

# 誤り訂正符号を用いた 音響伝送における性能改善の基礎検討

越智 寛\*<sup>1</sup> 中西 俊之\*<sup>1</sup> 土屋 利雄\*<sup>1</sup>

海中における無人探査機の制御や取得したデータの音響による伝送のために、信頼性が高く、データの加工の容易なデジタルデータ伝送が必要とされている。一般に、有線や電波等の陸上の通信では、誤り率を低減するための方式として、誤り訂正符号を用いる方式が知られており、これは、伝送データを符号化して伝送し、受信側で一定のアルゴリズムに基づいて復号し、誤りがあれば自動的に訂正して正しいデータを得るような方式である。このような復号化方式は、音波伝搬速度が小さい海中音響データ伝送において最も必要とされている技術であるが、海中での電波による伝送に対するような報告は、ほとんどなされていない。そこで、海中音響データ伝送の性能を改善するための手法として、誤り訂正符号のうち、最も基本的なもの（ハミング符号）についての検討を行い、水槽試験を実施したのでその結果を報告する。

キーワード：デジタルデータ伝送, 誤り率, 誤り訂正符号, 符号化, ハミング符号

## Basic Study of Improvement for Acoustic Data Transmission to Apply Error-Correcting Code

Hiroshi OCHI\*<sup>2</sup> Toshiyuki NAKANISHI\*<sup>2</sup>  
Toshio TSUCHIYA\*<sup>2</sup>

It is necessary that underwater digital data transmission be highly reliable and easy processing for control of unmanned untethered vehicles or for transmitting and receiving data. Generally, an error-correcting code is known as a method to reduce bit error rates in radio or in wired radio. In this method, source data is transmitted by encoding. The received data is decoded by using an algorithm, and if a data error is found, it is corrected automatically. This encoding method is most necessary in underwater acoustic data transmission which has a low sound velocity. However, papers applying this method to underwater acoustic transmission are almost never reported. Therefore, our study focusses on a basic

\* 1 深海開発技術部

\* 2 Deep Sea Technology Department

error-correcting code (Hamming code) for improvement of underwater acoustic data transmission. The experiment was carried out at an anechoic tank.

**Key word** : digital data transmission, error rate, error-correcting code, encoding, Hamming code

## 1 はじめに

近年、海中における無索の無人探査機のコントロールや取得したデータの音波による伝送のために、信頼性が高く、データの加工の容易なデジタルデータ伝送の必要性が増大している。また音波による伝送では、一般に電源として電池が使用されるため低電力化が要求される。そこで、デジタル伝送において、誤り訂正符号を用いた誤り率を低減するための手法を検討する。このような手法により、海中のノイズが増大した状況下においても、確実なデータの伝送が期待できる。また、同一雑音下においては電力を節約し、電池駆動の装置でも長時間利用が期待できる。

一般に陸上の電波、或いは有線のデータ伝送においては、誤り率を低減するために受信側で誤りが検出された場合に送信側に再送を要求する自動再送要求方式が使用されている。しかし、海中の音波によるデータ伝送においては、伝搬速度が電波の約20万分の1と著しく遅いため、再送を要求する方式は、データ伝送速度を著しく低下させる。そこで、送信側ではデータを送信するだけで、受信側で誤りを訂正するような方式を取らざるを得ない、このような方式として、誤り訂正符号を用いる方式が知られている。この方式は、送信データを符号化して伝送し、受信側で一定のアルゴリズムに基づいて復号し、誤りがあれば自動的に訂正して正しいデータを得るような方式である。

しかしながら、海中音響データ伝送に適合するような符号化方式の報告は、ほとんどなされていない。そこで、海中音響データ伝送の性能を改善するための手法として、誤り訂正符号を用いることを検討する。本報告では基礎検討として、誤り訂正符号のうち、最も基本的なものについての検討を行う。

## 2 誤り訂正符号

### 2.1 符号化の基礎概念

符号化は、情報理論の最も大切な研究分野である<sup>1)-3)</sup>。その符号化は、表1に示す3つに大きく分けられる。

本報告において扱う符号理論は、表1の(2)にあたる通信路符号化の問題に関する議論である。(1)の情報源符号化は、通信路を如何に効率よく使用するかということについて議論するもので、データの持つ情報量を減らすことなくデータ量を減らすためのデータ圧縮に関することを扱う。また、(3)の暗号化は、通信システムに対する、盗聴や、進入を如何に防ぐかということに関することが扱われる。

### 2.2 符号理論の基礎概念

通信路符号化を論じる場合、通信システムは一般に図1のようにモデル化される。情報源からは情報源系列が発生する。情報源系列の各記号は情報源アルファベットと呼ばれる。符号器は情報源系列を符号系列に変換する。このような操作を一般に符号化と呼んでいる。符号系列の各記号は符号アルファベットと呼ばれる。符号系列は通信路を介して送られる。この送られる符号系列を送信系列と呼ぶこともある。送信系列は通信路からみれば、入力系列である、通信路は記号が一つ入力

表1 符号化

Table.1 Coding Method

符号化	用途	用例
情報源符号化	通信路の効率化のための符号化	データ圧縮
通信路符号化	通信路の信頼性向上のための符号化	誤り訂正符号化 ブロック符号化 木符号化
暗号化	通信システムの保全本性向上のための符号化	暗号通信

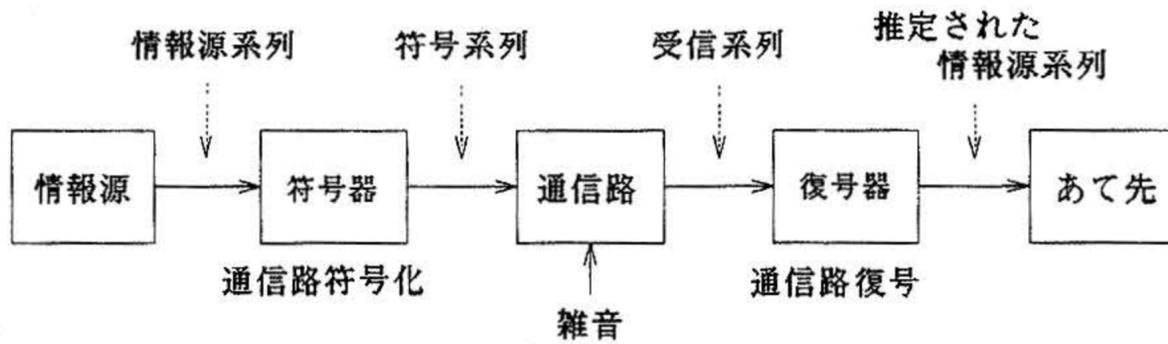


図1 通信システムのモデル

Fig. 1 Model of Communication System

されると記号を一つ出力する。通信路の出力系列は受信側の復号器に入力されるので、これを受信系列とも呼ぶ。復号器では、受信系列から元の情報系列を推定し、あて先に渡す。この操作を復号と言い、推定された系列を復号系列と呼ぶ。

通信路に雑音が付加されることにより、データに誤りが生じるが、この誤りに対処するために用いられる通信路符号が誤り訂正符号である。誤りに対処するためには情報源系列に対し、本質的な情報を含まないような冗長性を付加しなければならない。したがって、通信路を伝搬するデータ(符号系列)の量は、その分だけ増加することになる。この冗長性は、一定の規則に従って付加され、受信側では、受信系列がこの規則に従っているかどうかを調べ、その結果によって誤りの訂正を行うのである。このような誤り訂正符号は、様々な方式が考案されているが、できるだけよい方式のものを選んで用いる必要がある。“よい”方式とは、付加した冗長性が信頼性向上にできるだけ有効に用いられるようなものである。適用するにあたってはさらに、符号化・復号化に要する時間についても、十分な考慮が必要である。すなわち、いくら効率の良いものでも、符号化・復号化が複雑で時間がかかりすぎるものでは実用に供さないものとなる。

誤り訂正符号化には、2.1で述べたように大きく分けてブロック符号化と木符号化の2つの方式がある。まず、ブロック符号化方式は、情報源系列を一定長のブロックに分割し、各ブロックを符号化アルファベットの記号からなる一定長のブロックに変換することにより行われるものである。一つの符号のブロックを符号語と呼び、符号語の長さを符号語長と呼ぶ。また、符号語に対応する受信系列のブロックを受信語と呼び、同様な表し方

$$\text{符号語長} : n = 2^m - 1$$

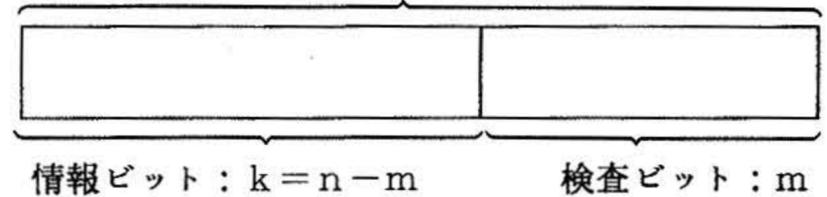


図2 (n, k) ハミング符号の構成

Fig. 2 Structure of (n, k) Hamming Code

をする、この方式として、ハミング符号、BCH符号、リード・ソロモン符号などが知られている。

木符号化は、あるブロックの符号化にそれ以前の情報ブロックも関係するような符号化である。この方式として、畳み込み符号化方式が知られている。

本報告では、ブロック符号化方式のうち、最も基礎的な符号化方式の一つであるハミング符号(Hamming code)を用いて、海中における音響デジタル伝送への誤り訂正符号の適用を検討する。

### 2.3 ハミング符号

ハミング符号<sup>4), 5)</sup>は、単一の誤りを訂正する能力のある符号である。図2に示すように、符号語(符号語長 $n$ )は、 $k$ ビットの情報ビットと $m$ ビットの検査ビットで構成され、その符号を $(n, k)$ ハミング符号と呼ぶ。

本報告では、検査ビット $m=3$ の場合、すなわち、 $n=7, k=4$ の $(7, 4)$ ハミング符号について考える、 $(7, 4)$ ハミング符号の符号化の方法は、まず検査ビット $(c_1, c_2, c_3)$ を情報ビット $(x_1, x_2, x_3, x_4)$ から次のように求める。

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \\ c_2 &= \quad \quad x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 \\ c_3 &= x_1 \oplus x_2 \quad \quad \oplus x_4 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 $\oplus$  は、XOR（排他的論理和）を表す。

これらを並べて、

$$w = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & c_1 & c_2 & c_3 \\ \hline \end{array}$$

として符号語を構成する。

《例1》

情報ビット：1101

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0 \\ c_2 &= 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0 \\ c_3 &= 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1 \end{aligned} \right\} (2)$$

符号語： $w = 1101\ 001$

表2に(7,4)ハミング符号の符号語を示す。

復号方法は次のようになる。

まず、受信語  $y = (y_1, \dots, y_7)$  に対するシンδροーム  $s = (s_1, s_2, s_3)$  を次のように定

表2 (7,4)ハミング符号語  
Table.2 (7,4) Hamming Codeword

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	1
0	0	1	0	1	1	0
0	0	1	1	1	0	1
0	1	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	1	1	1	0
1	0	1	0	0	1	1
1	0	1	1	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1

表3 単一誤りに対するシンδροームパターン  
Table.3 Syndrome Pattern of Single Error

誤りパターン							シンδροーム		
$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$	$s_1$	$s_2$	$s_3$
1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

義する。

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_5 \\ s_2 &= y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_6 \\ s_3 &= y_1 \oplus y_2 \oplus y_4 \oplus y_7 \end{aligned} \right\} (3)$$

受信語  $y$  は、送信符号語  $w$  に通信路で加わった雑音によるエラー  $e$  を併せたものである。雑音がない場合、即ち  $e = 0$  の場合は、シンδροームが0となるので、シンδροーム  $s$  は結局、誤りパターン  $e = (e_1, \dots, e_7)$  のみにより定まり、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= e_1 \oplus e_2 \oplus e_3 \oplus e_5 \\ s_2 &= e_2 \oplus e_3 \oplus e_4 \oplus e_6 \\ s_3 &= e_1 \oplus e_2 \oplus e_4 \oplus e_7 \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで、単一誤りに対し、このシンδροームがどうなるかを表3に示す。

この表から、全ての単一誤りに対し、シンδροームのパターンは互いに異なり、しかも全零になることもないことが分かる。したがって、このシンδροームパターンから単一誤りの位置が分かり、訂正可能となるのである。

《例2》

符号語： $w = 1101001$

受信語： $y = 1111001$

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= 1 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 = 1 \\ s_2 &= 1 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 = 1 \\ s_3 &= 1 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 1 = 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

シンδροーム： $s = 110$

表3より、第3ビット目に誤りが存在する。

推定された符号語： $1101001$

3 伝送試験

3.1 伝送試験方法

超音波水槽において、図3に示すような系で伝送試験を実施し(7,4)ハミング符号を用いて符号化したものと、符号化を行わないそのままのものについて比較を行った。信号に白色雑音を混入することにより、SN比を変えて、そのときの復号ビット誤り率(BER)を測定した。復号ビット誤り率は、次式で定義される。

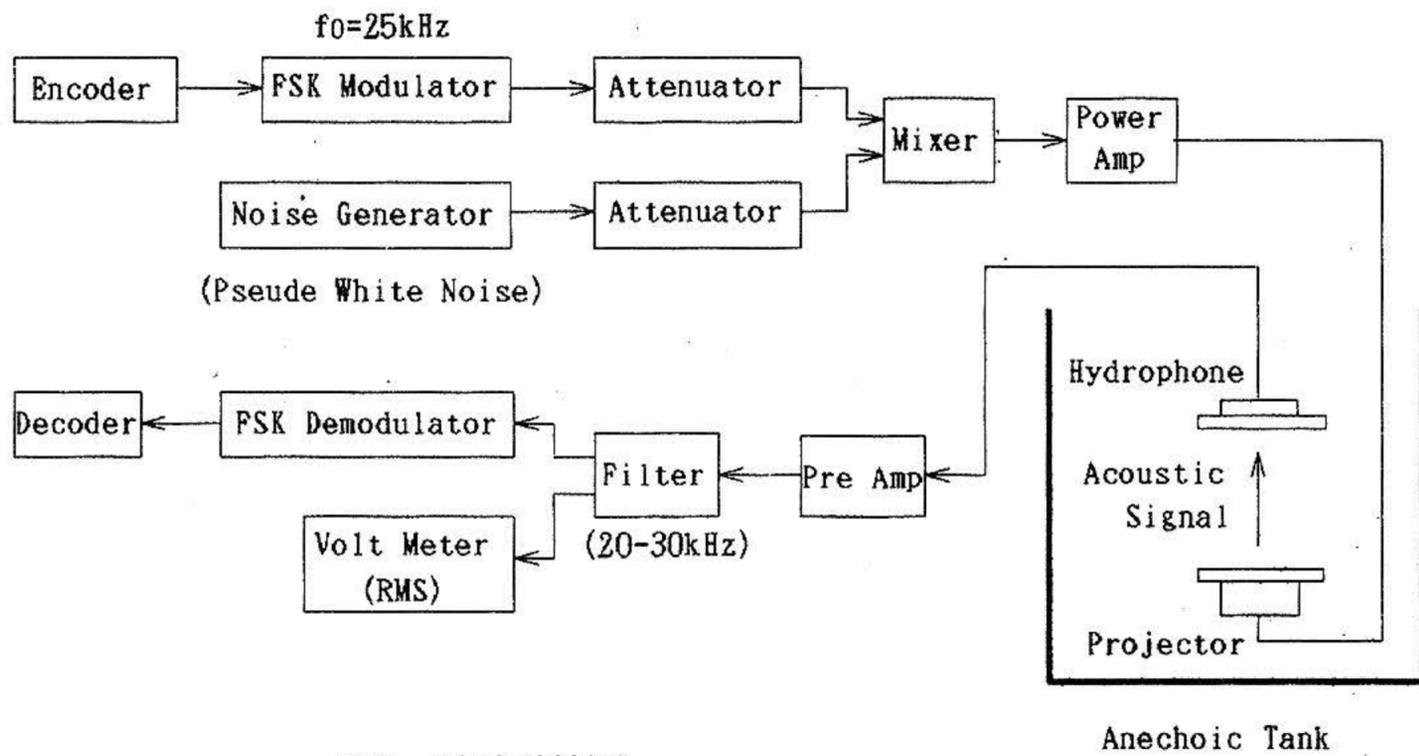


図3 試験系統図

Fig. 3 Schematic Diagram of Experiment

$$BER = \frac{\text{(復号誤りビット数)}}{\text{(全データビット数)}} \quad (6)$$

実際には、SN比を直接測定することは困難であるため、搬送波 (C) 対雑音 (N) の比をとり、 $(C+N)/N$  [dB] に対する復号ビット誤り率を測定した。符号器・復号器にはパーソナルコンピュータを用い、符号化・復号化は全てソフトウェア (C言語で記述) で行った。符号化・復号化アルゴリズムを次に示す。なお、 $A =: B$  は B を A に代入することを表し、 $A \leftarrow B$  は A の最下位ビット (LSB) に B をつなげることを表す。また、 $\Lambda$  はヌルストリング (空の系列) を表す。 $\bar{s}$  は s を反転したものを表すものとする ( $s=1$  の時、 $\bar{s}=0$ )。さらに、 $\times$  はビットアンド ( $1 \times 1 = 1$ ,  $1 \times 0 = 0$ ) を取ることを表す。

《符号化アルゴリズム》

```

step1:
  B =: Λ;
  B ← b0, b1, b2, b3;
  if データの終了 then goto step3;;
step2:
  S =: (b0, b1, 0) ⊕ (b1, b2, b3) ⊕
        (b2, b3, 0) ⊕ (0, 0, b0) ⊕ (0,
        0, b1);
  B ← S;

```

B を出力;  
goto step1;;

step3:  
end;

《復号アルゴリズム》

```

step1:
  C =: Λ;   D =: Λ;
  C ← c0, c1, c2, c3, c4, c5, c6;
  if データ終了 then goto step3;;
step2:
  S0 =: c0 ⊕ c1 ⊕ c2 ⊕ c4;
  S1 =: c1 ⊕ c2 ⊕ c3 ⊕ c5;
  S2 =: c0 ⊕ c1 ⊕ c3 ⊕ c6;
  d0 =: c0 ⊕ (S0 × S1 × S2);
  d1 =: c1 ⊕ (S0 × S1 × S2);
  d2 =: c2 ⊕ (S0 × S1 × S2);
  d3 =: c3 ⊕ (S0 × S1 × S2);
  D ← d0, d1, d2, d3;
  goto step1;;
step3:
  end;

```

変調方式には、極めて一般的に用いられている FSK<sup>6)</sup> (Frequency Shift Keying) を用いた。信号伝送時の、受信スペクトルを図4に示す。この図からわかるように 20-30kHz にスペクトルが

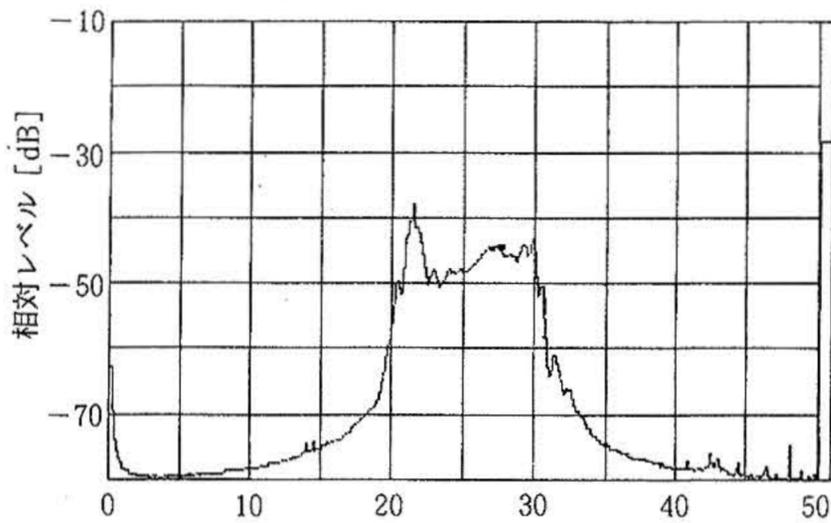
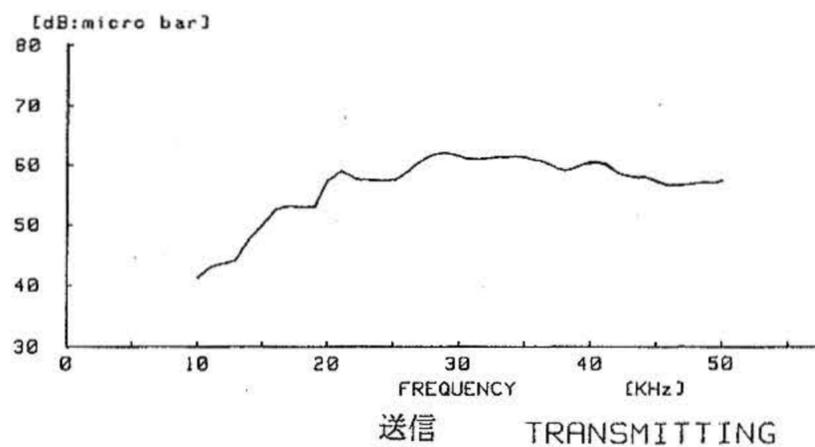
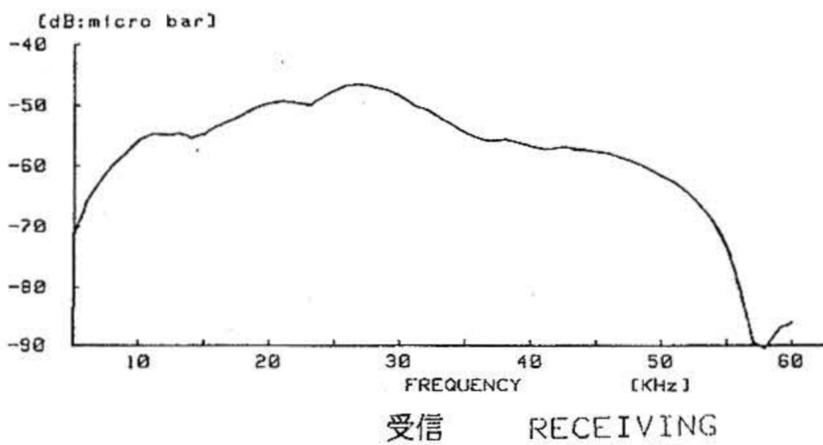


図4 受信信号スペクトラム  
Fig. 4 Received Signal Spectrum



送信 TRANSMITTING



受信 RECEIVING

図5 広帯域送受波器の周波数特性  
Fig. 5 Frequency Response of Wide-band Projector and Hydrophone

集中している。この試験で用いた、送波・受波器の周波数特性を図5に示す。図4、5から、この送受波器の帯域はデータの伝送帯域より十分広いのでこれによる帯域の制限は受けないことがわかる。

伝送試験は、超音波水槽内に送波器を下側に、受波器を上側にして、垂直に3mの距離で取り付け、反射等の影響がないように留意した。尚、伝送試験に用いたデータは、誤り率が確率的に得られるよう十分な大きさを持ったランダム系列の

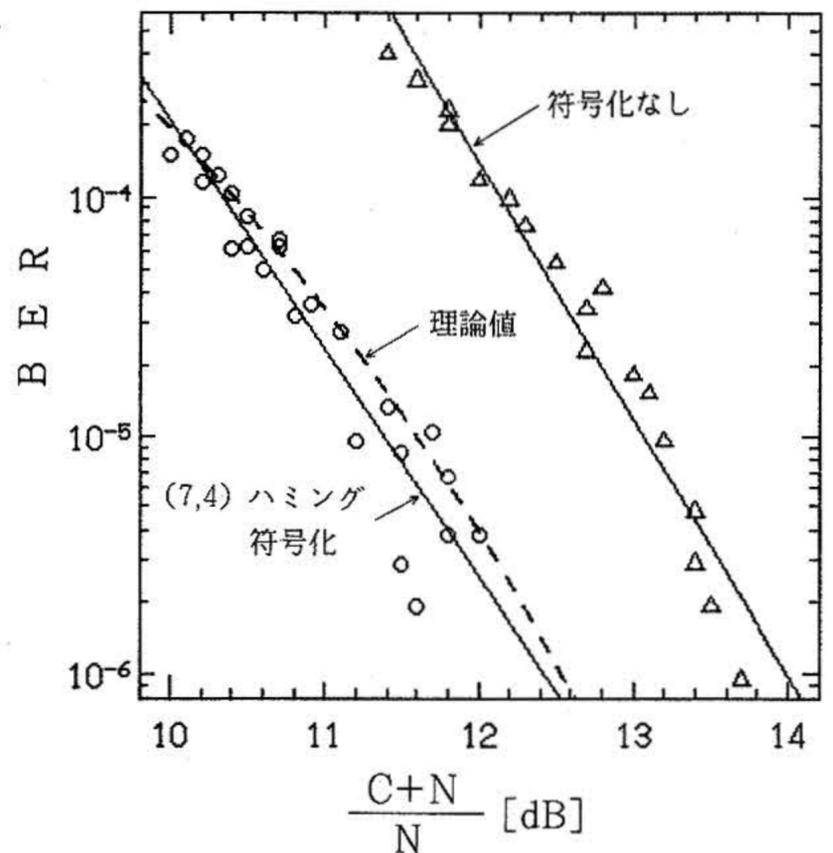


図6 BER - (C+N)/N の特性  
Fig. 6 Characteristics of BER - (C+N)/N

ファイルである。伝送速度2400bpsは、計算機の処理能力の制限により決定した。

### 3.2 試験結果

試験結果を図6に示す。横軸は(C+N)/NをdBで表し、縦軸はBERを対数で表す。図中の○は(7,4)ハミング符号で符号化した場合の性能を表し、△は符号化を行わない性能を表している。また、各々について、最小自乗法によって求めた直線も示した。さらに、破線は一般に知られている同期FSKの(C+N)/Nに対するBERであり、これを $\gamma$ と表すと次式で表されるものである。

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \quad (7)$$

符号化を行わなかった場合に、理論値に比べて約2dBの劣化がみられる。これは、試験系のトータルの劣化であり、グラフの傾斜はほぼ等しいので、試験系での歪はないと考えて良い。従って、このことが試験結果に影響を与えることはないと考えられる。

(7,4)ハミング符号を用いた場合、符号化を行わなかった場合共に、(C+N)/Nが大きいとこ

るでBERの散らばり方が多少大きくなっているが、これは、ファイルの大きさが $10^7$ ビット程度であったことが原因と推測される。

誤り率からみた場合には、同じCN比において誤り訂正符号を用いることにより、符号化を行わない場合と比較して、ほぼ1/60に誤り率が抑えられることがわかる。これにより、同程度の海中雑音がある場合においても、伝送される信号の信頼性の飛躍的な向上が得られることがわかる。

また、CN比でみた場合、(7, 4)ハミング符号を用いることにより、同程度の誤り率に抑えるためには、ほぼ2dB性能が改善されることがわかる。これにより、低電力送信が要求される海中での音響伝送に対する適用の妥当性が認められる。

#### 4 ま と め

本報告では、誤り訂正符号を用いた音響伝送における性能の改善の基礎検討を最も基本的な誤り訂正符号である(7, 4)ハミング符号を用いて行った。

この検討により、海中における音響伝送に対して誤り訂正符号を用いることの有効性を示した。また、この符号はソフトウェアのみによって実現可能であるのでハードウェアの追加・変更無しに適用可能である。

今後、より海中のデータ伝送に適した、より誤り訂正能力の高い、誤り訂正符号を検討していくことによって、さらに、性能の改善を図ることを考える必要がある。また、冗長性を持たせたためにデータ量が増加してしまうので、誤り訂正符号化を行う前にデータ圧縮を施し、データ量の増加を抑えることも検討の必要がある。

#### 参考文献

- 1) 今井秀樹：“2. 符号理論の基礎概念”，符号理論，電子情報通信学会，pp.13-41.，(1990)
- 2) 今井秀樹：“2. 情報理論の問題”，情報理論，昭晃堂，pp.10-23.，(1984)
- 3) B. Arazzi 著，佐々木彬夫訳，わかりやすい誤り訂正符号，共立出版，(1990)
- 4) 今井秀樹：“4. 線形符号”，符号理論，電子情報通信学会，pp. 76-105.，(1990)
- 5) 今井秀樹：“7. 通信路符号化法”，情報理論，

昭晃堂，pp.132-184.，(1984)

- 6) S. Stein, J. J. Jhones 著，関英男訳：“11. 2進周波数シフトキーイング”，現代の通信回線理論，森北出版，pp.238-247.，(1970)

(原稿受理：1990年11月22日)