送受波器取付角度  $\pm 0\sim 30^\circ$



写真-1 水中超音波計測用実験装置の外観

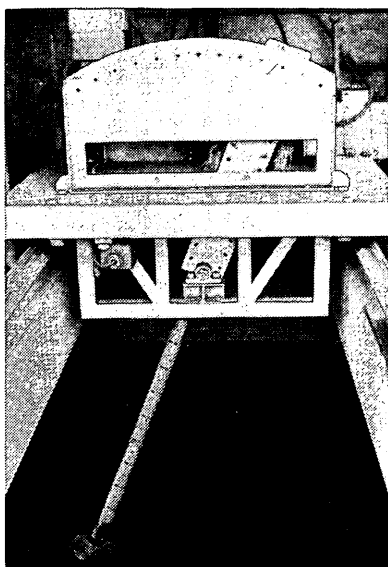


写真-2 計測台車 (送受波器を斜めに取り付けたところ)

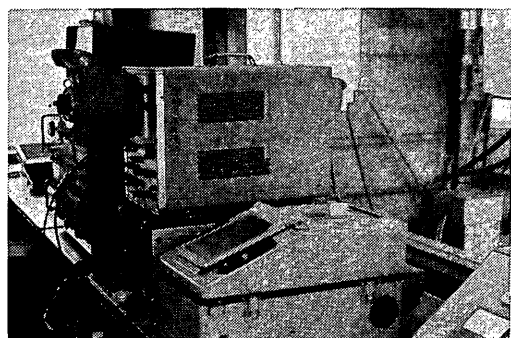


写真-3 超音波探査機および計測機器

走行速度 0~30 m/min 連続可変

(2) 超音波探査機

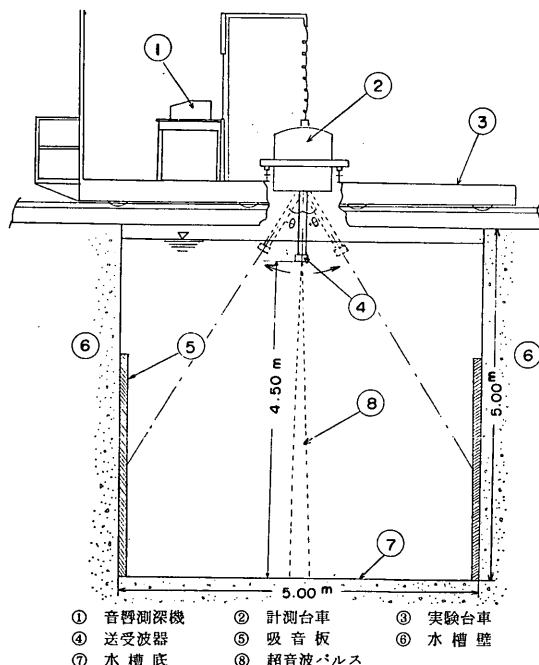
- a) 送信周波数: 11.5, 24, 40, 100, 200, 500, 1000 kHz 7段切替
- b) 送信出力: 最大 1kW<sub>(p-p)</sub> (100Ω 抵抗負荷)  
零から最大値まで連続可変
- c) 受信部増幅度: 150 dB 以上
- d) 送受波器指向角(半減半角): 1.2°~18°

(3) 計測機器

実験に使用した計測機器は、水温を測定するためのサーミスタ温度計、超音波パルスの波形観測や出力測定のためのシンクロスコープ、反射強度を測定するためのマージンテスト用の抵抗減衰器などがある。

2.2 実験概要

次に実験の概要を述べる。図-1 に示すように、実験水槽上の計測台車に水深が 4.5m になるように送受波器を設置して、超音波パルスを水底に向けて垂直に放射し、その時の音響出力をシンクロスコープの波形観測で、反響余裕値 (マージンと呼ぶ) を抵抗減衰器でそれぞれ測定した。次に超音波パルスが水底に斜めに入射するよう設置して、上記と同様な測定を、斜入射角  $\theta$  を 0~30度の範囲で 5度ずつ角度を変えて行なった。以上のような実験を 11.5, 100, 200, 500, 1000 kHz の 5 周波の超音波周波数にそれぞれ変えて行なった。ただし 24 と 40 kHz 振動子の半減指向角  $\gamma_{1/2}$  が、100 kHz 振動子の  $\gamma_{1/2}$  と同じ 6° であるため、7 周波の中から上記 5 周波を選んで使用した。表-1 および 2 に各種振動子の特性と感度を示す。音響出力と反響余裕値の測定方法は、マッチングボックス(整合器)と受信増幅器の間に抵抗減衰器をそう入し、送信器波形端子および記録器観測端子にシンクロスコープを接続して、超音波探査機を作動させて反響信号を記録紙に記録させ、その送信電圧と受信電圧を 2 現象シンクロスコープで測定した。同時に抵抗減衰器で記録紙上の反響信号がちょうど消えるときの減衰量 (dB) を測定し、それを反響余裕値  $M$  とした。なお測定中は、音響出力および受信器の感度を一定とした。



① 音響測深機 ② 計測台車 ③ 実験台車  
④ 送受波器 ⑤ 吸音板 ⑥ 水槽壁  
⑦ 水槽底 ⑧ 超音波パルス

図-1 実験装置概略図



音響測深機に関する研究

表-1 振動子の特性

周波数 $f$ (kHz)	音速度 (水中) $C$ (m/s)	波長 $\lambda$ (cm)	振動子音波放射面 の直径 $d$ (cm)	半減指向半角 $\gamma_{1/2}$ ( $^\circ$ )	指向零角 $\gamma_{01}$ ( $^\circ$ )
11.5	1500	13.04	30.0	18.0	32.0
100	1500	1.50	10.0	6.1	10.5
200	1500	0.75	10.0	3.1	5.3
500	1500	0.30	5.0	2.4	4.2
1000	1500	0.15	5.0	1.2	2.1

表-2 振動子の感度

周波数 $f$ (kHz)	指向性利得 $G_s$	自由コンダクタ $G_{f0}$ (m $\bar{O}$ )	電気音響変換能率 $\eta_{ea}$ (%)	送波電圧感度 $S_s$ ( $\mu$ bar/V)	受波電圧感度 音場較正值 $M_R$ (V/ $\mu$ bar)
11.5	53	0.5	73.0	$4.8 \times 10^3$	$1.66 \times 10^{-3}$
100	438	5.8	51.4	$3.95 \times 10^3$	$1.36 \times 10^{-4}$
200	1752	9.7	33.6	$8.29 \times 10^3$	$8.5 \times 10^{-5}$
500	2739	2.8	81.8	$8.69 \times 10^3$	$1.23 \times 10^{-4}$
1000	10955	5.0	73.4	$2.19 \times 10^4$	$2.75 \times 10^{-5}$

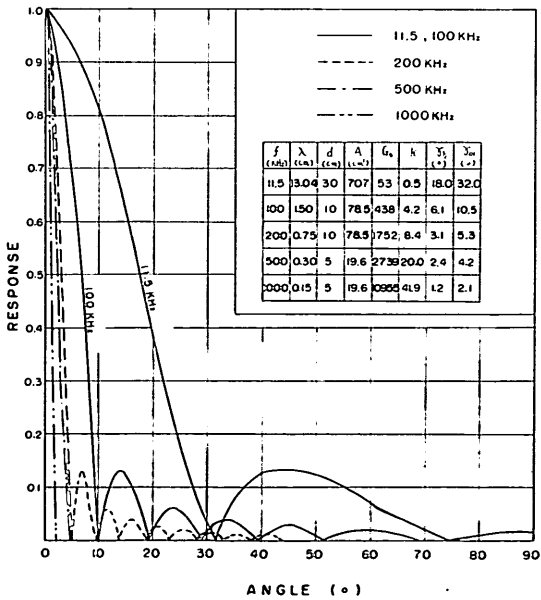


図-2 各振動子の指向特性

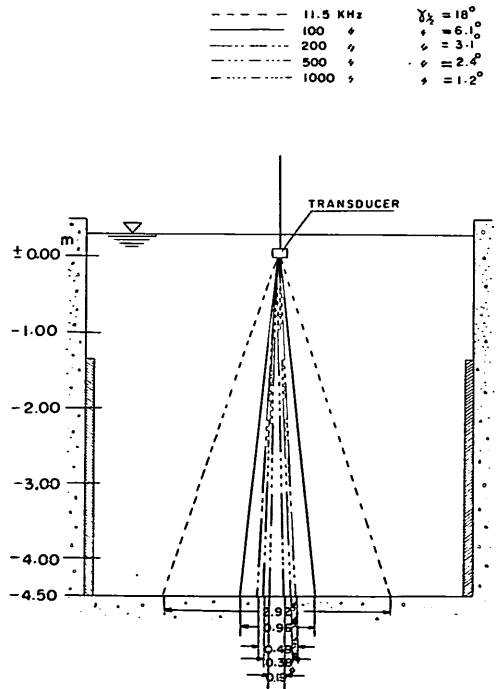


図-3 超音波ビームの広がり円の比較

3. 実験結果および考察

以上の実験から、超音波斜入射時の反射強度および測深値が得られたので、その結果を各周波数毎に表-3に示す。

3.1 超音波斜入射による反射特性と測距精度

表-3で斜入射角 $\theta$ の $\oplus$  $\ominus$ の記号は真下方向を $\pm 0^\circ$ とし、送受波器を左右に首振るとき正面から向かって右側に振ったときを $\oplus$ とし、左側に振ったときを $\ominus$ として区別した。

記録距離は、水温から補正した送受波器から水底までの距離で、実距離は水槽実形から算出した送受波器から水底までの距離である。誤差は記録距離から実距離を引

いた値で示し、誤差率は誤差を実距離で割った値の百分率で示した。

表-4は斜入射角 $\theta$ 毎の超音波の強さを各周波数毎に計算したものであって、(a)は垂直入射の場合、(b)は斜入射角が $5^\circ$ の場合、(c)は斜入射角が $10^\circ$ の場合、(d)は斜入射角が $15^\circ$ の場合、(e)は斜入射角が $20^\circ$ の場合をそれぞれ示している。表中、送信電圧 $E_s$ はシンクロスコープで測定した値で尖頭値で示し、送信出力 $P_{SE}$ は振動子の自由コンダクタンス $G_{J0}$ と $E_s$ の2乗の積で求め、音響出力 $P_{sa}$ は、送信出力 $P_{SE}$ に振動子の電気音響変換能率 $\eta_{ea}$ を乗じた値で示した。

送波指標点における送信波強度 $I_{s1}$ は次式から算出した。

表-3 超音波斜入射実験結果

周波数 $f$ (kHz)	斜入射角 $\theta$ ( $^\circ$ )	記録距離 $x'$ (m)	実距離 $x$ (m)	誤差 $x' - x$ (m)	誤差率 $\epsilon$ $\frac{x' - x}{x} \times 100$ (%)	音響出力 $P_{sa}$ ( $W_p$ )	反響余裕値 $M$ (dB)	測深誤差 $x' - 4.5$ (m)	$\frac{\epsilon'}{4.5} \times 100$ (%)
11.5	$\pm 0$	4.50	4.50	$\pm 0.00$	$\pm 0.00$	0.33	25.0	$\pm 0.00$	$\pm 0.00$
	+ 5	4.56	4.52	+0.04	+ 0.88		23.0	+0.06	+ 1.33
	+10	4.82	4.59	+0.23	+ 5.01		8.0	+0.32	+ 7.11
	+15	5.04	4.70	+0.34	+ 7.23		4.0	+0.54	+12.0
	+20	5.05	4.86	+0.19	+ 3.91		12.0	+0.55	+12.2
	+25	5.14	4.60	+0.54	+11.74		15.0	+0.64	+14.2
	+30	5.21	3.73	+1.48	+39.68		5.0	+0.71	+15.8
	- 5	4.58	4.52	+0.06	+ 1.33		23.0	+0.08	+ 1.78
	-10	4.92	4.59	+0.33	+ 7.19		8.0	+0.42	+ 9.33
	-15	5.00	4.70	+0.30	+ 6.38		4.0	+0.50	+11.1
	-20	5.01	4.86	+0.15	+ 3.09		12.0	+0.51	+11.3
	-25	5.01	4.60	+0.41	+ 8.91		15.0	+0.51	+11.3
	-30	5.22	3.73	+1.49	+39.95		5.0	+0.72	+16.0
	100	$\pm 0$	4.50	4.50	$\pm 0.00$		$\pm 0.00$	171.5	45.0
+ 5		4.55	4.52	+0.03	+ 0.66	36.2	+0.05		+ 1.11
+10		4.69	4.59	+0.10	+ 2.18	27.1	+0.19		+ 4.22
+15		4.82	4.70	+0.12	+ 2.55	27.0	+0.32		+ 7.11
+20		4.93	4.86	+0.07	+ 1.44	31.0	+0.43		+ 9.56
+25		5.08	4.60	+0.48	+10.43		+0.58		+12.9
+30		5.18	3.73	+1.45	+38.87		+0.68		+15.1
- 5		4.52	4.52	$\pm 0.00$	$\pm 0.00$	36.2	+0.02		+ 0.04
-10		4.63	4.59	+0.04	+ 0.87	27.1	+0.13		+ 2.89
-15		4.78	4.70	+0.08	+ 1.70	27.0	+0.28		+ 6.22
-20		4.90	4.86	+0.04	+ 0.82	31.0	+0.40		+ 8.89
-25		5.10	4.60	+0.50	+10.87		+0.60		+13.3
-30		5.32	3.73	+1.59	+42.63		+0.82		+18.2

## 音響測深機に関する研究

周波数 $f$ (kHz)	斜入射角 $\theta$ (°)	記録距離 $x'$ (m)	実距離 $x$ (m)	誤差 $x'-x$ (m)	誤差率 $\epsilon$ $\frac{x'-x}{x} \times 100$ (%)	音響出力 $P_{sa}$ (W <sub>p</sub> )	反響余裕値 $M$ (dB)	測深誤差 $x'-4.5$ (m)	$\frac{\epsilon'}{4.5} \times 100$ (%)
200	± 0	4.50	4.50	±0.00	± 0.00	63.9	32.0	±0.00	± 0.00
	+ 5	4.57	4.52	+0.05	+ 1.11		27.0	+0.07	+ 1.56
	+10	4.64	4.59	+0.05	+ 1.09		26.0	+0.14	+ 3.11
	+15	4.72	4.70	+0.02	+ 0.43		26.5	+0.22	+ 4.89
	+20	4.90	4.86	+0.04	+ 0.82		28.0	+0.40	+ 8.89
	+25	4.94	4.60	+0.34	+ 7.39		28.0	+0.44	+ 9.78
	+30	5.55	3.73	+1.82	+48.79		20.5	+1.05	+23.3
	- 5	4.52	4.52	±0.00	± 0.00		27.0	+0.02	+ 0.44
	-10	4.59	4.59	±0.00	± 0.00		26.0	+0.09	+ 2.00
	-15	4.67	4.70	-0.03	- 0.64		26.5	+0.17	+ 3.78
	-20	4.81	4.86	-0.05	- 1.03		28.0	+0.31	+ 6.89
	-25	4.99	4.60	+0.39	+ 8.48		28.0	+0.49	+10.9
	-30	5.35	3.73	+1.62	+43.43		20.5	+0.85	+18.9
	500	± 0	4.50	4.50	±0.00		± 0.00	33.0	29.0
+ 5		4.56	4.52	+0.04	+ 0.88	11.0	+0.06		+ 1.33
+10		4.64	4.59	+0.05	+ 1.09	6.5	+0.14		+ 3.11
+15		4.75	4.70	+0.05	+ 1.06	24.5	+0.25		+ 5.56
+20		4.94	4.86	+0.08	+ 1.65	29.0	+0.44		+ 9.78
+25		4.02	4.60	-0.58	-12.61	13.5	-0.52		+11.6
+30		—	3.73	—	—	—	—		—
- 5		4.58	4.52	+0.06	+ 1.33	11.0	+0.08		+ 1.78
-10		4.64	4.59	+0.05	+ 1.09	6.5	+0.14		+ 3.11
-15		4.75	4.70	+0.05	+ 1.06	24.5	+0.25		+ 5.56
-20		4.94	4.86	+0.08	+ 1.65	29.0	+0.44		+ 9.78
-25		5.31	4.60	+0.71	+15.43	13.5	+0.81		+18.0
-30		—	3.73	—	—	—	—		—
1000		± 0	4.50	4.50	±0.00	± 0.00	52.8		45.0
	+ 5	4.52	4.52	±0.00	± 0.00	34.5		+0.02	+ 0.44
	+10	4.61	4.59	+0.02	+ 0.44	31.4		+0.11	+ 2.44
	+15	4.71	4.70	+0.01	+ 0.21	25.5		+0.21	+ 4.67
	+20	4.87	4.86	+0.01	+ 0.21	30.0		+0.37	+ 8.22
	+25	3.81	4.60	-0.79	-17.17	25.7		-0.71	+15.8
	+30	3.10	3.73	-0.63	-16.89	14.5		-1.40	+31.1
	- 5	4.52	4.52	±0.00	± 0.00	34.5		+0.02	+ 0.44
	-10	4.60	4.59	+0.01	+ 0.22	31.4		+0.10	+ 2.22
	-15	4.71	4.70	+0.01	+ 0.21	25.5		+0.21	+ 4.67
	-20	4.90	4.86	+0.04	+ 0.82	30.0		+0.40	+ 8.89
	-25	3.98	4.60	-0.62	-13.48	25.7		-0.52	+11.6
	-30	3.68	3.73	-0.05	- 1.34	14.5		-0.82	+18.2

表-4(a) 垂直入射時の超

周波数 $f$ (kHz)	送信電圧 $E_s$ (V <sub>p</sub> )	送信出力 $P_{SE}$ (W <sub>p</sub> )	音響出力 $P_{Sa}$ (W <sub>p</sub> )	送波指標点における送信波強 $I_{s1}$ (W/cm <sup>2</sup> )	水底位置の入射波強度 $I_{sz}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底における反射波強度 $I_{Rz}$ (w/cm <sup>2</sup> )	受波面における反射波強度 $I_{RR}$ (w/cm <sup>2</sup> )
11.5	30.0	0.45	0.33	$1.39 \times 10^{-4}$ ( $1.443 \times 10^4$ )	$6.86 \times 10^{-6}$ ( $3.206 \times 10^3$ )	$3.48 \times 10^{-6}$ ( $2.283 \times 10^3$ )	$8.6 \times 10^{-7}$ ( $1.135 \times 10^3$ )
100	240.0	334.0	171.5	$5.98 \times 10^{-1}$ ( $9.465 \times 10^5$ )	$2.9 \times 10^{-2}$ ( $2.085 \times 10^5$ )	$1.52 \times 10^{-2}$ ( $1.509 \times 10^5$ )	$3.6 \times 10^{-3}$ ( $7.344 \times 10^4$ )
200	140.0	190.0	63.9	$8.82 \times 10^{-1}$ ( $1.15 \times 10^6$ )	$4.4 \times 10^{-2}$ ( $2.568 \times 10^5$ )	$2.23 \times 10^{-2}$ ( $1.827 \times 10^5$ )	$5.4 \times 10^{-3}$ ( $8.994 \times 10^4$ )
500	120.0	40.3	33.0	$7.13 \times 10^{-1}$ ( $1.034 \times 10^6$ )	$3.3 \times 10^{-2}$ ( $2.224 \times 10^5$ )	$1.67 \times 10^{-2}$ ( $1.581 \times 10^5$ )	$3.8 \times 10^{-3}$ ( $7.545 \times 10^4$ )
1000	120.0	72.0	52.8	4.41 ( $2.57 \times 10^6$ )	$1.8 \times 10^{-1}$ ( $5.193 \times 10^5$ )	$9.13 \times 10^{-2}$ ( $3.699 \times 10^5$ )	$1.53 \times 10^{-2}$ ( $1.514 \times 10^5$ )

表-4(b) 斜入射時の超

周波数 $f$ (kHz)	送信電圧 $E_s$ (V <sub>p</sub> )	送信出力 $P_{SE}$ (W <sub>p</sub> )	音響出力 $P_{Sa}$ (W <sub>p</sub> )	送波指標点における送信波強 $I_{s1}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底位置の入射波強度 $I_{sz}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底における反射波強度 $I_{Rz}$ (w/cm <sup>2</sup> )	受波面における反射波強度 $I_{RR}$ (w/cm <sup>2</sup> )
11.5	30.0	0.45	0.33	$1.39 \times 10^{-4}$ ( $1.443 \times 10^4$ )	$6.83 \times 10^{-6}$ ( $3.198 \times 10^3$ )	$2.18 \times 10^{-6}$ ( $1.808 \times 10^3$ )	$5.44 \times 10^{-7}$ ( $9.028 \times 10^2$ )
100	240.0	334.0	171.5	$5.98 \times 10^{-1}$ ( $9.465 \times 10^5$ )	$2.93 \times 10^{-2}$ ( $2.095 \times 10^5$ )	$1.96 \times 10^{-3}$ ( $5.419 \times 10^4$ )	$4.91 \times 10^{-4}$ ( $2.712 \times 10^4$ )
200	140.0	190.0	63.9	$8.82 \times 10^{-1}$ ( $1.149 \times 10^6$ )	$4.28 \times 10^{-2}$ ( $2.532 \times 10^5$ )	$6.85 \times 10^{-3}$ ( $1.013 \times 10^5$ )	$1.69 \times 10^{-3}$ ( $5.032 \times 10^4$ )
500	120.0	40.3	33.0	$7.13 \times 10^{-1}$ ( $7.034 \times 10^6$ )	$3.3 \times 10^{-2}$ ( $2.226 \times 10^5$ )	$2.68 \times 10^{-4}$ ( $2.007 \times 10^4$ )	$6.07 \times 10^{-5}$ ( $9.544 \times 10^3$ )
1000	120.0	72.0	52.8	4.41 ( $2.573 \times 10^6$ )	$1.77 \times 10^{-1}$ ( $5.154 \times 10^5$ )	$7.79 \times 10^{-3}$ ( $1.081 \times 10^5$ )	$1.31 \times 10^{-3}$ ( $4.433 \times 10^4$ )

表-4(c) 斜入射時の超

周波数 $f$ (kHz)	送信電圧 $E_s$ (V <sub>p</sub> )	送信出力 $P_{SE}$ (W <sub>p</sub> )	音響出力 $P_{Sa}$ (W <sub>p</sub> )	送波指標点における送信波強 $I_{s1}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底位置の入射波強度 $I_{sz}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底における反射波強度 $I_{Rz}$ (w/cm <sup>2</sup> )	受波面における反射波強度 $I_{RR}$ (w/cm <sup>2</sup> )
11.5	30.0	0.45	0.33	$1.39 \times 10^{-4}$	$6.6 \times 10^{-6}$ ( $3.147 \times 10^3$ )	$6.6 \times 10^{-8}$ ( $3.147 \times 10^2$ )	$1.65 \times 10^{-8}$ ( $1.574 \times 10^2$ )
100	240.0	334.0	171.5	$5.98 \times 10^{-1}$	$2.83 \times 10^{-2}$ ( $2.06 \times 10^5$ )	$2.26 \times 10^{-4}$ ( $1.841 \times 10^4$ )	$5.64 \times 10^{-5}$ ( $9.2 \times 10^3$ )
200	140.0	190.0	63.9	$8.82 \times 10^{-1}$	$4.16 \times 10^{-2}$ ( $2.499 \times 10^5$ )	$5.29 \times 10^{-3}$ ( $8.909 \times 10^4$ )	$1.30 \times 10^{-3}$ ( $4.417 \times 10^4$ )
500	120.0	40.3	33.0	$7.13 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-2}$ ( $2.195 \times 10^5$ )	$8.99 \times 10^{-5}$ ( $1.162 \times 10^4$ )	$2.03 \times 10^{-5}$ ( $5.52 \times 10^3$ )
1000	120.0	72.0	52.8	4.41	$1.72 \times 10^{-1}$ ( $5.08 \times 10^5$ )	$3.78 \times 10^{-3}$ ( $7.531 \times 10^4$ )	$6.34 \times 10^{-4}$ ( $3.085 \times 10^4$ )

※ ( ) 内は音圧 (μ bar)

$$P_{SE} = G_{J0} \cdot E_s^2$$

$$P_{Sa} = \eta_{\rho a} \cdot P_{SE}$$

$$I_{s1} = \frac{G_s \cdot R_f^2 \cdot P_{Sa}}{4\pi x_0^2}$$

$G_{J0}$ : 振動子の自由コンダクタンス

$P_{Ra} = I_{RR} \cdot A_R$  (W<sub>p</sub>)

$$I_{sz} = \left(\frac{x_0}{x}\right)^2 \cdot 10^{-0.1\alpha_x} \cdot I_{s1}$$

強さの反射率  $L_c^2 = 0.507$

$P_{RE} = \eta_{ea} P_{Ra}$  (W<sub>p</sub>)

$$I_{Rz} = L_c^2 I_{sz}$$

$$I_{RR} = \frac{1}{4} \cdot 10^{-0.2\alpha_x} \cdot I_{s1}$$

音響測深機に関する研究

音波伝搬特性 ( $\theta=0^\circ$ )

受波器開放 端電圧 $E_{RO} (V_p)$	受信器 入力電圧 $E_{RC} (V_p)$	受信器 増幅度 $A_f$ (dB)	受信器出力 電圧 $E_o (V_p)$	音響入力 $P_{Ra} (W_p)$	受信入力 $P_{RE} (W_p)$	$10 \log \frac{P_{SE}}{P_{RE}}$ (dB)
1.9	0.9	59.5	890	$6.08 \times 10^{-4}$	$4.44 \times 10^{-4}$	30.06
10.1	5.0	64.9	8880	$2.83 \times 10^{-1}$	$1.45 \times 10^{-1}$	33.63
7.7	3.8	54.3	1990	$4.24 \times 10^{-1}$	$1.42 \times 10^{-1}$	31.26
9.5	4.8	49.4	1410	$7.45 \times 10^{-2}$	$6.09 \times 10^{-2}$	28.21
14.7	7.4	61.6	8870	$3 \times 10^{-1}$	$2.2 \times 10^{-1}$	25.15

音波伝搬特性 ( $\theta=5^\circ$ )

受波器開放 端電圧 $E_{RO} (V_p)$	受信器 入力電圧 $E_{RC} (V_p)$	受信器 増幅度 $A_f$ (dB)	受信器出力 電圧 $E_o (V_p)$	音響入力 $P_{Ra} (W_p)$	受信入力 $P_{RE} (W_p)$	$10 \log \frac{P_{SE}}{P_{RE}}$ (dB)
1.5	$7.49 \times 10^{-1}$	59.5	$7.06 \times 10^2$	$3.84 \times 10^{-4}$	$2.80 \times 10^{-4}$	32.06
3.7	1.85	64.9	$3.25 \times 10^3$	$3.85 \times 10^{-2}$	$1.98 \times 10^{-2}$	42.27
4.5	2.15	54.3	$1.46 \times 10^3$	$1.33 \times 10^{-1}$	$4.47 \times 10^{-2}$	36.28
3.72	1.86	49.4	$1.49 \times 10^2$	$1.19 \times 10^{-3}$	$9.74 \times 10^{-4}$	46.17
3.88	1.94	61.6	$2.33 \times 10^3$	$2.57 \times 10^{-2}$	$1.89 \times 10^{-2}$	35.81

音波伝搬特性 ( $\theta=10^\circ$ )

受波器開放 端電圧 $E_{RO} (V_p)$	受信器 入力電圧 $E_{RC} (V_p)$	受信器 増幅度 $A_f$ (dB)	受信器 出力電圧 $E_o (V_p)$	音響入力 $P_{Ra} (W_p)$	受信入力 $P_{RE} (W_p)$	$10 \log \frac{P_{SE}}{P_{RE}}$ (dB)
$2.6 \times 10^{-1}$	$1.3 \times 10^{-1}$	59.5	$1.23 \times 10^3$	$1.17 \times 10^{-5}$	$8.54 \times 10^{-6}$	47.22
1.25	$6.27 \times 10^{-1}$	64.9	$1.1 \times 10^3$	$4.43 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-3}$	51.66
3.76	1.88	54.3	$3.08 \times 10^3$	$1.02 \times 10^{-1}$	$3.43 \times 10^{-1}$	37.44
$6.84 \times 10^{-1}$	$3.42 \times 10^{-1}$	49.4	$1.01 \times 10^2$	$3.98 \times 10^{-4}$	$3.26 \times 10^{-4}$	50.92
2.7	1.35	61.6	$1.62 \times 10^3$	$1.24 \times 10^{-2}$	$9.1 \times 10^{-3}$	38.98

水底反射損失 $\approx 3$  dB (コンクリート底質)

$$T = 10 \log \frac{P_{SE}}{P_{RE}} \text{ (dB)}$$

表-4(d) 斜入射時の超

周波数 $f$ (kHz)	送信電圧 $E_s$ (V <sub>p</sub> )	送信出力 $P_{SE}$ (W <sub>p</sub> )	音響出力 $P_{sa}$ (W <sub>p</sub> )	送波指標点における送信波強 $I_{s1}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底位置の入射波強 $I_{sx}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底における反射波強 $I_{Rx}$ (w/cm <sup>2</sup> )	受波面における反射波強 $I_{RR}$ (w/cm <sup>2</sup> )
11.5	30.0	0.45	0.33	$1.39 \times 10^{-4}$	$6.30 \times 10^{-6}$ ( $3.075 \times 10^3$ )	$2.52 \times 10^{-8}$ ( $1.944 \times 10^3$ )	$6.3 \times 10^{-9}$ ( $9.723 \times 10^1$ )
100	240.0	334.0	171.5	$5.98 \times 10^{-1}$	$2.71 \times 10^{-2}$ ( $2.016 \times 10^5$ )	$2.17 \times 10^{-4}$ ( $1.804 \times 10^4$ )	$5.40 \times 10^{-5}$ ( $9.001 \times 10^3$ )
200	140.0	190.0	63.9	$8.82 \times 10^{-1}$	$3.96 \times 10^{-2}$ ( $2.438 \times 10^5$ )	$5.66 \times 10^{-3}$ ( $9.216 \times 10^4$ )	$1.39 \times 10^{-3}$ ( $4.567 \times 10^4$ )
500	120.0	40.3	33.0	$7.13 \times 10^{-1}$	$3.06 \times 10^{-2}$ ( $2.143 \times 10^5$ )	$5.51 \times 10^{-3}$ ( $9.093 \times 10^4$ )	$1.24 \times 10^{-3}$ ( $4.314 \times 10^4$ )
1000	120.0	72.0	52.8	4.41	$1.63 \times 10^{-1}$ ( $4.945 \times 10^5$ )	$9.78 \times 10^{-4}$ ( $3.831 \times 10^4$ )	$1.62 \times 10^{-4}$ ( $1.559 \times 10^4$ )

表-4(e) 斜入射時の超

周波数 $f$ (kHz)	送信電圧 $E_s$ (V <sub>p</sub> )	送信出力 $P_{SE}$ (W <sub>p</sub> )	音響出力 $P_{sa}$ (W <sub>p</sub> )	送波指標点における送信波強 $I_{s1}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底位置の入射波強 $I_{sx}$ (w/cm <sup>2</sup> )	水底における反射波強 $I_{Rx}$ (w/cm <sup>2</sup> )	受波面における反射波強 $I_{RR}$ (w/cm <sup>2</sup> )
11.5	30.0	0.45	0.33	$1.39 \times 10^{-4}$	$5.91 \times 10^{-6}$ ( $2.978 \times 10^3$ )	$1.48 \times 10^{-7}$ ( $4.713 \times 10^2$ )	$3.70 \times 10^{-8}$ ( $2.357 \times 10^2$ )
100	240.0	334.0	171.5	$5.98 \times 10^{-1}$	$2.52 \times 10^{-2}$ ( $1.844 \times 10^5$ )	$5.04 \times 10^{-4}$ ( $2.75 \times 10^4$ )	$1.26 \times 10^{-4}$ ( $1.374 \times 10^4$ )
200	140.0	190.0	63.9	$8.82 \times 10^{-1}$	$3.70 \times 10^{-2}$ ( $2.357 \times 10^5$ )	$7.48 \times 10^{-3}$ ( $1.06 \times 10^5$ )	$1.84 \times 10^{-3}$ ( $5.255 \times 10^4$ )
500	120.0	40.3	33.0	$7.13 \times 10^{-1}$	$2.86 \times 10^{-2}$ ( $2.071 \times 10^5$ )	$1.45 \times 10^{-2}$ ( $1.475 \times 10^5$ )	$3.25 \times 10^{-3}$ ( $6.984 \times 10^4$ )
1000	120.0	72.0	52.8	4.41	$1.51 \times 10^{-1}$ ( $4.76 \times 10^5$ )	$2.42 \times 10^{-3}$ ( $6.026 \times 10^4$ )	$3.94 \times 10^{-4}$ ( $2.432 \times 10^4$ )

※ ( ) 内は音圧 (μ bar)  $I_{Rx} = I_{sx} \cdot L_{\theta}^2$   $L_{\theta}^2 = L_c^2 \times R_p^2$

$$I_{s1} = \frac{P_{SE} \cdot \eta_{ea} \cdot G_s \cdot R_s^2}{4\pi x_0^2} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

ここに  $P_{SE}$ : 送信出力 (W)  
 $G_s$ : 指向性利得  
 $R_s$ : 指向性関数  
 $x_0$ : 送波器の中心から水底方向へ単位距離 (1 m)

水底位置における入射波強  $I_{sx}$  は、次式から求めた。

$$I_{sx} = \left(\frac{x_0}{x}\right)^2 10^{-0.1\alpha_w x} I_{s1} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

ここに、 $x$ : 送波器から水底までの距離 (m)

$\alpha_w$ : 清水の吸収係数 (dB/m)

水底における反射波強  $I_{Rx}$  は水底の音圧反射率を

$L_{\theta}$  とすると、

$$I_{Rx} = I_{sx} \cdot L_{\theta}^2 \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (3)$$

ここで、 $L_{\theta}^2 = L_c^2 \times R_p^2$  であって、 $L_c$  はコンクリート底の音圧反射率で 0.712<sup>3)</sup> とした。 $R_p$  は斜めに音波が入射したときの入射角による音圧反射率である。もちろん、垂直入射の場合には  $R_p$  は 1 となって  $L_{\theta}^2 = L_c^2$  となる。

次に、受波面における反射波強  $I_{RR}$  は、

$$I_{RR} = \left(\frac{x}{2x}\right)^2 \cdot 10^{-0.2\alpha_w x} I_{Rx} \\ = \frac{1}{4} \cdot 10^{-0.2\alpha_w x} I_{Rx} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (4)$$

から求めた。

また表中 ( ) 内の数字は音圧に換算したものであって次式により求めた。

$$p = \sqrt{\rho c I \times 10^7} \text{ (}\mu\text{ bar)} \quad (5)$$

ここに、

音波伝搬特性 ( $\theta=15^\circ$ )

受波器開放端電圧 $E_{RO}$ (V <sub>p</sub> )	受信器入力電圧 $E_{RC}$ (V <sub>p</sub> )	受信器増幅度 $A_f$ (dB)	受信器出力電圧 $E_0$ (V <sub>p</sub> )	音響入力 $P_{Ra}$ (W <sub>p</sub> )	受信入力 $P_{RE}$ (W <sub>p</sub> )	$10 \log \frac{P_{SE}}{P_{RE}}$ (dB)
$1.61 \times 10^{-1}$	$8.07 \times 10^{-2}$	59.5	76.1	$4.45 \times 10^{-6}$	$3.25 \times 10^{-6}$	51.41
1.22	$6.12 \times 10^{-1}$	64.9	$1.08 \times 10^3$	$4.24 \times 10^{-3}$	$2.18 \times 10^{-3}$	51.85
3.99	1.95	54.3	$1.01 \times 10^3$	$1.09 \times 10^{-1}$	$3.66 \times 10^{-2}$	37.15
5.34	2.67	49.4	$7.88 \times 10^2$	$2.43 \times 10^{-2}$	$1.99 \times 10^{-2}$	33.06
1.37	$6.82 \times 10^{-1}$	61.6	$8.19 \times 10^2$	$3.18 \times 10^{-3}$	$2.33 \times 10^{-3}$	44.9

音波伝搬特性 ( $\theta=20^\circ$ )

受波器開放端電圧 $E_{RO}$ (V <sub>p</sub> )	受信器入力電圧 $E_{RC}$ (V <sub>p</sub> )	受信器増幅度 $A_f$ (dB)	受信器出力電圧 $E_0$ (V <sub>p</sub> )	音響入力 $P_{Ra}$ (W <sub>p</sub> )	受信入力 $P_{RE}$ (W <sub>p</sub> )	$10 \log \frac{P_{SE}}{P_{RE}}$ (dB)
$3.9 \times 10^{-1}$	$1.95 \times 10^{-1}$	59.5	$1.84 \times 10^2$	$2.63 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-5}$	43.72
1.87	$9.37 \times 10^{-1}$	64.9	$1.65 \times 10^3$	$9.89 \times 10^{-3}$	$5.08 \times 10^{-3}$	48.17
4.48	2.24	54.3	$1.16 \times 10^3$	$1.44 \times 10^{-1}$	$4.84 \times 10^{-2}$	35.94
8.64	4.32	49.4	$1.27 \times 10^3$	$6.37 \times 10^{-2}$	$5.21 \times 10^{-2}$	28.89
2.12	1.06	61.6	$1.27 \times 10^3$	$7.73 \times 10^{-3}$	$5.67 \times 10^{-3}$	41.04

$\rho c$ : 水の固有音響インピーダンス  $\approx 1.5 \times 10^3 \left( \frac{\mu \text{ bar}}{\text{cm/s}} \right)$

$I$ : 音波の強度 (W)

音響入力  $P_{Ra}$  (W) は、受波器の受波面積を  $A_R$  (cm<sup>2</sup>) として、次式を用いて計算した。

$$P_{Ra} = I_{RR} \cdot A_R \quad (\text{W}) \quad (6)$$

受信入力  $P_{RE}$  (W) は、受波器の電気音響変換能率を  $\eta_{ea}$  として次式で求めた。

$$P_{RE} = \eta_{ea} \cdot P_{Ra} \quad (\text{W}) \quad (7)$$

総合伝送損失  $T$  は、送波器電気入力  $P_{SE}$  と受波器電気入力  $P_{RE}$  の比のデシベルで表す次式を用いて計算した。

$$T_p = 10 \log_{10} \frac{P_{SE}}{P_{RE}} \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

受信器入力電圧  $E_{RC}$  (V) は、電圧を用いた総合伝送損失  $T_v = 20 \log_{10} \frac{E_s}{E_{RC}}$  と式(8)の  $T_p$  を等しいとおい

て求めたものである。

受信器開放端電圧  $E_{RO}$  は受信器入力電圧の  $E_{RC}$  の2倍として計算した。

受信器出力電圧  $E_0$  は受信器増幅度を  $A_f$  (dB) として次式より算出した。

$$A_f = 20 \log_{10} \frac{E_0}{E_{RC}} \quad (9)$$

図-4 は測深記録と水槽実形を対比した図であって、一点鎖線は超音波ビームの中心線、点線は測深記録値を結んで得られた測深軌跡である。この図から周波数が高いほど、すなわち送受波器の指向幅が狭いほど(半減指向角  $\gamma_{1/2}$  が小さいほど)測深記録と水槽実形との差が小さく、水底形状を比較的忠実に記録することがわかる。11.5 kHz, 100 kHz のように低い周波数の測深軌跡が波状になっているのは、超音波ビームの指向幅が非常に大

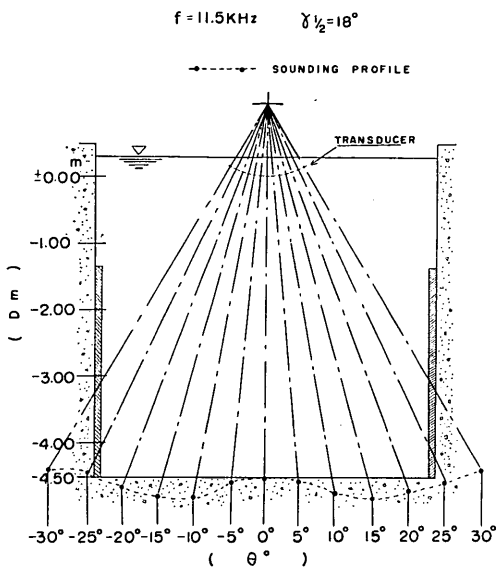


図-4・a 音響測量と水槽実形との対比 (11.5 kHz)

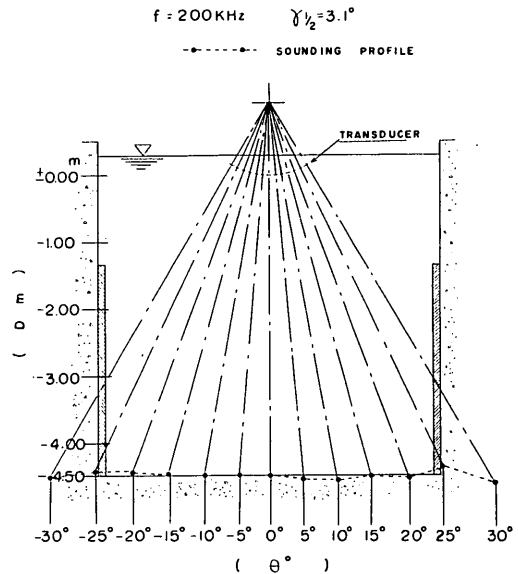


図-4・c 音響測量と水槽実形との対比 (200 kHz)

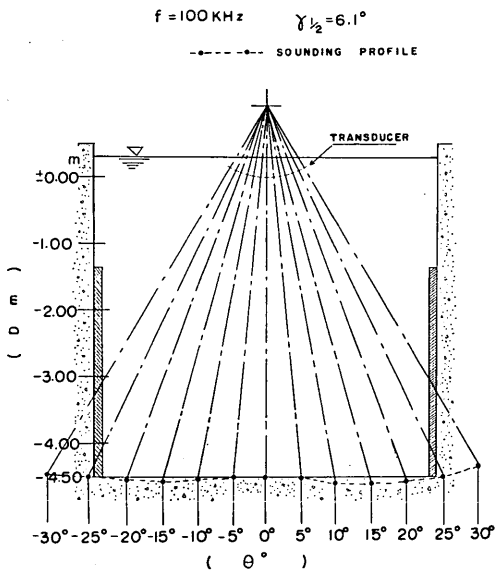


図-4・b 音響測量と水槽実形との対比 (100 kHz)

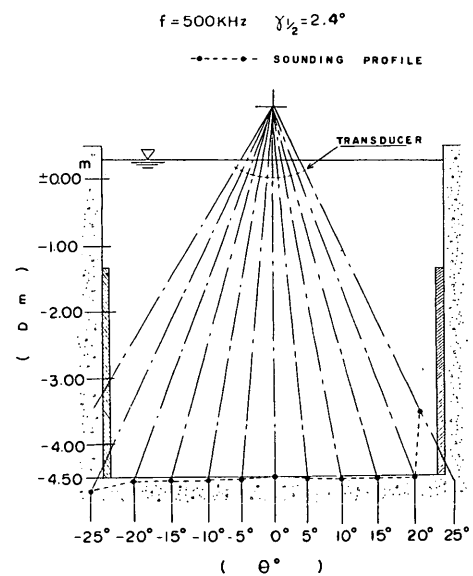


図-4・d 音響測量と水槽実形との対比 (500 kHz)



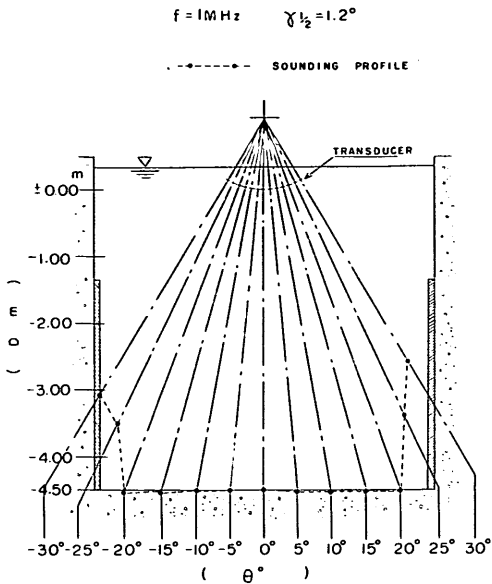


図-4-e 音響測量と水槽実形との対比 (1 MHz)

きいため斜入射角が  $20^\circ$  以上になると水槽壁からの反響の影響が大きくなるためであろう。500 kHz 以上の周波数になると、指向幅も非常に小さくなって、測深記録と水槽実形との差が小さくなり、ほぼ水槽実形を忠実に記録しているといえよう。特に 1000 kHz を用いた場合、半減指向角  $\gamma_{1/2}$  が  $1.2^\circ$  と非常に小さいため、4.5 m 水深の位置の超音波ビームの広がり円の直径  $d$  は、19 cm で他に比して小さく水槽形状を正確に記録しているが、斜入射角  $\theta$  が  $25^\circ$  以上になると超音波ビームが水槽壁のゴム製の吸音板に斜めに入射するため、反射特性が複雑となって水槽壁の実形と大分誤差が出ているようである

が、記録の形からみれば、ほぼ実形を記録しているといえよう。このことから側壁を忠実に正確に記録するためには、より半減指向角  $\gamma_{1/2}$  の小さい送受波器を使用する必要がある。

図-5 は図-4 の a~e までの各周波毎の測深軌跡を比較検討するため拡大して重ね合わせた図であって、この図から明らかに半減指向角の小さい振動子を用いた方が水底形状を忠実に記録することがわかる。

なお、橋本氏<sup>6)</sup>らが、超音波指向角と測深精度の関係を湖沼で垂直入射の実験を行なった例があるが、この場合も上記同様、指向角が小さいほど、水底形状を忠実に記録すると報告されている。

図-6 は斜入射角  $\theta$  と記録距離  $x'$  の関係を示したものであって、実線は次式で求めた実距離  $x$  である。

$$x = \frac{4.5 + 1.08}{\cos \theta} - 1.08 \text{ (m)} \quad (10)$$

ここに 1.08 m は回転軸から送受波器までの長さで、この式の適用範囲は  $0 \leq \theta < \tan^{-1} \frac{2.5}{4.5 + 1.08} = 24.1^\circ$  である。

11.5 kHz の記録距離は  $10^\circ$  附近まで斜入射角  $\theta$  に比例して誤差が増えているが、その角度以上になると側壁の影響が現われてくるのがわかる。100 kHz では  $15^\circ$  附近が誤差の比例限界で、200 kHz ~ 1000 kHz では  $20^\circ$  附近が誤差の比例限界であることがわかる。

図-7 は、斜入射角と測距誤差の関係を各周波数毎に示したものである。超音波ビーム幅の大きい振動子を用いた記録よりも、超音波ビーム幅の小さい振動子を用いた記録の方がより精度がよいことがわかる。

図-8 は、斜入射角とマージンの関係を各周波数毎に

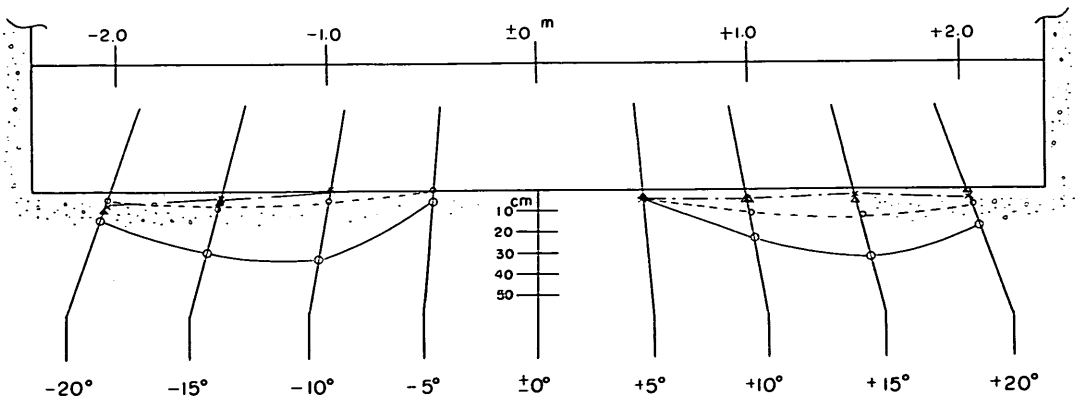


図-5 音響測量と水槽実形との周波数毎の対比

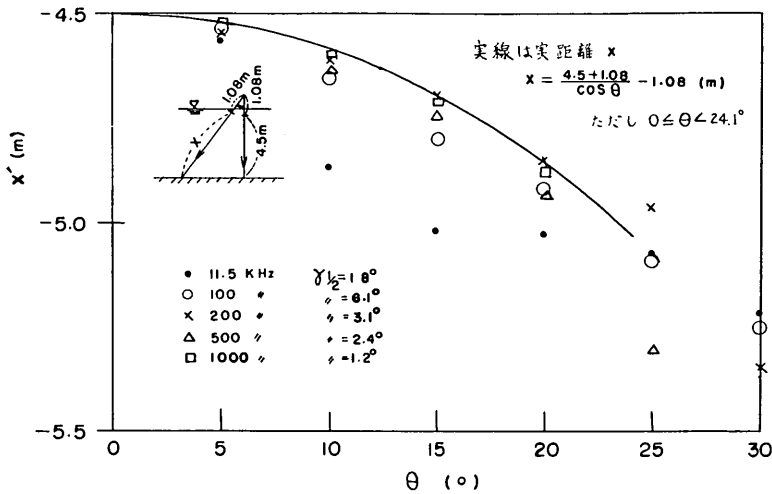


図-6 斜入射角と記録距離

示したものであって、各周波数共、斜入射角  $\theta$  が  $20^\circ$  附近で急に反射強度が大きくなっていることがわかる。これは斜入射角  $\theta$  が  $20^\circ$  以上になると側壁に超音波の一部が当って、受波器に帰着する反射波の強度が大きくなったものと思われる。

図-9 は斜入射角の余角 (Grazing Angle という) と散乱強度の関係を各周波数毎に示す。ここで散乱強度<sup>3)</sup> は下記のように定義した。

散乱強度 = 斜入射のマージン - 垂直入射のマージン (dB)

図-10 は振動子の半減指向角  $\gamma_{1/2}$  と測距誤差  $\epsilon$  との関係を示したものである。測距誤差  $\epsilon$  は半減指向角  $\gamma_{1/2}$  に比例して増加していくことがわかる。 $\theta = 20^\circ$  が  $\theta = 5^\circ$  に次いで誤差が小さいのは、水槽壁に超音波ビームの一部が当たったため、その合成反射波に影響をおよぼしたためであろう。この図から測距誤差  $\epsilon$  が  $0.2\%$  以下で測深するためには斜入射角  $\theta$  が  $15^\circ$  の場合、振動子の半減指向角  $\gamma_{1/2}$  が  $0.5^\circ$  以下のものを使用する必要がある。

図-11 は、散乱強度と測距誤差の関係を斜入射角  $\theta$  が  $0 \sim 20^\circ$  の範囲で表わしたものであって、周波数が低い方から高い方、すなわち半減指向角  $\gamma_{1/2}$  が大きい方から小さい方に移るにしたがって測距誤差  $\epsilon$  が小さくなることわかる。また、測距誤差  $\epsilon$  は、散乱強度  $S$  に反比例して、ほぼ増加の傾向にあることがわかる。

図-12 は、半減指向角  $\gamma_{1/2}$  と散乱強度  $S$  との関係を斜入射角  $\theta$  が  $0 \sim 20^\circ$  の範囲で示したものである。この

図によると、半減指向角  $\gamma_{1/2}$  が  $2 \sim 3^\circ$  の範囲で斜入射による散乱強度が急変している  $\gamma_{1/2}$  が  $6^\circ$  以上では変化が少ない。 $\gamma_{1/2} = 2.4^\circ$  では、 $\theta = 5 \sim 10^\circ$  で散乱強度が小さく、 $\theta = 15 \sim 20^\circ$  では逆に散乱強度は非常に大きくなっている。また  $\gamma_{1/2} = 3^\circ$  では各入射角共、散乱強度がほぼ  $-5$  dB 程度にあって非常に大きい。これらのことから、超音波を水底に斜めに入射した場合、測距誤差  $\epsilon$  の増加と共に、受波器で受信しうる反射強度も減衰することを考慮する必要がある。

### 3.2 ソナー方程式を用いた総合伝送損失の理論

回転受波式超音波測深装置を開発するには、海底斜入射による反射特性を明らかにする必要がある。

次に、水中の底質に超音波を斜入射したときの反射透過の様子を理論的に考察してみよう。

図-13 に示すように送波器  $S$  よりコンクリート底質へ向けて斜入射角  $\theta$  で斜めに放射された超音波は、拡散減衰しながらコンクリート底質表面に到達して、一部は反射し、一部は透過する。この斜入射の理論的取り扱いはまだ港研資料 No. 45<sup>3)</sup> でとりあげているのでここでは説明は省略し、底質にコンクリートを用いたので、文献-3 でとりあげた反射透過の挙動はもちろん、底質表面が理論平面でないため平滑でなく、多少凹凸のある粗面であるから、入射波の一部が入射面で散乱波を生ずることになる。この散乱波の中、受波器  $R$  方向に反射する散乱波は再び拡散減衰しながら受波器  $R$  に帰着する。この伝搬の様子をソナー方程式で表わしてみよう。

底質表面より反射する音波は、総合伝送損失を  $T_0$ (dB)

音響測深機に関する研究

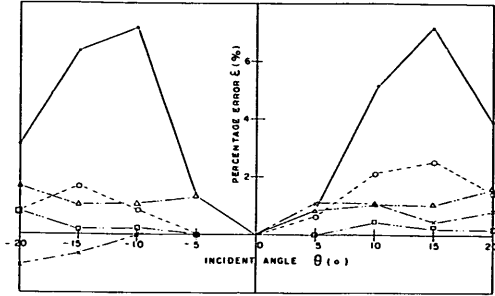


図-7 斜入射角と測距誤差

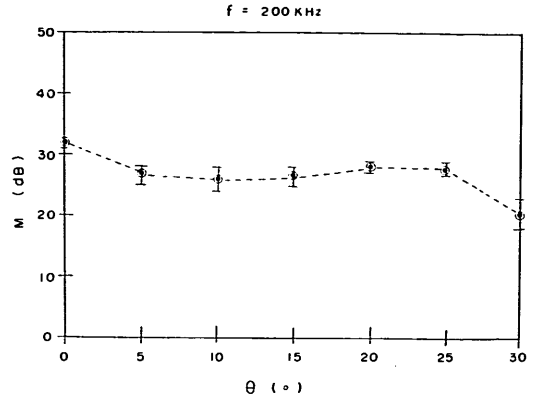


図-8.c 200 kHz 斜入射角とマージンの関係

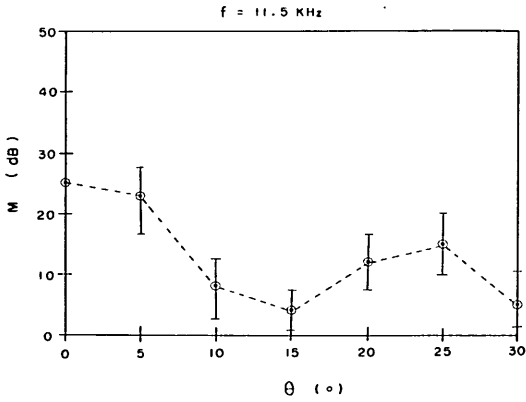


図-8.a 11.5 kHz 斜入射角とマージンの関係

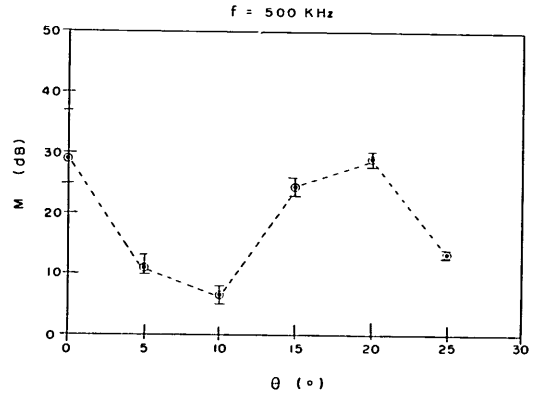


図-8.d 500 kHz 斜入射角とマージンの関係

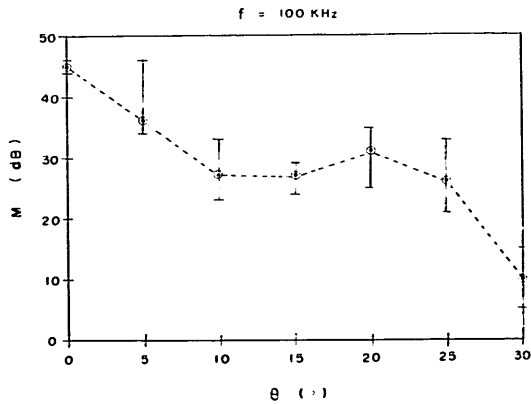


図-8.b 100 kHz 斜入射角とマージンの関係

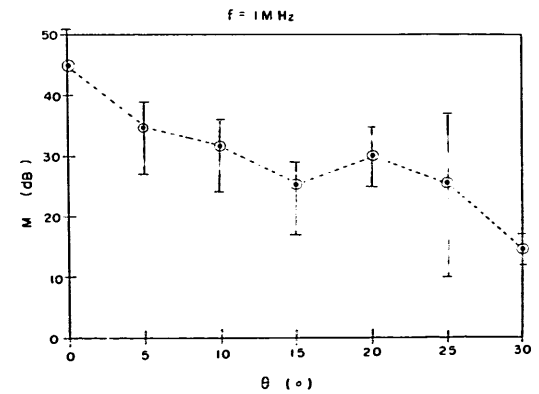


図-8.e 1 MHz 斜入射角とマージンの関係

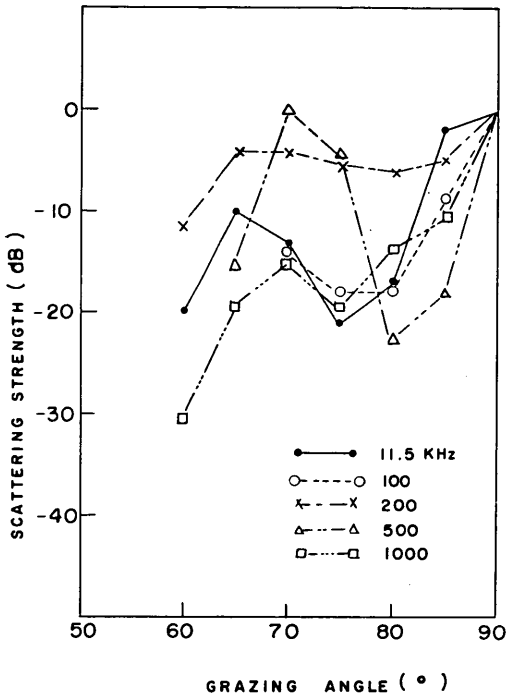


図-9 斜入射角の余角と散乱強度の関係

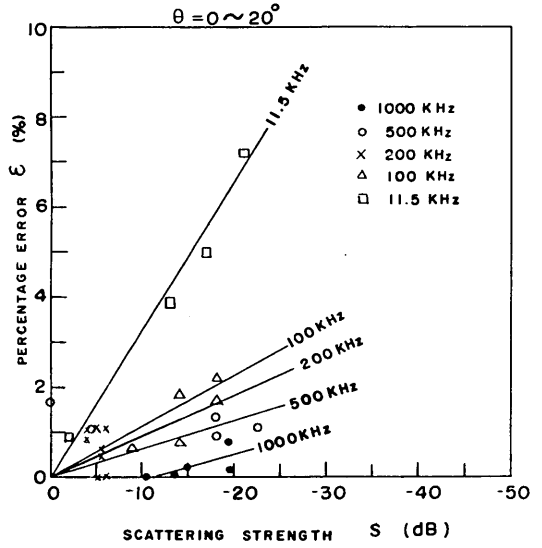


図-11 散乱強度と測距誤差

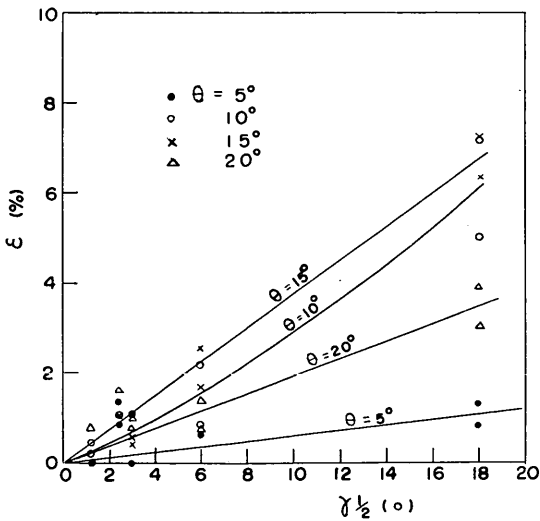


図-10 半減指向角と測距誤差の関係

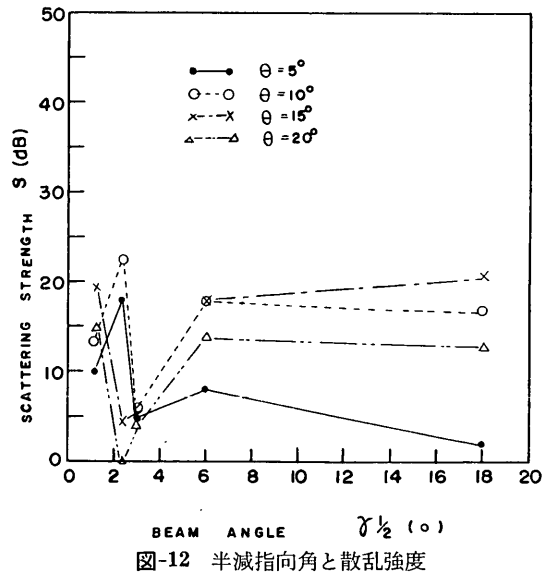


図-12 半減指向角と散乱強度

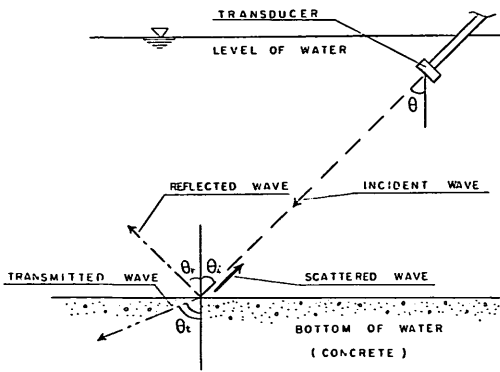


図-13 超音波斜入射による反射と透過

とすると、

$$\begin{aligned}
 T_c &= 20 \log_{10} \frac{E_s}{E_{R0}} \text{ (dB)} \\
 &= -20 \log (S_s R_s) - 20 \log (M_R R_R) \\
 &\quad + 20 \log \frac{2x}{x_0} - 2\alpha_w x - 20 \log L_{c\theta} \quad (11)
 \end{aligned}$$

ここに、 $L_{c\theta}$  はコンクリート底質表面における斜入射に

よる音圧反射率であり、次のように定義した。この  $L_{c\theta}$  は、コンクリート底質表面垂直入射の場合の音圧反射率  $L_c$  と音波がコンクリート底質に斜めに入射した場合の斜入射音圧反射率  $L_\theta$  の積で表わされる。すなわち  $L_{c\theta}$  は、

$$L_{c\theta} = L_c \cdot L_\theta$$

ここに

$$L_\theta = \frac{\text{斜入射の場合の反射音圧強度}}{\text{垂直入射の場合の反射音圧強度}} \quad (12)$$

となる。

### 3.3 探知可能深度

総合伝送損失と水中の伝搬に関する損失から、音響測深機的设计に必要な探知可能深度が求められる。水中の伝搬に関する損失  $L_w$  は次のように表わされる<sup>4)</sup>。

$$L_w = 20 \log \frac{2x}{x_0} + 2\alpha_w x \text{ (dB)} \quad (13)$$

図-14 に5周波 (11.5, 100, 200, 500, 1000 kHz) それぞれの伝搬損失を示す。

総合伝送損失  $T_c$  は式(11)より求めることができる。表-5 にはコンクリート底質の表面からの反射波の総合

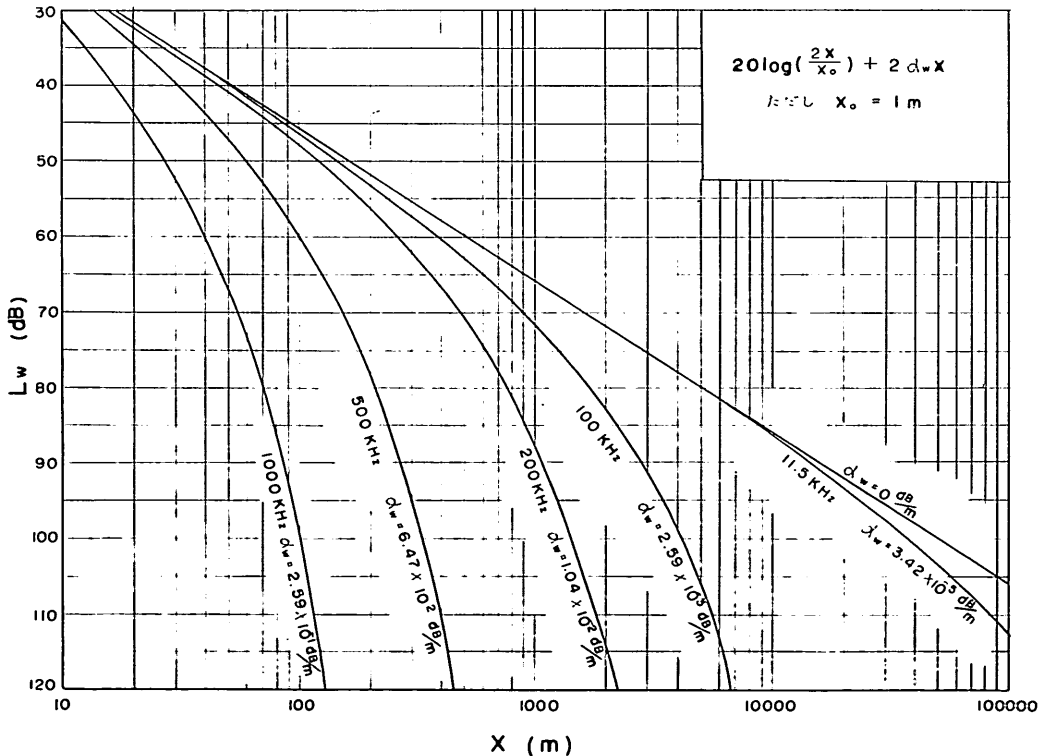


図-14 水中伝搬に許しうる減衰と距離

表-5(a) コンクリート底質の場合の総合伝送損失 (垂直入射の場合)

周波数 $f$ (kHz)	送波器変換損失 $-20 \log(S_S R_S)$	受波器変換損失 $-20 \log(M_R R_R)$	拡散損失 $20 \log\left(\frac{2x}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $2\alpha_w x$	コンクリート底質 における反射損失 $-20 \log L_c$	総合伝送損失 $T_c$ (dB)
11.5	-53.62	55.60	19.08	$2.30 \times 10^{-4}$	3.00	24.06
100	-71.92	77.32	19.08	$1.71 \times 10^{-2}$	3.00	27.50
200	-78.32	81.42	19.08	$6.93 \times 10^{-2}$	3.00	25.25
500	-78.72	78.18	19.08	$4.41 \times 10^{-1}$	3.00	21.98
1000	-86.80	81.22	19.08	1.71	3.00	18.21

※ 気泡による吸収損失は無視した。(以下同じ)

表-5(b) コンクリート底質の場合の総合伝送損失 ( $\theta=5^\circ$  の場合)

周波数 $f$ (kHz)	送波器変換損失 $-20 \log(S_S R_S)$	受波器変換損失 $-20 \log(M_R R_R)$	拡散損失 $20 \log\left(\frac{2x}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $2\alpha_w x$	コンクリート底質 における反射損失 $-20 \log L_\theta$	総合伝送損失 $T_c$ (dB)
11.5	-53.62	55.60	19.12	$2.30 \times 10^{-4}$	4.95	26.05
100	-71.92	77.32	19.12	$1.72 \times 10^{-2}$	11.74	36.28
200	-78.32	81.42	19.12	$6.96 \times 10^{-2}$	7.96	30.25
500	-78.72	78.18	19.12	$4.43 \times 10^{-1}$	20.92	39.94
1000	-86.80	81.22	19.12	1.72	13.57	28.83

表-5(c) コンクリート底質の場合の総合伝送損失 ( $\theta=10^\circ$  の場合)

周波数 $f$ (kHz)	送波器変換損失 $-20 \log(S_S R_S)$	受波器変換損失 $-20 \log(M_R R_R)$	拡散損失 $20 \log\left(\frac{2x}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $2\alpha_w x$	コンクリート底質 における反射損失 $-20 \log L_\theta$	総合伝送損失 $T_c$ (dB)
11.5	-53.62	55.60	19.26	$2.34 \times 10^{-4}$	20.0	41.24
100	-71.92	77.32	19.26	$1.75 \times 10^{-2}$	20.97	45.65
200	-78.32	81.42	19.26	$7.07 \times 10^{-2}$	8.96	31.39
500	-78.72	78.18	19.26	$4.5 \times 10^{-1}$	25.53	44.7
1000	-86.80	81.22	19.26	1.75	16.58	32.01

表-5(d) コンクリート底質の場合の総合伝送損失 ( $\theta=15^\circ$  の場合)

周波数 $f$ (kHz)	送波器変換損失 $-20 \log(S_S R_S)$	受波器変換損失 $-20 \log(M_R R_R)$	拡散損失 $20 \log\left(\frac{2x}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $2\alpha_w x$	コンクリート底質 における反射損失 $-20 \log L_\theta$	総合伝送損失 $T_c$ (dB)
11.5	-53.62	55.60	19.46	$2.4 \times 10^{-4}$	23.98	45.42
100	-71.92	77.32	19.46	$1.79 \times 10^{-2}$	20.97	45.85
200	-78.32	81.42	19.46	$7.24 \times 10^{-2}$	8.45	31.08
500	-78.72	78.18	19.46	$4.61 \times 10^{-1}$	7.45	26.83
1000	-86.80	81.22	19.46	1.79	22.22	37.89

表-5(e) コンクリート底質の場合の総合伝送損失 ( $\theta=20^\circ$  の場合)

周波数 $f$ (kHz)	送波器変換損失 $-20 \log(S_S R_S)$	受波器変換損失 $-20 \log(M_R R_R)$	拡散損失 $20 \log\left(\frac{2x}{x_0}\right)$	水の吸収損失 $2\alpha_w x$	コンクリート底質 における反射損失 $-20 \log L_\theta$	総合伝送損失 $T_e$ (dB)
11.5	-53.62	55.60	19.76	$2.48 \times 10^{-4}$	16.02	37.76
100	-71.92	77.32	19.76	$1.85 \times 10^{-2}$	16.99	42.17
200	-78.32	81.42	19.76	$7.48 \times 10^{-2}$	6.94	29.87
500	-78.72	78.18	19.76	$4.76 \times 10^{-1}$	2.95	22.65
1000	-86.80	81.22	19.76	1.85	17.96	33.99

伝送損失を周波数毎に示している。(a)は垂直入射の場合、(b)は斜入射角 $\theta$ が5度の場合、(c)は斜入射角 $\theta$ が $10^\circ$ の場合、(d)は斜入射角 $\theta$ が $15^\circ$ の場合、(e)は斜入射角 $\theta$ が $20^\circ$ の場合をそれぞれ示している。表中の水の吸収係数は Pinkerton の吸収係数 $\alpha$ を用いて求めた。送波器変換損失、受波器変換損失は両方も送受波器固有の値であるからそれをそのまま使い、拡散損失は伝搬距離 $x$ として垂直入射の場合は4.5m、斜入射の場合は斜入射角 $\theta$ における実距離 $x'$ を用いて算出した。底質における反射損失は、垂直入射の場合の反射損失を3dB<sup>3)</sup>

とし、斜入射の場合は垂直入射の場合のマージンから斜入射の場合のマージンを差し引いた値(これを斜入射反射損失という)に、垂直入射の場合の反射損失をたした値である。

記録器の記録可能限界出力、受信器の増幅度、送信出力が既知であれば、式(11)の総合損失 $T_e$ の許容最大値が定まる。次に総合損失の式(11)の第1項、第2項は既知であり、コンクリート底質表面の反射損失が既知であれば、これらを差し引いて水中の伝搬に関する損失 $L_w$ の許容最大値が定まる。図-14の曲線群から探知可能距

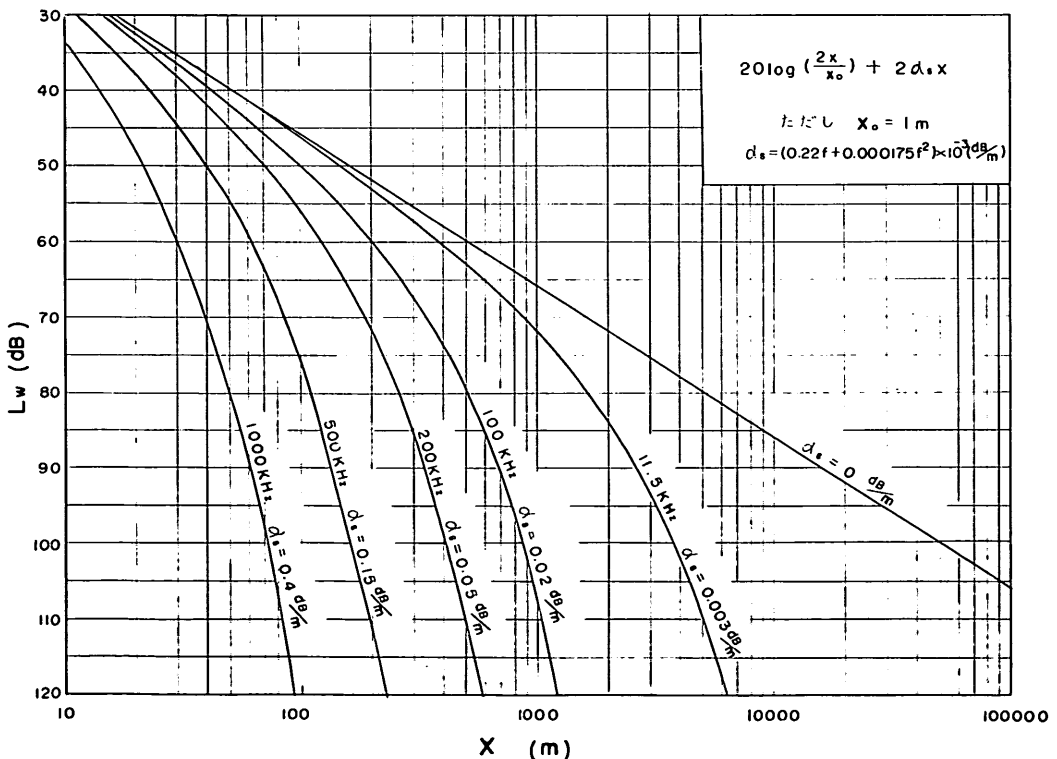


図-15 海中伝搬に許しうる減衰と距離

離  $x$  が求まる。

いま、数値例として、本実験に使用した超音波探査機の周波数  $f$  が 1 MHz, 受信増幅度  $A_f$  が 100 dB, 送信出力  $P_{SE}$  が 1W の場合の探知可能距離および深度を求めてみる。

記録器の記録可能限界出力電圧  $E_s$  は 50V<sup>2)</sup> であるが、実際に記録を目で確認しうるマージン  $M$  は、この装置では 10 dB 以上であるから、ここでは記録可能出力電圧として 200V を用いることにする。

受電端最低入力電圧  $E_R$  は、

$$A_f = 100 = 20 \log_{10} \frac{E_0}{E_R} \quad (\text{dB})$$

より

$$\log \frac{E_0}{E_R} = 5$$

$$\therefore E_R = 2 \times 10^{-3} \quad (\text{V})$$

したがって、開放端電圧  $E_{R0}$  は、

$$E_{R0} = 2E_R = 4 \times 10^{-3} \quad (\text{V})$$

となる。

水中雑音 SN 比を無視すれば、受電端に最低 4(mV) の電圧が必要である。

式(34)より、

$$E_s = \sqrt{\frac{P_{SE}}{G_f}} = 14.1 \quad (\text{V}), \quad E_{R0} = 4 \times 10^{-3}$$

(V) を入れて、

$$T_c = 20 \log \frac{E_s}{E_{R0}} = 70.9 \quad (\text{dB})$$

が得られる。

次に斜入射角  $\theta$  が  $0^\circ$  と  $15^\circ$  のときの探知可能距離  $x$  と深度  $D$  を求めてみる。

a) 垂直入射 ( $\theta=0^\circ$ ) の場合

底質表面の反射損失が 3 dB (コンクリートの反射損失) で送受波器の指向性軸で探知する場合には、表-5 の各数値を式(11)に入れて水中の伝搬に関する損失  $L_w$  を求めると、

$$L_w = T_c + 20 \log(S_S R_S) + 20 \log(M_R R_R) + 20 \log L_{c\theta}$$

$$= 70.9 + 86.8 - 81.2 - 3 = 73.5 \quad (\text{dB})$$

したがって、図-14 の曲線群から周波数  $f$  が 1 MHz のときの探知可能距離(水深)を求めてみると、約 60 m 以下であることがわかる。

b) 斜入射 ( $\theta=15^\circ$ ) の場合

底質表面の垂直入射反射損失が 3 (dB) (コンクリートの反射損失) で、斜入射反射損失が 19.5 (dB) であるから、総合反射損失は  $3 + 19.5 = 22.5$  (dB) となる。送受

波器の指向性軸で探知する場合には、表-5 の各数値を式(11)に入れて、水中の伝搬に関する損失  $L_w$  を求めると、

$$L_w = T_c + 20 \log(S_S R_S) + 20 \log(M_R R_R) + 20 \log L_{c\theta}$$

$$= 70.9 + 86.8 - 81.2 - 22.5 = 54.0 \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

したがって図-14 の曲線群から周波数  $f$  が 1 MHz のときの探知可能距離を求めてみると、約 32 m 以下であることがわかる。これを深度に換算するには、探知可能距離に  $\cos 15^\circ$  を掛けて、探知可能深度が約 31 m 以下であることがわかる。

なお、参考のために本装置を海で用いた場合の  $\theta=15^\circ$  のときの探知可能深度を求めてみる。海水における吸収係数  $\alpha_s$  の値は我国および諸外国で実測値並びに実験式<sup>3),4),5),7),8),9)</sup> が示されているが、ここでは下記の実験式<sup>4)</sup> を用いた。

$$\alpha_s = 0.22f + 0.000175f^2 \quad (\text{dB/km})$$

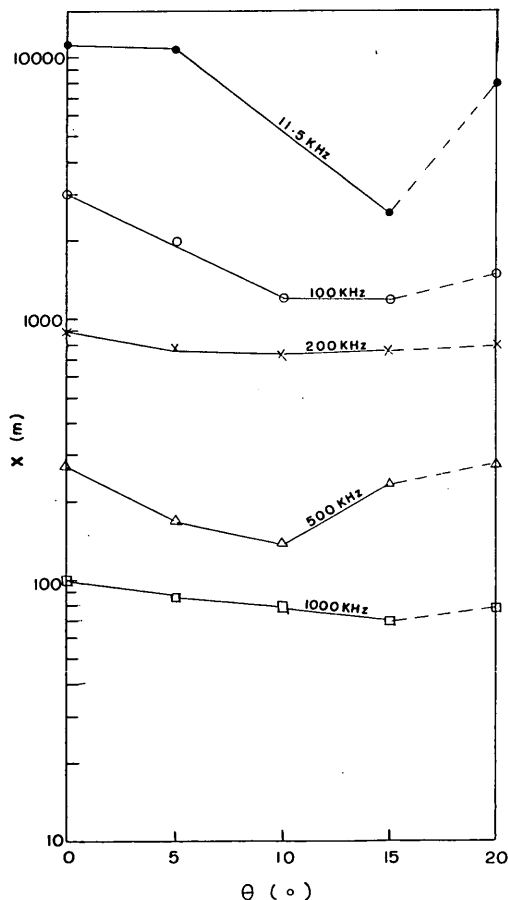


図-16 斜入射角と探知可能距離



音響測深機に関する研究

表-6 探知可能距離と斜入射角との関係

$f$ (kHz)	$I_{s1}$ (w/cm <sup>2</sup> )	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$E_{RO}$ (V)	$T_c$ (dB)	$20 \log$ ( $S_s R_s$ ) (dB)	$20 \log$ ( $M_{RR} R_R$ ) (dB)	$\theta$ (°)	$20 \log$ $L_{co}$ (dB)	$L_{w1}$ (dB)	$x$ (m)
11.5	$3.3 \times 10^{-1}$	125.0	500.0	$4 \times 10^{-3}$	101.9	53.6	-55.6	0	-3.0	96.9	11000
								5	-5.0	94.9	10900 (10856)
								10	-20.0	79.9	5000 (4925)
								15	-24.0	75.9	2600 (2512)
								20	-16.0	83.9	8000 (7520)
100	1.69	928.0	400.0	$4 \times 10^{-3}$	100.0	71.9	-77.3	0	-3.0	91.6	3000
								5	-11.8	82.8	2000 (1992)
								10	-20.9	73.7	1200 (1182)
								15	-21.0	73.6	1200 (1159)
								20	-17.0	77.6	1500 (1410)
200	1.04	218.0	150.0	$4 \times 10^{-3}$	91.5	78.3	-81.4	0	-3.0	85.4	900
								5	-8.0	80.4	780 (777)
								10	-9.0	79.4	750 (739)
								15	-8.5	79.9	760 (751)
								20	-7.0	81.4	800 (752)
500	2.00	112.0	200.0	$4 \times 10^{-3}$	94.0	78.7	-78.2	0	-3.0	91.5	280
								5	-21.0	73.5	170 (169)
								10	-25.5	69.0	140
								15	-7.5	87.0	240 (138)
								20	-3.0	91.5	280 (263)
1000	29.0	450.0	300.0	$4 \times 10^{-1}$	97.5	86.8	-81.2	0	-3.0	100.1	100
								5	-13.5	89.6	87 (87)
								10	-16.6	86.5	80 (79)
								15	-22.5	80.6	70 (68)
								20	-18.0	85.1	80 (75)

注 1) 受信増幅度  $A=100$  dB

2) 水中雑音, SN 比を無視した。

3) ( ) 内は水深 (m)

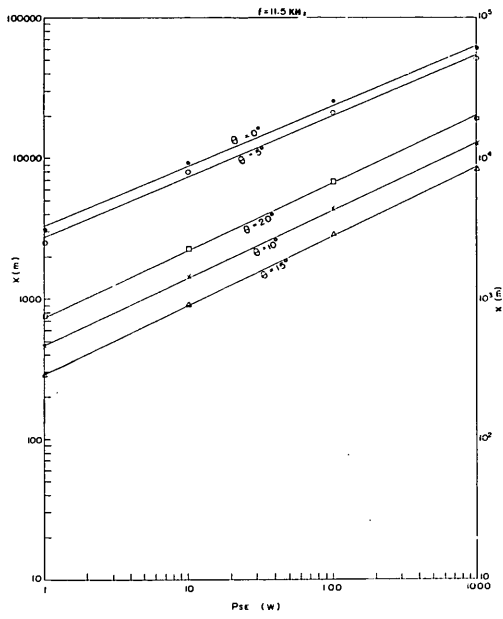


図-17.a 送信出力と探知可能距離 (11.5 kHz)

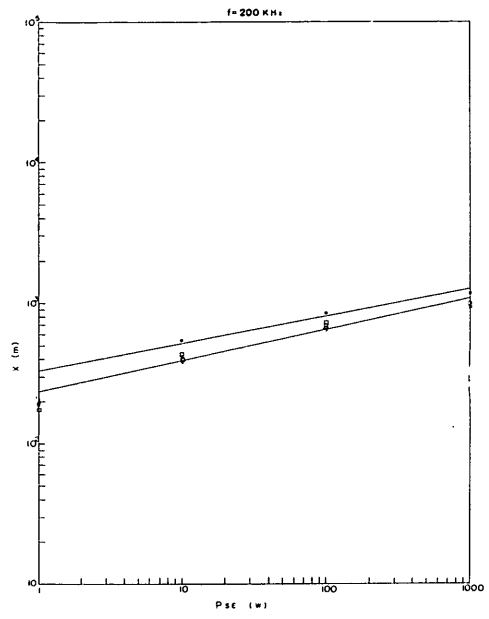


図-17.c 送信出力と探知可能距離 (200 kHz)

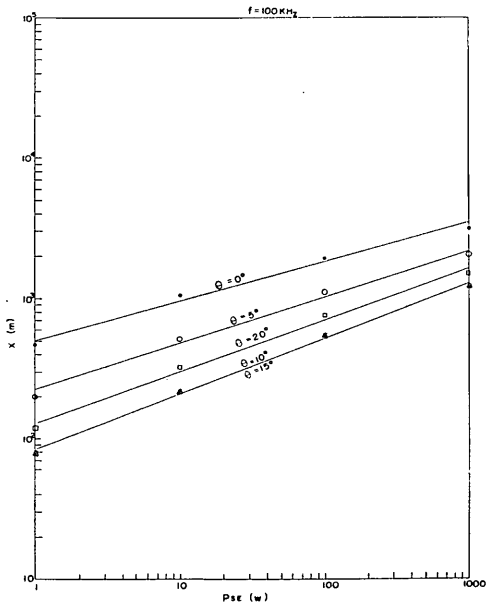


図-17.b 送信出力と探知可能距離 (100 kHz)

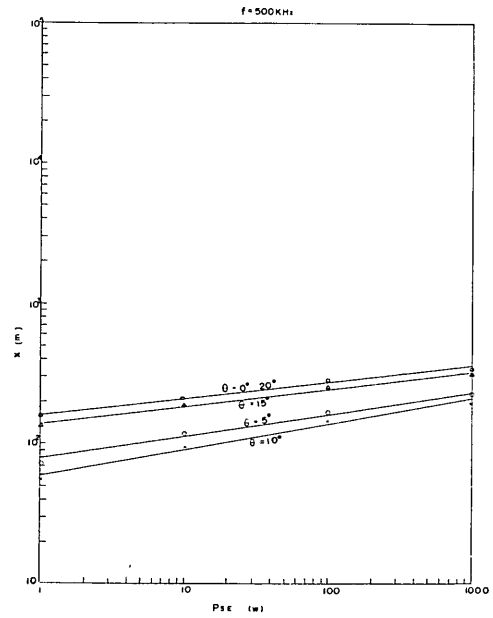


図-17.d 送信出力と探知可能距離 (500 kHz)

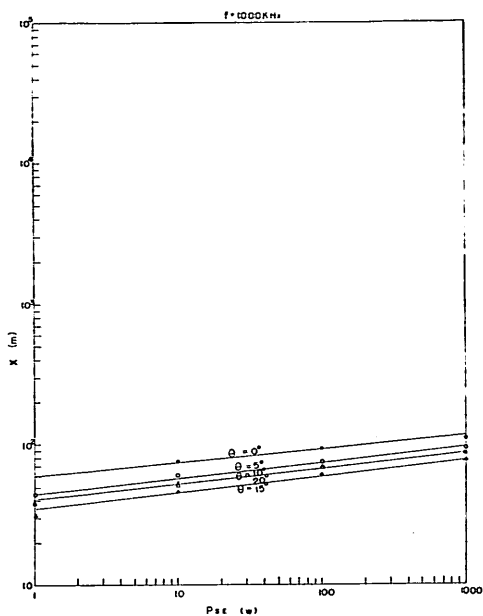


図-17-e 送信出力と探知可能距離 (1 MHz)

ここに、 $f$  : 周波数 (kHz)

図-15 は上記式の海水における吸収係数を用いて作成した5周波それぞれの伝搬損失を示す。この図の曲線群の中から、周波数  $f$  が 1 MHz の曲線に式(14)の  $L_w = 54.0$  (dB) を適用すると探知可能距離が 26 m として求まる。これを深度に直すと 25 m が得られる。したがって送信出力 1W で斜入射角  $\theta = 15^\circ$  のときの海水中のコンクリート底質を探知するには、約 25 m 以下の水深でなければならないことがわかる。

以上のような計算方法や図式解法で各周波数毎に求めて表に示したのが表-6 の探知可能距離と斜入射角との関係である。この表は、超音波探査機を用い、各周波数共、最大出力、最大受信利得のときの媒質が清水で底質がコンクリートの場合の探知可能距離と斜入射角との関係を示したものである。ただし水中雑音、SN 比等を無視した。

図-16 に斜入射角と探知可能距離との関係を周波数をパラメータとして示したものである。この図によれば、コンクリート底質を斜入射角  $\theta$  が  $0 \sim 20^\circ$  の範囲で探知する場合、11.5 kHz で  $x$  が 2600 m、100 kHz で  $x$  が 1200 m、200 kHz で  $x$  が 750 m、500 kHz で  $x$  が 140 m、1000 kHz で  $x$  が 70 m であることがわかる。

勿論、送信出力や受信感度を上げれば、それに比例して探知可能距離が大きくなるものと考えられる。図-17

にその関係を参考のために示す。また底質の反射損失や媒質の吸収係数  $\alpha_w$  が変われば、当然探知可能距離が変わるものと考えられる。

したがって、これらの図を底質の反射損失や媒質の吸収係数毎に作成しておけば、斜入射角と探知可能距離の関係や、送信出力と探知可能距離の関係が一目でわかり、回転送受波式超音波測深装置の設計に利用出来よう。

なお、海域によって、水中雑音による電圧が異なるため、海底から帰来する信号をその雑音から拾い出すためには、その雑音電圧以上の信号電圧すなわち、受波器開放端電圧  $E_{R0}$  が必要である。附表-1 に  $E_{R0}$  が  $10^{-6} \sim 10^{-3}$  (V) のときの探知可能距離  $x$  および深度  $D$  を、送信電力  $P_{SE}$  が 1, 10, 100, 1000 (W) のとき、斜入射角  $\theta$  が  $0 \sim 15^\circ$  のときの水中、海中に別けて、周波数毎にそれぞれ示した。

### 3.4 超音波斜入射が測深精度に及ぼす影響

海底に斜めに超音波パルスを放射して、入射角  $\theta$  に応じた海底幅の深度を測定するには、記録距離に入射角の余弦を乗じて、記録深度に換算する必要がある。その時の測深誤差は、測距誤差と同じ値で表わされる。また、送受波器から水底までの垂直距離、すなわち深度 ( $D = 4.5$  m) と斜入射角  $\theta$  による記録距離  $x'$  との測深誤差は表-1 の右端に示す通りである。ここで、測深誤差率  $e'$  は記録距離  $x'$  から送受波器から水底までの深度 (4.5 m) を引いた値 (測深誤差) を、深度 4.5 m で割った値の百分率で示した。

図-18 に斜入射角  $\theta$  と測深誤差率の関係を示す。実線

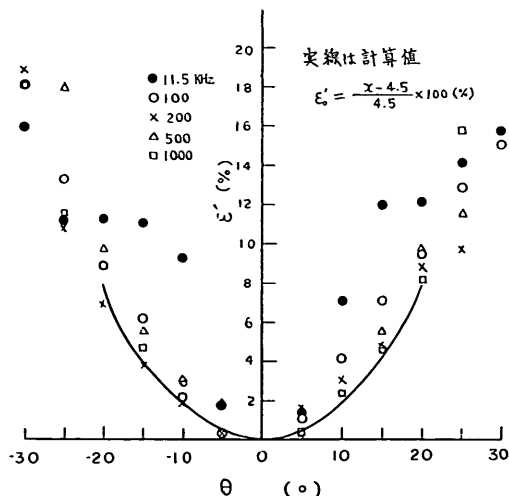


図-18 斜入射角  $\theta$  と測深誤差率  $e'$  の関係

表-7 送信出力と探知可能距離

$f$ (kHz)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)
11.5	1.0	44.7	81.0	0	76.0	3100	3100
				5	74.0	2500	2490
				10	59.0	460	453
				15	55.0	290	280
				20	63.0	740	696
	10	141.0	90.9	0	85.9	9200	9200
				5	83.9	8000	7968
				10	68.9	1450	1428
				15	64.9	920	889
				20	72.9	2300	2162
	100	447.0	101.0	0	96.0	25000	25000
				5	94.0	21000	20916
				10	79.0	4400	4334
				15	75.0	2900	2801
				20	83.0	6800	6392
	1000	1410.0	110.9	0	105.9	61000	61000
				5	103.9	52000	51792
				10	88.9	13000	1281
				15	84.9	8400	8114
				20	92.9	19000	17860
100	1.0	13.2	70.4	0	62.0	470	470
				5	53.2	200	199
				10	44.1	80	79
				15	44.0	80	77
				20	48.0	120	113
	10	41.4	80.3	0	71.9	1020	1020
				5	63.1	510	508
				10	54.0	220	217
				15	53.9	220	213
				20	57.9	320	301
	100	132.0	90.4	0	82.0	1900	1900
				5	73.2	1100	1096
				10	64.1	550	542
				15	64.0	550	531
				20	68.0	760	714
	1000	414.0	100.3	0	91.9	3100	3100
				5	83.1	2050	2042
				10	74.0	1200	1182
				15	73.9	1200	1159
				20	77.9	1500	1410

音響測深機に関する研究

表-7 つづき

$f$ (kHz)	$P_{SE}$ (W)	$E_S$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)
200	1.0	10.2	68.1	0	62.0	300	300
				5	57.0	210	209
				10	56.0	195	192
				15	56.5	200	193
				20	58.0	225	212
	10	32.1	78.1	0	72.0	540	540
				5	67.0	400	398
				10	66.0	380	374
				15	66.5	390	377
				20	68.0	430	404
	100	102.0	88.1	0	82.0	840	840
				5	77.0	680	677
				10	76.0	650	640
				15	76.5	670	647
				20	78.0	710	667
	1000	321.0	98.1	0	92.0	1150	1150
				5	87.0	1000	996
				10	86.0	960	946
				15	86.5	980	947
				20	88.0	1020	959
500	1.0	18.9	73.5	0	71.0	157	157
				5	53.0	72	72
				10	48.5	55	54
				15	66.5	135	130
				20	71.0	158	149
	10	59.8	83.5	0	81.0	210	210
				5	63.0	117	117
				10	58.5	95	94
				15	76.5	187	181
				20	81.0	210	197
	100	189.0	93.5	0	91.0	280	280
				5	73.0	168	167
				10	68.5	145	143
				15	86.5	250	242
				20	91.0	280	263
	1000	598.0	103.5	0	101.0	340	340
				5	83.0	225	224
				10	78.5	200	197
				15	96.5	307	297
				20	101.0	340	320

表-7 つづき

$f$ (kHz)	$P_{SE}$ (W)	$E_S$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)
1000	1.0	14.1	71.0	0	73.6	60	60
				5	63.1	44	44
				10	60.0	40	39
				15	54.1	32	31
				20	58.6	38	36
	10	44.8	81.0	0	83.6	76	76
				5	73.1	60	60
				10	70.0	54	53
				15	64.1	46	44
				20	68.6	52	49
	100	141.0	91.0	0	93.6	92	92
				5	83.1	75	75
				10	80.0	70	69
				15	74.1	61	59
				20	78.6	68	64
	1000	448.0	101.0	0	103.6	109	109
				5	93.1	92	92
				10	90.0	86	85
				15	84.1	77	74
				20	88.6	85	80

は下記の式で求めた斜入射角  $\theta$  による計算上の測深誤差  $\epsilon_0'$  である。

$$\epsilon_0' = \frac{x - 4.5}{4.5} \times 100(\%)$$

$$\text{ただし } x = \frac{4.5 + 1.08}{\cos \theta} - 1.08(\text{m})$$

$$0 \leq \theta < 24.1^\circ$$

この図および表から、海底に斜めに超音波が入射した場合、計算上の測深誤差率  $\epsilon_0'$  のみでなく、送受波器の指向角による誤差も考慮する必要がある。

#### 4. 結 論

以上の実験結果および考察によって明らかになって事項を要約すると次のようになる。

(1) コンクリート底質に超音波を斜入射させた場合、測距並びに測深誤差は振動子の半減指向角  $\gamma_{1/2}$  が大きいほど、また斜入射角  $\theta$  が大きくなるほど大となる。すなわち数値で示せば、 $\gamma_{1/2} = 18^\circ$ 、 $\theta = 15^\circ$  で測距誤差率  $\epsilon$  は +7.2%、測深誤差率  $\epsilon'$  は +12% となり、 $\gamma_{1/2} =$

$1.2^\circ$   $\theta = 15^\circ$  で  $\epsilon$  は +0.2%、 $\epsilon'$  は +4.7% となる。

(2) 送受波器の指向角が小さいほど（特に指向半減角  $\gamma_{1/2} = 1.2^\circ$ ）測深記録と水槽実形との差が小さく、水底形状を比較的忠実に記録することがわかった。このことから送受波器を回転させて、海底地形や構造物の外形を精密に記録するためには、振動子の半減指向角  $\gamma_{1/2}$  が  $1^\circ$  以下のものを使用する必要がある。

(3) 本実験の範囲内では周波数の相違による測深の忠実性の良否判定の実験が出来なかったが、同じ半減指向角の振動子を各周波数ごとに作って実験を行えば、周波数と測深の忠実性の関係が得られるものと考えられる。

(4) 斜入射角  $\theta$  と反射損失の関係では、 $\theta$  が  $0 \sim 20^\circ$  の範囲では、 $\theta$  に比例して反射損失が大となる。

(5) 超音波の水中伝搬や、コンクリート底質表面の斜入射反射損失について、ソナー方程式を適用し、各周波数ごとの総合伝送損失を求めることによって、回転送受波式超音波測深装置の設計に利用することが出来る。

(6) 総合伝送損失の式と水中伝搬に許しうる減衰

と、底質における斜入射反射損失を用いて、各周波数ごとの探知可能深度を求めることができる。

以上、各項の結論から、超音波を斜めに入射して、海底のある幅の深度を測定する装置を開発するには、探知可能深度を考慮し、かつ使用周波数の高い、指向角の鋭い振動子をもった回転式の送受波器を研究開発する必要がある。

また送信出力および受信利得は、測深海域の海況、水質等により、水中雑音電圧が地域によって異なるので、現地試験等を行なって現地データの把握に努め、上記解析方法により、適当な値を決定する必要がある。

## 5. あとがき

本実験は、実験用水槽で行なわれたため、側壁の影響が、半減指向角 $\gamma_{1/2}$ の大きい振動子を用いた場合や、斜入射角 $\theta$ を $20^\circ$ 以上にすると、多少出るようであるが、斜入射角 $\theta$ が $0\sim 20^\circ$ 以内では誤差少なく実験が出来たものと思われる。今後は各周波数共、半減指向角 $\gamma_{1/2}$ が小で、 $\gamma_{1/2}$ の等しい振動子を用い、また底質も砂利、砂、泥等に変えて実験を行ない、適合して振動子をもった測深装置を開発するための研究を行なう必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 第16回港湾機械技術研究会資料, 1969年「測量機器と測量調査用作業船の問題点」各建設局
- 2) 木原純孝:「音響測深機に関する研究——超音波放射と反響記録特性——」港研報告第8巻第1号 pp. 129~132
- 3) 木原純孝:「音響測深機に関する研究——4周波音測機による室内および現地実験について——」港研資料 No. 45, 1968年, pp. 67~124
- 4) 実吉ほか:「超音波技術便覧」日刊工業新聞社, 昭和41年改訂新版, pp. 615~647
- 5) 橋本ほか:「海水中におけるミリメートル波超音波の伝播特性並びに魚群探知実験」漁船研究技報別冊, 1955年, pp. 93~103
- 6) 橋本ほか:「音響測深により求めた海底地形と海底実形との対比について」漁船研究技報別冊, 1955年, pp. 105~112
- 7) J. W. Horton: Fundamentals of SONAR U.S. Naval Institute (1957)
- 8) L. N. Liebermann: The origin of sound absorption in water and sea water J. Acoust Soc. Am. Vol. 20 1948
- 9) M. Schulkkin and H. W. Marsh Absorption of sound in sea water J. Brit. Instn. Radio Engrs. Vol. 25 1963

(1971. 6. 30 受付)

## 記 号 表

$A_f$ :	受信器増幅度
$A_R$ :	受波用振動子の受波面積
$A_S$ :	送波用振動子の放射面積
$c$ :	音の伝搬速度
$D$ :	水深
$d$ :	振動子の直径
$E_S$ :	送信電圧
$E_{R0}$ :	受電端開放電圧
$E_{RC}$ :	受信増幅器入力電圧
$E_2$ :	記録可能限界出力電圧
$f$ :	周波数
$G_{f0}$ :	自由コンダクタンス
$G_S$ :	指向性利得
$I_{s1}$ :	送波指標点における送信波強度
$I_{sz}$ :	水底位置の入射波強度
$I_{Rz}$ :	水底における反射波強度
$I_{RR}$ :	受波面における反射波強度
$L_w$ :	往復の伝搬損失
$L_C$ :	コンクリート底質の音圧反射率
$L_\theta$ :	斜入射音圧反射率
$M$ :	反響余裕度
$M_R$ :	受波器の電圧感度音場校正値
$P_{SE}$ :	送信出力
$P_{sa}$ :	音響出力
$P_{RE}$ :	受信入力
$P_{Ra}$ :	音響入力
$P$ :	音圧
$R$ :	指向性関数
$S_S$ :	送波器の電圧感度
$T_c$ :	総合伝送損失
$V$ :	電圧の単位
$W$ :	電力の単位
$x$ :	距離
$\alpha_w$ :	水の吸収係数
$\alpha_s$ :	海水の吸収係数
$\gamma_{1/2}$ :	半減指向角(半角)
$\eta_{ea}$ :	電気音響変換能率
$\theta$ :	斜入射角
$\lambda$ :	波長
$\epsilon$ :	測距誤差率
$\epsilon'$ :	測深誤差率

附表-1 水中雑音電圧と探知可能距離

 $f=11.5\text{ kHz}$  (その 1)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_S$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
10 <sup>-6</sup>	1	44.7	153.0	0	148.0	420000	420000	10200	10200
				5	146.0	400000	398400	9900	9860
				10	131.0	246000	242310	7700	7585
				15	127.0	210000	202860	7200	6955
	10	141.0	163.0	0	158.0	540000	540000	11600	11600
				5	156.0	520000	517920	11300	11255
				10	141.0	347000	341795	9200	9062
				15	137.0	305000	294630	8600	8308
	100	447.0	173.0	0	168.0	660000	660000	13200	13200
				5	166.0	640000	637440	12800	12749
				10	151.0	460000	453100	10600	10441
				15	147.0	410000	396060	10000	9660
	1000	1410.0	183.0	0	178.0	800000	800000	14800	14800
				5	176.0	770000	766920	14500	14442
				10	161.0	580000	571300	12100	11919
				15	157.0	530000	511980	11400	11012
10 <sup>-5</sup>	1	44.7	133.0	0	128.0	218000	218000	7300	7300
				5	126.0	202000	201192	7000	6972
				10	111.0	90000	88650	5100	5024
				15	107.0	67000	64722	4600	4444
	10	141.0	143.0	0	138.0	314000	314000	8700	8700
				5	136.0	293000	291828	8400	8366
				10	121.0	162000	159570	6400	6304
				15	117.0	128000	123648	5900	5699
	100	447.0	153.0	0	148.0	423000	423000	10200	10200
				5	146.0	400000	398400	9900	9860
				10	131.0	247000	243295	7700	7585
				15	127.0	210000	202860	7200	6955
	1000	1410.0	163.0	0	158.0	540000	540000	11600	11600
				5	156.0	520000	517920	11300	11255
				10	141.0	347000	341795	9200	9062
				15	137.0	303000	292698	8600	8308
10 <sup>-4</sup>	1	44.7	113.0	0	108.0	72000	72000	4700	4700
				5	106.0	61000	60756	4500	4482
				10	91.0	15600	15366	2700	2660
				15	87.0	10500	10143	2300	2222
	10	141.0	123.0	0	118.0	147000	147000	6000	6000
				5	116.0	121512	121512	5800	5777
				10	101.0	39597	39597	3900	3842
				15	97.0	27048	27048	3400	3284



音響測深機に関する研究

$f=11.5\text{ kHz}$  (その 2)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_S$ (V)	$T_e$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
$10^{-4}$	100	447.0	133.0	0	128.0	218000	218000	7300	7300
				5	126.0	202000	201192	7000	6972
				10	111.0	90000	88650	5100	5024
				15	107.0	67000	64722	4600	4444
	1000	1410.0	143.0	0	138.0	370000	370000	8700	8700
				5	136.0	294000	292824	8400	8366
				10	121.0	162000	159570	6400	6304
				15	117.0	129000	124614	5900	5699
$10^{-3}$	1	44.7	93.0	0	88.0	11500	11500	2400	2400
				5	86.0	9300	9263	2200	2191
				10	71.0	1820	1793	950	936
				15	67.0	1150	1111	710	686
	10	141.0	103.0	0	98.0	30800	30800	3500	3500
				5	96.0	25500	25398	3270	3257
				10	81.0	5700	5615	1720	1694
				15	77.0	3600	3478	1380	1333
	100	447.0	113.0	0	108.0	72000	72000	4700	4700
				5	106.0	61000	60756	4500	4482
				10	91.0	15600	15366	2700	2660
				15	87.0	10500	10143	2300	2222
	1000	1410.0	123.0	0	118.0	138000	138000	6000	6000
				5	116.0	122000	121512	5800	5777
				10	101.0	40000	39400	3900	3842
				15	97.0	28000	27048	3400	3284
$10^{-2}$	1	44.7	73.0	0	68.0	1270	1270	760	760
				5	66.0	1030	1026	660	657
				10	51.0	184	181	160	158
				15	47.0	115	111	107	103
	10	141.0	83.0	0	78.0	4000	4000	1470	1470
				5	76.0	3200	3187	1320	1315
				10	61.0	580	571	430	424
				15	57.0	362	350	295	285
	100	447.0	93.0	0	88.0	11600	11600	2400	2400
				5	86.0	9300	9263	2200	2191
				10	71.0	1820	1793	950	936
				15	67.0	1150	1111	710	686
	1000	1410.0	103.0	0	98.0	30800	30800	3500	3500
				5	96.0	25500	25398	3300	3287
				10	81.0	5500	5418	1720	1694
				15	77.0	3600	3478	1400	1352

$f=100$  KHz (その 1)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
10 <sup>-6</sup>	1	13.2	142.4	0	134.0	9400	9400	1540	1540
				5	125.2	7800	7769	1320	1315
				10	116.1	6400	6304	1150	1133
				15	116.0	6400	6182	1150	1111
	10	41.4	152.3	0	143.9	11000	11000	1800	1800
				5	135.1	9600	9562	1560	1554
				10	126.0	8000	7880	1340	1320
				15	125.9	7970	7699	1340	1294
	100	132.0	162.4	0	154.0	12500	12500	2030	2030
				5	145.2	11200	11155	1800	1793
				10	136.1	9700	9555	1600	1576
				15	136.0	9700	9370	1600	1546
	1000	414.0	172.3	0	163.9	14200	14200	2270	2270
				5	155.1	12700	12649	2050	2042
				10	146.0	11200	11032	1830	1803
				15	145.9	11200	10819	1830	1768
10 <sup>-5</sup>	1	13.2	122.4	0	114.0	6100	6100	1120	1120
				5	105.2	4900	4880	970	966
				10	96.1	3600	3546	800	788
				15	96.0	3600	3478	798	771
	10	41.4	132.3	0	124.0	7600	7600	1300	1300
				5	115.2	6300	6275	1140	1135
				10	106.1	5000	4925	980	965
				15	106.0	5000	4830	980	947
	100	132.0	142.4	0	134.0	9400	9400	1520	1520
				5	125.2	7800	7769	1320	1315
				10	116.1	6400	6304	1150	1133
				15	116.0	6400	6182	1150	1111
	1000	414.0	152.3	0	144.0	11000	11000	1770	1770
				5	135.2	9600	9562	1540	1534
				10	126.1	8000	7880	1330	1310
				15	126.0	8000	7728	1330	1285
10 <sup>-4</sup>	1	13.2	100.4	0	94.0	3170	3170	760	760
				5	85.2	2250	2241	600	598
				10	76.1	1340	1320	430	424
				15	76.0	1340	1294	430	415
	10	41.4	112.3	0	104.0	4700	4700	950	950
				5	95.2	3240	3227	780	777
				10	86.1	2350	3215	610	601
				15	86.0	2350	2270	610	589

## 音響測深機に関する研究

 $f=100\text{ KHz}$  (その 2)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
$10^{-4}$	100	132.0	122.4	0	114.0	6100	6100	1120	1120
				5	105.2	4900	4880	970	966
				10	96.1	3600	3546	800	788
				15	96.0	3600	3478	800	773
				0	124.0	7600	7600	1300	1300
	1000	414.0	132.3	5	115.2	6300	6275	1140	1135
				10	106.1	5000	4925	980	965
				15	106.0	5000	4830	980	947
				0	74.0	1170	1170	400	400
				1	13.2	80.4	5	65.2	600
10	56.1	270	266				156	154	
15	56.0	267	258				156	151	
0	84.0	2140	2140				575	575	
10	41.4	92.3	5				75.2	1260	1255
			10	66.1	650	640	277	273	
			15	66.0	640	618	277	268	
			0	94.0	3170	3170	760	760	
			100	132.0	102.4	5	85.2	2250	2241
10	76.1	1340				1320	430	424	
15	76.0	1340				1294	430	415	
0	104.0	4700				4700	950	950	
1000	414.0	112.3				5	95.2	3500	3486
			10	86.1	2350	2315	610	601	
			15	86.0	2350	2270	610	589	
			0	54.0	220	220	136	136	
			1	13.2	60.4	5	45.2	88	88
10	36.1	32				32	29	29	
15	36.0	32				31	29	28	
0	64.0	550				550	250	250	
10	41.4	72.3				5	55.2	245	244
			10	46.1	99	98	73	72	
			15	46.0	98	95	73	71	
			0	74.0	1170	1170	400	400	
			100	132.0	82.4	5	65.2	600	598
10	56.1	270				266	157	155	
15	56.0	270				261	157	152	
0	84.0	2140				2140	580	580	
1000	414.0	92.3				5	75.2	1260	1255
			10	66.1	650	640	280	276	
			15	66.0	640	618	280	270	

$f=200\text{ KHz}$  (その 1)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
10 <sup>-6</sup>	1	10.2	140.2	0	134.1	2800	2800	710	710
				5	129.1	2600	2590	660	657
				10	128.1	2550	2512	650	640
				15	128.6	2600	2512	660	638
	10	32.1	150.2	0	144.1	3200	3200	800	800
				5	139.1	3000	2988	760	757
				10	138.1	2960	2916	740	729
				15	138.6	3000	2898	750	725
	100	102.0	160.2	0	154.1	3700	3700	880	880
				5	149.1	3450	3436	840	837
				10	148.1	3400	3349	840	827
				15	148.6	3420	3304	840	811
	1000	321.0	170.2	0	164.1	4100	4100	990	990
				5	159.1	3900	3884	930	926
				10	158.1	3850	3792	920	906
				15	158.6	3880	3748	930	898
10 <sup>-5</sup>	1	10.2	120.2	0	114.1	2000	2000	535	535
				5	109.1	1800	1793	490	488
				10	108.1	1760	1734	480	473
				15	108.6	1780	1719	490	473
	10	32.1	130.2	0	124.1	2400	2400	620	620
				5	119.1	2220	2211	580	578
				10	118.1	2190	2157	570	561
				15	118.6	2200	2125	576	556
	100	102.0	140.2	0	134.1	2800	2800	710	710
				5	129.1	2600	2590	660	657
				10	128.1	2560	2522	650	640
				15	128.6	2600	2512	660	638
	1000	321.0	150.2	0	144.1	3200	3200	800	800
				5	139.1	3000	2988	760	757
				10	138.1	2920	2916	740	729
				15	138.6	3000	3898	750	725
10 <sup>-4</sup>	1	10.2	100.2	0	94.1	1230	1230	370	370
				5	89.1	1060	1056	330	329
				10	88.1	1030	1015	320	315
				15	88.6	1050	1014	325	314
	10	32.1	110.2	0	104.1	1600	1600	450	450
				5	99.1	1400	1394	410	408
				10	98.1	1360	1340	400	394
				15	98.6	1390	1343	443	389

## 音響測深機に関する研究

 $f=200\text{ KHz}$  (その 2)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
$10^{-4}$	100	102.0	120.2	0	114.1	2000	2000	535	535
				5	109.1	1800	1793	490	488
				10	108.1	1750	1724	480	473
				15	108.6	1770	1710	488	471
	1000	321.0	130.2	0	124.1	2400	2400	620	620
				5	119.1	2220	2211	580	578
				10	118.1	2190	2157	570	561
				15	118.6	2200	2125	572	553
$10^{-3}$	1	10.2	80.2	0	74.1	590	590	215	215
				5	69.1	450	448	180	179
				10	68.1	430	424	172	169
				15	68.6	445	430	176	170
	10	32.1	90.2	0	84.1	900	900	287	287
				5	79.1	750	747	250	249
				10	78.1	710	699	242	238
				15	78.6	730	705	246	238
	100	102.0	100.2	0	94.1	1230	1230	370	370
				5	89.1	1060	1056	330	329
				10	88.1	1030	1015	320	315
				15	88.6	1050	1014	315	304
	1000	321.0	110.2	0	104.1	1600	1600	450	450
				5	99.1	1400	1394	410	408
				10	98.1	1370	1349	400	394
				15	98.6	1380	1333	402	388
$10^{-2}$	1	10.2	60.2	0	54.1	166	166	91	91
				5	49.1	110	110	66	66
				10	48.1	100	99	62	61
				15	48.6	104	100	65	63
	10	32.1	70.2	0	64.1	340	340	147	147
				5	59.1	240	239	117	117
				10	58.1	228	225	112	110
				15	58.6	234	226	115	111
	100	102.0	80.2	0	74.1	590	590	214	214
				5	69.1	455	453	180	179
				10	68.1	430	424	173	170
				15	68.6	440	425	176	170
	1000	321.0	90.2	0	84.1	900	900	287	287
				5	79.1	740	737	250	249
				10	78.1	710	699	243	239
				15	78.6	730	705	247	239

$f=500\text{KHz}$  (その 1)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
$10^{-6}$	1	18.9	145.5	0	143.0	620	620	292	292
				5	125.0	490	488	242	241
				10	120.5	460	453	230	227
				15	138.5	580	560	280	270
	10	59.8	155.5	0	153.0	690	690	320	320
				5	135.0	560	558	270	269
				10	130.5	530	522	260	256
				15	148.5	660	638	310	299
	100	189.0	165.5	0	163.0	770	770	350	350
				5	145.0	630	627	300	299
				10	140.5	600	591	285	281
				15	158.5	730	705	340	328
	1000	598.0	175.5	0	173.0	840	840	380	380
				5	155.0	710	707	320	319
				10	150.5	670	660	310	305
				15	168.5	810	782	370	357
$10^{-5}$	1	18.9	125.5	0	123.0	480	480	240	240
				5	105.0	370	369	176	175
				10	100.5	340	335	162	160
				15	118.5	450	435	226	218
	10	59.8	135.5	0	133.0	540	540	264	264
				5	115.0	430	428	210	209
				10	110.5	400	394	194	191
				15	128.5	510	493	252	243
	100	189.0	145.5	0	143.0	620	620	290	290
				5	125.0	490	488	240	239
				10	120.5	460	453	230	227
				15	138.5	580	560	280	270
	1000	598.0	155.5	0	153.0	690	690	320	320
				5	135.0	560	558	270	269
				10	130.5	530	522	260	256
				15	148.5	660	638	303	293
$10^{-4}$	1	18.9	105.5	0	103.0	360	360	170	170
				5	85.0	240	239	122	122
				10	80.5	210	207	112	110
				15	98.5	330	319	157	152
	10	59.8	115.5	0	113.0	420	420	202	202
				5	95.0	300	299	147	146
				10	90.5	275	271	135	133
				15	108.5	390	377	187	181

音響測深機に関する研究

$f=500$  KHz (その 2)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
$10^{-4}$	100	189.0	125.5	0	123.0	480	480	240	240
				5	105.0	370	369	175	174
				10	100.5	340	335	162	160
				15	118.5	450	435	226	218
	1000	598.0	135.5	0	133.0	540	540	264	264
				5	115.0	430	428	210	209
				10	110.5	400	394	194	191
				15	128.5	510	493	252	243
$10^{-3}$	1	18.9	85.5	0	83.0	224	224	117	117
				5	65.0	126	125	73	73
				10	60.5	104	102	63	62
				15	78.5	198	191	106	102
	10	59.8	95.5	0	93.0	290	290	142	142
				5	75.0	180	179	98	98
				10	70.5	154	152	87	86
				15	88.5	260	251	130	126
	100	189.0	105.5	0	103.0	328	328	170	170
				5	85.0	238	237	122	122
				10	80.5	210	207	112	110
				15	98.5	314	303	156	151
	1000	598.0	115.5	0	113.0	420	420	203	203
				5	95.0	302	301	147	146
				10	90.5	276	272	135	133
				15	108.5	390	377	187	181
$10^{-2}$	1	18.9	65.5	0	63.0	117	117	69	69
				5	45.0	44	44	30	30
				10	40.5	32	32	23	23
				15	58.5	95	92	58	56
	10	59.8	75.5	0	73.0	167	167	93	93
				5	55.0	80	80	50	50
				10	50.5	62	61	40	39
				15	68.5	144	139	82	79
	100	189.0	85.5	0	83.0	224	224	117	117
				5	65.0	127	126	73	73
				10	60.5	104	102	63	62
				15	78.5	197	190	106	102
	1000	598.0	95.5	0	93.0	290	290	142	142
				5	75.0	180	179	98	98
				10	70.5	155	153	87	86
				15	88.5	260	251	130	126

$f=1000\text{ KHz}$  (その 1)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_w$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
$10^{-6}$	1	14.1	143.0	0	145.6	174	174	122	122
				5	135.1	160	159	110	110
				10	132.0	154	152	106	104
				15	126.1	144	139	100	97
	10	44.8	153.0	0	155.6	200	200	132	132
				5	145.1	179	118	120	120
				10	142.0	172	169	117	115
				15	136.1	160	155	110	106
	100	141.0	163.0	0	165.6	220	220	144	144
				5	155.1	197	196	132	131
				10	152.0	191	188	128	126
				15	146.1	180	174	122	118
	1000	448.0	173.0	0	175.6	237	237	156	156
				5	165.1	220	219	143	142
				10	162.0	212	209	140	138
				15	156.1	200	193	133	128
$10^{-5}$	1	14.1	123.0	0	125.6	144	144	99	99
				5	115.1	126	125	88	88
				10	112.0	121	119	84	83
				15	106.1	112	108	78	75
	10	44.8	133.0	0	135.6	160	160	110	110
				5	125.1	143	142	98	98
				10	122.0	137	135	96	95
				15	116.1	127	123	88	85
	100	141.0	143.0	0	145.6	180	180	122	122
				5	135.1	160	159	110	110
				10	132.0	154	152	106	104
				15	126.1	145	140	99	96
	1000	448.0	153.0	0	155.6	200	200	133	133
				5	145.1	180	179	121	121
				10	142.0	173	170	118	116
				15	136.1	160	155	111	107
$10^{-4}$	1	14.1	103.0	0	105.6	112	112	77	77
				5	95.1	95	95	66	66
				10	92.0	90	89	63	62
				15	86.1	80	77	56	54
	10	44.8	113.0	0	115.6	127	127	88	88
				5	105.1	111	111	76	76
				10	102.0	106	104	74	73
				15	96.1	96	93	67	65



音響測深機に関する研究

$f=1000$  KHz (その 2)

$E_{RO}$ (V)	$P_{SE}$ (W)	$E_s$ (V)	$T_c$ (dB)	$\theta$ (°)	$L_{\theta}$ (dB)	$x$ (m)	$D$ (m)	$x_s$ (m)	$D_s$ (m)
$10^{-4}$	100	141.0	123.0	0	125.6	143	143	99	99
				5	115.1	126	125	87	87
				10	112.0	121	119	84	83
				15	106.1	112	108	77	74
	1000	448.0	133.0	0	135.6	160	160	110	110
				5	125.1	143	142	98	98
				10	122.0	137	135	96	95
				15	116.1	127	123	88	85
$10^{-3}$	1	14.1	83.0	0	85.6	80	80	56	56
				5	75.1	63	63	45	45
				10	12.0	58	57	42	41
				15	66.1	48	46	36	35
	10	44.8	93.0	0	95.6	96	96	66	66
				5	85.1	79	79	55	55
				10	82.0	74	73	52	51
				15	76.1	64	62	46	44
	100	141.0	103.0	0	105.6	112	112	77	77
				5	95.1	95	95	66	66
				10	92.0	90	89	63	62
				15	86.1	80	77	56	54
	1000	448.0	113.0	0	115.6	127	127	88	88
				5	105.1	111	111	76	76
				10	102.0	106	104	73	72
				15	96.1	96	93	67	65
$10^{-2}$	1	14.1	63.0	0	65.6	48	48	36	36
				5	55.1	33	33	26	26
				10	52.0	30	30	24	24
				15	46.1	23	22	19	18
	10	44.8	73.0	0	75.6	64	64	46	46
				5	65.1	47	47	35	35
				10	62.0	43	42	33	33
				15	56.1	35	34	27	26
	100	141.0	83.0	0	85.6	80	80	56	56
				5	75.1	63	63	45	45
				10	72.0	58	57	42	41
				15	66.1	49	47	36	35
	1000	448.0	93.0	0	95.6	96	96	67	67
				5	85.1	79	79	55	55
				10	82.0	74	73	52	51
				15	76.1	64	62	46	44