

音響による画像信号伝送の基礎研究

土屋利雄*¹ 網谷泰孝*¹ 青木太郎*¹
山本浩文*¹ 中西俊之*¹

本研究は無索の潜水船の作業効率等の向上を図るために、潜水船で得られた画像を音響によって母船上で伝送することを目的としている。標準のTV信号は非常に広帯域であるために、何らかの方法で帯域を圧縮しないと、このままでは音響信号として海中を伝送させることができない。この報告では、①帯域の圧縮の方法、②基礎的な伝送装置を使った水槽試験及び岸壁試験の結果並びに、③実海域における最大1,800mの信号伝送試験の結果を報告する。

Basic Study of Image Signal Propagation by Underwater Acoustics

Toshio Tsuchiya*² Yasutaka Amitani*² Taro Aoki*²
Hirofumi Yamamoto*² Toshiyuki Nakanishi*²

“SHINKAI 2000” is presently performing very important missions in the observation of the sea bed. However, it cannot accommodate the many specialists who would like to conduct their own observations. If such specialists could be supplied with images of the sea bed in real time, the submersible would be a more effective aid for geologists, biologists and other researchers.

For this purpose, we have studied video signal propagation by acoustic signals from “SHINKAI 2000” to the mother ship and developed a basic system for tests of propagation. The most important component of this system is the scan converter, which is capable of converting normal video signals to slow scan signals and compressing the frequency band width.

From the results of propagation tests on this system we determined the necessary S/N ratio for underwater propagation. Ocean experiments were then carried out in order to obtain data on long-distance propagation. The results indicate that it is possible to propagate signals over a long distance (maximum 1800 m) between the tow fish and surface ship.

*1 深海開発技術部

*2 Deep Sea Technology Department

1. はじめに

現在、潜水調査船システムでは、海底での作業状況や海底の様子などを母船上で知る手段としては、水中通話機による音声通信によっている。しかしながら、もし、潜水船で得られたTV画像を母船上に伝送することができれば、その画像を見た専門家の助言や指示により、潜水船側では、限られた乗員で海底での作業を効率良く進めることができる。

我々は、このような目的のために、音響により海底から画像信号を伝送するシステムの研究を行ってきており、基礎的な装置を製作し、水槽や岸壁及び実海域において、伝送試験を行ったので報告する。

2. 音響による画像信号伝送の問題点

空中における画像信号の伝送にはTV放送に代表されるように一般に電磁波が使用されている。電磁波の場合には、比較的自由に周波数帯域を得ることができるので、TV画像のように広い周波数帯域を必要とする信号を伝送するのは容易である。しかし、海水中における電磁波はその進向方向に対して大きな減衰を受ける。一般に海水中を1km伝搬するごとに受ける電磁波の減衰量 α_e は次式で表わされる。¹⁾

$$\alpha_e = 34.5 \sqrt{f \cdot 10^3} \text{ (dB/km)} \quad \text{--- (1)}$$

ただし f : 周波数 (kHz)

一方海水中の音波が1km伝搬するごとに受ける減衰量 α_a はSchulkin & Marshの実験結果から、周波数が5kHzから40kHzの間では水温を1.7°Cとすると次式のようになることが知られている。²⁾

$$\alpha_a = 10.3 \times 10^{-3} f^2 \text{ (dB/km)} \quad \text{--- (2)}$$

ただし f : 周波数 (kHz)

この α_e と α_a を比較すると例えば、10kHzの電磁波では1km当り3450dBのもの大きな減衰を受けるが音波では、わずか1dB程度であり、比較にならない。このため海水中で画像信号の伝送には伝搬損失の少ない音響を用いることになるが音響トランスデューサの特性や伝搬損失における周波数特性の問題から任意の周波数や広い周波数帯域を選択することはできない。そのため、音響において、多量の情報を伝送する場合は、何ら

かの方法で周波数帯域を圧縮しないと伝送することができない。また、空間で電磁波を伝送する場合と違って、海中は非常に狭い層であるため、海面や海底からの残響や反射が発生し、伝送上の雑音となる。さらに、電磁波の伝送速度(30万km/秒)に比較すると海中の音速(1.5km/秒)は非常に遅い。したがってこれらの問題を十分に考慮した上で、システムを考えないと、音響による画像信号の遠距離伝搬は可能とならない。

3. 使用周波数の選定

「しんかい2000」システムでの画像信号伝送を考える上で最も重要な事は音響信号の周波数の選定である。このためには、まず次の点を考慮しなければならない。

- ① 海水中の伝搬減衰
- ② 母船の放射雑音
- ③ 「しんかい2000」システムで使用されている他の音響機器の周波数

①については、式(2)で分かるように周波数は低い方が減衰は小さくなり、遠距離伝送に適している。しかし、②については、30kHz程度までの事を考えれば「なつしま」の水中放射雑音は周波数が低くなると大きくなる傾向があり、これらのことを考え合せると最も長距離伝送に最も適している周波数は10kHz前後となる。しかし、実際には③の問題が最も大きい。つまり、図1のように「しんかい2000」システムではすでに周波数が使用されているため、この周波数帯に割り込むことは不可能であり、これらの周波数を避けなければならない。したがって伝搬減衰とのかねあいから20~30kHzの周波数範囲を選択することにして、以後の検討を進めることとした。

4. 周波数帯域の圧縮

3で、音響により画像信号を伝送する場合何らかの方法により、周波数帯域を圧縮しなければならない事を述べたが、ここでは、実際の方法について考える。

4.1 画像信号の周波数帯域幅

標準的なTVカメラで図2の(a)のような被写体を撮り、A-A'で結ぶ線上で走査が行なわれている場合を考えたとき、カメラからは(b)のような

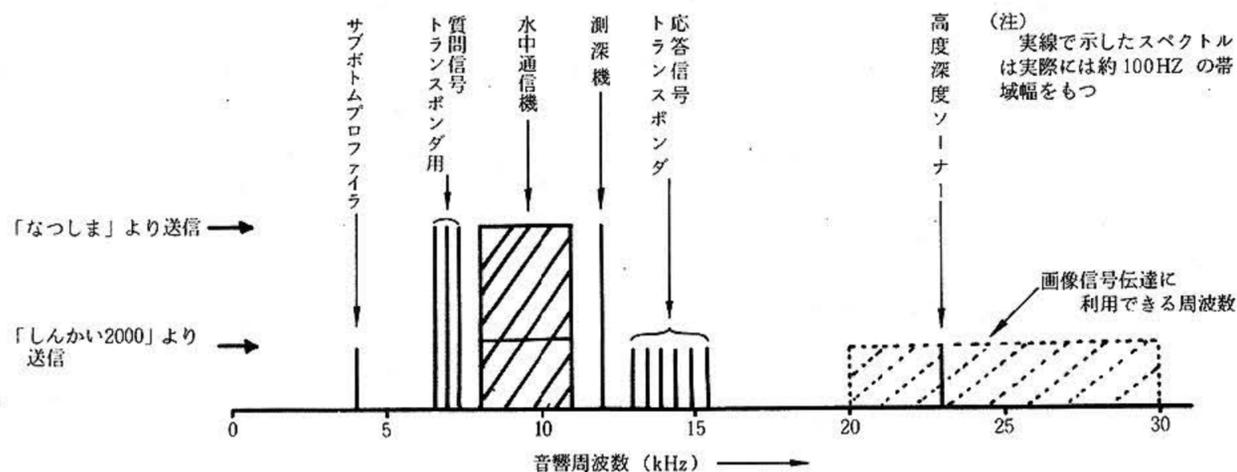


図1 「しんかい2000」システムの音響機器使用周波数
Acoustic frequency of the SHINKAI 2000 system

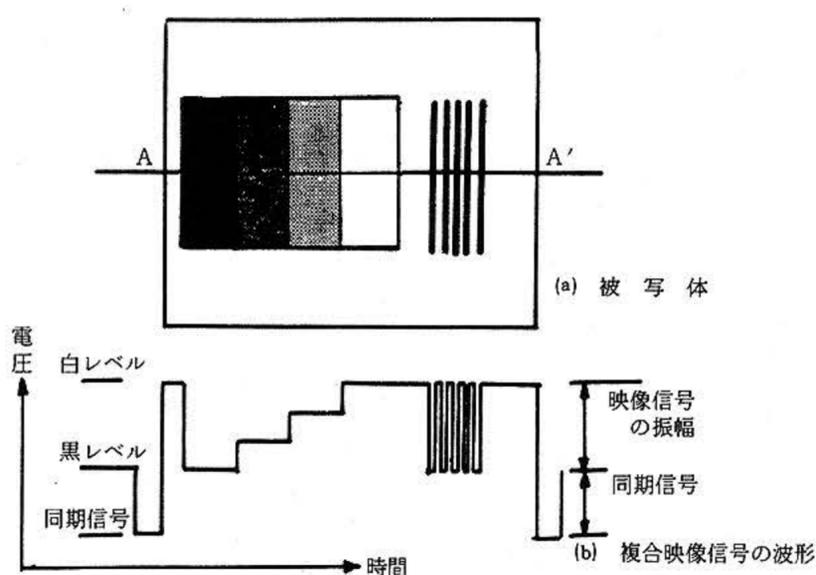


図2 被写体と画像信号との対応
Relation of video signal and picture

波形をもつ電気信号（映像信号と同期信号とが混合されたもの）が得られるがこれを複合映像信号と言いつこの信号を画像信号と定義する。

この画像信号は、被写体の明るい部分では振幅が大きく、また暗い部分ではその振幅が小さい。また細かい絵柄を持った被写体の部分に対応する画像信号は、波形の変化が激しく、走査変換した画像信号の周波数は、走査方向の空間周波数に比例して高くなるといえる。

画像信号の最高周波数は、図3のような市松模様の被写体を走査変換したときの基本周波数で定義される。この周波数を f_{max} とすると f_{max} は次の式で表わされる。⁽⁵⁾

$$f_{max} = \frac{1}{2} K \cdot n^2 \cdot f_p \cdot \frac{wh}{hv} \cdot \frac{kv}{kh} \dots\dots\dots (3)$$

- ここで n : 走査線数
- f_p : 毎秒像数
- wh/hv : アスペクト比 (横/縦)
- kv : 垂直走査の有効走査率

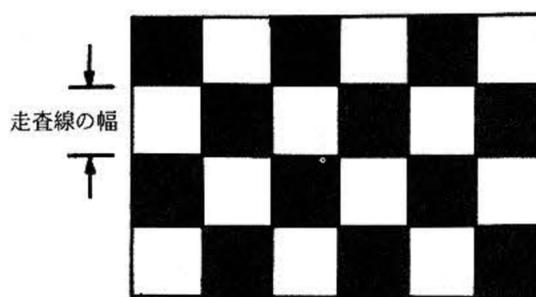


図3 最高周波数の被写体
Picture of maximum frequency

- kh : 水平走査の有効走査率
- K : kell factor (≈ 0.7)

標準TV方式は、 $n = 525$ 本、 $wh/hv = 4/3$ 、 $f_p = 30$ 、 $kv/kh = 0.84/0.95$ であり(3)式にこれらの値を代入すると f_{max} は約 4.3 MHz になる。また最低周波数は、まっ白又はまっ黒の被写体を写した場合でこの場合周波数は 0 Hz つまり直流成分まで必要であるから、 f_{max} がすなわち伝送帯域となり音響信号での伝送ではこの 4.3 MHz という周波数帯域を3項で述べたように10 kHz以下の帯域まで圧縮する必要がある。

式(3)において wh/hv 、 kv/kh 、 K の値はTV信号の方式によりほぼ決定されており、ほとんど変更することはできない。したがって、 f_{max} を下げるためには、もっぱら、 n (走査線数) か f_p (毎秒像数) を減らすしか方法がない。しかし、 n を減少させれば当然解像度が悪化し、海底の状況を把握するという目的を果すことはできない。一般にTV受像機での周波数帯域は 2 ~ 2.5 MHz としており、この場合の水平解像度は 250 本程度であり、垂直解像度もこの程度で十分である。したがって、 n を 250 本と決めて、 f_{max} を下げ

るためには、 f_p を減らすこととした。 f_p を減らすことは、とりもなおさず、動画像を伝送できないことを意味するが、我々の目的が、あくまで潜水船で得た海底の状況を把握するということであり、データとしての画像は潜水船が揚収されてから見れば良いという考えから静止画像でもさしつかえないと考えた。

そこで、 f_p を減少させて帯域圧縮を行うことを考え(3)式から f_p と f_{max} との関係を求めると(4)式のようになる。

$$f_p = \frac{2 f_{max}}{K \cdot n^2 \cdot \frac{wh}{hv} \cdot \frac{kv}{kh}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $k = 0.7$ 、 $wh/hv = 4/3$ $kv/kh = 0.84/0.95$ とし、 n を前述のように250本とすると

$$f_p = 3.88 \times 10^{-5} \cdot f_{max} \dots\dots\dots (5)$$

となる。(5)式から f_p と f_{max} の関係を図4に示した。ただしこの図では f_p (毎秒像数)の逆数をとって1枚の画像を伝送するのに必要な時間として表わしている。

この図からわかるようにもし帯域を最大10kHzとすることができれば2.6秒に1枚の画面を伝送することができる。したがって、これらの検討をもとに、伝送実験を行える装置を製作し、実用化のための基本的な検討を行った。

4.3 スキャンコンバータ

4.2で述べたように伝送帯域の圧縮のために、伝送枚数を減少させなければならない。通常のTVカメラ等で得られたビデオ信号は、毎秒30枚の画像を走査している。いわゆるファーストスキャン信号であり、この信号を適当な走査速度まで低下させて、いわゆるスロースキャン信号とするために、スキャンコンバータが必要となる。今回、使用したスキャンコンバータは、基本的な伝送試験を行うためのもので、図5に示すような画面構成となっており、デジタルメモリ(D-RAM)を使ったデジタルスキャンコンバータと呼ばれるものである。このスキャンコンバータのブロック図を送信側(ファーストスキャン/スロースキャン変換)と受信側(スロースキャン/ファーストスキャン変換)とに分けて図6に示した。このスキャンコンバータでは、取り込んだビデオ信号を図5

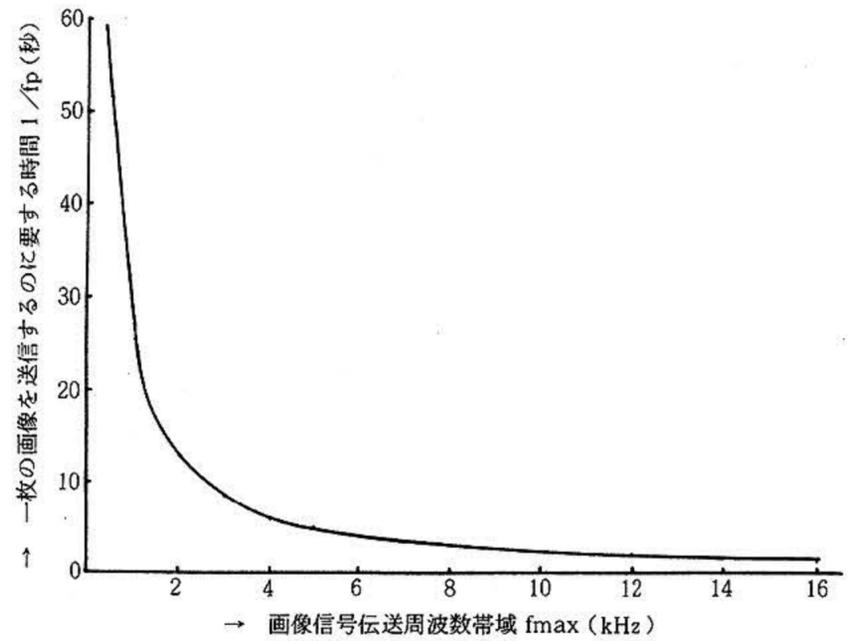


図4 伝送周波数帯域(f_{max})と一枚の画像を伝送するのに必要な時間($1/f_p$)との関係

Relation of the transmit frequency band width (f_{max}) and necessary time for transmit a image ($1/f_p$)

のような周波数に変換し、周波数変調(FM)波として出力している。

4.4 変調方式

4.3でスキャンコンバータの画像信号出力はFM波として出力されると述べたが、実際に、音響信号として送波器から出力するためには、必要とする周波数を搬送波として変調をかけなければならない。今回は、スキャンコンバータのFM波で搬送波を振幅変調して得られる副搬送波周波数変調(Sub Carrier Frequency Modulation-SCFM)方式を採用した。

ITU (International Telecommunication Union)の無線規則により、この場合のSCFM波の周波数帯域を求めると約5000Hzとなるが、実際には図7に示したようにUSB(上側波帯)とLSB(下側波帯)とでは、まったく同じ信号成分を持つので必要な周波数帯域はUSBかLSBの約2500Hzである。

今回は、とりあえず、伝送試験を行うためにSCFM方式による試験についてのみ検討を行ったが、実際にはこの変調方式の問題は非常に重要であり、海水中において、画像信号の伝送に最も適した変調方式の検討を行う必要がある。したがって、今後、様々な変調方式について検討し、報告

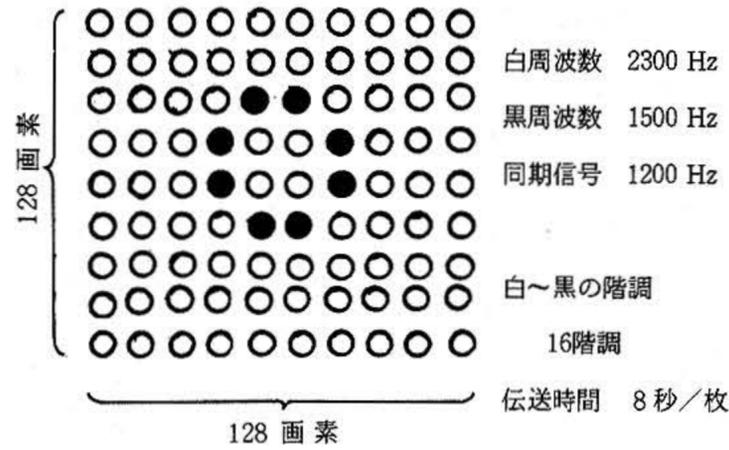


図5 伝送実験に使用したスキャンコンバータの画面構成
Consist of a picture at the Scanconverter

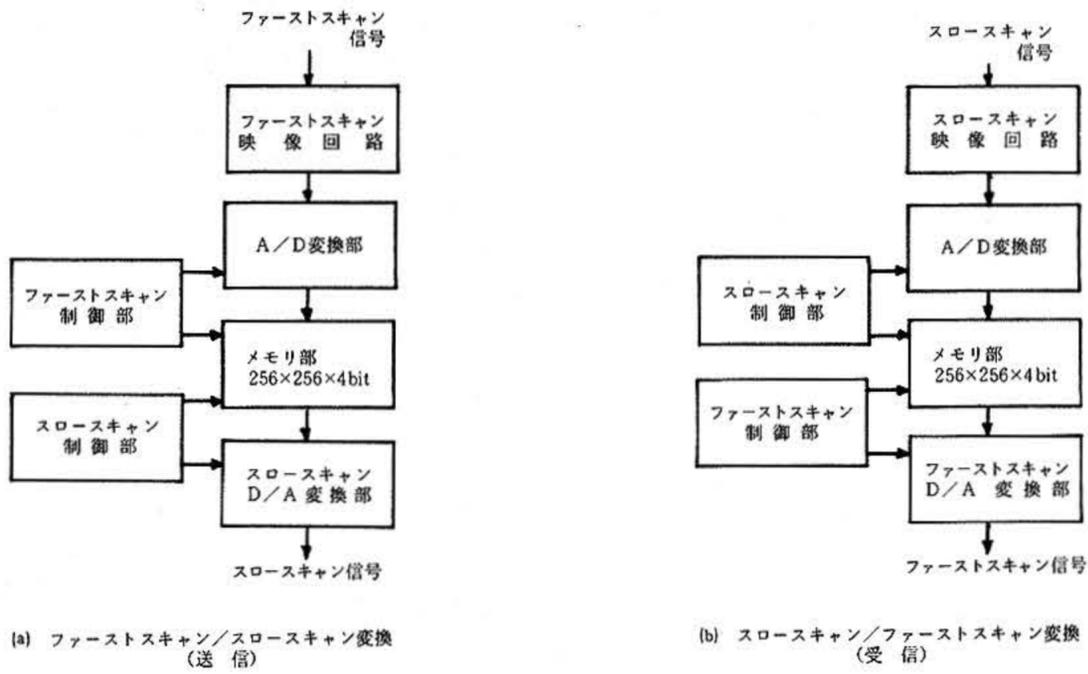


図6 スキャンコンバータの基本ブロック図
Basic block diagrams of the Scan Converter

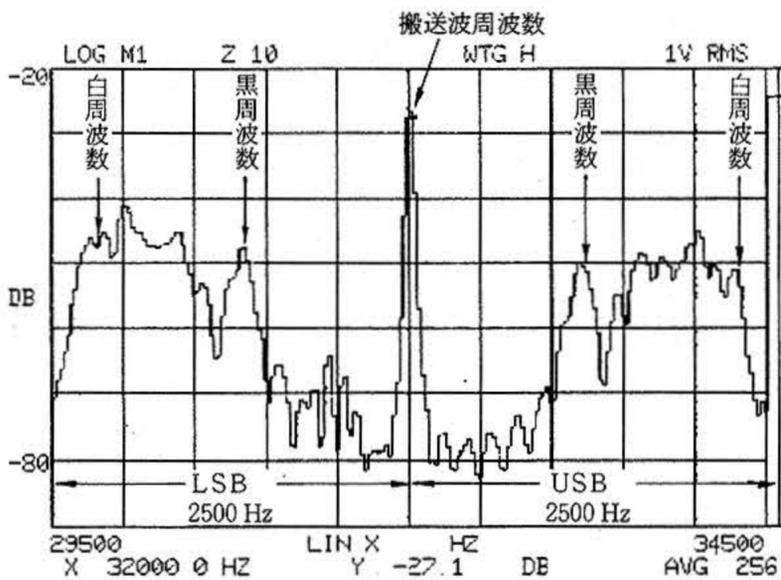


図7 SCFM波のスペクトル (FFTによる計測)
Specutram of the SCFM (mesurment by FFT)

するつもりである。

5. 水槽における伝送試験

5.1 試験装置および方法

水槽における伝送試験では、伝送システムの基本的な作動確認をすることを主目的とするが、併せて、実用的なシステムを考える上で最も重要な画像のS/N(信号対雑音比)に対する検討を行った。

水槽における伝送試験のブロック図を図8に示す。なお本試験に使用した送波器はOceano社製PET 292である。また、受波器には1 kHz ~ 70 kHzまで平坦な特性をもつ標準ハイドロフォンを使用した。変調方式は4項で述べたようにSCFMとし、S/Nの検定を行うために白色

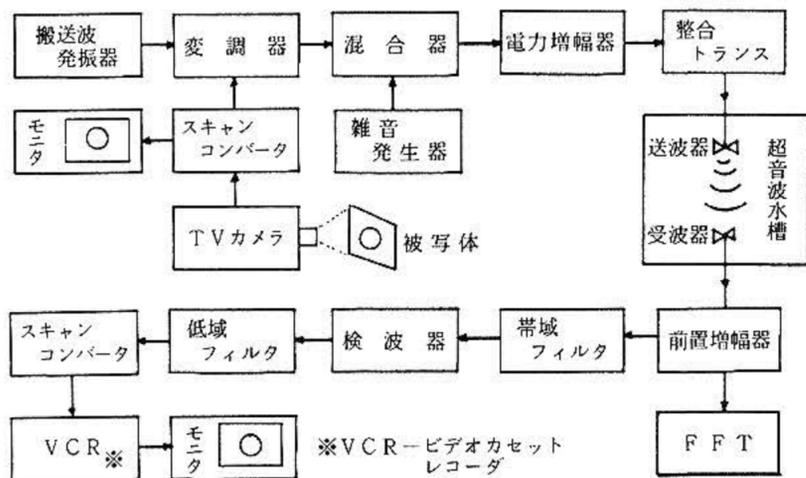


図8 水槽における計測系統図

Block diagram of mesurment at the Anechoic tank

雑音を印加し，モニタ用のハイドロフォンで受波した信号レベルをFFTで読み取った。被写体には人物画を用いた。写真1にスキャンコンバータにメモリされた伝送前の画像を示した。写真は画面の約2/3の部分のみを写している。なお，伝送試験装置は写真2に示した。

5.2 試験結果

水槽において伝送試験を行った画像を写真3の(a)，(b)に示す。この内(a)は送波器及び受波器の間隔を1mとしたもので(b)は同様に3mとしたものである。距離を3mとしたものは，画面上に多重画像（ゴースト）が見られる。これは，水槽内で直接波のほかに多くの反射波が時間遅れを伴って受信されるからである。この反射波と直接波のレベル差は1mの場合は約15dB，3mの場合は約6dBである。しかし，同期信号等の乱れはなく，非常に良質の画像が得られた。

次にS/Nの計測結果を写真4の(a)～(d)に示す。画像の評価を定量的に行うのは，なかなか困難であるが，筆者らは，写真4(c)程度の画像が得られれば実用的には十分と判断した。この時のS/Nは約15dBであり，この値をSCFM方式の信号検出限界とした。

5.3 試験結果の検討

5.2でのS/Nの計測結果をもとにして，実用的なシステムを考える上で必要なソーナー方程式を立て，送信レベル等を求める。この場合伝送距離を2000m，周波数を25kHzとする。

一般に送信レベルを求めるためのソーナー方程式は次のように表わされる。



写真1 スキャンコンバータに記憶された伝送前の人物画
picture of memory in the Scan converter

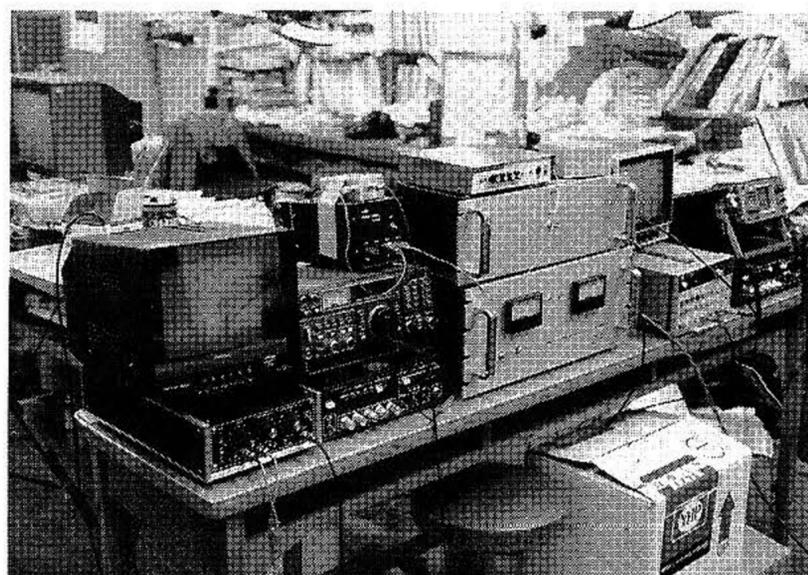


写真2 水槽試験装置の外観
Apparence of devices at the anechoic tank

$$SL = T_L + (N_L - DI) + DT \dots\dots\dots (6)$$

- ただし， S_L : 送信レベル (dBrel μ bar)
- T_L : 伝搬損失 (dB)
- N_L : 雑音レベル (dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
- DI : 指向性利得 (dB)
- DT : 検出の域値 (dB)



(a)



(b)

写真3 水槽における伝送画像 (雑音なし)

(a) 伝送距離 1 m

(b) " 3 m

Propagated pictures at the anechoic tank

(a) distance 1m

(b) distance 3m



(a) S/N = 20 dB



(b) 17 dB



(c) 15 dB



(d) 12 dB

写真4 S/N計測結果

Result of S/N measurements

である。ここで、 T_L は伝搬距離 r (m), 吸収係数を α (dB/km) とすれば $T_L = 20 \log r + \alpha r \times 10^{-3}$ であり、伝搬距離を 2000m とし α を式(2)より求めると周波数 25 kHz においては、 $\alpha = 6.4$ (dB/km) であり、この値から $T_L = 78.8$ dB となる。

また「なつしま」の放射雑音の低減目標値 N_{sp} は $N_{sp} = -5 - 20 \log f$ (kHz) であり 25 kHz では $N_{sp} = -32.9$ dB となる。ここで N_L は受信帯域幅 B_w を 2500 Hz とすると $N_L = N_{sp} + 10 \log 2500 \approx 1.1$ dB となる。さらに DI は指向幅を 30° とすれば約 16 dB であり、DT は 5-2 項の試験結果から 15 dB とする。これらの値を(6)式に代入すると

$$S_L = 78.8 + (1.1 - 16) + 15 \\ \approx 79 \text{ (dB rel } \mu\text{bar at 1 m)}$$

となり、十分実現可能な値である。

6. 岸壁での伝送試験

水槽試験を行った後、当センターの岸壁において伝送試験を行った。これは、反射や残響が多く、最も条件が悪いと考えられる場所での伝送状況を把握したかったためである。

伝送試験の装置は 5 項の水槽試験とはほぼ同様である。また、岸壁での送波器及び受波器の関係を図 9 に示した。この条件下で伝送距離を変え、周波数を変化させて試験を行った。

この結果、最大 100 m までの伝送が可能であった。しかし、予想したことではあるが、水深が 6 m と浅くまた、岩壁から 3 m 程度しか離れていないため、多重伝搬経路によるゴーストが多く発生しており、この状況は周波数により大きく変化する。また、この状況がさらに悪化すると同期信号が検出不可能となって同期がはずれ、画像が判別できなくなる場合があった。

この結果から、水深が浅い場合のような、かな

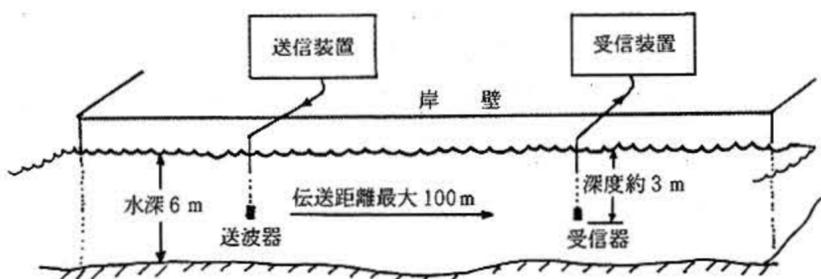


図9 岸壁での伝送試験の概念図
propagation test at the quay

り悪条件の中でも伝送が可能ではあるが、同期信号には何らかの対策が必要であり、多重伝搬を防止するために、鋭い指向性をもつ送受波器を使用するとかなり良好な伝送が可能ではないかと思われる。

7. 実海域試験

5, 6 の結果をふまえて、実海域において、実際に遠距離伝送試験を行った。このために、潜水船を使わないでも、海中から海面までの鉛直方向の伝送が行えるように試験装置を製作した。この試験装置の基本ブロック図を図 10 に示す。この試験装置は曳航式のソーナーシステムや TV システムに使用されている二重鎧装ケーブルを使って、船上からの任意の信号を 3 MHz 帯の FM 信号に変換し、伝送し、海中の曳航体に装備された、信号復調器で復調しその信号を電力増幅器で増幅し、送波器により、音響信号として船上に向けて送出するものである。また、送信電圧や、電力増幅器と送波器との整合状態の監視や、設定値の変更なども船上部で行なえるように、デジタル信号によるテレメトリ装置も設けている。

この装置及び海域実験の詳細については、続報

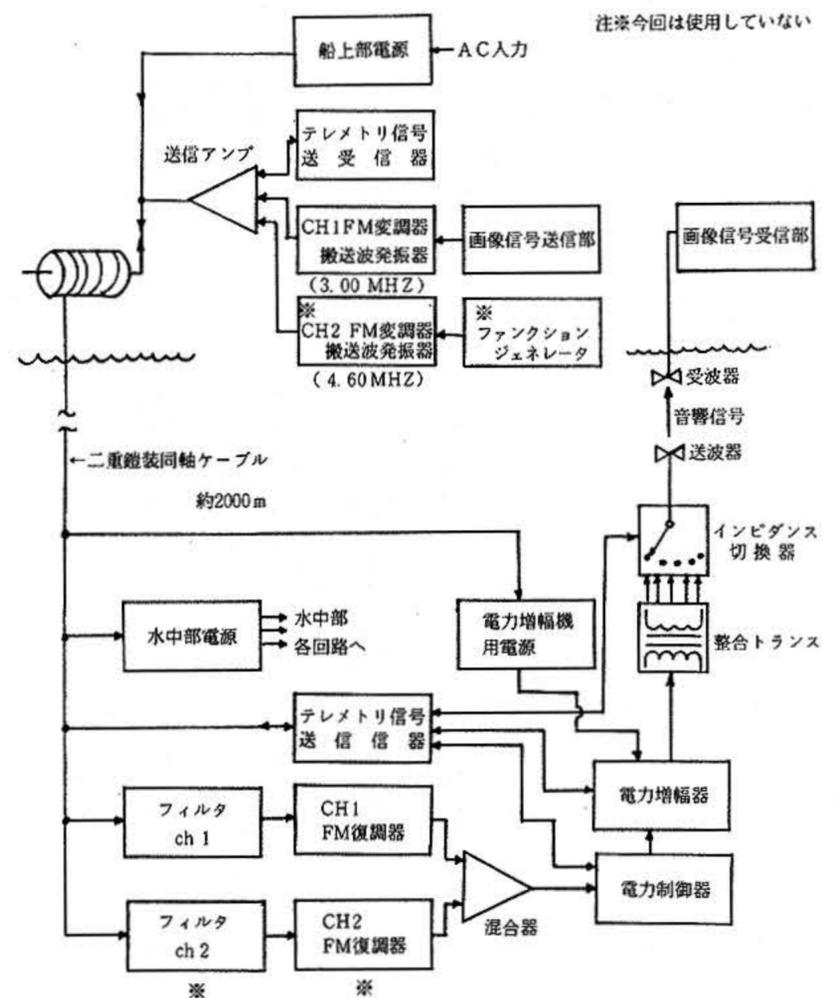


図10 実海域試験装置ブロック図
Block diagram of Sea trial Equipment

で報告することとするが、ここでは、船上装置及び水中部の曳航体、および伝送距離が1800mの時の画像を写真5の(a)~(d)に示す。なお、この試験の主な条件を以下に示す。

- 試験海域 : 駿河湾口中央部
- 水深 : 約2500m
- 送信レベル : 約90 (dB re 1 μ bar at 1m)
- 送信周波数 : 25 kHz (中心周波数)
- 送波器 : OCEANO社製 PET292 S
- 受波器 : ITHACO社製 601-1型
- 受波器深度 : 約20m
- 最大伝送距離 : 約1800m
- 変調方式 : SCFM方式

なお、スキャンコンバータ等、伝送試験に必要な

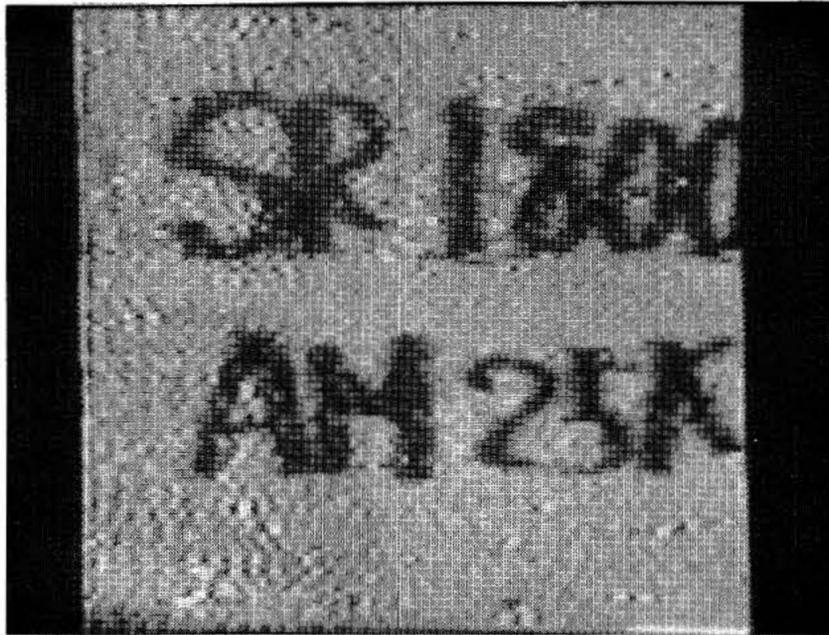
な装置は、水槽における伝送試験と同様な構成である。写真6に装置の外観を示す。

この試験の結果から次のようなことが分った。

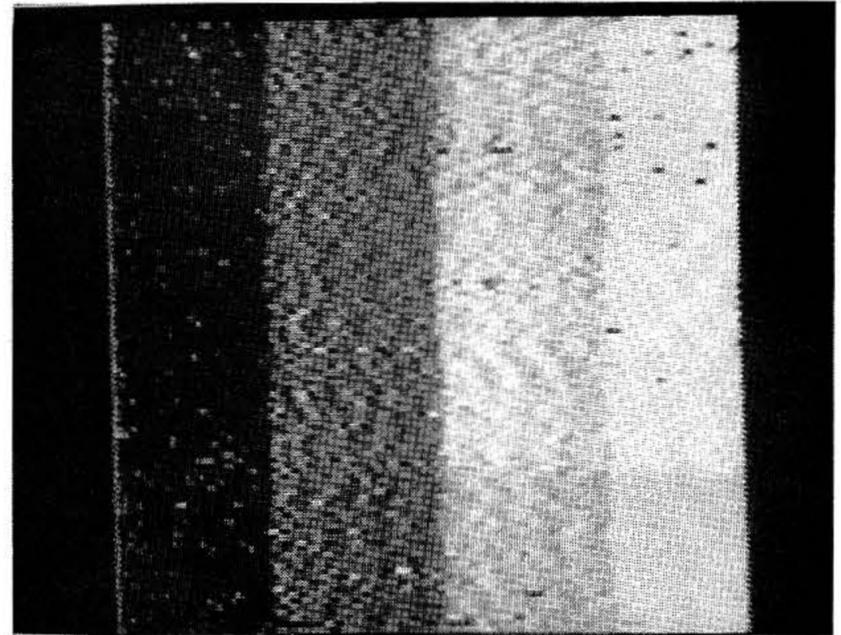
(1) 伝搬距離1800mでのS/Nは約10~15dBである。送信レベルは約90dBであり、指向性利得等を考慮すると5.3項で検討したソーナー方程式とはほぼ一致する。

(2) 試験を行った海域が比較的マルチパスが少なかったためもあるが、鉛直方向の伝搬においては、はっきりしたゴーストは認められなかったが、海面や海底に反射した信号が妨害波となり、同期ずれを起こすことがあった。

(3) 試験装置はおおむね良好に作動し、様々な信号の伝送試験に利用できることが分った。



(a) 文字



(b) 4階調のグレースケール
(電氣的に発生させたもの)

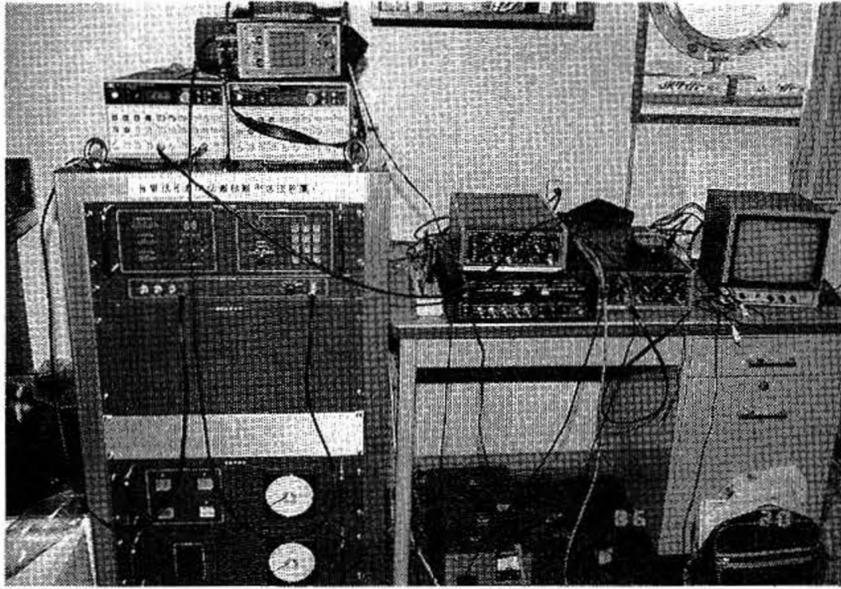


(c) 人物写真

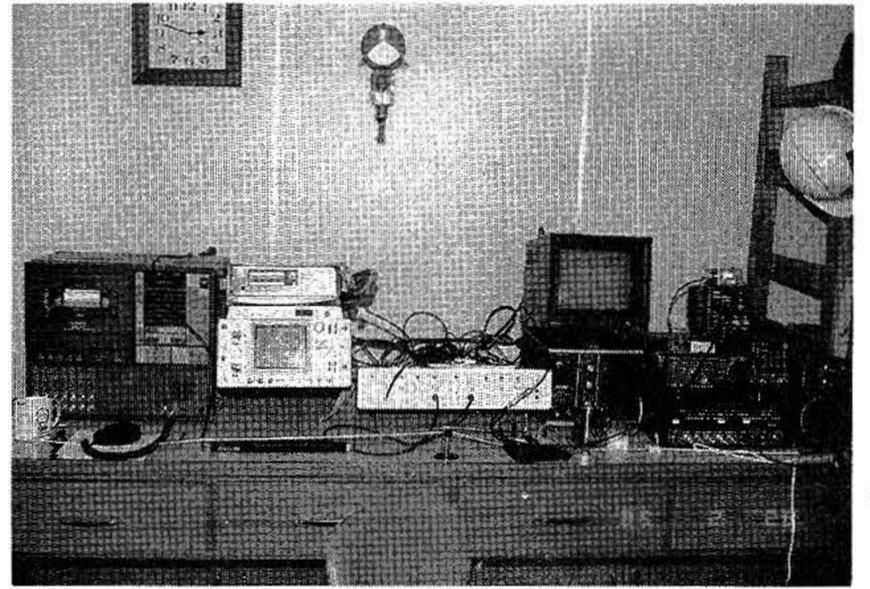


(d) 人物の顔

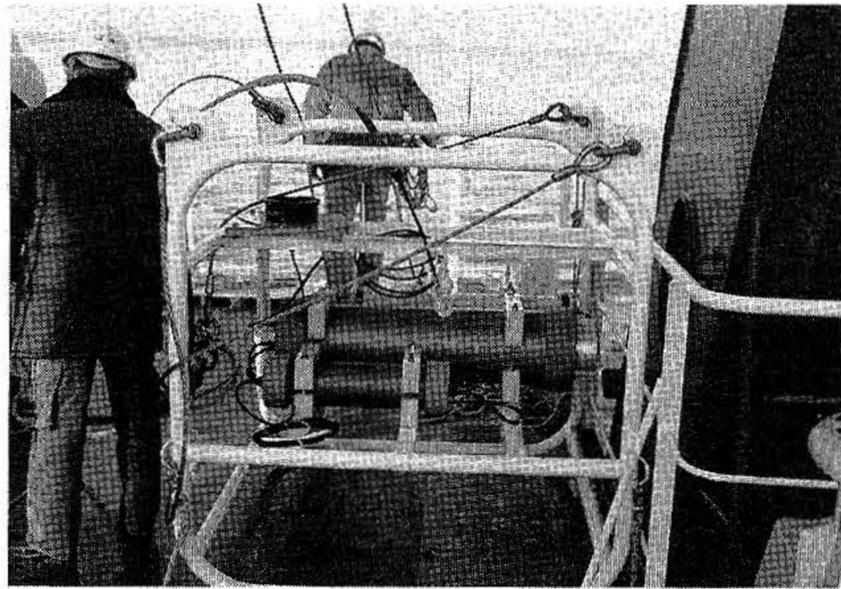
写真5 伝搬距離1800mにおける伝送画像の例
example of Images (Distance 1800m)



(a)



(b)



(c)

写真6 実海域試験装置の外観

- (a) 送信装置
- (b) 受信装置
- (c) 曳航体

船上部

水中部

Appearance of sea trial equipments

- (a) devices of transmission
- (b) devices of receive
- (c) towed fish

shipboard

underwater

8. 今後の研究課題

基礎的な伝送実験の結果をもとに、実用的なシステムを製作するためには、次の点について更に研究を進めていく必要がある。

- (1) 広い伝送帯域を確保するために必要な広帯域、高感度の送波器の研究
- (2) デジタル伝送 (FSK, PSK) 及び、アナログ伝送方式 (AM, FM) の研究
- (3) 海面や船底からの反射による妨害波を除去する方法及び妨害波の影響を受けにくい受波器の

の研究

- (4) 画像伝送時間の短縮や画像の S / N を改善するための画像処理技術の研究
- (5) 画像伝送時間の短縮やカラー画像信号伝送に必要な多重伝送方式の研究
- (6) 雑音や多重伝搬に強い同期方式の検討
- (7) 実用的なスキャンコンバータの研究
- (8) 様々な変調方式の研究

9. おわりに

今回の試験は、最も基本的な伝送装置を使って行ったものであるが、海中の隔った2点間で2000m近い画像信号伝送試験ができたことは、実用的なシステムの完成のメドが立ったので8項で述べた研究を進めシステムの実用化を図っていくつもりである。

最後になるが、伝送試験や試験データの整理及び試験装置の製作に助力いただいた電気通信大学研究生、寺島正紀君に深謝する。

文 献

- 1) 岩下光男他 "海洋物理 I" p 132 東海大学出版会 1970 年
- 2) 海洋音響研究会編 "海洋音響-基礎と応用" p 60, p35 海洋音響研究会 1984 年
- 3) 中西俊之他 "相模湾における海面海底間の音波伝搬損失について" 電子通信学会技術研究報告, 1985 年
- 4) 森政雄他 "アマチュアの SSTV 技術" p 10~12 CQ 出版社 1976
- 5) 宮川洋他 "画像エレクトロニクスの基礎" p 35~38, p 236~238 コロナ社, 1975 年
- 6) 伊藤健一 "デジタル画像とカラー" p 56 日刊工業新聞社 1984 年
- 7) 木下健治 "画像処理システムの基礎と応用" p 118, CQ 出版社 1984 年
- 8) 海洋科学技術センター編 1984 年 "2000メートル潜水調査船開発建造の記録" p 415 一分冊

(原稿受理: 1986 年 5 月 12 日)