

音響による画像情報のデジタル伝送 (PSK方式) について

土屋 利雄^{*1} 中西 俊之^{*1} 網谷 泰孝^{*1}
野並 健二^{*1} 許 正憲^{*1} 新井 嘉人^{*1}
杉内 克己^{*2} 鈴木 道也^{*2}

我々は、潜水船で得られたTV画像を母船上に伝送することを目的として、音響信号により画像情報を伝送するための研究を続けてきた。その結果、アナログ伝送方式で「しんかい2000」を使って、水深2000mの海底の様子を1画面当り46秒で伝送することに成功した。

これらの結果を基に、伝送速度の向上と伝送距離の延伸を計るために、デジタル伝送(PSK)方式の研究を開始した。そこで伝送路の補正に必要な適応等化器や画像データの圧縮のための高能率符号化の検討を行い、その結果に基づいて伝送試験装置を製作した。そして、実海域においてこの試験装置を使った伝送試験を実施し、距離3,500mまで1画面当り約7秒で良好な画像情報を伝送することができた。

キーワード：音響信号，画像伝送，高速デジタル伝送，PSK方式，画像圧縮，
高能率符号化，DCT方式

Study on Color Video Pictures Transmission by Digital (PSK) Acoustic Signal

Toshio TSUCHIYA^{*3} Toshiyuki NAKANISHI^{*3}
Yasutaka AMITANI^{*3} Kenji NONAMI^{*3} Masanori KYO^{*3}
Yoshihito ARAI^{*3} Katsumi SUGIUCHI^{*4} Michiya SUZUKI^{*4}

We have been studying video picture transmission by acoustic signal. As the result of many studies, we have successfully carried out an ocean experiment for acoustic transmission of color pictures to the mothership from "SHINKAI 2000" at the depth of 2,000m. But in this case, the transmission data rate was very slow for analogue modulation system, and much time (46 sec) is needed for transmitting an

*1 海洋開発技術部

*2 日本電気(株)海洋技術部

*3 Deep Sea Technology Department

*4 NEC corporation

enormous amount of picture data. Therefore, a video picture transmission system requires a higher data rate transmission method.

Thus we decided to employ the PSK (Phase Shift Keying) method which is the most superior system in digital modulation. But the PSK method for long-range application includes various difficulties, that is, (1) lower frequencies used for long-range transmission because the absorption loss of acoustic energy increases at higher frequencies. But the higher data rate of PSK transmission requires a wider band-width, which is limited by the carrier frequency and the band width of the acoustic transducer. (2) Phase distortion caused by frequency characteristics of the channel. (3) Unstable acoustic channel and effect of the Doppler shift make its reliability lower.

We have made many studies to solve these various difficulties of PSK application for long range transmission in sea-water. Therefore a test system of high-speed PSK acoustic video picture transmission with 4-PSK at 20 k-bps was realized through development of, (1) Adaptive Equalizer (AEQ) with phase controller that removes the phase distortion and compensates for the Doppler shift, (2) Image coding based on Discrete Cosine Transformation (DCT) that reduces the color video information to 2bit/pixel.

As the result of ocean experiments with a test system, we have carried out a 7 second transmission of color pictures at the range of 3,500 m with depth direction.

Key word: Acoustic telemetry, Video picture transmission, Hi-speed digital data transmission, PSK, Image coding, DCT method

1. はじめに

我々は、潜水船で得られたTV画像を母船上に伝送することを目的として、音響信号により画像情報を伝送するための研究を続けてきており、潜水調査船からアナログ方式によりカラー画像(46秒/画像)を伝送することが可能になった。^{1),3)}

これらの結果を基に、伝送速度の向上と伝送距離の延伸を計るために、ディジタル伝送(PSK方式)及び画像処理のための研究を行い、実海域試験を実施した。その結果、鮮明なカラー画像を水深方向3,500 mから約7秒で伝送することができたのでこの手法と、試験結果について報告する。

2. PSK方式による画像信号伝送

図1に示したような様々なディジタル変調方式の中で、PSK(Phase Shift keying)方式は、搬送波の位相の変化を“0”または、“1”のデータ系列に対応させた変調方式であり、原理的に、他の

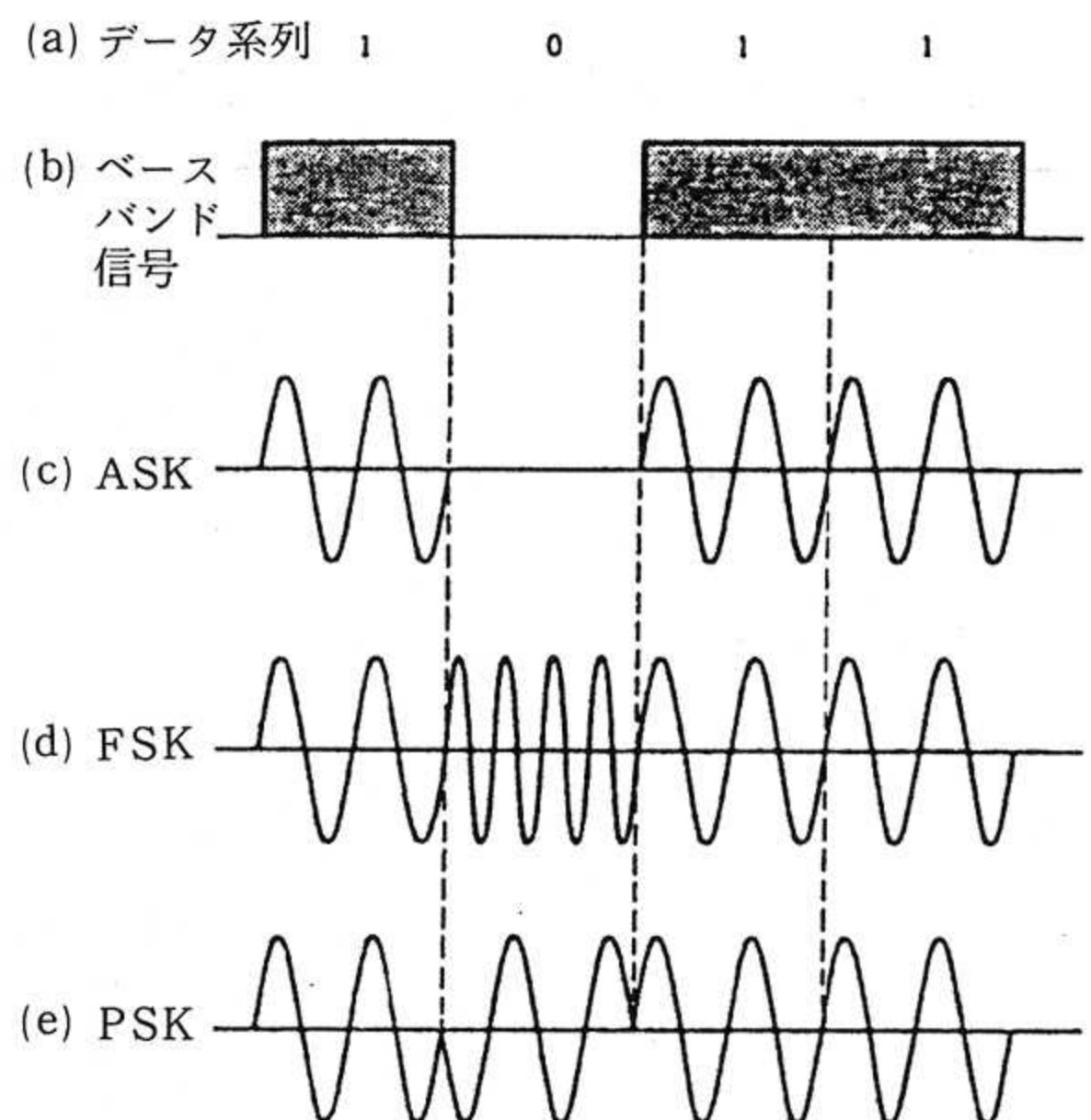


図1 デジタル変調方式

Fig.1 Schematic of Digital Modulation

デジタル伝送方式（ASK，FSK等）に比べ次の点が優れている。⁴⁾

①伝送周波数帯域が同じ場合，最も高速のデータ伝送が可能である。

②受信時のS/Nが同じ場合は，伝送データのビット誤り率が最も小さくなる。

しかし一方，次のような点で技術的な対応が必要となる。

①ハードウェアの規模が他のデジタル伝送方式に比べて大きくなる。

②伝送路の位相情報の変動により，データの誤り率が支配されるので，音響による伝送では，適切な補正が必要となる。

我々は，このようなPSK方式の優れた特質を生かして，画像情報を伝送するために必要な検討を行い，その結果にしたがって4相（4-PSK）及び8相（8-PSK）のPSK信号伝送試験装置を製作した。

3. 海中におけるPSKの信号伝送

(1) PSK信号の海中伝送の問題点

一般にPSKの信号伝送において，伝送路の周波数特性が，定振幅・直線位相（定遅延）の理想特性から偏差を生じている場合，位相歪により信号の信頼性が劣化し，伝送路の等化（平滑化）を行わないと誤りが発生する。

しかし，海中における音波の吸収損失や音響送受波器の指向特性が周波数に依存しているため，伝搬距離の変動や，船舶の動揺等による方位の変化により，周波数特性が時々刻々変化する。したがって，この伝送路の周波数特性の等化には，補正値が固定されていない適応型の等化器（Adaptive Equalizer：AEQ）が必要となる。⁶⁾

(2) 適応型等化器の原理^{4), 5)}

適応等化器は，まず未知の伝送路（システム）の振幅と遅延特性を入出力データから推定し，次にこの推定値から伝送路の逆特性を持つようなフィルタを伝送路の一部として構成し，希望するインパルス応答特性を得ることにより，伝送路の等化を実現する。⁷⁾

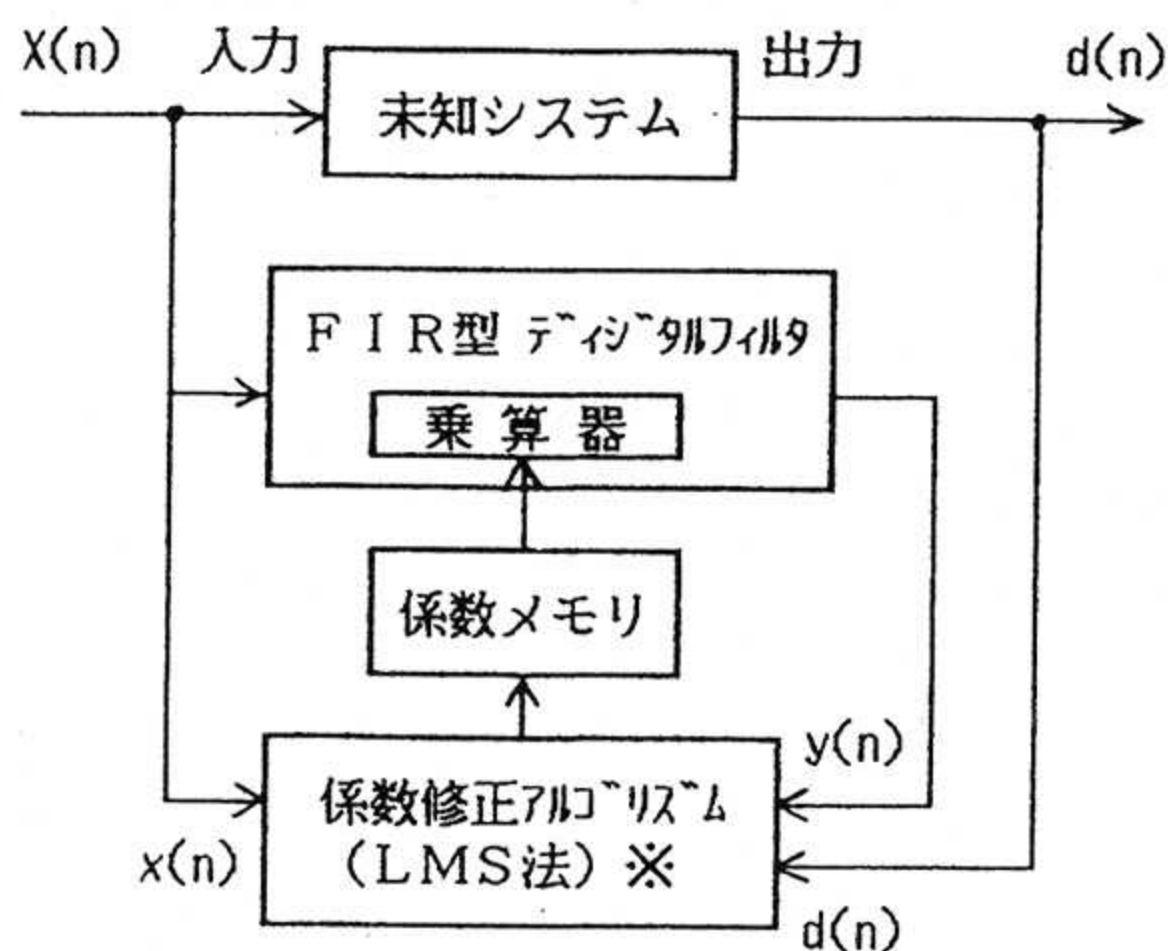
図2に伝送路のパラメータを推定するための原理を示した。離散時間システムにおいて，未知のシステムの入力信号， $x(n)$ を，同時に任意に係数

を書き換えることができるFIR（Finite Impulse Response）型デジタルフィルタに入力する。FIR型デジタルフィルタの原理を図3に示す。この図で Z^{-1} は，遅延回路であり1サンプル前のデータを保持している。また， $a^0 \sim a^N$ は，乗算器を表わしており，所定の特性を得るため各項に乗算器により係数を掛け，重み付けをして各々の出力の移動平均の演算を行うことにより，様々な特性のフィルタを実現することができた。したがって，図2において， $y(n)$ （フィルタの出力信号）と $d(n)$ （望みの信号）とが等しくなるようにフィルタの係数を修正することにより，未知のシステムを等化するために必要なフィルタの特性を得ることができる。

実際の回路においては，FIR型のデジタルフィルタの次数 n が有限なので， $d(n)$ と $y(n)$ とが必ずしも等しくなるとは限らない。そのため， $d(n)$ と $y(n)$ と差の関数 $L\{d(n)-y(n)\}$ を評価量として， L が最小となるように，適当な係数修正アルゴリズムにより係数を求め，高速乗算器により係数を変更する。このためのアルゴリズムは，通常，最小自乗平均（Least Mean Square：LMS）法が使われる。

(3) 適応等化器の製作

本試験装置における適応型等化器は，3-(2)の原理に基づいて，FIR型のデジタルフィルタ



※ 評価量 $L\{d(n)-y(n)\}$ を最小にする

図2 適応化器による未知システムの推定
Fig.2 Estimation of Unknown System

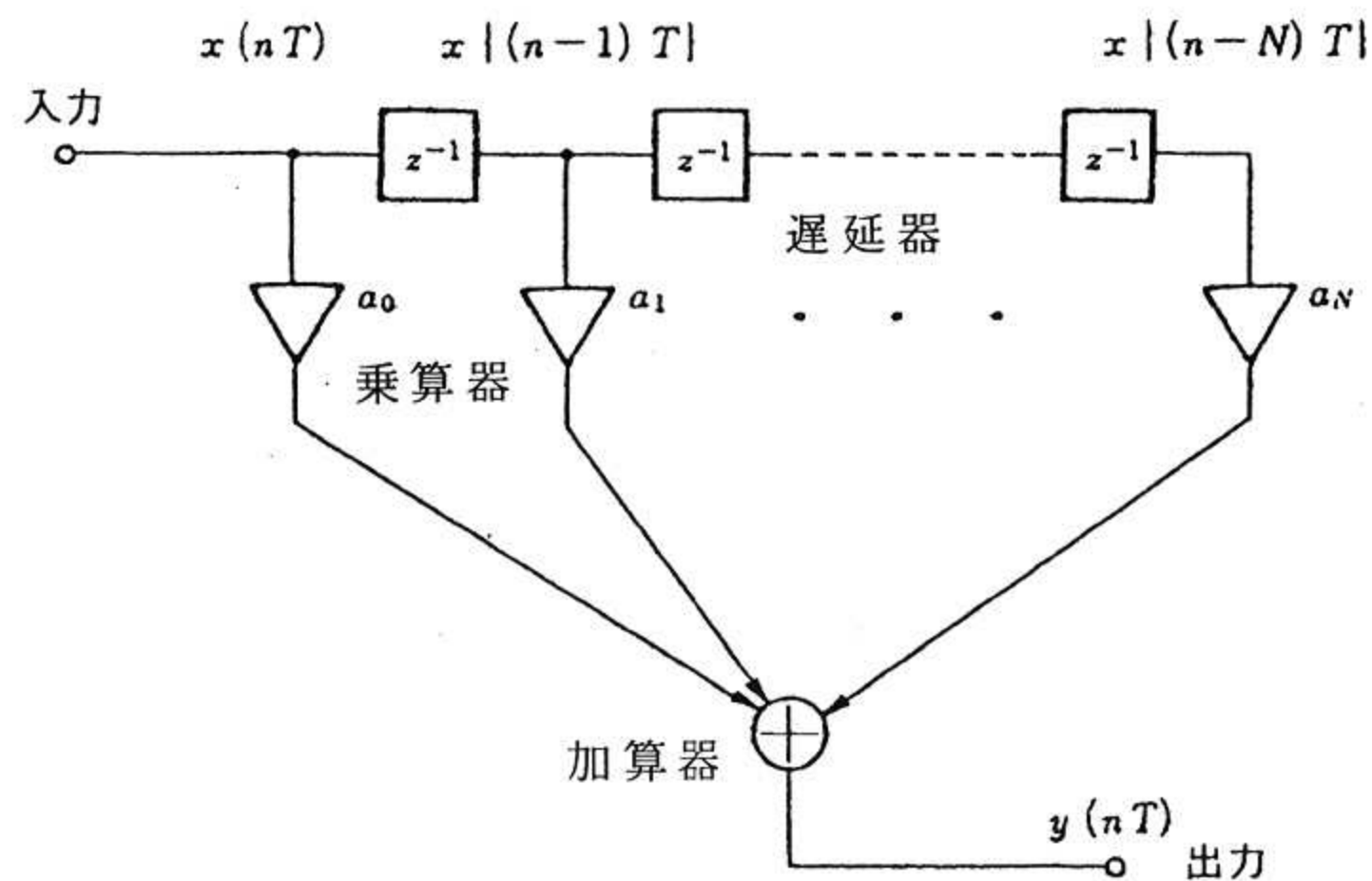


図3 FIR型のデジタルフィルタの原理
Fig.3 Principle of FIR Type Digital Filter

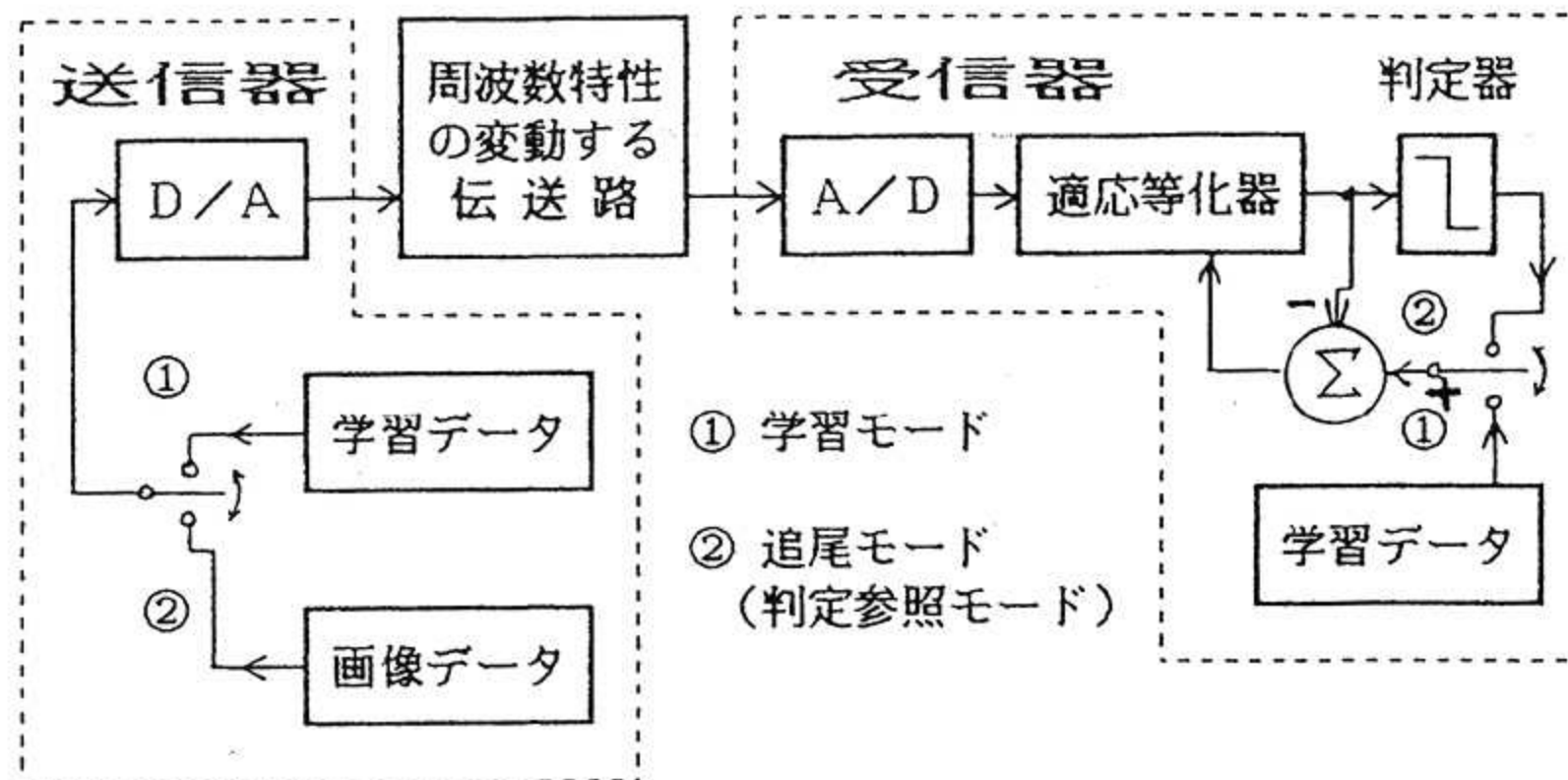


図4 適応等化器によるデータの伝送
Fig.4 Schematic of Data Transmit System by AEQ (Adaptive Equalizer)

にドプラシフトの補正を兼ねたキャリア再生用位相同期回路により構成し、ベースバンドでの等化を行なっている。適応型の等化器においては、できるだけ実時間処理動作が要求されるため、本試験装置では、DSP (Digital Signal Processor) で構成している。DSPは、基本的には、高速乗算器をハードウェアとして内蔵したマイクロプロセッサであり、音声等のアナログ信号を実時間で処理するために開発された素子であり、汎用の演算器に比べ、非常に高速の動作が期待できる。

本試験装置における適応化器の構成を図4に示す。この等化器の動作は、次のとおりである。

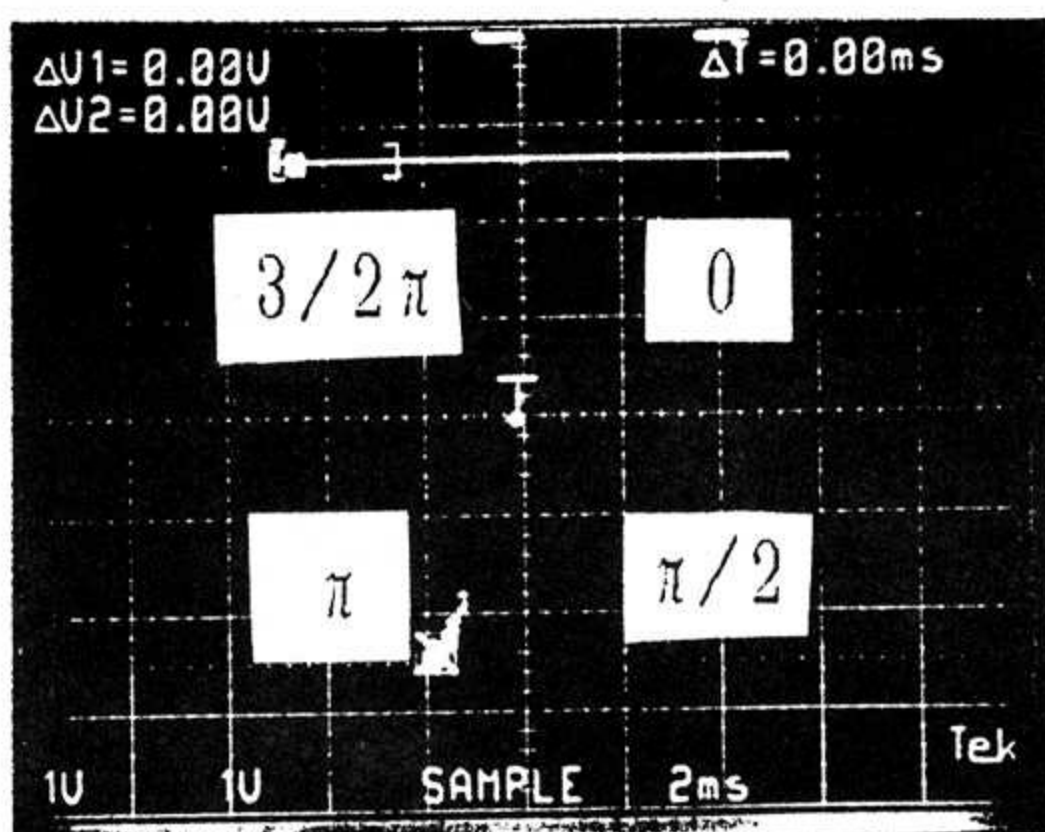
①最初に伝送路の特性を調査するために、送信

器から①の既知の学習データ群 ($0, \pi$ により構成される、最大長シフトレジスタ符号) が伝送される。

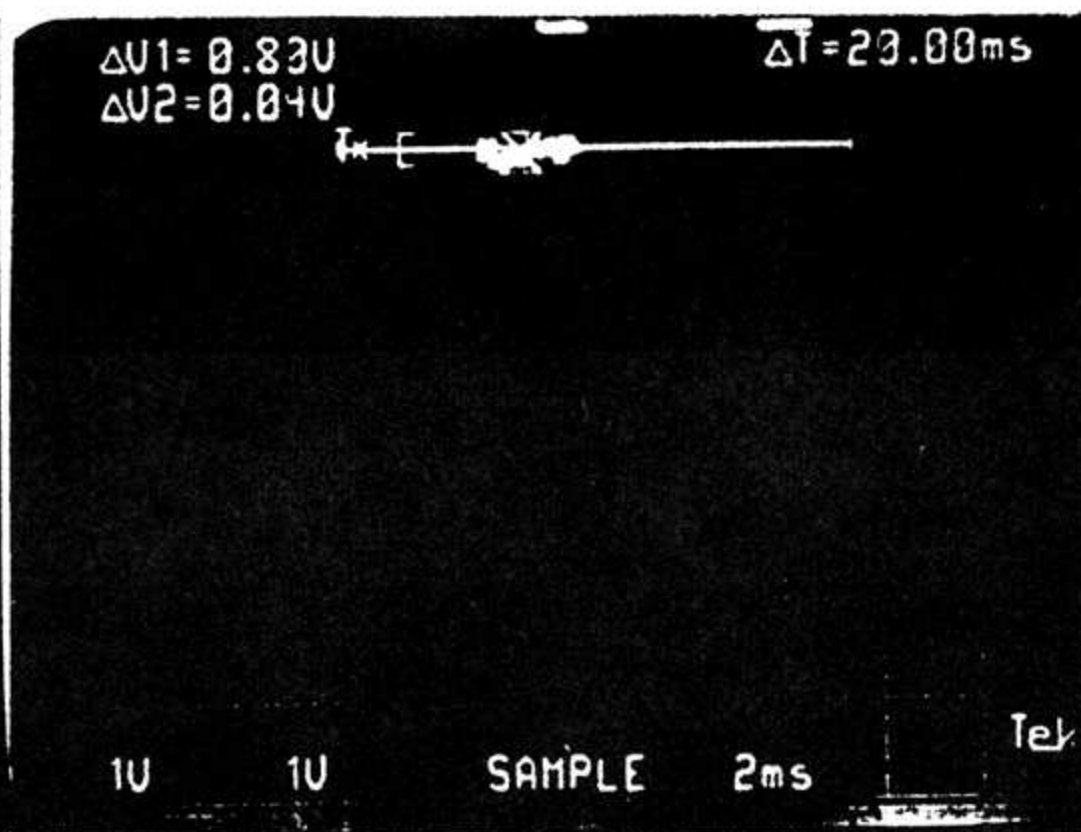
②受信器では、この学習データ群と既知の学習データ群とを比較し、LMS法によりこの誤差が最小になるように適応等化器のFIRフィルタの係数を更新する。

③更新された係数から伝送路のパラメータを推定し、適応等化器において補正值を求める。(以上学習モード)

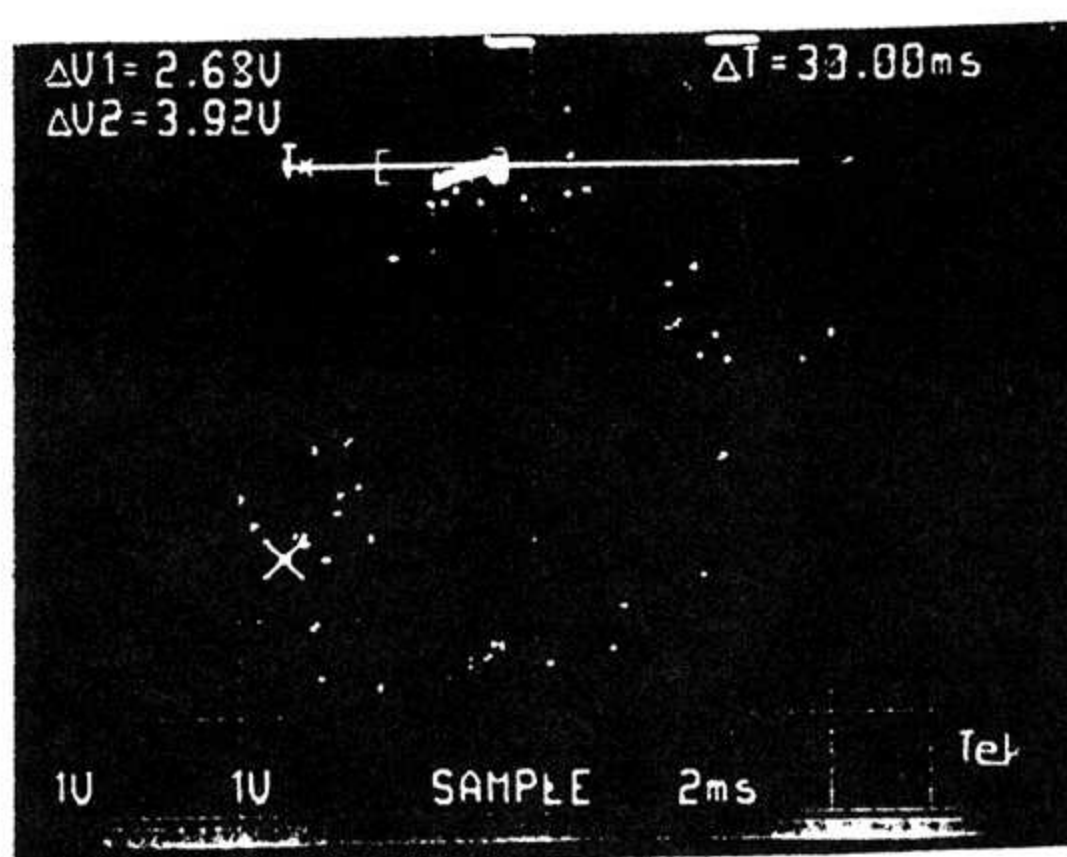
④③の補正值の状態画像データの受信を開始し、データの判定器により、緩やかな変動に対して追従し、等化を連続的に行なう。(追



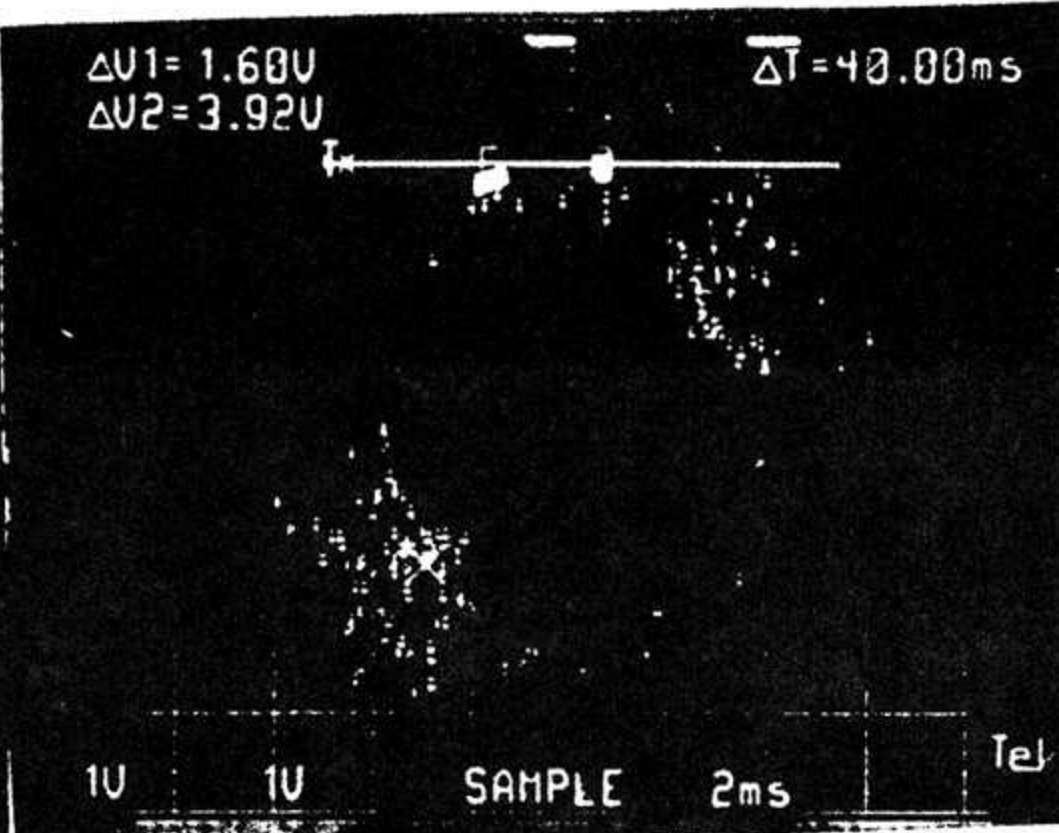
A: 受信開始 (学習モード)



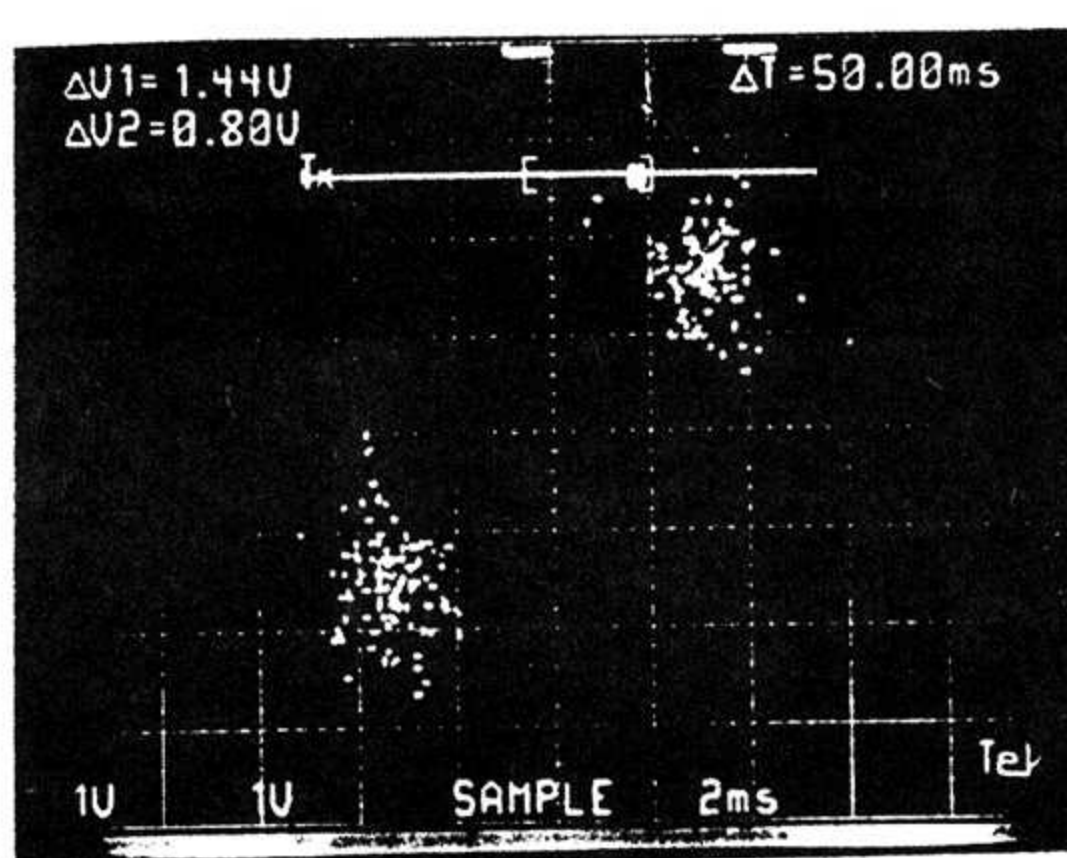
B: 20msec経過



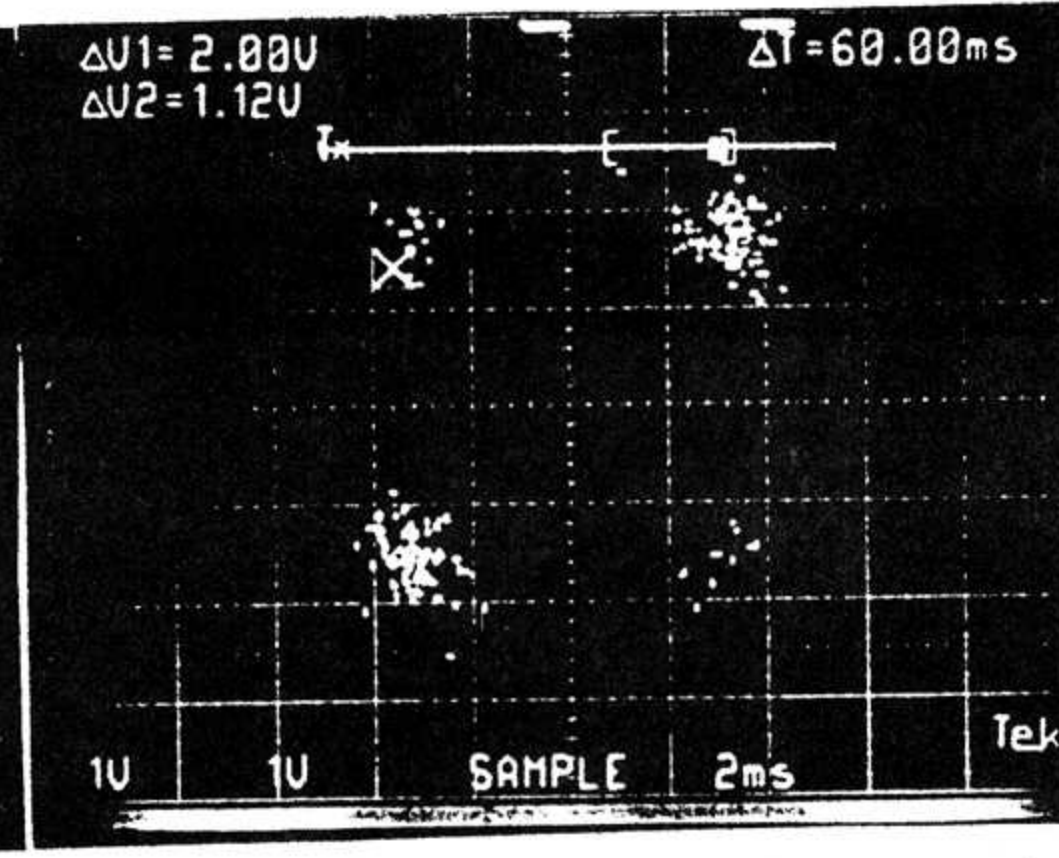
C: 30msec経過



D: 40msec経過



E: 50msec経過



F: 60msec経過 (追尾モード)

図5 適応等化器の動作 (アイパターン)

Fig.5 Working of Adaptive EQulizer (Eye Pattern)

A: 受信開始 (学習モード) B: 20m sec 経過

C: 30m sec 経過

D: 40m sec 経過

E: 50m sec 経過

F: 60m sec 経過 (追尾モード)

尾モードの開始)

(4) 試験結果

図5にこの試験装置で実際に4-PSKの信号を受信したときの、適応等化器の動作試験結果を示す。

図中の白い点がそれぞれのデータを示しており、A～Eまでが学習モードである。乱雑だったデータ群(アイパターン)が時間の経過とともに、0と π の領域に収束していき、計測結果から約50msecで等化が完了し、その後、図中Fの追尾モードから、画像信号の受信を開始することができることが分かった。

4. 画像信号の高能率符号化

(1) 高能率符号化の原理

本研究では、画像情報を効率良く伝送させる目的で、PSKによる伝送方式と併せて、DCT (Discrete Cosine Transfer) 法による画像の高能率符号化処理を行った。

DCTの原理を図6に示す。図6のA(1)のよう

にデジタル的に取り込まれた画像は、時系的に配列された $f(i, j)$ という画素の集合であり、A(2)のようにその画素の位置座標に対し、輝度情報が変化している。これを同図B(2)のように空間周波数的に $F(u, v)$ という画像データに変換すれば、そのパワースペクトルは、B(2)のように大部分が直流及び低周波数成分に集中する。従って、この成分のみを伝送すれば大幅に伝送量を削減できることになる。

しかし、実際には、高周波成分はエネルギー的には小さいが、視覚に与える情報としては、大きな意味を持っているのでこの成分を伝送しないと画質の劣化を招くことになる。このため、DCT法では、送信側で周波数成分に変換された画像信号に対し、画像のブロックごとに量子化し、符号化する際に、視覚的な特性を考慮した上で、可変長符号化によりパワースペクトルに応じたビット割当を行う。そして、受信側では、図6のCのように逆DCT (IDCT) 変換により、受信したデータから各々に対応する各周波数成分の画像を足し

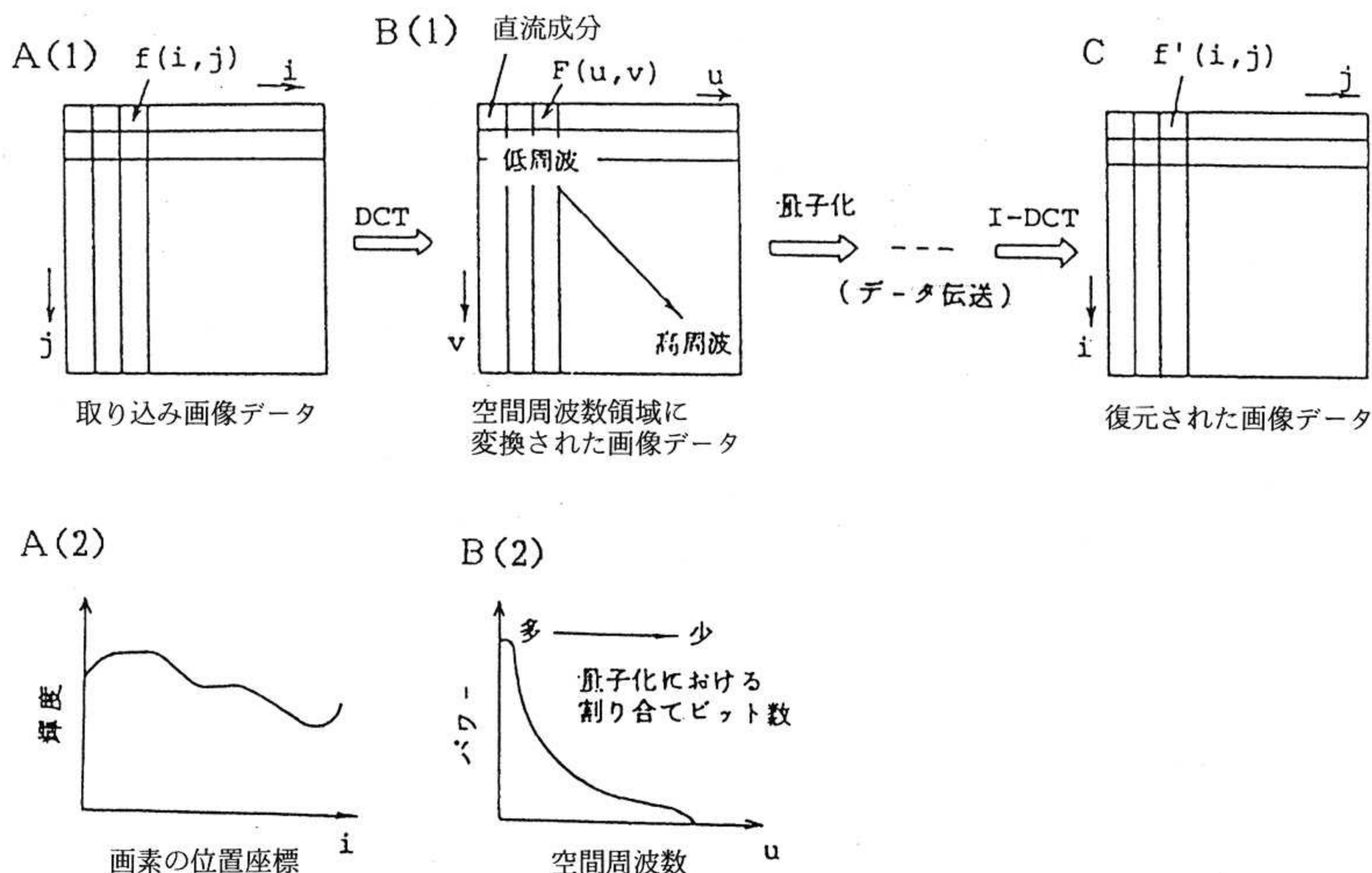


図6 DCT (Discrete Cosine Transfer) による画像符号化
Fig.6 Principle of Image Coding by DCT Method

合わせて元の画像を復元する。その結果、画質を劣化させずに伝送量を大幅に減少させることが可能となる。

本試験装置では、上記のような考えにしたがったアルゴリズムにより、画像情報を符号化する際に、DCT処理を施している。

(2) DCTによる試験結果

DCT法によって伝送した画像を図7に示す。なお、これらの試験には、使用状況に合わせて実際に潜水調査船のTVカメラによって得られた画像を使った。

この図の内、左の原画は、TVカメラの画像を

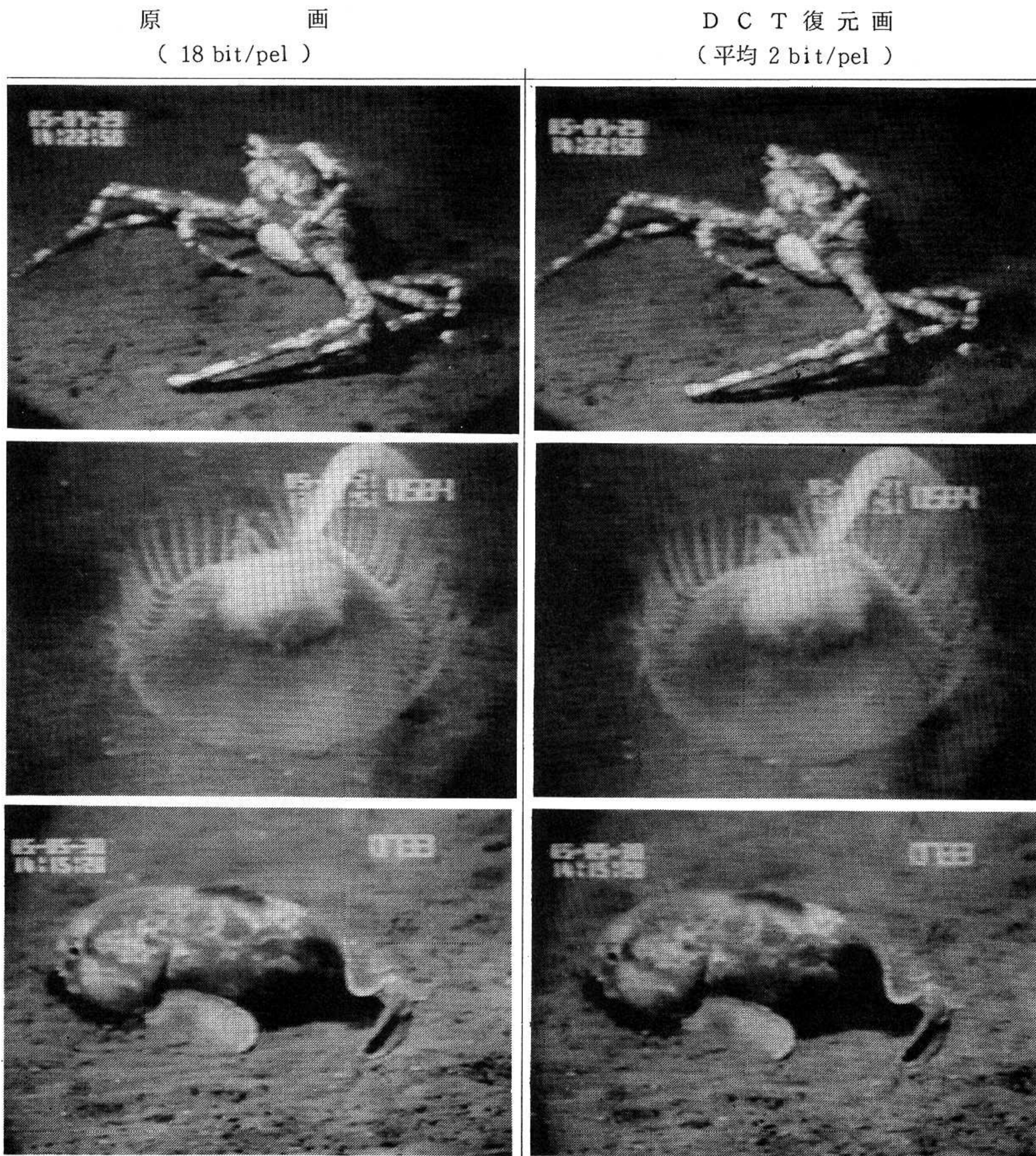


図7 画像符号化シミュレーション

Fig.7 Resulte of Image Cprding Simulation by the DCT

そのままA/D変換したもので、各画素につきR(赤)・G(緑)・B(青)の情報を各々6 bit ずつ合計18 bit で構成している。この画像に対し、D

CT法による処理を施した結果、図の右側のように画質の劣化はほとんど認められなかったが、1画素当り、画像全体の平均で2 bit までデータ量

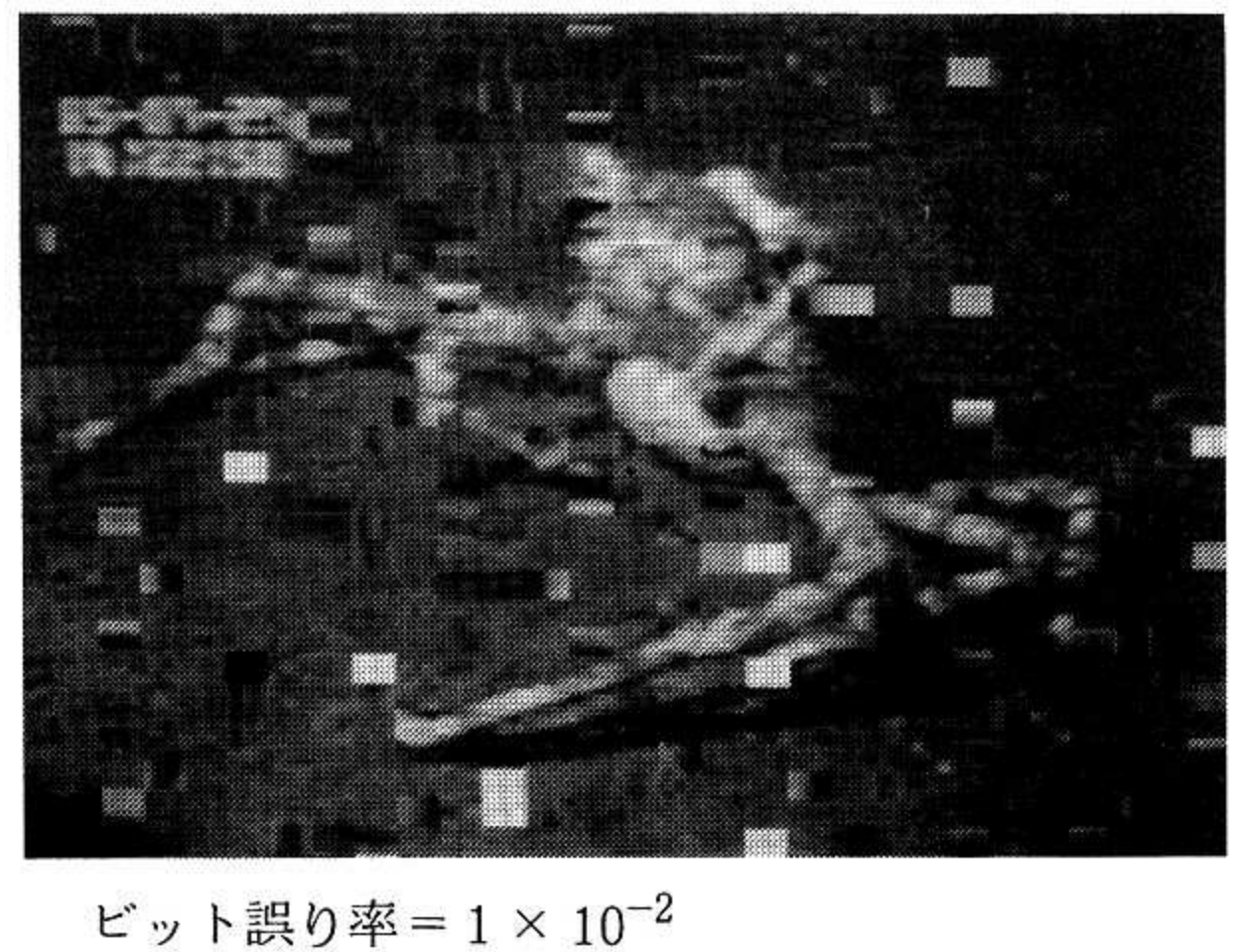
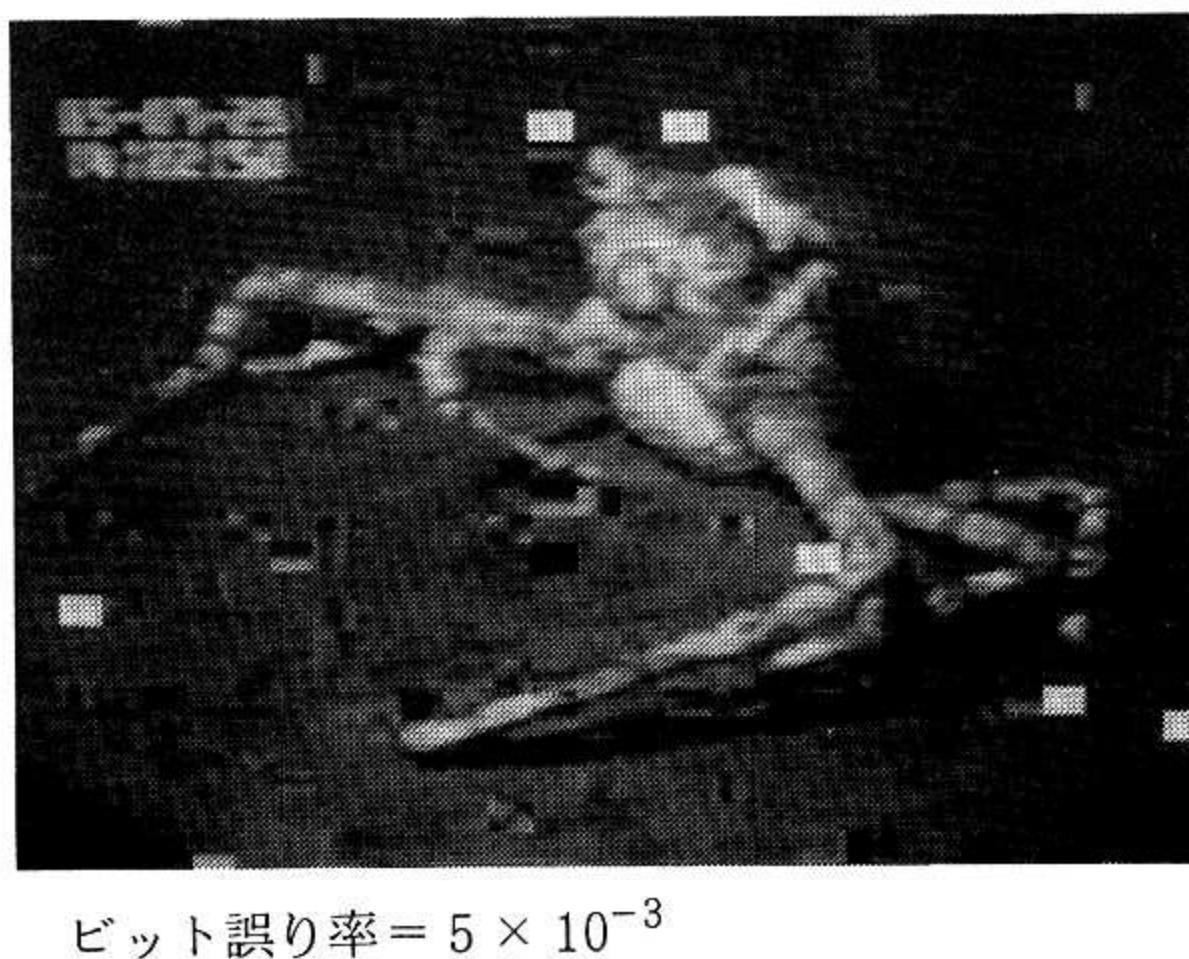
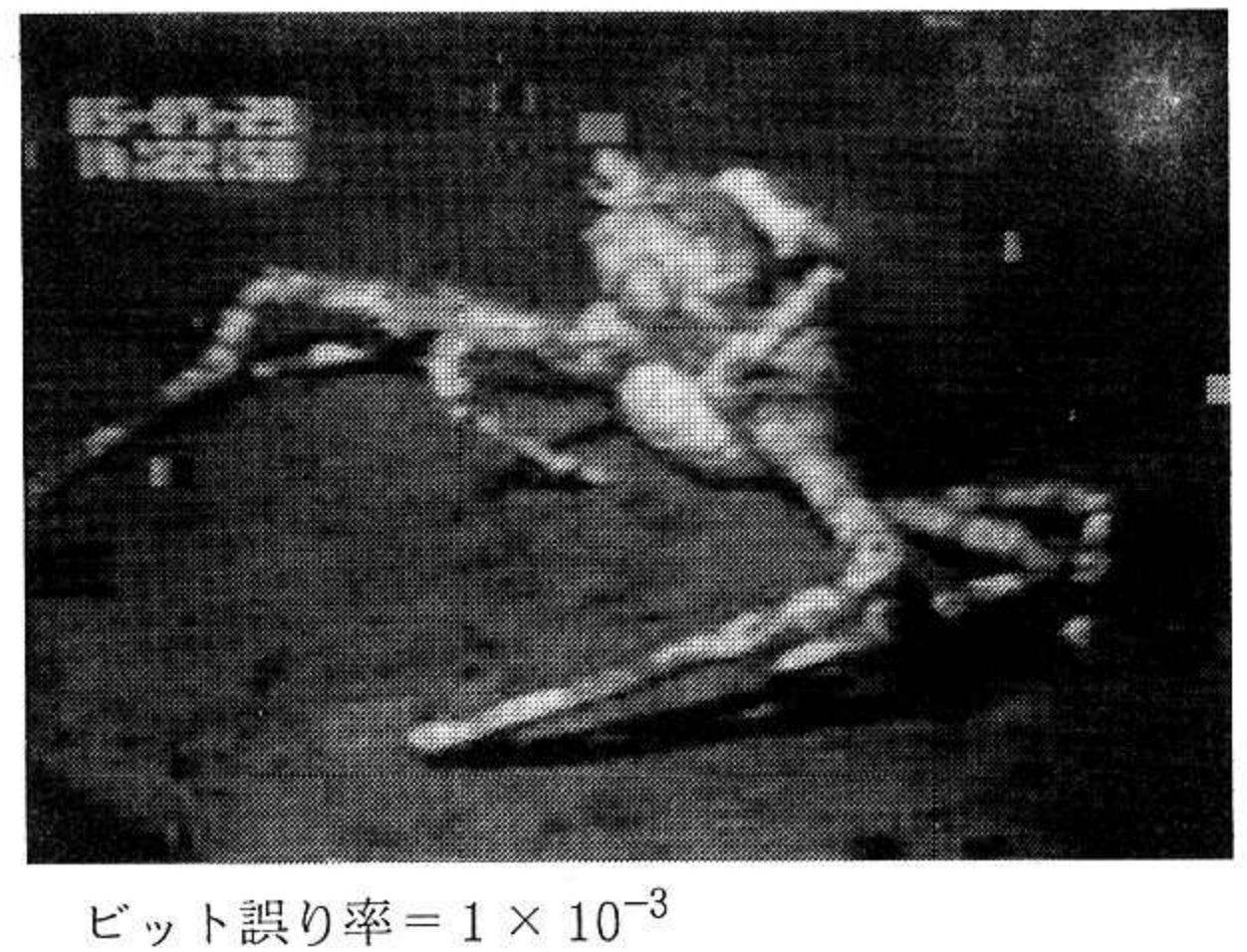
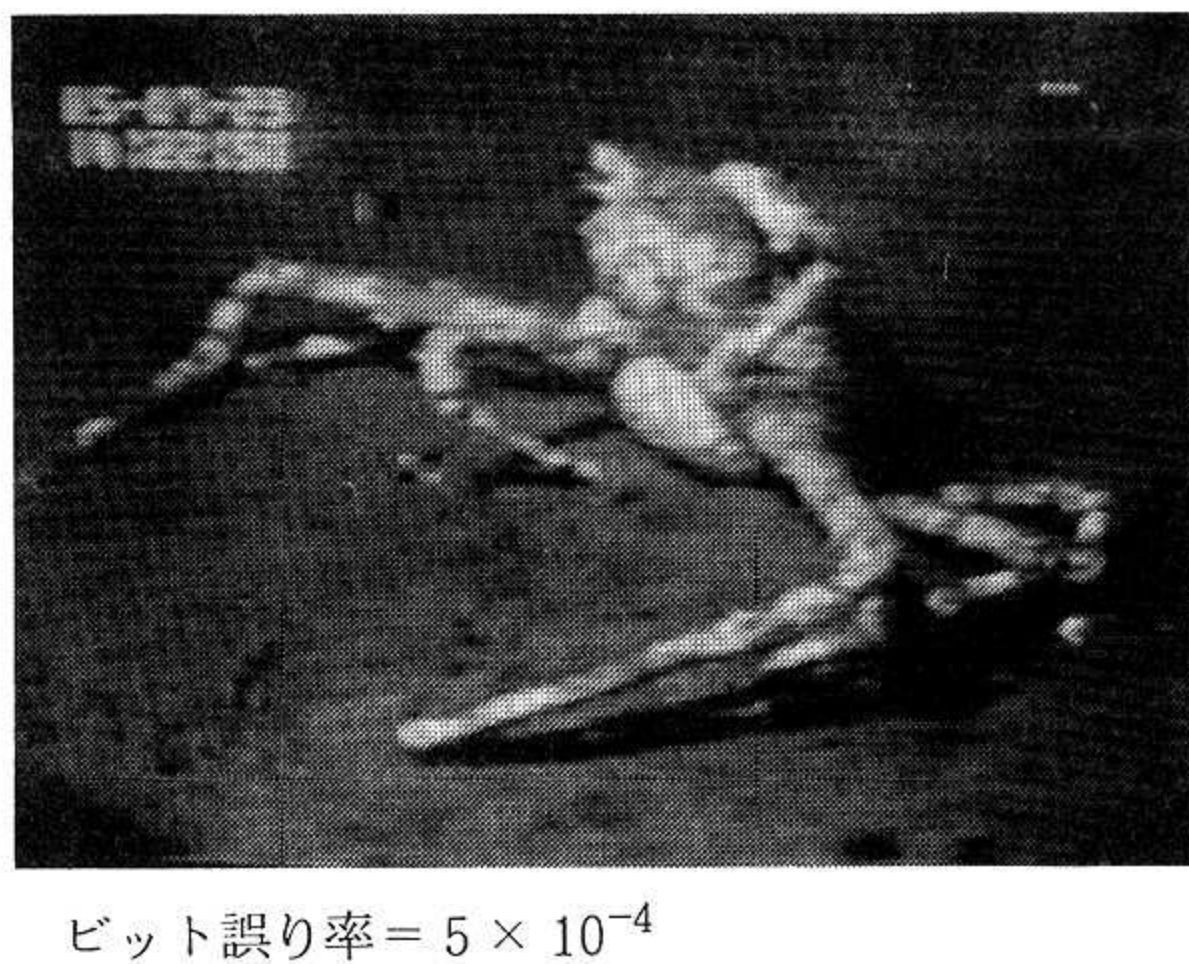
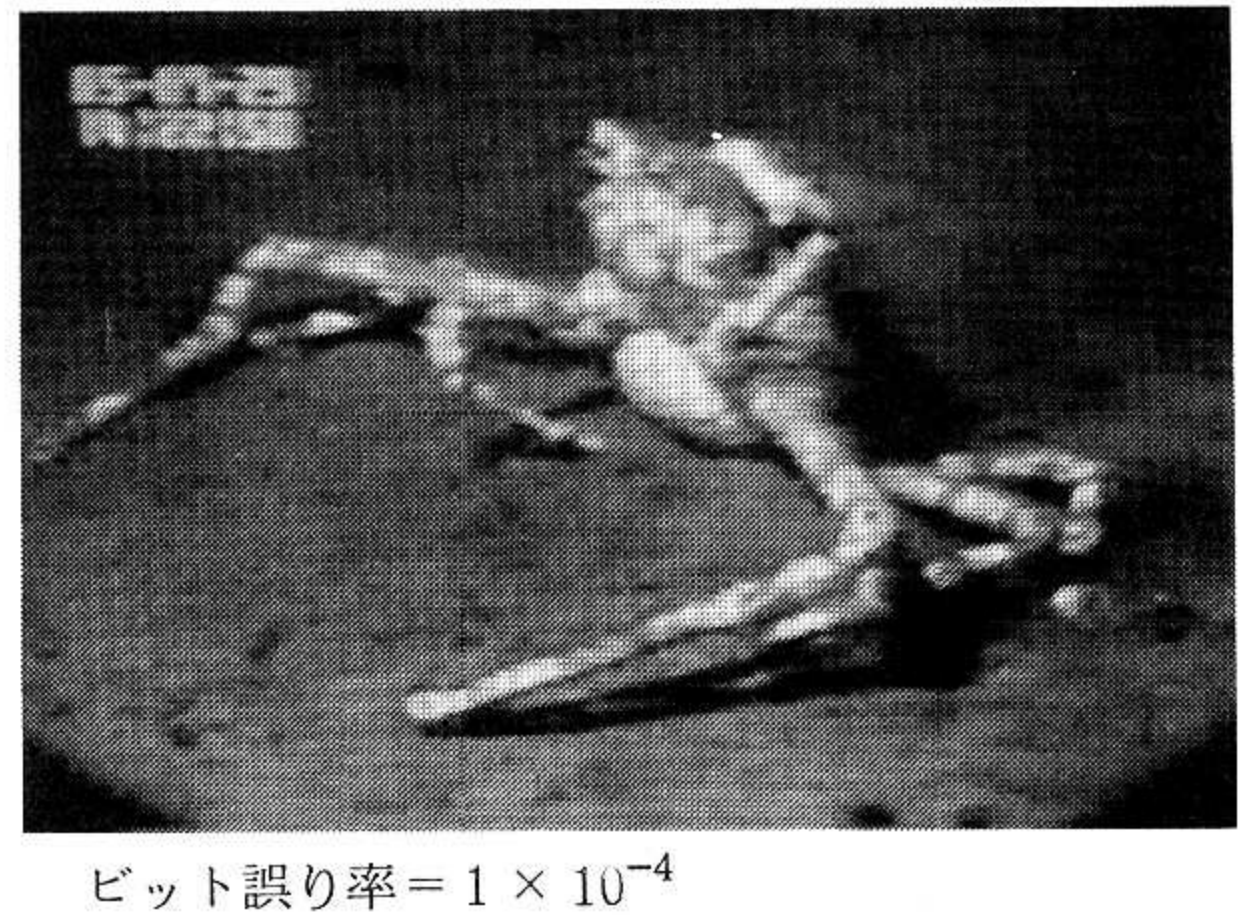
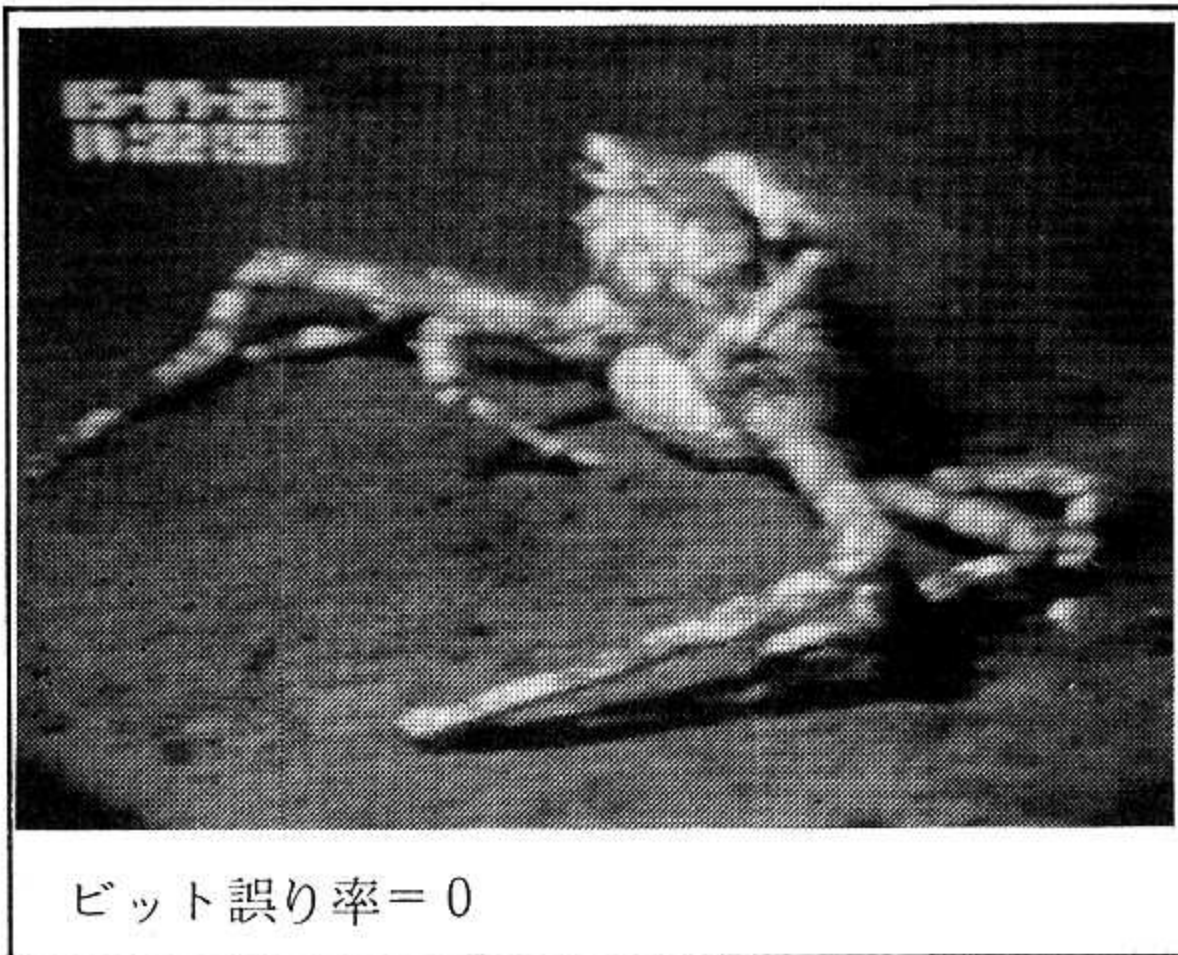


図8 高能率符号化(DCT)による誤り率の影響

Fig.8 Image Quality vs Bit Error Rate on DCT Image

を低減させることができ、伝送時間を約 1/10 とすることができた。

また、DCT 法による伝送誤り率に対する画質低下の影響を調査するため、伝送経路にランダムな雑音を印加し、シミュレーションを実施した。その結果を図 8 に示す。この図のように、DCT 法では、1 bit のエラーが処理ブロック（ 8×8 画素）全体に影響を与えるため、ブロック全体が欠落する場合があります、このため誤り率が 1×10^{-4} 程度より小さくしなければ十分実用的な画像を得られないことが分かった。

5. 信号伝送試験

(1) 試験方法

音響試験水槽で、試験装置を使って、ランダム雑音を付加した場合の S/N と誤り率との関係を計測し、その後、遠州灘沖合いの水深 4,000 m の海域で画像信号の伝送試験を実施した。

図 9 に本試験装置による、伝送試験の系統図を示す。3 項及び 4 項で検討した適応等化や DCT による高能率符号化は、この系統図の内、符号化及び復号化の中に含めている。

この試験における搬送波周波数は 25 kHz、伝送帯域は、約 10 kHz である。また、変調方式は、4-PSK、8-PSK であり、ボーレートは、10k ボーである。ここでは、船上部で発生させた PSK 信号を二重鎧装同軸ケーブルを介して水中に伝送し、そこで電力増幅器により送波器を駆動し、音響信号に変換し、それを船上において受信する方法を使った。⁹⁾

PSK 信号の送波には、この研究のために開発した整合層付きの広帯域送波器（-3 dB 指向幅約 35 度）を使用した。¹⁰⁾

信号の受波には、海中作業実験船「かいよう」の船底に装備されている音響測位装置の受波器を利用した。この際、受波器の素子配列（16 素子）のうち、4 素子の出力を加算器より合成する方法により、約 35 度（-3 dB at 25 kHz; 理論値）の指向幅を得ている。

実海域試験では、最大 3,500 m までの伝送距離において、送波レベルを変化させることにより、受信信号の S/N をパラメータとし、4-PSK（20 kbps）と 8-PSK（30 kbps）での画像データの誤り率を調査した。

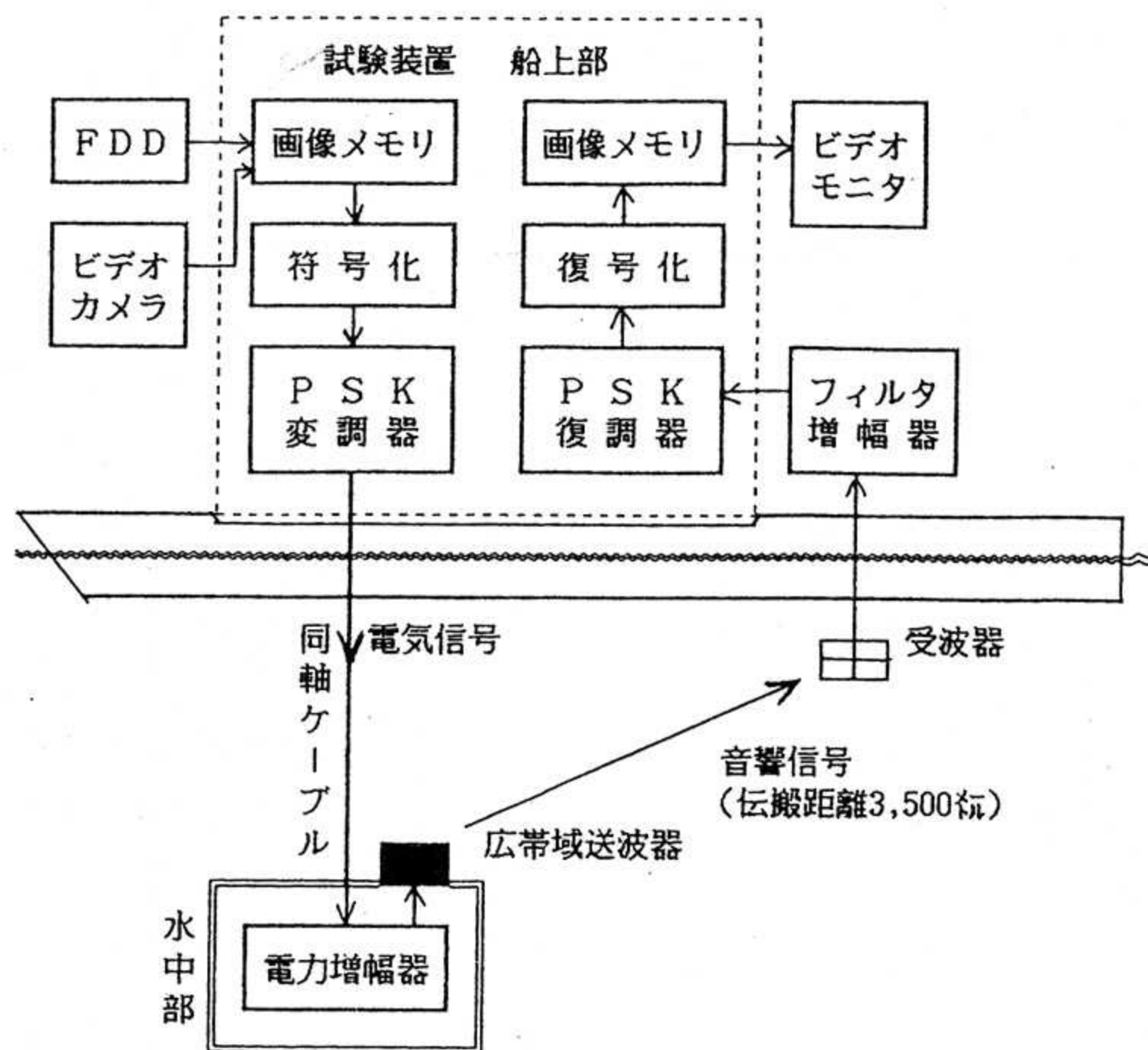


図 9 実海域試験系統図

Fig. Block Diagram of Sea Experiment

(2) 試験結果

S/Nに対する誤り率の関係を図10に示す。この結果から次のようなことが分かった。

①誤り率に対する画質の劣化は、図8のシミュレーションとはほぼ同様の結果が得られた。従って、エラーの発生は、ランダムであると考えられる。

②受信側で同じS/Nが得られた場合、適応等化器を付加することにより、付加しない時と比べて4-PSKの誤り率を1/10以下にすることができた。図11にこの場合のアイパターンを示した。この図のアイパターンの収斂のしかたからも、適応等化器によるエラー率の改善の状態を見ることができる。

また、8-PSKにおいては、図11のように

適応等化器なしでは、位相の同期がはずれるため、アイパターンが発散し、信号の伝送は不可能であった。

③本試験装置における実用的なS/Nは、4-PSKでは20 dB程度である。これらの値と理論値を比べると15~20dBの差があるが、これは、試験装置の適応等化器の次数の制限や信号検出機能の固定損失のためと考えられ、今後の改善項目である。しかしながら、この試験装置でも4-PSKで、3,500mの伝速距離（水深方向）において、図12に示すように、 10^{-4} 以上のエラー率で256×256画素のカラー静止画を7秒（音波伝搬の時間を含まない）で伝送することができた。

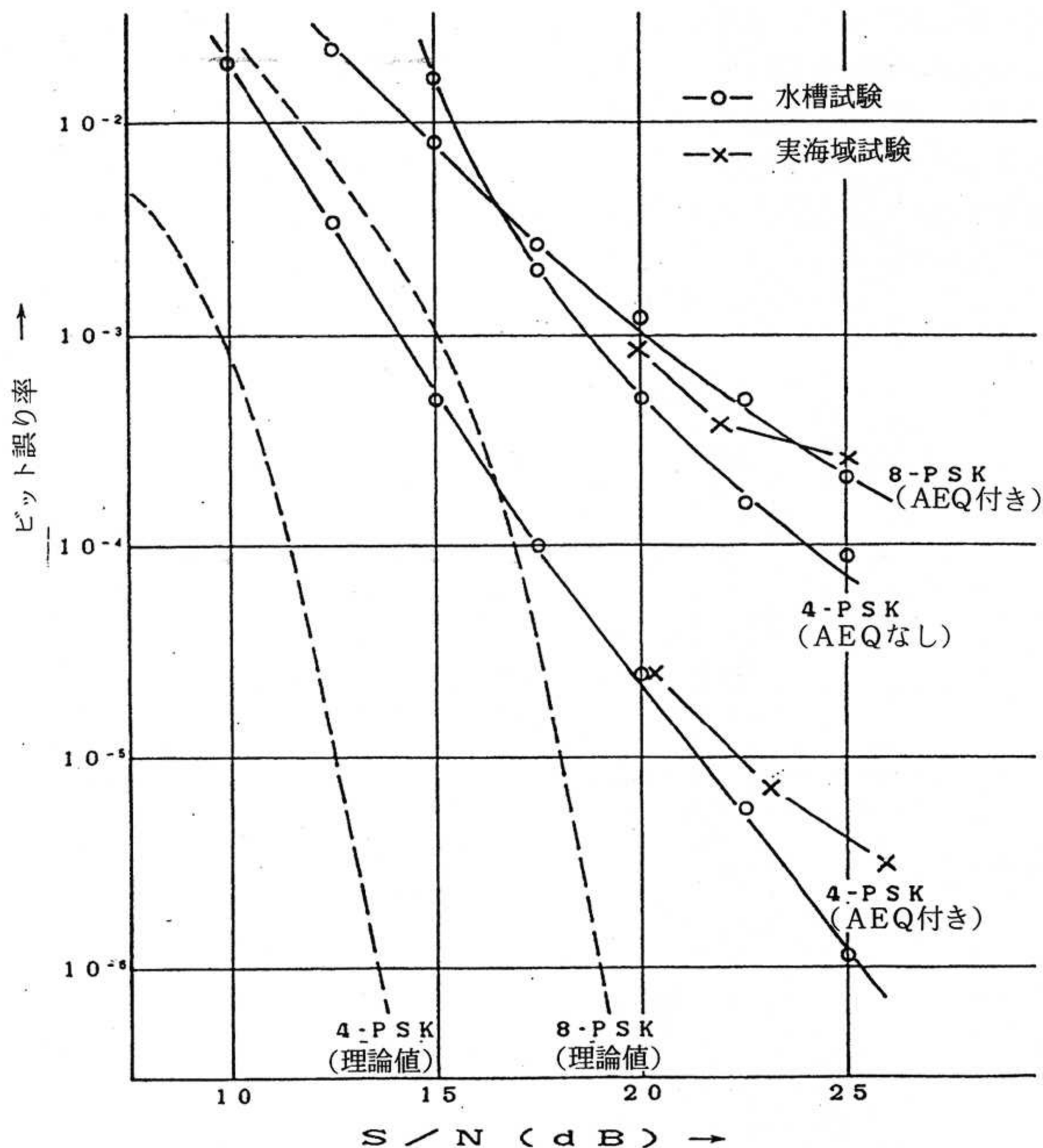


図10 S/Nとビット誤り率特性

Fig.10 Error Rate vs SNR of Test System

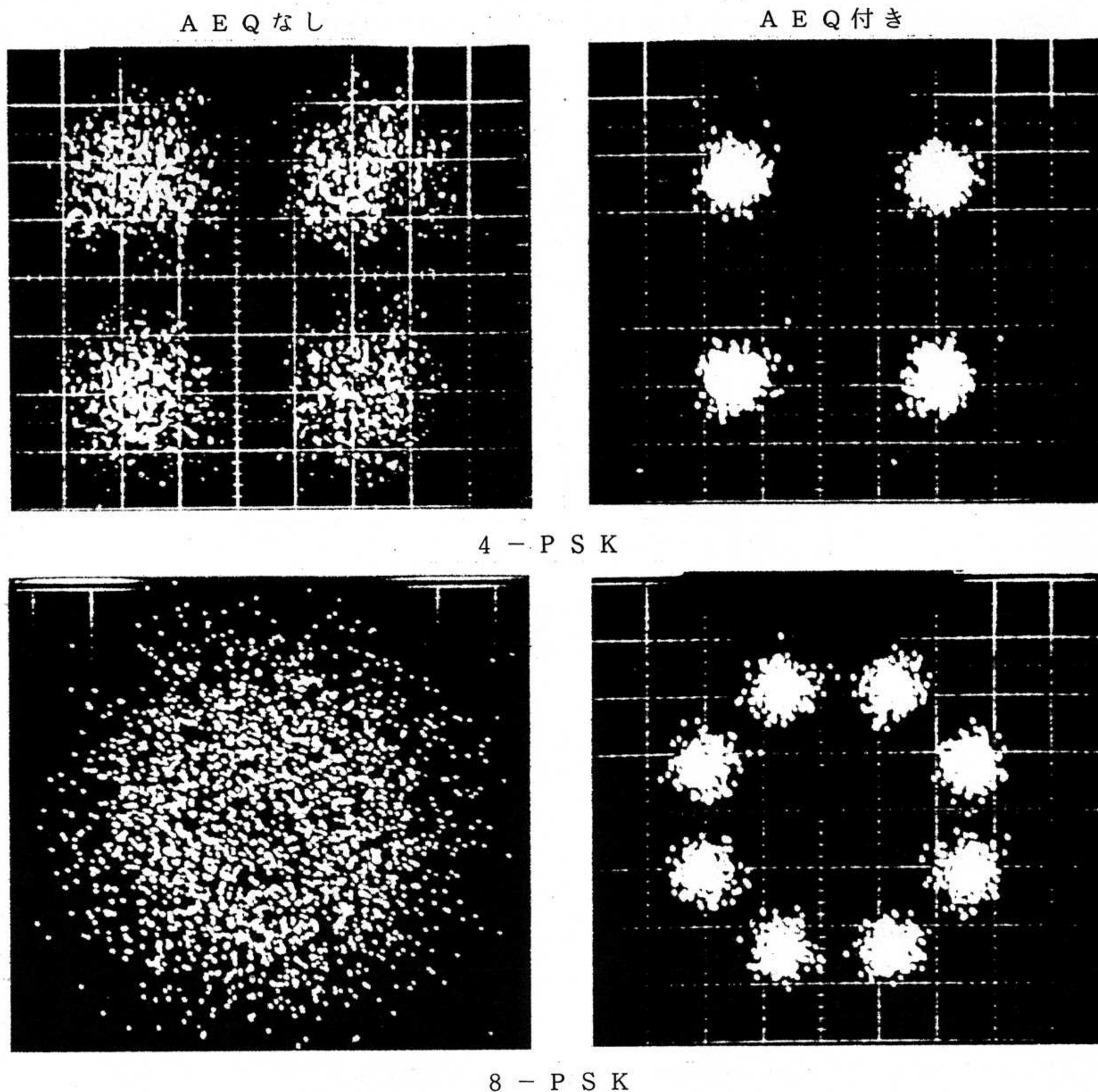


図11 適応等化回路 (AEQ) の効果 (S/N=20dB)
Fig.11 Effect of AEQ at the Range of 3,500 m

6. おわりに

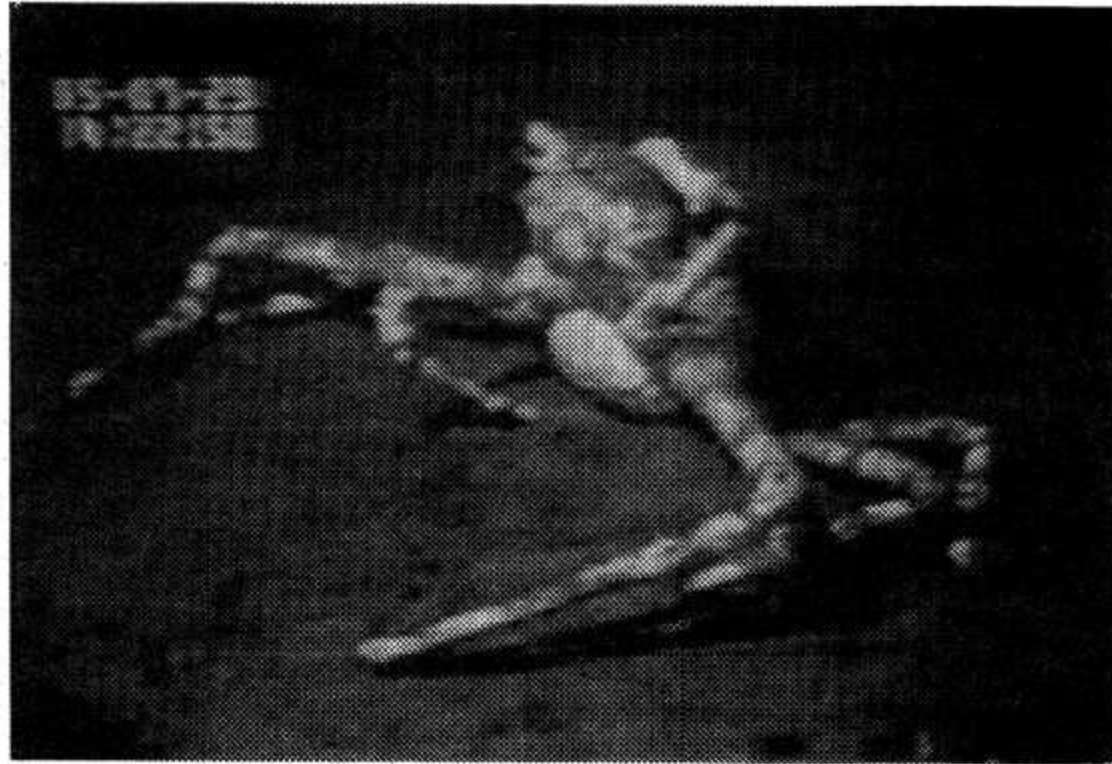
本研究の結果、実海域で3,000 m以上の距離においてPSK方式による画像情報の伝送が、十分可能であることが確認できた。筆者らは、これらの結果を基に、深海潜水調査船(「しんかい6500」)に搭載可能な実用的なシステムを開発するつもりである。

また、海中におけるPSK方式による伝送は、画像情報だけではなく、様々なデータの高速度伝送に利用することが可能であり、今後この技術の活用を考えている。

参考文献

- 1) 土屋, 中西, 網谷, 山本, 許, 野並, 新井,

$$S / N = 20 \text{ dB}$$



4 - PSK (伝送時間約 7 秒)



8 - PSK (伝送時間約 4 秒)

- 伝送条件：①伝送距離 3,500 m (水深方向)
 ②伝送速度 10 k ボー (4 - PSK = 20 kpps , 8 PSK = 30 kbps)
 ③AEQ 機能付加
 ④DCTによる高能率符号化处理

図 12 実海域試験における受信画像の例

Fig.12 Example of Received Image at the Range of 2,500 m

名田, 鈴木 ;

音響によるビデオ信号の水中伝送について,
 海洋音響研究会第 4 回研究発表会講演論文集 88
 - 2, 昭和 63 年 5 月

2) 土屋, 中西, 網谷, 山本, 許, 野並 ;

音響による画像伝送の研究 - カラー画像の伝
 送 - ,

JAMSTECTR 第 19 号 p 35 ~ 48 1988 年

3) 新井, 中西, 土屋, 網谷, 許, 野並 ;

「しんかい 2000」による画像伝送試験につ
 いて,

海洋科学技術センター第 5 回「しんかい 2000」
 研究シンポジウム予稿集 p4 ~ 7, 1988 年

4) W. R. BENNETT ほか, 塚田昌功訳 ; デ
 ータ伝送 (第 5 刷),

ラテス社, p211 ~ 234, 279 ~ 286, 昭和 60 年
 8 月

5) 土屋, 中西, 網谷, 許, 野並, 新井, 杉内,
 鈴木 ;

PSK 音響信号による画像情報の海中伝送につ
 いて,

海洋音響研究会第 5 回研究発表会講演論文集 89

- 5, 平成元年 5 月

6) S. ヘイキン著, 武部 幹訳 ; 適応フィルタ
 入門,

現代工学社, p25 ~ 90, p108 ~ 127, 1987 年

7) SHAHID QURESHI ; ADAPTIVE
 EQUALIZATION, IEEE COMMUNIC-
 ATION MAGAZINE, p9 ~ 16, MARCH
 1982

8) 吹抜敬彦著 ; 画像のデジタル信号処理,
 日刊工業新聞社, p137 ~ 243, 昭和 59 年

9) 土屋, 中西, 青木, 網谷, 山本 ;

海中伝搬試験装置の製作及びその海上試験結果
 JAMSTECTR 17 号, p39 ~ 50, 1986 年

10) 許, 土屋, 中西, 網谷, 野並, 新井, 名田,
 鈴木 ;

広帯域送波器の開発, JAMSTECTR 21 号
 p45 ~ 55, 1989 年

(原稿受理 : 1989 年 5 月 29 日)