

## 海中音響信号伝搬試験装置の製作及び その海上試験結果

土屋利雄\*<sup>1</sup> 中西俊之\*<sup>1</sup> 網谷泰孝\*<sup>1</sup>  
山本浩文\*<sup>1</sup> 青木太郎\*<sup>1</sup> 許 正憲\*<sup>1</sup>

我々は現在、音響による画像伝送システムの開発を行っており、JAMSTECTR 17において基礎的な伝送試験について報告した。

しかし、実海域において伝送試験を行うためには、海中において特定の深度で長時間にわたり、任意の安定した信号を送信することのできる装置が必要である。我々は曳航式のソーナーシステム等に使用されている二重外装ケーブルを利用した音響信号伝搬試験装置を開発した。そして、この装置を用いて水深方向最大2500mまでの画像信号の伝送を行い、良好な成果を得た。

### Production of Underwater Acoustic Signal Propagation Test Device and Results of Sea Test

Toshio TSUCHIYA,\*<sup>2</sup> Toshiyuki NAKANISHI,\*<sup>2</sup> Yasutaka AMITANI\*<sup>2</sup>  
Hirofumi YAMAMOTO,\*<sup>2</sup> Taro AOKI,\*<sup>2</sup> Masanori KYO\*<sup>2</sup>

We studied video signal propagation via acoustic signals from the *SHINKAI 2000* to the mother ship and developed a basic system for propagation tests in an anechoic tank. In propagation tests at sea, a different device is required to transmit a stable acoustic signal from a fixed underwater depth for several hours. We therefore developed an underwater acoustic signal propagation test device that is connected to the deep sea sonar system towing rig by a double armored coaxial cable.

This paper describes the device's method and performance and the results of sea tests. The results indicate that it is possible to propagate a slow scan video signal over a long distance (B/W signal 2,500 m, color signal 1,500 m) between the equipment and the surface ship using various modulation methods.

---

\*1 深海開発技術部

\*2 Deep Sea Technology Department

### 1. はじめに

音響信号による画像伝送システムの開発においては、既に報告したとおり<sup>1)</sup>、画像の品位は受信点におけるS/Nの影響が大きい。ところが、音波は周波数が高くなるにつれて伝搬減衰が大きくなるので、使用周波数が伝送距離に影響する。また、広帯域を使用する場合、下限周波数と上限周波数の減衰の違いによって画像の品位が劣化する。

そこで我々は、伝送距離に対する信号劣化の関係を把握するために、音響信号伝搬試験装置を製作したのでその装置について述べさらに実海域において本装置を用い2500mまでの画像伝送試験を行ったので併せて報告する。

### 2. 装置の設計条件

音響信号伝搬試験装置（以下「試験装置」という。）を製作するにあたっては、次のような事項を可能とすることを条件とした。

- (1) 海中から任意の周波数や波形の音響信号を送信でき、しかも音波伝送距離を自由に変えることができること。
- (2) 海中の送波器について次のような項目が船上で計測できること。
  - ①送波器印加電圧、送波レベル、送波波形
  - ②送波器の方向（ロール、ピッチ、方位）
- (3) 船上から次の項目が設定できること。
  - ①送信器出力レベル
  - ②送信出力インピダンス
- (4) 画像信号のように連続した信号波を長時間にわたって大出力で送信できるように、電力増幅器や電源は十分余裕のあるものを使用すること。
- (5) 2個以上の送波器を用いて信号多重伝送試験が可能であること。

### 3. 装置の概要

前述のような設計条件を満足させるために図1に示すような試験装置を製作した。

この試験装置は基本的には船上部と水中部に分かており、船上の信号発生部で発生した任意の信号を信号伝送路により水中部に伝送し、水中の送信部により、音響信号に変換して、水中に送信し、船上において、音響信号を受信するという動作を行うものである。この信号伝送路には曳航式

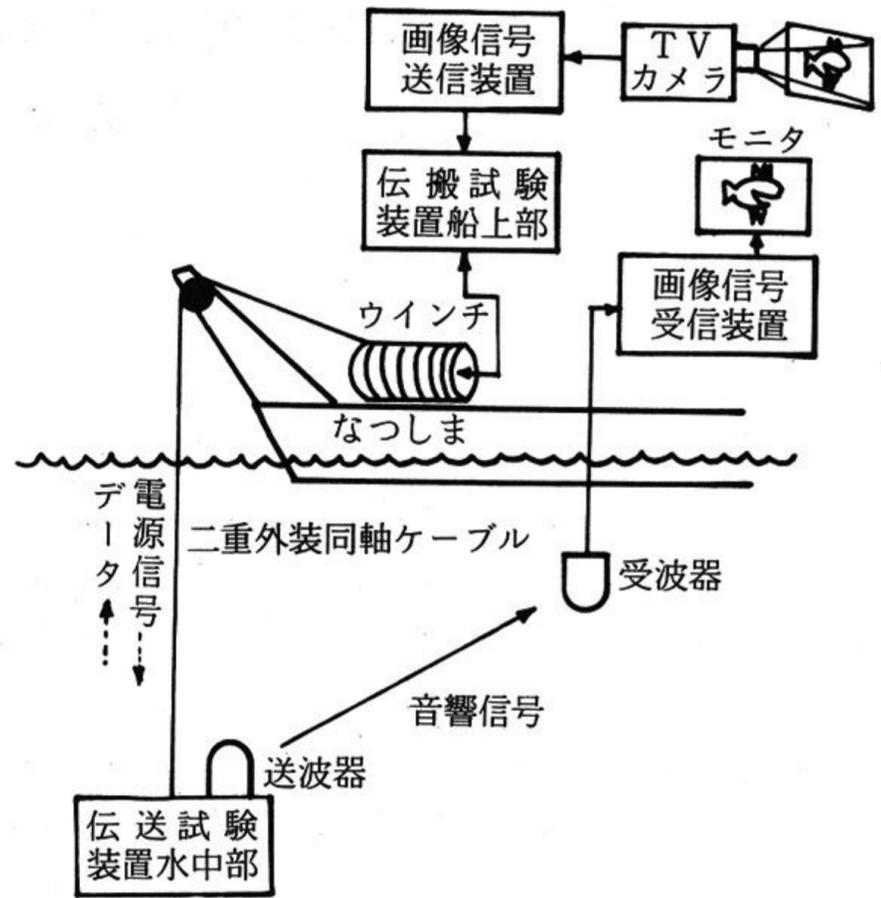


図1 伝送試験装置の概念図  
Basic System of the Underwater Acoustic Signal Propagation Test Equipment.

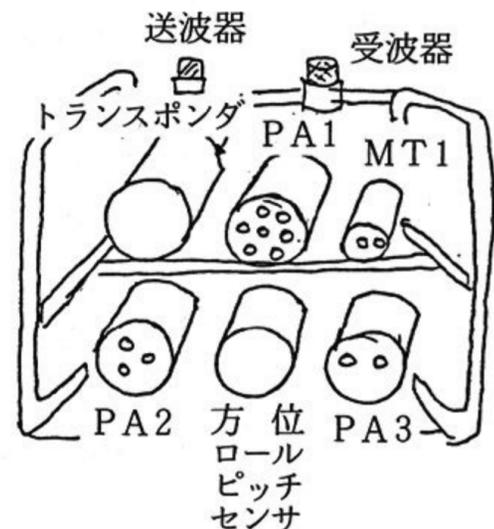
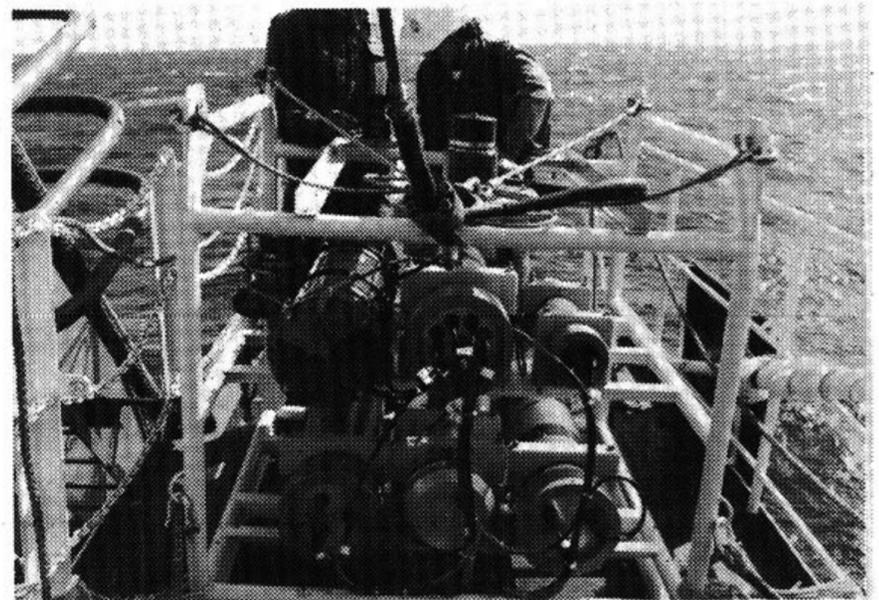


写真1 試験装置水中部の外観  
Appearance of Underwater Acoustic Signal Propagation Test Equipment (Underwater Devices)

のソーナーシステム<sup>2)</sup>や深海TVシステム<sup>3)</sup>等に使用されている二重外装同軸ケーブルを利用し、信号を伝送するとともに、水中部を吊り下げウィンチ操作によりケーブルの繰り出し長を変えて任意の音波伝送距離を設定する。

実際には、水中部と船上部との間で一本の二重外装同軸ケーブルを用いて、周波数の多重化によって各種の送受信及び水中部への電力供給を行っている。

なお、この水中部の位置及び距離の計測は、水中部に搭載した音響トランスポンダを使って音響測位装置により行うこととした。

水中部の外観は写真1に示すように5個の耐圧容器（高張力アルミ製）と送波器及び音響トランスポンダにより構成され、1.2×1.2×1.2 m（縦×横×高さ）のオープンフレーム上に装備されている。船上部は写真2に示すように1台のラックにまとめている。

図2に全体の系統図を示した。

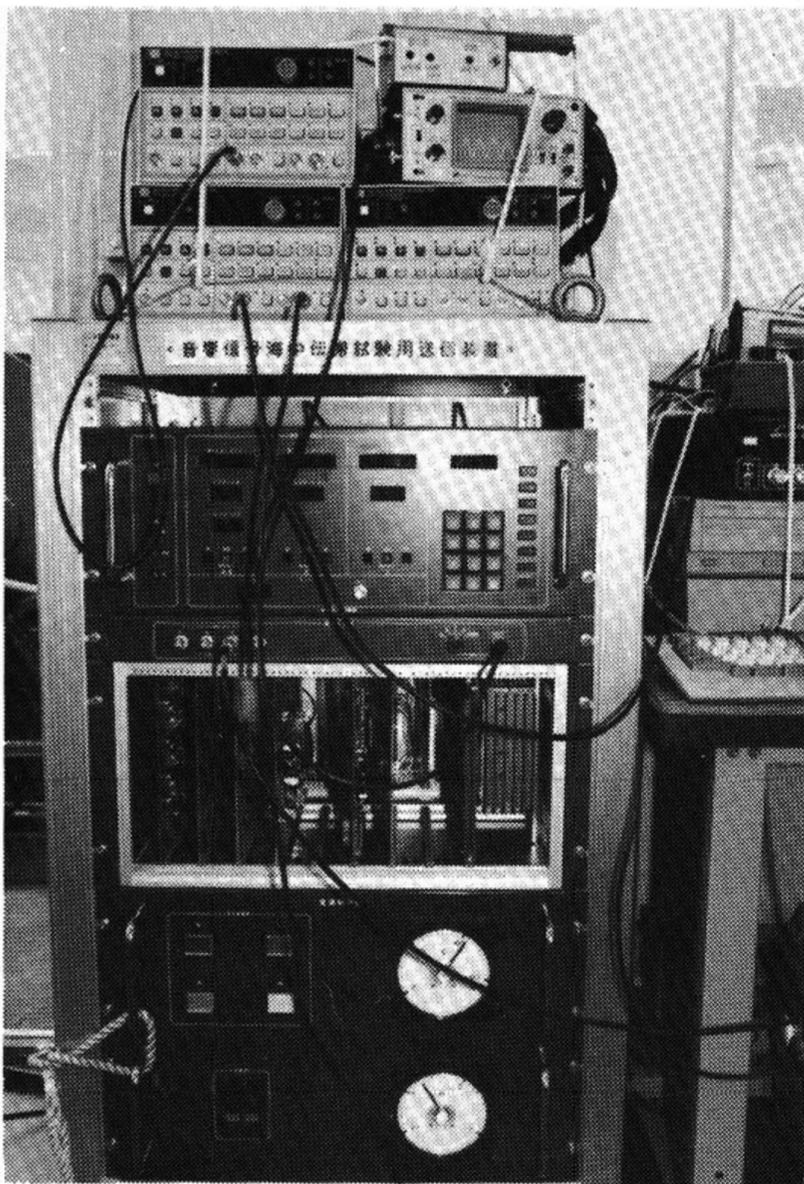


写真2 試験装置船上部の外観

Appearance of Underwater Acoustic Signal Propagation Test Equipment (Shipboard Devices)

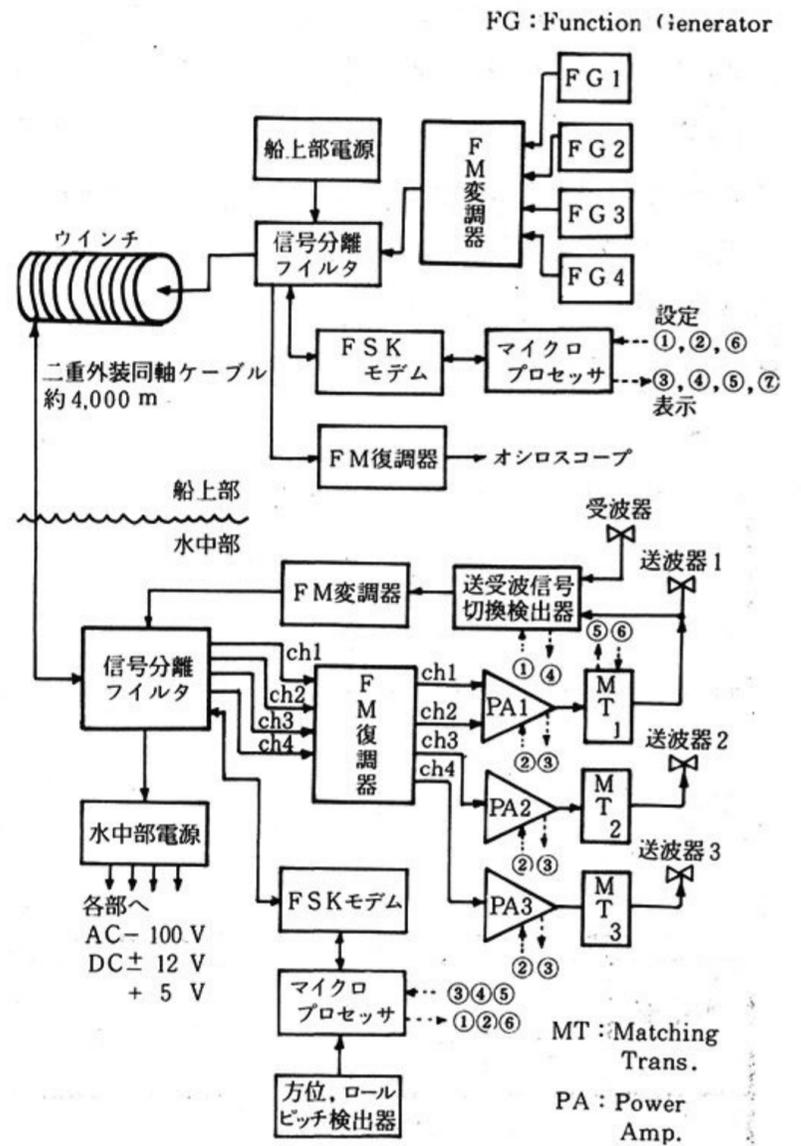
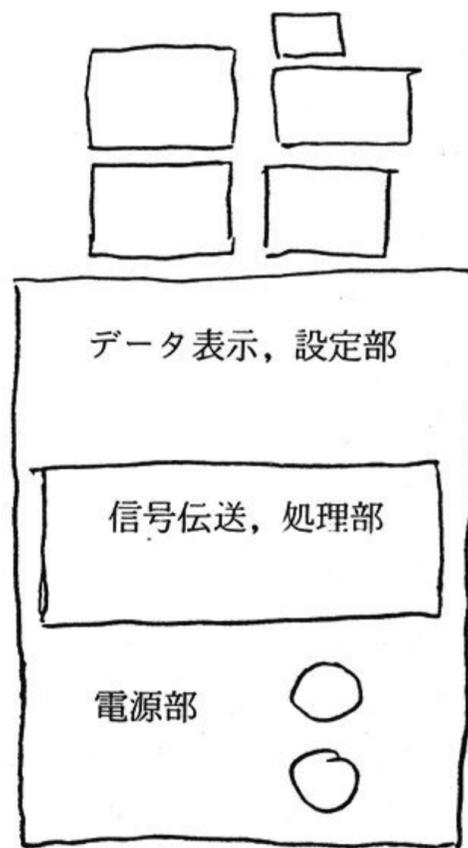


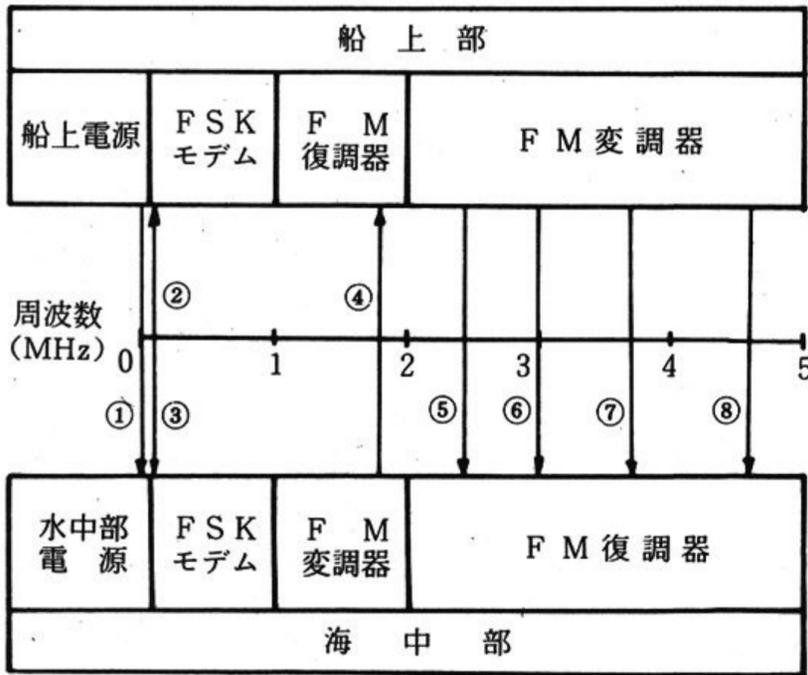
図2 伝搬試験装置の構成図

Block Diagram of the Underwater Acoustic Signal Propagation Test Equipment



### 3.1 信号伝送系

前述したように1本の同軸ケーブルにより電源を含めたすべての信号の往復伝送を行うために、それぞれの信号に搬送波周波数を割り当てている。この割り当てを図3に示す。この周波数は、二重外装同軸ケーブルの周波数特性<sup>3)</sup>を考慮した上で、相互の高調波が妨害しないように選択している。



(a) 周波数の割り当てと方向

番号	区分	中心周波数	偏移幅	用途
①	A C	60Hz	-	電源
②	デジタル	125/135 kHz	±10 kHz (FSK)	送信レベル設定確認、インピダンス設定確認 方位、ロール、ピッチ、データ
③	デジタル	125/135 kHz	±10 kHz (FSK)	送信レベル設定、インピダンス設定 送受信器切換え
④	アナログ	1.80 MHz	±100 kHz (FM)	海中部の送受信信号の伝送
⑤		2.44 MHz	"	電力増幅器PA1の駆動用信号の伝送
⑥		3.00 MHz	"	" PA2 " "
⑦		3.70 MHz	"	" PA1 " "
⑧		4.60 MHz	"	" PA3 " "

(b) 信号の諸元と用途

図3 二重外装ケーブルにおける周波数の割り当て  
Frequency Assignments at the Double Armored Coaxial Cable

まず、図3中の⑤⑥⑦⑧は音響信号として送出するための信号を伝送するチャンネルである。船上部の信号発生部の伝送すべき信号(5k~50kHzに限定している)で搬送波を周波数変調し、水中部へ伝送している。この場合、信号の立ち上がりやS/Nを考慮し、搬送波の周波数偏移幅は変波の最高周波数の4倍(±100kHz)としている。<sup>4) 5)</sup>

ここでケーブルで伝送する信号をFMとするこ

とにより、周波数成分のみを伝送すればよいのでケーブルによる振幅成分の伝送損失特性を無視することができ、長さの異なるケーブルを使用しても、周波数による振幅の減衰特性の補正を行う必要がなくなる。

水中部では、各々のチャンネルの搬送波周波数に対応するフィルタにより、周波数成分を分離し、周波数弁別器により変調波形を再現し、それぞれ独立に3台の電力増幅器を駆動して送波器により音響信号として海中に送出する。

一方、水中部の受波器で得られた受波信号や送波器の印加電圧信号は④のチャンネルを使い、船上部に伝送する。船上部では同様に周波数弁別器により波形を再現し、オシロスコープ等でレベル測定や波形の観測を行うことができる。

またデジタル系の信号は、船上部と水中部に装備されたマイクロプロセッサ間で通信が行われ、船上からは、出力レベルや出力インピーダンスの選択、受波信号と印加電圧信号の検出器の切換えを行い、水中部からはそれらの作動確認の信号の伝送及び、ロール、ピッチ、方位データの伝送を行う。いずれの方向の伝送も125kと135kHzのFSK信号を用い、モデムを通して相互間の送受信を行うが、データはすべてシリアルでマイクロプロセッサに転送して、そこで割り込み処理を行う。図3(b)②、③にこれらのデータ信号の諸元と用途を示す。なお、プロセッサのソフトウェアはすべてROM化し、電源を投入すればただちに作動可能となるようにした。

また、図3の①の電源電流は、交流周波数(船では60Hz)のまま、船上部の電源から水中部へ伝送し、信号とフィルタで分離された後、水中部の電源でAC 100VとDC ±15V及び+5Vに変換し、各水中部へ供給している。

### 3.2 送信部

送信部は電力増幅器、整合トランスとで構成されている。

電力増幅器の性能要目を表1に示す。このうち連続出力500Wを確保するために、最終段のパワートランジスタの放熱効率を向上させる必要から、ヒートパイプと水中に露出した放熱フィンとを直結とし、ヒートパイプ上にパワートランジスタを配置する方法をとっている。放熱用フィンは写真3

で示すような形状をしており耐食アルミに塗装を行わないで海中に露出させている。

表1 電力増幅器の性能  
Specification of Power Amplifier

作業モード	B 級
増幅周波数	5k ~ 50kHz (-3dB)
周波数特性	帯域内で±1 dB以下
電力利得	約40dB
入力インピーダンス	75 Ω
出力インピーダンス	8 Ω
連続定格出力	500W
最大出力	1kW (デューティ比50%以下時)
電源電圧	100 VAC

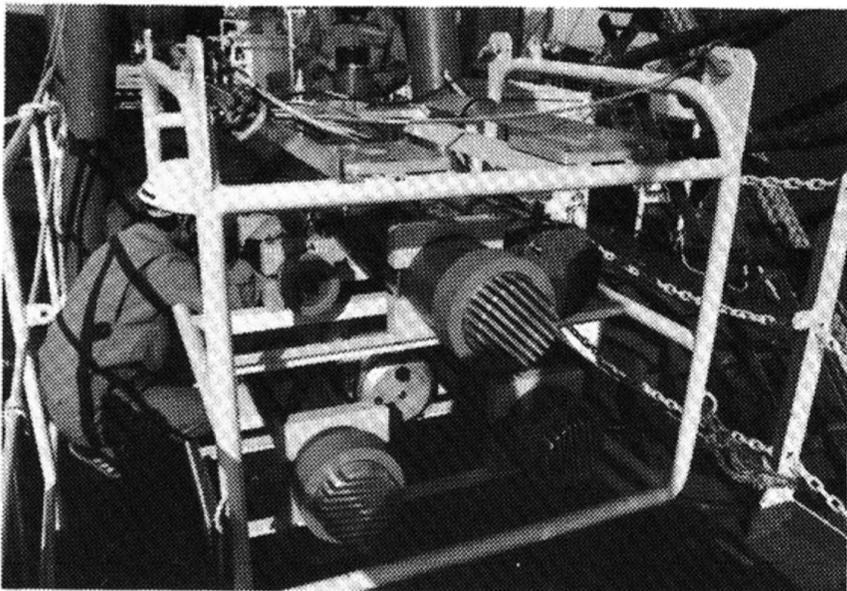


写真3 電力増幅器の放熱用フィンの外観  
Appearance of Cooling Fin for Power Amp.

電力増幅器を図2で示したようにPA1, PA2及びPA3の3台用意し、同時に異なった信号を送信することが可能である。また電力増幅器の出力インピーダンスは8Ωとし、整合トランスを介して音響送波器の出力周波数によるインピーダンスの変化に対応させている。

MT1のインピーダンスの切換えは、船上のプロセッサの信号により、水中部のプロセッサがロータリーソレノイドに直結したロータリースイッチを設定することにより行うことができる。また、

船上部でインピーダンスが所定の値になっていることを確認することができるようにしている。PA2及びPA3の電力増幅器に接続するMT2及びMT3はそれぞれ表2に示すような出力インピーダンスを設け、低いインピーダンス、高いインピーダンスの音響送波器に対応できるようにしており、船上で手動によりあらかじめ設定して使用する。

表2 整合トランスの出力インピーダンス  
Output Impedance of Matching Transformer

MT1 (PA1用)	25, 50, 100, 200, 400, 800, 1kΩ
	(コマンド信号により船上より切換え可能)
MT2 (PA2用)	8, 16, 32, 64, 128, 256 Ω
	(手動により切換え)
MT3 (PA3用)	500, 1k, 1.2k, 1.4k, 1.6k, 1.8kΩ
	(手動により切換え)

### 3.3 センサ部

水中部には、フレームの方位、ロール及びピッチの状態を計測するためのセンサを装備している。このセンサを設けたのは、音響送波器の送波指向特性は、完全な無指向性ではないので送信レベルを正確に知る必要からである。そのために、送波器の傾き(ロール・ピッチ)と方位のデータを測定し、あらかじめ測定してある送波器の送波指向特性のデータを基に送信レベルの補正を行うようにしている。

表3にロール・ピッチ及び方位センサの主要性能を示す。これらのセンサの出力はアナログ値であるため、A/D(アナログ/デジタル)変換した後、マイクロプロセッサに入力している。プロセッサではこれらの信号を64bit単位のシリアルデータに変換して方位、ロール・ピッチの順でそれぞれ7秒間隔でFSK信号により船上に転送して、船上部のプロセッサで処理しLED表示器やプリンタに時間データとともに表示する。

表3 ロール・ピッチ，方位センサの性能

(a) ロール・ピッチセンサ

Specification of Direction,  
Roll and Pitch Sensor

米国SPERRY社製	
アキュースタークリノメータ	
①計測角度	± 50°
②出力形式	直流電圧 ± 58mV/deg (実測)
③電源	+ 15V 55mA( " ) - 15V 40mA( " ) + 5V 35mA( " )

(b) 方位センサ

東北金属社製	
フラックスゲート型地磁気センサ	
①計測方位	0 ~ 360°(真方位)
②方位精度	± 1°
③出力形式	BCD
④電源	+ 12V 7mA(実測) - 12V 7mA( " )

3.4 電源部

一般に二重外装ケーブルを使用するソーナーやTVシステムでは，直流電源を使用している。これは，信号と電力とを一本のケーブルで伝送する場合，交流成分と直流成分とした方が簡単なフィルタで分離ができることと，TVなどでは信号として数10Hzまでの非常に低い周波数まで伝送する必要があるのである。

本装置の水中部では，3台の大出力電力増幅器を備えているため，約2kWの電力を必要とし，二重外装ケーブルにおける電力損失を考えれば，船上部から供給すべき電力は3kW程度必要となる。これだけの電力を供給するための直流電源は高価であり，装置も大型となる。また，本装置では，信号用搬送波周波数はすべて高い周波数を用い，電源電流波形の歪を考えても信号周波数に対する妨害は無視できるようにし，単にトランスを使って電圧を昇圧する簡単で安価な交流電源を用いた。この電源の最大電圧は，水中コネクタの最大耐圧電圧の関係から約600Vとしている。通常

4000mの二重外装同軸ケーブルを用いる場合には船上部での送出電力を450Vとすれば，水中部で定格電圧が得られる。なお，水中部で定格電圧になった場合には，電圧コンパレータにより電圧が検出され，船上部でLEDランプが点灯して確認できるようにしている。

水中部では，船上部から送られてきた電力をトランスにより交流100Vとし，電力増幅器とセンサ部に供給している。また，スイッチングレギュレータにより安定化された直流電源±15V及び+5Vを得て，その他の電子回路に供給している。

4. 作動確認試験

本装置の作動確認は，超音波水槽において4000mの二重外装ケーブルと等価の特性を持つケーブルシミュレータを接続し，電源電圧，インピーダンスの切替，送信出力の切替，印加電圧波形と音響信号波形の関係を波形観測によって行い正常に作動することを確認した。また，信号伝送系のFM雑音は5k~50kHzの間で50dB以上抑圧されており，チャンネル相互間の干渉による妨害等を受けないこと，スパイク性の雑音も認められないことも確認した。特にロータリーソレノイドの駆動時に発生する電気雑音がプロセッサに回り込むことにより，インピーダンス等の設定が不能となる障害には十分留意して雑音の除去を図っており，海上試験全般を通じてこのような障害は発生しなかった。

PA1の最大出力特性は図2のFGから信号を入力し，ケーブルは前述のケーブルシミュレータを用い，MT1には1kΩダミー抵抗負荷を接続して負荷の両端電圧を読みとることにより測定を行った。入力信号は10msecのバースト波を加えた。測定結果から計算によって求めた出力電力値は表4(a)に示すとおり，5k~50kの範囲において1kW以上の電力が得られ，各周波数における偏差が±1dB以内であることを確認した。また実海域において約4000mの二重外装同軸ケーブルを用い，出力端には音響送波器を接続して音響出力特性の測定を行った。水中部は設定深度を20mとし，水中部のほぼ真上に標準受波器を16m離して測定した結果は表4(b)に示すとおりで，所要のインピーダンスの設定を行うことができ，かつ音響出力

が得られることを確認した。

表 4. 作動確認試験結果

Result of Measurements for Power Amplifier Characteristics

(a) 最大出力電力の測定結果

1 k Ω のダミー負荷を接続し、10 msec のパースト波にて測定

送信周波数 (kHz)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
出力電圧 (Vrms)	1096	1096	1078	1078	1113	1131	1131	1131	1131	1131
* 出力電力 (Wrms)	1201	1201	1162	1162	1238	1238	1279	1279	1279	1279

\* ただし出力電力 P は出力電圧 E と負荷インピーダンス Z から次式で求めた。

$$P = \frac{E^2}{Z} \quad (Z \text{ は } 1000 \Omega \text{ 一定})$$

(出力電圧は 1/200 のプローブをオシロスコープに接続して測定した)

(b) 送波レベル計測結果

東和製作所製ホーン型送波器を使用して計測した。

送信レベルアッテネータ	10 dB						
送信周波数 (kHz)	20	25	30	35	40	45	50
MT のインピーダンス (Ω)	100	50	50	50	50	25	25
送波レベル (dB/μbar)	91.6	93.9	92.6	88.5	82.6	79.5	82.6

海上における作動確認において、ロール・ピッチ、方位センサ及び伝送系は良好に作動し、水中部の運動の状態を把握することが可能となった。また測定間隔 (7 秒) も適当であることがわかった。測定の結果、水中部を搭載したフレームのロール及びピッチは、ほとんどの場合 ±2° 以内で極めて安定していたが、方位はかなり変動が大きく、回転の方向に規則性はないが、最大で 1 分間 30° 程度回転することもあり、一度回転運動が生じると数分間は停止状態にならず、また、船が回頭すると水中部もあわせて回転することなどがわかった。

5. 画像信号伝送試験

本装置による実海域における画像信号伝送試験は第 1 回を 61 年 2 月に、第 2 回を 61 年 10 月に実施した。第 1 回目は、1800 m の水深において、振幅変調による画像信号の伝送の確認のみにとどまったが、第 2 回目は振幅変調 (AM) 周波数変調 (FM) 及び FSK による伝送を行い、距離をパラメータとして受信画質の劣化の状態を調査した。以下第 2 回 (61 年 10 月) の試験の詳細については別途報告する予定である。

5.1 試験の概要

試験は駿河湾口の 34° 28' N, 138° 35' E を中心とする半径 3 マイルの水深約 2700 m の海域で「なつしま」を使用して実施した。なお、水深の関係で最大伝送距離は 2500 m とした。試験の構成図を図 4 に示す。画像信号の変調方式は、AM, FM, 及び FSK によるが、AM 及び FM は図 4 のアナログ系画像伝送装置を、また、FSK はデジタル系画像伝送装置を用いて、送信の信号処理を行う。表 5, (a), (b) にこれらの画像伝送装置の諸元を示す。

伝送する画像は、送信信号の条件を合わせるために、あらかじめビデオカセットレコーダ (VCR) に収録したものをを用いた。写真 4 に伝送試験に用いた試験装置の外観を示す。

VCR の画像を画像信号送信部に送出すると、画像信号送信部では、任意の一画面をデジタルメモリに記憶し、記憶した画面を表 5 に示したような伝送速度で読み出し、逐時必要な D/A (デジタル/アナログ) 変換及び V/F (電圧/周波数) 変換を行い、変調器により設定した変調を行う。写真 5 は水中部を A フレームに取り付けた曳航用シーブを用いて水中に吊り下げる状態を示す。このようにして、ウインチ操作により水中部を所

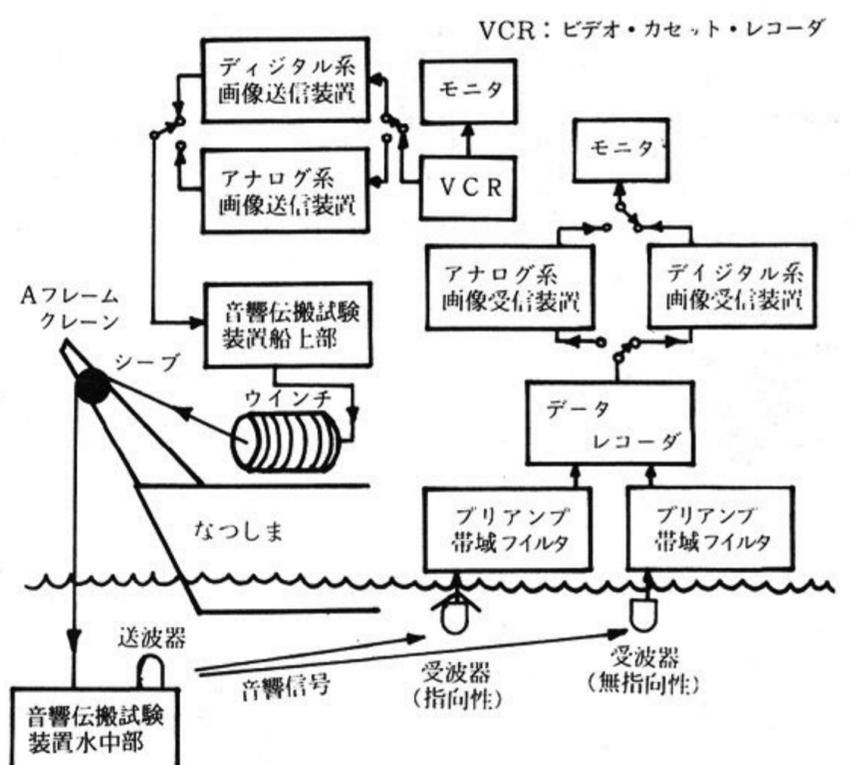


図 4 実海域における画像信号伝送試験の構成 Block Diagram of Image Signal Propagation Test by Acoustic Signal at the Sea

定の深さに設定し、伝搬距離をパラメータとしてデータを取得した。

表5 画像信号伝送試験装置の概要

Basic specification of Scan Convertor

(a) アナログ伝送系

伝送方式	S C F M
白レベル	2300 Hz
黒レベル	1500 Hz
同期	1200 Hz
画素数	128 × 128
階調	16段階 (白黒)
伝送速度	8秒 / 枚
変調方式	DSB, SSB, FM

(b) デジタル伝送系

画素数 256 × 256

1画素分のビット構成

START	R	G	B	STOP
1	3	3	2	1

伝送速度 1 ~ 20分 / 枚

階調 256色

変調方式 FSK (23/28 kHz)

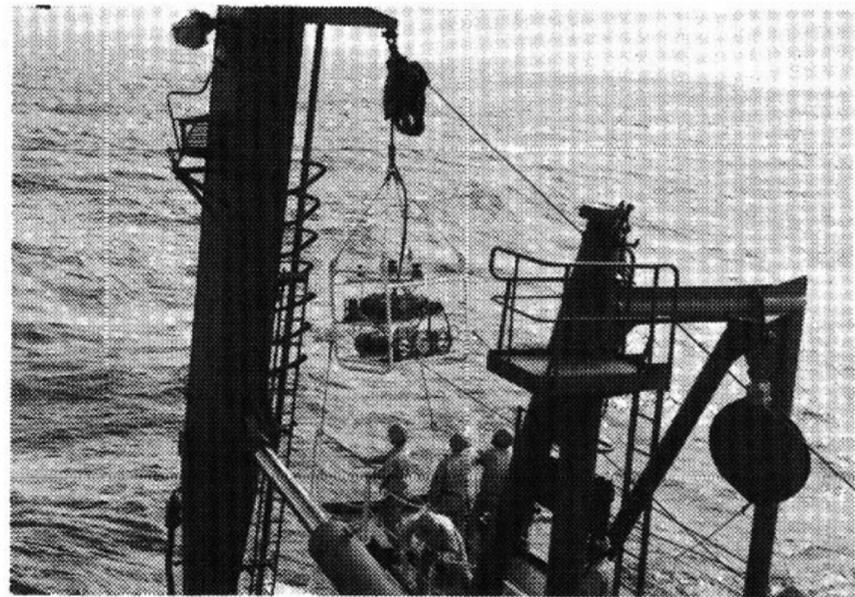


写真5 試験装置水中部の吊り下げ作業  
Hanging Works of Underwater Devices

海中部の送波器は  $900\text{kg}/\text{cm}^2$  の耐水圧をもつ Oceano社製のPET-292型を使い、写真6に示すようにフレームの上部に取り付けて、音響信号を送信した。

また、船上で受信に用いた受波器の外観を写真7に示す。受波器は無指向性のもの (ITHACO社601-1型) と指向性のあるもの (東和製作所HORN-1型) を舷側から約20m吊り下げ

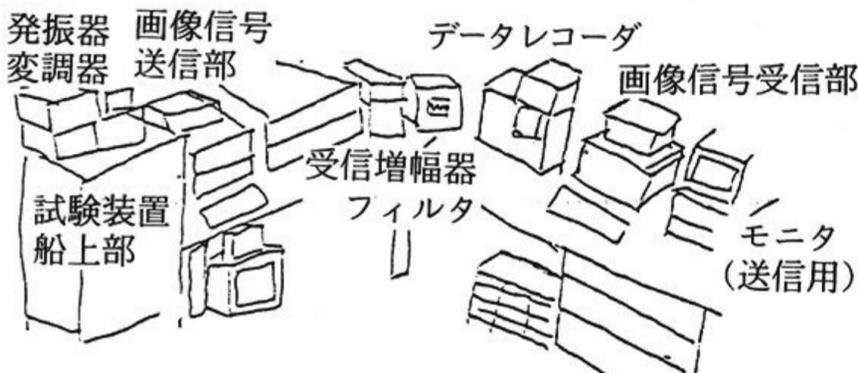
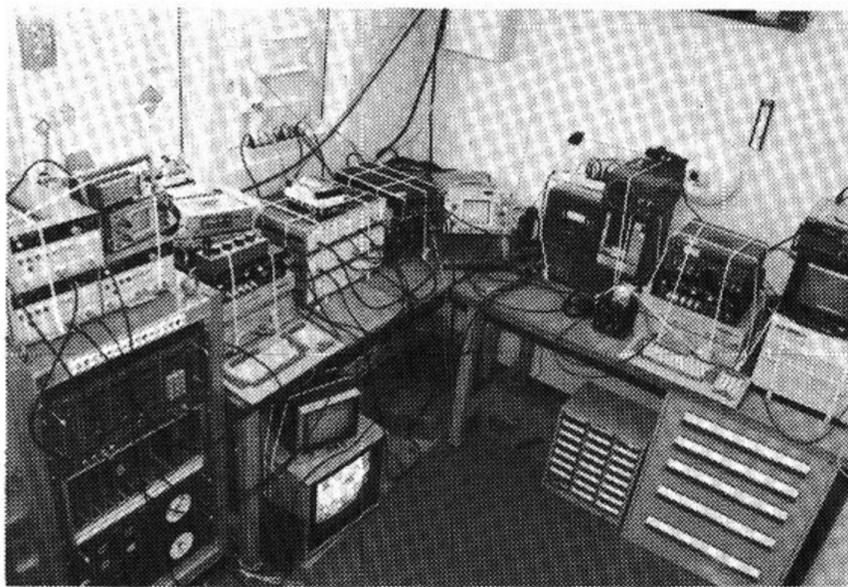


写真4 画像信号伝送機器の外観  
Appearance of Image Signal Propagation Test Devices

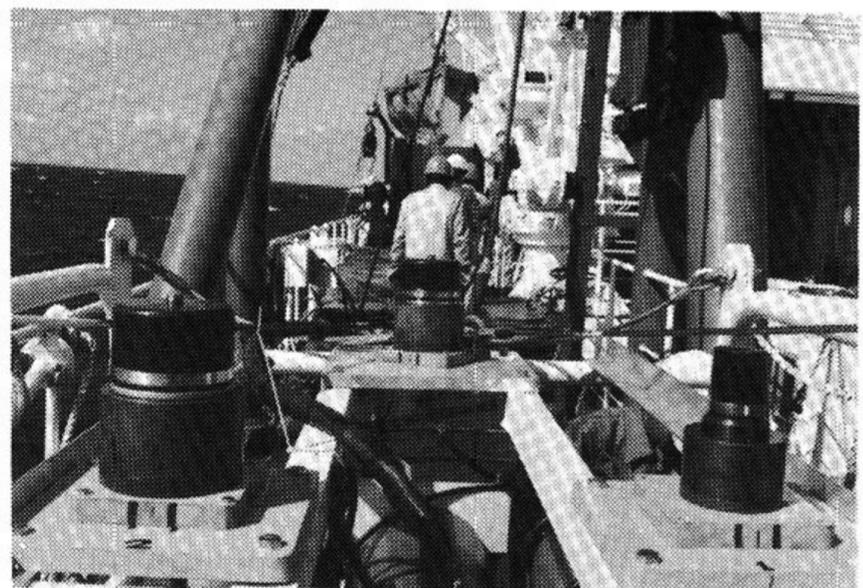
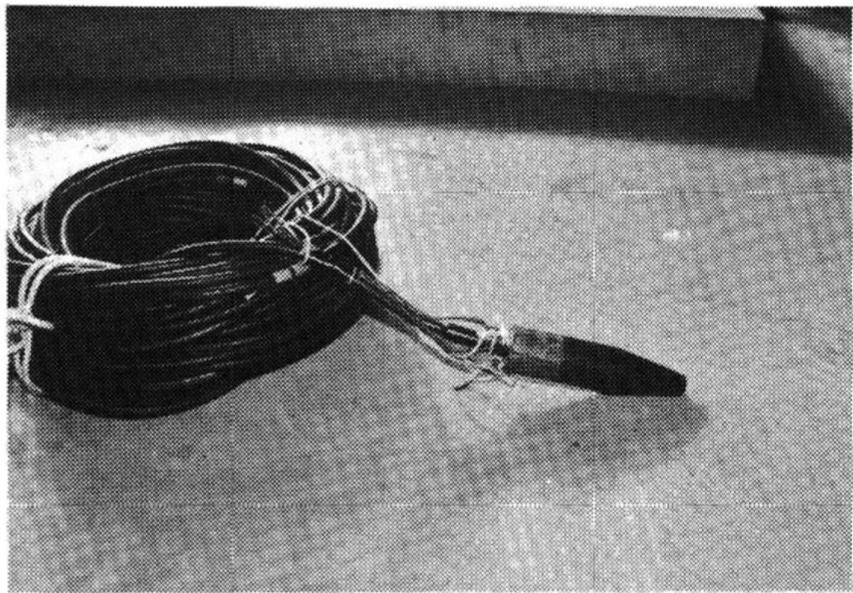
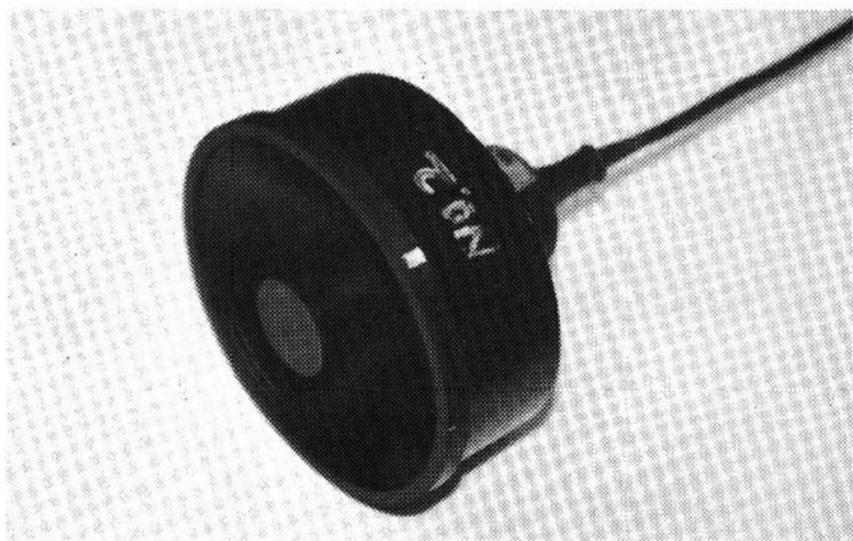


写真6 送波器の取り付け状況  
Fitting of Projectors

信号を受信した。この受波器で受波した信号は受信増幅器（ITHACO社1201型）で適当なレベルまで増幅した後、帯域フィルタ（WAVE TEK社753A）により帯域外の雑音を除去し、データレコーダに入力し、同時に画像信号受信部によりF/V（周波数/電圧）A/D変換した後、デジタルメモリ上に記憶し、D/A変換して画像としてモニタに再現する。



(a) 無指向性受波器の外観



(b) 指向性受波器の外観

写真7 画像信号受信用受波器の外観  
Appearance of Hydrophones for  
Image Signal Recieve

## 5.2 伝送試験結果

伝送試験結果の詳細については別途報告することとするが、写真8.9.及び10に各変調方式（AM,

FM, FSK）で得ることのできた最大伝搬距離における画像を原図と併せて示した。これらの画像はいずれも指向性受波器で得られたものであり、無指向性の受波器では、海面の反射等と思われる雑音により、良好な画像を得ることができなかった。

## 6. おわりに

この海中音響伝搬試験装置を使用することにより、実海域において容易に深度方向の様々な音波の伝搬特性の試験を行うことができるので、今後画像信号の伝送試験だけでなく、音波の伝搬損失の計測や音響送受波器の圧力下における感度計測などにこの装置を活用していくつもりである。

## 謝 辞

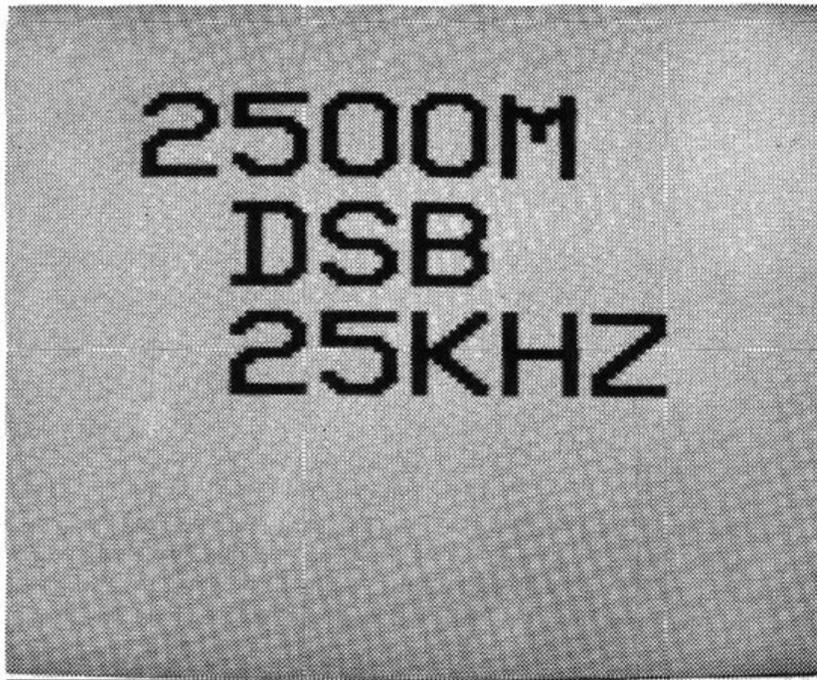
海洋実験に際し、ご助力いただいた、「かいよう」及び「なつしま」の乗組員の方々と運航部の柴田、橋本、小原、高橋の4氏に深謝する。また、本装置の製作に際し、御尽力いただいた、湘南高波(株)の稲葉、長井の両氏に深謝する。

## 文 献

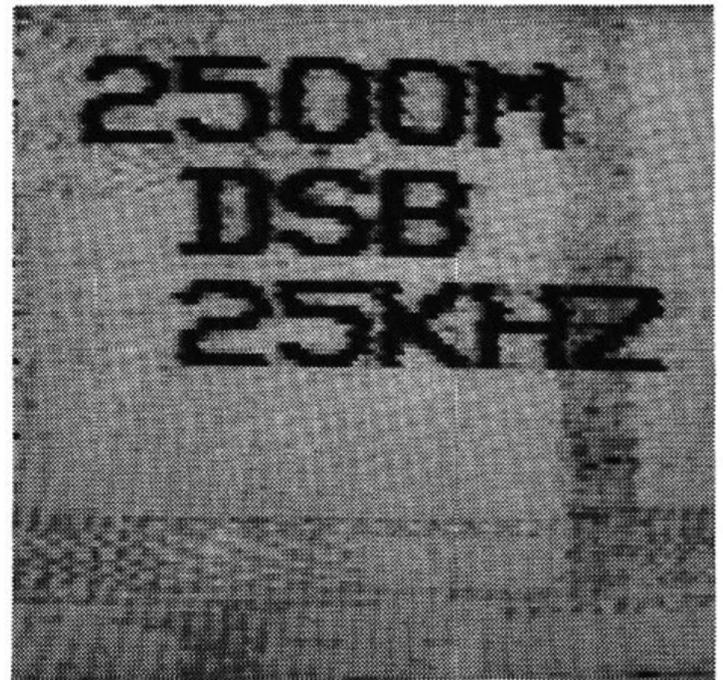
- 1) 土屋利雄, 網谷泰孝, 青木太郎, 山本浩文, 中西俊之 ; 音響による画像伝送の基礎研究 , JAMSTECTR-17 53-63 (1986)
- 2) 大塚清, 中西俊之, 堀田宏 ; 曳航式深海底探索システムのソーナー, JAMSTECTR-8, 1-28 (1982)
- 3) 土屋利雄, 大塚清 ; 曳航式深海底探査テレビシステムの開発, JAMSTCTR.-11, 13-29 (1983)
- 4) 山口開生, 中込雪男監訳 ; 情報通信システム AT&Tベル研究所 丸善, 342-346 (1984)
- 5) 谷村功 ; 無線通信工学, コロナ社, 78-85 (1969)

(原稿受理 1986年12月10日)

送信原画



受信画像



伝送距離 2500 m 中心周波数 25kHz (帯域約 5 kHz )

(128 × 128画素, 白黒16階調, 伝送速度 8 秒/枚)

写真8 AM信号による伝送画像

Result of Image Signal Propagation Test by AM

送信原画

受信画像



距離 2000 m, 中心周波数 27 kHz (帯域約 15 kHz )  
(128 × 128 画素, 白黒 16 階調, 伝送速度 8 秒 / 枚)

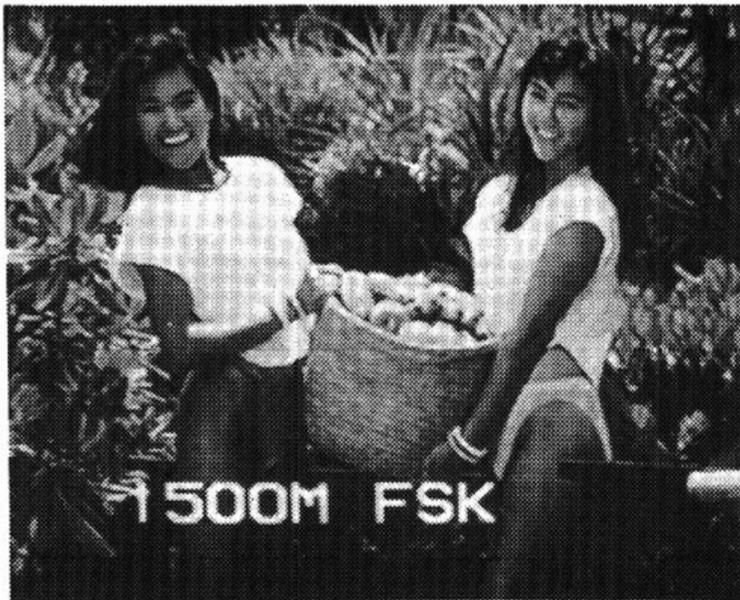
写真 9 FM 信号による伝送画像  
Results of Image Signal Propagation Test by FM

送信原画

受信画像



(a) 距離1,000m FSK方式 23/28kHz 伝送速度1,200bps  
(256 × 256 画素 265色カラー)



(b) 距離1,500m FSK方式 23/28kHz 伝送速度2,400bps  
(256 × 256 画素 256 色カラー)

写真10 FSK信号による伝送画像の一例  
Result of Image Signal Propagation Test by FSK