

デジタル海底地震計の開発と海底地震観測

筒井智樹*¹ 安藤雅孝*² 金嶋 聡*² 大滝壽樹*²

「しんかい2000」を用いて、海底に設置するデジタル地震計を開発した。センサーの固有周期は1秒で、上下動1成分、水平動2成分からなる。地動の振幅があるレベル以上に達すると、PROMに収録される。1個の地震の記録時間は250秒で、全部で50個のイベントが、全メモリー4メガ・バイトのPROMに収録できる。これらのセンサー、回路、メモリー等は、17インチ耐圧ガラス球内に納められ、さらにガラス球はプラスチックのハードカバーで覆われ、音響呼び出し装置等と共に、金属製パイプの架台に組み立てられる。地震計内の時計の時刻、観測開始時間、トリガーレベル等は、外部コンピューターからRS-232Cケーブルを介し設定できる。さらに、PROMに記録されたイベントやそのリストも外部コンピューターから読みだせる。ただし、地震計を「しんかい2000」で設置する試みは、トランスポンダーの不調のため実施できなかった。

The Development of a Digital Ocean Bottom Seismograph

Toshiki TSUTSUI*³, Masataka ANDO*⁴, Satoshi KANESHIMA*⁴
and Toshiki OHTAKI*⁴

A digital ocean-bottom seismograph has been developed, which was designed to be installed on ocean-bottom hard rock by using the submarine research ship "SHINKAI 2000". The sensor consists of 1 vertical and 2 horizontal components with a natural pendulum period of 1 s. Ground motions are recorded on PROM memory when their amplitudes exceed over a pre-set level. A triggered event is recorded for a period of 250 s and thus the total of 51 events can be stored on the PROM memory of 4 mega bytes. The sensor, amplifier, memories and so on are all put in a 17" glass pressure-vessel. The glass sphere, covered with a hard plastic container, transponder, weight and others are all assembled with a leg-frame. All parameters such as starting time of measurement, trigger component(s), triggering level, and so on are set with commands by an external portable type computer before closing the vessel. The OBS was set in the Okinawa trough for 5 days in September 1988, and recorded 11 seismic events and back-ground noises during the observation.

*¹ 京都大学 理学部*² 京都大学防災研究所*³ Faculty of Science, Kyoto University*⁴ Disaster Prevention Research Institute Kyoto University

1. はじめに

地震計は地球の中を見る“眼”である。どんな“眼”を持つかで見える地球の様子も変わる。細かいものがよく見えるもの、おおまかな全体の姿が見えるもの、などいろいろある。大事なことは、見たいものが見える“眼”を持つことである。この研究では、性能の良い“眼”を海の中でも持とうとする試みが行われている。

近年、陸上で使われる地震計はかなり高性能になってきた。海底にも、陸上と同じような高性能地震計を置きたいと考えられるが、困難なことが多い。地震計を海水につけても高い圧力下に置いても良いように、耐圧にしなければならない。さらに、電源を外から供給ができないし記録も取り替えられないから、長期間持つ電池と記録器を作る必要がある。地震計の調整は自動的にされねばならない。なによりも、観測が終わったら自分で浮き上がってこなくてはならない。このように、陸上観測では経験しない多くの困難がある。しかし、このような困難を乗り越えてでも、海での観測を行う必要がある。地球の2/3は

海に覆われているため、陸上の観測だけから「地球内部」や「地震」の姿を求めるには限界がある。靴の裏から足を搔くように、知りたいところがはっきりと見えない。海での観測が加われば、今までぼんやりしていたものも、はっきり見えてくるはずである。したがって、海底地震計の開発は、地球を研究するための重要な課題といえる。

地球の内部構造、地震の破壊過程などは、走時や波形のデータを用いて調べられる。走時とは、地震波がどれだけの時間をかけて伝わったかを表すものである。ところが、これらの走時や波形データの質は、記録を捉えた地震計の性質（周期特性）、その地震計がどんな地盤に置かれていたか（地盤特性）などに大きく左右される。特に、波形はこれらの特性に敏感である。良い観測条件のもとで記録を取らなければ良い研究は行えない。地震計の置いた地盤が悪く、地震の波形が大きく変えられることがよくある。厚い柔らかい層の上に地震計を置くと波形は変質されやすい。その例を図1に示そう。大阪の北で起きた小地震の波形

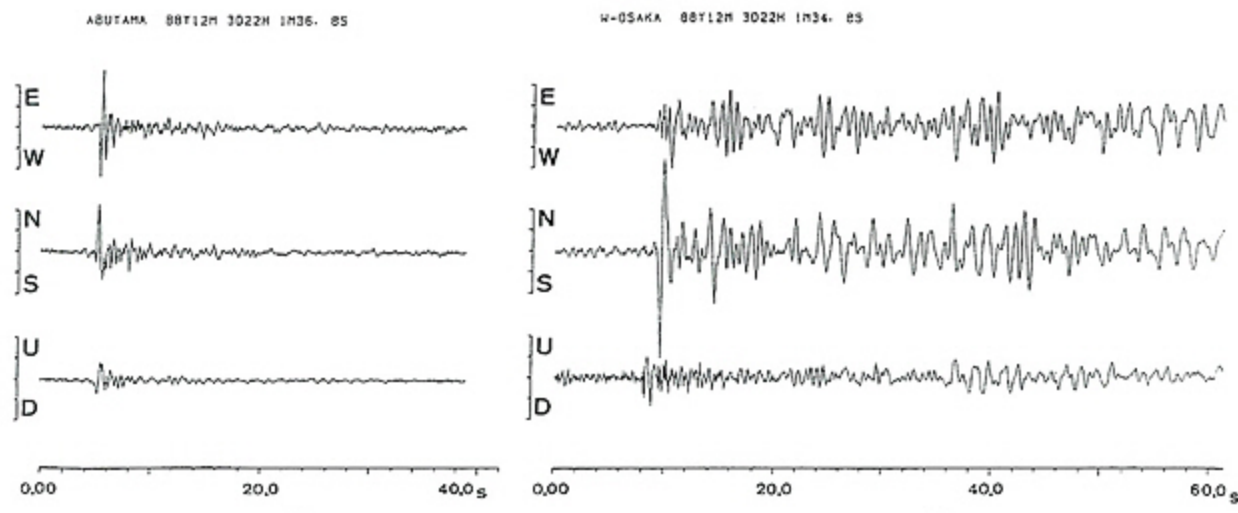


図1 地震波形の比較。地震は大阪の北部で起きたもので、マグニチュードは4.5。a) 京都大学理学部阿武山地震観測所で記録された波形。地震計は古生層の岩盤の上に置かれている。b) 大阪平野の堆積層（厚さ1～2km）の上で記録された波形。縦横軸のスケールはa), b) 共に変わらないが、記録された波形は大きく異なる。

Fig. 1 Comparison of waveforms recorded at two sites lying on different geological conditions : a) Paleozoic hard rock (Abuyama Seismological Observatory, Kyoto University), and b) Quaternary sediments with a thickness of 1–2 km.

記録である。図の上側の波形(a)は、大阪の北部の堅い古生層の岩盤上で記録されたもので、下図の波形(b)は、堆積層に厚く覆われた大阪平野で記録されたものである（記録は京大防災研岩田知孝氏による）。二つの波形の違いは明瞭である。堅い地層で記録された波形は、おもな振動は5秒以内に終わり単純である。一方、厚い堆積層で記録された波形は、50秒を越えてもまだ振動が続いている。前者の波形には、震源から放出された波がそのまま残されているが、後者には、かなり変形された波が記録されている。たぶん地震波が大阪平野に入り、何回も反射や屈折を繰り返して新しい波が作られ、震源から出た波に重なっているためだろう。地震計を置く場所に注意を払う理由がここにある。

一般に、海底地震計を設置するときには、まず音波探査で堆積層に覆われた平坦な海底を捜し、その上に地震計を投げ下ろす方法が取られる。この方式には、地震計が急な斜面を転がり落ちる心配はないものの、柔らかい堆積層の上で観測せざるをえない大きな欠点がある。記録された波形は、柔らかい堆積層の影響を受け、元の波形とは異なる。しかし、地震計を船から投げ下ろし岩盤の上に正確に置く技術は今のところ無いから、この方法を取らざるをえない。そこで我々は新しい方法を考えた。潜水船「しんかい2000」を用い、海底岩盤に地震計を直接設置する方法を始めた（筒井ほか、1988）。この報告では、1988年9月沖縄トラフの海底に設置された海底地震計の概要と、その際に得られた記録について述べる。

2. 海底地震計の概要

2.1 海底地震計の概要

OVERVIEW OF KYOTO UNIVERSITY OBS SYSTEM

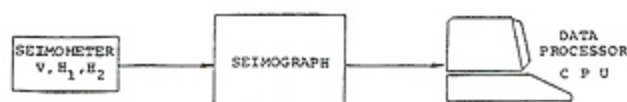


図2 京大型海底地震計システムの概念図

Fig. 2 Overview of the Kyoto University Ocean Bottom Seismograph II System

図2に海底地震計のシステムの概念図が示されている。海底地震計は増幅器、CPU、記録器、耐圧ケース、音響呼び出し装置などからなる。海底に設置された後、3成分センサー（上下動1成分、水平動2成分）により捉えた地震は増幅・処理され、振幅が設定したレベルを越えると、PROMに収録される。海底地震計は自己浮上により回収され、記録データは外部のCPUへ転送し解析に供される。表1に海底地震計の性

表1. 海底地震計の概要

本 体	
空中重量	100 kg
水中重量	30 kg
高 さ	100 cm
直 径	70 cm
センサー	
固有周期	1 sec
重 量	10 kg
記 録 器	
記録媒体	UUEPROM素子合計4 Mバイト
ダイナミックレンジ	12 bit
レコード長	270 sec
サンプリング周波数	50 Hz
レコード個数	51 個

能がまとめられており、海底地震計の全景は写真1に示されている。

2.2 地震計の設置

海底地震計の投入は、潜水船「しんかい2000」の母船「なつしま」から行われる。地震計が海底に着地したことを確認し、その位置を求めた後、潜水船は潜航を開始する。「しんかい2000」は、母船からの指示で地震計へ近づきつつ降下する。海底に降りてからは、地震計に取り付けたフラッシュの閃光を頼りに探す。フラッシュの閃光は50m先まで届くので、地震計の近くまで到達すれば探査は容易と思われる。潜水船は地震計に到達した後、コンピュータで回収し、地震計を持ったまま設置点を探し航走する。適当な岩盤を見つけたら、そこに地震計を置く。このとき地震計の架台の傾斜は15°以内にしなければならない。15°を越えるとセンサーの姿勢制御ができなくなるからである。潜水船は、設置した地震計の方位

を確認した後、架台を岩盤に固定する。固定方法は簡単なもので、架台に取り付けたモルタル入りのゴム袋（写真1、アルミホイルでおおっており銀色のもの）をマニピュレータで突き破り、中からモルタルを出し架台の周りに流し込み、地震計を岩盤に固定させるものである。これらの作業が終了したら、潜水船は海底地震計から離れる。

2.3 センサーの姿勢制御

センサーは水平に置かれなければならない。センサーは傾斜すると固有周期や感度の周波数特性を大きく変える。許容範囲を越えて傾斜した場合、記録された地動は使用できない。ちなみに、今回用いたセンサーの傾斜の許容範囲は 2° で、ほぼ水平に近い。この研究では、センサーの姿勢制御の方法をいくつか試みた。結局センサーの重量が10kgとかなり重いことから、以下の方法が採用された。まず、耐圧ガラス球の上に載せてあるセンサーを内部のモーターで中空に吊り上げ、鉛直を取った後、再び耐圧球の上に降ろす、という方法である（図3）。センサーは、モーターにより

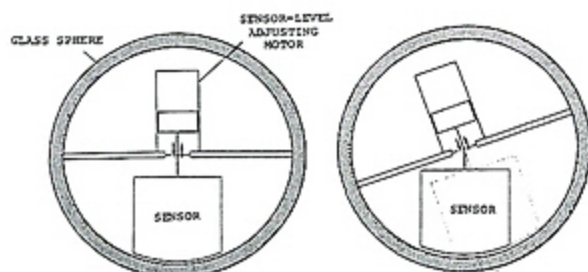


図3 耐圧球内部のセンサーの姿勢制御の方法。

Fig. 3 Method of adjusting the sensor-level: lifting up the sensor with the motor, taking its level, and then lowering it again on the glass-sphere surface.

巻き上げられ宙吊りにされ、50分間吊り下げられた後、耐圧ケースの上に降ろされる。この吊り上げ方式でセンサーの水平を取るには、以下の3点が満足されねばならない。

- ① モーターから吊るされたワイヤーがセンサーにつながる点は、センサーの上下動成分に平行で、かつセンサー全体の重心を通る線

上にある。

- ② モーターとワイヤーを結ぶ点は、耐圧球の中心にある。
- ③ センサーの底面は、耐圧球の内面と同じ曲率を持つ球面からなる。

上記の条件が整えば、センサーは回転せず、水平に、かつ耐圧球に密着して置かれる。地動の観測は、センサーの姿勢制御が終わって10分後に始められる。姿勢制御の開始時間は、地震計投入前に外部のパソコンから設定する。

2.4 パラメーターの設定

外部のパソコンからRS-232Cを介して、時刻、トリガーレベルなどのパラメータを設定する。さらに動作試験のための記録モニターや、メモリーからの記録の読み取りなども、外部パソコンを用いて行う。今回は、NEC-PC98LTを外部パソコンとして使用した。

2.5 トリガーレベル

内部のCPUは、常に地動の20秒間の平均値と40秒間平均値の比を求めており、この比が設定された値を超えると、PROMメモリーへの記録を開始する。トリガーレベルは、上下動成分だけを用いる場合と、上下動と水平動の両方の成分を用いる場合がある。どちらを用いるかはパラメータ設定時に決める。記録可能な全メモリーは4Mバイトと限られているため、ノイズでトリガーがかからないように、この方法を採用した。現在は、平均をとる時間間隔もパラメータで外部から与えられる。

2.6 記録方式

あらかじめ設定したレベル以上の振動を捉えると、その波形は内蔵するPROMメモリー（4メガ・バイト）に記録される。地動ノイズレベルの調査のため、記録が一つもなかった日に限り、翌日の0時に1レコード長分の地動が収録される。また、1時間毎の温度・傾斜データを記録することも可能である。温度センサーの記録は、内部時計の補正のために用いられる。時計に使われている水晶発振子の振動数と温度の関係が求められているので、温度記録から時計の時刻補正ができる。

3. ソフトウェア

ここで用いられるプログラムはすべて MS-DOS 上で書かれている。海底地震計のソフトには、開封モード (OPEN MODE) と封印モード (CLOSED MODE) の二つがある。①開封モードとは、耐圧ガラスを開けた状態を考えれば良く、海底地震計と外部コンピュータ (PC98LT) を RS-232C 通信ケーブルで接続し通信が可能である (図4)。各種のコマンドにより、海底地震計の動作設定、自己診断、記録データの読みだ

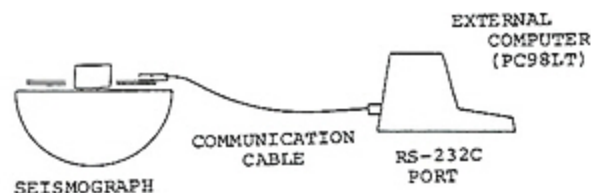


図4 開封モード。地震計と外部パソコンはRS-232Cケーブルでつながれている。

Fig. 4 The open mode: the seismograph connected with an external computer through a RS-232C cable.

しなどが行なえる。②封印モードとは、通信ケーブルが外され、耐圧ケースが閉じられた状態を考えればよく、地動の測定が可能である。これらのモードの切りかえは、外部パソコンとの接続の有無を地震計システムが判断し、自動的に行われる。以下に、図1の番号にしたがいソフトの説明をする。

3.1 開封モード (図5)

①オペレータが電源を入ると、②各デバイスの初期設定と、③PROMメモリーチェックが行われる。すでに記録データがPROMメモリー上にある時は、操作パネルのERASE-NGランプが点滅する。このとき、PROMメモリー基板16枚の内、どの基板にデータが残されているかは、外部コンピュータのディスプレイ上に表示される。記録データが残っている場合は計測されないで、オペレータは記録データの残っている基板を抜取り、EPROM素子の内容の消去を行い、再び①に戻る。④ここで封印モードになっていない場合には、開封モードになるまでモード指示ランプを点

滅させ、オペレーターに外部コンピュータとの接続を促す。⑤封印モードの場合は計測部の電源が自動的に入り、⑥再び開封モードであることを確かめた後に、⑦コマンドの受信が開始される。⑧コマンドが処理された後、オペレーターがRS-232Cケーブルをはずすと、封印モードに移る。

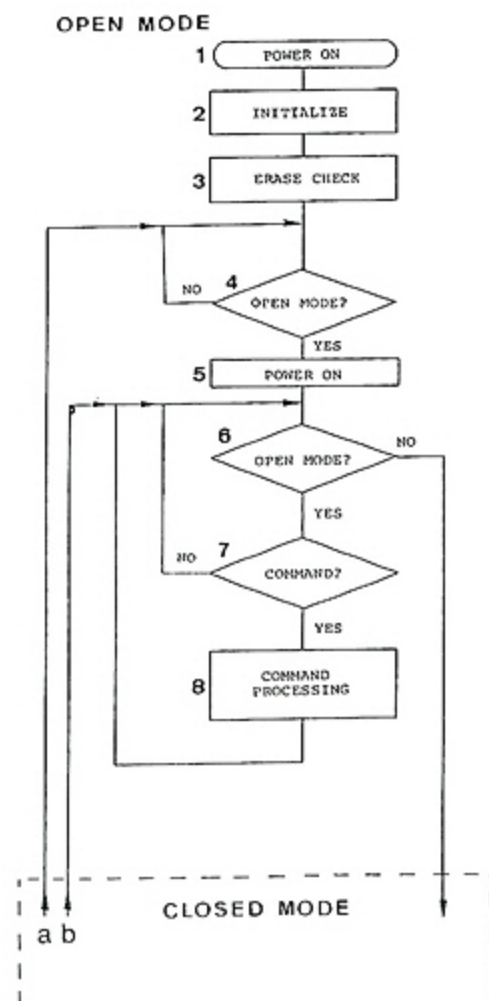


図5 開封モード。図の中の番号は本文の説明の番号に対応する。

Fig. 5 Flow-chart for the open mode. A number for each block is quoted in the text.

3.2 封印モード (図6)

このモードに移ると、⑨計測部の電源は自動的に切られ、⑩計測前のチェックが行なわれる。ここまでで内部時計の時刻、観測開始時刻、トリガ

ーレベルがセットされていない場合には、計測に移れないので、その場合には、オペレーターは、封印モードのa（図5左下）に戻り、パラメータをセットし直す必要がある。⑪ここでまだ開封モードの場合には、⑫計測部の電源が入れられ、bへ戻る。封印モードの場合には、⑬観測開始時刻になっているかどうかを調べられ、⑭観測時刻になっていると、自動的に計測部の電源が入り、観測が開始される。⑮封印モードであることをさら

に確認した後、地震計の姿勢制御を1時間かけて行う。⑯設定時刻の1時間後に、⑰A/D変換が開始される。⑱長時間平均と短時間平均の比を求め、⑲あらかじめ設定した値を越えると、⑳設定した時間だけさかのぼりPROMメモリー上に記録データが書き込まれる。㉑PROMメモリー（4Mバイト）が一杯になると、㉒計測部の電源が切られ、観測が中止される。㉓ここで開封モードbに戻ればPROMメモリーから記録が読み取れる。

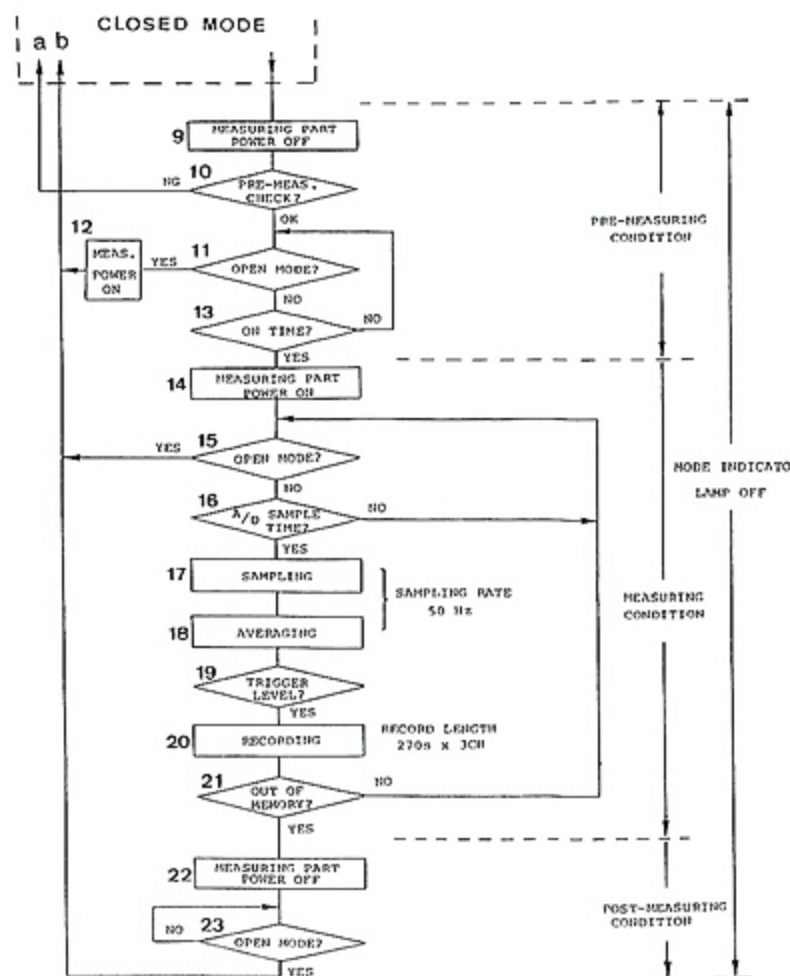


図6 封印モード。

Fig. 6 Flow-chart for the closed mode.

3.3 コマンドの種類

- (1)動作パラメータ表示コマンド：内部時計の時刻、トリガーレベル、収録データ個数、観測開始時刻を表示させる。
- (2)時刻設定コマンド：内部時計の時刻を設定する。
- (3)トリガーレベル設定コマンド：地動の長期間平

均時間、短時間平均時間、長短平均比、遅延時間（トリガーされた時刻からさかのぼり収録させる時間、0—60秒）、を設定する。

- (4)タイマー設定コマンド：観測開始時刻をする。
- (5)タイマー解除コマンド：観測開始を解除し、計測をスタートさせない。

- (6)トリガーリスト表示コマンド：トリガーされ PROMメモリに記録されている地震のリストを表示させる。
- (7)記録再生コマンド：PROMメモリに記録されているレコードデータの内、指定されたレコードを外部コンピュータへ送る。
- (8)リアルタイム波形観測コマンド：90秒間波形をのサンプリングし、バッファRAMへ記録し、外部コンピュータへ波形を転送する。
- (9)自己診断コマンド：PROMメモリの消去チェックを行う。

17インチ耐圧ガラス球の上半球に、回路部とセンサー姿勢制御用モーター、下半球にセンサーと電池が収められている。センサーの性能は表1にまとめられている。耐圧球内の上半分のハードウェアの配置は、図7と写真2に示されている。図

SENSOR AND A/D CONVERTER

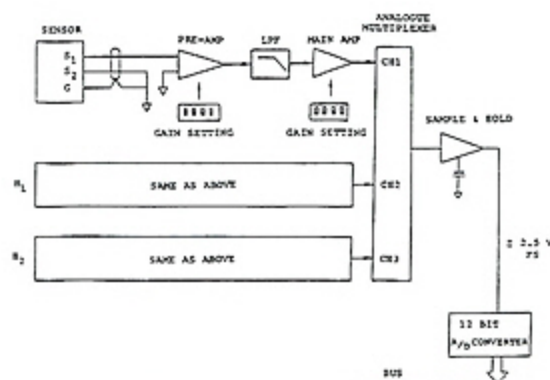


図7 耐圧球内部のハードウェアの配置図。
Fig. 7 Map-view of the amplifier, analogue-to-digital (A/D) converter, CPU, memories, and motor in the glass pressure-vessel.

7の上部の横に長い部分がPROMメモリで、その左下は増幅器、その右は時計・バッファメモリ・CPUなどの基礎、中央はセンサーの姿勢制御用のモーターである。

4.1 回路部

耐圧球内部のハードウェアの配置図は図8に示されている。図の左上のセンサーから送られた

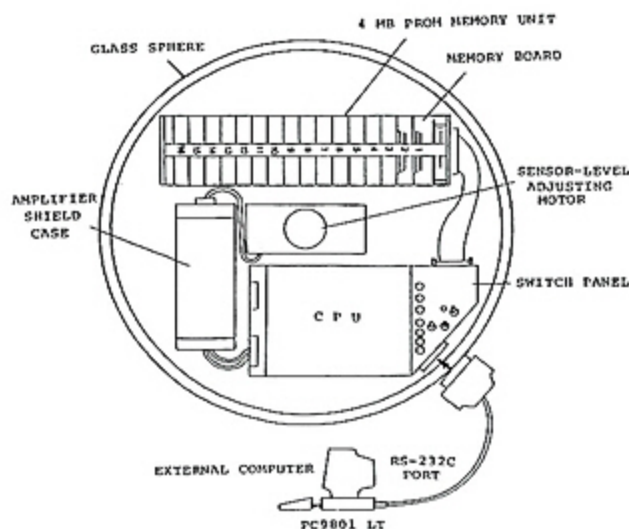


図8 海底地震計の計測・記録システムのブロックダイアグラム。

Fig. 8 Block diagram of the OBS measuring and recording system.

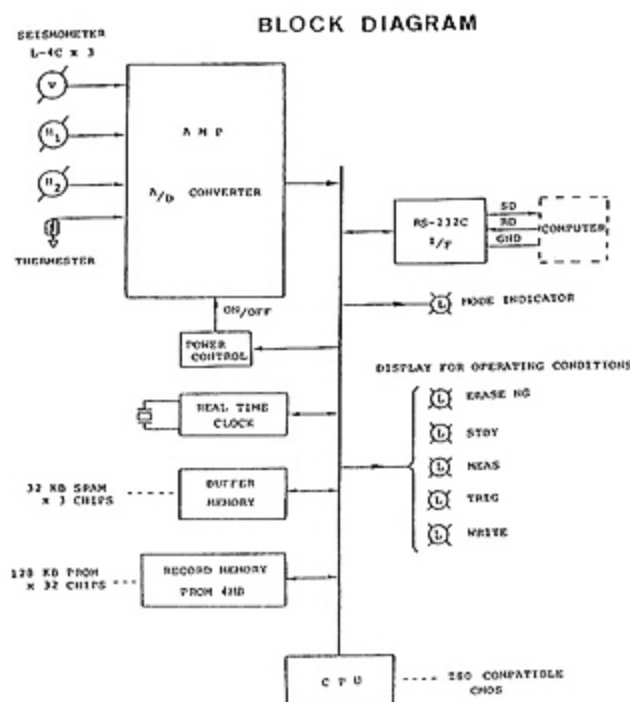


図9 センサーと増幅器部分のブロックダイアグラム。
Fig. 9 Block diagram for the amplifier and A/D converter unit.

信号は、増幅器とアナログ・デジタル変換器を通りCPUへ送られる(図9)。この測定器の電源のON-OFFは、前述のようにソフトで制御される。地動はバッファメモリーに常に収録されている。地動がトリガーレベルに達すると、あらかじめ設定した時間までさかのぼり、270秒間PROMメモリーへ収録される。

操作パネル上には、動作状態を示すランプが6個置かれている。これらのランプの点滅から、海底地震計の状態を知ることができる。ただし測定に入る際には、電源を節約するためにオペレーターがスイッチを切る。ランプの表示機能は以下のとおり。

ERASEランプ：PROMメモリー上にデータが残っていると点灯する。消灯している時は全てのメモリー内容が消去されていることを示す。

STBYランプ：開封モードでの設定が終わり、計測前のスタンバイ状態の場合に点灯する。

MEASランプ：観測状態の際に点灯する。

TRIGランプ：トリガーレベルに達すると点灯する。

WRITEランプ：バッファメモリーからPROMメモリーへ記録データが書き込まれているときに点灯する。

MODEランプ：電源を入れたとまずPROMが消去状態にあるかをチェックした後、もしEPROM素子の一つでも消去されていないときは、このランプが点灯する。このランプが点滅するときは、海底地震計に外部コンピューターを接続するよう促している状態を示す。開封モードでパラメータの設定が終わり、RS-232Cケーブルを抜くと、ランプは消灯する。ただし、ケーブルを抜いた後にも点滅する場合には、以下の四つの可能性がある。

- ① EPROMが全部消去されていない。
- ② 日付・時刻設定がされていない。
- ③ トリガーが設定されていない。
- ④ 観測開始時刻設定がされていない。

のいずれかである。したがって、このランプが点滅したら、各種の設定をし直す必要がある。観

測エラーを防ぐ重要な指示ランプである。

4.2 PROMメモリー

図7のように、1から16までの番号の付いた小基板からなる。各小基板には1MビットのEPROM素子が2個ずつ装着されている。したがって、小基板ごとにはずして紫外線を照射することで、メモリー内容の消去が行える。どの基板のメモリーにデータが収録されているかは、外部コンピューターから前述のコマンドを用いて調べられる。

5. 観測結果の概要

1988年9月11日、沖縄トラフ伊是名海穴での潜航の際に、海底地震計の設置を試みた。地震計は潜航予定2時間前に投入された。しかし投入直後、地震計に取り付けたトランスポンダーが稼働していないことがわかり、潜水船での設置を中止した。潜水船で海底地震計を設置しても、自己浮上させ回収することができないから、すべての作業は無意味になる。このため当初の計画を変更し、潜水船で地震計を設置せず「回収」することに決めた。潜水船による地震計の捜索は、地震計の着地点が分からず困難を極めたが、最後に成功した。回収した海底地震計は、翌日9月12日伊平屋海丘付近で再び投入された。観測期間は5日間である。以上のように、本年度は地震計を岩盤に

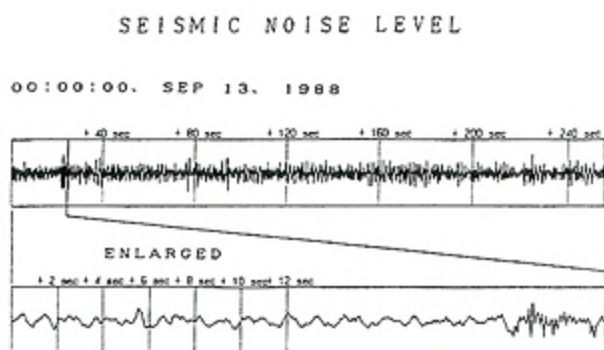


図10 沖縄トラフ内の地動ノイズの例(1988年9月13日0時)。上段は250秒間の記録、下段は最初の25秒間の記録を拡大したもの。

Fig.10 Ground noises in the Okinawa trough, for a 250 s interval, recorded at 00:00 Sep 13, 1988.

設置する試みは行われなかった。ただし地震計の設置点は、堆積層が薄く岩盤とはほぼ同じ地盤条件の所と思われるので、得られたデータは貴重である。観測期間中に、9個の地震や地動ノイズが記録された。地震はその内、3個であった。いくつか記録された地動ノイズは、今後の海底地震計の改良への基礎データとなる。地動ノイズとそのスペクトルの例を、図10、11、12、13に示した。

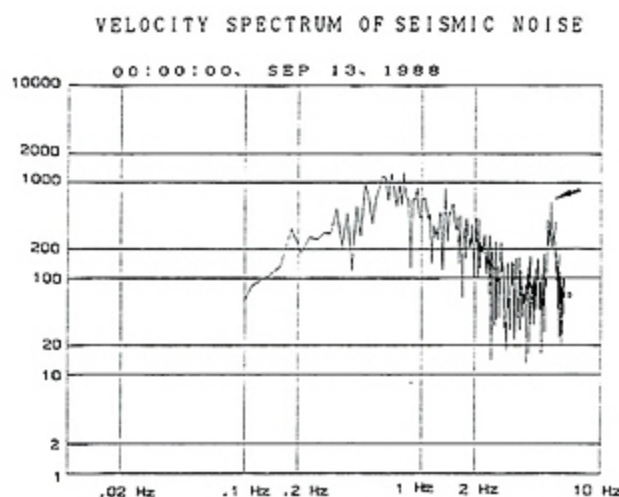


図11 地動ノイズのパワースペクトル。5 Hz 付近の鋭いピークは、電気的なノイズと思われる。

Fig.11 Spectrum of the ground noises shown in Fig.10. The peaks at about 5 Hz are possibly circuit noises.

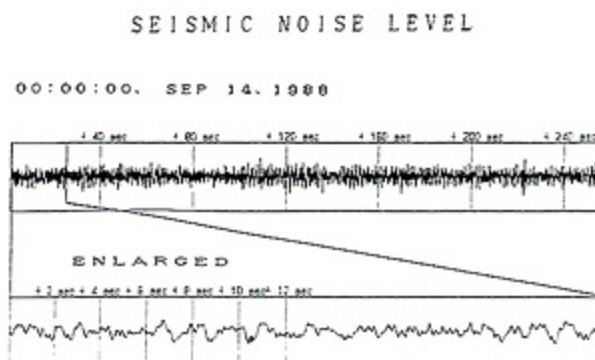


図12 沖縄トラフ内の地動ノイズの例（1988年9月14日0時）。説明は図10と同じ。

Fig.12 Same as in Fig. 10 except recorded at 00:00 Sep 14, 1988.

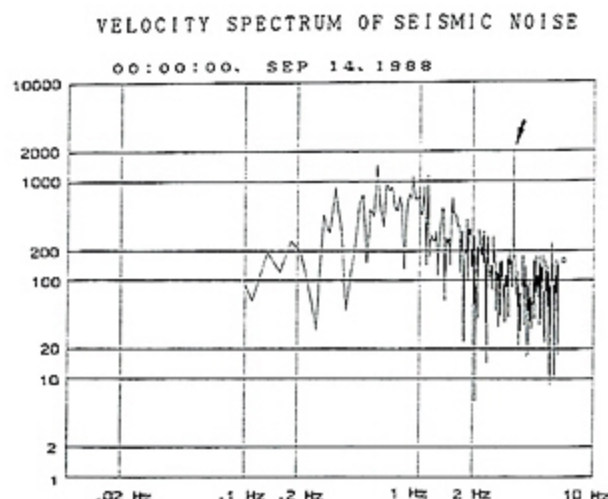


図13 地動ノイズのパワースペクトル。4 Hz 付近の鋭いピークは、電気的なノイズと思われる。

Fig.13 Power spectrum of the ground noises shown in Fig.10. The peaks at about 4 Hz are possibly electric circuit noises.

謝 辞

地震計設置と回収にご協力をいただいた、海洋科学技術センターの「しんかい2000」の潜航チーム、「なつしま」乗組員の方々に感謝致します。

参考文献

筒井智樹, 安藤雅孝, 金嶋 聡, 1988, 潜水船「しんかい2000」による海底地震計の設置について, 海洋技術センター試験研究報告, 259-266.

(原稿受理 1989年5月17日)



写真1 海底地震計と投入作業のようす。

photo. 1 The Ocean Bottom Seismograph (Kyoto University Type II), lowered into the sea before the dive of the submarine research ship "SHINKAI 2000" on Sep 11, 1988.



写真2 海底地震計の耐圧球とその内部。右側の半球の内、横に長いのがPROMメモリー、縦に長いのがセンサーレベル用のモーターユニット。

photo. 2 The OBS glass-sphere and its interior. In the right-hand half sphere, the horizontally elongated part on the brown disk cover is the PROM memory consisting of 16 small boards (total 4 M bytes), and the long part at the center is the motor unit for taking the level of the 3-component sensor, which is installed beneath the brown disk, and is not viewed in the photo.