自己浮上式海底地震計の観測データ処理方法

著者	鵜川 元雄, 藤縄 幸雄, 江口 孝雄, 前田 隆夫
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	34
ページ	43-58
発行年	1984-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000920

550.34 : 681

自己浮上式海底地震計の観測データ処理方法

鵜川元雄*・藤縄幸雄*・江口孝雄*

国立防災科学技術センター

前田隆夫

株式会社　サン・コンピュータ・サイエンス

Data Processing Method for the Pop-up Type Ocean Bottom Seismometers

By

Motoo Ukawa, Yukio Fujinawa and Takao Eguchi

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

And

Takao Maeda

Sun Computer Science, Shinkawa, Chuo-ku, Tokyo 104

Abstract

A practical data processing method was developed for the data obtained by seismic observations by the pop-up type ocean bottom seismometers (OBSs) of National Research Center for Disaster Prevention (NRCDP). The magnetic tape data recorder of the OBSs of NRCDP can record seismic data continuously for about one month and we usually operate about ten OBSs in one observation. Hence, to examine the seismic data after the observations, it is needed to play back a large amount of data. As our observation's purpose is to investigate the seismicity of natural earthquakes, the data processing method developed in this study is intended to suit that purpose. That is, the data digitally compiled for each earthquake are finally reproduced on the recording charts in which absolute times of all OBSs are aligned like as the seismic records obtained with telemetered seismic networks. The procedure of our method consists of three stages. The first is to pick up the event times from seismograms played back on a visicorder. The second is to digitize the seismic signals and to compile the data for each event by using the electric mini- and large-computers. The third is to reproduce visual

* 第2研究部地殻変動研究室

seismograms on a pen recorder. So far, we applied this system in three times and obtained satisfactory results. It usually takes about 4 to 5 months to process the data of one month's observation.

1. 概　　要

国立防災科学技術センター（防災センター）では，自己浮上式海底地震計による海底地震観測を昭和55年度より実施している．著者らは，この海底地震観測によって得られたデータを処理するシステムを，昭和57年度に開発・実用化し，現在まで多少の変更や改善を加えながら使用してきている．本論文では，現在行っている海底地震計データ処理の方法について説明する．

防災センターの海底地震観測の主な目的は自然地震観測にあるので，処理システムもこの目的に沿ったものとした．すなわち最終的に得られる可視記録が，陸上のテレメーター網によるもののように解析し易い形にすることを目指した．自己浮上式海底地震計ではデータをアナログ直接録音方式で連続的に磁気テープに記録しているが，著者らの処理作業は地震を抜き出し，各観測点ごとのデータを地震ごとに編集し，それを可視記録化するというものである．作業のなかで編集に関する部分は計算機を用いて処理するので，データはディジタル化している．

データ処理を行う場合，最も考慮すべきことはいかにして原データの質を落さずに，目的の処理をするかということである．とくに海底地震計データの場合は，用いている地震計やデータレコーダーにより，周波数帯域，ダイナミックレンジともにかなり制約されたものとなっているので，データ処理において記録されたデータの質を損なわないことが重要となる．著者らの処理システムの場合，ディジタル化して処理しているので，ダイナミックレンジについては問題ないが，録音・再生速度比の大きいこととチャンネル数の多いことから，必要な周波数帯域を確保するためには，高速のＡＤ変換装置が必要となった．

これまでにこの処理システムを用いて，昭和57・58年度の東海沖における観測と昭和58年度の西南太平洋における観測のデータを処理した．本論文ではこれら３度のデータ処理作業をもとにデータ処理システムについて説明する．

2. データ処理作業の流れ

2.1　処理するデータ

防災センターでは，２種類の自己浮上式海底地震計OBSCDP Ⅱa型とFEU－Ⅰ型を用いて観測を実施している．それぞれの収録データ内容は表１にまとめてあるが，OBSCDPⅡa型

OBSCDP IIa		FEU I	
Ch.	Data	Ch.	Data
1	X 90db	1	Z 80db
2	X 70db	2	Z 60db
3	X 50db	3	H 80db
4	Y 90db	4	Time
5	Y 70db		
6	Y 50db		
7	Z 90db		
8	Z 70db		
9	Z 50db		
10	ZL 70db		
11	ZL 50db		
12	Azimuth signal		
13	Control signal		
14	Time		

Z:vertical component
ZL:long period vertical component
X,Y;horizontal component

表1　自己浮上式海底地震計のデータ内容

Table 1　Contents of the data recorded by OBSs.

は12チャンネルに，FEU－I型では4チャンネルに信号と刻時コードが記録されている．観測期間は通常ほぼ30日程度である．データレコーダーの周波数帯域はOBSCDPIIa型では1～30 Hz，FEU－I型では1～15 Hzで，アナログ直接録音方式で収録されている．1台あたりの全データ量は，仮に収録時の時間に対し100 Hzでサンプリングしたと考えると，OBSCDP IIa型では約6 Gバイト，FEU－I型でも約2 Gバイトと膨大なものである．このため，ディジタル化して処理を行うには地震の部分だけ抜き出す必要がある．地震が1日10個程度で1地震当りの平均収録時間を5分間とすると，取り込むデータ量はOBSCDP IIa型では約200Mバイト，FEU－I型では，70Mバイト程度となり，磁気ディスクや磁気テープを用いて収録可能な量となる．

2.2　データ処理作業の流れ

データ処理作業は，海底地震記録を収録した原磁気テープのアナログ記録をディジタル化し，地震ごとに編集し，可視記録化するという順序でなされる．作業は大きくは，(i)地震の抽出・照合，(ii)信号のディジタル化・編集，(iii)可視記録の作製の3つに大別される．主な処理手順は図1の流れ図に示されているように，以下のとおりである．

(1)　FEU－I型については記録・再生速度比を小さくするために原記録をダビングして，再生速度を8分の1とする．

(2)　ビジコーダーを用いて全地震計（あるいは一部のみ）の，信号1成分（ほとんどの場合，上下動高感度成分）と刻時コード成分を全収録時間にわたり連続再生する．

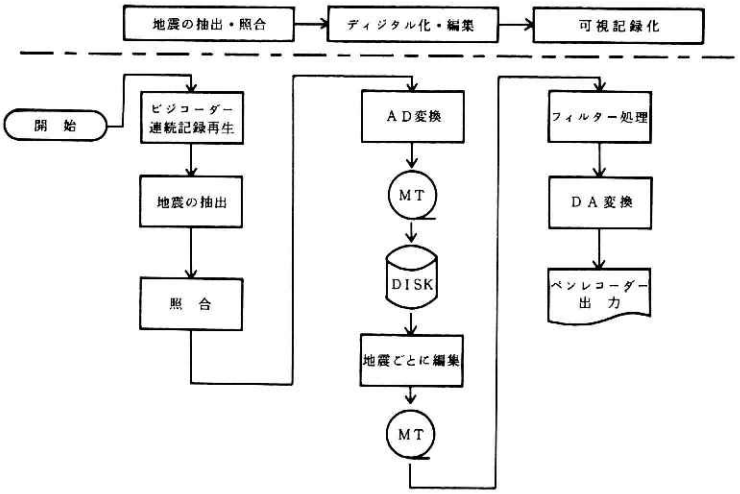


図1　データ処理の流れ図

Fig. 1　Flow chart of the data processing.

(3)　ビジコーダー記録紙上で目視により地震部分を抜き出し，その部分の時刻を読み取る．

(4)　各地震計について読み取られた地震の時刻を表にし，また他の観測点で読み取られた時刻との対比，照合を行う．

(5)　照合結果をもとにして，収録・再生する地震を決定する．

(6)　(5)で選ばれた地震を計算機によりディジタル化し，各観測点について磁気テープに保存する．

(7)　計算機を用いて地震ごとの記録ファイルを作製し，磁気テープに保存する．

(8)　地震ごとに編集された磁気テープをもとに，計算機でフィルター処理等を施した波形を作製する．

(9)　編集された記録とフィルターを通した波形をアナログ化し，ペンレコーダーで再生，可視記録化する．

以下でこれらの諸作業について更に詳しく説明する．

3.　地震の抽出・照合

地震波を解析するにあたって，特に震源決定を主とした自然地震の解析を行う場合には，同じ地震に対応する信号は1つにまとめられているほうが扱いやすい．自己浮上式海底地震計の記録は各観測点でデータが独立に収録され，また刻時用の時計もそれぞれ別個のものである．このため，各観測点で検知した地震を照合し，地震ごとに記録を編集する必要がある．ここでは各観測点で検知した地震を抽出し，照合する方法について述べる．

3.1 地震の抽出

地震の抽出方法として陸上のテレメーター観測網等では，信号の大小や，あるいは長時間と短時間の平均信号レベルの比により地震を検出することが実用的に行われている．海底地震計のデータ処理においても，同様の判定によって自動的に地震を抽出することが望ましい．しかしながら，現在のところ著者らは海底における雑音の状態や海底地震計で観測される地震波形の特性をまだ十分に把握していないので，自動的に地震を抽出することは行わなかった．ここで採用した方法は，記録のうち1成分を全期間について再生・可視記録化して，その記録上で地震を目視によって検出するという初歩的なやり方である．可視記録化に際しては，記録・再生速度比が大きいので，高周波まで追従する記録器が必要とされ，著者らはビジコーダーを用いた．この方法ではビジコーダー記録の再生や地震の検出に時間がかかるが，全期間について雑音の状況を知ることができるので，今後地震抽出を自動化するうえで重要な資料となる．

ビジコーダーで再生された記録の例を図2に示す．再生速度はOBSCDPⅡa型では収録時の160倍，FEU－Ⅰ型では約130倍であり，記録紙の交換なども含めて記録再生には1観測点あたり約7時間を要する．図2でもわかるように信号1成分と刻時成分を再生している．信号成分は通常上下動高感度成分である．FEU－Ⅰ型の刻時成分については，原記録のままだと刻時コードの解読が困難なため，後述するクロックアナライザーを通して整形した波形

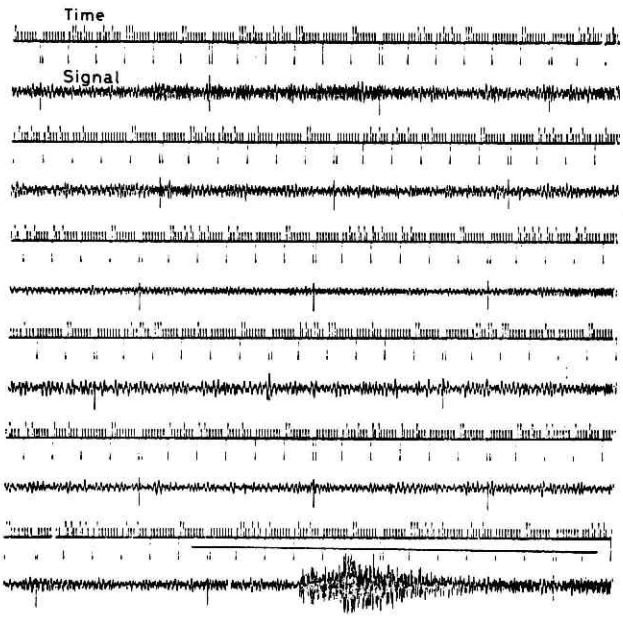


図2 ビジコーダーによる再生記録

Fig. 2 Seismic record played back on a visicorder.

にしている．記録紙上で刻時コードを読み取るので，記録紙上の時間軸の長さは1分間が約5cmになるようにした．

3.2　地震の照合

各観測点で抽出された地震時刻をもとに，ディジタル化・編集・可視記録化すべき地震を決定する．解析の目的が，震源決定等を主体とした自然地震活動の調査なので，複数観測点で検知されているか否かが，通常，地震選択の基準となるが，具体的な方法については観測点の配置，陸上観測点の寄与，ビジコーダー記録再生が全観測点か一部のみかなどの条件で異なってくる．ここでは昭和58年度の2度の観測（東海沖および西南太平洋）の際に行った方法について例示する．東海沖のデータについてはビジコーダー記録は一部の観測点について

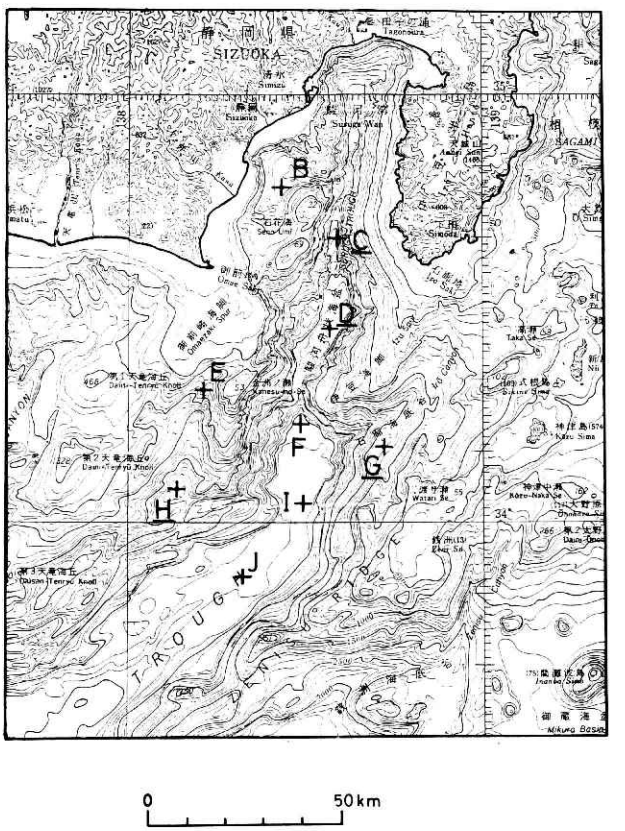


図3　東海沖観測（1983年）の観測点の位置．観測点名に下線を付した点の記録をビジコーダーで再生した．

Fig. 3　Location map of OBS stations of the 1983 Tokai-Oki observation. The station codes with underlines indicate the stations whose data were replayed on a visicorder.

	I				II					
	C	D	G	H	B	E	F	I	J	Number of stations
	○	○	○	○	*	*	*	*	*	9
	○	○	○		*	*	*	*	*	8
	○	○		○	*	*	*	*	*	8
	○		○	○	*	*	*	*	*	8
		○	○	○	*	*	*	*	*	8
	○	○			*	*	*	*	*	7
	○		○		*	*	*	*	*	7
	○			○	*	*	*	*	*	7
		○	○		*	*	*	*	*	7
			○	○	*	*	*	*	*	7
	○				*					2 ★
		○			*	*	*	*		5
			○			*	*	*	*	5
				○		*	*	*	*	5

○　；ビジコーダー記録で地震を検知した観測点

○ *　；編集，可視記録化する観測点

★　；陸上点データも考慮

表2　編集する観測点の選択方法
（東海沖観測1983年の場合）

Table 2　Selection of the stations whose data are compiled for the event (1983 Tokai-Oki observation).

のみ再生し，一方西南太平洋のデータでは全観測点について再生した．

昭和58年度の東海沖地震観測では自己浮上式海底地震計9台が布設・回収されたが，ビジコーダー記録は4台について再生された．図3に観測点の配置とビジコーダー記録を再生した観測点を示す．この4観測点（C，D，G，H）で検知された地震をもとに解析すべき地震およびデータ収録を行う観測点を決定した．その方法は表2に示すようなものである．ビジコーダー記録を再生した4観測点のいずれかで地震として検知される観測点の組合せは，表2に示すように15とおりある．このうち，2地点以上で検知した地震は，ビジコーダー記録を再生しなかった観測点についてもデータをディジタル化，編集することにした．1観測点のみで検知された場合は陸上点のデータも参考にして，表2に示すように行った．このようにして選択された地震は全部で193個であった．

西南太平洋の観測はビスマルク海とソロモン海の2地点で実施した．ここではビスマルク海で観測した8台の海底地震計のデータ処理について説明する．この場合は，全観測点についてビジコーダー記録を再生し，それぞれ地震の抽出を行った．地震の照合の結果，5台以上で検知されたものは約370個，4台以上は約520個，3台以上は約700個あった．解析する時間および記録紙の消費量等を考慮して4台以上のものについて，ディジタル化・編集を行った．

異なる観測点において検知された地震波が同一の地震に対応するか否かの判定は，図4に示すように行った．すなわち各観測点で地震波信号が認められている時間を読み取っているが，

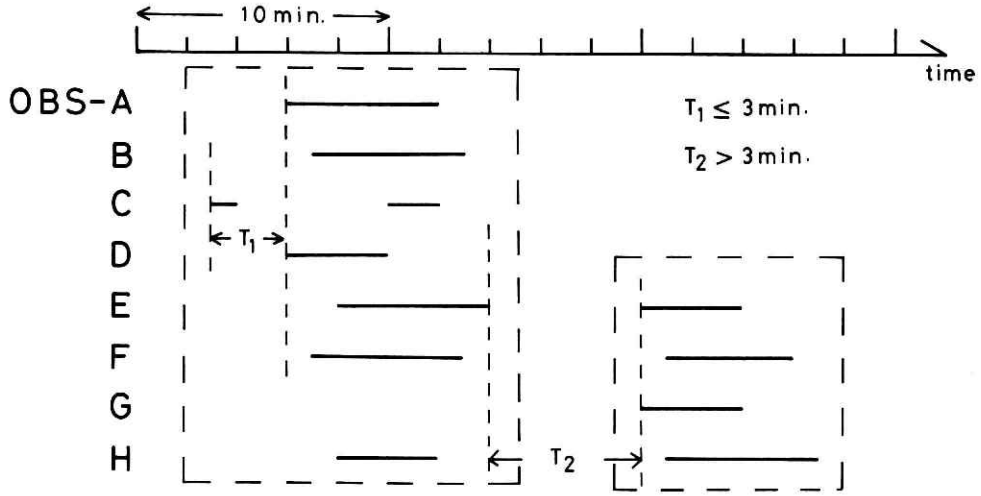


図4　地震の同定方法．横線は各観測点で地震を検知した時間を示す．破線で囲まれた地震を同一のものと同定した．

Fig. 4　Schematic diagram indicating the method of the identification of earthquakes. Horizontal bars indicate the periods in which sesmic signals were detected. The events enclosed with the broken lines are identified as the same earthquake.

これが3分以内で重なれば同一地震と考えた．この方法では近接した時刻に発生した複数の地震は同一地震と判定してしまうが，再生された記録紙上で区別できるので以後の処理においては支障ない．

4. 信号のディジタル化と地震ごとの編集

ディジタル化する地震が決まると，次に各観測点の記録のディジタル化と編集作業を行う．この作業には小型計算機PANAFACOM U−1400と大型計算機ACOS 800を用いる．作業の流れを図5に示す．この作業のためのシステムの構成は図6のようなものである．主な作

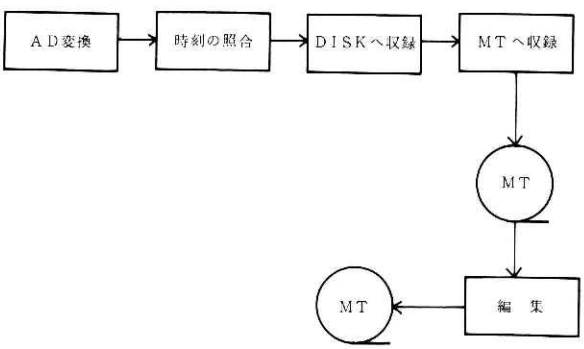


図5　ディジタル化作業のブロック図

Fig. 5　Block diagram for the digitization of data.

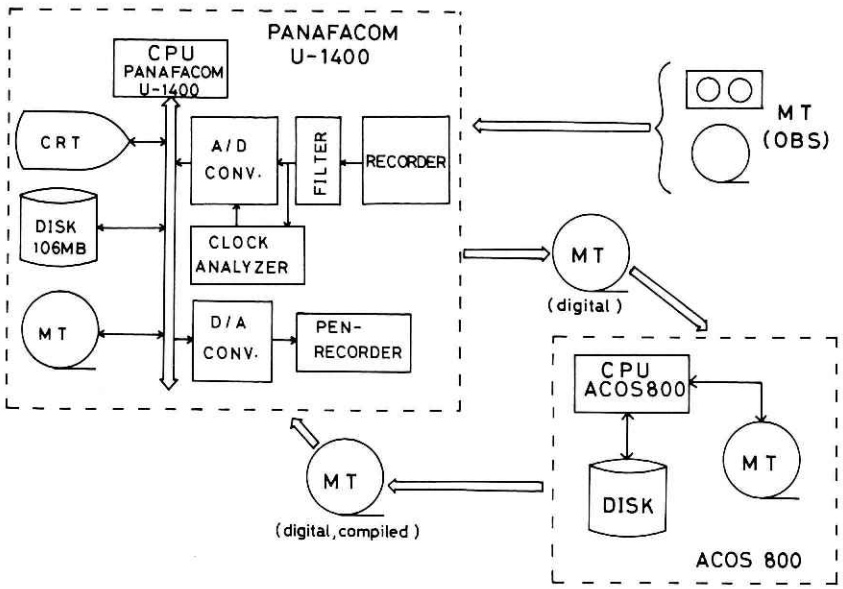


図6　ディジタル化・編集作業のシステム構成図

Fig. 6　Digitization and compiling system.

業は次の2点である．

(1)　各観測点ごとに選ばれた再生する地震をディジタル化して磁気テープへ収録する．

(2)　照合結果に従い，計算機により各観測点ごとの記録を各地震ごとのファイルに作り直し，磁気テープに収録する．

それぞれの作業について以下に具体的に説明する．

4.1　ディジタル化

ディジタル化のためには，まず指定した時刻を記録上で知るために刻時コードを解読しなければならない．刻時コードにはBCDコードが使用されている．OBSCDPⅡa型ではこれを矩形波で記録しているが，再生波形はデータレコーダーの周波特性から，この微分波形となる．また，FEU－Ⅰ型では10 Hzの搬送信号に重畳されたBCDコード(IRIG－H型)を用いている．このような生の波形は計算機で解読できないので，クロックアナライザーを通して，波形を整形した．図7に再生原刻時コードとクロックアナライザーにより整形された刻時コードを示す．さらにクロックアナライザーインターフェイスを通して得られる時刻タイミングパルスを計算機により解読して時刻を認定した．

ディジタル化して収録する地震の時刻は各観測点ごとにあらかじめ計算機に入力しておく．データはディジタル化作業開始とともに，AD変換装置により12ビットのディジタル信号に変換されるが，記録の刻時コードとあらかじめ入力してある指定時刻が一致したときのみデ

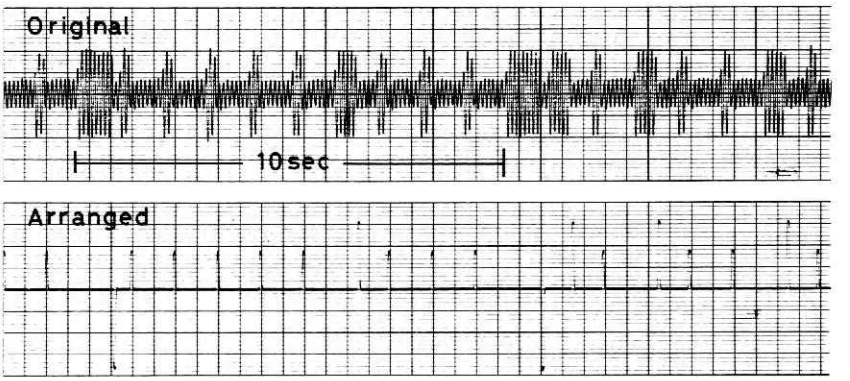


図7　時刻信号の原記録とクロックアナライザーにより整形された時刻コード

Fig. 7　Original time signal and its arranged form by the clock analyzer (FEU-I type).

ータを指定時間分だけ磁気ディスクへ取り込む．

信号のディジタル化においてはデータの質が保存されなければならない．表3にデータ収録・処理における各段階でのデータの周波数特性とダイナミックレンジをまとめた．今回の処理ではダイナミックレンジは充分保存し得る．一方，周波数帯域の確保のためにはサンプリングレートを収録時の値に換算して100 Hzになるようにした．OBSCDPⅡa型ではディジタル化するチャンネル数が12あり，また収録・再生の速度比が80倍であるため，このサンプリング周波数を実行するには約10 μ秒のサンプリング周期という高速サンプリングが必要となった．

各観測点でディジタル化されるデータ量は1日の地震数を10個とすれば，　OBSCDPⅡa

表3　各段階での周波数帯域とダイナミックレンジ

Table 3　Frequency and dynamic ranges at the each stage of the data processing.

	OBS		Data processing	
	地震計	データレコーダー	A／D	ペンレコーダー
周波数帯域	4.5 Hz — 2 Hz OBSCOPⅡa FEU－I	1－30 Hz 1－15 Hz	DC～20 Hz (100 Hz サンプリング)	DC～50 Hz
S／N	—	OBSCDPⅡa 26 db FEU I 30 db	72 db	(4 cm P－P)

型では約200Mバイト，FEU－I型では約70バイトである．PANAFACOM U－1400のディスク容量は106Mバイトで，このうち80Mバイト程度をデータ領域として使用しているので，通常1度に1観測点のデータをディスクに収容することはできず，磁気テープに転写しながら行っている．

再生された記録の時間軸の長さを各観測点間で一致させるためには，収録時換算で100Hzのサンプリングをできるだけ正確に実行しなければならない．しかし，海底地震計のデータレコーダーの記録速度は，一般的なデータレコーダーの約1000分の1という低速なので，個々の海底地震計間で時間軸の若干のばらつきは免れ得ない．そこで著者らは，あらかじめ記録の一部を再生し，計算機により分マーク間隔の再生時間を求めて，収録時のテープ速度を概算し，実際のサンプリング周波数を決定している．これにより，時間軸の長さの観測点間のばらつきがかなり小さくなり，通常の験測作業では支障にならなくなった．

4.2 地震ごとのファイルに編集

全ての観測点のデータのディジタル化が終了すると，次は，これを地震ごとの記録ファイルに作り直す作業となる．この編集作業のためには複数の磁気テープ装置や大容量の磁気ディスク装置が必要なため，大型計算機のACOS 800を使用している．編集には複数の磁気テープ装置による方法と磁気ディスクによる方法を併用している．前者では，磁気テープ装置数台を用い，一度に3～4観測点のデータを1本のテープに地震ごとにまとめていく．この作業を順次繰り返し，最終的に全観測点のデータを編集する．後者では一度に全観測点のデータを磁気ディスクに収容できるだけ書き込み，それぞれのデータの時刻を読みながら同一地震を一つのファイルにしていくというものである．これら2つの方法のうちどちらを採用するかは，そのときのACOS 800の使用状況に依っている．編集後の記録は磁気テープに保存されるが，各地震ごとのファイルの先頭には図8に示すとおり，マスターラベルがつけられ，そこに地震の番号，日付と時刻，観測点等の情報が書き込まれている．

5. フィルター処理と可視記録化

5.1 フィルター処理

データ処理の最終段階では，前節で述べた地震ごとのファイルからDA変換して得られる可視記録をもとに，P波，S波の到着時刻を読み取ることになるが，海底地震計の記録では設置状態や海流の影響と考えられる雑音が読み取りの障害となることがある．このような雑音は比較的周波数帯域が狭く，フィルター処理することにより除去できることがあるので，著者らは原波形とともにフィルター処理した波形も全記録について再生することにした．雑音の状態は時間的に変化することもあるので，本来地震ごとにフィルター帯域を決めることが

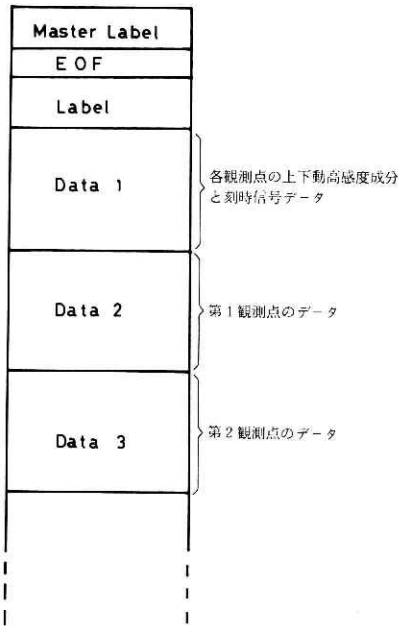


図8　地震ごとに編集された磁気テープの内容

Fig. 8　Contents of the magnetic tape compiled for each event.

望ましい．しかし，ルーチン的に大量のデータを処理する場合，このような方法をとることは大変に困難である．そこで著者らは各観測点ごとに原記録をいくつかあらかじめ再生し，最も卓越する雑音を除去するようなフィルター帯域を1つ選ぶことにした．ただし，地震計およびデータレコーダーの周波数帯域が狭いので，この帯域の中に周波数帯域がある雑音は実際上，取り除けない．

フィルターはデータがディジタル化されているので，計算機を用いたディジタル数値フィルターとした．詳しくは付録1に示す．フィルター処理した波形と原波形を比較した例を図9に示す．フィルター処理により，P波到着時刻が明瞭になっている．

5.2　可視記録の作製

地震ごとに編集された磁気テープをもとに可視記録を作製する．この際に5.1のフィルター処理波形も計算するが，この作業は大型計算機ACOS　800で行う．DA変換装置は小型計算機U－1400に接続されているので，原波形とフィルター処理波形のデータをU－1400で解読できるようにコード変換し，DA変換装置出力用に編集した作業用磁気テープをACOS　800で作製する．

アナログ化されたデータを可視記録化するために用いるペンレコーダーは，できるだけ再生速度を大きくできるように熱ペン式レコーダー（日電三栄製レクチホリー8K25型）を使用した．ペンレコーダーのガルバノメーターの特性がDC～50 Hz（40 ㎜振幅時）なので，収録時の約2倍の速度で可視記録化できる．再生された記録の一部を図10に示すが，今回の

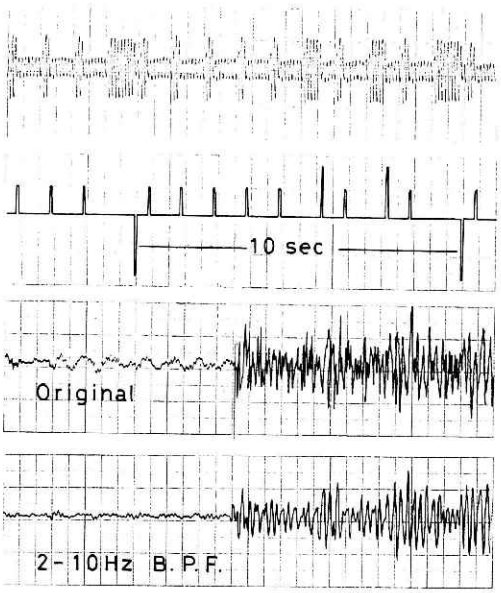


図９　地震の原波形と２－10 Hzバンドパスフィルターで処理した波形

Fig. 9　Original seismogram and its filtered seismogram (2-10 Hz band-pass filter).

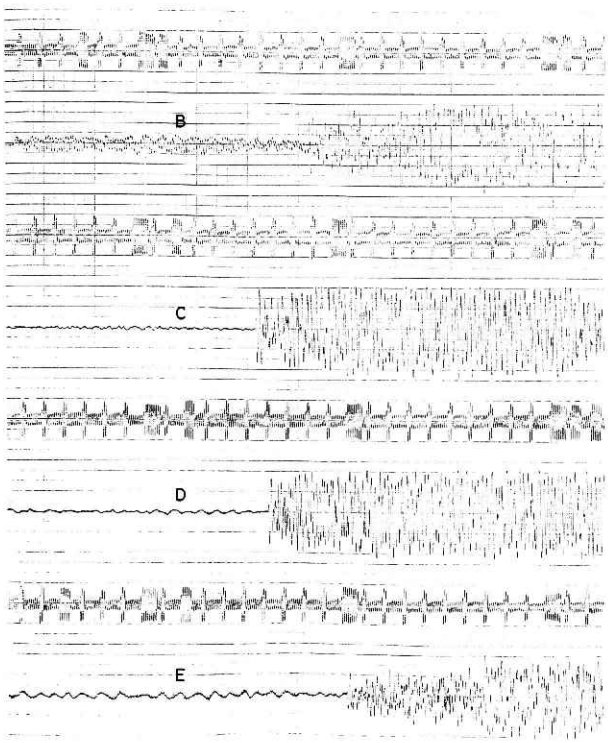


図10　最終的に得られた可視記録の一部．
(a) 地震ごとに編集された記録．

Fig. 10　Examples of the resulting visual records.
(a) Records compiled for each event.

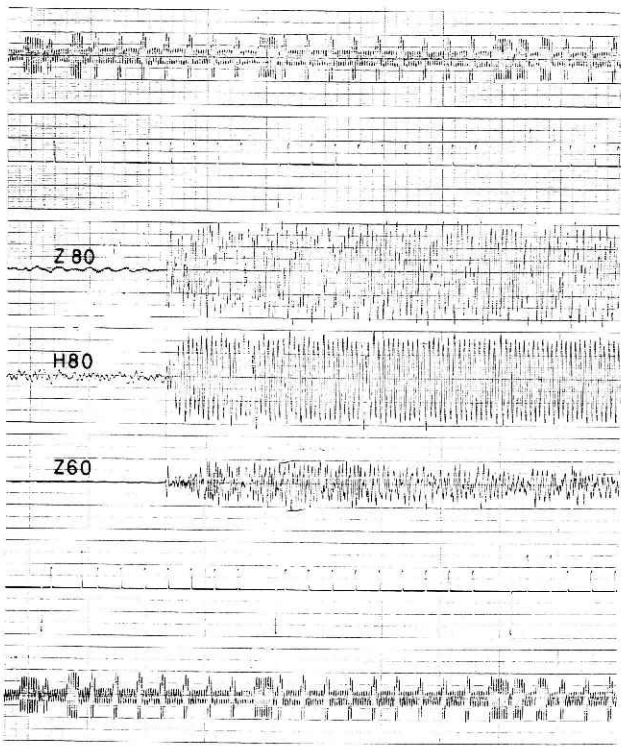


図10　最終的に得られた可視記録の一部.
(b) 各観測点ごとの記録.

Fig. 10　Examples of the resulting visual records.
(b) Records of the each station.

再生記録の特徴は次の3点である.

(1) 各観測点の絶対時刻を揃えて，上下動高感度成分を同一記録紙上に再生する（図10a).

(2) 地震波到着時刻を明瞭にするために，原波形とともにフィルター波形も各観測点ごとに再生する.

(3) 地震の時刻，観測点名等の情報をペンレコーダーに付属のプリンターにより印字する.

このような形式で可視記録化することにより，陸上のテレメーター地震観測網で得られている記録にほぼ近いものを得ることができた．また，実際に解析に使用した経験では，14チャンネルのため記録紙幅が65cmと大きく読み取り作業にやや不便であることを除いては，順調な験測作業ができた.

6. まとめと今後の課題

防災センターの自己浮上式海底地震計のデータ処理システムについて説明してきたが，主な特徴は次の3点である.

(1) 各観測点ごとに収録されている原データを地震ごとに編集する.

(2) 各観測点の信号のうち上下動高感度成分の絶対時刻を揃えて同一記録紙上に再生する.

(3) 全ての記録について原波形とともに雑音除去のためにフィルター処理した波形も再生する.

これらの再生記録を作製するために，データをディジタル化して計算機により処理作業を行った．また，処理システムの構成にあたってはデータの質（周波数帯域とダイナミックレンジ）を確保することを最重要視した.

昭和58年度の実績から考えると，10台の海底地震計を用いて約1カ月間の観測を行った場合，このデータを処理するには4～5カ月を要している．作業項目別には，ビジコーダー記録を再生し，地震を抽出・照合するのに約1.5カ月，ディジタル化および編集に約2カ月，可視記録の作製に1～2カ月を必要としている．地震観測を実施した場合，その観測結果をいかに迅速に得るかは重要な要件である．その点で，今回の処理システムは未だ満足できるものではない．今後，処理に要する時間を少しでも短縮することが課題である．実際の作業を考えると，ディジタル化や可視記録作製は再生器やペンレコーダーといった機器の数に制約されるので，大幅に時間を短縮することは困難である．地震の抽出については，これまでの経験から自己浮上式海底地震計のデータの特徴もかなり把握できてきたので，自動処理化することが可能と考えている.

本論文で述べてきたように，今回の処理システムの開発・実用化によりデータ処理システムはほぼ確立できた．今後は作業の能率化を考えてゆきたい.

7. 謝　辞

この処理作業を実施するにあたり，初期の段階では第4研究部勝山ヨシ子計測研究室長，第2研究部木下繁夫主任研究官に協力して頂いた．データ処理システムの実用化にあたっては第2研究部浜田和郎総括主任研究官，大竹政和地震活動研究室長に有益な助言を頂いた．プログラムの開発等に関しては，株式会社サン・コンピュータ・サイエンスの元社員王沢秀一氏と岩本廣洋氏の寄与が大きい．なお，本研究の一部は科学技術庁の昭和57・58年度科学技術振興調整費による「インド洋・太平洋プレート境界海域における島弧・海溝系の地質構造に関する研究」の一環として行われた.

（1984年11月21日　原稿受理）

付録　フィルターについて

フィルターはデータがディジタル化されているので，ディジタルフィルターを用いた．方法はフィルターの特性A(f)を時間軸へ逆変換したものW(t)と信号X(t)とを，重畳するものである．フィルターの特性としては取り出す周波数帯域で1，他では0となる箱型を設定したが，実際には計算に用いる項数が有限であるので，箱型にはなっていない．

計算に用いた式は以下のとおりである．

$$W(t)=\int_{f_1}^{f_2} e^{i2\pi ft}\,df$$

$$=\frac{1}{\pi t}(\sin 2\pi f_2 t-\sin 2\pi f_1 t)$$

ここでf_1，f_2 はバンドパスフィルターを考えた場合の下限と上限の周波数．

W(t)の離散データに対する表現Wrは，

$$Wr=W(r\Delta t)\Delta t$$

$$=\frac{1}{\pi r}\left[\sin\left(\frac{2\pi hr}{m-1}\right)-\sin\left(\frac{2\pi lr}{m-1}\right)\right]$$

ここで　$t=r\Delta t$

$\Delta f=1/\Delta t\,(m-1)$

$h=f_2/\Delta f$

$l=f_1/\Delta t$

$r=-R,\ -(R-1),\ \cdots\cdots,\ R$

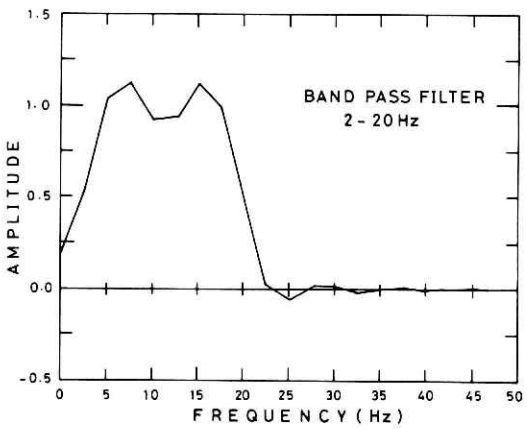
$R=(m-1)/2$

m：フィルターWrの項数

フィルターの波形は次の式で計算される．

$$\bar{X}n=\sum_{r=-R}^{R} W_r\cdot X_{n-r}\cdot\Delta t$$

周波数帯域2～20 Hz のバンドパスフィルターで，項数を21とした場合のフィルターの特性を図A－1に示す．



図A－1　フィルターの周波数特性

Fig. A-1　Response of the filter used in this study.