

2/15

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

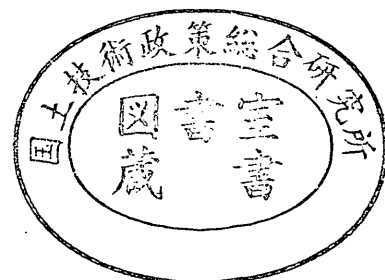
---

VOL. 8

NO. 1

MAR. 1969

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。ただし第1巻から第6巻および欧文編第1号から第15号までは下記のとおり不定期に刊行された。  
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。

和文篇 (Japanese Edition)

- Vol. 1. No. 1 (1963)
- Vol. 2. Nos. 1~3 (1963~1964)
- Vol. 3. Nos. 1~7 (1964)
- Vol. 4. Nos. 1~11 (1965)
- Vol. 5. Nos. 1~15 (1966)
- Vol. 6. Nos. 1~8 (1967)

欧文篇 (English Edition)

- Report Nos. 1~15 (1963~1967)

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 report prior to the seventh volume were published in two series in Japanese and English as listed above.

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8巻 第1号 (Vol. 8, No. 1), 1969年3月 (March 1969)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Measurement of Wind Velocity Fluctuations over Waves in a  
Wind-Wave Tunnel .....Hajime KATO and Kikuo SANO..... 3  
(風洞水路における波の上の風速変動の性質について.....加藤 始・佐野喜久雄)
2. 沖積粘土層におけるサウンディング (数種の方法による試験結果について)  
..... 柳瀬重靖..... 37  
(Soundings in the Alluvial Clay Stratum (On the results of several methods)  
..... Shigeyasu YANASE)
3. 粘土試料の攪乱に関する研究 (第1報)  
——繰り返し三軸圧縮試験による攪乱実験—— .....奥村樹郎..... 59  
(Studies on the Disturbance of Clay Samples (1st Report)——Remolding Tests  
by the Repeated Triaxial Compression—— .....Tatsuro OKUMURA)
4. 飽和砂層の振動性状 .....荒井秀夫・梅原靖文..... 85  
(Vibration of Saturated Sand Layers .....Hideo ARAI and Yasuhumi UMEHARA)
5. 音響測深機に関する研究 .....木原純孝.....123  
(Study on Echo-Sounder.....Sumitaka KIHARA)
6. 砂, 砂利混合時の浚渫ポンプの特性  
..... 八木得次・宮崎昭児・奥出 律.....165  
(Characteristic of the Dredging Pump in Case of Mixed with Sand and Gravel  
..... Tokuji YAGI, Shoji MIYAZAKI and Tadasu OKUDE)

## 5. 音響測深機に関する研究

——超音波放射と反響記録特性——

木原純孝\*

### 要 旨

海底地形を能率的に把握する超音波測深機を開発するには、周波数に応じて海底からの超音波の反射・伝搬特性がどのように変化し、かつ測深精度に如何なる影響をおよぼすかを究明する必要がある。このようなことから、7周波方式の超音波探査機を試作し、音響特性を求めるための室内実験を行なった。

実験結果および解析から、送受波用振動子の電気音響変換能率や音響的諸定数が求められた。

一方、受信出力電圧  $E_2$  と反響余裕値 (マージン)  $M$  との間に次のような実験式が得られた。

$$M = 6.318 \times 10^{-4} E_2^{1.917}$$

この実験式によって、記録可能限界出力電圧が約 40~50  $V_p$  の間にあることがわかった。

以上の実験から音響出力および受信出力電圧が得られ、またこの結果を利用することによって各周波数毎の超音波の水中における反射・伝搬特性を定量的に求めることが出来よう。

\* 機材部 流体輸送研究室

**Study on Echo-Sounder**  
—Ultrasonic Radiation and Echo-Recording Characteristic—

Sumitaka KIHARA\*

**Synopsis**

For the development of echo-sounder which ascertain the relief of the sea-bottom efficiently, it is necessary for us to study into the effect of ultrasonic reflection and propagation characteristics.

So we experimented in the laboratory on the acoustic characteristic of the ultrasonic echo-sounder.

Through the analysis of this experimental results, we took electro-acoustic transformed efficiency of the transducers ( $\eta_{ea}$ ).

The other side, margin ( $M$ ) was expressed as follow:

$$M = 6.318 \times 10^{-4} E_2^{1.917}$$

where  $E_2$ : out put voltage at recorder

From this empirical formula, it was understood that recordable limit out put voltage was about from 40 to 50 voltages.

By use of these results, we can take quantitatively reflection and propagation characteristic in water each frequencis ultrasonic waves.

---

\* Member of Fluid Transportation Laboratory, Machinery Division

## 目 次

要 旨	123
1. ま え が き	127
2. 超音波放射の一般的考察	127
2.1. 電気音響変換器の能率	127
2.2. 振動面の音波放射	128
3. 実 験 装 置	129
3.1. 超音波探査機	129
3.2. 測深測定実験装置および計測機器	132
4. 実 験 概 要	133
4.1. 振動子諸定数算定のための実験	133
4.2. 送信出力特性と超音波放射に関する実験	135
4.3. 反響記録特性に関する実験	137
5. 実験結果および考察	141
5.1. 振動子の周波数アドミタンス特性	141
5.2. 音波放射の理論的検討	144
5.3. 送信出力特性と超音波放射	153
5.4. 記録器の反響記録特性	156
6. 結 論	159
参 考 文 献	162
記 号 表	163

## 1. ま え が き

超音波は普通われわれの耳に聞こえる音波と同様に、媒質中の弾性波であり、気体はもちろんのこと、光のような電磁波に対していちじるしく不透明である液体、固体などの媒質の中において伝搬することの出来るエネルギーの一形態である。したがって気体や液体では縦波であるが、固体中では縦波のほかに横波も存在する。このような性質をもった超音波は、最近の科学技術、特に超音波技術とエレクトロニクスの長足の進歩によっていろいろな方面に応用されている。超音波応用を大別すると通信的応用と動力的応用に分けられる。通信的応用は通信を広義に解して、超音波という波動を利用してなんらかの情報を獲得する応用である。たとえば測深機などのソナー、水中作業員との連絡のための水中通信を初め、金属探傷、厚さ、流量の測定その他の工業計測等がある。

動力的応用は、超音波の形となった動力を利用して物体または物質になんらかの変化を与える応用である。二三例を挙げれば、超音波加工、超音波洗浄、超音波集塵等がある。

港湾に係する応用例としては今のところ通信的応用に限られているが、音響測深機を始めとする水中応用計測機器や、水中土木工事における水中作業員と水上作業員との連絡手段としての水中通信機器が考えられる。

今回、超音波実験装置として試作した7周波方式の超音波探査機<sup>1)</sup>は、超音波の通信的応用の中で主として音響測深機を始めとする水中超音波応用計測の分野の実験的研究に使用するため製作したものである。その特徴を列記すると、周波数を11.5, 24, 40, 100, 200, 500 KHz, 1MHzの7段階に切換えて使用することができ、発振出力も零から最大値まで連続的に切換えて超音波パルスを発振させることが可能である。また実験水槽を使用して実験を行なうことを考慮して低周波域において超音波の指向性を鋭くするため反射笠を送受波用振動子に付けて指向半減角を約6度以下になるよう製作した。

本報告は、試作した超音波探査機の概要、本試作機の理論的および実験的諸特性、特に今後室内実験を進める上に必要な超音波放射の定量的測定や反響記録特性解析のための送受波用振動子の音響的諸定数や電気音響変換効率等基礎的定数の算定および反響信号を記録紙に記録するのに必要な最低印加電圧、いわゆる記録可能限界出力電圧等を調べた実験について述べたものである。

## 2. 超音波放射の一般的考察

### 2.1. 電気音響変換器の能率

振動子の等価回路は図-1のように直列共振回路に  $C_a$  が並列に入った回路で与えられ<sup>2,3)</sup>、その共振点付近におけるアドミッタンスの周波数に対する軌跡は、複素平面上で一つの円を描く。いま振動子の共振角周波数を  $\omega_R$ 、反共振角周波数を  $\omega_A$ 、動アドミッタンス (アドミッタンスの直径) を  $\dot{Y}_{m0}$ 、制動アドミッタンスを  $\dot{Y}_a$ 、象限周波数の差を  $\Delta f$  とすると、これらと等価回路定数  $L_1, C_1, R_1, C_a$  などとの間につきの関係がある<sup>2,5)</sup>。

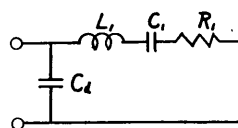


図-1 振動子の等価回路

$$\left. \begin{aligned} \omega_R^2 &= \frac{1}{L_1 C_1}, & \omega_A^2 &= \frac{1}{L_1 \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_a} \right)} \\ \dot{Y}_{m0} &= \frac{1}{R_1}, & \dot{Y}_a &= \omega_R C_a \\ \pi \Delta f &= \frac{R_1}{2L_1} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

またこれらの回路定数と音響的諸定数  $m, s, r$  などとの間に

$$L_1 = \frac{m}{A^2}, \quad \frac{1}{C_1} = \frac{S}{A^2}, \quad R_1 = \frac{r}{A^2} \quad \dots (2)$$

なる関係が存在する。ここに  $m$  は等価質量 (g),  $s$  は等価スティフネス (dyne/cm),  $r$  は機械抵抗 (dyne/kine) で、 $A$  は力係数 (e.s.u.) である。

振動子の共振時において、その音響端子から出る音響出力  $P_a$  は印加電圧を  $E_s$  とし、等価放射抵抗を  $r_a$  とすると次式で与えられる。

$$P_a = \frac{r_a}{r_a + r_1} |\dot{Y}_{m0}| E_s^2 \quad \dots (3)$$

ここに  $r_1$  は放射抵抗が零である状態で測定した等価抵抗で、この場合の動アドミッタンスを  $\dot{Y}_{m00}$  として

$$|\dot{Y}_{m00}| = \frac{A^2}{r_1} \quad \dots (4)$$

および

$$|\dot{Y}_{m0}| = \frac{A^2}{r_a + r_1} \quad \dots (5)$$

が成立つ。

いま振動子の共振周波数における自由アドミッタンス

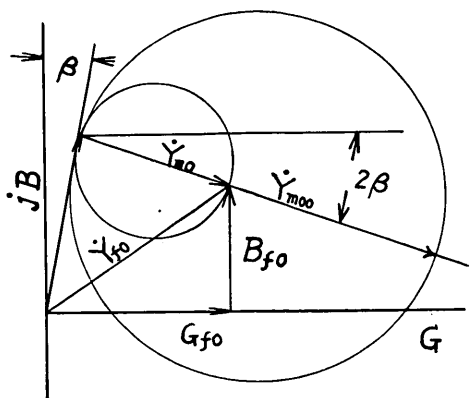


図-2 自由アドミッタンス軌跡

を  $\dot{Y}_{fo}$  とすれば 図-2 より

$$\dot{Y}_{fo} = G_{fo} + jB_{fo} \quad \dots\dots(6)$$

ただし

$G_{fo}$ : 自由コンダクタンス

$B_{fo}$ : 自由サセプタンス

が成立ち、電気端子より入る電気的入力  $P_{SE}$  は

$$P_{SE} = G_{fo} \cdot E_s^2 \quad \dots\dots(7)$$

で表わされるから、音響出力  $P_a$  との比、すなわち電気音響変換率  $\eta_{ea}$  は

$$\eta_{ea} = \frac{P_a}{P_{SE}} = \frac{|\dot{Y}_{mo}|}{G_{fo}} \cdot \frac{r_a}{r_a + r_1} \quad \dots\dots(8)$$

で表わされる。この式において  $|\dot{Y}_{mo}|/G_{fo}$  は機械的振動の全エネルギーの電気的入力に対する比を表わすもので、電気機械変換率 ( $\eta_{em}$ ) とよばれる。また  $r_a/(r_a + r_1)$  は音響出力の機械的エネルギーに対する比で、機械音響変換率 ( $\eta_{ma}$ ) とよばれる。なお  $G_{fo}$  に対し

$$G_{fo} = \dot{Y}_a \cdot \sin \beta + \dot{Y}_{mo} \cdot \cos 2\beta \quad \dots\dots(9)$$

が成立ち、また式 (4)、(5) より

$$\eta_{ma} = \frac{r_a}{r_a + r_1} = \frac{\dot{Y}_{moo} - \dot{Y}_{mo}}{\dot{Y}_{moo}} \quad \dots\dots(10)$$

が成立つから、これらを式 (8) に代入して

$$\eta_{ea} = \eta_{em} \times \eta_{ma} = \frac{\dot{Y}_{mo}}{\dot{Y}_a \sin \beta + \dot{Y}_{mo} \cos 2\beta} \cdot \frac{\dot{Y}_{moo} - \dot{Y}_{mo}}{\dot{Y}_{moo}} \quad \dots\dots(11)$$

が得られる。

## 2.2. 振動面の音波放射

### (1) ピストン振動面の音波放射

円板状振動子のような音源は振動板を振動させて音波を放射する。実際の円板状振動子の放射の理論の導出は困難であるので 図-3 のように無限大鋼壁に振動板がはま

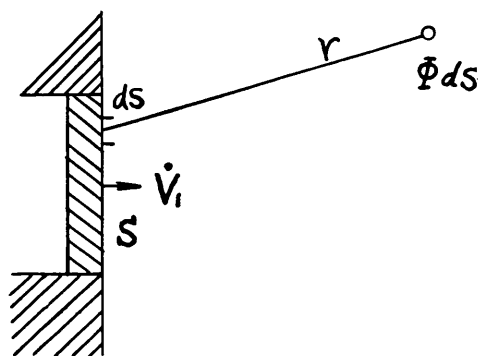


図-3 音波の放射

っていて、振動板はピストンのように全面が同速度、同位相で振動するものと理想化して考察する。

振動板の面積を  $S$ 、速度を  $V_1$  とすると、円形ピストン振動面の音波放射による音場 (速度ポテンシャル  $\dot{\phi}$ ) は、次の式によって表わすことができる<sup>2,3)</sup>。

$$\dot{\phi}_{as} = \frac{\dot{V}_1}{2\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} dS \quad \dots\dots(12)$$

$$\dot{\phi} = \frac{\dot{V}_1}{2\pi} \iint \frac{e^{-jkr}}{r} dS \quad \dots\dots(13)$$

ここで、 $r$  は振動面上の  $dS$  から問題とする点までの距離で、 $k$  は波長定数 ( $k=2\pi/\lambda$ ) である。

#### a) 中心軸上の遠距離の音場

中心からの距離  $r$  が振動板寸法より十分大きければ、面上のどの点からの距離も中心からの距離にほとんど等しく、その距離差による位相差は無視できるので式 (13) は簡単に計算されて

$$\dot{\phi} = \frac{\dot{V}_1}{2\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} S \quad \dots\dots(14)$$

$$\dot{P} = j\omega\rho\dot{\phi}, \quad |\dot{P}| = \frac{f\rho S}{r} |\dot{V}_1| \quad \dots\dots(15)$$

すなわち音圧の絶対値は、周波数・面積・速度に比例し、距離に反比例する。

#### b) 中心軸上の近距離の音場

図-4 のように距離が近くなると、振動面上の  $dS$  の位置による距離差がかえって大きくなって、それによる位相差は振動面寸法が波長に比して十分小さくない限り無視できなくなる。式 (13) の積分を行なうのに、この場合は振動面は半径  $a$  の円形とし、半径方向の座標を  $y$  とする。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad dS = 2\pi y dy$$

を入れて  $y=0$  から  $y=a$  まで積分すれば



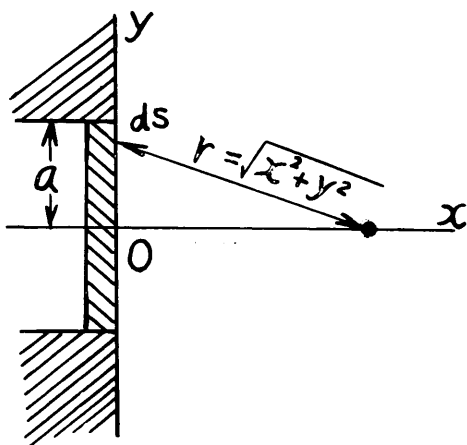


図-4 近距離の音場

$$\dot{\phi} = j \frac{\dot{V}_1}{k} (e^{-jk\sqrt{x^2+a^2}} - e^{-jkx}) \quad \dots\dots(16)$$

$$\therefore p = -\frac{\omega\rho\dot{V}_1}{k} [\cos(k\sqrt{x^2+a^2}) - \cos kx] - j[\sin(k\sqrt{x^2+a^2}) - \sin kx] \quad \dots\dots(17)$$

これを三角関数の公式で整理してから絶対値を求めると

$$|\dot{P}| = \rho c |\dot{V}_1| \cdot \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2+a^2} - x) \right| \quad \dots(18)$$

ただし、 $c$  は音速 (cm/s) である。式 (18) により、 $\sqrt{x^2+a^2} - x$  すなわち中心からの距離と周辺からの距離の差が波長の整数倍になる位置では音圧は 0 となる。また距離がいかに近くなっても音圧は無限大になることはなく、 $\rho c \dot{V}_1$  の 2 倍以下である。

距離が大きくなれば式 (18) において、

$$\begin{aligned} \sin \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2+a^2} - x) &\doteq \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2+a^2} - x) \\ &\doteq \frac{\pi x}{\lambda} \left( 1 + \frac{a^2}{2x^2} - 1 \right) = \frac{\pi a^2}{2\lambda x} \quad \dots\dots(19) \end{aligned}$$

$$\therefore |\dot{P}| = \rho c |\dot{V}_1| \left| \frac{\pi a^2}{\lambda x} \right| = f \rho s |\dot{V}_1| / x \quad \dots(20)$$

これは遠距離音場の式 (15) と同じである。すなわち式 (18) は遠距離では音圧が距離に反比例する式となる。

(2) 遠距離音場の指向性

水中に放射された超音波は、遠距離でも方向が中心軸からはずれると式 (13) の積分において位相差が大きくなって積分された速度ポテンシャルは中心軸方向より小さくなる。これが指向性を生ずる理由である。

a) 円形ピストンの指向性<sup>4)</sup>

中心軸から  $\gamma$  の方向で中心からの距離が  $r_0$  である  $P$  点の速度ポテンシャルを求める。図-5 のように、座標

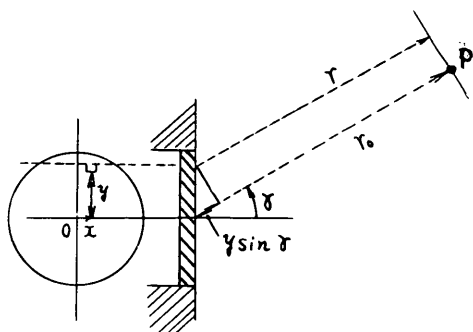


図-5 円形ピストンの指向性

は振動面中心を原点とし、中心軸と  $P$  点とを含む平面と振動面との交線を  $y$  軸、その平面の法線方向を  $x$  軸とし、式 (13) を積分する。結果だけを示せば

$$R = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \quad \dots\dots(21)$$

ただし  $R$  は指向性関数

$$Z = ka \sin \gamma = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma = \frac{\pi d f}{c} \sin \gamma \quad \dots\dots(22)$$

$J_1(Z)$  はベッセル関数、 $d$  は振動面の直径である。

3. 実験装置

3.1. 超音波探査機<sup>1)</sup>

(1) 試作超音波探査機の構成と性能概要

図-6 は試作超音波探査機の外形系統図である。

a) 送受信器

送受信器は送信信号を作る発振部、反響信号を増幅する受信増幅部が収めてある。発振器は電気振動を発生させてこれを送波器 (送波用振動子) に送り、超音波を発生するためのものである。電気振動を作るのに本試作機では真空管発振器で発生する方法を用いた。発振回数は 10 m レンジで毎分 1500 回、100 m レンジで毎分 150 回である。

発振回路は、真空管 12BH7A を 2 本、6BQ6-GTB が 1 本、2T12P (送信管) を 1 本用いて、11.5, 24, 40, 100, 200, 500 KHz, 1 MHz の 7 種の周波数にそれぞれ切換えて使用出来るよう 7 種の LC 回路を設けている。

受信増幅回路はヘテロダイン増幅回路方式を用いており、11.5 KHz では 51.5 KHz の第一局部発振器と、240 KHz の第二局部発振器により、24 KHz は 64 KHz と 240 KHz の局部発振器で、40 KHz は 240 KHz, 100 KHz は 300 KHz, 200 KHz では 400 KHz, 500 KHz では 700 KHz, 1 MHz では 800 KHz の局部発振器を用いて、

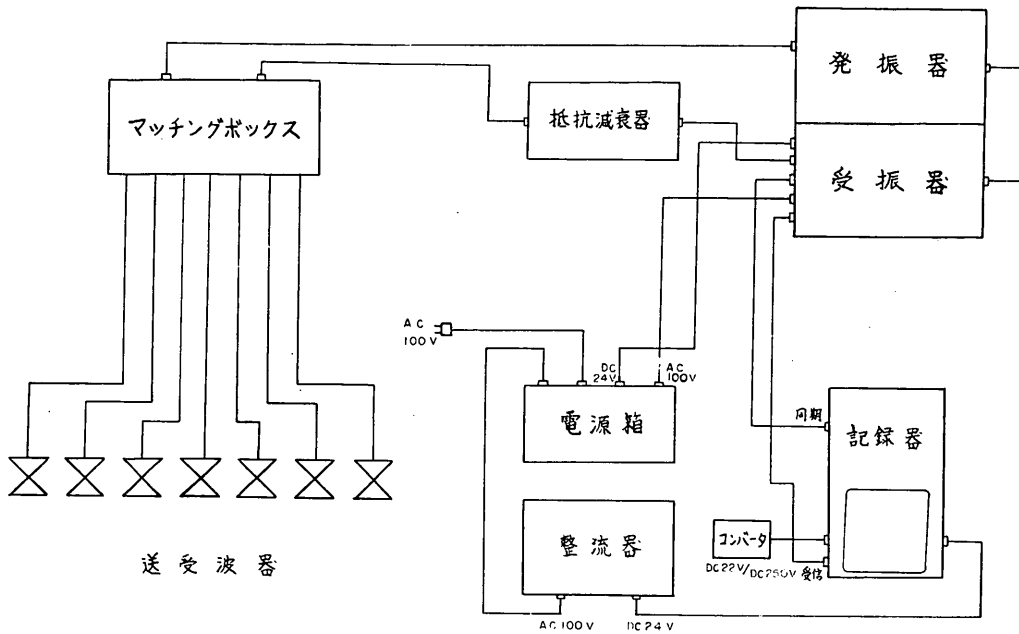


図-6 超音波探査機外形系統図

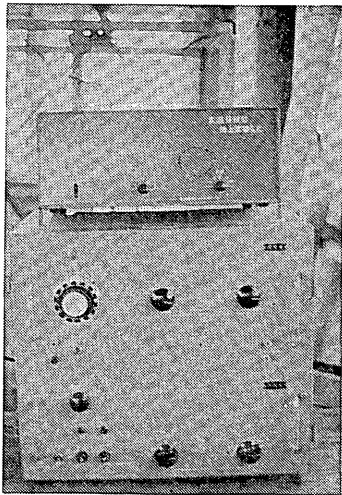


写真-1 送受信器

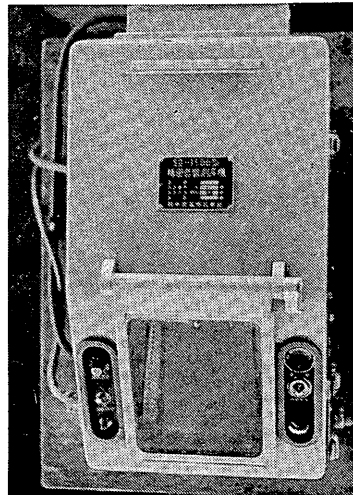


写真-2 記録器

それぞれ 200 KHz に変換して記録器に送出している。

写真-1 にその外観を示す。

b) 記録器

記録器は湾曲直線記録方式を用いている SD-1500 型精密音響測深機を改造して使用した。写真-2 にその外観を示す。

c) 電源箱

インバータを使用して電池等の直流電源から交流 100 V 50 Hz を得る方法と、直接、交流 100 V 電源より得る方法を併用した、いわゆる交直両用方式とした。写真-3 にその外観を示す。

d) 送受信器

11.5, 24, 40 KHz の送受信器は、振動子に環状チタン酸バリウムを使用して、軽合金製の反射笠を付してい

音響測深機に関する研究

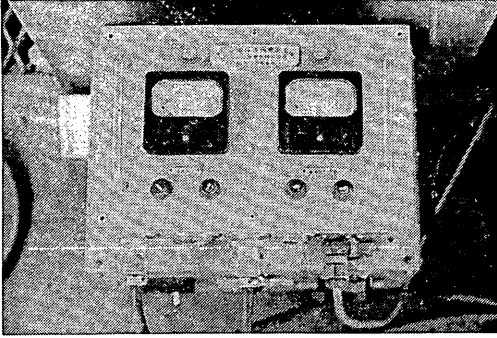


写真-3 電源箱

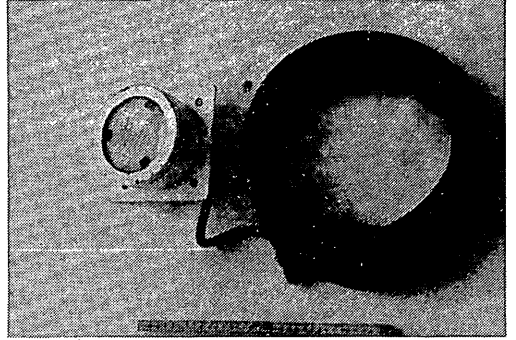


写真-7 100 KHz 送受波器

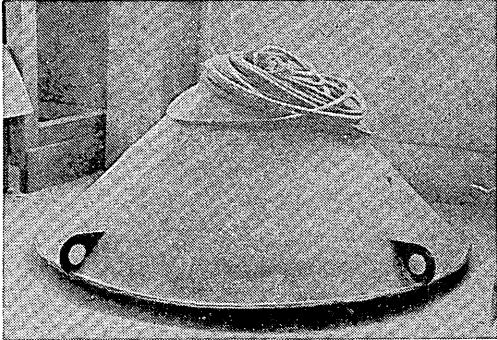


写真-4 11.5 KHz 送受波器

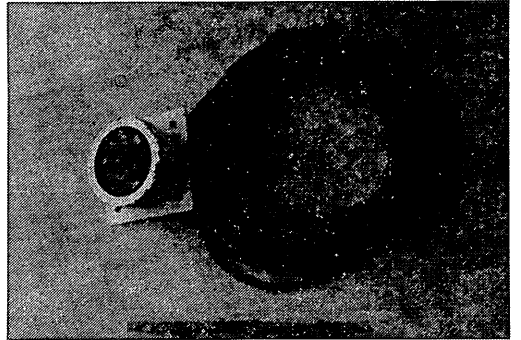


写真-8 200 KHz 送受波器



写真-5 24 KHz 送受波器

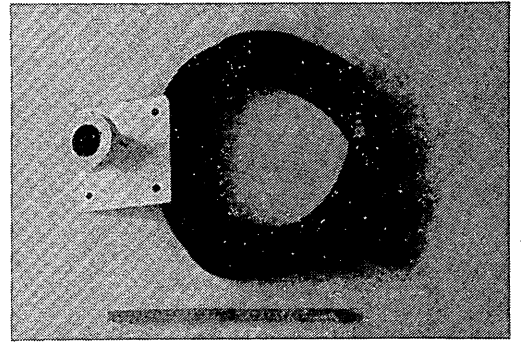


写真-9 500 KHz 送受波器



写真-6 40 KHz 送受波器

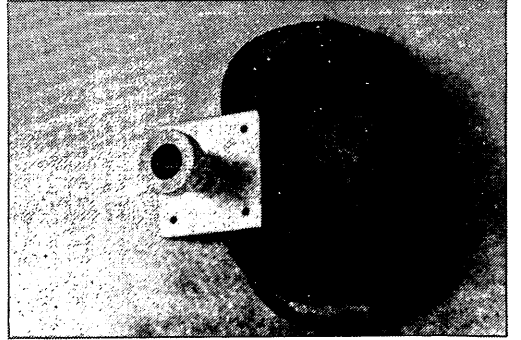


写真-10 1 MHz 送受波器

る。写真-4, 5, 6 にその外観を示す。また 100, 200KHz 送受波器の振動子には、ランジュバン型振動子を使用し、500 KHz, 1MHz の振動子はチタン酸バリウムの円板振動子を使用した。写真-7, 8, 9, 10 にその外観を示す。

(2) 超音波探査機主要目

- a) 電 源 直流 24 V $\pm$ 5% 約 13.7 A
- b) 測 深 範 囲 第1目盛 0—10m 多重記録  
第2目盛 0—100m "
- c) 深度記録縮尺度 13mm/m
- d) 測 深 精 度 0.3m~50m の間において  
 $\pm 3\text{cm} \pm \frac{\text{深度}}{1000}$
- e) 記 録 紙 乾式放電破壊記録紙(無地, 送り孔付)幅 150mm 長さ 10m
- f) 記録紙繰出し速度 60mm/min $\pm$ 5%
- g) 深度マーク 第1目盛範囲において1mごとに自記  
第2目盛範囲において2mごとに自記
- h) 送信回数 第1目盛範囲において 1500回/min  
第2目盛範囲において 150回/min
- i) 送信方式 真空管送信方式
- j) 送信周波数 11.5, 24, 40, 100, 200, 500 KHz  
1MHz 7段切換
- k) 送信出力 最大 1.1kW<sub>(p-p)</sub> (100 $\Omega$  抵抗負荷) 零から最大値まで連続可変
- l) 受信方式 スーパーヘテロダイン方式

- m) 出力周波数 50 KHz $\pm$ 10%
- n) 受信部増幅度 150 dB 以上
- o) 送受波器共振角(半減角) 1 $^{\circ}$ ~6 $^{\circ}$

3.2. 測深測定実験装置および計測機器

測定用水槽は、高さ 10.5 m, 内径 2.4 m, 内壁に吸音用の松のくさびを取付けた直立円筒形鋼板製で媒質に清水(水道水)を使用した。

計測器は、振動子のインピーダンスを測定するためのインピーダンスブリッジ(写真-11)、発振器(写真-12) Qメータ(写真-13)、周波数監視用のエレクトロニック

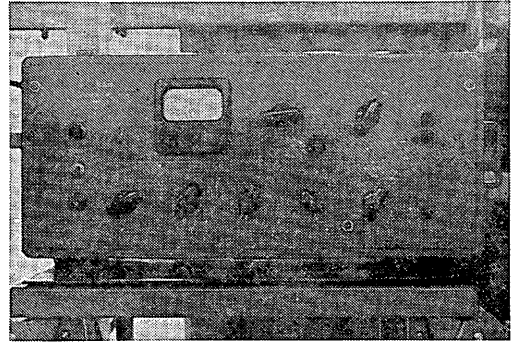


写真-12 発 振 器

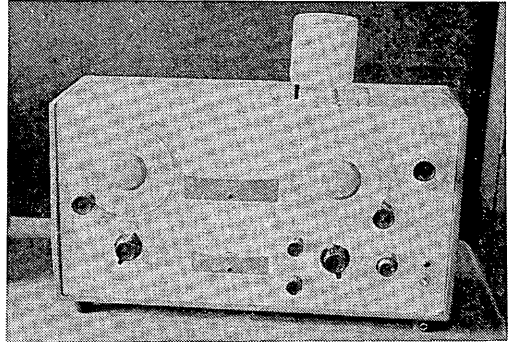


写真-13 Qメータ

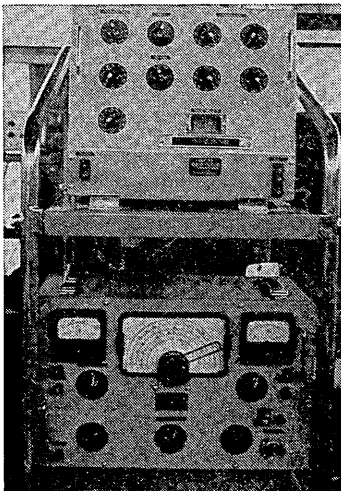


写真-11 インピーダンスブリッジ

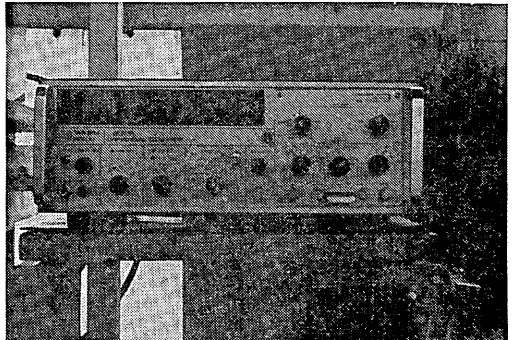


写真-14 エレクトロニックカウンタ

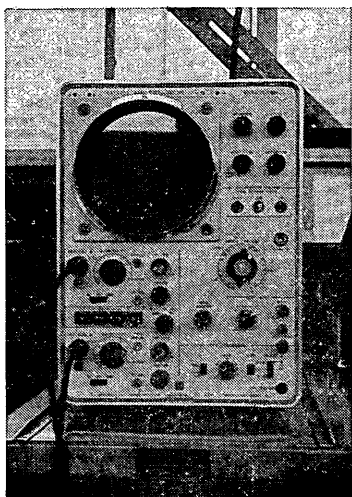


写真-15 シンクロスコープ

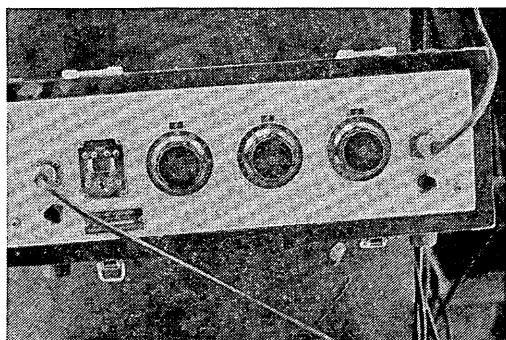


写真-16 抵抗減衰器

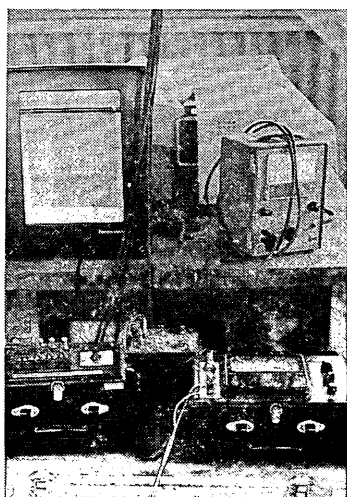


写真-17 サーミスタ温度計

表-1 インピーダンスブリッジの仕様

項目	インピーダンス	
	絶対値	位相角
測定範囲	0~1000Ω	0~±90°
最小目盛	0.1Ω	0.5°
最大誤差	2%+1Ω	2°
使用周波数範囲	10 KHz~552 KHz (実用上は 1 KHz~1 MHz)	
周波数ダイヤル	3	桁
許容最大入力レベル	+25 dB	

カウンター (写真-14), 波形観測用のシンクロスコープ (写真-15), マージン測定用の抵抗減衰器 (写真-16) がある。写真-17 にサーミスタ温度計を示した。

インピーダンスブリッジは測定範囲が周波数で 1 KHz から 1 MHz まで, インピーダンスは絶対値で 0~1000Ω 位相角で 0~±90° であってその他の仕様は表-1 に示す。

発振器は, 発生周波数が 0.2~500 KHz, 出力インピーダンス 75Ω と 600Ω (各平衡型), 出力レベル -10~+26 dB, 周波数微細調整可能なデケード型 CR 発振器であって, インピーダンスブリッジ用電源として使用した。

Qメータは上記発振器で測れない 1 MHz 振動子のインピーダンス測定用として使用した。その使用周波数は 0.5 KHz~50 MHz, Q測定範囲が 5~600 のものである。

発振器の発生周波数監視用としてのエレクトロニックカウンターは万能型計数装置で, 本体のみで周波数測定 (10 Hz~62 MHz) 周期測定 (1 μs~10<sup>3</sup>s) 等の出来る測定器である。

波形観測用のシンクロスコープは感度が 50 mV/cm~20 V/cm, 周波数特性は DC~5 MHz である。

マージン測定用の抵抗減衰器は入出力共 75Ω の一定インピーダンスの不平衡型可変抵抗減衰器で, 最小減衰量 0dB より 0.1dB 段階で, 最大減衰量 91dB まで変えることができ, 最高周波数 5 MHz まで使用することができる。

#### 4. 実験概要

##### 4.1. 振動子諸定数算定のための実験

###### (1) 供試振動子

表-2 振動子の諸特性

周波数 (KHz)	振動子材質	寸法 (mm)	半減指向角 (度)	備考
11.5	チタン酸バリウム	880φ	6.0	環状振動子反射笠付
24	" "	420φ	6.1	" "
40	" "	250φ	6.1	" "
100	" "	100φ	6.1	ランジュバン型
200	" "	100φ	3.1	"
500	" "	50φ	2.4	円板型
1000	" "	50φ	1.2	"

\* 11.5, 24, 40 KHz の寸法は反射笠開口面の直径を示す。

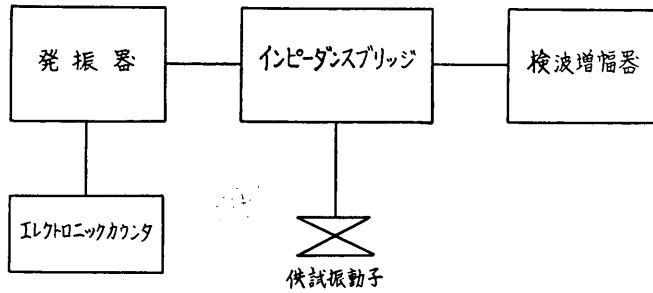


図-7 振動子自由アドミタンス測定系統図

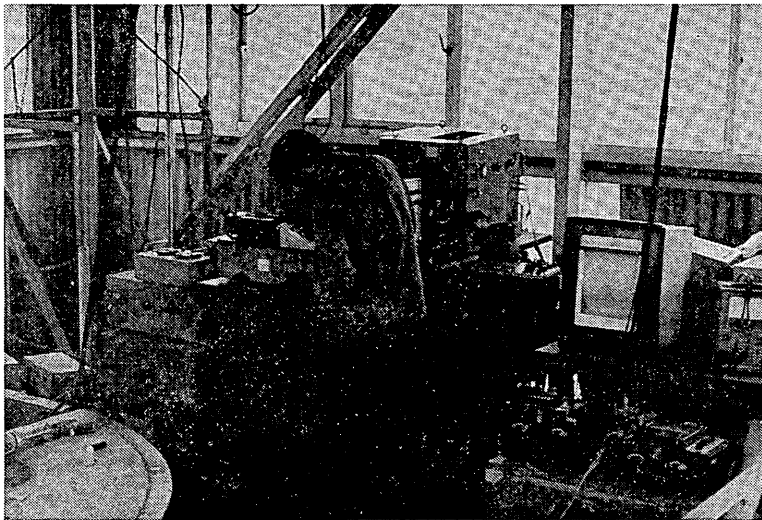


写真-18 測定状況

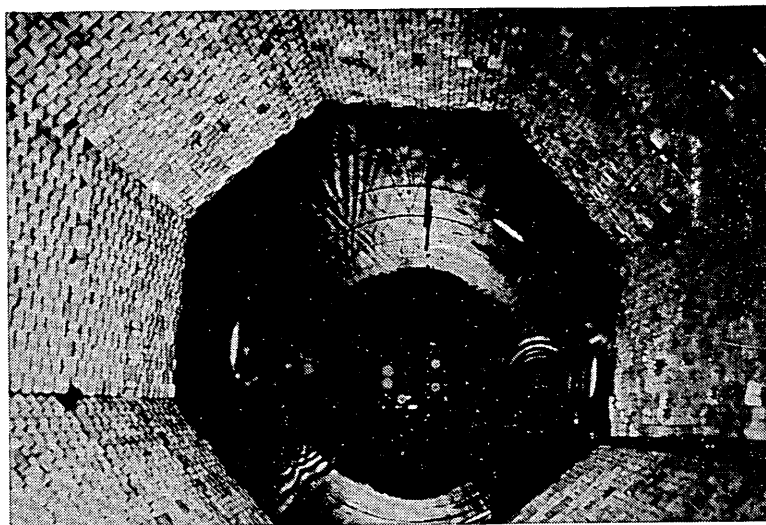


写真-19 水槽内部

実験に使用した振動子は7種類であって、これらの特性を表-2に示した。また写真-4~10にその外観を示す。

(2) 実験方法

図-7に示すように、供試振動子をインピーダンスブリッジの測定端子に接続し、まず振動子を空気中において、発振器の発生周波数を振動子の共振周波数を中心として徐々に変化させたときの、各周波数ごとのインピーダンスの絶対値および位相角を測定した。次に、振動子を実験水槽の水中に沈下せしめ、上記と同様な方法でインピーダンスを測定した。同時に気温、水温、湿度の測定を行なった。

上記実験を振動子を変えてくり返し行なった。

なお、1MHz用振動子は1MHzの周波数を発生させる発振器がないのでQメータを使って振動子の容量を測定してインピーダンスを算出した。

4.2. 送信出力特性と超音波放射に関する実験

図-8に示すように発振器出力端子に100Ω抵抗を接

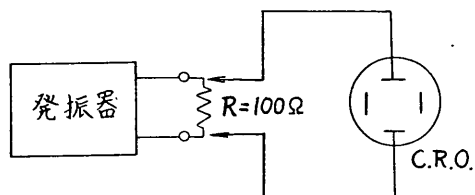


図-8 送信出力の測定

続し、発振器を作動させて、抵抗の端子電圧をシンクロスコープにて測定しかつ波形を接写装置で撮影した。その結果を写真-20に示す。表-3には発振パルスの諸特性を、図-9に送信管陽極電圧( $E_p$ )と送信電圧( $E_s$ )の関係を周波数をパラメータとして描いたものである。

次に、発振器出力端子に送受波器を接続し、図-10に示すように測深測定実験水槽に送受波器を設置し、発振器を作動させて送受波器端子電圧をシンクロスコープにて測定した。その結果を図-11に送信管陽極電圧と送信電圧の関係曲線で示した。

表-3 発振パルスの諸特性

項目 \ 周波数(KHz)	11.5	24	40	100	200	500	1000
パルス幅(msec)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
最大パルス電圧( $V_{p-p}$ )	260	270	310	330	310	200	160
負荷抵抗( $\Omega$ )	100	100	100	100	100	100	100
最大パルス電力( $W_{p-p}$ )	676	730	960	1090	960	400	250

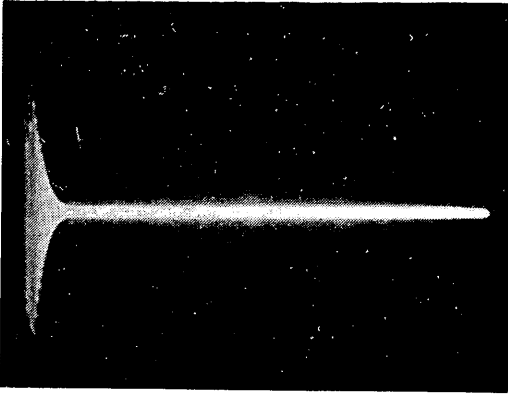


写真-20a 11.5 KHz 送信波形

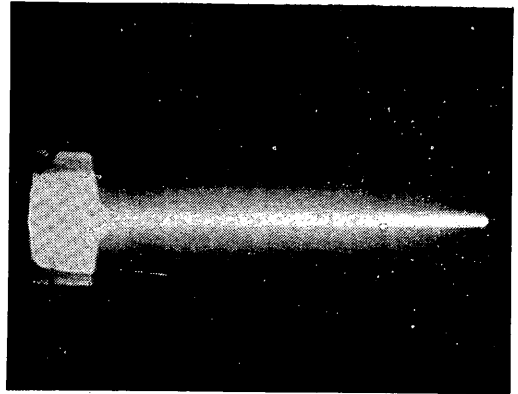


写真-20d 200 KHz 送信波形

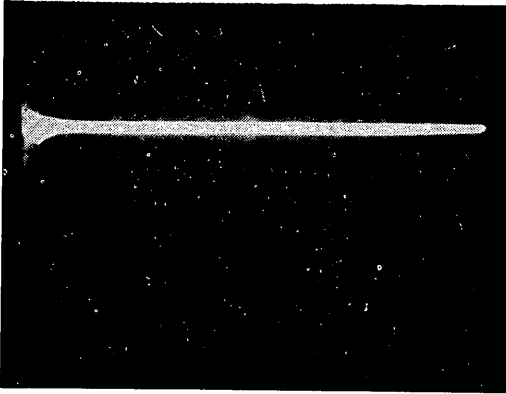


写真-20b 24 KHz 送信波形

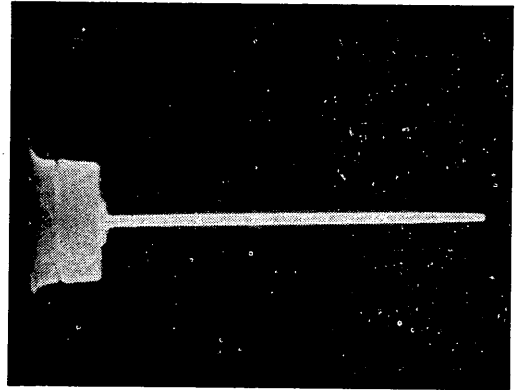


写真-20e 500 KHz 送信波形

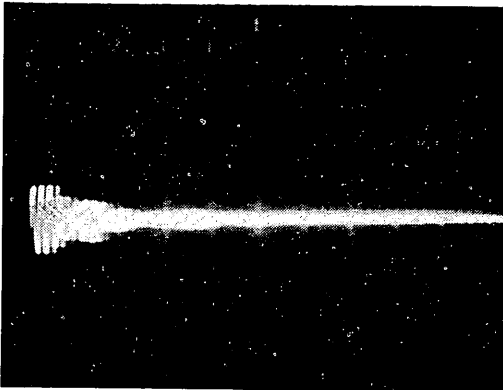


写真-20c 100 KHz 送信波形

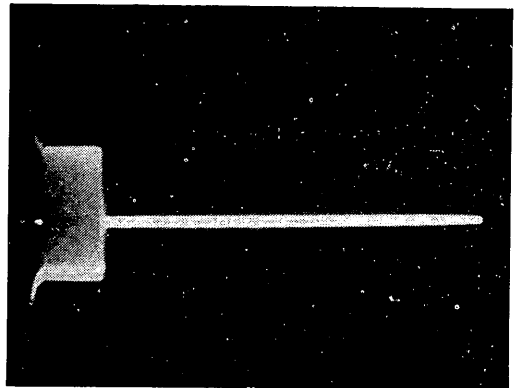


写真-20f 1 MHz 送信波形



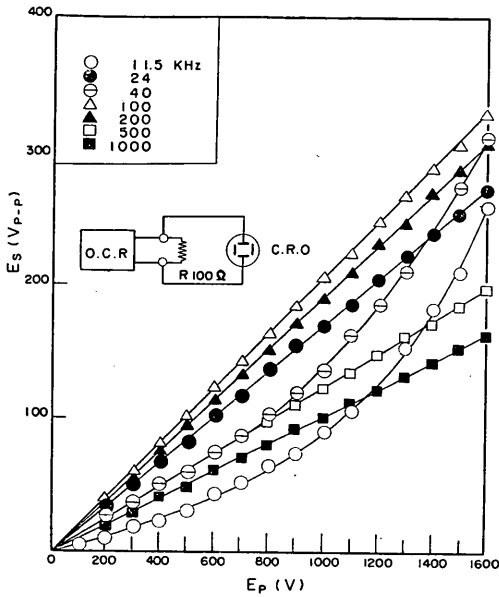


図-9 送信管陽極電圧と送信電圧  
(負荷抵抗 100Ω)

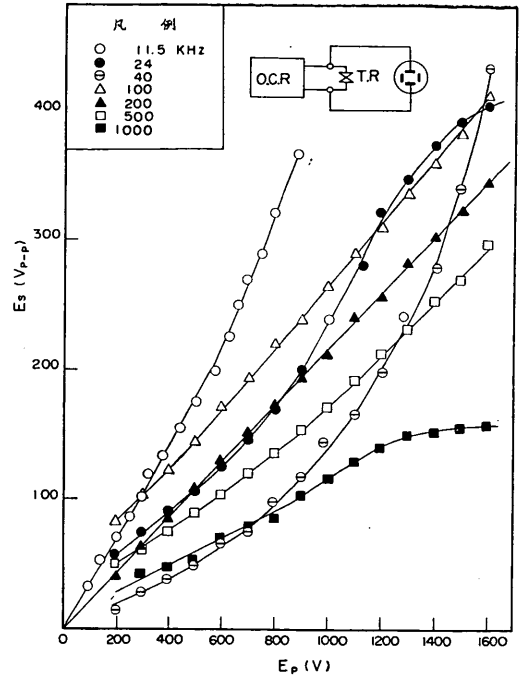


図-11 送信管陽極電圧と送信電圧  
(振動子が負荷のとき)

### 4.3. 反響記録特性に関する実験

測深値を記録器に指示させるためには、ある値以上の電圧を記録ペンと記録紙（放電破壊記録紙）の間に印加しなければならない。この電圧（記録可能限界出力電圧）を求めるために次のような実験を行なった。

図-10 に示すように、測深測定実験水槽に送受波器を設置し、マッチングボックス（整合箱）と送受信器の間に抵抗減衰器をそう入し、記録器観測端子にシンクロス

コープを接続した。この状態で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、その電圧を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（マージン）M とした。

上記実験を送信出力および受信感度を変えて、各周波数ごとくり返し行なった。

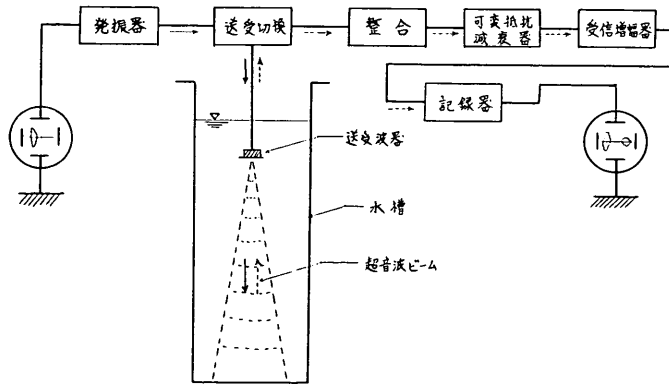


図-10 実験装置

表4 振動子の自由インピーダンス

a) 11.5 KHz (空中)

周波数 インピーダンス	KHz 10.18	10.60	10.80	11.00	11.20	11.28	11.39	11.40	11.49	11.50	11.51	11.52	11.53	11.55	11.56	11.58	11.60	11.61
絶対値	166.6	148.2	136.0	129.0	125.0	122.7	122.7	125.0	131.5	141.0	150.4	167.0	188.7	222.0	263.0	282.0	270.0	227.0
位相角	-88.0	-85.5	-80.5	-76.5	-71.8	-68.0	-63.5	-58.0	-52.5	-48	-45	-43	-42	-44	-52.4	-63.5	-76.8	-86.0

b) 24 KHz (空中)

周波数 インピーダンス	KHz 21.40	22.30	22.60	23.00	23.30	23.40	23.85	23.99	24.00	24.01	24.02	24.04	24.08	24.12	24.15	24.20	24.25	24.30
絶対値	182.0	150.4	135.0	125.0	120.5	117.8	118.3	125.0	135.0	145.0	160.0	188.7	227.5	278.0	312.0	270.0	227.4	227.4
位相角	-88.0	-85.0	-81.0	-75.0	-70.0	-62.5	-55.5	-48.5	-42.2	-39.0	-36.0	-33.6	-35.0	-42.2	-53.0	-70.0	-82.0	-87.7

c) 40 KHz (空中)

周波数 インピーダンス	KHz 37.90	39.29	39.92	39.93	39.95	39.96	39.97	39.98	39.99	40.00	40.02	40.08	40.19	40.25	40.38	40.48	40.62	40.86	41.01
絶対値	100.0	69.4	55.6	45.5	41.7	37.6	35.5	34.5	34.5	35.5	36.7	39.4	44.3	52.6	52.6	82.2	135.2	385.0	500.0
位相角	-80.4	-72.0	-63.5	-52.6	-47.2	-36.6	-27.6	-18.5	-10.0	-3.5	+6.0	+15.5	+24.2	+33.5	+40.2	+48.5	+57.3	+57.4	-82.0

d) 100 KHz (空中)

周波数 インピーダンス	KHz 96.80	97.2	98.0	98.8	99.3	99.6	99.8	100.0	100.1	100.2	100.3	100.7	100.9	101.0	101.6	102.0
絶対値	97.1	82.5	70.8	65.3	62.8	63.3	65.8	70.0	75.7	84.7	104.1	143.1	164.0	232.0	244.0	172.0
位相角	-85.1	-80.1	-72.0	-63.0	-54.0	-46.0	-37.0	-30.5	-25.0	-20.0	-10.5	-10.4	-15.8	-30.0	-65.4	-84.1

e) 200 KHz (空中)

周波数 インピーダンス	KHz 166.0	179.0	186.2	192.2	196.0	198.0	199.0	199.7	199.9	200.0	200.1	200.3	200.6	201.0	201.1	201.6	202.0	202.6	203.0	
絶対値	$\Omega$ 117.6	95.2	80.6	70.4	64.1	61.3	59.5	59.8	61.3	64.1	68.0	76.2	90.8	113.5	145.0	188.5	322.5	400.0	238.0	
位相角		-84.5	-79.5	-73.2	-65.1	-57.0	-50.0	-42.0	-33.0	-25.4	-19.2	-13.0	-5.6	+2.2	+8.0	+10.0	+9.0	-4.0	-50.0	-82.4

f) 500 KHz (空中)

周波数 インピーダンス	KHz 460.0	465.0	470.0	475.0	480.0	485.0	490.0	493.0	495.0	498.0	500.0	505.0	508.0	509.0	510.0	511.0	513.0	514.0	530.0	535.0
絶対値	$\Omega$ 42.4	37.3	32.3	29.0	27.1	25.9	25.4	25.1	25.4	26.5	28.0	30.9	35.2	41.0	47.2	54.4	65.0	89.2	104.2	87.7
位相角		-86.6	-84.0	-79.0	-72.8	-67.5	-64.0	-57.5	-50.8	-44.0	-37.0	-30.5	-24.0	-18.4	-14.6	-13.4	-14.6	-27.0	-51.0	-75.0

g) 1 MHz (空中)

周波数 インピーダンス	KHz 756	802	845	880	907	954	980	993	1000	1002	1006	1011	1020	1030	1040	1062	1082	1100	
絶対値	$\Omega$ 17.0	14.8	13.6	12.9	12.6	12.3	12.5	13.2	14.2	15.4	17.3	21.0	24.4	28.2	30.8	29.9	25.6	22.4	
位相角		-87.5	-83.4	-78.8	-73.6	-70.3	-62.3	-55.7	-49.2	-44.7	-41.0	-37.5	-37.0	-39.6	-46.5	-56.7	-73.6	-84.0	-88.0

c') 40 KHz (水中)

周波数	KHz	36.0	38.0	39.0
インピーダンス				
絶対値  z	$\Omega$	147.0	166.5	250.0
位相角 $\angle\theta$		-73.2	-57.5	-66.0

f') 500 KHz (水中)

周波数	KHz	490.0	500.0	530.5
インピーダンス				
絶対値  z	$\Omega$	47.6	50.0	52.6
位相角 $\angle\theta$		-85.2	-82.0	-84.0

g') 1 MHz (水中)

周波数	KHz	987.0	1000.0	1030.0
インピーダンス				
絶対値  z	$\Omega$	18.9	19.4	20.4
位相角 $\angle\theta$		-86.5	-84.5	-86.5

b') 24 KHz (水中)

周波数	KHz	22.0	24.0	24.5
インピーダンス				
絶対値  z	$\Omega$	189.0	192.2	193.7
位相角 $\angle\theta$		-88.5	-87.4	-88.5

d') 100 KHz (水中)

周波数	KHz	97.9	98.6	99.5	99.9	100.0	100.1	100.2	101.0	101.2
インピーダンス										
絶対値  z	$\Omega$	101.1	92.6	89.2	94.3	104.1	120.4	154.0	178.7	150.6
位相角 $\angle\theta$		-83.4	-77.2	-67.0	-58.0	-52.4	-49.0	-52.4	-70.0	-83.4

e') 200 KHz (水中)

周波数	KHz	170.2	182.0	188.0	192.4	196.1	197.0	197.3	198.0	199.1	200.7	203.0	206.5
インピーダンス													
絶対値  z	$\Omega$	105.0	91.0	82.0	79.4	81.4	89.4	100.0	117.6	156.4	208.4	286.0	244.0
位相角 $\angle\theta$		-80.0	-72.5	-62.5	-53.1	-40.3	-30.5	-24.0	-18.0	-15.2	-19.2	-36.5	-76.7

5. 実験結果および考察

5.1. 振動子の周波数アドミッタンス特性

測定時の気温は約 24°C, 水温 21°C, 湿度 60% であった。

表-4 には各振動子ごとのインピーダンスの実測値を示す。図-12 は実験結果をアドミッタンスに変換して複素平面上にプロットしたものである。

(1) 電気音響変換能率の算定

実測された自由アドミッタンス円から図-12を参考にして電気音響変換能率を算定した。すなわち電気音響変換能率  $\eta_{ea}$  は式(8)で表わされるから図-12から諸定数を求めて計算した。

いま、一例として 11.5 KHz 振動子自由アドミッタンス軌跡を用いて電気音響変換能率を求めてみる。水中の共振点  $f_R$  における能率を求めるのに、図-12から

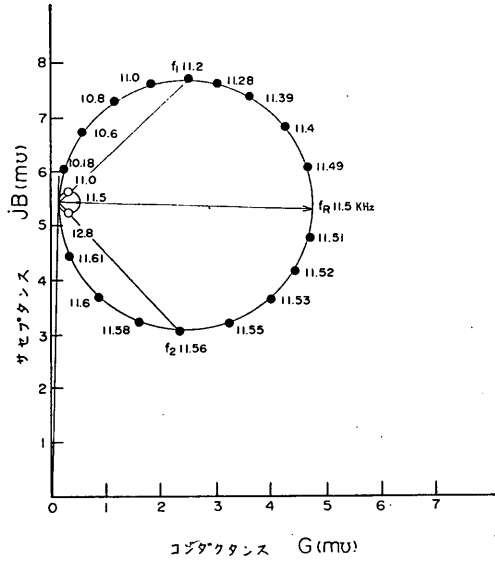


図-12 a 11.5 KHz 振動子自由アドミッタンス軌跡

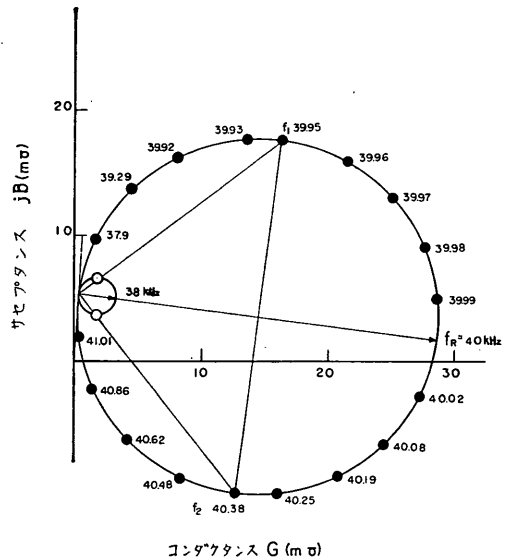


図-12 c 40 KHz 振動子自由アドミッタンス軌跡

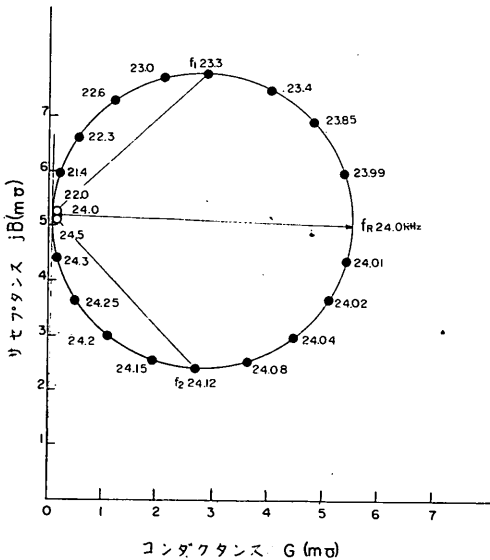


図-12 b 24 KHz 振動子自由アドミッタンス軌跡

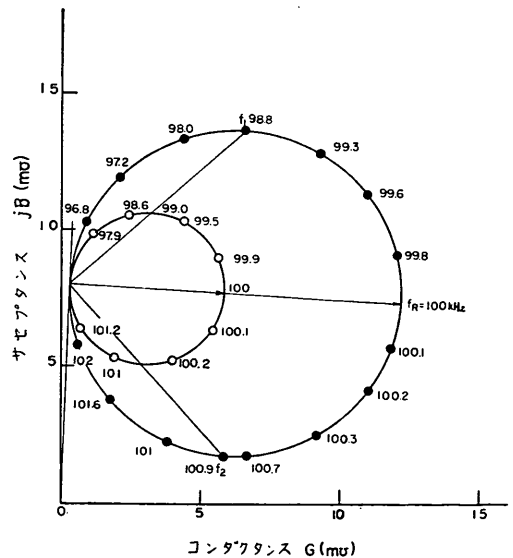


図-12 d 100 KHz 振動子自由アドミッタンス軌跡

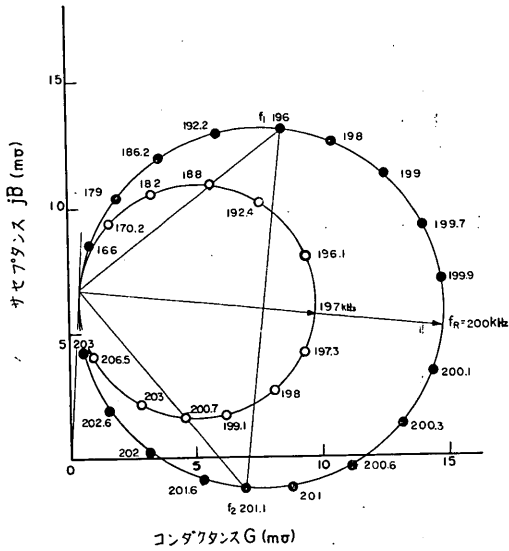


図-12e 200 KHz 振動子自由アドミッタンス軌跡

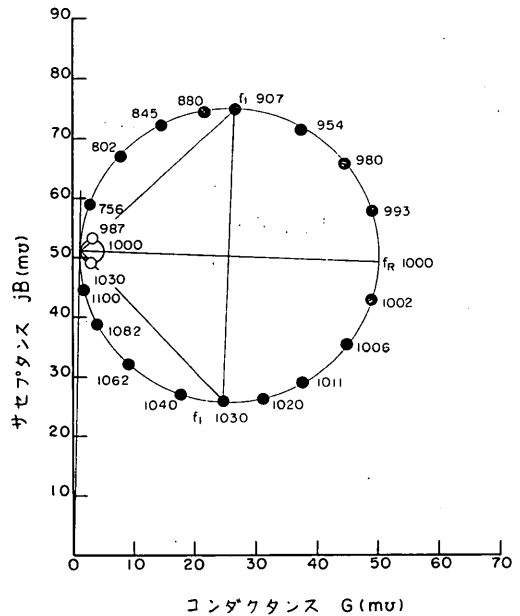


図-12g 1 MHz 振動子自由アドミッタンス軌跡

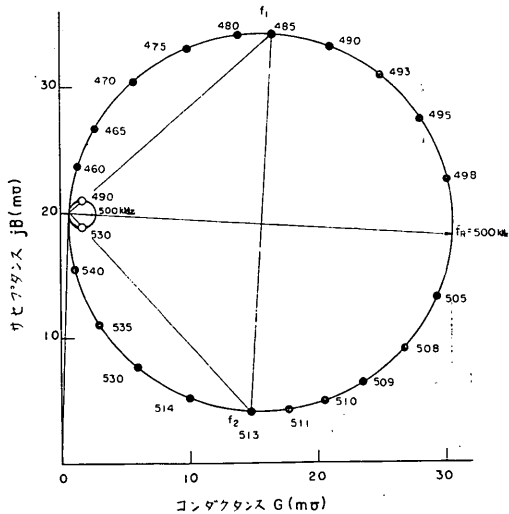


図-12f 500 KHz 振動子自由アドミッタンス軌跡

表-5 11.5 KHz 振動子の諸定数

測定量	空气中	水中
$f_R$ (KHz)	11.50	11.50
$f_1$ (KHz)	11.20	11.00
$f_2$ (KHz)	11.56	12.80
$Q = f_R / (f_2 - f_1)$	32.0	6.4
$ \dot{Y}_{moo} ,  \dot{Y}_{mo} $	4.6	0.4

$G_{f0} = 0.5 \text{ m}\Omega$  だから式 (8) から

$$\eta_{em} = 0.4 / 0.5 = 0.800$$

また

$$\eta_{ma} = 1 - 0.4 / 4.6 = 0.913$$

したがって

$$\eta_{ea} = \eta_{em} \cdot \eta_{ma} = 0.730$$

上記方法により各周波数ごとに能率を求めた結果を表-6に示す。

チタン酸バリウム磁器振動子においては一般に式(11)または図-2の $\beta$ の値が小さいので $\eta_{em}$ の値が大きい。この実験によってもそのことが証明されている。しかしながら $\eta_{ma}$ の方は100, 200 KHzを除いて、80%以上の能率があり、全能率すなわち $\eta_{ea}$ はほぼ70%以上もあるが、100および200 KHz振動子の $\eta_{ma}$ が非常に小さい。これは水中における動アドミッタンス $|\dot{Y}_{moo}|$ と空气中における動アドミッタンス $|\dot{Y}_{mo}|$ との比すなわち $|\dot{Y}_{moo}|/|\dot{Y}_{mo}|$ が他の振動子に比して大きいからである。換言すれば100および200 KHz振動子の等価スチフネスや機械抵抗が他に比較して大きいからであると考えられる。その一因として100, 200 KHz振動子はランジュバン型を使用しているので、チタン酸バリウム磁器円板と鋼鉄製円板との接着不良または空気層に基づく構造的な原因が考えられるが詳細は不明である。

(2) 振動子の等価回路および諸定数

表-6 振動子の能率算定表

測定量	11.5 KHz			24 KHz			40 KHz			100 KHz			200 KHz			500 KHz			1 MHz			
	空気中	水中	中	空気中	水中	中	空気中	水中	中	空気中	水中	中	空気中	水中	中	空気中	水中	中	空気中	水中	中	
$f_R$ (KHz)	11.5	11.5	24.0	24.0	24.0	38.0	100.0	100.0	100.0	197.0	500.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
$f_1$ ( " )	11.2	11.0	23.3	23.3	22.0	36.0	98.8	99.0	99.0	188.0	485.0	987.0	987.0	987.0	987.0	987.0	987.0	987.0	987.0	987.0	987.0	987.0
$f_2$ ( " )	11.56	12.8	24.12	24.12	24.5	39.0	100.9	100.6	100.6	201.1	513.0	1030.0	1030.0	1030.0	1030.0	1030.0	1030.0	1030.0	1030.0	1030.0	1030.0	1030.0
$Q = f_R / (f_2 - f_1)$	32	6.4	29.3	29.3	9.6	12.7	47.6	62.5	62.5	39.3	15.5	8.1	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2
$ \dot{Y}_{mod} ,  \dot{Y}_{mol} $ (mG)	4.6	0.4	5.4	5.4	0.2	28.1	3	12.0	5.5	14.3	9.3	49.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
$\eta_{2m}$	0.800		0.850	0.850		0.939	0.949		0.949	0.959		0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
$\eta_{ma}$	0.913		0.982	0.982		0.893	0.542		0.542	0.350		0.918	0.918	0.918	0.918	0.918	0.918	0.918	0.918	0.918	0.918	0.918
$\eta_{aa}$	0.730		0.835	0.835		0.839	0.514		0.514	0.336		0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734	0.734

表-7 回路定数と音響的諸定数

共振周波数 $f_R$ (KHz)	反共振周波数 $f_A$ (KHz)	共振数 $f_1$ (KHz)	第1共振周波数 $f_1$ (KHz)	第2共振周波数 $f_2$ (KHz)	共振周波数の差 $\Delta f$ (KHz)	Q	$R_1$ ( $\Omega$ )	$L_1$ (H)	$C_1$ (F)	$C_a$ (F)	力係数 $A$ (dyne/V)	等価質量 $m$ (g)	等価スチネス $S$ (dyne/cm)	機械抵抗 $r$ (dyne/kine)	自由インピーダンス $ Z_0 $ ( $\Omega$ )	位相角 $\theta$ (度)
11.5	15.7 (11.8)	11.0 (11.2)	12.8 (11.56)	1.8 (0.36)	6.4 (32)	2500	$2.22 \times 10^{-1}$	$8.7 \times 10^{-10}$	$7.48 \times 10^{-8}$	$2.08 \times 10^5$	961	4.97	$1.08 \times 10^7$	184.5	-85.8	
24	24.6	22.0 (23.3)	24.5 (24.12)	2.5 (8.2)	9.6 (29.3)	10000	$1.57 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-10}$	$3.44 \times 10^{-8}$	$9.17 \times 10^4$	133	3.0	$8.42 \times 10^5$	196.0	-88.9	
38	41.0 (41.4)	36.0 (39.95)	39.0 (40.38)	3.0 (4.3)	12.7 (9.3)	333	$1.77 \times 10^{-2}$	$9.9 \times 10^{-10}$	$2.26 \times 10^{-8}$	$4.2 \times 10^3$	314	1.79	$5.89 \times 10^6$	161.7	-61.0	
100	103	99.0 (98.8)	100.6 (100.9)	1.6 (2.1)	62.5 (47.6)	182	$1.81 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-10}$	$1.27 \times 10^{-8}$	$1.096 \times 10^1$	2170	8.57	$2.18 \times 10^7$	103.0	-55.6	
197	214 (215)	188 (196)	200.7 (201.1)	11.3 (5.0)	17.4 (39.3)	108	$1.52 \times 10^{-3}$	$4.35 \times 10^{-10}$	$5.4 \times 10^{-9}$	$1.77 \times 10^5$	475	7.19	$3.36 \times 10^7$	84.4	-36.0	
500	600	490 (485)	530 (513)	40 (28)	12.5 (17.9)	400	$1.59 \times 10^{-3}$	$6.37 \times 10^{-11}$	$6.37 \times 10^{-9}$	$2.84 \times 10^5$	12.8	1.26	$3.21 \times 10^8$	49.6	-82.9	
1000	1200	987 (907)	1030 (1030)	43 (123)	23.2 (8.1)	250	$9.26 \times 10^{-3}$	$2.74 \times 10^{-11}$	$8.12 \times 10^{-9}$	$3.61 \times 10^5$	11.8	4.67	$3.203 \times 10^8$	19.7	-85.5	

ただし ( ) 内は水中で測定した値

振動子の等価回路は 2.1(2) の 図-3 のようであるが  
 ここではその定数  $L_1, C_1, R_1, C_a$  や音響的諸定数  $m, s, r$  などを前述の実測値によって算出してみる。  
 いま

- $\omega_R = 2\pi f_R$ : 共振角周波数 (rad/s)
- $\omega_A = 2\pi f_A$ : 反共振角周波数 (rad/s)
- $Y_{mo}$ : 動アドミッタンス (U)
- $Y_a$ : 制動アドミッタンス (U)
- $\Delta f = f_2 - f_1$ : 象限周波数の差 (Hz)
- S: 放射面積
- $r_r = \rho c$ : 放射抵抗 (ubar/kine)

とすると式 (1) より

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{Y_{mo}} & L_1 &= \frac{R_1}{2\pi \Delta f} \\ C_1 &= \frac{1}{\omega_R^2 L_1} & C_a &= \frac{Y_a}{\omega_R} \end{aligned} \right\} \dots\dots (23)$$

が求められる。

また音響的諸定数  $m, s, r$  も同様にして式 (2) より求めることができる。

$$m = L_1 A_2 \quad s = A^2 / C_1 \quad r = R_1 A^2 \quad \dots\dots (24)$$

ただし

$$A^2 = Y_{mo}(r_1 + r_a)$$

$$\text{ここに} \quad r_a = S r_r = \rho c \cdot S$$

$$r_1 = \frac{(1 - \eta_{ma}) r_a}{\eta_{ma}}$$

表-7 には、上式より計算した結果を各周波数ごとに示した。

なお振動子の等価回路は 図-1 に示すようであるが、共振時には 図-13 のようになる。全インピーダンス  $\dot{Z}_0$  は  $\dot{Z}_2 = -j(1/\omega_R C_a)$  とおいて次のようにして求められる。

$$\dot{Z}_0 = \frac{R_1 \cdot \dot{Z}_2}{R_1 + \dot{Z}_2} = \frac{R_1 \left( -j \frac{1}{\omega_R C_a} \right)}{R_1 - j \frac{1}{\omega_R C_a}} = \frac{R_1}{\omega_R^2 C_a^2} - j \frac{R_1^2}{\omega_R C_a}$$

$\dot{Z}_0$  の大きさは

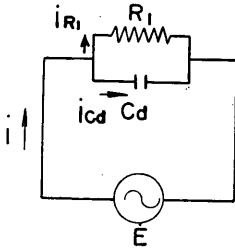


図-13 共振時の等価回路

$$\begin{aligned} |\dot{Z}_0| &= \sqrt{\left[ \frac{\frac{R_1}{\omega_R^2 C_a^2}}{R_1^2 + \frac{1}{\omega_R^2 C_a^2}} \right]^2 + \left[ \frac{\frac{R_1^2}{\omega_R C_a}}{R_1^2 + \frac{1}{\omega_R^2 C_a^2}} \right]^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_1^2} + \omega_R^2 C_a^2}} \quad \dots\dots (25) \end{aligned}$$

となる。電源電圧  $\dot{E}$  と電流  $\dot{I}$  との位相角  $\theta$  は

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{R_1^2}{\omega_R C_a}}{\frac{R_1^2 + \frac{1}{\omega_R^2 C_a^2}}{R_1}} = \tan^{-1} \omega_R C_a R_1 \quad \dots\dots (26)$$

式 (25) と式 (26) により各周波数ごとに求めた値を表-7 に示した。この表によると 100 および 200 KHz 振動子の等価スチフネスと機械抵抗は他に比して大きくて  $\eta_{ma}$  が小さいことを示している。また自由インピーダンス  $|\dot{Z}_0|$  は高周波ほど小さく、位相角  $\theta$  は 100, 200 KHz が小さく、他は 80~90° の間にあることを示している。

### 5.2. 音波放射の理論的検討

#### (1) 中心軸上の近距離の音場

##### a) ピストン振動面の音波放射

試作した送受信用振動子 (100, 200, 500 KHz, 1 MHz) について式 (18) を用いて、中心よりの距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  との関係計算してみた。その結果を 図-14 に示す。図中の点線は遠距離音場の式により計算して求めたものである。ここで逆にどの程度の近距離まで音圧が距離に反比例するかを吟味してみる。式 (18) の近似の条件、すなわち  $\sin \theta \approx \theta$  とする近似は  $\theta < \pi/8$  ならば誤差は 2% 以内である。したがって音圧の誤差を 2% 以内にするには周辺からの距離と中心からの距離との差が  $\lambda/8$  以下であればよい。この条件  $\sqrt{x^2 + a^2} - x < \lambda/8$  を書き替えると

$$x > \frac{(2a)^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{16} \quad \dots\dots (27)$$

式 (27) により、各振動子ごとそれぞれ計算した結果を、表-8 に示す。

##### b) 反射笠付環状振動子の音波放射

反射笠を用いた環状振動子は径方向に振動しながら音波を放射し、45度を開いた反射笠で直角に進行方向を変えられて進行する。

反射笠反射面による音波の吸収損失や反射笠出口までの伝搬損失を無視すると、振動子放射面から出た音響出



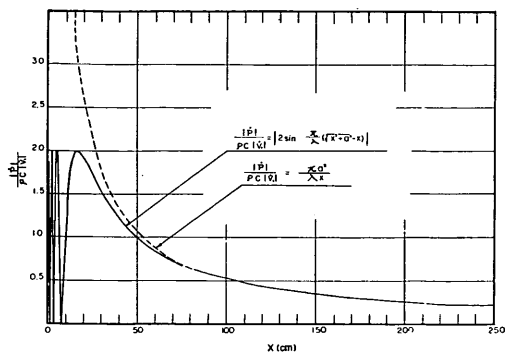


図-14 a 100 KHz 距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  の関係

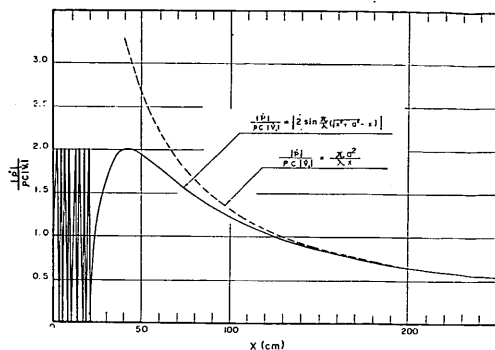


図-14 d 1 MHz 距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  の関係

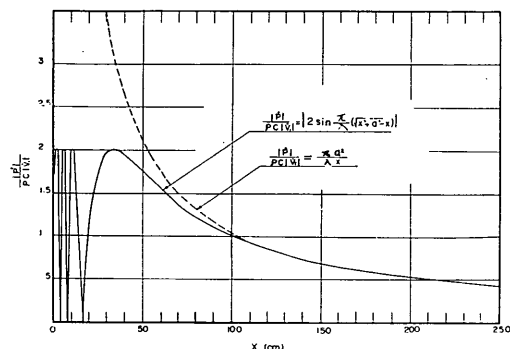


図-14 b 200 KHz 距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  の関係

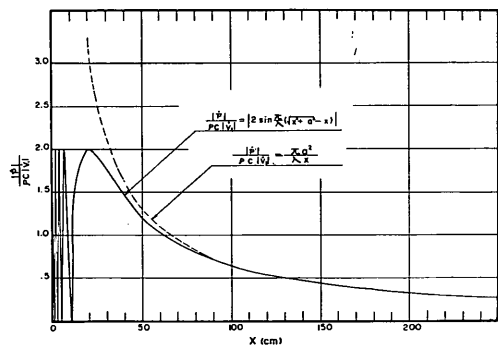


図-14 c 500 KHz 距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  の関係

力と反射笠出口から出る音響出力とは相等しい。ゆえに単位面積当りの出力  $I$  は、反射笠放射面積を  $S$ 、音響出力を  $P_a$  として次のように表わすことができる。

$$I = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{\pi(a_1 - a_2)^2} \quad [\text{W/cm}^2] \quad \dots\dots(28)$$

$a_1 \gg a_2$  とみなせば

$$= \frac{P_a}{\pi a_1^2} \quad \dots\dots(29)$$

表-8 音圧が距離に反比例する限界距離 (円形ピストン振動子)

周波数 $f$ (KHz)	波長 $\lambda$ (cm)	振動面半径 $a$ (cm)	中心よりの距離 $x$ (cm)
100	1.50	5.0	66.7
200	0.75	5.0	133.3
500	0.30	2.5	83.3
1000	0.15	2.5	166.7

したがって反射笠を用いた環状振動子は、近似的に反射笠出口の径をもった円形ピストン振動子と等価であると考えることができる。

次に反射笠付環状振動子による音場を円形ピストン振動子の音場を求める理論を使って求めてみよう。振動板の面積を  $S$ 、速度を  $V_1$  とすると、円形ピストン振動面の音波放射による音場は 2.2(1) の式 (12) (13) によって表わすことができる。

図-16 のように距離が近くなると、 $r$  が異なるための位相差を考慮に入れなければならない。式(13)の積分を行なうのに、この場合は振動面は外径  $a_1$ 、内径  $a_2$  のド

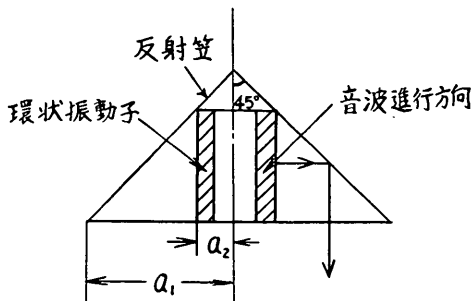


図-15 反射笠付環状振動子の音波放射

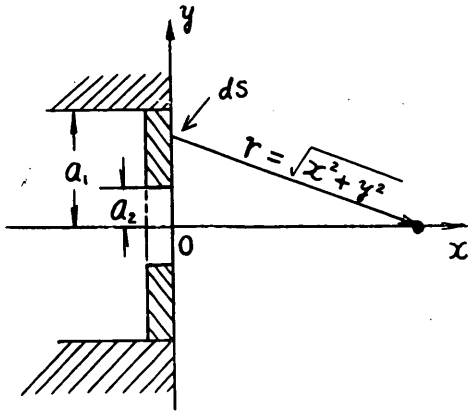


図-16 近距離の音場

一ナツ状とし、半径方向の座標を  $y$  とする。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad dS = 2\pi y dy$$

を入れて  $y = a_2$  から  $y = a_1$  まで積分すれば

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{\dot{V}_1}{2\pi} \iint \frac{e^{-jkr}}{r} dS \\ &= j \frac{\dot{V}_1}{k} (e^{-jk\sqrt{x^2+a_1^2}} - e^{-jk\sqrt{x^2+a_2^2}}) \dots (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \dot{P} &= -\frac{\omega\rho V_1}{k} \{ \cos(k\sqrt{x^2+a_1^2}) \\ &\quad - \cos(k\sqrt{x^2+a_2^2}) \} \\ &\quad - j \{ \sin(k\sqrt{x^2+a_1^2}) - \sin(k\sqrt{x^2+a_2^2}) \} \} \dots (31) \end{aligned}$$

これを三角関数の公式で整理してから絶対値を求めると

$$|\dot{P}| = \rho c |\dot{V}_1| \cdot \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2+a_1^2} - \sqrt{x^2+a_2^2}) \right| \dots (32)$$

(32) において、 $a_1 \gg a_2$  とみなせば、円形ピストン振動面音波放射の式(20)と一致する。

このように単位面積当りの出力および音場から検討しても反射笠付環状振動子は円形ピストン振動子とほぼ等価であるといえよう。

つぎに試作した送受波用環状振動子 (11.5 KHz, 24 KHz, 40 KHz) について式(32)を用いて、中心よりの距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  との関係を計算した結果を図-17に示す。

表-9 には音圧が距離に反比例する限界距離  $x$  を式(27)により各振動子ごとに算出した結果を示す。

表-8, 表-9 および式(27)より、音圧が距離に反比例する限界距離は、波長  $\lambda$  が一定の場合、振動子の半径  $a$  の自乗に比例し、半径が一定の場合は波長  $\lambda$  にほぼ反比

表-9 音圧が距離に反比例する限界距離 (反射笠付環状振動子)

周波数 $f$ (KHz)	波長 $\lambda$ (cm)	振動面半径 (反射笠開口面半径) $a$ (cm)	中心からの距離
11.5	13.0	44.0	594.9
24.0	6.3	21.0	279.6
40.0	3.8	12.5	164.2

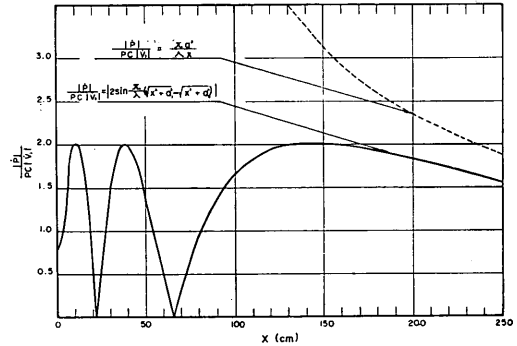


図-17a 11.5 KHz 距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  の関係

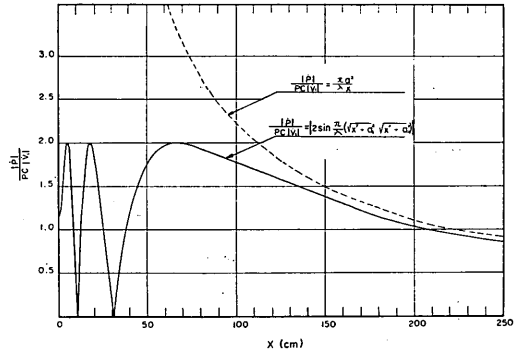


図-17b 24 KHz 距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  の関係

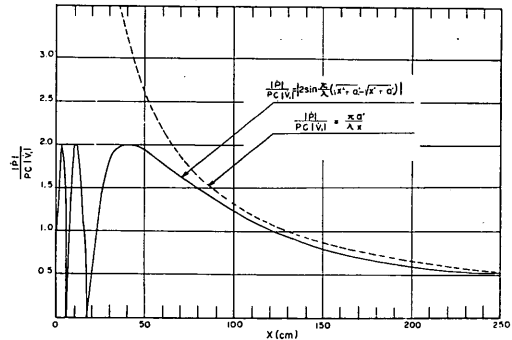


図-17c 40 KHz 距離  $x$  と  $|\dot{P}/\rho c \dot{V}_1|$  の関係

表-10 a 11.5 KHz 指向性計算表

$$f=11.5 \text{ KHz} \quad \lambda = \frac{c}{f} = 13.0 \text{ cm} \quad R = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \quad Z = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma = 21.09 \sin \gamma$$

$\gamma^\circ$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$	$\gamma^\circ$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$
1	0.0175	0.3708	0.977	25	0.4226	8.9549	0.055
2	0.0349	0.7395	0.930	26	0.4384	9.2897	0.043
3	0.0523	1.1082	0.856	27	0.4540	9.6203	0.030
4	0.0698	1.4791	0.750	28	0.4695	9.9487	0.010
5	0.0872	1.8478	0.625	29	0.4848	10.2729	0.005
6	0.1045	2.2144	0.500	30	0.5000	10.5950	0.020
7	0.1219	2.5831	0.370	31	0.5150	10.9129	0.028
8	0.1392	2.9496	0.240	32	0.5299	11.2286	0.038
9	0.1564	3.3141	0.127	33	0.5446	11.5400	0.040
10	0.1737	3.6807	0.034	34	0.5592	11.8500	0.039
11	0.1908	4.0431	0.040	35	0.5736	12.1500	0.035
12	0.2079	4.4054	0.092	36	0.5878	12.4600	0.027
13	0.2250	4.7678	0.122	37	0.6018	12.7500	0.019
14	0.2419	5.1259	0.131	38	0.6157	13.0500	0.010
15	0.2588	5.4840	0.127	39	0.6293	13.3300	0.001
16	0.2756	5.8400	0.107	40	0.6428	13.6200	0.009
17	0.2924	6.1960	0.074	41	0.6561	13.9000	0.017
18	0.3090	6.5477	0.040	42	0.6691	14.1800	0.026
19	0.3256	6.8995	0.010	43	0.6820	14.4500	0.022
20	0.3420	7.2470	0.018	44	0.6947	14.7200	0.027
21	0.3584	7.5945	0.038	45	0.7071	14.9800	0.027
22	0.3746	7.9378	0.052	46	0.7193	15.2400	0.025
23	0.3907	8.2789	0.060	47	0.7314	15.5000	0.021
24	0.4067	8.6180	0.061	48	0.7431	15.7500	0.016

例するといえる。このことから水槽を使用して超音波の反射伝搬特性の計測を送受波器を上下しながら行なう際に音圧が距離に反比例する限界距離を考慮する必要がある。

(2) 送受波器の指向特性

振動子の指向性計算式(21)を用いて、試作した振動子の指向性を計算した。なお 11.5, 24, 40 KHz のような反射笠付環状振動子は 5.2(1), b) に述べたごとく反射笠開口面を振動面とした円形ピストン振動子と仮定して指向性を計算した。その結果を表-10 および 図-18, 図-19 に示す。24 KHz 振動子の指向性を表わした 図-19 には実測した結果も示した。この図によれば周波数が高いほど  $\gamma_{1/2}$  を小さくしてもサイドローブの出る角度の範囲は非常に小さく、周波数が低いほどその範囲が広がる傾向があることがわかる。また 24 KHz において理論値と実測値を比較するとメインローブは両者ともほとんど

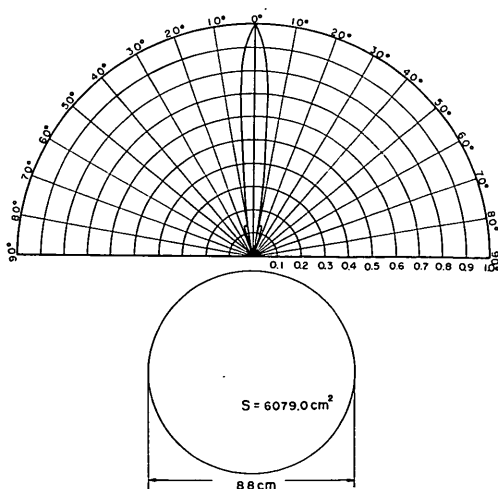


図-18 a 11.5 KHz 振動子指向性特性

表-10b 24 KHz 指向性計算表

$$f = 24 \text{ KHz} \quad \lambda = \frac{c}{f} = 6.25 \text{ cm} \quad R = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \quad Z = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma = 21.1 \sin \gamma$$

$\gamma$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$	$\gamma$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$
1	0.0175	0.3193	0.975	25	0.4226	8.9169	0.057
2	0.0349	0.7364	0.931	26	0.4384	9.2502	0.045
3	0.0523	1.1035	0.860	27	0.4540	9.5794	0.030
4	0.0698	1.4728	0.755	28	0.4695	9.9065	0.013
5	0.0872	1.8399	0.630	29	0.4848	10.2293	0.003
6	0.1045	2.2050	0.500	30	0.5000	10.5500	0.018
7	0.1219	2.5721	0.370	31	0.5150	10.8700	0.028
8	0.1392	2.9371	0.245	32	0.5299	11.1800	0.034
9	0.1564	3.3000	0.130	33	0.5446	11.4900	0.040
10	0.1737	3.6151	0.035	34	0.5592	11.8000	0.040
11	0.1908	4.0259	0.037	35	0.5736	12.1000	0.036
12	0.2079	4.3867	0.090	36	0.5878	12.4000	0.029
13	0.2250	4.7475	0.120	37	0.6018	12.7000	0.021
14	0.2419	5.1041	0.131	38	0.6157	12.9900	0.012
15	0.2588	5.4607	0.128	39	0.6293	13.2800	0.002
16	0.2756	5.8152	0.110	40	0.6428	13.5600	0.007
17	0.2924	6.1696	0.078	41	0.6561	13.8400	0.012
18	0.3090	6.5199	0.045	42	0.6691	14.1200	0.021
19	0.3256	6.8702	0.013	43	0.6820	14.3900	0.025
20	0.3420	7.2162	0.014	44	0.6947	14.6600	0.027
21	0.3584	2.5622	0.034	45	0.7071	14.9200	0.027
22	0.3746	7.9041	0.050	46	0.7193	15.1800	0.026
23	0.3907	8.2438	0.060	47	0.7314	15.4300	0.023
24	0.4067	8.5814	0.061	48	0.7431	15.6800	0.018

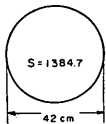
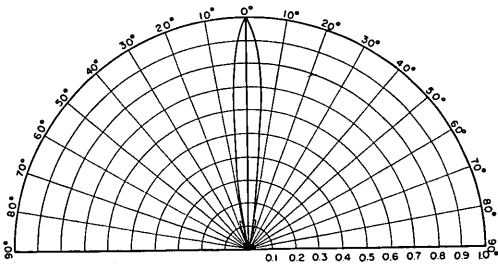


図-18b 24 KHz 振動子指向性特性

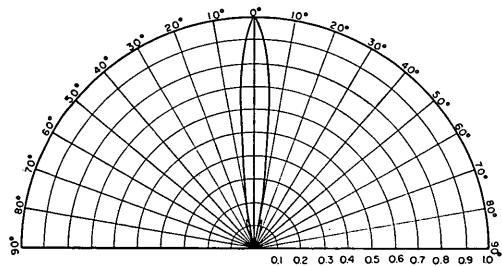


図-18c 40 KHz 振動子指向性特性

音響測深機に関する研究

表-10c 40 KHz 指向性計算表

$$f = 40 \text{ KHz} \quad \lambda = \frac{c}{f} = 3.75 \text{ cm} \quad R = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \quad Z = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma = 20.93 \sin \gamma$$

$\gamma$	$\sin \gamma$	Z	R	$\gamma$	$\sin \gamma$	Z	R
1	0.0175	0.3663	0.915	25	0.4226	8.8450	0.059
2	0.0349	0.7305	0.932	26	0.4384	9.1757	0.048
3	0.0523	1.0946	0.859	27	0.4540	9.5022	0.035
4	0.0698	1.4609	0.760	28	0.4695	9.8266	0.020
5	0.0872	1.8251	0.630	29	0.4848	10.1406	0.000
6	0.1045	2.1872	0.505	30	0.5000	10.4650	0.015
7	0.1219	2.5514	0.375	31	0.5150	10.7800	0.023
8	0.1392	2.9135	0.250	32	0.5299	11.0900	0.032
9	0.1564	3.2735	0.140	33	0.5446	11.4000	0.038
10	0.1737	3.6355	0.040	34	0.5592	11.7000	0.040
11	0.1908	3.9934	0.030	35	0.5736	12.0100	0.038
12	0.2079	4.3513	0.085	36	0.5878	12.3000	0.031
13	0.2250	4.7093	0.120	37	0.6018	12.6000	0.024
14	0.2419	5.0630	0.130	38	0.6157	12.8900	0.015
15	0.2588	5.4167	0.128	39	0.6293	13.1700	0.006
16	0.2756	5.7683	0.111	40	0.6428	13.4500	0.004
17	0.2924	6.1199	0.081	41	0.6561	13.7300	0.012
18	0.3090	6.4674	0.050	42	0.6691	14.0000	0.019
19	0.3256	6.8148	0.020	43	0.6820	14.2700	0.023
20	0.3420	7.1589	0.010	44	0.6947	14.5400	0.027
21	0.3584	7.5013	0.031	45	0.7071	14.8000	0.027
22	0.3746	7.8404	0.050	46	0.7193	15.0500	0.027
23	0.3907	8.1774	0.060	47	0.7314	15.3100	0.024
24	0.4067	8.5122	0.062	48	0.7431	15.5500	0.020

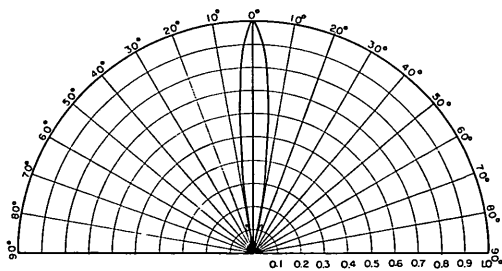


図-18d 100 KHz 振動子指向性特性

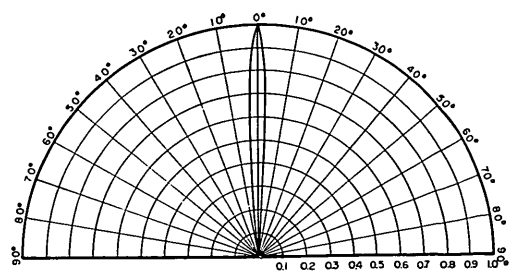
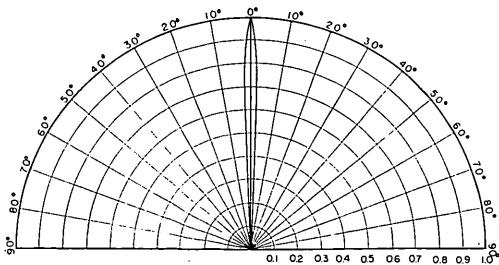


図-18e 200 KHz 振動子指向性特性

表-10d 100 KHz 指向性計算表

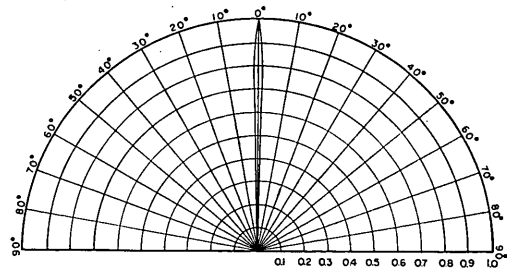
$$f=100 \text{ KHz} \quad \lambda = \frac{c}{f} = 15.0 \text{ mm} \quad R = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \quad Z = \frac{\pi d}{Z} \sin \gamma = 20.93 \sin \gamma$$

$\gamma$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$	$\gamma$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$
1	0.0175	0.3663	0.975	25	0.4226	8.8450	0.058
2	0.0349	0.7305	0.932	26	0.4384	9.1757	0.048
3	0.0523	1.0946	0.859	27	0.4540	9.5022	0.035
4	0.0698	1.4609	0.760	28	0.4695	9.8266	0.020
5	0.0872	1.8251	0.630	29	0.4848	10.1406	0.000
6	0.1045	2.1872	0.505	30	0.5000	10.4650	0.015
7	0.1219	2.5514	0.375	31	0.5150	10.7900	0.023
8	0.1392	2.9135	0.250	32	0.5299	11.0900	0.032
9	0.1564	3.2735	0.140	33	0.5446	11.4000	0.038
10	0.1737	3.6355	0.040	34	0.5592	11.7000	0.040
11	0.1908	3.9934	0.030	35	0.5736	12.0100	0.038
12	0.2079	4.3513	0.085	36	0.5878	12.3000	0.031
13	0.2250	4.7093	0.120	37	0.6018	12.6000	0.024
14	0.2419	5.0630	0.130	38	0.6157	12.8900	0.015
15	0.2588	5.4167	0.128	39	0.6293	13.1700	0.006
16	0.2756	5.7683	0.111	40	0.6428	13.4500	0.004
17	0.2924	6.1199	0.081	41	0.6561	13.7300	0.012
18	0.3090	6.4674	0.050	42	0.6691	14.0000	0.019
19	0.3256	6.8148	0.020	43	0.6820	14.2700	0.023
20	0.3420	7.1581	0.010	44	0.6947	14.5400	0.027
21	0.3584	7.5013	0.031	45	0.7071	14.8000	0.027
22	0.3746	7.8404	0.050	46	0.7193	15.0500	0.027
23	0.3907	8.1774	0.060	47	0.7314	15.3100	0.024
24	0.4067	8.5122	0.062	48	0.7431	15.5500	0.020



5 cm

図-18f 500 KHz 振動子指向性特性



5 cm

図-18g 1 MHz 振動子指向性特性

音響測深機に関する研究

表-10 e 200 KHz 指向性計算表

$$f=200 \text{ KHz} \quad \lambda = \frac{c}{f} = 7.5 \text{ mm} \quad R = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \quad Z = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma = 41.87 \sin \gamma$$

$\gamma$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$	$\gamma$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$
1	0.0175	0.7327	0.932	23	0.3907	16.3586	0.002
2	0.0349	1.4613	0.746	24	0.4067	17.0285	0.012
3	0.0523	2.1898	0.503	25	0.4226	17.6943	0.020
4	0.0698	2.9225	0.250	26	0.4384	18.3558	0.019
5	0.0872	3.6511	0.040	27	0.4540	19.0090	0.011
6	0.1045	4.3754	0.090	28	0.4695	19.6580	0.001
7	0.1219	5.1040	0.131	29	0.4848	20.2986	0.011
8	0.1392	5.8283	0.107	30	0.5000	20.9350	0.015
9	0.1564	6.5485	0.040	31	0.5150	21.5600	0.015
10	0.1737	7.2728	0.018	32	0.5299	22.1900	0.008
11	0.1908	7.9888	0.055	33	0.5446	22.8000	0.001
12	0.2079	8.7048	0.060	34	0.5592	23.4100	0.008
13	0.2250	9.4208	0.040	35	0.5736	24.0200	0.013
14	0.2419	10.1284	0.000	36	0.5878	24.6100	0.012
15	0.2588	10.8360	0.025	37	0.6018	25.2000	0.008
16	0.2756	11.5394	0.040	38	0.6157	25.7800	0.002
17	0.2924	12.2428	0.033	39	0.6293	26.3500	0.005
18	0.3090	12.9378	0.013	40	0.6428	26.9100	0.0095
19	0.3256	13.6329	0.000	41	0.6561	27.4700	0.011
20	0.3420	14.3195	0.024	42	0.6691	28.0200	0.0092
21	0.3584	15.0062	0.027	43	0.6820	28.5600	0.005
22	0.3746	15.6845	0.018				

表-10 f 500 KHz 指向性計算表

$$f=500 \text{ KHz} \quad \lambda = \frac{c}{f} = 3.0 \text{ mm} \quad R = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \quad Z = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma = 52.33 \sin \gamma$$

$\gamma$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$	$\gamma$	$\sin \gamma$	$Z$	$R$
1	0.0175	0.916	0.900	17	0.2924	15.301	0.024
2	0.0349	1.826	0.630	18	0.3090	16.170	0.007
3	0.0523	2.737	0.310	19	0.3256	17.039	0.013
4	0.0698	3.653	0.040	20	0.3420	17.897	0.021
5	0.0872	4.563	0.110	21	0.3584	18.775	0.15
6	0.1045	5.469	0.128	22	0.3746	19.603	0.001
7	0.1219	6.379	0.058	23	0.3907	20.445	0.012
8	0.1392	7.284	0.020	24	0.4067	21.283	0.016
9	0.1564	8.184	0.060	25	0.4226	22.115	0.009
10	0.1737	9.090	0.050	26	0.4384	22.942	0.003
11	0.1908	9.985	0.010	27	0.4540	23.758	0.011
12	0.2079	10.879	0.028	28	0.4695	24.569	0.0125
13	0.2250	11.774	0.040	29	0.4848	25.370	0.0064
14	0.2419	12.659	0.022	30	0.5000	26.165	0.0032
15	0.2588	13.543	0.007	31	0.5150	26.950	0.0097
16	0.2756	14.422	0.026	32	0.5299	27.730	0.0605

表-10g 1MHz 指向性計算表

$$f=1\text{MHz} \quad \lambda=\frac{c}{f}=1.5\text{mm} \quad R=\left|\frac{2J_1(Z)}{Z}\right| \quad Z=\frac{\pi d}{\lambda}\sin\gamma=104.6\sin\gamma$$

$\gamma$	$\sin\gamma$	$Z$	$R$	$\gamma$	$\sin\gamma$	$Z$	$R$
1	0.0175	1.830	0.615	9	0.1564	16.370	0.002
2	0.0349	3.650	0.020	10	0.1737	18.150	0.021
3	0.0523	5.460	0.064	11	0.1908	19.800	0.002
4	0.0698	7.290	0.006	12	0.2079	26.740	0.008
5	0.0872	9.125	0.050	13	0.2250	23.50	0.009
6	0.1045	10.972	0.028	14	0.2419	25.30	0.007
7	0.1219	12.730	0.020	15	0.2588	27.06	0.010
8	0.1392	14.580	0.027	16	0.2756	28.80	0.003

等しいが、サイドローブは実測の方が理論値よりもやや大きいことがわかった。このことから理論計算値と実測値とがほぼ一致し、反射笠付環状振動子は円形ピストン振動子の指向性計算式を使用しても差しつかえないも

のと思われる。

指向性の鋭さを簡潔に表現するのに、指向性関数が1/2に落ちる角度 $\gamma_{1/2}$ または最初に零に落ちる角 $\gamma_{01}$ をもってする。 $\gamma_{1/2}$ 、 $\gamma_{01}$ では $Z$ の値はそれぞれ2.216、

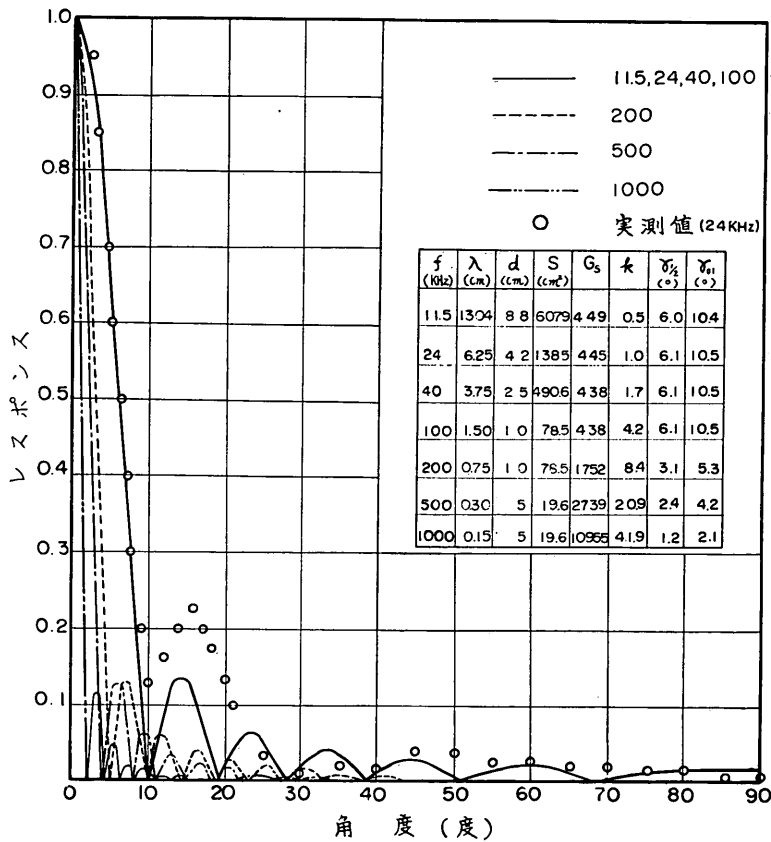


図-19 各振動子の指向特性



表-11 試作振動子の特性

周波数 $f$ (kHz)	音速度 (水中) $v$ (m/s)	波長 $\lambda$ (cm)	振動子の直径 $d$ (cm)	指向半減角 $\gamma_{1/2}$ (°)	指向零角 $\gamma_{01}$ (°)
11.5	1500	13.04	88.0	6.0	10.4
24.0	1500	6.25	42.0	6.1	10.5
40.0	1500	3.75	25.0	6.1	10.5
100.0	1500	1.50	10.0	6.1	10.5
200.0	1500	0.75	10.0	3.1	5.3
500.0	1500	0.30	5.0	2.4	4.2
1000.0	1500	0.15	5.0	1.2	2.1

ただし、11.5, 24, 40 kcの振動子の直径は反射笠開口面の直径である。

および 3.83 であるから式(22)により

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{1/2} &= \sin^{-1}(0.71\lambda/d) \\ \gamma_{01} &= \sin^{-1}(1.22\lambda/d) \end{aligned} \right\} \dots\dots(33)$$

上記の式を使って逆に  $\lambda$  をパラメータとした  $d \cdot \gamma_{1/2}$  および  $\gamma_{01}$  の関係を求めることができ、振動子設計に利用することができる。

表-11 に指動子直径と指向角の関係を示した。

(3) 水槽と超音波ビームの広がり円

実験水槽で超音波の反射伝搬特性の測定を行なうには少なくとも送受波器の指向半減角を6度以下に納めなければならない。なんとすれば水深  $x$  m の水槽で上記送受波器を使って超音波を放射すると超音波ビームの広がり円の直径  $D$  は、指向半減角を  $\gamma_{1/2}$  とすると次の式で表わされる。

$$D = 2x \tan \gamma_{1/2} \dots\dots(34)$$

いま、水深を 10.0m, 直径 2.4m の水槽で超音波ビームを使って実験を行なうには  $\gamma_{1/2}$  をいかほどにとればよいかというと、式(34)より

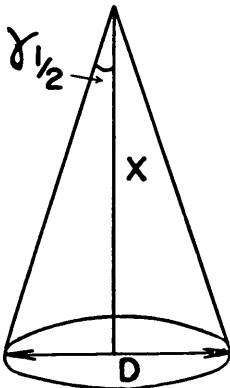


図-20 超音場ビームの広がり円

表-12 指向角と超音波ビームの水底における広がり円の直径 (水深 10.0m, 水槽直径 2.4m)

周波数 $f$ (kHz)	指向半減角 $\gamma_{1/2}$ (°)	広がり円の直径 $D$ (m)
11.5	6.0	2.10
24.0	6.1	2.14
40.0	6.1	2.14
100.0	6.1	2.14
200.0	3.1	1.08
500.0	2.4	0.84
1000.0	1.2	0.42

$$\gamma_{1/2} = \tan^{-1} \frac{D}{2x} \dots\dots(35)$$

で表わされるから、この式に  $x=10.0$  m,  $D=2.4$  m を代入して  $\gamma_{1/2}$  を求めると

$$\gamma_{1/2} = \tan^{-1} \frac{2.4}{2 \times 10.0} = \tan^{-1} 0.12 = 6.8^\circ$$

したがって  $\gamma_{1/2}$  が6度以下の送受波器を使えば壁の影響をいくぶん減少させることができよう。

試作した送受波器の指向半減角と超音波ビームの水底における広がり円の直径との関係を求めると表-12のごとくになる。したがって本送受波器はこの水槽において、誤差を少なく使用できるものと考えられる。

5.3. 送信出力特性と超音波放射

(1) 送信出力特性

図-9 に送信管陽極電圧一送信電圧の関係を示す。送信出力  $P_{SE}$  ( $W_{P-P}$ ) は負荷抵抗を  $R$  ( $\Omega$ ), 送信電圧を  $E_S$  ( $V_{P-P}$ ) とすると

$$P_{SE} = \frac{E_S^2}{R} \dots\dots(36)$$

で表わされる。

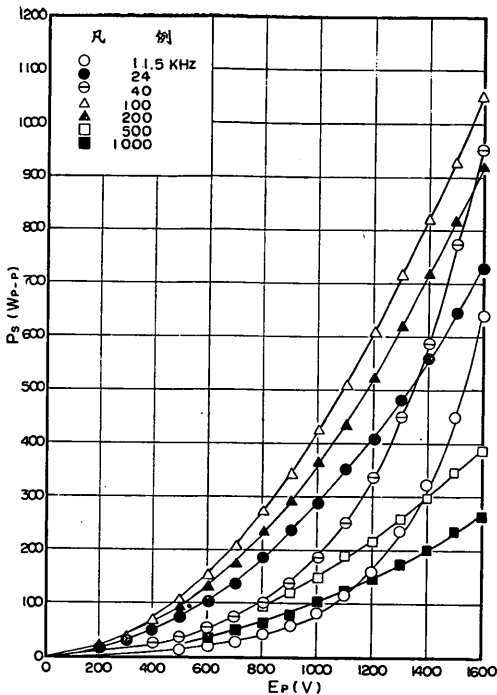


図-21 送信管陽極電圧と送信出力 (負荷抵抗 100Ω)

式(36)を用いて送信出力  $P_{SE}$  を求めて、送信管陽極電圧—送信出力の関係を示したのが図-21である。

この図によると送信管陽極電圧  $E_P$  を上げていくと、各周波数とも送信出力  $P_S$  は  $E_P$  の  $n$  乗に比例して増加する。この関係を式で示すと次のごとくなる。

$$P_{SE} = aE_P^n \quad \dots\dots(37)$$

ここで  $a, n$  とも定数

この関係は真空管の  $E_P-I_P$  特性曲線をもてもうなすけることであろう。

(2) 振動子の音響出力

発振器出力端子に送受波用振動子を接続して、その端子電圧を測定した結果を図-11に示す。

振動子の電気入力すなわち送信出力  $P_{SE}$  は式(7)で表わされる。音響出力  $P_a$  ( $W_{p-p}$ ) は送信出力  $P_{SE}$  ( $W_{p-p}$ ) に式(8)の電気音響変換率  $\eta_{ea}$  の積で表わされる。すなわち、

$$P_a = \eta_{ea} \cdot P_{SE} \quad \dots\dots(38)$$

式(36)および(38)を用いて、送信電圧  $E_S$  と振動子電気入力  $P_{SE}$  および音響出力  $P_a$  の関係を求めたのが、図-22と図-23である。

図-24と図-25には、送信管陽極電圧  $E_P$  を変化した

場合の送信出力  $P_{SE}$  と音響出力  $P_a$  の関係を周波数をパラメータとして示す。

音響出力  $P_a$  がわかれば、それと放射抵抗  $r_r$  によって、速度  $V_1$  が計算できる。すなわち放射抵抗  $r_r$  は、振動子の  $ka$  が大きいので  $r_r = \rho c$  となり、速度  $V_1$  は

$$V_1 = \sqrt{\frac{P_a}{r_r \pi a^2}} = \sqrt{\frac{P_a}{\rho c \pi a^2}} \quad \dots\dots(39)$$

となる。また、式(18)、(32)および図-14、17を用いて音圧の絶対値  $|P|$  を求めることができる。

(3) 電気音響変換率と感度

電気音響変換率  $\eta_{ea}$  を用いて送受波器の感度が求められる。送波器の電気入力を  $P_{SE}$  送波器の指向性利得を  $G_s$ 、電気音響変換率を  $\eta_{ea}$  とすると、正面方向  $x_0$  (cm) 離れた点の音の強度  $I_s$  は、

$$I_s = \frac{P_{SE} \eta_{ea} G_s}{4\pi x_0^2} \quad [W/cm^2] \quad \dots\dots(40)$$

である。図-26に送信管陽極電圧  $E_P$  と  $I_s$  との関係を示した。

この点の音圧を  $p_s$  [ $\mu$ ber] とすると、媒質の音響インピーダンス密度  $\rho c$  を用いて

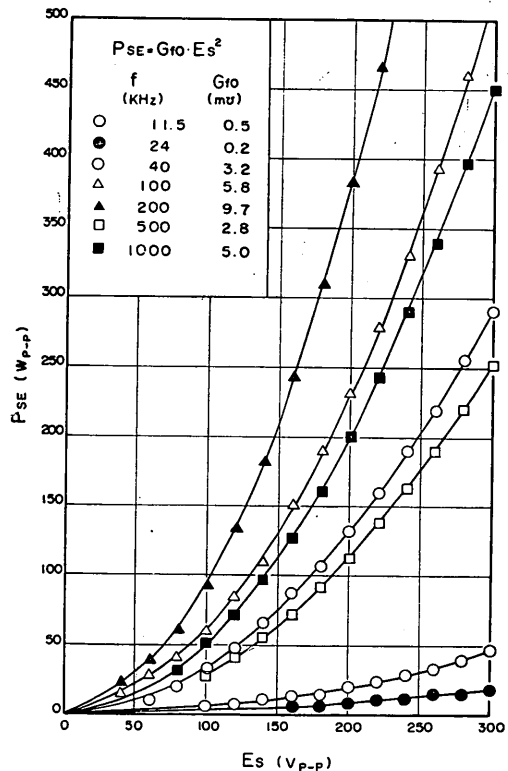


図-22 送信電圧と振動子電気入力

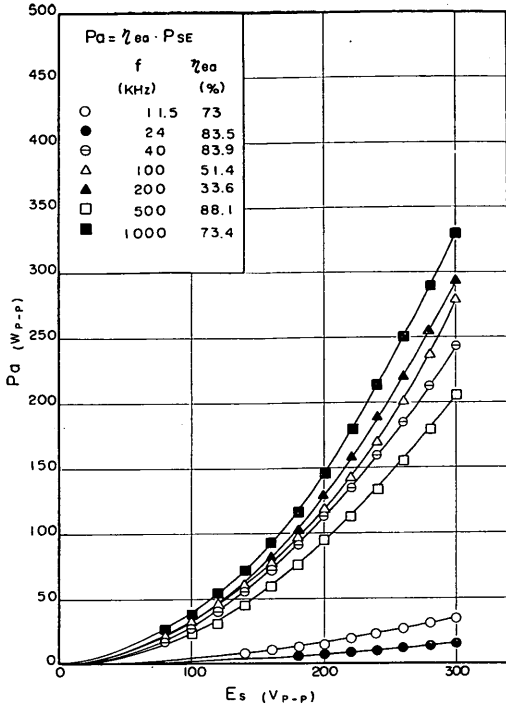


図-23 送信電圧と音響出力

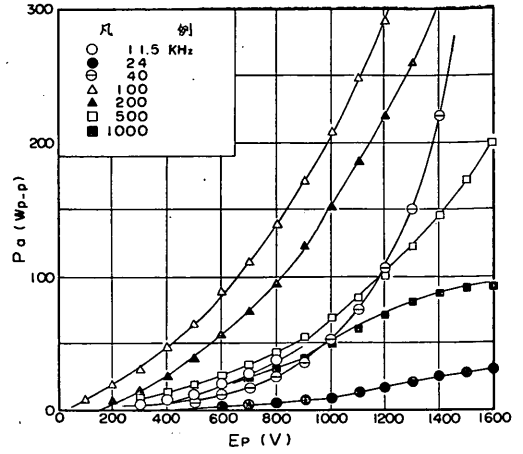


図-25 送信管陽極電圧と音響出力

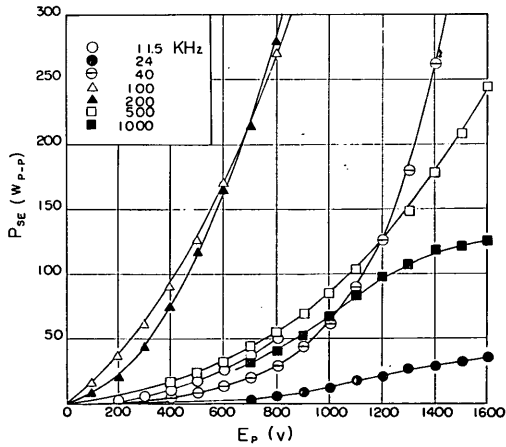


図-24 送信管陽極電圧と送信出力

$$I_s = ps^2 / \rho c \times 10^{-7} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad \dots\dots(41)$$

したがって、送波電力感度<sup>6)</sup>  $S_P$  は、 $x_0=100$  cm であるから

$$S_P = \frac{ps^2}{P_{SE}} = \frac{\rho c \eta_{ea} G_s}{4\pi} \times 10^3 \text{ [1 } \mu\text{ bar at 1 m/1 W]} \quad \dots\dots(42)$$

である。

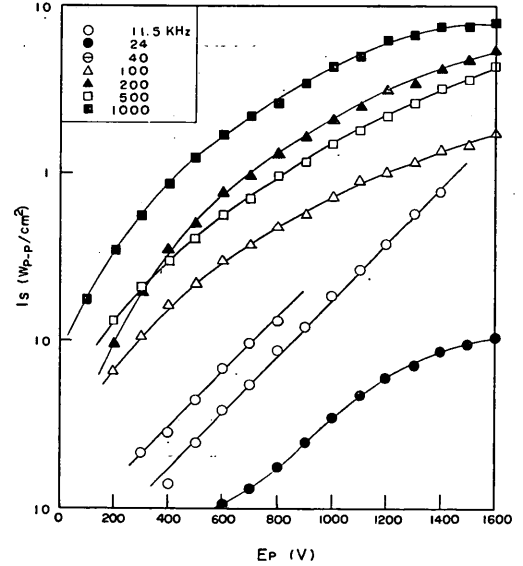


図-26 送信管陽極電圧と送波指標点における強度

送波電圧感度<sup>6)</sup>  $S_E$  は  $P_{SE} = G_{fo} \cdot E_s^2$  であるから

$$S_E = \frac{ps}{E_s} = \sqrt{\frac{\rho c \eta_{ea} G_s G_{fo}}{4\pi}} \times 10^3 \text{ [1 } \mu\text{ bar at 1 m/1 V]} \quad \dots\dots(43)$$

となる。

また受波電圧感度<sup>6)</sup>  $M_E$  は次のような式で表わされる。

$$M_E = \frac{2Z_0 S_E}{\rho f} \times 10^{-5} \text{ [1 V/1 } \mu\text{ bar]} \quad \dots\dots(44)$$

ここで  $\rho$  は媒質の密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $f$  は周波数 (Hz)、 $Z_0$

表-13 試作送受波器の感度

周波数 $f$ (KHz)	指向性利得 $G_S$	自由コンダクタンス $G_{fo}(m\Omega)$	自由インピーダンス $ Z_0  (\Omega)$	電気音響 変換率 $\eta_{ea} (\%)$	送波電力感度 $S_P(\mu\text{bar/W})$	送波電圧感度 $S_E(\mu\text{bar/V})$	受波電圧感度 $M_E (V/\mu\text{bar})$
11.5	449	0.5	184.5	73.0	$3.91 \times 10^6$	$1.40 \times 10^3$	$4.49 \times 10^{-4}$
24.0	445	0.2	196.0	83.5	$4.44 \times 10^6$	$9.42 \times 10^2$	$1.54 \times 10^{-4}$
40.0	438	3.2	161.7	83.9	$4.39 \times 10^6$	$3.75 \times 10^3$	$3.03 \times 10^{-4}$
100.0	438	5.8	103.0	51.4	$2.69 \times 10^6$	$3.95 \times 10^3$	$8.14 \times 10^{-5}$
200.0	1752	9.7	87.4	33.6	$7.03 \times 10^6$	$8.29 \times 10^3$	$7.22 \times 10^{-5}$
500.0	2739	2.8	49.6	81.8	$2.68 \times 10^6$	$8.69 \times 10^3$	$1.72 \times 10^{-5}$
1000.0	10955	5.0	19.7	73.4	$9.60 \times 10^6$	$2.19 \times 10^4$	$8.63 \times 10^{-6}$

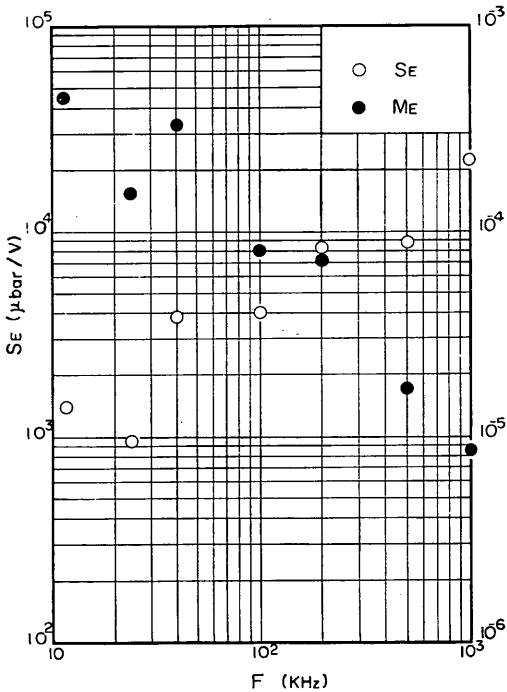


図-27 振動子の感度

は測定媒質中に置いたときの自由インピーダンス ( $\Omega$ ) である。表-13 および 図-27 には、式 (42), (43), (44) を用いて試作振動子の感度を求めた結果を示した。

図-27 によれば周波数が高いほど、送波器、受波器とも感度がよいことがわかる。これは式(42), (43), (44)をみればうなずけることであろう。

5.4. 記録器の反響記録特性

図-28 に記録器感度目盛とマージンとの関係を送信出力をパラメータとして示した。この図によると各周波数共、記録器感度目盛 (Gain) を上げていくと、マージン

M はほぼ直線的に上昇し、受信増幅器の真空管増幅特性に一致する。またあまり感度を上げすぎると、残響や雑音が多くなり、記録紙全体が黒くなってマージンの測定が困難となる。その黒くなる限界の記録器感度目盛を各周波数ごとに表に示すと表-14のごとくなる。すなわち記録器感度目盛を7以上に上げると記録紙全体が黒くなり、水深の読みとりが困難になることがわかる。

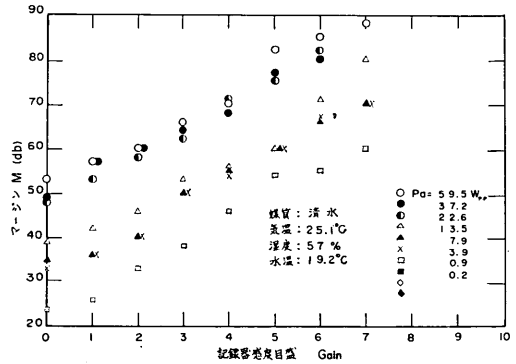


図-28 a 11.5 KHz 受信感度特性

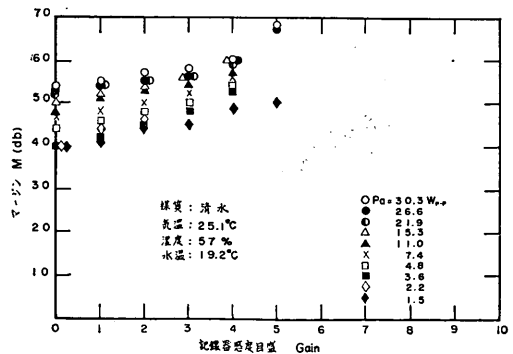


図-28 b 24 KHz 受信感度特性

音響測深機に関する研究

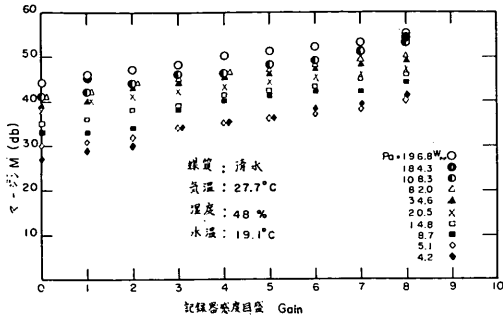


図-28c 40 KHz 受信感度特性

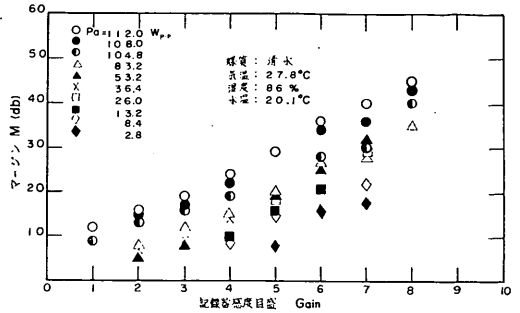


図-28g 1 MHz 受信感度特性

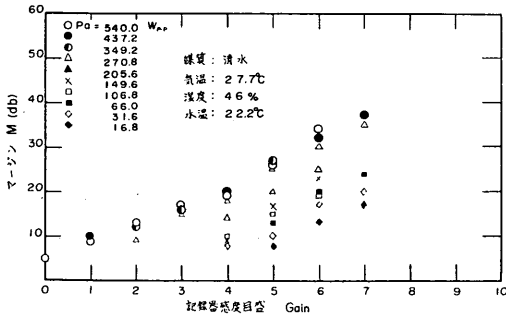


図-28d 100 KHz 受信感度特性

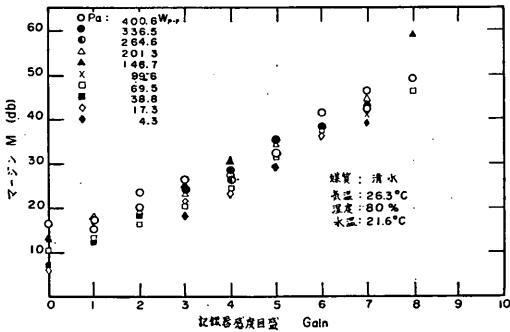


図-28e 200 KHz 受信感度特性

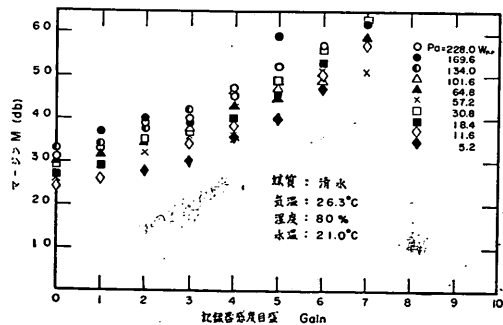


図-28f 500 KHz 受信感度特性

表-14 各周波数ごとの限界記録器感度目盛

周波数 $f$ (KHz)	限界記録器感度目盛 Gain
11.5	7
24.0	5
40.0	8
100.0	7
200.0	8
500.0	7
1000.0	8
平均値	7

写真-21 には各周波数ごとの送信波形と記録入力波形のシンクロスコープ観測波形を示す。写真上段の波形が送信波形であり、下段が受信波形である。受信波形の左端のパルスが誘導で記録器回路に入った送信波の一部で、右側にあるパルスが反響受信波形である。送信パルスと受信パルスとの間の距離が超音波パルスが送波器を出て水底で反射して帰ってくるまでの往復の時間  $t$  であ

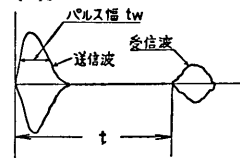


図-29 送信波と受信波

り、送受波器と水底との距離  $x$  がわかれば、おおよその超音波の伝搬速度  $C$  が次式により測定できる。

$$C = \frac{2x}{t} \quad \dots\dots (45)$$

写真-22 は各周波数ごとの記録紙記録例を示す。この記録を見ると低周波数特に 11.5 KHz は、音響出力  $P_a$

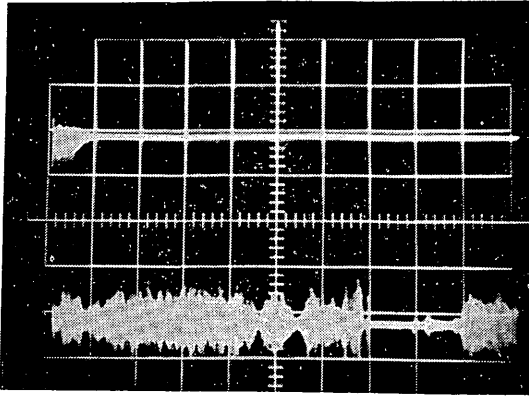


写真-21 a 11.5 KHz 送受信波形

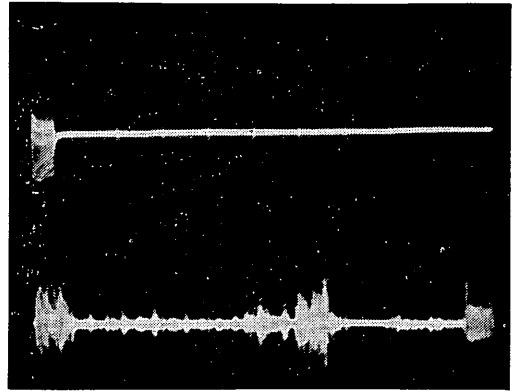


写真-21 d 200 KHz 送受信波形

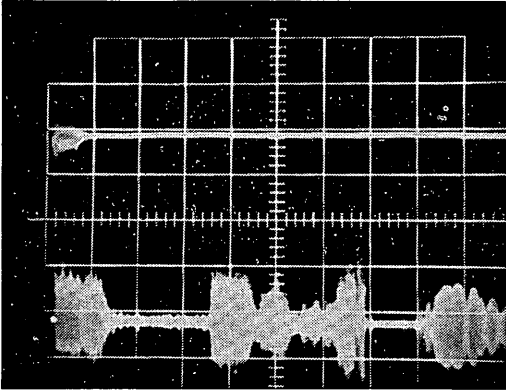


写真-21 b 24 KHz 送受信波形

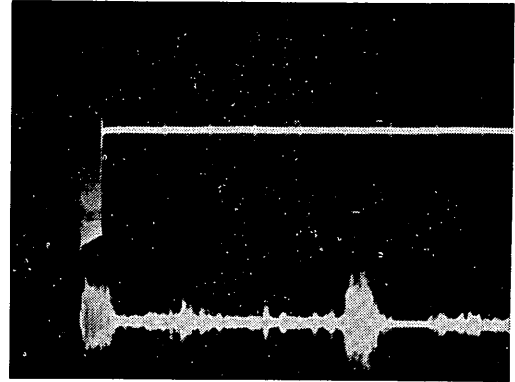


写真-21 e 500 KHz 送受信波形

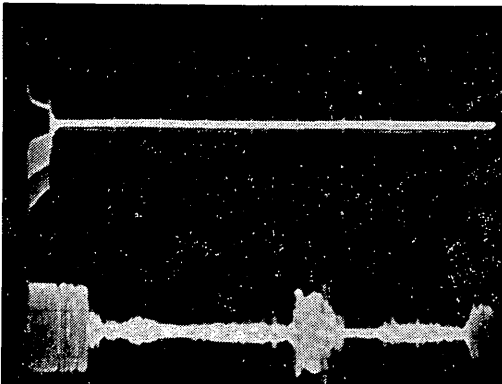


写真-21 c 100 KHz 送受信波形

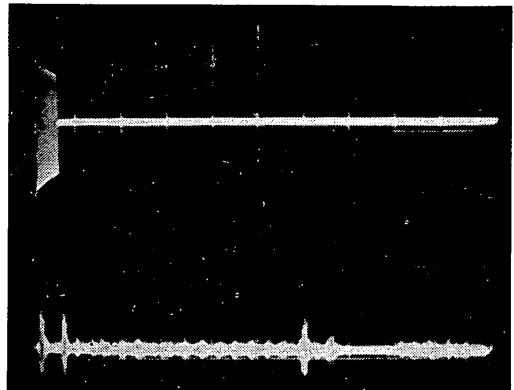


写真-21 f 1 MHz 送受信波形

## 音響測深機に関する研究

が  $0.2 W_{P-P}$ 、記録器感度目盛が 0、抵抗減衰器で受信入力を 20 dB しぼって記録紙に描かせたものであるが、指向半減角  $\gamma_{1/2}$  が 6 度でも、サイドローブが大きいため、水槽壁からの残響が大きく、やや黒ずんだ記録が得られた。高周波数の 1 MHz の記録をみると、音響出力  $P_a$  が  $112 W_{P-P}$  記録器感度目盛が 5、抵抗減衰器で受信入力をしぼらないで記録紙に描かせたものであるが、残響は全く見られなかった。これは超音波ビームの指向半減角  $\gamma_{1/2}$  が 1.2 度と非常に小さく、かつサイドローブが出る角度が小さいので側壁による残響の影響が少なかったからであろう。また反響記録の線の太さが細くて、水中での超音波の伝搬損失が大きいことを物語っている。

受信出力電圧  $E_2 (V_P)$  とマージン  $M (dB)$  との関係を図-30 に示す。ばらつきは多少あるが、このばらつきは記録ペンと記録紙との間の接触抵抗がペンの回転によ

り変動するためや送信出力  $E_s$  の時間的変動および受信増幅器の増幅度の変動による測定誤差に起因するものと考えられる。その平均値をとって曲線を描くと図のような関係曲線が得られる。この曲線の方程式を最小自乗法により求めると次のような式が得られた。

$$M = 6.318 \times 10^{-4} E_2^{1.917} \quad \dots\dots (46)$$

この式によりマージン  $M (dB)$  は受信出力電圧  $E_2 (V_P)$  のほぼ自乗に比例する。また図-30 のグラフから外そう法により  $M$  が 0 (dB) のとき、すなわち記録可能限界出力電圧 (記録紙に記録できる最低電圧) を求めると約 40~50  $V_P$  の値が得られた。このことから音響測深機を設計する際に、受信増幅度の決定の目安として、この記録可能限界出力電圧を利用することができよう。

## 6. 結 論

以上の実験および考察によって明らかになった事項を

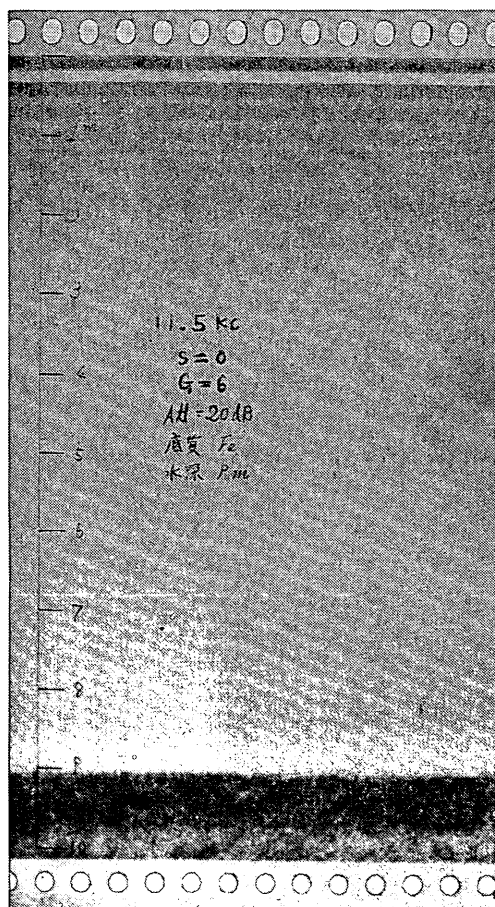


写真-22 a 11.5 KHz 測深記録例

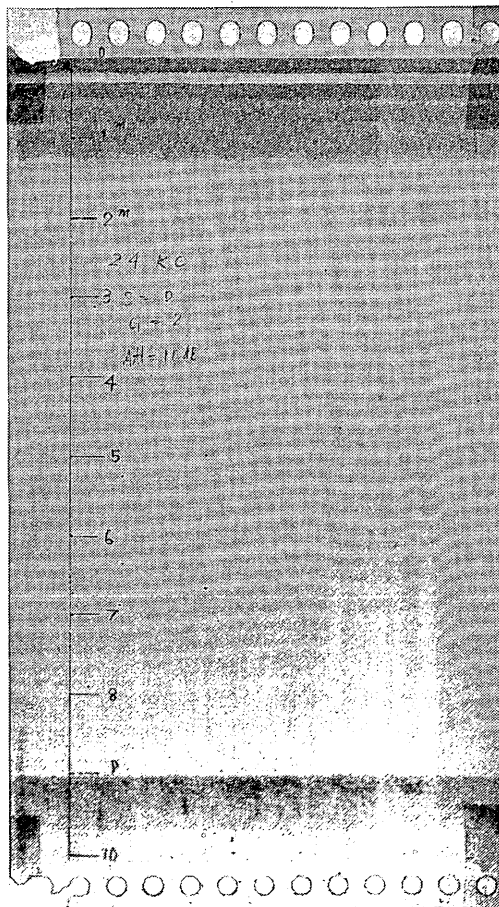


写真-22 b 24 KHz 測深記録例

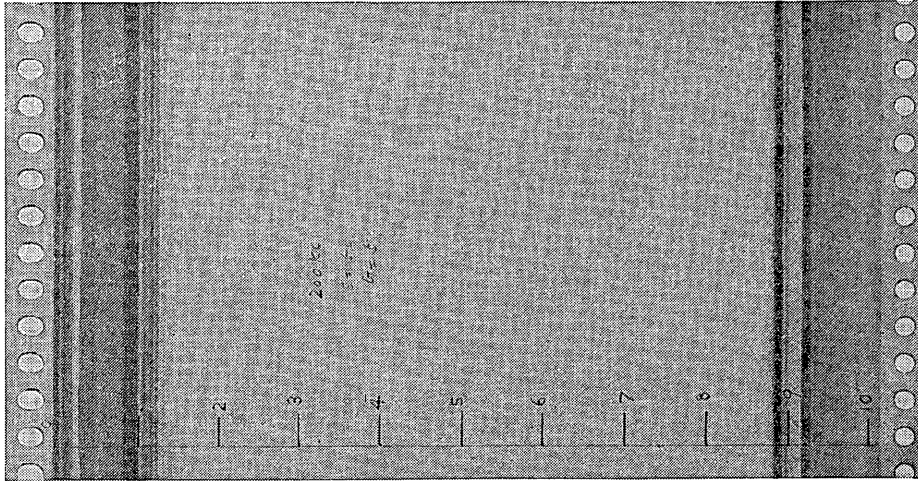


写真-22 e 200 KHz 測深記録例

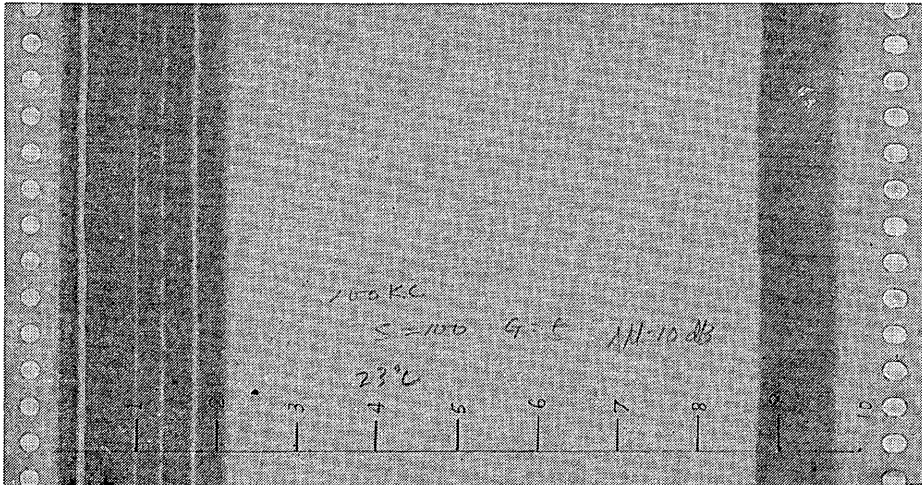


写真-22 d 100 KHz 測深記録例

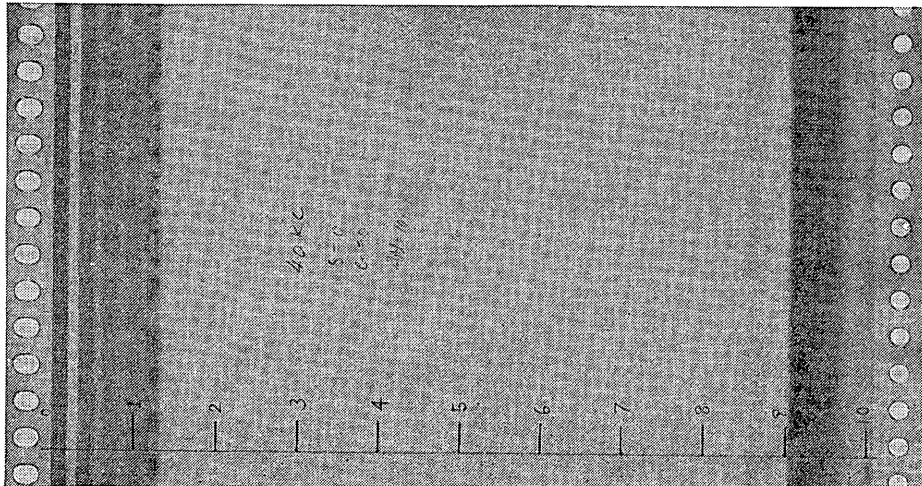


写真-22 c 40 KHz 測深記録例



音響測深機に関する研究

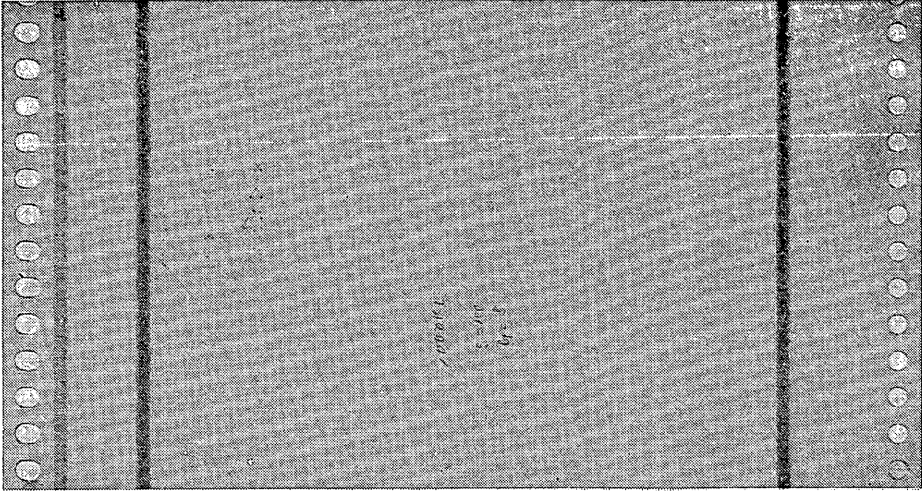


写真-22 g 1 MHz 測深記録例

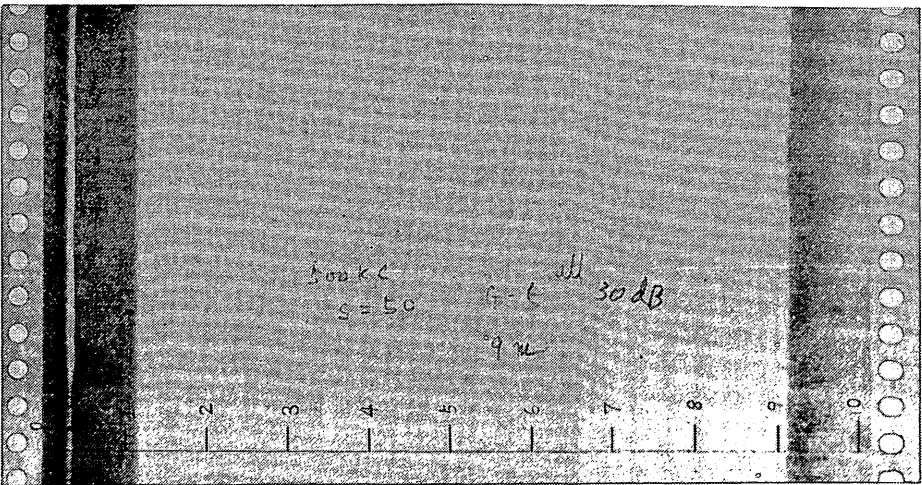


写真-22 f 500 KHz 測深記録例

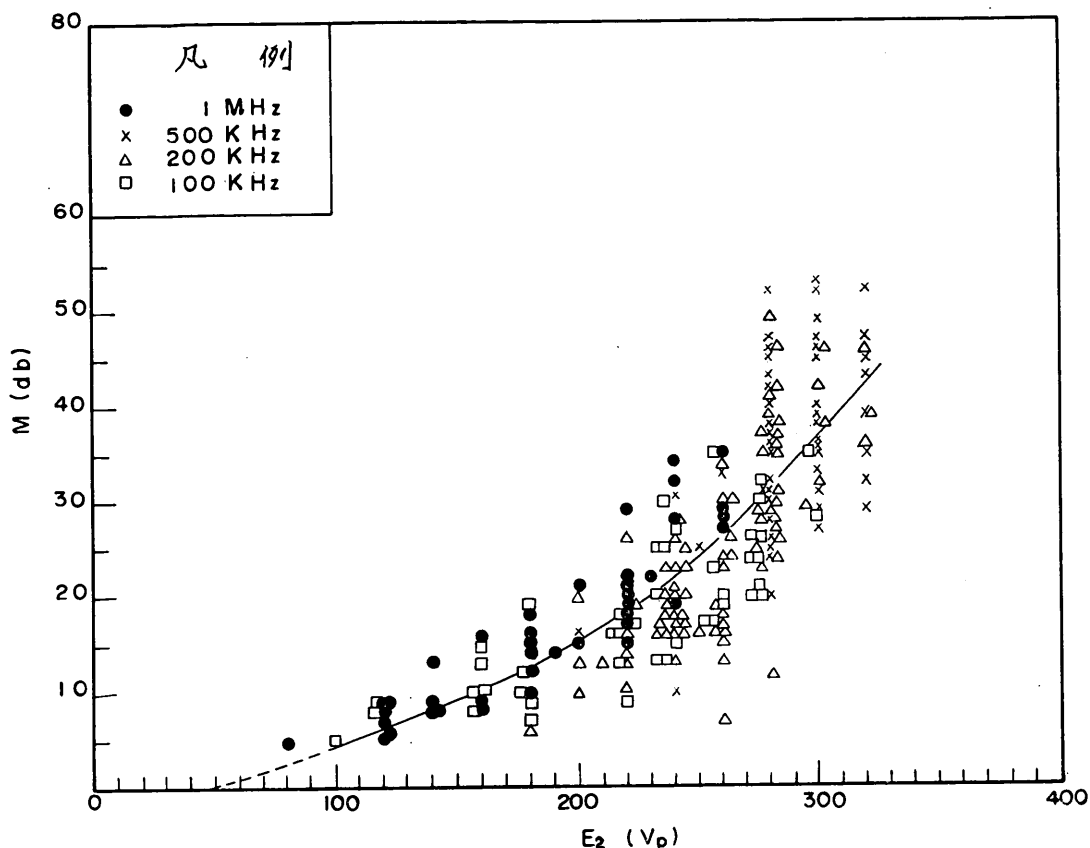


図-30 受信出力電圧とマージン特性

要約すると次のようになる。

- 1) 振動子の周波数アドミタンス特性を求めることにより電気音響変換能率や音響的諸定数を算定することができる。
- 2) 反射笠付環状振動子の単位面積当りの出力および指向性特性は円形ピストン振動面を持った振動子のそれと等価であると考えられる。
- 3) 振動子入力端電圧を測定することにより、送信電力が算定され、かつ電気音響変換能率がわかれば音響出力が推定できる。
- 4) 記録器の受信出力電圧と反響余裕値（マージン）との関係は式(46)のごとく、受信出力電圧のほぼ自乗に比例する。また記録可能限界出力電圧は約  $40 \sim 50 V_P$  であって、音響測深機の設計に利用できよう。

参 考 文 献

- 1) 木原純孝：浮泥探査に関する実験，第14回港湾機械技術研究会資料，1967年
- 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
- 3) 実吉純一：電気音響工学，コロナ社，1958年，p. 31~33
- 4) 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 —，港湾技研資料 No. 45，1968年，p. 77
- 5) 田中哲郎：チタン酸バリウムとその応用，オーム社，1962年，p. 127~129
- 6) 熊野正雄：超音波機器の設計，オーム社，1965年，p. 62~64

(1968.12.25 受付)

## 記 号 表

$A$ : 力係数	$Q$ : 共振の鋭さ
$a$ : 振動子の半径	$R$ : 指向性関数
$B_{fo}$ : 自由サセプタンス	$R_1$ : 振動子の等価回路定数 (抵抗)
$C_1$ : 振動子の等価回路定数 (静電容量)	$S$ : 振動子放射面積
$C_a$ : " "	$s$ : 等価スティフネス
$c$ : 音の伝搬速度	$r$ : 機械抵抗
$D$ : 超音波ビームの広がり円の直径	$r_a$ : 等価放射抵抗
$d$ : 振動子の直径	$r_r$ : 放射抵抗 ( $\approx \rho c$ )
$E_S$ : 送信電圧	$t$ : 時間
$E_B$ : 受信出力電圧	$V_1$ : 振動板の振動速度
$e$ : 自然対数の底 = 2.71828	$x$ : 距離または水深
$f$ : 周波数	$\dot{Y}_{fo}$ : 自由アドミッタンス
$G_{fo}$ : 自由コンダクタンス	$\dot{Y}_a$ : 制動アドミッタンス
$G_S$ : 指向性利得	$\dot{Y}_{mo}$ : 水中における動アドミッタンス
$I_S$ : 送波指標点における送信波強度	$\dot{Y}_{moo}$ : 空気中における動アドミッタンス
$J_1(Z)$ : 第一種第一次のベッセル関数	$Z_0$ : 自由インピーダンス
$j$ : 虚数単位 ( $= \sqrt{-1}$ )	$\beta$ : 角度
$k$ : 波長定数 $2\pi/\lambda$	$\gamma$ : 角度
$L_1$ : 振動子の等価回路定数 (インダクタンス)	$\tau_{1/2}$ : 指向半減角
$M$ : 反響余裕値 (マージン)	$\tau_{01}$ : 指向第一零角
$m$ : 振動子の等価質量	$\theta$ : 位相角
$P_a$ : 音響出力	$\lambda$ : 波長
$P_{SE}$ : 送信出力	$\pi$ : 円周率 (3.14159)
$p$ : 音圧	$\rho$ : 密度
	$\Phi$ : 速度ポテンシャル