「しんかい2000」による画像情報の伝送試験について

新井嘉人*1 中西俊之*1 土屋利雄*1 網谷泰孝*1 野並健二*1 許 正憲*1

我々は，潜水船で得られた画像情報を母船へ伝送することを目的として，音響信号により画像信号を伝送するための研究を昭和60年度から行ってきており，62年度には，水深3,500mからアナログ伝送方式により約46秒に1枚の速度で，家庭用ビデオ程度のカラー画像を伝送する技術を確立した。

そして，この試験装置を「しんかい2000」に搭載し，昭和63年11月に水深約2,000mの海底から鮮明な画像を伝送することに成功した。

Transmission Test of Video Pictures from Moving "SHINKAI 2000" to "NATSUSHIMA"

Yoshihito ARAI*2, Toshiyuki NAKANISHI*2, Toshio TSUCHIYA*2, Yasutaka AMITANI*2, Kenji NONAMI*2 and Masanori KYO*2

In order to transmit pictures from a submersible to her support ship, we have been developing long distance picture transmission system by acoustics since 1985. We had succeeded in color pictures transmission from 3500m depth in 1987. The frame rate is about 46 seconds per frame and pictures had 256 x 256 pixels.

In 1988, we equipped the submersible "SHINKAI 2000" with the picture transmission system and successfully carried out acoustic transmission of sea bottom scenery from moving "SHINKAI 2000" to the support ship "NATSUSHIMA".

This paper describes the development and the results of the experiment of this system.

1. はじめに

近年，深海潜水調査船を使った調査により，熱水鉱床をはじめとした重要な発見がなされてきているが，その調査は必ずしも効率よく行われているとはいい難い。なぜなら，潜水船には研究者が1名しか乗船出来ず，調査内容はその研究者の専門分野を越えることはないからである。

そこで，潜航中の潜水船から音声による通信だけではなく，海底の画像情報も伝送できるようになれば，それを見た母船上の専門家の助言や指示によって，海底での作業を限られた乗員で多分野にわたって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，音響によって画像情報を伝送するための装置の開発を行って来ており，

*1 海洋科学技術センター 深海開発技術部

*2 Deepsea Technology Department of Japan Marine Science & Technology Center

昭和62年には水深3,500mの海底から，カラー静止画像を1枚約46秒の速度で伝送することに成功している。

昭和63年の11月8日，本試験装置を「しんかい2000」に実際に搭載し，水深約2,000m の海底から鮮明なカラー画像を伝送することができたので，その手法と試験結果について報告する。

2. 音響による画像情報の伝送

「しんかい2000」システムにおいて音響による通信を行う場合，伝搬減衰や，他の音響機器の周波数の配分等を考慮すると，画像情報の伝送に使用できる周波数はほぼ20～30 kHzまでで，帯域幅は10 kHz 以下である。一方，テレビ放送で代表される動画像信号の情報量は膨大で，極めて広い周波数帯域幅（標準方式で約4.2MHz ）が必要である。海底で撮影される未知のものを判別するのに必要な画質を確保し，これを音響信号により伝送するためには，ビデオ信号を静止画像として伝送を行う必要がある。

2.1 画像情報の伝送

画像情報とは図1－(a)に示すように，画像の各座標（x，y）における，時刻tでの明るさu（x，y，t）で構成される物理量であり，静止画像は，

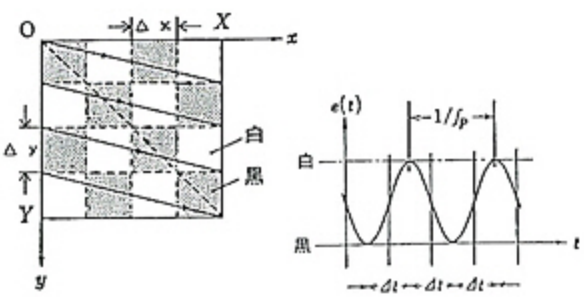


図1　画像情報

Fig. 1　Video picture model

(a) 画像情報の構成 Video picture model

(b) 画像情報の最高画周波数（白黒） Maximum picture frequency of video picture model (monochrome)

このu（x，y）が時間によって変化しない画像と定義される。白黒の静止画像において1枚の画面の情報を伝送するのに必要な時間Tは，次のように表わすことができる。

$$T = Y/\Delta y \cdot X/v \quad \cdots \quad (1)$$

ただし，X・Yは画面の大きさ（横×縦），vは画面を走査する速度，また，Δyは Y方向の画像の分解能である。さらに，X方向にも同様な長さΔxを定め，$\Delta t = \Delta x / v$ となるようなΔtを用いると，図1－(b)の様な白黒画像における画像信号のもつ最大の周波数成分，つまり最高画周波数 f_p は，

$$f_p = 1/2\Delta t \quad \cdots \quad (2)$$

と表せる。従って，白黒画像の場合，

$$T = Y/\Delta y \cdot X/\Delta x \cdot 1/2\ f_p \quad \cdots \quad (3)$$

となる。カラー画像とは，赤(R)・緑(G)・青(B) の各々の輝度情報を重ね合わせたものであるので，各々で得られる輝度情報を別々に伝送することにより，白黒画像と同じ方法で信号を伝送することが可能となる。このことから，カラー画像の情報の伝送時間は，

$$T = Y/\Delta y \cdot X/\Delta x \cdot 3/2\ f_p \quad \cdots \quad (4)$$

となる。

(4)式中のY/Δyと X/Δxは，換言すれば画面の縦及び横の解像度（画素数：PEL ）のことであり，これらの値をパラメータとし，(4)式を用いて伝送時間Tと最高画周波数 f_p との関係を求めると図2のようになる。

輝度情報は，電圧の大きさとして出力される。しかし，これを音響信号として水中に送出した場

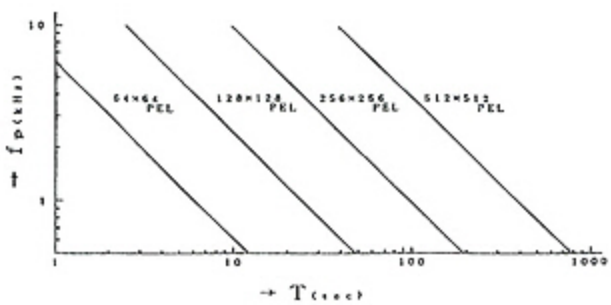


図2　伝送時間Tと最高画周波数f_pとの関係

Fig. 2　Relation of T(transmission time) and f_p(maximum picture frequency)

合，伝搬のゆらぎ等の影響から，受信側で正確に再現することは困難である。したがって，ここでは画像の輝度情報を周波数に変換し，搬送波を周波数変調してＦＭ信号として送出している。

f_p は，画像情報による周波数の最大偏差Ｄと，これによって占有される周波数の帯域幅 B_n によって次のように表わされる。

$$f_p = (B_n - 1.5\,D)/2 \qquad \cdots (5)$$

そこで，(5)式によって得られる f_p を(4) 式に代入してやれば，伝送時間が求められる。

2.2 変調方式

ＦＭ信号波の場合，一般に被変調出力信号ｍｆ（ｔ）は次のように表わせる。

$$mf(t) = E_f \cos\{2\pi f_s t + \int^t v(t)\,dt\} \qquad \cdots (6)$$

ここで，E_f は搬送波の振幅，f_s は搬送波周波数，$v(t)$は画像の振幅情報である。

このｍｆ(t)を，目的の周波数において音響信号として伝送するためには，さらに，適当な音響周波数の搬送波に変調を施す必要がある。

本装置では，スペクトルの広がりをできるだけ抑圧し，使用できる周波数帯域と電力を最大限に利用することが可能な，変調方式として最も優れたＳＳＢ−ＳＣ(Single Side Band Suppressed Carrier modulation）方式を使用している。

一般に，ＳＳＢ−ＳＣ方式等の振幅変調方式において，振幅E_c，周波数f_c で表される搬送波，$e(t) = E_c \cos 2\pi f_c t$ を，ｍｆ(t) で変調した場合，変調度ＫをＥｆ／Ｅｃとすると，被変調波ｍ(t)は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} m(t) &= [1 + K\cos\{2\pi f_s t + \textstyle\int^t v(t)dt\}] \\ &\quad \cdot E_c \cos 2\pi f_c t \\ &= E_c \cos 2\pi f_c t \quad \cdots\cdots ①\text{搬送波成分} \\ &\quad + E_f/2 \cdot \cos\{2\pi (f_c + f_s t \\ &\quad + \textstyle\int^t v(t)dt\} \cdots\cdots ②\text{上側波帯成分} \\ &\quad + E_f/2 \cdot \cos\{2\pi (f_c - f_s t \\ &\quad + \textstyle\int^t v(t)dt\} \cdots\cdots ③\text{下側波帯成分} \end{aligned}$$

したがって，ＳＳＢ−ＳＣ方式により，(7)式の①の搬送波成分を抑圧し，②，③のうち，例えば②の上側波帯成分のみ取り出せば，$f_c + f_s$ を搬送波とするＦＭ信号波ｍｆ(t)と等価な信号を得ることができる。

これに加え，平衡変調器と急峻な特性を持つフィルタを用いることで，搬送波を約40ｄＢ，下側波帯成分を約20ｄＢ以上抑圧することができ，側波帯間の相互干渉も避けることができる。

2.3 画像情報伝送試験装置

本試験装置では，１枚の静止画は256（画素）×256（ライン）で構成され，各画素は，256（8 bit）階調の輝度情報を持っており，各階調は図３に示す通りに振り分けている。同期方式はラ

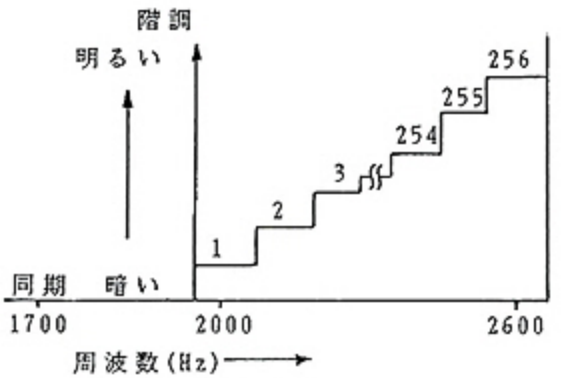


図３　画像信号と周波数の対応

Fig. 3 Relation of the SCFM frequency and luminance scale

イン順次伝送方式で，また潜水調査船システムの他の音響機器に対して妨害を与えないように，ＳＳＢ変調方式によって上側波帯成分を取り出している。搬送周波数は25 kHz〜28 kHz である。前述した(5)式のB_n及びＤは，それぞれ 5 kHz，500 kHz であり，これらの条件により伝送時間は約46秒となる。

試験装置の系統図を図４に示す。送信部では，ビデオカメラ等で得られた画像を，Ｒ・Ｇ・Ｂ おのおのの輝度信号に分離して静止画としてメモリに一旦記録する。そして１走査線の輝度情報を読み取り，その先頭に同期信号を加えてＦＭ変調を行う。なお送波器は，本装置及びその変調方式において出来るだけ効率良く，しかも安定した画像信号の伝送を行なうことを目的として開発した，整合層付き広帯域送波器を使用している。

受信部では送信部と逆の処理を行うことによって画像がモニタに出力される。

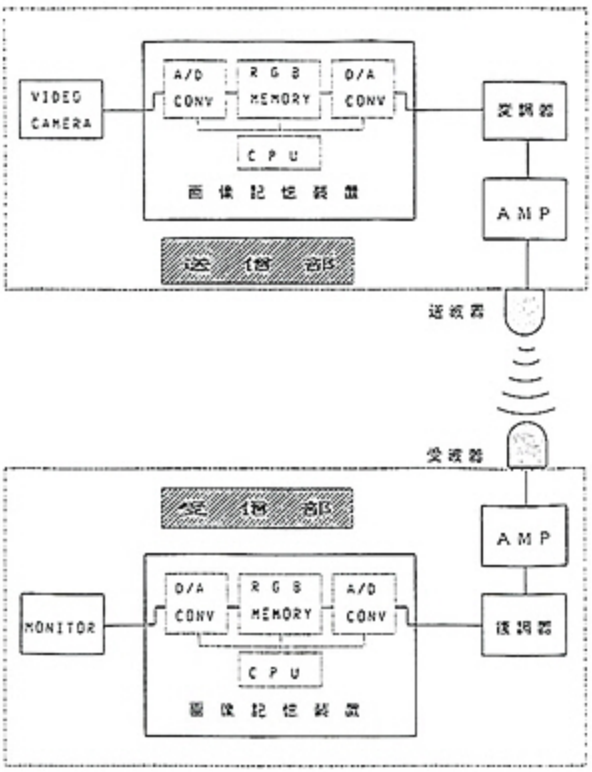


図4　試験装置の系統図

Fig. 4　Block diagram of test devices for video transmit

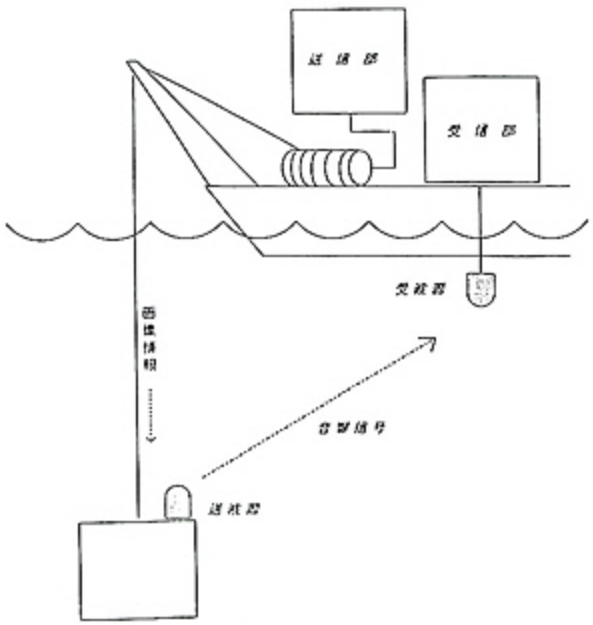


図5　予備試験概念図

Fig. 5　Basic system of the underwater Acoustic Signal Propagation Test Equipment

3. 実海域における予備試験

「しんかい2000」に搭載する試験に先立ち，昭和62年度に伝送試験を実施した。

概念図を図5に示す。試験は伝送距離を最大3,500 m（水深方向）まで変えて行い，受信画質の劣化や同期信号の乱れの状態を調査した。この試験では，非常に良質のカラー受信画像を得ることができた。

なお，画像を受信するために必要なS／Nについては，超音波水槽で調査した結果，実用上十分な画像を得るのに，S／Nは25～30dB以下必要であるという結果が得られている。

4. 「しんかい2000」による伝送試験

実用化を目指し，昭和63年11月8日に実際に潜水調査船「しんかい2000」に試験装置を搭載して，駿河湾の松崎沖の水深約2,000 mの海域（駿河トラフ中軸部）で，海底からの画像の伝送試験を実

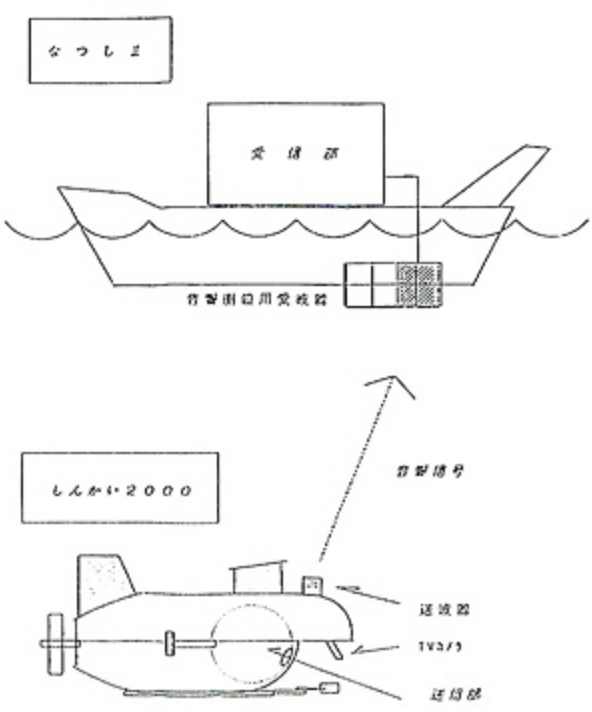


図6　試験概念図

Fig. 6　Main system of the sea trial by "SHINKAI 2000"

施した。

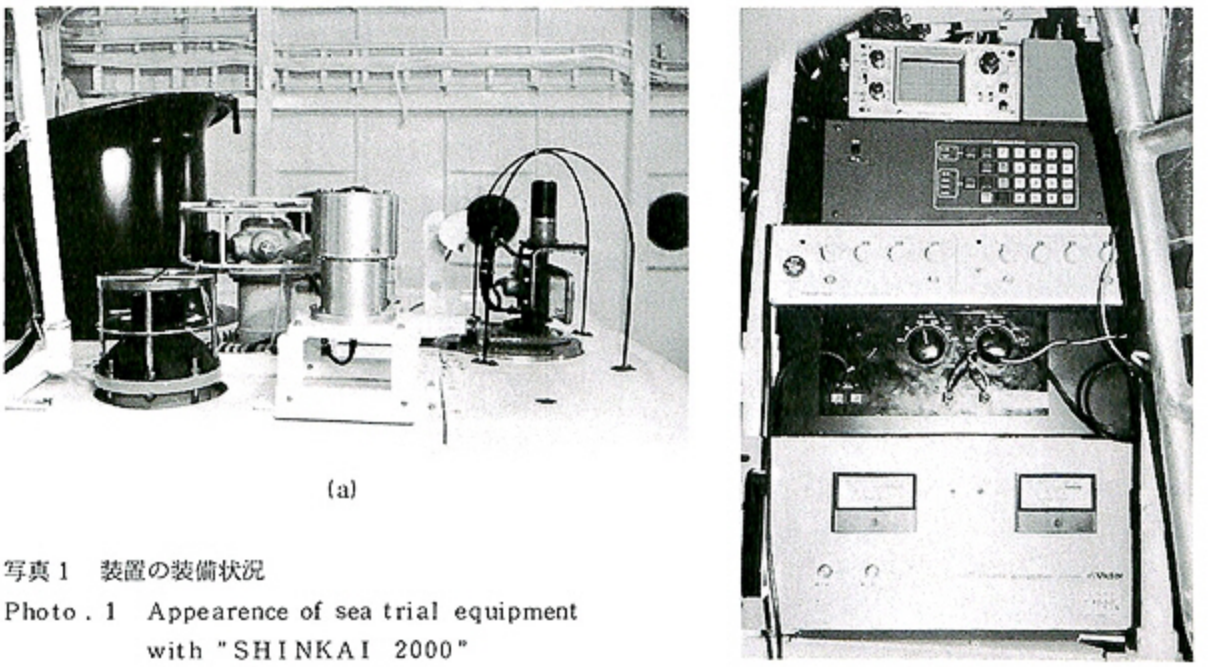
4.1 試験方法

図6はこの試験の概念図である。

潜水調査船に搭載した耐圧殻内の装置類のほとんどは，ペイロードラックに取り付けたが，試験用の装置であるため，合計重量は約82kgとなった。

また，「なつしま」での信号の受信には，指向性利得を得るために，船底に装備されている音響測位（SSBL）用受波器の素子配列（4×4＝16）のうち，4素子分の出力を合成して使用した。

「しんかい2000」への装置の装備状況を写真1に示す。この写真でわかるように送波器は，専用の治具を用いて潜水船上部に装備している。



(a)　(b)

写真1　装置の装備状況

Photo . 1　Appearence of sea trial equipment with "SHINKAI 2000"

(a) 潜水船上部
Upper part

(b) 潜水船内ペイロードラック（上から，オシロスコープ，画像変換装置，フィルタ，マッチングトランス，電力増幅器）
Inside of pressure hull

この試験では，送信電力をパラメータとして，テストパターン及び「しんかい2000」の水中TVカメラで得られた海底の画像を着底状態で伝送し，この信号を「なつしま」で受信・記録し，S／N等を調査した。また，併せて同期信号の乱れなどを調査するため，航走状態での伝送試験を実施した。

4.2 試験結果

写真2に送・受信画像の一例を示した。送信出力は25 W，伝送時間はほぼ46秒であった。この画像からもわかるように，「なつしま」船上で受信した画像と「しんかい2000」の水中TVカメラで得られた原画像を比較した結果，画質の劣化はほとんど認められなかった。

また，「しんかい2000」と母船の「なつしま」を使用して伝送を実施した場合に得られる，理論上のS/Nを求めることにした。

送信電力と受信側のS/Nとの関係を求める場合のソーナー方程式は，次のように与えられる。

$$S/N = 10 \cdot \log P + Trs - TL - NL \quad \cdots(8)$$

ただし，ここで

P　＝送信電力（W）

Trs ＝ 送波電力感度（dB/W）

TL＝伝搬損失（dB）

NL＝雑音レベル（dB）である。

これらの内 Trs は，前述した送波器の実測値を使い，81 dB/W（25 kHz）とした。

TLは，伝搬距離 r(m)，吸収損失をα（dB/km）とすれば，$TL=20\cdot\log r+\alpha r\times10^{-3}$ で求められる。ここで，αはShalkin & Marsh の実験式から周波数が 2 k～25kHz の間では，

$$\alpha=\{1.86\cdot10^{-2}\cdot S\cdot f_T\cdot f^2/(f_T^2+f^2)+2.68\cdot10^{-2}\cdot f^2/f_T\}\cdot1.0936 \quad \cdots (9)$$

S ＝塩分

f ＝周波数（kHz）

$f_T=21.9\cdot10^{6-\{1520/(T+273)\}}$

…水温Tに依存する緩和周波数

で表わせる。塩分及び水温は，潜航時に「しんかい2000」で測定したそれぞれの値の鉛直平均を用い，S＝34.5，T＝5.6（℃）とした。

また，NLは潜水調査船システムの母船「なつしま」での値Nsp＝－5－20・logf（kHz）を使用し，受信帯域幅を2,800（Hz）とする。また，受波器の指向性利得を16 dB（電力半減角＝30°）とすれば，受波器に入力されるNLは，NL＝Nsp＋10・log 2,800－16（dB）となる。

以上の設定条件を(9)式に代入し，母船が潜水船の直上にいると想定して，水深2,000 mの海底から25～27.8 kHz の伝送周波数で送信した場合の，電力とS/Nの関係を求めたのが図7である。

また，各送信出力におけるS/Nの計測結果を図7の計算値に重ねてプロットした。この図からわかるように，計測結果は，計算値と極めてよく一致する。このことから，「しんかい2000」が母船直下にいる状態で実用上十分な画像，つまりS/N 30 dBを確保するために必要な送信電力は20Wであるということができる。

今回の試験においては，垂直同期信号に加え，各走査線毎の始点に対応する水平同期信号も伝送する伝送同期方式を使用したため，潜水船が海底付近を約1 kt で航走しながら行った伝送においても，着底状態と変わらない良質の画像を受信することができた。

一方，25Wでカラーパターンを伝送した際には音響測位用質問信号の影響により，同期の欠落によって画面の下半分にずれを生じた場合があった。しかしながら，出力50W以上による伝送ではこういった現象は生じなかった。したがって，音響測位用質問信号の同期信号への影響は，50W以上の送信出力を確保することで避ける事ができると考えられる。また，この欠落の原因は質問信号の高周波成分であると考えられるため，搬送波周波数を3 kHz 程度ずらすことによって，欠落を防げるのではないかと考えている。

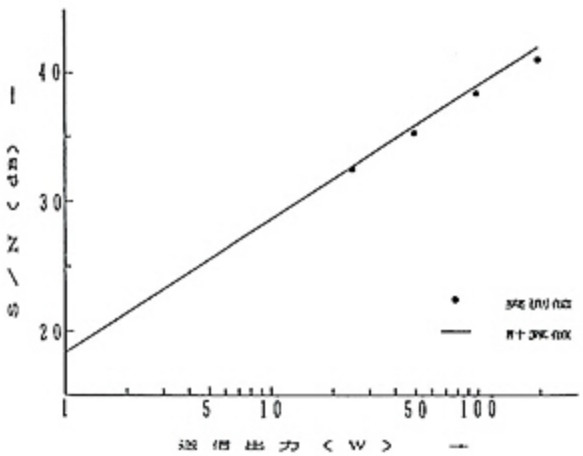


図7　電力とS/Nの関係

Fig. 7　Relation of P(power) and S/N

また，潜水船への影響として，画像伝送が潜水船に装備されている前方障害物探査ソーナーに干渉したが，これは送波器の取り付け位置を変えることで回避できると考えている。

5. おわりに

今回の試験結果から「しんかい2000」システムにおいて，実際の海底の画像を音響によりほぼ実時間で伝送することが可能であることがわかった。筆者らは，このシステムをさらに高速化することによって，潜水調査船の調査能力が飛躍的に向上すると考えている。

現在，高速ディジタル伝送方式（PSK方式）と画像処理の研究を行っており，これらの研究の結果，10秒以内で1枚のカラー画像の伝送に成功している。

今後は，現在海洋科学技術センターが建造を進めている「しんかい6500」にも適用が可能な装置の開発に着手する予定である。

参考文献

網谷泰孝，安藤久司，中西俊之，土屋利雄，山本浩文，岩柳順二，1986，相模湾における鉛直方向音波伝搬試験について．海洋科学技術センター試験研究報告特集号第２回「しんかい2000」シンポジウム，75－80．

土屋利雄，中西俊之，網谷泰孝，青木太郎，山本浩文，1986，音響による画像伝送の基礎研究。海洋科学技術センター試験研究報告第17号，53－63．

土屋利雄，中西俊之，網谷泰孝，山本浩文，青木太郎，許　正憲，1987，海中音響伝搬試験装置の製作及びその海上試験結果．海洋科学技術センター試験研究報告第18号，39－50．

土屋利雄，中西俊之，網谷泰孝，山本浩文，許　正憲，野並健二，1988，音響による画像伝送の研究．海洋科学技術センダー試験研究報告第19号，35－48．

土屋利雄，中西俊之，網谷泰孝，山本浩文，許　正憲，野並健二，新井嘉人，名田孝稔，鈴木道也，1988，音響によるビデオ信号の伝送について．海洋音響研究会講演文集，５－８．

Masanori Kyo, Toshiyuki Nakanishi, Toshio Tsuchiya, Yasutaka Amitani, Kenji Nonami, Hirofumi Yamamoto, 1988, STUDY ON ACOUSTIC TRANSMISSION SYSTEM OF VIDEO PICTURE FOR "SINKAI 2000". PACON'88, OST 1/31- OST 1/36. (1988)

許　正憲，中西俊之，土屋利雄，網谷泰孝，新井嘉人，名田孝稔，1989，広帯域送波器の開発．海洋科学技術センター試験研究報告第21号，45－54．

（原稿受理　1989年４月21日）

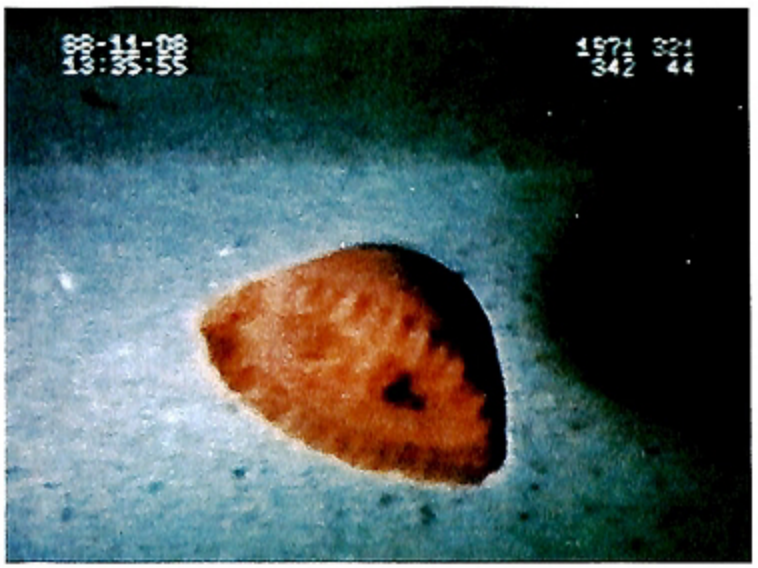


写真２　送受信画像

photo. 2 Result of sea trial

(a) 送信画「しんかい2000」の水中ＴＶカメラで得た画像
Original video picture by TV camera with "SHINKAI 2000"

(b) 受信画「なつしま」船上で受信した画像
Received video picture in "NATSUSHIMA"