

水中音響データ伝送の実海域実験装置 及び実験方法について

渡邊 佳孝^{*1} 越智 寛^{*1} 志村 拓也^{*1}
佐藤 慎章^{*2} 網谷 泰孝^{*3} 澤 隆雄^{*1}

海洋技術研究部では水中音響データ伝送に関する研究を行っており、マルチパスやドップラーシフトといった通信を妨げる歪みの影響下での通信について実海域実験を行った。送受信装置は係留及び船上からの吊り下げによって設置し、音波の海底反射や船上のウインチによる送受波器の移動を利用して歪みを加えた。信号の使用帯域は20kHz±4kHzで、5個のハイドロフォンを用いてマルチチャンネル受信を行った。予め作成してPCに用意した送信信号データをD/Aコンバータで変換して送信し、受信データはそのままA/DコンバータによってPCに記録して復調処理は後にソフトウェアによって行った。本稿では実海域実験で用いた送受信装置と、実験方法の詳細について説明する。

キーワード：水中音響データ伝送, マルチパス, ドップラーシフト, マルチチャンネル, 実海域実験

The experimental device and the method for ocean field experiments on underwater acoustic telemetry

Yoshitaka WATANABE^{*4} Hiroshi OCHI^{*4} Takuya SHIMURA^{*4}
Sadafumi SATO^{*5} Yasutaka AMITANI^{*6} Takao SAWA^{*4}

Ocean field experiments on underwater acoustic communication were implemented. In experiment, multipath or Doppler shift, as distortion which degrade communication, were added into the received signal. Transmitting and receiving device were moored or suspended from the ship. Distortions were added with seabed reflection and by winch operation controll. The band of signal was 20kHz±4kHz. The signal was received with five hydrophones. Transmitted signal was previously recorded on PC as digital data, converted to analog signal by D/A converter and transmitted from the transducer. Received signal was digitized by A/D converter and recorded on PC. The recorded data was demodulated with software as off-line processing. In this paper experimental devices and method are described in detail.

Keywords : underwater acoustic communication, multipath, Doppler shift, multichannel, ocean field experiment

*1 海洋科学技術センター 海洋技術研究部

*2 海洋科学技術センター 海洋技術研究部 (現川崎造船)

*3 海洋科学技術センター 深海地球ドリリング計画推進室

*4 Marin Technology Department, Japan Marin Science and Technology Center

*5 Marin Technology Department, Japan Marin Science and Technology Center in 2001~2002, (Kawasaki Shipbuilding corporation)

*6 OD21 Program Department, Japan Marin Science and Technology Center

1. はじめに

水中でのテレメトリや画像伝送のために、様々な水中音響通信の研究がなされている^{1, 2)}。JAMSTECでもプロジェクト研究「先進的技術の開発」の水中音響技術の開発において、海底ステーションや係留系からのデータ回収、無人探査機の制御等を目的として研究が行われている³⁻⁵⁾。

「先進的技術の開発」では水中音響を用いたデジタルデータ伝送の実海域実験を行ってきた。実験では、マルチパスやドップラーシフトといった、通信の妨げになると考えられる歪みの影響下での通信について調べた。実験装置は、係留もしくは船上からの吊り下げによって設置し、音波の海底反射によってマルチパスを、船上のウインチで送受波器を移動させることによってドップラーシフトを加えた。送信信号は $20\text{kHz} \pm 4\text{kHz}$ の帯域を使用し、受信は5個のハイドロフォンを用いてマルチチャンネル受信⁶⁾を行った。

本稿では、上記実験に用いたタイマ動作による音響信号送受信機、及び実験方法について説明する。

2. 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。デジタルデータの変調信号をあらかじめノートPCに記録しておき、D/Aコンバータによってアナログ信号とし、パワーアンプを経てトランスデューサにより送信される。受信信号はバンドパスフィルタ、プリアンプを経てA/Dコンバータによってデジタル化し、ノートPCに記録される。受信データは回収後ソフトウェアにより復調及び解析を行った。また、5個のハイドロフォンによってマルチチャンネル受信を行った。送受信機の両方が係留される場合、チェックのため船上からモニタ用のハイドロフォンを吊り下げ、信号を受信した。以下に各装置の詳細を示す。

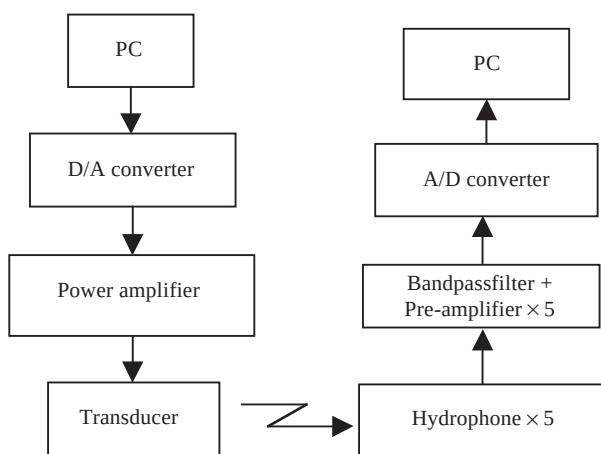


図1 実験装置概要

Fig. 1 General of experimental device

2.1. 送信装置

送信装置ブロック図を図2に、結線図を図3に示す。結線の所々に、分解、組み上げのしやすさを考慮してモレックスコネクタ等を入れている。装置はすべて水中に沈めるため、耐圧容器に格納される。耐圧容器は、制御部用、電源用、パワーアンプ用の3つに分かれており、それぞれ水中コネクタによって結線される。耐圧容器にはそれぞれ以下のものが収納される。

- ・ 制御部用耐圧容器 (図4内部写真)
 - 送信用ノートPC (SONY製VAIO PCG-C1S)
 - D/Aコンバータ (ELMEC製EC-2481)
 - 方位計 (アレック電子製AC-2)
 - 傾斜計 (アレック電子製ACO-200)
 - 方位、傾斜用データログ (白山工業製 DATAMARKLS-3300PtV)
- タイマ回路 (湘南製)
- リレー回路
- DC/DCコンバータ ($\pm 15\text{Vout}$)
- DC/DCコンバータ ($+15\text{Vout}$)
- タイマ回路用電源 (リチウム電池2CR5で作製)
- ・ 電源用耐圧容器
 - 制御部用リチウム電池パック (インターニクス製)
 - パワーアンプ用リチウム電池パック (同上)
 - パワーアンプ用オフセット電源 (2CR5で作製)
 - パワーアンプ電源用スイッチ回路 (湘南製)
- ・ パワーアンプ用耐圧容器
 - パワーアンプ (オーディオ用パワーアンプを改造)
- ・ トランスデューサ
 - TOKIN製 (マルチパス、ドップラーシフト実験用)
 - Oceano Instruments製PET292 (ドップラーシフト実験用)

2.1.1. 制御部

- ・ タイマ回路 (図5)

実験において、装置はすべてタイマ回路によって制御される。タイマはタイマスイッチをショートさせることによってスタートし、図6のようなスケジュールで動作する。タイマスタートからの制御開始時間は0~7.5時間の範囲で設定でき (SW202)、装置設置時間等を考慮して適切な時間に変更できる。制御開始から2秒ごと (突入電流に起因する電流不足を避けるため) に、 $+15\text{VDC}$ 電源 (CN201-1)、 $\pm 15\text{V}$ 及び $+5\text{VDC}$ 電源 (CN201-3)、データ送信用ノートPC (VAIO) のスイッチ (CN201-5,6を1秒間ショート) をオンにする。制御開始の3分後から1分ごとに図6 (a) のような、D/Aコンバータへのトリガパルス (CN202-1、制御開始と共に 5V 電圧が立つ) を600回出力し、最後のパルスから3分後に全ての電源を遮断する。トリガが出力されるまでの3分と最後の3分は、PCの起動、及び終了処理のための時間を考慮している。タイマスケジュールはPAL-ICの書き換えにより変更できる。

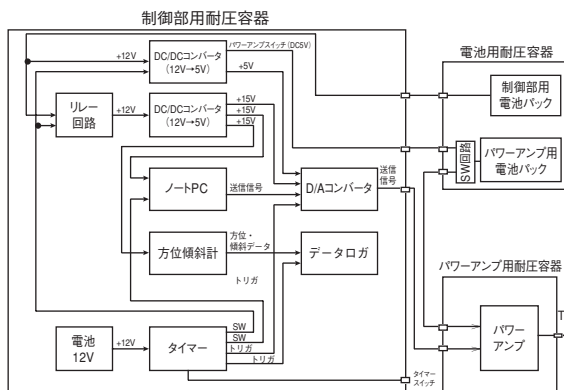


図2 送信装置ブロック図
Fig. 2 Block diagram of transmitter

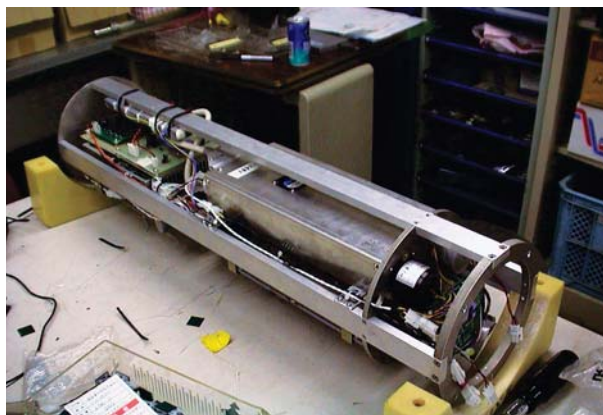


図4 送波装置制御部写真
Fig. 4 Photograph of transmitter controller

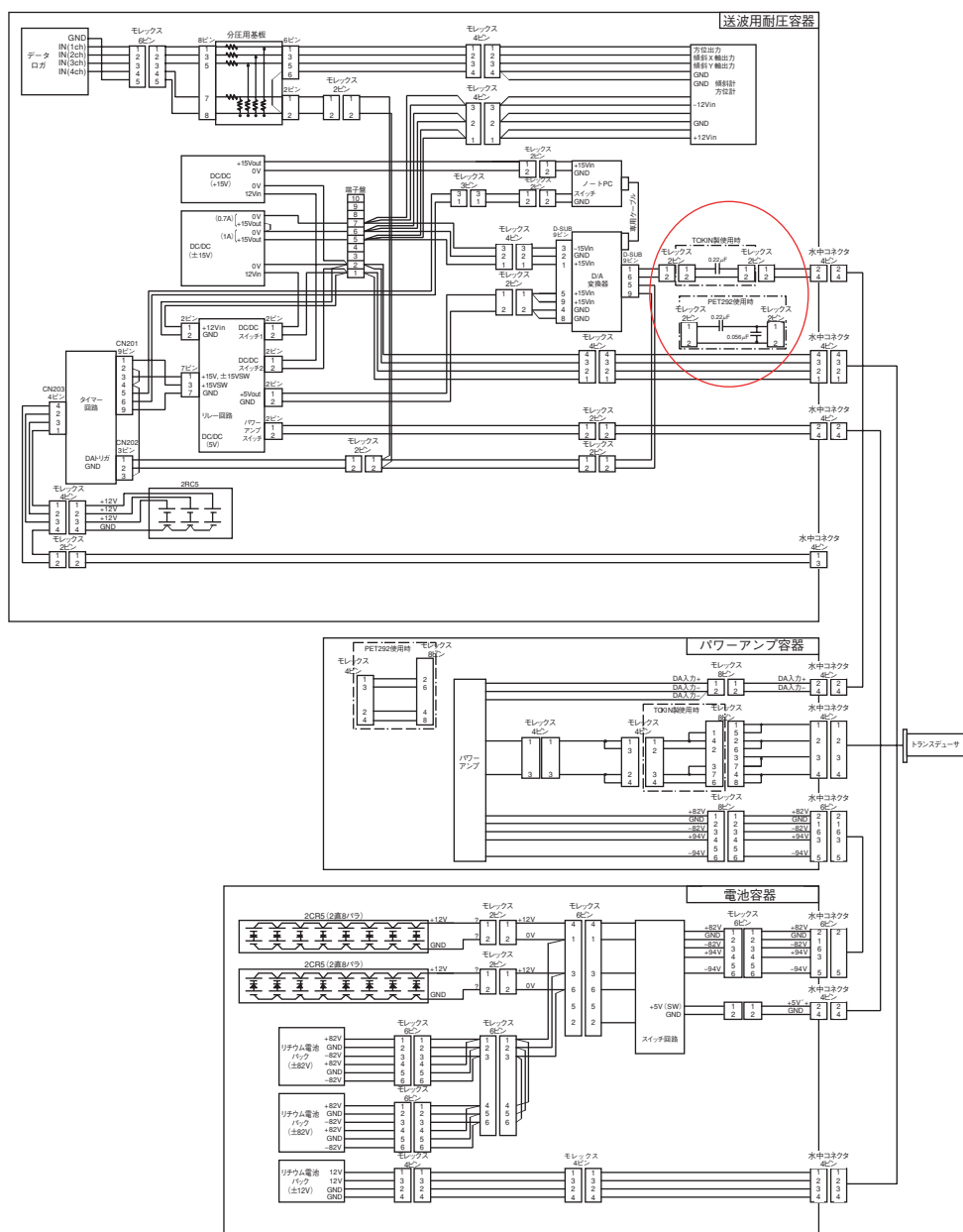


図3 送信装置結線図
Fig. 3 Schematic of transmitter

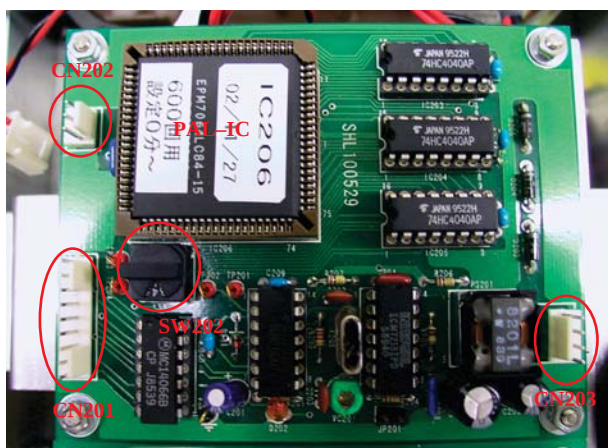


図5 タイマ回路
Fig. 5 Timer circuit

・送信用ノートPC

送信データの記録、及びD/Aコンバータの制御用の小型のノートPCである。タイマからの信号でスイッチを入れるため、スイッチ部に改造を施した。また、動作の安定を確保するため、電源はPC付属のバッテリーを使わず、外部電源(+15V)を用いた。

・D/Aコンバータ

カードバス用のD/Aコンバータで、D/A分解能12bit、測定レンジ $\pm 5V$ 、最大サンプリング速度1MHz、出力チャンネル数1のものである。PCによってサンプリング周波数、データファイル、トリガの入力法(内部、外部)などを設定され、PCから送信データを読み込んで出力する。外部トリガの場合、PCから取り込んだデータを図6(a)のようなトリガパルスに

よって送信を始める。D/Aコンバータは耐圧容器に収まるような筐体を製作して基板のみを収め、電源は外部から $\pm 15V$ 、 $+5V$ を給電している。外部とのインターフェイスは、電源用、信号及びトリガ用、共にD-SUB9ピンコネクタにて製作した。PCとは専用のケーブルにて接続される。

このD/Aコンバータは送信が終わった後 $+5V$ の電圧が出力されたままになってしまうので、コンデンサを直列に挿入しACカップリングとした(図3の楕円で囲んだ部分のTOKIN使用時枠内)。その結果としてコンバータの出力、パワーアンプの出力は図7ようになった。滑らかな波形が出力されており、問題のないことがわかる(コンデンサの容量が小さすぎると波形が歪む)。

・方位計

方位計は北を 0° として東回りに 360° を、リニアに $0 \sim +5V$ の電圧に変換する。方位計はフラックスゲートタイプのものであり、周囲の磁性体の影響を受けて出力が変化するので、装置を全て組み上げ、電源を投入した状態でのキャリブレーションを行った。半径50m以内に何も無いグラウンドにて、装置全体を 30° ごと回転させて測定を行った。方位計のキャリブレーションは各実験ごとに行う必要がある。電源はDC/DCコンバータから $\pm 15V$ を給電している。

・傾斜計

傾斜計は直交する2軸をそれぞれ $\pm 70^\circ$ まで計測し、リニアに $\pm 5V$ 電圧として出力する。方位計出力が $0V$ 時に北向きとなる軸をX軸に合わせて設置した。方位計、傾斜計を合わせて記録しておくことにより、係留系がどの方角に何度傾いているかを知ることができる。電源はDC/DCコンバータから $\pm 15V$ を給電している。

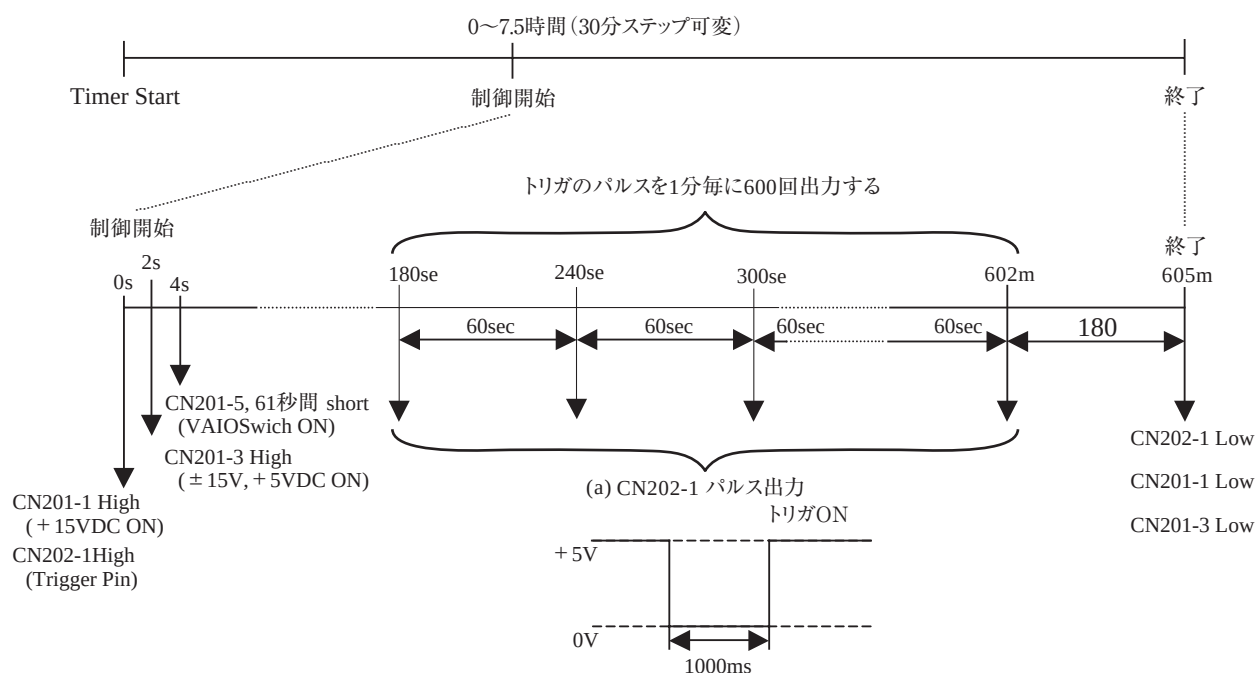
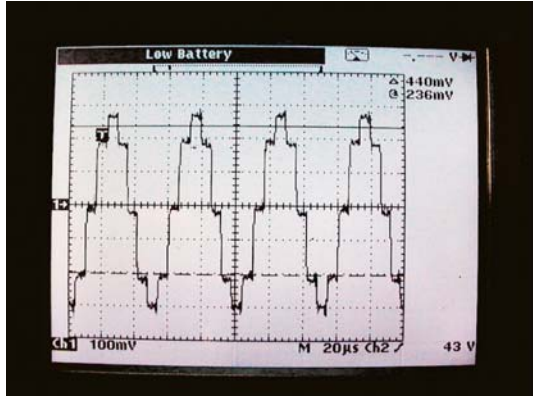
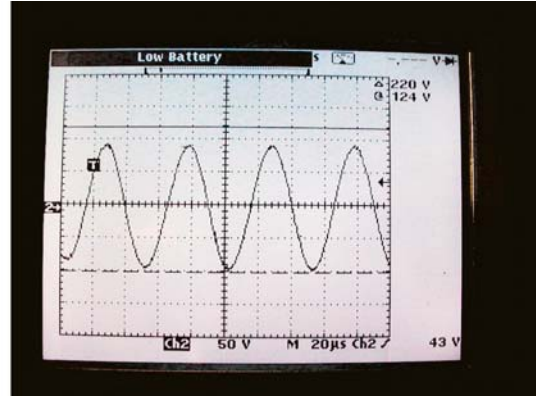


図6 タイマのスケジュール
Fig. 6 Schedule of timer



D/A コンバータ出力



パワーアンプ出力

図7 コンデンサ挿入後の出力波形

Fig. 7 Output signal with condenser inserted

・ データロガ

方位計、傾斜計のデータの記録のため、データロガを用いた。データロガにはタイマ回路からのトリガパルスも記録し、データ伝送のタイミングとの関係が分かるようにした。方位計1チャンネル、傾斜計2チャンネル、トリガ1チャンネルの計4チャンネルを記録した。方位計、傾斜計、及びトリガパルスの入力には $\pm 5V$ であり、データロガの入力は $\pm 2V$ であるため、抵抗を組み合わせる図8のような分圧基板を製作し、 $\pm 5V \rightarrow \pm 2V$ の変換を行って入力した。電源には制御部用のバッテリーは使用せず、製品指定の乾電池を用いた。

・ リレー回路

図9にリレー回路を示す。OMRON製パワーリレーG6D

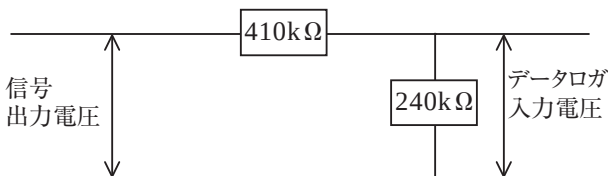


図8 データロガへの入力電圧変換

Fig. 8 Conversion of Voltage inputed to datalogger

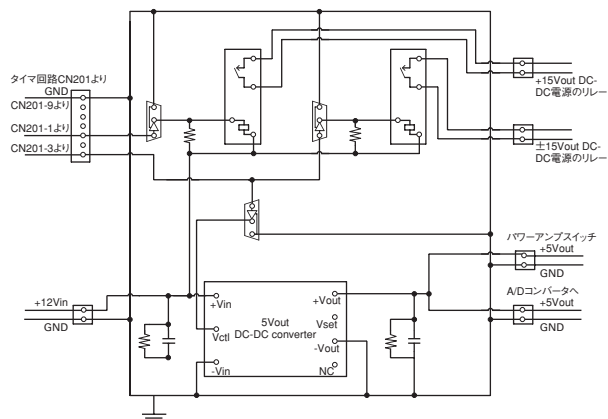


図9 送波装置リレー回路配置図

Fig. 9 Relay circuit for transmitting device

(+5Vの入力によってONとなる)を使用し、電源の制御を行った。また基板には、+5V電源として出力のON, OFFが可能+12V入力、+5V出力のDC/DCコンバータ(TDK製CCN-1205FS)を配置した。リレー回路は、タイマ回路からの信号によって $\pm 15V$ 電源、+15V電源のスイッチの役割を果たす。また、+5V電源はD/Aコンバータの電源であると共に、パワーアンプ用電源のスイッチの役割も兼ねている。

2.1.2. 送信部

・ パワーアンプ

パワーアンプはオーディオ用パワーアンプを耐圧容器に収納できるように組替え、出力インピーダンスを変更できるように改造して用いた。出力インピーダンスは8, 16, 32, 64, 128, 256 Ω に設定することができる。電源は $\pm 70V$, $\pm 82V$ が必要である。アンプゲインは約50dBである。

・ TOKIN製トランスデューサ

内部に6個の圧電素子が配置しており、2素子の対を組み合わせる使用することができる。図10の#1のみ、または#1, #2を並列に接続して使用した場合の送波の周波数特性と20kHzにおける指向特性を図11に示す。マルチパスの実験では#1, 2を、ドップラーシフトの実験では#1のみを使用した。

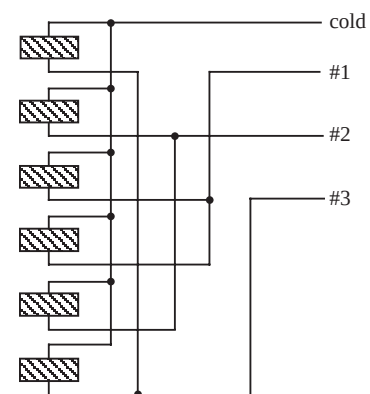


図10 TOKIN製トランスデューサの素子配置

Fig.10 Element array of TOKIN transducer

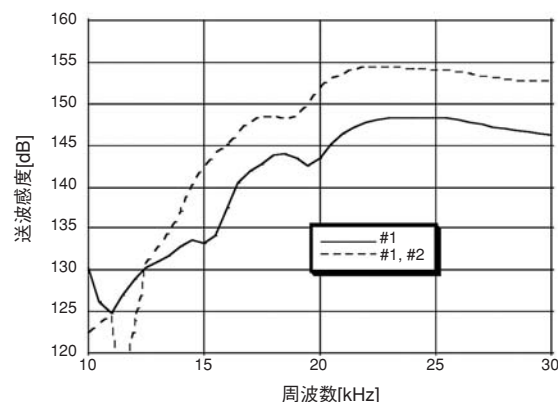
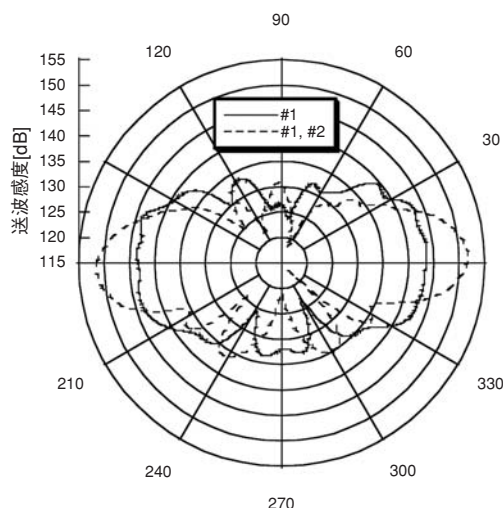


図11 TOKIN製トランスデューサの送波特性
Fig.11 Transmitting characteristics of the TOKIN transducer

・ PET292

送波の周波数特性と、20kHzにおける指向特性を図12に示す。PET292は静電容量が小さく(478pF)、160kHzのサンプリングでは波形が歪んでしまう。そこで、サンプリング間の段差による高周波成分をカットするため、図3の楕円で囲んだ部分のPET292使用時の枠内に描かれたように、並列にコンデンサを挿入した。その結果、図13のように歪んだ波形が補償されていることがわかる。

2.1.3. 電源

タイマ回路の電源には+6Vのカメラ用リチウム電池2CR5を組み電池として使用し、2直列3並列で入力される(CN203)。

タイマ回路以外の制御機器の電源、及びパワーアンプ用の電源にはインターニクス製のリチウム電池パックを用いた。電池パックはウイルソン・グレートバッチ製リチウム電池3B36(定格3.4V)を組み上げて作製された。制御部用+13.6V電池パックは図14(a)のように3B36を4直列4並列で組まれている。パワーアンプ用電池パックは図14(b)のように3B36を21直列+21直列で組まれ、±71.4V電源として用いた。また、パワーアンプ用の電源として、±83.4Vも必要であるので、2CR5を2直列8並列(もしくは5並列)にしたものを±71.4V電池パックの+側、-側にそれぞれ上乘せて用いた。

パワーアンプ用電池パックの出力部にはスイッチ回路を設けており、外部から+5Vを入力することでONとなる。これは、制御部のリレー回路に設置した+5VDC/DCコンバータより給電される。

2.2. 受信装置

受信装置ブロック図を図15に、結線図を図16に示す。受信装置は1つの耐圧容器に全て収められ、以下のものが収納される。

受信用ノートPC (SONY製VAIO PCG-C1S)

A/Dコンバータ (ELMEC製EC-2380)

方位計 (アレック電子製AC-2)

傾斜計 (アレック電子製ACO-200)

方位、傾斜用データロガ

(白山工業製 DATAMARKLS-3300PtV)

タイマ回路 (湘南製)

プリアンプ、フィルタ回路 (湘南製)

リレー回路 (図17)

DC/DCコンバータ (+12V→±15V)

タイマ回路用電源 (2CR5で作製)

+12Vリチウム電池パック (インターニクス製)

ハイドロフォン (ITC製ITC1032)

・ A/Dコンバータ

カードバス用のA/Dコンバータで、A/D分解能12bit、測定レンジ±5V、最大サンプリング速度1MHz、入力チャンネル数8のものである。PCによってサンプリング周波数、取得データの長さ、チャンネル数、トリガの入力法(内部、外部)などを設定する。外部トリガの場合、図6(a)のようなトリガパルスによってデータの記録を始め、指定した長さのデータを取り終えた後PCに記録する。D/Aコンバータと同様に、耐圧容器に収まるような筐体を製作した。外部とのインターフェイスは、電源用はD-SUB9ピン、信号及びトリガ用はD-SUB13ピンを用いた。PCとは専用のケーブルにて接続される。電源は±15V及び+5VをDC/DCコンバータから給電する。

本実験で用いたD/A、A/Dコンバータの間には160kHzのサンプリング周波数に対し、相対的に約4Hzの周波数ずれが存在した。これは、ドップラーシフトなどと比較し、周波数ずれとしては小さいが、送受信装置を両方とも係留する場合など、伝送路での周波数ずれが支配的でない場合には留意しなければならない。

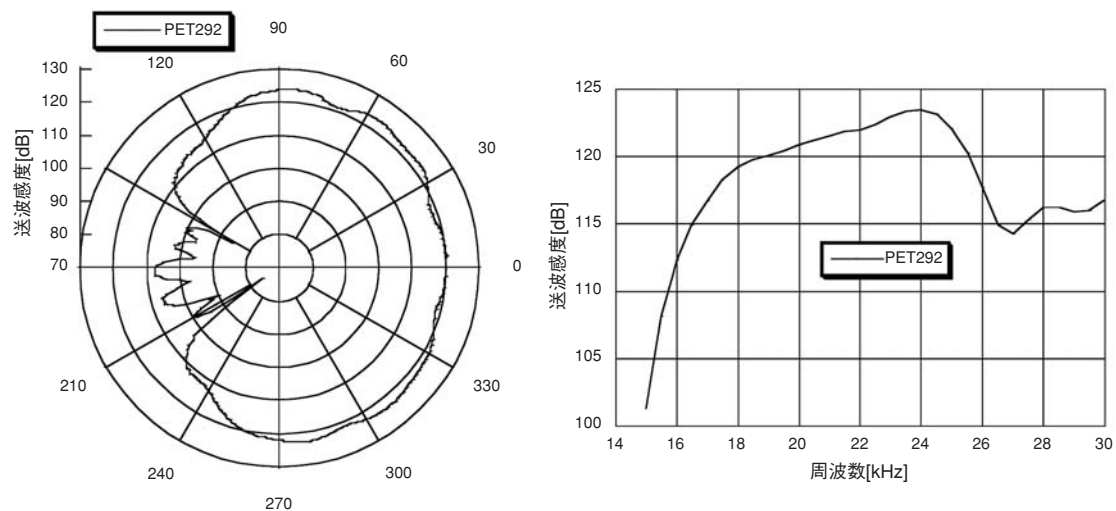
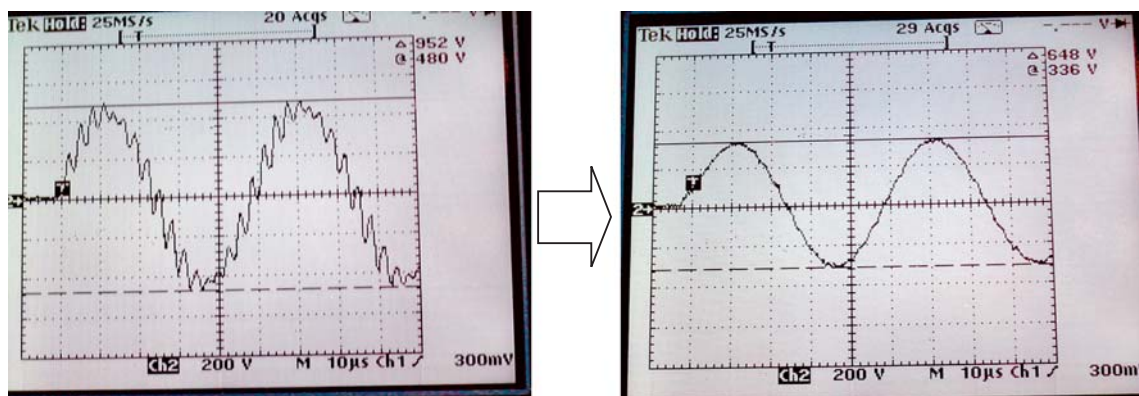


図12 PET292の送波特性
Fig.12 Transmitting characteristics of PET292



コンデンサ挿入前のパワーアンプ出力 コンデンサ挿入後のパワーアンプ出力

図13 コンデンサ挿入によるパワーアンプ出力の変化
Fig.13 Change of power amp. output with insertion of condenser

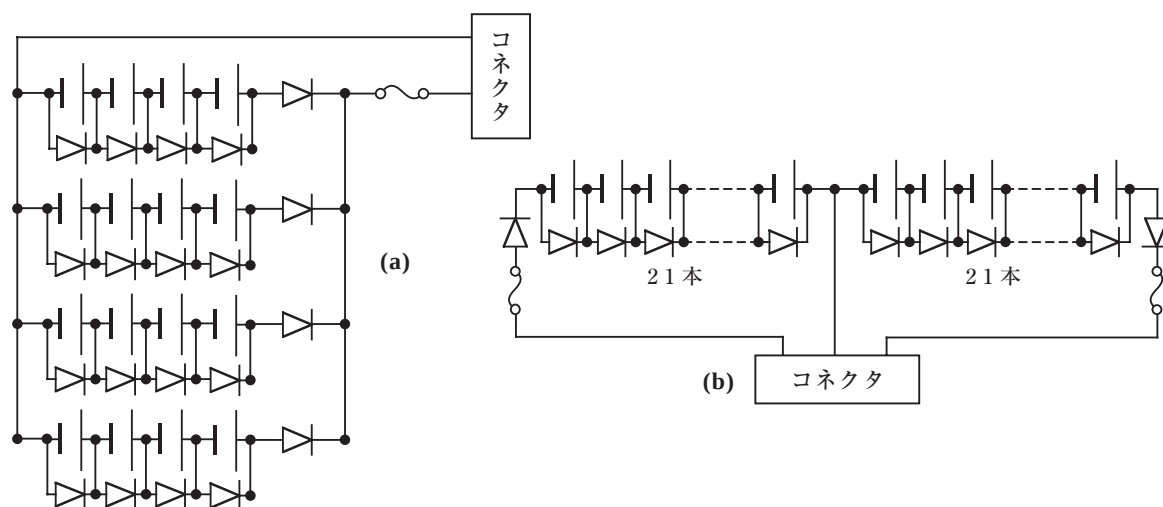


図14 リチウム電池パック
Fig.14 Lithium battery packs

図15 受信装置ブロック図

Fig.15 Block diagram of receiving device

図17 受信装置リレー回路配置図

Fig.17 Relay circuit for receiving device

図16 受信装置結線図

Fig.16 Schematic of receiving device

・プリアンプ、フィルタ基板(図18)

プリアンプとフィルタは同じ基板上に配置し、チャンネルごとに1枚の基板を配した。アンプゲインはジャンプスイッチ(JP103)により20~80dBを10dBごとに設定できる。フィルタはハイパスフィルタとローパスフィルタをカスケード接続した。ハイパスのカットオフ周波数は15kHzで固定、ローパスのカットオフ周波数はロータリスイッチ(WS101)により設定可能である。±15Vの電源をDC/DCコンバータより給電する。

・ ハイドロフォン

無指向性のハイドロフォン、ITC製ITC1032を5個用意し、フレームに20kHzの10波長間隔(75cm)で並べて(図19)受信を行った。ITC1032の受信の周波数特性を図20に示す。

・電源

送信装置では+15V, ± 15 VDC/DCコンバータをそれぞれ

図18 プリアンプ、フィルタ回路

Fig.18 Pre-amp. and filter cercuit

用意したが、受信装置においては耐圧容器のスペースの問題上、 $\pm 15\text{VDC/DC}$ コンバータのみを使用し、ノートPCなど $+15\text{V}$ の電源が必要な場合もこのコンバータの $+15\text{V}$ 電源を用いた。

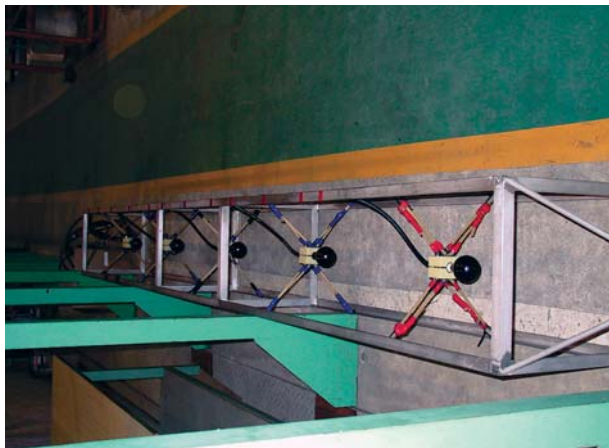


図19 フレームに取り付けたハイドロフォン
Fig.19 Hydrophones set up in a frame

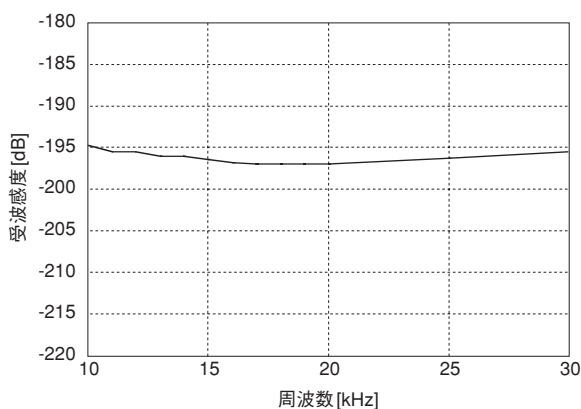


図20 ITC1032の受波感度の周波数特性
Fig.20 Frequency characteristics of Rx sensitivity of ITC1032

2.3. モニタ装置

モニタ装置ブロック図を図21に、耐圧容器内結線図を図22に示す。モニタ用耐圧容器、及びトランスデューサは船上から4000mアーマードケーブルウインチによって吊り下げた。モニタ用受波器にはTOKIN製トランスデューサを用いた。モニタ用耐圧容器内には、プリアンプ基板とプリアンプ用電源が収納されている。アンプゲインは10~70dBを10dBごとに設定できる。基板は受信装置で用いたプリアンプ・フィルタ基板と同じもので、プリアンプ回路のみを実装した。プリアンプの出力はアーマードケーブルによって船上の計測コンテナに送られ、フィルタ、プリアンプを経てオシロスコープによって観察され、またA/DコンバータによってPCに記録される。

2.4. 係留系

係留系略図を図23に示す。図23(a)は送信装置側、(b)は受信装置側の係留系である。両者共に送受信器の直上にトランスポンダを備え、送受信器の深度を測定できる。図23のような構成で、投入時、もしくは切り離し後浮上時に110kgf~130kgfの重力、もしくは浮力が働くようになっており、1000m沈む(浮く)のにかかる時間はおおよそ12、3分である。下降、及び浮上速度は約1.3m/s、簡易的なシミュレーションによる着底時のオーバーシュートの距離は約0.3mと計算された。

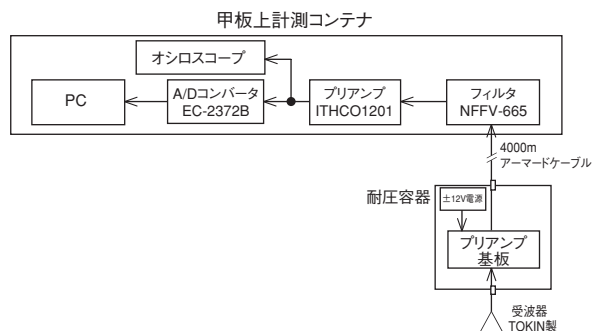


図21 モニタ装置ブロック図
Fig.21 Block diagram of monitoring device

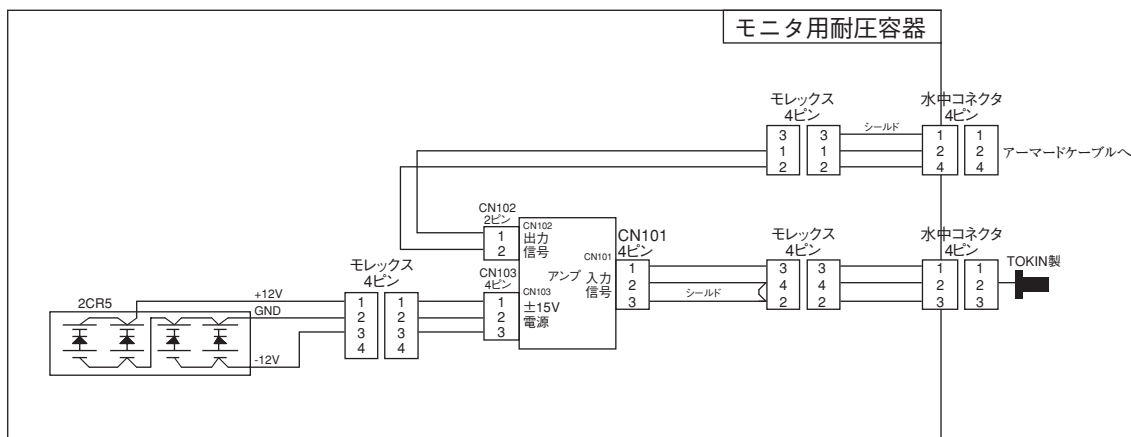


図22 モニタ装置結線図
Fig.22 Schematic of monitoring device

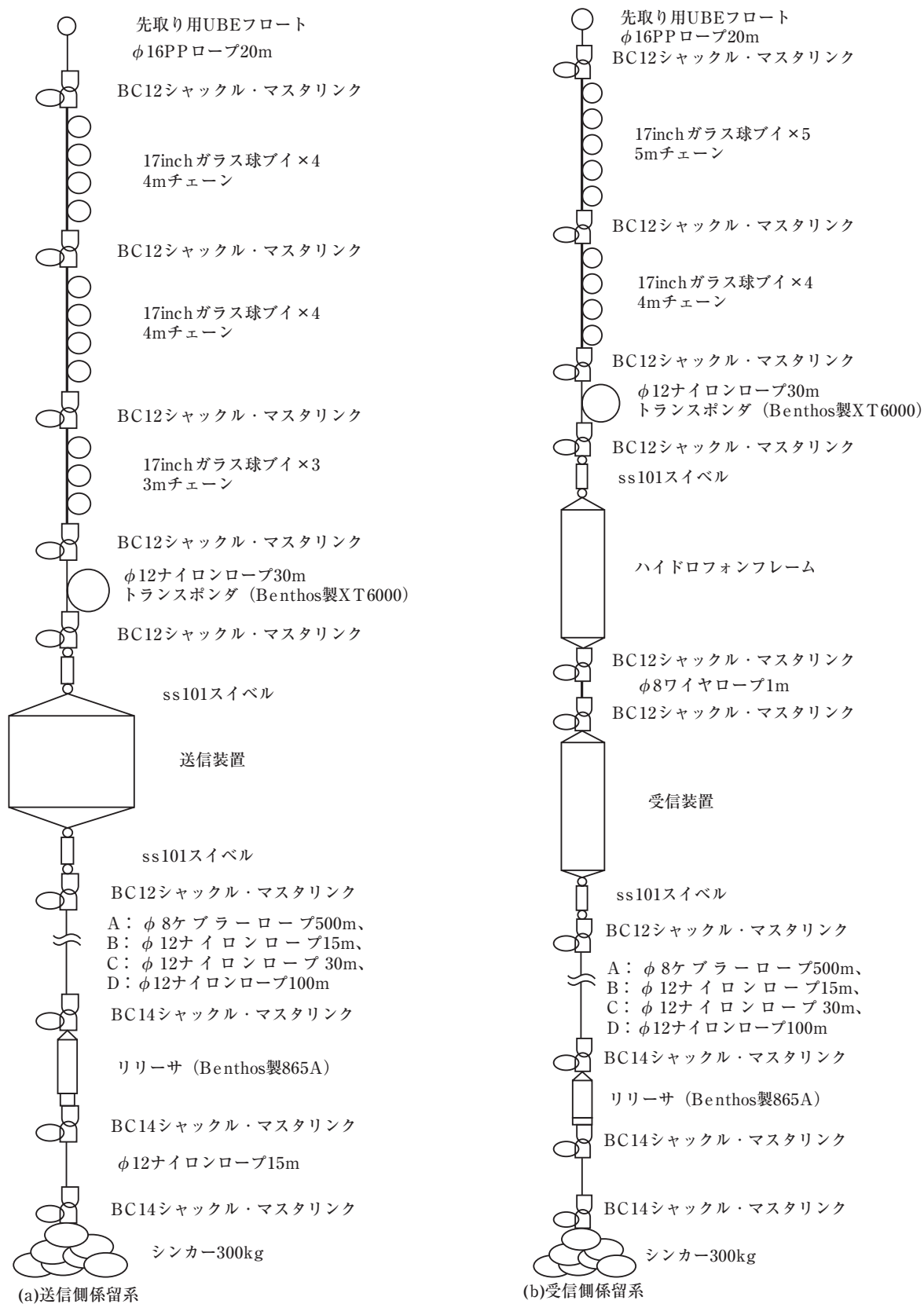


図23 係留系
Fig.23 Mooring systems

3. 実験方法

平成14年度の実海域実験KY03-02で行ったマルチパス、ドップラーシフトをそれぞれ加える実験の概要を説明する。

3.1. マルチパスを加える実験

実験概要図を図24に示す。海底反射を利用して受信信号にマルチパスを加えた。送受波器の距離と高度の設定によって、直接波と反射波の受波器への到達時間差を調節した。

パターン(a)の場合には、船上から吊り下げたモニタによっても送信信号を受信した。モニタは、送信装置から、受信装置と反対方向に同じ距離の位置に設置した。パターン

(a)で用いた各機器の設定を表1に示す。送受波器間距離は特に受信信号のSNRが20dB前後となるように計算して設定した。これはシミュレーション等によって20dB前後が、十分に低い誤り率で復調できる境目であることを確認したからである。送信信号には様々な変調方式による信号を用意した。また、推定した周囲雑音と電気雑音から、受信信号のSNRが25, 20, 15dBとなるように信号レベルを算出し、各信号に対し3パターンのレベルの信号を用意してこれを送信した。

パターン(b)は、航海の途中でのアクシデントのため前章で紹介したD/Aコンバータが使用不能になったため行った方法である。送信部のブロック図を図25に示す。船上の

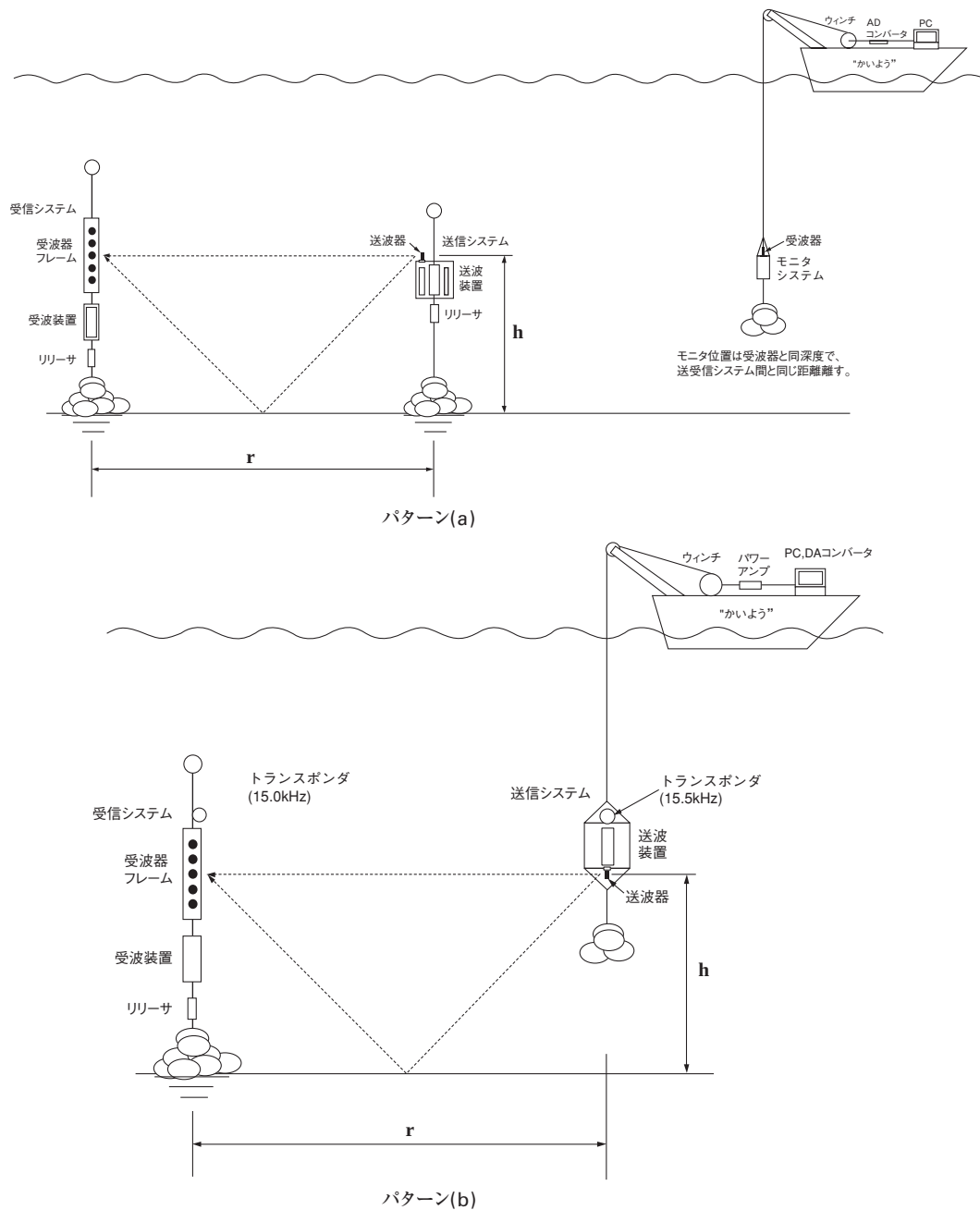


図24 マルチパスを加える実験
Fig.24 Experimental method under the condition with multipath

表1 マルチパスを加える実験(a)の際の機器の設定

Table 1 Setting of devices in experiments (a) with multipath

	項目	値
送波系	パワーアンプゲイン	51.6dB
	パワーアンプインピーダンス	128Ω
受波系	プリアンプゲイン	60dB
	フィルタ	HPF:15kHz,LPF:24kHz
モニタ系	A/Dサンプリング周波数	160kHz
	容器内プリアンプゲイン	40dB
	船上プリアンプゲイン	10倍 (20dB)
	船上フィルタ	HPF:14kHz,LPF:26kHz
	A/Dサンプリング周波数	200kHz

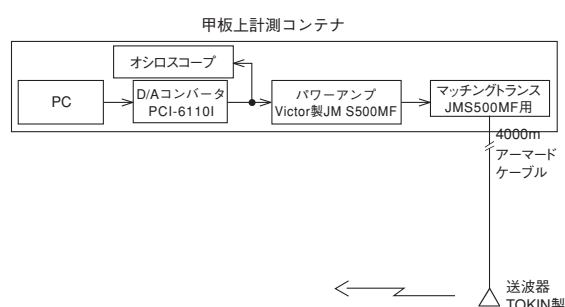


図25 パターン(b) 送波装置ブロック図

Fig.25 Block diagram of transmitting device of pattern (b)

表2 マルチパスを加える実験(b)の際の機器の設定

Table 2 Setting of devices in experiments (b) with multipath

	項目	値
送波系	パワーアンプゲイン	41.5dB
	パワーアンプインピーダンス	100Ω
受波系	プリアンプゲイン	70dB
	フィルタ	HPF:15kHz,LPF:24kHz
	サンプリング周波数	160kHz

PCから、D/Aコンバータ(National Instruments製PCI-6110E)により出力し、パワーアンプ(Victor製JMS500MF、マッチングトランスとセットで使用)、アーマードケーブルを経て、TOKIN製トランスデューサにより送波される。この方法での実験の場合の機器の設定を表2に示す。この方法では、送受信装置ともに係留されている場合とは異なり、船の移動や動揺によるドップラーシフトが混入するので、データ解析の際には留意しなければならない。

3.2. ドップラーシフトを加える実験

図26に実験概要図を示す。受波系はマルチパスの実験の場合と同じく係留されるが、海底反射を避けるため、受波器高度は500mとした。本来は、海面反射を避けるため、指向特性を考慮してPET292を使用する予定であったが、前述のとりのアクシデントのため、TOKIN製トランス

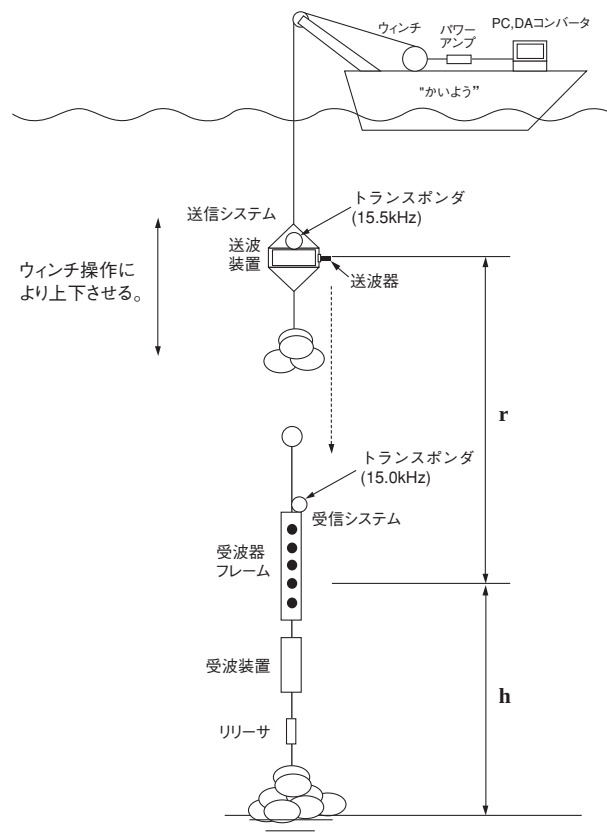


図26 ドップラーシフトを加える実験

Fig.26 Experimental method under the condition with Doppler shift

表3 ドップラーシフトを加える実験の際の機器の設定

Table 3 Setting of devices in experiments with Doppler shift

	項目	値
送波系	パワーアンプゲイン	41.5dB
	パワーアンプインピーダンス	100Ω
受波系	プリアンプゲイン	50dB
	フィルタ	HPF:15kHz,LPF:24kHz
	サンプリング周波数	160kHz
ウィンチ	上下速度	0.25m/s~1.0m/s
	移動周期	巻上→停止→巻出→停止を30秒毎に繰返し

デューサを用いた。図23のセットでPET292の送波試験を行った結果、アーマードケーブルを介してパワーアンプ出力を送ると、送波レベルの低下と波形の歪みが著しかったためである。TOKIN製トランスデューサでは指向角を広くとるため、図10の#1のみを用いて送波を行った。各機器の設定を表3に示す。ドップラーシフトは、送波系を吊り下げた4000mアーマードウインチを30秒ごとに、巻上げ→停止→巻き出し→停止、を繰り返す、速度は0.25m/s~1.0m/sとして実験を行った。

4. まとめ

本稿では、 $20\text{kHz} \pm 4\text{kHz}$ 帯域の水中音響データ伝送の実海域試験装置、および実験方法について述べた。今後はさらに高い周波数帯域での高速データ伝送や、移動通信の分野で研究されている最新の変復調技術を応用したデータ伝送など、バリエーションに富んだ研究を行っていく予定である。高い周波数帯域を使用する場合には、周囲の影響を受けやすくなること等、実験ごとに適切な装置、あるいは方法を考案していく必要がある。

参考文献

- 1) M. Stojanovic, "Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustics Communications," IEEE J. Oceanic Eng., 21(2), 125-136 (1996).
- 2) Daniel B. Kilfoyle and B. Baggeroer, "The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry," IEEE J. Oceanic Eng., 25(1), 4-27 (2000).
- 3) Hiroshi Ochi, Takuya Shimura, et al., "Experiments for Acoustic Digital Data Communication Using Frequency Shift Keying Modulation," Jpn. J. Appl. Phys., 39(5B), 3184-3187 (2000).
- 4) 越智寛, 網谷泰孝 他, "FSK変調による音響デジタルデータ伝送装置について", 海洋音響学会講演論集, (平成11年6月), 49-52.
- 5) Toshiaki Nakamura, Takuya Shimura, et al., "Acoustic Systems of the AUV 'URASHIMA'," ISOPE-2001, Stavanger, Norway, 674-678 (2001).
- 6) Hong K. Yeo, Bayan S. et al., "Performances of Multi-Element Multi-User Detection Strategies in a Shallow-Water Acoustic Network (SWAN)," IEEE J. Oceanic Eng., 26(4), 604-611 (2001).

(原稿受理：2003年8月7日)