

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 933 June 1999

水中超音波を用いた直記式波浪観測データ回収システムの開発

永	井	紀	彦
橋	本	典	明
高	橋	智	晴
小	山	謙	一
石	原	孝	史

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 水中伝送システムの概要	4
3. 予備検討における試験機器の試作	7
3. 1 水槽実験	7
3. 2 現地基礎実験	7
3. 3 伝送能力と S N R	8
3. 4 指向性の検討	9
3. 5 送受信部の検討	9
3. 6 マルチパスを考慮した水平伝送距離	10
3. 7 マトリクスチェックコード方式による誤り訂正方式の検討	11
4. 現地実証実験によるシステムの適用範囲の検討	12
4. 1 現地実証実験	12
4. 2 伝送距離の検討	13
4. 3 誤り訂正方式の適用性の評価	14
4. 4 D G P S による海上小型船舶の位置決め精度	14
5. 今後に残された課題	15
6. おわりに	15
参考文献	16

Development of the Cableless Data Acquisition System for Self-Recording Seabed-Installed Type Wave Gauges

Toshihiko NAGAI*
Noriaki HASHIMOTO**
Tomoharu TAKAHASHI***
Kennichi OYAMA****
Takashi ISHIHARA****

Synopsis

A cableless data acquisition system for self-recording seabed-installed type wave gauges is newly developed by using 100KHz ultrasonic acoustic signals in the sea water.

Model tests using water basins have been conducted several times during 1995 and 1996, and the system design was completed. Various types of field tests were also conducted in the Numazu-Bay, the Tokyo-Bay and the Sagami-Bay areas repeatedly during the years from 1996 to 1999, and validity of the system has been proved.

This paper introduces the basic concept of the cableless data acquisition system and results of the water-basin and field tests.

Key Words: Wave Observation, Acoustic Data Acquisition, Ultrasonic Waves, Self-recording Wave Gauge

* Chief, Marine Observation Lab., Hydraulic Engineering Div.

** Chief, Hydrodynamics Lab., Marine Environmental Div.

*** Maine Surveyors Association

**** Kaijo Co.

3-1-1, Nagase, Yokosuka, 239-0826, Japan

Tel: +81-468-44-5017, Fax: +81-468-42-5246, E-Mail: nagai@cc.phri.go.jp

水中超音波を用いた直記式波浪観測データ回収システムの開発

永井紀彦*
橋本典明**
高橋智晴***
小山謙一****
石原孝史****

要 旨

海底に設置された波浪観測機器によって観測されたデータを、引き上げや有線通信に頼ることなく、水中超音波を応用した無線通信方式によって、機器設置点付近の海上船舶等で回収できるシステムの開発・実用化を行った。

本資料は、ここで開発されたシステムの概要を述べ、数回にわたって行われた現地実験結果を通じて確認された安定したデータ回収のための諸条件を示すとともに、今後に残された技術開発課題をとりまとめたものである。

本データ回収システムは、海底に設置する1台または複数台のデータ送信器と、そのデータ送信器を任意の時刻に海上から呼び出し、データ送信器内部のデータを回収するためのデータ受信器で構成される。海底のデータ送信器は直記式波高計と接続して予め設定された時間間隔毎に観測データを受け取り、一旦、内部記憶媒体に蓄え、海上からの呼び出しに備える。そして、海上からの指令に基づいて、要求されるデータを超音波による無線通信で伝送するものである。

数回に渡る現地実証実験の結果、本装置を用いた安定したデータ回収の諸条件が明らかになり、今後の沿岸波浪観測における効率化、コスト低減に大いに貢献の期待が持たれるに至った。

キーワード：波浪観測，水中伝送，超音波，直記式波浪計，データ伝送

* 水工部海象調査研究室長
** 海洋環境部水理研究室長
*** (社)海洋調査協会
**** (株)カイジョー 計測制御システム事業部
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
Tel(0468)-44-5017, Fax(0468)-42-5246, E-mail:nagai@cc.phri.go.jp

1. はじめに

近年、海洋調査においては調査内容の多様化、高度化と共に、観測業務の合理化が迫られている。そうした中、海中に設置された直記式波浪観測機器の測定データを、水中の音響無線通信により、周辺海上の船舶で回収可能とするデータ伝送装置の開発に着手することになった¹⁾²⁾。

これまでの直記式波浪観測機器では、通常、観測期間終了後でないとデータを回収することができないため、誤測・欠測等による観測リスクや、期間途中の処理が行えない等の問題があった。また、データの回収、測器の再設置では潜水作業を伴い、荒天持の作業中断や延伸、経費の増加等の問題があった。

本システムは、上記問題に鑑み開発されたもので、直記式波浪観測機器からのデータ回収や機器の動作状態の監視を、潜水作業を伴うことなく、機器設置点上の海上で行うことができるものである。なお、ここで対象とした動作状態の監視としては、データの取得確認（所定の量のデータが取得されているかどうか）、および内容確認（とびはねや同じ値が長時間連続することなく正常と判断される波形記録が取得されているかどうか）を考慮したが、将来的には異常データの修正作業も、ノートパソコンおよびソフトを船上に持ち込むことによって、対応は可能である。

本システムは、水中音響技術や移動体通信技術を柱としたものであるが、このような開発例としては、海洋科学技術センターの「しんかい6500」³⁾やKDD（株）の「AE1000」⁴⁾に搭載の伝送装置がある。しかしながら、これらは潜水艇やAUV（Autonomous Underwater Vehicle）で捉えた水中画像データの伝送を目的としている。しかし、画像データの伝送は、波浪観測データよりも誤り率が高くて利用上の問題が少ない。また、大水深海域では、波浪観測機器が通常設置される浅海域とは異なり、マルチパスによるノイズ混入が少ない。このため、波浪観測データの伝送は、大水深海域の画像伝送とは、データの資質や伝送環境が異なっている。

なお、この開発は、港湾技術研究所、海上保安庁水路部、（社）海洋調査協会、および（株）カイジョーの共同研究として行ったものであり、（社）海洋調査協会内に設置された水中計測信号伝送システム開発委員会（委員長：合田良実横浜国立大学教授）のご指導を受けた。

2. 水中伝送システムの概要

本システムは、先に述べた通り、主として直記式波浪

観測機器と接続して、観測業務の効率化、コスト低減、リスク低減を目的に開発されたものであり、以下にその概要を示す。

図-2.1に、システムの概念図を示す。海底に観測機器と共にデータ送信器を設置し、その間を水中通信ケーブルで接続する。そして観測データは、予め設定された一定時間毎に、観測機器からデータ送信器に有線で伝送され、データ送信器内のメモリーに蓄えられる。データ送信器は、海上側データ受信器からの超音波による指令要求に基づいて、指定された観測ファイルのデータを送信する。また、データ送信器には、それぞれ通信上のID番号を設定しており、複数の観測機器を併設（データ送信器を併設）しても、個別に通信することが可能である。

表-2.1は、その開発システムの仕様を示す。表中の目標数値は、本装置を波浪観測装置と接続して用いるという観点から、開発当初に当面の理想的な数値として挙げられた参考値である。

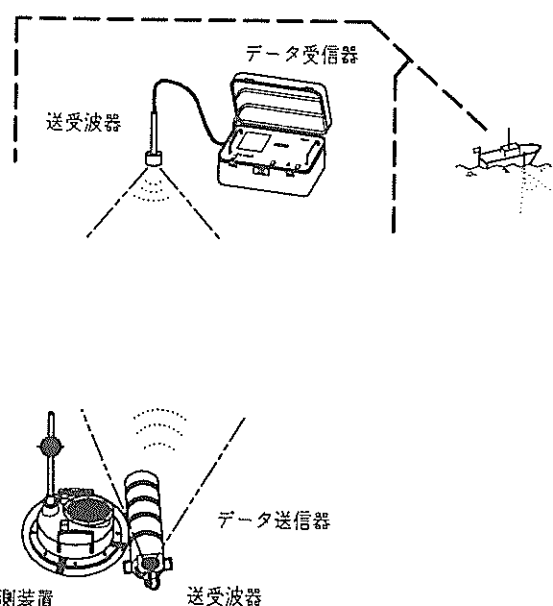


図-2.1 水中計測信号伝送システム概念図

データの変調方式は、4-DPSK（4-Differential Phase Shift Keying）を採用している。これは、本システムで取り扱うデータが大容量の波浪観測データであるために高速伝送が必要であることや、電力の利用効率がよいことによる⁵⁾。この4-DPSK変調方式について図-2.2に基本原理を示す。一定の波数毎に（図では4波で示している）一つのデータ情報を持つシンボルを形成する。4-DPSKでは、各シンボルは4種の位相状態の内のいずれかの位相をとり、それぞれ直前のシ

表-2.1 開発システムの仕様（目標値と達成値）

項目	目標値	達成値
伝送速度	約 6000 bps 30 min ~ 2 h で データ回収でき ること	24.2 kbps 約 54 min でデー タ回収可能
水平伝送範囲	送信器上半径 500 m 以内の海 上	例えば水深 20 m で送信器上半径 15 m 以内の海上
適用水深	100 m	100 m
記憶容量	16 Mbyte	20 Mbyte
電池寿命	3 ~ 6 ヶ月	6 ヶ月

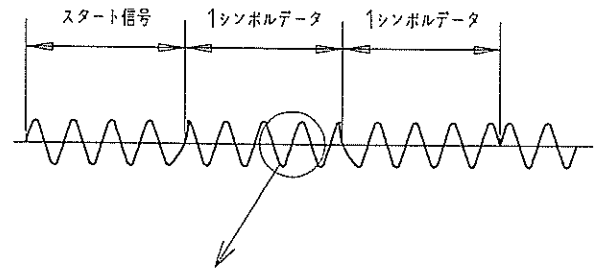
ンボルとの位相差がデータになる。即ち、信号波は、それぞれ搬送波の基準とする位相の他に、この位相より、 90° 、 180° 、 270° それぞれ異なる3種の位相を加えた合計4種の位相のいずれかの位相で伝送される。

受信側でそれぞれの位相を検出し、データを復元するのが4-PSKである。しかし、移動体通信では、送信器側と受信器側の位置関係は絶えず変化しており、絶対位相を検出することは大変困難である。例えば、本システムで使用している100kHzは、海中では波長15mmになり、僅か7.5mm移動しただけで、 180° も位相が変化することになるからである。そこで、すぐ前のシンボルからの位相変化分を検出し（差動検出する）、その位相差をデータに換算する4-DPSKを用いている。この方式では、それぞれのシンボルが直前のシンボルとの位相を比較するだけでよく、移動通信の環境下でも復調器を比較的容易に製作することが可能である。

搬送周波数は、上記4-DPSK変調を行うことを前提にして、その伝送速度と超音波の吸収による距離減衰を勘案して100kHzとした。

表-2.1からわかるように、ここで開発されたシステムは、データの伝送速度および記憶容量については、目標を上回る仕様を達成することができた。水平伝送距離については、後述するように海底設置センサーの水深によって決まるため、通常の波浪観測（水深20から50m）を対象とした場合、データを回収する船の位置決めには、当初想定した以上の精度が求められることとなった。

ここで検討対象機器として取り上げた波高計は、写真-2.1に示す波高波向を同時に計測できる超音波式のものである。表-2.2には、この波高計の主な仕様を示すが、本波高計は、表面変動計測、水平2成分流速計測、および水圧変動計測の4チャンネルのデータ取得を行うもの



	位相	位相シフト(→)と"データ"
基準位相		'0' '3' '2' '1'
基準位相 + 90°		'1' '0' '3' '2'
基準位相 + 180°		'2' '1' '0' '3'
基準位相 + 270°		'3' '2' '1' '0'

図-2.2 信号伝送の原理

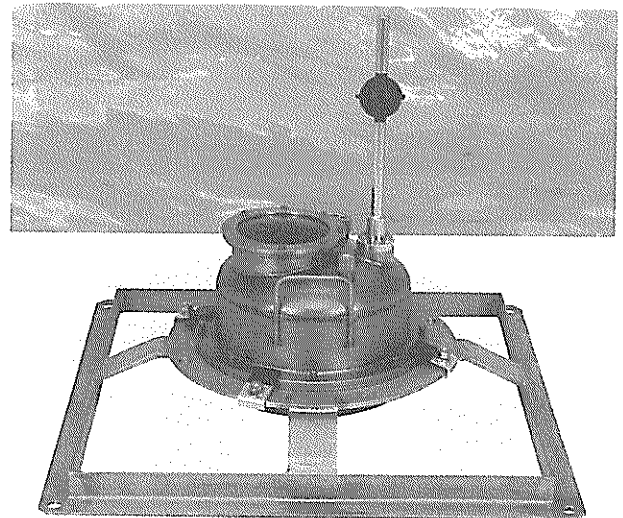


写真-2.1 検討対象直記式波高計
(協和商工(株)写真提供)

である。また、表-2.3には、同装置によって観測されたデータを伝送する場合の伝送時間の実験結果を示している。

この場合の、検討対象波浪観測機器による1か月分の伝送データ量は、2時間毎(1日12回)に20分間のデータを0.5s間隔で取得する場合、次式(1)により計算される。

$$16 \text{ [bit/data]} \times 2400 \text{ [data/ch]} \times 4 \text{ [ch]} \\ \times 12 \text{ [観測/日]} \times 31 \text{ [日]} \times 1.22 \\ = 69709824 \text{ [bit]} \quad (1)$$

但し、係数1.22は、3.7で述べる誤り訂正用の付加データ分である。なお、各観測項目毎に16bitの観測データを取得するものとしている。

本システムは、これら接続する観測装置のメモリー容量や電池寿命を考慮した仕様で開発された。

写真-2.2は、本システムを構成するデータ送信器と受信器を示している。本システムでは、小型船(船外機ポート含む)によるデータ回収を想定しており、データ受信器は可搬型となっている。写真-2.3、写真-2.4は、それぞれ、波浪観測装置と共に海底に設置されたデータ送信器と、システムの設置作業状況を示したものである。

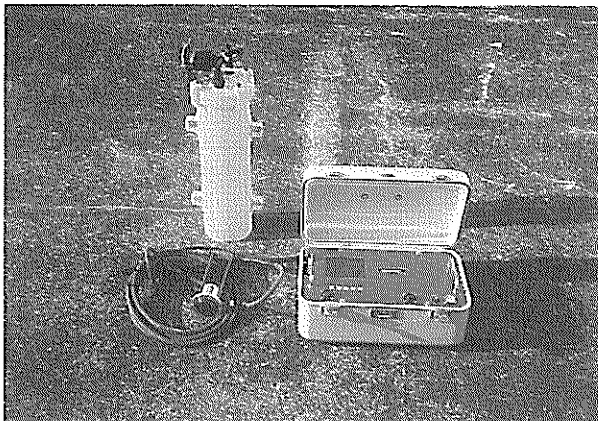


写真-2.2 データ送信器(左)と受信器(右)

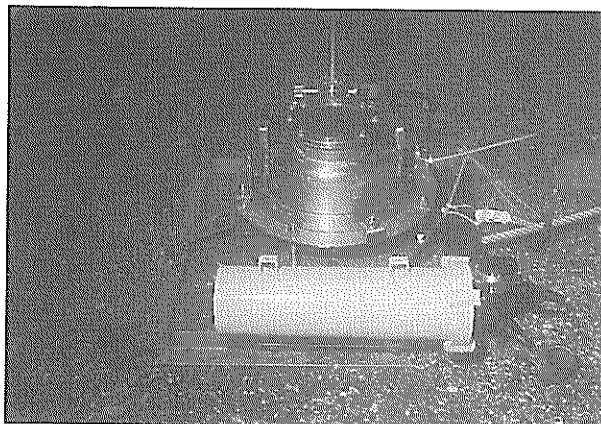


写真-2.3 海底に設置された直記式波高計とデータ送信器

表-2.2 検討対象直記式波高計の仕様

測定範囲	超音波式波高計 : 0 ~ 20m 水圧式波高計 : 0 ~ 20m 電磁流速波高計 : ± 1.25/2.5m/s
測定精度	超音波式波高計 : ± 3.0% 水圧式波高計 : ± 1.0% 電磁流速波高計 : ± 1.0%
分解能	超音波式波高計 : 1cm 水圧式波高計 : 1cm 電磁流速波高計 : 1cm/2cm
設置範囲	超音波式波高計 : 2 ~ 60m 水圧式波高計 : 1 ~ 60m 電磁流速波高計 : 1 ~ 60m
観測時間	約 45 日 20 分/2 時間観測 メモリー標準 8Mバイト・0.5sec サンプ リング
サンプ リング 期間	0.1, 0.2, 0.5, 1.0 秒
観測時間	1 ~ 100 分(1 分間隔で設定)
観測間隔	2 ~ 999 分(1 分間隔, 待合最長時間 1 ヶ月)
時計精度	± 30 秒/月
時計合わせ	キースイッチで設定
データ記憶方式	IC メモリーカードに時刻とともに収録
記憶容量	1M, 2M, 4M, 8M, 16M バイト (標準で 8M バイトを実装)
データ保持期間	5 年バックアップ 電池内蔵
電源	シール電池 12AH・3 個 リチウム電池 30AH・3 個 実装
外形寸法・重量	φ 384・H607mm, 約 26kg



写真-2.4 システムの設置作業状況

表-2.3 データ量と伝送時間算出例

データ量 項目	1日分	10日分	31日分
要求からデータ伝送 までの時間 [s]	17	90	255
データの水中伝送時間 [s]	93	928	2877
伝送後の後処理時間 [s]	12	34	102
全通信時間 [s]	122	1052	3234

3. 予備検討における試験機器の試作

3.1 水槽実験

開発を進める上で、現地実験に先立ち、水槽実験により、設計上の基本性能の確認を行った。表-3.1は、実験に使用した水槽の諸元と実験項目を示している。

水中音響通信機器の設計製作においては、このような水槽における定量的な指向特性や送波レベルの測定が必要不可欠である。あわせて、水中4-DPSKの信号伝送実験も水槽で行ったが、この実験では、水槽内の多重反射の弊害を防ぐため、データ各ブロック伝送間の休止間隔を約1sと非常に長く設定した。写真-3.1および写真-3.2は、水槽実験状況を示している。木製浮体の下、約1.5mに超音波送受波器を取り付けたものを2個用意し、これらを互いに5m離して水中で対向させ、伝送実験を行った。この実験では、38400bit (2400data相当)と僅かなデータ量ではあるが、誤りのない良好な伝送が確認された。

また、水圧タンクを用いた耐圧力試験では、1.5MPaで24時間の加圧試験を行い、装置の耐圧性を確認した。

表-3.1 水槽の諸元と実験項目

水槽 (幅×長さ×水深)	予備実験項目
5.0m×4.0m×4.5m	指向性測定 送波レベル測定
15.0m×10.0m×3.5m	水中4-DPSK信号伝送
直径 0.8m×0.8m (水圧タンク) (耐水圧: 6MPa)	データ送信器耐圧試験

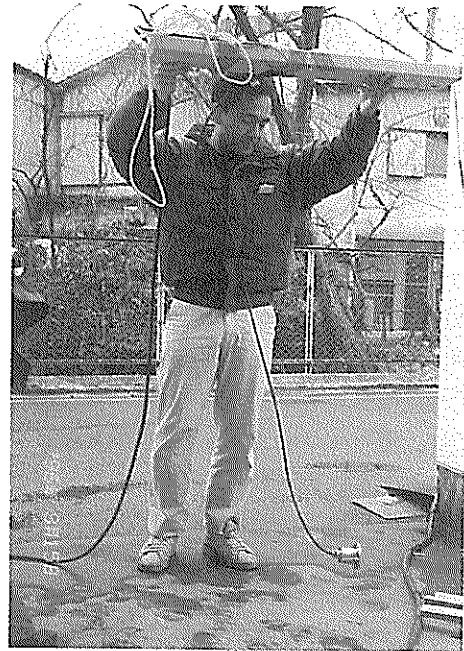


写真-3.1 水槽実験状況 (1)

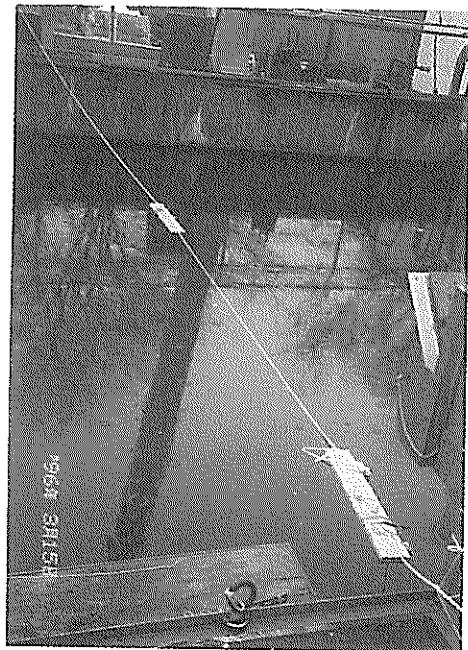


写真-3.2 水槽実験状況 (2)

3.2 現地基礎実験

本システムを用いる上で、水槽と現地との大きな違いは、信号の伝搬環境の違いである。狭い水槽実験では、信号音波が多重反射し、互いに重畳して、本来の信号が大きく歪んでしまうが、広い現地環境では、その多重反射経路(マルチパス)からの重畳が軽減され高速伝送が可能になる。

表-3.2は、現地基礎実験の経緯を示したものである。初回の実験では、水槽実験で行えなかった高速伝送の確認を、舷側から吊り下げられたデータ送信器と海面付近のデータ受信器用送受波器との間で行った。この時、同時に、海底に着底されたデータ送信器と数十m離れた海上船舶との間でデータ伝送を試みているが、マルチパスによるノイズ混入のため良好な通信が行えなかった。これについては、3.6で述べる。

続く数回の実験では、横方向の指向性を卓越させた送受波器や、海底のデータ送信器上の位置関係を保持するためのデータ回収ブイの使用を試みたが、これらの方法については、その後の相当な開発改良期間を要することが懸念され、まずは基本的な上方向の送受波器と舷側に固定された送受波器との伝送に絞って開発を行う方針となった。基礎実験後半では水平伝送距離限界や本システムに採用した誤り訂正手法の実際の伝送における有効性の確認、及び、短時間ながら波浪観測装置と現地組み合わせ動作試験を行い、良好な結果が得られた。

表-3.2 現地基礎実験の経緯

実験日時、場所	主な実験内容
1996.7.22 1996.8.5～6 (沼津内浦湾)	データ送信器吊り下げによるデータ伝送実験等
1996.11.28～29 (沼津内浦湾)	(リング型振動子による) 横方向送受波器での伝送実験等
1997.3.4～5 (沼津内浦湾)	データ送信器を着底させて伝送実験、海底反射損失測定等
1997.7.23～24 (沼津内浦湾)	データ回収ブイ方式による伝送実験等
1997.9.29～10.1 (東京湾口保田港沖)	データ回収ブイ方式による伝送実験、マルチパス影響調査、誤り訂正有効性確認
1998.2.17～20 (東京湾口保田港沖)	DL-2との現地組み合わせ伝送実験等
1998.11.16～18 (相模湾中央部)	海底マルチパスを無視できる大水深海域で、伝送距離能力の確認等

3.3 伝送能力とSNR

水中音響では、送波音圧から拡散と吸収による音波の距離減衰を減じることにより、音波の送信点からの距離に応じた指向軸上の音圧 $P(x)$ が、式(2)に示すように求まる¹⁾。図-3.1は、式(2)の右辺第2項以降で計算される音波の距離減衰量を示したものである。さらに、指向軸上からずれた角度の音圧は、この値から指向性減衰をさらに減じれば求まる。

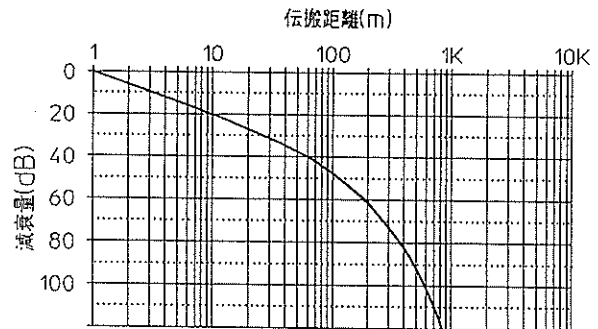


図-3.1 100KHzにおける超音波の距離減衰曲線

$$P(x) = P_0 - 20 \log x - \alpha x \quad \text{[dB]} \quad (2)$$

ここで、

P_0 : 送波音圧 [dB]

\log : 常用対数 (底は10)

x : 送信点からの距離 [m]

α : 吸収減衰で、概ね、式(3)で与えられる。

$$\alpha = 0.044 f^2 / (4100 + f^2) + 3.0 f^2 \quad \text{[dB/m]} \quad (3)$$

ここで、

f : 音波の周波数 [KHz]

ノイズの音圧 N_L は、次式で見積もることができる。

$$N_L = N_p + 10 \log B - D_R \quad (4)$$

ここで、

B : 受信部の周波数帯域 [Hz]

N_p : 海中自然雑音で、式(5)で推定される。

D_R : 受波器の指向性利得で式(6)で与えられる。

$$N_p = 145 - 18 \log f_0 \quad (5)$$

$$D_a = 10 \log (4\pi s / \lambda^2) \quad (6)$$

ここで、

f_0 : 中心周波数 [Hz]

s : 音波の送波面積 [cm²]

λ : 音波の波長 [cm]

また、ノイズの音圧 N_L の求め方には、幾つか計算式がある。例えば、水産機器の設計で一般的に用いられる実験式として式(4)を用いて概略値を推定することができる。しかしながら、この値は波浪や船舶のエンジン雑音、走行雑音、生物雑音等により異なり、10~20dBの違いが現れることも珍しくない。式(4)に、実際にデータ受信に用いられる送受波器の定数を代入して N_L を計算すると91.2dBになる(但し、定数はそれぞれ $B=36\text{kHz}$, $D_a=9.34\text{dB}$, $f_0=100000\text{Hz}$ とする)。

実際の沼津内浦湾における雑音測定では、100~105dBの雑音が測定された。この時の測定環境条件としては、作業船停船、エンジン停止状態、波高 0.5m、測定深度は 3m であった。また、後述の相模湾中央部における実験時の雑音測定では、95dBの雑音が測定された。この時の測定環境条件としては、作業船エンジン稼働状態、プロペラ停止にて漂流状態、波高 0.5m、測定深度 3m であった。このように、 N_L は海況等の環境条件により常に変化するものの、上記の式により、送信点からの距離に応じた概略の SNR (Signal to Noise Ratio) を計算により求めることができる。

一方、本システムを用いた室内での連続的疑似電気雑音混入による実験では、SNRが20dBにおいて1.0E-4の誤り率での伝送が確認された。

そこで、上記の音響的な減衰曲線に対し、20dBの SNR を確保できる距離限界を図-3.1から求める。送波音圧を 173dB、 N_L を95dBとすると、173dBから20dBと95dBを減じた58dBまでの減衰が許容されることになる。これは、図より指向軸上で 約160mに相当する。相模湾中央部の水深 820mで行った実験では、この誤り率に相当する伝送距離は、80mから 120m程度であった。この原因としては、送受信器間の指向軸上からのずれや、吊り下げ用ロープや取り付け用スイベルによる音波伝搬路の障害などが考えられる。

3.4 指向性の検討

本システムは、当初、伝送の水平範囲を広げること、および、製造上のメリットからデータ送信器側とデータ受信器側に同じ送受波器を使用することを目指していた。

しかし、沼津内浦湾における実験では、水中雑音が大きかったので、海上の受信器側では、指向性をやや絞ったものとした。これは、指向性利得を上げることで送受波器が捉える水中雑音を減らすことと、海上側の送受波器は人為的に方向が変えられるため、効率よく海底側に向けることができるという理由からである。一方、海底側のデータ送信器用の送受波器は、方向を変えることができなため、広い指向性を持たせた。

送信器側、受信器側それぞれの指向特性を、図-3.2および図-3.3に示す。6dBが半減を意味する。このため、図-3.2および図-3.3からそれぞれ、半減半角を読み取ると、それぞれ、50° および31° となる。すなわち、海底部送受波器の半減全角は 100° であるのに対し、海上部送受波器では62° であった。

3.5 送受信部の検討

PSK変調方式は、高速伝送に適した方式であるが、同じn値の位相変調で、より高速な伝送を行うには、図-2.2に示す1シンボル当たりの波数を減らせばよい。

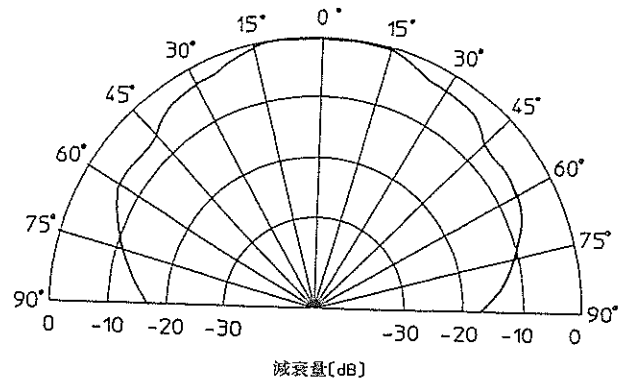


図-3.2 指向性測定結果 (海底部送受波器)

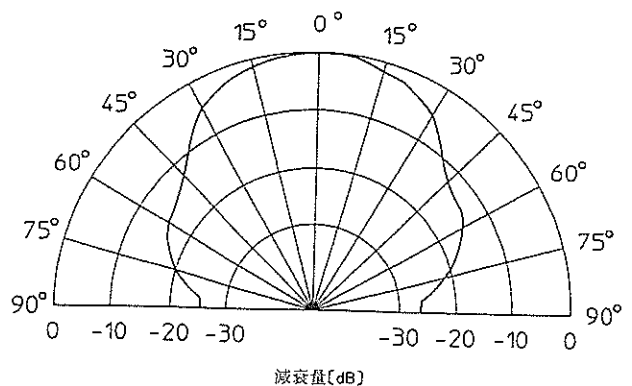


図-3.3 指向性測定結果 (海上部送受波器)

しかし、通常、電気-音響変換素子として用いられる P Z T (Pb(Zr・Ti)O₃ : チタン酸ジルコン酸鉛) 振動子では、周波数帯域幅が狭く、このためシンボル変化に対する応答時間が長い。この応答時間は、周波数帯域幅の逆数で求められ、通常、未処理の振動子を水中で使用した場合、共振周波数である 100kHz に対し、5 kHz 程度である。これより応答時間を求めると、200 μs となり、100kHz (周期 10 μs) の信号では 20 波分に相当する。

この応答時間を短くするために、振動子の周囲を押さえ振動を抑制するダンピングを行うようにした。しかし、このダンピングは、電気-音響変換効率の低下につながる。

このため、効率よく、かつ、応答時間を短くする手段として、振動子の音波放射面に、図-3.4に示すように音響的に伝搬効率のよい音響整合層を付けた。この結果、応答時間を 25 μs とすることに成功した。この応答時間は、100kHz では 2.5 波分に相当するものである。

ただし、実際には純粋な信号波形の応答時間に加え、電氣的に信号を検出するサンプリングの変動を考慮し、また、伝送の信頼性を高める目的でさらに充分な時間的余裕を設けたので、6 波 (60 μs) で、1 シンボル、すなわち 2 bit のデータを伝送している。

この結果、式 (1) で示した量のデータを伝送するのに必要な時間は、以下のように計算される。

$$30 [\mu\text{s}/\text{bit}] \times 69709824 [\text{bit}] = 2091 \text{秒} \quad (7)$$

すなわち、理論的には、約35分間で1月分の波浪観測データの伝送が可能となる。実用機では、各観測毎にファイルを区分するためのポーズ時間が必要であるため、実際の伝送時間は、表-2.3で示したように、3234秒であった。

なお、この時の、振動子の電気入力-音響出力特性は、図-3.5に示すようになり、効率50%で計算した値 (図の点線) と一致している。通常、水中で用いられる送受波器の効率は約50%であり、整合層負荷により振動抑制を加えたこの送受波器は、その効率を確保したまま (効率を下げることなく)、周波数帯域を広げている。

3. 6 マルチパスを考慮した水平伝送距離

3. 1 では、水槽内で本システムを使用すると、多重反射波が重畳するために本来の高速伝送が行えないことを述べた。実は、実海域においても、少なからずこの影響があり、特に、水深が数十m以下の浅海域においては

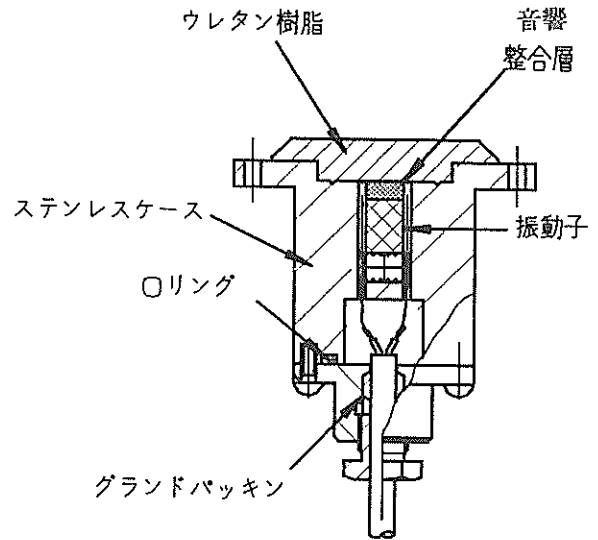


図-3.4 送受波器の構造図

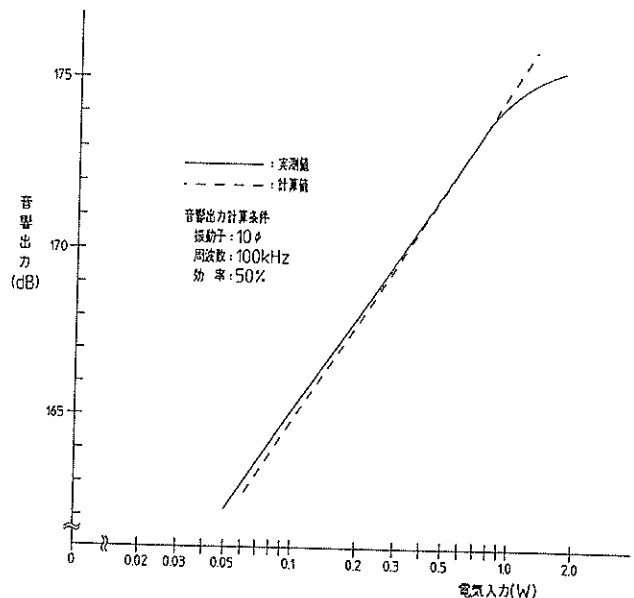


図-3.5 振動子の電気入力-音響出力特性

海底と海面で反射した信号が、無視できないレベルで本来の信号に重畳してくる。海底の反射損失については、幾つかの測定事例があるが、ここでは実海域で、本システムで使用する100kHzの送受波器で測定した。その結果が、表-3.3である。表ではさらに、信号波とマルチパス伝搬波を雑音とした時の海底側データ送信器真上での SNR を算出している。

ここで、マルチパス伝搬波 (M1) とは、海底側のデータ送信器から発射された音波が海面で1回反射し、一旦、海底に戻り反射して、再び海面側に向かってデータ受信器用送受波器に達する音波としており、海底の反射損失はそれぞれ表中の値を、海面側は鏡面として扱い、反射損失は0として求めている。また、送波音圧173dB、

表-3.3 海底反射損失測定と測定点直下のマルチパス SNR 計算値

場所	底質	水深 [m]	反射信号音 圧測定値 [dB]	伝搬損失 計算値 [dB]	海底反射損 失計算値 [dB]	信号音 圧 [dB]	M1音 圧 [dB]	S N R 計算値 [dB]
A	岩	17m	130.0	30.6	12.4	148.9	124.9	24
B	砂	29m	118.4	36.7	17.9	143.3	113.3	30
C	砂	18m	124.9	31.3	16.8	148.3	119.9	28
D	砂	27m	121.8	35.9	15.3	144.1	116.8	27

吸収減衰0.0379dB/mとし、海上側送受波器は海面下 2 mの位置から送受信した。

これに、さらに指向性減衰を考慮し、水平方向についても SNR を計算した結果、図-3.6が得られた。図は、水深22mの海上から、データ受信用送受波器を海面下 2 mまで降ろしてデータ伝送を行う場合として求めており、海底反射損失は15.3dBと仮定している。図より真上では20dB以上のSNRを確保できるが、水平12mを越えると20dB以下となり、水平15mでは16dBとなる。16dBは、先の3.3で述べた実験室での疑似信号入力による誤り率調査では、3.0E-2程度の誤り率になる。

これを確認するため、現地で水平距離伝送可能範囲の確認実験を行った。水深22mの海上で舷側からデータ送信器を着底直前の深度21mまで降ろし、データ受信器用送受波器を真上の位置から徐々に水平方向に遠ざけていった。結果は、図-3.7の通りで、概ね計算値と一致した。

いずれにしても、データの伝送可能な水平範囲がデータ送信器上の僅かな範囲に限定されることが、計算と実験によって確認されたが、データ回収は、汎用のDGPS (Differential Global Positioning System) の近年における飛躍的な測位精度向上に伴う船舶の誘導精度の向上を期待すれば、実用可能といえよう。

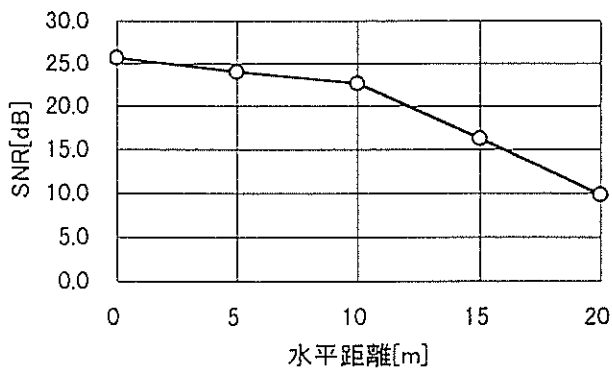


図-3.6 水平距離に対するマルチパス SNR

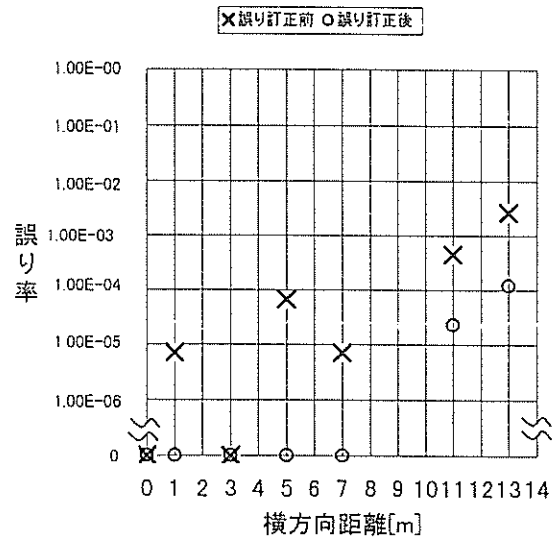


図-3.7 水平距離に対する誤り率調査結果

3.7 マトリックスチェックコード方式による誤り訂正方式の検討

デジタル通信では、伝送路の障害等により誤りの発生が避けられない。この誤りを訂正する方法として、自動再送方式とFEC (Forward Error Correction) と呼ばれる非再送訂正方式がある⁷⁾。前者は、誤りの検出のみを行い、誤りが検出されるとデータの再送を要求するもので、送信側と受信側が1:1で、且つ、通信時間に余裕があれば確実な方法である。後者は、デジタル放送のような多数の受信系に伝送する場合や、再送の余裕がない高速伝送を行う場合等に行う方法で自動訂正を行うための、冗長符号が付加されており、受信側でその冗長符号を使って自動的に誤り補正する。FECによる訂正は、原理上いかなる場合も完全に訂正できるというものではないが、今日のデジタルVTR等を支える重要な技術となっている。

本システムの伝送系について検討すると、データ伝送

(1) 誤り訂正用データの作成

10×10毎のデータにチェックサムを付加し、データ伝送する。

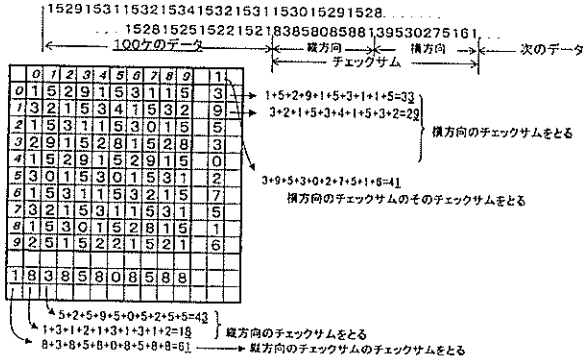


図-3.8 データの誤り訂正 (誤り訂正用データの作成)

(2) 受信データのチェックサム算出

受信データから10×10毎のチェックサムを求め誤り箇所を調べる。

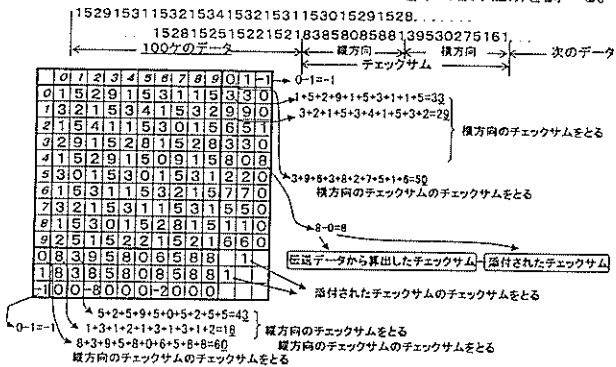


図-3.9 データの誤り訂正 (受信データのチェックサム算出)

(3) データの配列変数化

下図のようにデータを配列変数化し、誤り訂正の演算処理をやり易くする。

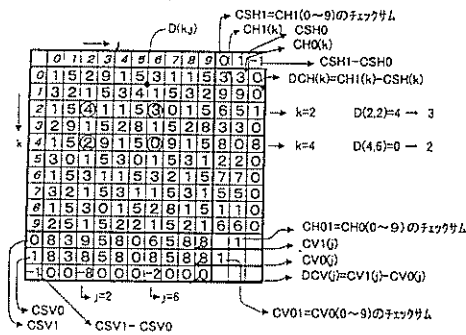


図-3.10 データの誤り訂正 (データの配列変数化)

速度の高速性や海中という極めて信号伝搬速度が遅い伝搬路を考えると、FECが必要不可欠である。

以下に、本システムで採用している誤り訂正方式について図-3.8から図-3.11により簡単に説明する⁸⁾。

図-3.8では、100ヶのデータを10×10のマトリックスに入れるとともに、計22ヶの誤り訂正用冗長符号を配置している。右3列と下3行はチェックサム項であるが、図-3.9に従って空欄部分を計算し、最右列と最下行がすべて0になれば、この伝送データに誤りは存在しない。この項が0以外の数値であれば、その行、または、列に誤りが存在する。図-3.10では、D(2,2), D(2,6), D(4,2), D(4,6)の内の何れか1ヶ、または、複数に誤りがあることを検出している。

こうしたデータの修正は、図-3.11のフローに沿い、順次、値を当てはめていくことによって行われる。そして、最右列、最下行がすべて0になったときの値が正解の値として誤り訂正が完了する。ただし、この訂正方法では、D(k1, j1), D(k1, j2), D(k2, j1), D(k2, j2)すべてに誤りがある時、および、伝送されたチェックサム項に誤りがある時は、訂正データが特定できず、確実な誤り訂正ができない欠点を有する。

ここで紹介した方式によるデータ修正は、4. で後述する通り、現地での誤りパターンに対し、その有効性が確認されている。

(4) 誤り訂正方法

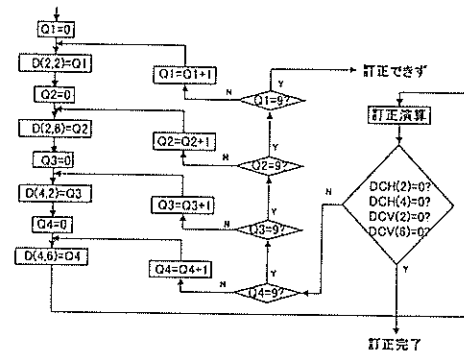


図-3.11 データの誤り訂正フロー

4. 現地実証実験によるシステムの適用範囲の検討

4.1 現地実証実験

本システムは、水槽実験、ならびに現地予備実験等を通して改良を重ねた後、表-4.1に示す現地実証実験を行った。この実験では、設置からデータ回収、撤収に至る一連の現地作業について検証を行った。

初回の現地実証実験は、東京湾口久里浜沖で行ったが、この実験では、対象波浪観測機器と本システムとを組み合わせ1ヶ月間に渡って海底に設置した。その間、3回のデータ回収を行ったが、設置時の測位と船舶の誘導に若干の不安要因が現れた。即ち、小型潜水作業船から観測機器を吊り降ろし海底に設置する際、作業船の触れ回り等から、必ずしも作業船の真下に設置されるとは限らず、このため、海上の測位精度が海底設置場所の測位に一致しない点である。この実験では、設置場所の誤認識からデータ伝送の成功と失敗の両方を経験した。

表-4.1 現地実証実験の経緯

実験日時, 場所	主な実験内容
1998.10.6 ~ 1998.11.5 (東京湾口久里浜沖)	D L-2 と組み合わせ設置, データ回収実験
1999.2.8 ~ 2.10 (東京湾口保田港沖)	設置状態のデータ送信器に対する水平伝送距離確認と船の誘導テスト

そこで、設置時の確実な測位を行うための方法確立と、その測位データの妥当性を確認すべく、再度、現地実証実験を行った。その結果、以下の方法が有効であることが確認された。

①設置時の潜水作業船係船を3点係留し、真下に吊り降ろして設置場所を定める方法。

フーカー式潜水では、3点係留は珍しくないが、スクーバ式潜水では、通常、流れに向けて1点係留を行っている。しかしながら、1点係留では、風や潮流の影響で水深分以上の触れ回りを覚悟しなければならない。これに対し、3点係留では、ほぼ真下に位置決めすることができる(4.4参照)。

②設置時に、水中位置測定装置⁹⁾を用い、海上でのDGPS測位データと組み合わせて使用する方法。

この方法では、設置時に別途水中位置測定装置を持参

すれば、作業船と実際の設置場所が異なっても正確な測位が可能である。なお、データ回収作業にあたる小型船舶が漁船である場合、搭載されている魚群探知機によっては、海底部の波高計や送受波器の検出を行うことができる場合があるので、水中位置測定装置を搭載していなくても作業に支障が生じない。

4.2 伝送距離の検討

本システムによるデータ伝送可能距離の確認を行うため、海底データ送信器の周囲を移動し限界距離を測定した。図-4.1および図-4.2は、それぞれ水深約20mおよび約30mでの伝送実験結果について、データ伝送可能な範囲を、海底側データ送信器との水平位置関係で示したものである。波浪観測データは、時折、スパイク上の異常波形が発生するため、 $1.0E-3$ 程度の異常データは前もって考慮され、雑音処理演算で対策されている。そこで、伝送データについても同程度の誤りが発生しても、観測データに及ぼす影響は殆どない。そこで、図では、概ね誤り率 $1.0E-3$ 以下の伝送が行われた地点を●印、それ以上及びデータの復元が全く行えなかった地点に×印を付けて示している。

図より、データ伝送可能範囲を角度に換算すると、概ねデータ送信器の上方全角約 $50\sim 60^\circ$ の範囲で可能であることが分かる。これは、波高計が設置水深が50mであれば半径 $25\sim 30$ mに相当し、係留された作業船の触れ回りを考慮しても伝送は可能であることを示している。

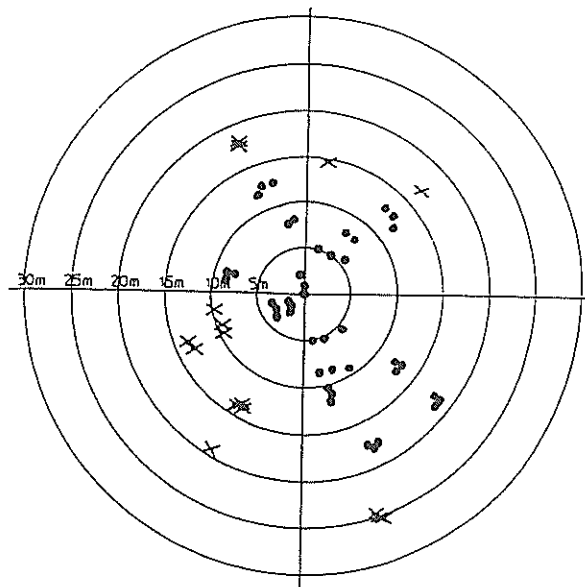


図-4.1 水平伝送距離と誤り率(水深20m)

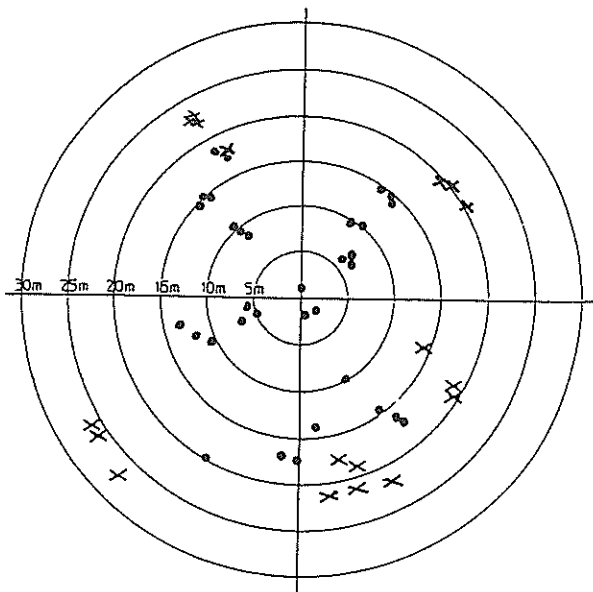


図-4.2 水平伝送距離と誤り率（水深30m）

4.3 誤り訂正手法の適用性の評価

図-4.3～図-4.6に実際に、データ伝送において発生した誤りについて、誤り訂正を行った結果を示す。図より、誤り訂正によって約2桁の改善効果が認められ、実際に発生する誤りパターンに対して、有効に働いていることが分かる。

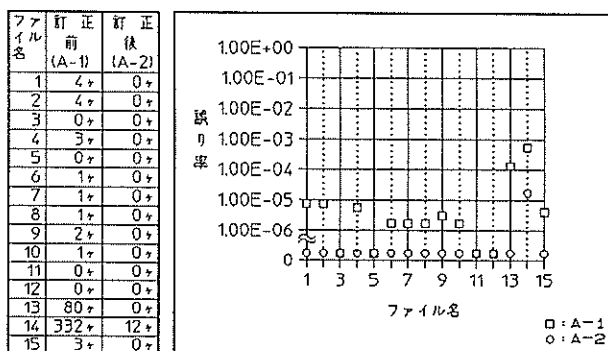


図-4.3 誤り訂正によるデータ訂正例1

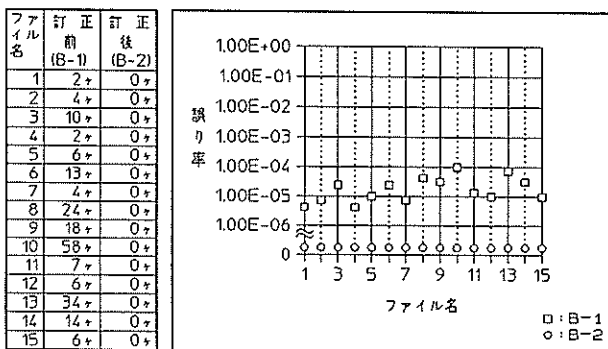


図-4.4 誤り訂正によるデータ訂正例2

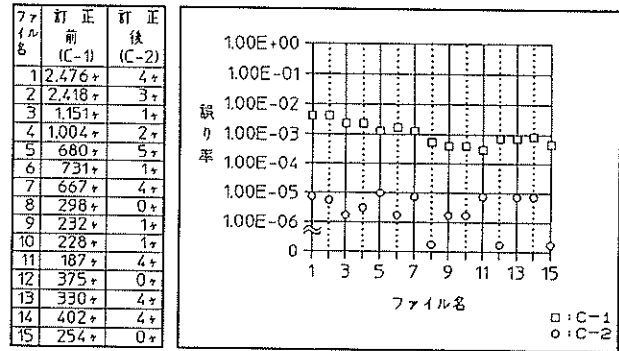


図-4.5 誤り訂正によるデータ訂正例3

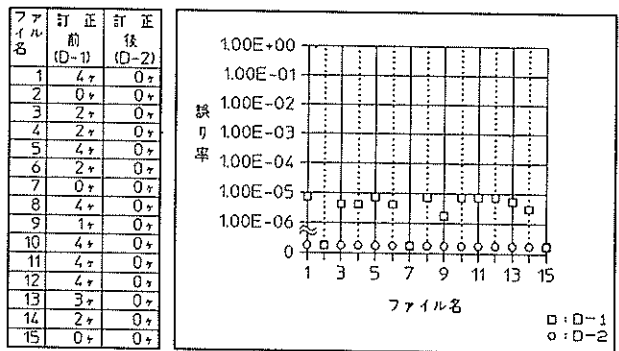


図-4.6 誤り訂正によるデータ訂正例4

4.4 DGPSによる海上小型船舶の位置決め精度

データ伝送実験において、DGPSを用いて作業船の振れ回りを測定した。

その結果、水深22m、3点係留時の振れ回りは約3～4mの範囲に収まっていることが確認できた。但し、この値は海象条件により異なるであろうことが予測されるが、係留索の張力変化を考慮しても、それほど大きな違いはないと思われる。なお、この日の海面付近の最大流速は15cm/s、波高20cm、風速は6.5m/s、10分内の風向、風速の振れはそれぞれ20°、3m/s程度であった。

また、別の水深30mの場所で、船首側2点係留により前記同様の実験を行った。この時の振れ回りは5～8mであった。なお、この日の海面付近の最大流速は15cm/s、風速は11m/s、波高50cm、10分内の風向、風速の振れはそれぞれ20°、3m/s程度であった。

一方、実験を行った保田港内で、DGPSの定点での測位性能確認を行ったところ、3日間の期間中で最大70cmであり、十分な精度が確認された。

上記の値から、気象海象条件や水深、船舶の大きさ、形状等により異なるものの、3点係留、または、船首側2点係留を行えば、作業船をデータ回収可能な程度に位

置決めできることが確認できた。

5. 今後に残された課題

本システムを用いて、上記の通り、海底に設置された波浪観測機器上の海上から、一定の水平伝送範囲内において観測データを音響無線通信によって回収することができた。

本システムの実用性をさらに向上させるためには、送受波器の指向性改善による水平伝送範囲の拡大が望まれる。これによって、設置やデータ回収における測位と船の係留、誘導上の負担が軽減されることになる。また、データ送信器については、より一層の小型化を計り、できれば波浪観測機器内への組み込み型とすることにより、取り扱い上の利便性やコスト低減を計ることが可能となる。

なお、本装置によってデータを回収しても、ただちに海底の自記記憶装置に残されているデータが消去されるわけではないので、たとえ一度データ回収に失敗したとしても、再度データの回収を行うことは可能である。もちろん、船上からデータ消去コマンドを送信することによってメモリーの初期化を行うことができるので、正常なデータ回収がなされれば、再度、メモリー容量が許す

期間のデータを新たに蓄積することができる。

ただし、ここで対象とした波高計は、超音波式のものであるので、観測時間中（通常設定であれば2時間毎に20分間の観測）には、データ回収を同時に行うことはできない。測定のための超音波がノイズとなり、データ転送を阻害するためである。

6. おわりに

本システムの開発は、著者5名だけにとどまらず、多くの方々のご支援ご協力によって、初めて可能となったものである。

表-6.1に、開発実施工程および開発委員会の開催時期を示す。4年間の開発期間中に11回にわたって開催された開発委員会では、合田委員長および港湾局・海上保安庁水路部の各委員の方々から、有益なご指導とご助言をいただいた。改めて、ここに感謝の意を表す。

本システムは、波浪観測機器ばかりではなく、流れ・水温・水質などの海洋環境計測にも広く活用される可能性を秘めたものである。今後、本システムが、さまざまな海洋調査に活用されることを願ってやまない。

(1999年3月25日受付)

表-6.1 開発の経緯

項目	年度			
	7	8	9	10
1. 計画・準備 (1) 開発目標の設定 (2) 概念設計	—			
2. データ伝送方式の標準化 (1) 観測フォーマットの標準化 (2) 計測信号・測定データの 変換・伝送前後処理 (3) 伝送信号の標準化	—			
3. 実験機器の設計・製作 (1) 実験装置の設計・製作 (2) 実用化モデル機器の設計・製作 (3) 応用機器の検討・試設計	—			
4. 実用化周辺技術の検討・整備 (1) 関連技術・機材 (2) 回収データの収録・活用システム (3) 応用観測システム	—			
5. 開発実験の実施 (1) 基礎実験の実施 (2) 実用化検証試験の実施	—			
6. 開発成果のまとめ (1) 実用化標準仕様(案)の作成 (2) 報告書の作成	—			
※ 開発委員会開催日	1995.08.25 1995.12.22 1996.03.27	1996.09.20 1996.12.13 1997.03.27	1997.11.26 1998.03.10	1998.07.08 1998.12.17 1999.03.11

参考文献

- 1) 高橋智晴：水中計測信号伝送システムの開発，
（社）海洋調査協会報No.46, pp.28-33, 1996
- 2) 高橋智晴・渡辺泰則・小山謙一・石原孝史：水中計
測信号伝送システムの開発，（社）海洋調査協会第
15回技術発表会予稿集, pp.11-13, 1998
- 3) 越知寛・網谷泰孝・土屋利雄：長距離高速デジタル
通信，超音波TECHNO, pp.49-53, 1996
- 4) 小島淳一・白崎勇一：無索式水中ロボット用水中画
像超音波伝送システムの開発，日本造船学会
第13回海洋工学シンポジウム, pp.371-376, 1995
- 5) 宮内一洋：通信方式入門，コロナ社, pp.90-92,
1991
- 6) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦（監修）：超音波技
術便覧（新訂版），日刊工業新聞社, pp.616-618,
1987
- 7) 松尾憲一：デジタル放送技術，東京電機大学出版
局, 148P., 1997
- 8) 大原雄介：誤り検出と訂正の方法，トランジスタ技
術，CQ出版社, pp.304-308, 1992年11月号
- 9) 小山謙一：水中位置測定装置，カイジョー技報
Vol.No.4 pp.38-45, 1996

港湾技研資料 No.933

1999.6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1999) by P.H.R.I.

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。