

マイクロコンピュータを地震観測に応用する試みについて*

椛皮久義**・柏原静雄***・浜田信生**

550.34.038

On the Application of a Microcomputer to Seismological Observations

H. Hikawa and N. Hamada
(*Seismological Division, J. M. A.*)

and

S. Kashiwabara
(*Seismological Observatory, J. M. A.*)

In this paper are presented several applications of a microcomputer for seismological observations and signal processing at the Matsushiro Seismological Observatory.

For a long time, hardware logics have been used for triggering and recording systems in a seismograph, but the hardware system is not flexible and it is difficult to improve or upgrade its functions.

On the other hand, the microcomputer permits these by changing softwares.

An 8 bit-microprocessor Intel 8080A is used in this simulation. The system used in the experiment has a 13K byte random access memory and an 8K byte read only memory with several peripheral devices. The results obtained are summarized as follows:

For the triggering system, several programmed logics are developed and tested. Results of the test proved that the software logics are much more superior than hardware logics in picking up signals in noise.

A digital recording device connected to the microcomputer is able to record efficiently many events of short period seismic waves. Although its capacity is too small to operate at a high sampling rate, it is useful for test measurement in short period of time.

Software of conversation type (called the tiny BASIC interpreter) is also loaded on the system. Floating point calculation is not applied in the interpreter, but it is convenient for some off line data handlings.

The microcomputer system is applied to the numerical calculation and digital filtering, too. Floating point numeration is difficult at real time usage because of its slow speed. However, bandpass filter using selected mean is attainable at a real time processing system.

§ 1. はじめに

1970年代のはじめ、4ビットのマイクロコンピュータが発明され、その後8ビット、16ビットのマイクロコンピュータなどが開発されるに従い、1975年以降急速な勢いで普及し、電子計測の各分野で取入れられ用いられるようになった。

地震観測への応用もいくつか考えられたので、マイク

ロコンピュータを実際の地震観測へ用いて、その性能の限界、応用範囲についての検討を行なった。

マイクロコンピュータ(以後マイコンと略す)の使い方は、多種多様で、個々の使用法をここですべて記述することは不可能である。しかし、一般論として、従来ミニコンピュータを用いて行なわれてきたデータ処理や制御を、そっくりマイコンで置換えるといった複雑な使い方から、単なる機器の一部品として今までデジタル、アナログの論理演算回路で行なった機能を置換えるといった簡単な使い方までの間に、色々な程度の用い方があるといえる。

* Received June 4, 1980.

** 気象庁地震課(元地震観測所)

*** 地震観測所

前者の例として、ディスプレイやフロッピーディスク付の卓上電子計算機などがあり、ミニコンピュータと同等の機能が $1/10$ から $1/100$ の費用で実現可能である。また後者の例として、地震計の地震判別(トリガー)回路がある。今までは、地震判別回路としてアナログの波形整形回路、コンパレータが用いられてきたが、最近設置された海底地震計の受信装置には、マイコンによるトリガー回路が組込まれた。従来の電子回路では、複雑な機能を持たせることが困難であり、一度製作したプリント基板(ハードウェア)の機能を変更するためには、新たに製作し直さなければならないが、マイコンを用いると、プログラム(ソフトウェア)次第で、如何にも改良が可能である。マイコンを地震観測に取入れることにより、今まで高価であった記録収集システムを、低価格で実現できるという利点と、今までの電子回路では実現不可能であった機能処理が可能になって、地震記録の処理・解析に新しい分野が開けるという側面がある。

今回は、マイコンの機能を理解し、地震信号の遅延、地震の識別、デジタル記録などを行ない、その他比較的容易に実現可能と思われるデジタルフィルタリングについても、若干の考察を試みた。

§ 2. マイコンの種類と機能

マイコンといっても、その基本的構造に大型のコンピュータや、ミニコンピュータ(以後ミニコンと略す)と差がある訳ではなく、10年前のミニコンが、ICの集積度の向上に伴ない、数個のICで構成されたものと考えてよい。現在製作されているマイコンは、一語(ワード)が、4ビット、8ビット、16ビットのものが主である。4ビットのものは、プログラムの命令の種類も少なく、主として、シーケンス制御などに用いられている。8ビットのものは、現在最も多く生産され用いられており、プログラムの種類もインテル社の8080Aでは、78種類244命令がある。また、16ビットのマイコンは、ミニコンとプログラムの互換性をもつものも生産され、計算速度を除けば、能力もミニコンと変わらない。マイコンの特長としては、ミニコンなどと違い、複数のメーカーが互換性のある製品(セカンドソース)を生産していることがあげられる。このため、ミニコンと違って機種を変更しても、プログラムに互換性があれば、プログラムなど変更なしに使用が可能である。現在、8ビットのマイコンとしては、インテル社の8080型とモトローラ社のM6800型と、その改良機種が大半を占めている。

特殊なマイコンとしては、C-MOS ICによる低消費

電力CPUがある。乾電池で動作するので、無人の気象観測ステーションなどへの応用が考えられよう。稲谷・古屋(1977)は、C-MOS ICのCPUを用いた地震観測用のタイムコード付き水晶時計の製作を報告している。

マイコンのCPUの演算速度は、命令の種類にもよるが、 $2\mu\text{s}$ から $20\mu\text{s}$ の範囲であり、ミニコンに比べ計算速度は劣る。現在、ミニコンでは、浮動小数点演算乗除算には専用のハードウェアが用意されるようになったが、マイコンでは、プログラムで処理しなければならないため、これらの演算には少なくとも数十ステップのプログラムが必要である。従って、浮動小数点演算には不向きである。

マイコンには、以上のべたCPU素子に加え、いくつかの周辺素子が用意されている。その主なものをあげると、メモリ、直列並列変換用入出力素子(USART)*、並列入出力用素子、割込みコントローラ、DMAコントローラ、フロッピーディスクコントローラ、タイマー等がある。

メモリには、ミニコンでは主としてコアメモリが用いられているが、マイコンでは主としてICメモリが用いられる。ICメモリは、読み書き可能なRAM(ランダムアクセスメモリ)と読み出し専用のROM(リードオンリーメモリ)がある。コアメモリは、電源を切っても、メモリの内容は消えないが、ICメモリ(RAM)では、内容が消えてしまうため、常駐プログラムは、ROMにいられて使用するのが普通である。ROMにも、一度しか書込みができないマスクROMと、紫外線や電気により内容を消去して、何回でも書込み可能なPROM(プログラマブルリードオンリーメモリ)があり、後者は、プログラムの開発などに用いられる。

USARTは、テレタイプや通信回線などと、データを入出力(やりとり)するために用いられ、並列のデータをパリティビットを付けて直列に変換したり、または、その逆を行なう機能をもっている。並列入出力用素子は、並列データの入出力を行なうものである。

割込みコントローラは、複数の割込み入力へ優先度を与えて処理を行ない、DMAコントローラは、CPUを介さずに外部機器とメモリの間で、データの転送を行なうものである。

その他、いくつかの素子が用意されており、いずれ

* Universal Synchronized Asynchronized Receiver and Transmit.

も、CPU から命令を与えることによって複数の働きを選択して使用できるようになっているものが多い。これら周辺素子は、いずれも集積度の高い IC でできており、PROM などでは、一つの IC で、16000ビット (2K バイト) 以上の容量をもつものまで実用化されている。

以上マイコンを構成する素子について簡単に触れたが、次に、周辺機器として入出力には、キャラクタディスプレイ、タイプライタ、キーボード、プリンタなどがある。オープンリールのテープデッキは、現在のところ、マイコンに接続する例はほとんど知られていない。しかし、技術的には十分可能であり、USGS では、WWSSN のデジタル記録に使用を始めている。デジタルカセット、フロッピーディスクは、プログラムのライブラリーとしては容量は十分であるが (約500K バイト)、データの収録に用いるには容量不足である。その他、AD、DA コンバータや、リモート用端子のある機器があれば、リレーなどを仲介していろいろな使用方法が考えられる。

ソフトウェアとしては、電源を投入すると走り出し、決められた機能を果すプログラムと、オペレータの指示を待ち、解読し、それによって動くモニタプログラムがある。モニタプログラムにも、プログラムを機械語で入力しなければならない簡単なものから、アセンブラやフォートラン、ベーシックなどの高級言語が使用できる高度なものまでであり、高度なソフトウェアは、フロッピーディスクなどに入れて市販されており、速度はともかく質的にはミニコンと余り変わらない。どの程度のソフトウェアを用いるかは、使用目的によって変り、例えば、地震信号の遅延、トリガーなどは、機械語でも容易にプログラムを組むことができる。

マイコンのソフトウェアの特色として、一つは機種が少ない上、互換性があり、多くのプログラムが雑誌等に公開されているため、そのまま利用できることである。今回も、簡易アセンブラ、逆アセンブラ、Tiny BASIC などは、いずれも公開されているものを移し換えて使用したため、ソフトウェアの開発に必要な労力を軽減できた。また、これらのプログラムを解読することによって、ソフトウェアの技術の向上にも役立った。

マイコンソフトウェアのもう一つの特色は、多くのモニタプログラムが会話形式を採用していることである。プログラムを計算機で実行するには、高級言語で書かれたプログラム全体をコンパイル (翻訳) し、機械語に変換して実行する方式と、高級言語で書かれたプログラムの一行一行を、そのつど解釈しながら実行するインタプ

リット方式がある。前者は、高速処理に向き、大型、ミニコンなどで主として用いられている。後者は、処理速度は遅いが、プログラムの作成変更・修正が簡単で、会話形式のプログラムを作り易いという利点がある。

会話形式の代表的なものが BASIC 言語であり、マイコンに用いられているモニタプログラムの多くは、この BASIC か、その簡略型の言語である。Fig. 1 に、1 から 100 までの整数の和を求めるプログラムと、実行までの手順を示す。

	FORTRAN	BASIC
PROGRAM	J=0 DO 1 I=1,100 1 J=J+I WRITE(6,100)J 100 FORMAT(1H,15) STOP END	10 J=0 20 FOR I=1 TO 100 30 J=J+I 40 NEXT I 50 PRINT J 60 STOP
PROCEDURE	PROGRAMMING AND PUNCH CARD COMMAND COMPILE AND EXECUTE PRINT	PROGRAMMING AND KEY IN COMMAND INTERPRET AND EXECUTE PRINT

Fig. 1. Comparison of the programs and computing procedures between FORTRAN and BASIC computer languages.

小さいプログラムで種類を多く作る必要のある場合は、会話形式が適し、少数のプログラムで速く処理を行なう必要性のある場合は、コンパイル方式が適している。

§ 3. 試験に用いたシステムの構成

試験には、インテル社マイクロコンピュータキット SDK-80 を中心に、そのハードウェアを拡張して用いた。SDK-80 を選んだ理由としては、購入当時最も普及した製品の一つであったこと、ハードウェアの拡張変更が、他製品と比べ容易であると判断したことによる。実際には、機能を漸時拡張していったため、プリント基板のパターンの一部までを変更せざるを得なくなった。現在では、より機能の高い製品が多種類発表されているので、それらを選択することができる。

現在使用中のシステム全体の構成を Fig. 2 に示す。これにより、システムの概要を説明する。また、システムの全景写真を Photo. 1 に示す。

3.1 SDK-80 オリジナルキットの概要

インテル SDK-80 のオリジナルキットの主な仕様は、次のとおりである。

- ・CPU 8080A 命令サイクル時間 1.95 μ s, クロック間隔 480ns
- ・メモリ

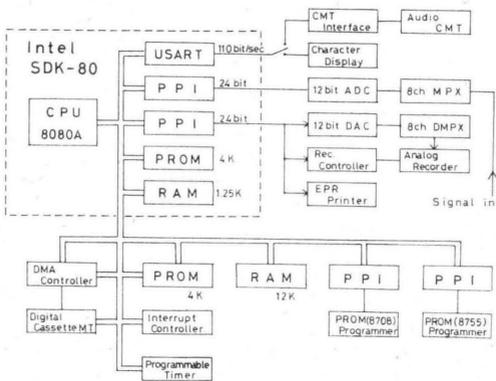


Fig. 2. Block diagram of the microcomputer system used in the present simulation.

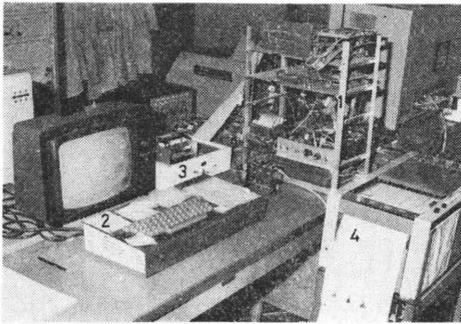


Photo. 1. The microcomputer system used in the simulation. 1. SDK-80 Kit, Memory etc., 2. Character display, 3. Digital cassette tape recorder, 4. Analog recorder

ROM 2 Kバイト (8708または8308使用), 基板上で 4 Kバイトまで拡張可能

RAM 256バイト (8111を2個使用), 基板上で1Kバイトまで拡張可能

アドレッシング ROM 0000-OFFF, RAM 1000-13 FF

入出力

並列入出力 プログラマブル汎用 I/O 素子 8255A を使用

直列入出力 汎用レシーバ/トランスミッタ8251を使用, 転送速度75~4800ボー/秒切換可能

インタフェース

バスライン すべての信号 TTL コンパチブル

並列入出力 すべての信号 TTL コンパチブル

直列入出力 RS 232C/EIA, TTY に対して 20mA の電流ループ

割り込み 単一レベル, RST7 のベクトル割り込み命令 (拡張可能)

DMA機能 HOLD 要求はジャンパ線で切換え

ソフトウェア モニタ 1K バイト分マスク ROM 8308 に書き込み済み, 機能としてメモリ内容のプリント, メモリ内のデータ転送, RAM への書き込み, CPU レジスタの表示, プログラムの実行開始等

電源

V_{CC} 5V±5% 1.3 A

V_{DD} 12V±5% 0.35A

V_{BB} -10V±5% または -12V±5% 0.20A

3.2 周辺装置とコントローラ

周辺装置

SDK-80 キットには, 入出力用周辺装置がないため, 最初に, CRT キャラクタディスプレイを接続し, マイコン技術のトレーニングを行なった. その後, 技術の習得に伴ない, 実験計画を立てて, 出力装置として小型の放電プリンタと, メモリの増設をはかった. 最終的に, メモリはキット実装分を含めて, RAM 13.25K バイト, ROM 8K バイトとした.

外部メモリは, 始め, 主としてプログラムや少量のデータ収録を目的に, 操作が容易なオーディオカセット用の CMT インタフェースを接続し利用した. その後, 実験で地震波データを扱う段階では, さらに, テアック MT-2 型デジタルカセットテープレコーダを組込んだ. このデジタルカセットは, メモリ容量が, テープ1巻で約 500 K バイトあり, データ転送速度も, オーディオカセットに比較して, 問題にならないくらい速く, 割り込みによる処理も可能であり, 現在では, ほとんどデジタルカセットを用いている.

既設の地震計から信号を取入れるため, 8 チャンネルのアナログマルチプレクサと12ビット AD 変換器を, また, 同じく既設のアナログレコーダを利用するため, 8 チャンネルのデマルチプレクサと12ビット DA 変換器を組込んだ.

周辺装置用コントローラ

増設した周辺装置を制御するため, DMA コントローラ, 割り込みコントローラ, プログラマブル・インターバルタイマーを組込んだ.

DMA コントローラ (8257)

8257は, たとえば, 磁気テープ, 磁気ディスク, フロッピーディスクなどのように, 高速で入出力できる I/O 機器と, メモリ間で, データを直接アクセスするためのコントローラである. 本システムでは, デジタルカセッ

トテープレコーダからのデータ転送要求があったとき、CPU 8080 A の働きを一時ホールド (Hold) し、CPU に代ってデータの転送をする機能をもっている。

割込みコントローラ (8259)

8259は、8 レベルの割込み要求を制御し、サブルーチンコール命令を自動的に生成し、CPU へ供給する機能をもっている。8 レベル分の優先順位モード設定、個々の割込みのマスク、ベクトルアドレスの指定などは、全てソフトウェアによって行なうことができる。本システムでは、MT-2、プリンタ、40 Hz クロック、プログラマブル・インターバルタイマーからの出力 (2本) 等、合計 5 レベルの割込み要求を制御している。

プログラマブル・インターバルタイマー (8253)

コンピュータシステムにおいて、しばしば遅延時間の設定、リアルタイムのクロック、パルスの計数、レートジェネレーション、パルスの生成などの、カウンタあるいは、タイマーに関する機能が要求されることがある。8253は、これら一切の機能を果す汎用素子で、独立した 3 組のカウンタを有しており、ソフトウェアで 6 種のモードを設定し、上記の機能を果すことができる。本システムでは、基本クロック入力としてカウンタ 1 には、19200 Hz、カウンタ 2 には、40 Hz を使用し、その 2 レベルの出力を割込み要求信号として、8259に接続した。

PROM 8708, 8755 用書き込み器

常時使用するプログラムを固定するには、作成したプログラムを ROM に書き込みしなければならない。はじめ ROM への書き込みは外注で行なっていた。しかし、外注の手間、納期、ときにはプログラムのデバッグ不足によるミスなどによる不便を解消するために、PROM 8708 の書き込み器を製作した。PROM 8708 は、紫外線で消去可能な素子で、何度でも消去・書き込みができる。この書き込み器によって、作成したプログラムを本システムの PROM に固定することが可能になり、PROM 書き込み・読出しチェック等のプログラムを固定して、常時使用できることになった。

さらに、PROM 8755 を別のシステムで使用するため、8755用の書き込み器を製作した。8755は、紫外線で消去可能な PROM で、メモリ容量 2K バイトの外、I/O ポートをもった複合素子である。CPU 8085 A および、RAM・I/O ポート・タイマーの複合素子 (8155) と共に用いて、わずか 3 素子で小さなマイコンシステムを構成できるものである。この利用例については、すでに気象庁地震観測所技術報告第 1 号 (1980年 2月) に報告済みであるが、後章で簡単に説明する。

§ 4. システム開発用ソフトウェアの拡張

SDK-80 モニタプログラムだけでは、プログラム作成後のプログラム管理、チェック、デバッグ、周辺機器へのデータ転送等が効率よく行なえないので、次に示すような各種ソフトウェアを設け、システムの運用を容易にした。

4.1 アセンブラ・逆アセンブラ等

プログラム作成後のプログラム入力、チェック、デバッグを容易にするために、簡易アセンブラ、逆アセンブラを使用できるようにした。これらは、マイコン関係の雑誌記事を参考に、本システムに適合するよう改良したもので、製作した PROM 書き込み器で ROM に固定した。

しかし、8080A は 1ワード 8ビットであり、命令の種類は 78種類で、それほど多くはない。従って、アセンブラ言語でプログラムを書いても、手作業で容易に機械語に変換可能であり、機械語 (16進値) の方が入力すべき字数が少ないので、むしろ便利な場合もある。従って、マクロ命令の定義ができるような、高度なアセンブラ言語でない限り、アセンブラを用いるメリットは余りない。一方、逆アセンブラは、機械語をアセンブラ言語に変換するプログラムで、他で作成されたプログラムの解読やプログラムのデバッグに非常に有効であった。

4.2 データ転送用プログラム

カセットテープレコーダのオペレーティングプログラム、PROM への書き込み・読出し・チェックプログラム、プリンタの動作サブルーチンプログラム等を自作し、PROM に書き込み常時使用できるようにした。簡単なプログラム例として、メモリダンププログラムを Fig. 3a に示す。このプログラムは、ダンプしたいメモリの先頭番地と終了番地を入力して、キャラクタディスプレイに表示するとともに、必要ならプリンタに印字させるものである。なお、このプログラムリストは、先にのべた逆アセンブラプログラムを用いて出力したものである。Fig. 3b は、メモリダンプの例である。

4.3 Tiny BASIC

マイコン雑誌に公開されている Tiny BASIC インタプリタ (2K バイト) を、本システムに適合するように変更し、使用できるようにした。オリジナルのインタプリタでは、ユーザーが使用できるプログラム領域 (SIZE) は、1K バイト分だけで、多数のデータを処理することができなかった。また、PRINT 機能は、本システムの場合、キャラクタディスプレイに表示されるだけで、計算結果等のハードコピーをとることができなかった。そ

```

5730 005257 CALL 5752
5733 05 PUSH 0
5734 005957 CALL 5756
5737 1E00 HVI E,00
5739 0E20 HVI C,20
573E 0009AF CALL 0F09
573E 7E MOV A,H
573F 008E9F CALL 0F8E
5742 23 INX H
5743 10 DCR E
5744 023957 JNZ 5739
5747 006857 CALL 5768
5749 01 POP 0
574B 009C02 CALL 029C
574E 023357 JNC 5733
5751 0F RST 1
5752 0E02 HVI C,02
5754 005702 CALL 0257
5757 01 POP 0
5758 01 POP H
5759 09 RET
575A 00EE01 CALL 01EE
5760 3E00 HVI A,00
575F 320014 STA 1400
5762 7C MOV A,H
5763 008E9F CALL 0F8E
5766 70 MOV A,L
5767 008E9F CALL 0F8E
576A 09 RET
576B 05 PUSH H
576C 3A0F14 LDA 140F
576F FE00 CPI 00
5771 027C57 JNZ 577C
5774 210014 LNI H,1400
5777 0610 HVI B,10
5779 000F08 CALL 0F0F
577C 01 POP H
577D 09 RET
    
```

(a)

Fig. 3a. List of the memory dump program printed out by the program which converts the machine language into the ASS-EMBLER language.

```

5730 00 52 57 05 00 5A 57 1E
5733 08 0E 20 00 09 0F 7E 0D
5740 0E 0F 23 10 02 39 57 0D
5748 68 57 01 00 9C 02 02 33
5756 57 0F 0E 02 00 57 02 01
5758 01 09 00 0E 01 3E 00 32
5766 00 14 70 00 0E 0F 70 00
5768 0E 0F 09 05 3A 0F 14 FE
5770 00 02 7C 57 21 00 14 06
5778 10 00 0F 06 01 09 00 52
5780 57 05 3E 02 03 33 00 56
5788 57 1E 00 0E 20 00 09 0F
5790 70 87 87 87 87 03 32 70
5798 03 30 08 31 00 0E 0F 23
57A0 10 02 0E 57 09 68 57 01
57A8 00 9C 02 02 01 57 0F 00
57B0 52 57 4E 00 03 01 23 00
57B8 90 02 02 02 57 0F 0E 01
57C0 00 57 02 01 3E 00 22 00
57D0 14 3E 00 03 33 05 01 05
57D8 01 00 00 7E 03 31 70 87
57E0 87 87 87 03 32 75 79 03
57E8 30 1F 0E 40 03 32 3E 7F
57F8 04 02 03 57 38 00 14 3C
57F0 32 00 14 02 0E 57 0F 0F
5800 00 0E 01 0E 40 00 74 01
5808 00 18 02 00 74 01 21 30
5810 58 11 55 58 79 0E 02 25
5818 58 23 5E 22 56 21 00 58
5828 38 38 03 0E 09 23 23 23
5838 00 9C 02 02 15 38 0E 3F
5840 03 05 58 52 90 58 57 25
5848 57 53 03 59 54 13 59 46
5858 00 57 42 00 58 40 0E 50
5868 4E F9 58 45 6E 58 4F 00
5878 59 18 04 58 43 54 59 FF
5888 FF FF FF FF FF FF FF FF
    
```

(b)

Fig. 3b. Memory dump list. Data are presented by hexadecimal code.

ここで、SIZEを8Kバイトに拡張し、さらに、デジタルプリンタの使用をプログラムで制御できるよう機能を拡張して、PROMに書込んだ。Tiny BASICは、本格的なBASICとは異なり、数値は-32768から+32767までの整数しか扱えず、組込み関数もほとんどない。このため、これでリアルタイムのルーチン、全てのシステム操作、各種計算を行なうには、動作スピードの点からみても、むずかしいが、オフラインの簡単な処理・数値計算は可能である。計算例として、後章で歪のデータにベルチェフのフィルタをかける場合を示す。

なお、マイコンのCPUと周辺機器間のデータ転送には、ポーリング方式、割込み方式、DMA方式の3つの方法が考えられる。大量のデータを高速に転送し、CPUの演算時間を効率よく使うには、DMA方式がもっとも優れており、ミニコンの場合、周辺機器とのデータ転送

には、ほとんどDMA方式を用いている。マイコンの場合は、DMA方式はカセットテープ、フロッピーディスクとのデータ転送に使用できるが、マイコンの演算速度が遅いので、ミニコンの場合ほどの効果はあがらないと言われている。本システムでは、DMA方式は実際には使用せず、カセットデッキ、デジタルプリンタを割込み方式で使用した。キャラクタディスプレイ、AD変換器をポーリング方式で使用した。この方式でも、地震信号の遅延・判別などの、リアルタイム処理プログラムを余裕をもって実行させることが可能である。

§ 5. 地震波のデジタルデータ収録

地震波をデジタルデータで収録することは、データの解析、データのダイナミックレンジの面で大きな向上が期待され、今日では、種々の収録方式が行なわれている。しかし、他面データ量は、アナログに比べて大量になるために、地震の起った時だけ信号を記録するいわゆる“データの遅延→地震判別→データ収録”の方式が必要となる。この方式は、アナログの磁気テープ収録の場合にも用いられ、気象庁では、松代群発地震の特別観測を実施したときに初めて試みられ、その後、67型磁気テープ地震計で実用化された。67型の場合、データの遅延には磁気ドラム、地震判別にはアナログコンパレータが用いられている。磁気ドラムは、S/N比を40dB確保するのが限界であり、最近では信号をAD変換後デジタルメモリにいれ、DA変換して取り出す方式に変わりつつある。この方式では、AD変換器の性能だけS/N比が確保できるが、高い周波数まで記録するには、メモリの容量を大きくしなければならない。地震の判別をアナログコンパレータで行なう長所は、低コストであるが、雷などの誘導や、人工的な雑微動によってもトリガーされやすく、脈動の振幅の消長が大きいところでは、レベルの設定が不確かであると、トリガーがかかったままになることがある。

マイコンは、比較的低コストで、アナログコンパレータではできなかった地震とノイズの識別を、プログラム次第で実現できる可能性をもっている。

一方、ミニコンをリアルタイム処理で、トリガーに用いることは、コストの上からは無駄が多いようにも考えられる。

ここでは、地震波をマイコンを用いて、デジタルデータで、磁気テープ(カセット)に収録するため、データの遅延・地震判別とトリガー時刻の精度、および実際のデータ収録方法についての実験内容について述べる。

その実験システムの構成を Fig. 4 に、また、使用した地震計の特性を Fig. 5 に示す。ただし、Fig. 5 の BS はルーチンで使用している地震計で、比較のために記載した。

5.1 AD 変換およびデータの遅延

地震信号のデジタル変換は、Fig. 4 に示すように 8 チャンネルのマルチプレクサと、12ビットの AD 変換器で構成し、短周期地震波は 40 Hz、長周期地震波は 4 Hz サンプリングとした。これにより、最大 7 成分の地震波と時刻 1 成分の同時収録を可能にした。

データの遅延には、短周期地震波については 4 成分でメモリ (RAM) 4K バイト、長周期地震波については 2K

バイトを使用して行なった。以下、短周期 4 成分のデータの遅延について述べる。

遅延は、入力された 4 成分のデータを、あらかじめ定められたメモリ領域の最初から、順次格納して行き、メモリ容量がいっぱいになった所でまた領域の最初にもどり、くりかえして使用することで行なった。メモリ 4K バイトでは、1 データが 2 バイトで、4 成分 512 組のデータを記憶させることができるので、40 Hz サンプルで、12.8 秒の遅延が可能である ($2 \times 4 \times 512 = 4096$)。しかし、トリガーが遅れることを考えれば、もっと長い、たとえば 30 秒程度の遅延ができることが望ましい。

データの入出力、および遅延のための 40 Hz 割込みプログラムのフローチャートを Fig. 6 に示す。このプログラムは、後述する他のプログラムによる情報を用いて、次の機能をもたせてある。①トリガー中は、12.8 秒間遅延されたデータを、DA 変換してアナログレコーダに出力する。②AD 変換されたデータを入力しメモリに

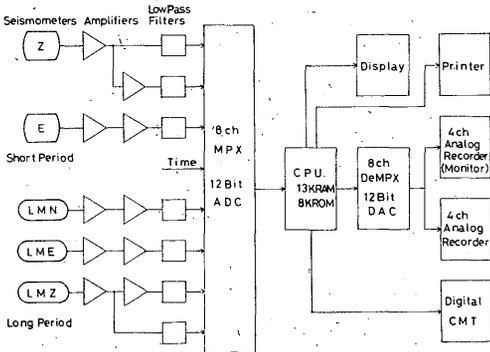


Fig. 4. Block diagram of the earthquake recording system for a short period seismometer.

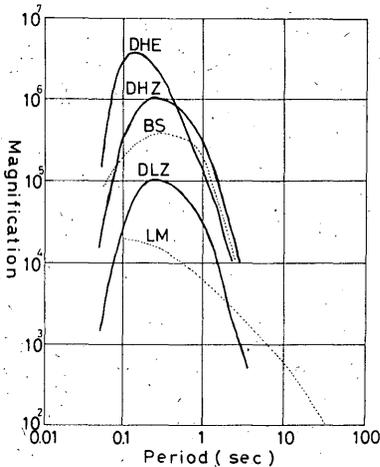


Fig. 5. Frequency response of a seismometer used in the simulation. BS shows the response of Benioff type short period seismograph which has been used in the routine observation in the observatory.

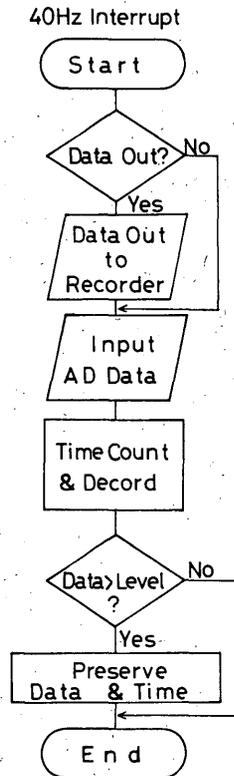


Fig. 6. Flow chart of interrupting program for data acquisition and signal delay. The program runs every 25 millisecond and each execution requires 3 millisecond.

格納する。③時刻を計数する。④時刻符号を解読する。
 ⑤データがトリガーレベルより大きいときは、トリガー時刻表示のため、そのデータと時刻を保存する。このプログラムに要する時間は、約3msである。40Hzサンプルで行なう場合、割込みプログラムは25ms以内であればよいので、まだかなり余裕があり、もっと複雑な処理を行なうことが可能である。

5.2 短周期地震波の地震判別(トリガー)

トリガーをプログラムで行なう方法は、SRO, ASROシステムですでに実用化されており、その方式は験震時報*により紹介されている。この方式(SRO方式と呼ぶ)の特長は、デジタル的にバンドパスフィルタをかけ、速地震波を識別しやすいように処理し、さらに、脈動の消長などを測定して、トリガーレベルがノイズレベルに追従して、大きくなったり小さくなったりすることにある。SRO方式では、脈動や極近地震を除外することに効果がある反面、20秒間の信号の積分値と1秒間の積分値を比較するため、誘導ノイズなど単純なパルスでも振幅が大きければ、誤動作するという短所がある。

そこで、トリガーの仕組みとして、いくつかの方式を考えて試験を行なってみた。

まず、もっとも簡単な、トリガーレベル以上の信号がくれば、すべて地震とみなす方式(a方式)、次に、ある設定時間(数秒間)に、トリガーレベルを越える信号の波が、設定回数以上きたとき、地震とみなす方式(b方式)のテストを行なった。a方式では、設定パラメータが一つだけであるが、b方式では、トリガーレベル、トリガーの判別時間(ウィンドー)、波数の三つのパラメータがある。また、これらの改良型についても検討を行なったので、それぞれについて特長・短所等をのべる。しかし、ノイズレベルの変動に、トリガーレベルを追従させるSRO方式は、プログラムが長くなるので今回は採用しなかった。また、デジタル的にバンドパスフィルタを構成することは、トリガーとは切り離して実験して

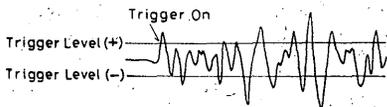


Fig. 7. Scheme for the simple trigger method (a). At moment when a signal exceeds trigger threshold, detection is declared. Only one parameter (trigger threshold) is used.

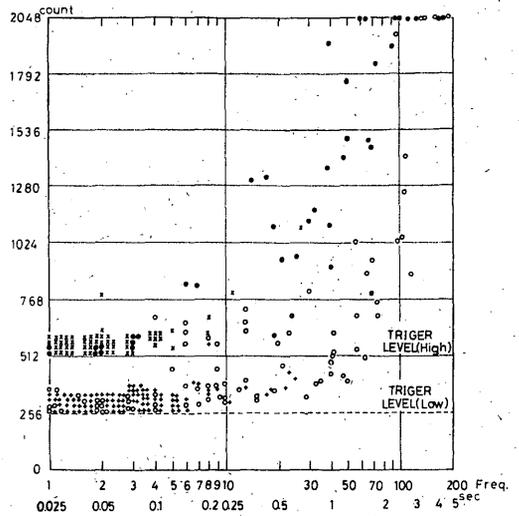


Fig. 8. Some characteristics of detected signals are shown. Maximum amplitude (in digit) versus total duration of signal which exceeds the trigger threshold.
 ○, x: Detected earthquake and noise, respectively. A 256-counts is chosen for the trigger threshold.
 ●, +: Detected earthquake and noise, respectively. A 512-counts is chosen for the trigger threshold.

みたので、これについては後章で述べる。

単純トリガー(a方式)

単純トリガー方式は、入力したデータの絶対値が一回でもトリガーレベルを越えたとき、地震と判断(トリガーON)する方式である。(Fig. 7 参照)。

この方式は、プログラムが非常に簡単であるが、ノイズ・脈動の変動による誤動作(ミストリガー)の発生する率が高い。プログラムに要する時間はわずか数百μs程度である。

Fig. 8は、その試験結果である。トリガーレベルをかえて試験してあるが、いずれの場合もノイズによるミストリガーの率がかなり高い。図には、トリガーがかかってから、5秒間の最大振幅と、トリガーレベルを越えたデータの回数(時間)を示してある。図を見ると、ノイズに比べて、地震の場合は、トリガーレベルを越えている回数(時間)が多く(長く)なっている。このことから、次に、単純トリガー方式を改良してミストリガーの率を減少させる方法を考えてみる。

単純トリガーの改良(a'方式)

a方式を改良して、入力したデータが、M秒間(ウイ

* 験震時報 第44巻 第1~2号(1979): ASRO 地震観測システムについて

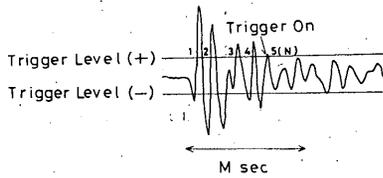


Fig. 9. Scheme for the modified trigger method. 3 trigger parameters are used. Detection is declared when signal exceeds the threshold more than $(N/40)$ second in time of M seconds just after a signal exceeded the threshold.

ンドー)に、 N 個($N \times 1/40$ 秒)以上トリガーレベルを越えたとき、地震と判別する方式を考えてみる (Fig. 9)。この方式は、トリガーレベル、トリガーレベルを越えるデータの数(時間)、トリガーを判定する時間(ウィンドー)の3個のパラメータがある場合の例である。a方式に比べて、ノイズによるミストリガーの率は少なくなるが、脈動のように周期の長いノイズによるミストリガーの率は減少させることはできない。このプログラムは、ウィンドーを5秒間に設定して200個のデータの大きさを判別し、トリガーのONまたはOFFを決定するまで、約のべ93msの時間を要する。

それでは、次に、脈動のような比較的周期の長いノイズを除去する方法を考えてみる。

ある設定時間(ウィンドー)に、トリガーレベルをこえる波数がある定めた回数以上になったとき、トリガーONとする方式(b方式)

この方式は、Fig. 10のように、 M 秒間に、トリガーレベルを N 個以上の波数がこえたときトリガーONとする方式である。この方式も、パラメータが3個の場合で、プログラムに要する時間は、a'方式と同じ程度である。この方式で、たとえば、 M を5秒、 N を5個と定めると、平均周期1秒程度以上の波は、トリガーされない。このため、脈動によるミストリガーを除去すること

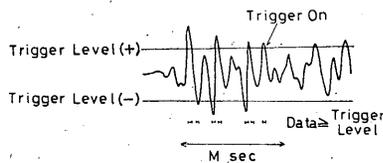


Fig. 10. Scheme for another trigger method (b). Detection is declared when N waves which exceed the threshold arrive in M seconds just after a signal exceeded the level.

ができる。また、パルス状のノイズによるミストリガーも除去できるが、連続した短周期ノイズによるミストリガーは除去できない。

Fig. 11は、b方式で、5秒間に5波以上、設定したトリガーレベルを越えたとき、トリガーONとする方法でとったものの、最初にレベルをこえて、トリガーONとなるまでの時間と、それまでの最大振幅をプロットしたものである。

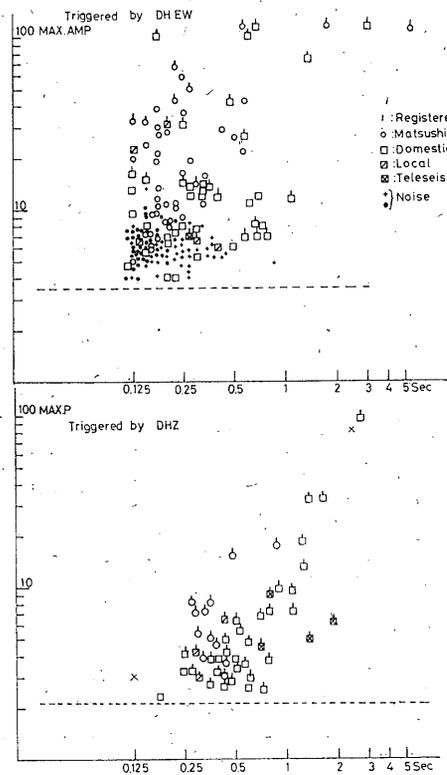


Fig. 11. Characteristics of the triggered signal by the method (b). This plot shows relation between the maximum amplitude and time interval (of signal) measured from the start of detection processing until detection is declared. Signals of large amplitude and longer period need more time to be triggered.

- | : Visually evaluated and registered earthquake from BS seismograph.
- : Earthquake occurring near the observatory.
- ⊠ : Local event of $S-P < 10$ seconds
- : Earthquake which occurred in and around Japan.
- ⊞ : Teleseismic event.

Fig. 12 は、トリガーが宣言されたときまでの最大振幅と、トリガーレベルをこえた時間の割合を示してある。いずれも、トリガー成分に上下動、または、東西動をもちいた場合を示した。地震計の特性の相違により、とれた地震の種類が異なっている。一般的傾向として、振幅の大きな地震ほど、周期が長く、トリガーレベルをこえている時間の割合が大きいのという、極めて当然な結果が出ている。

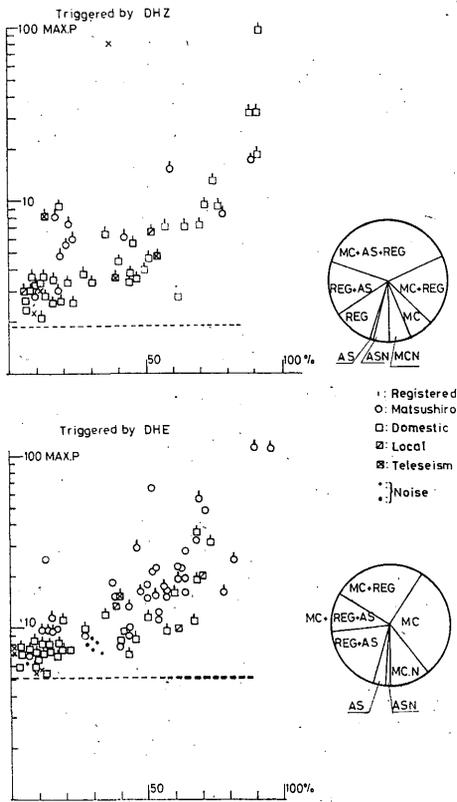


Fig. 12. Other characteristics of the triggered signal. Maximum amplitude versus percentage in which signal exceeded the threshold during the detection processing.

Circle graphs show the ratio of the events which are triggered by different methods.

- MC : Events triggered by the method (b)
- AS : Events triggered by ASRO system
- REG : Manually extracted events
- MCN: False signals triggered by the method (b)
- ASN : False signals triggered by the ASRO system

Fig. 12 の円グラフは、マイコンシステムでトリガーされたもの、ルーチンで検測している地震(BSによる)、ASRO (主として遠地地震をトリガーする特性をもっている)でトリガーされたものを比較したもので、地震の種類別の割合を示してある。上下動を用いた場合、ルーチンで検測するものと比較的一致している。これは、地震計の特性 (Fig. 5 参照) が似ているからである。東西動の特性は、他のものより短周期であるため、松代地震 ($P\sim S$: 3秒以下)、極近地震 ($P\sim S$: 10秒以下)が、かなり多くとれている。

次に、このb方式を少し改良して、周期のやや長い遠地地震をもう少しとりいれる方法、および、連続した短周期ノイズを除去する方法について考えてみる。

b方式の改良

b方式で、5秒間にトリガーレベルをこえる波数を3~4回にすると、平均周期約1.7~1.3秒までの地震がとれることになる。一方、短周期をカットするため、3~4波に要した時間を、1.5~2.0秒以下は、トリガーONとしないことに改めると、平均周期0.5秒以下は除去することができる。この方式は、パラメータが4個の例である。このような方法によって、連続した短周期ノイズのミストリガーを減少させることができたが、反面、松代地震、極近地震等の短周期が卓越した地震のトリガーONの時刻のおくれる傾向が見られるようになった。これは、ごく近い地震の場合、P波立ちあがり部分では、非常に短周期であるが、S波部分や、振動の後半は、見かけの周期はやや長くなっており、その部分でトリガーされるようである。特に、やや大きな地震では、見かけの周期は短いので、P波でトリガーしにくい。やや大きな地震を確実にとるためには、レベル判断を二重にしておき、波数が定められた数になったとき、再度レベル判断を行えば、短周期であっても、トリガーを宣言することができる (Fig. 13 参照)。

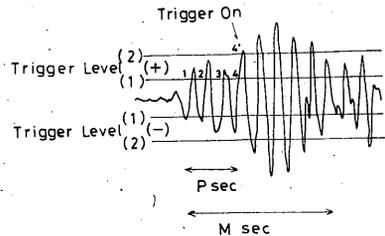


Fig. 13. Scheme for the modified (b) method. Two parameters are added to reject short period noise.

このb方式を改良したトリガープログラムは、パラメータが、トリガーレベル2個、波数、トリガー判定時間、制限時間の合計5個の例である。このプログラムのフローチャートを Fig. 14 に示す。このプログラムに要する時間はのべ約 96 ms である。

なお、トリガーレベルは、そのトリガー方式によって異なるが、通常のノイズレベルより2~3倍大きくしておくのが適当である。また、短周期ノイズは、昼間に比べ夜間はかなり低くなるので、時刻によってトリガーレベルをあらかじめプログラムで書きかえるようにしておけば、夜間には比較的小さな地震を観測することができる。

マイコンなど、デジタル信号で、トリガーを行なう上で、注意すべき点は、信号のオフセットと、入力信号の入力レベルである。地震の信号には、増幅器のオフセット電圧がのっているのが普通で、オフセットが大きいと、信号の極性によって、実質上トリガーレベルに差が生じる。松代の場合、アナログ信号の段階で、このオフセットを十分に、小さくするよう調整した。プログラム

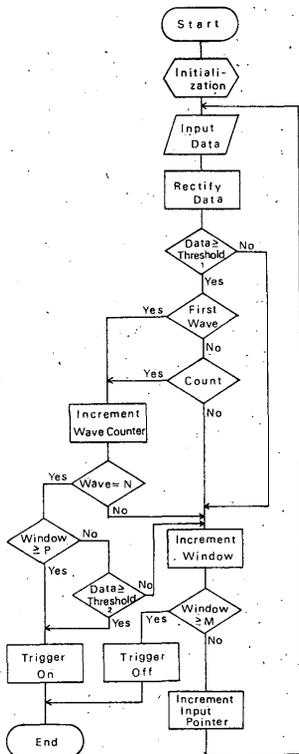


Fig. 14. Flow chart of the modified trigger method (b).

により、このオフセットを計り、補正する方法をとりいれれば、アナログ部分での微細な調整は不要となる。

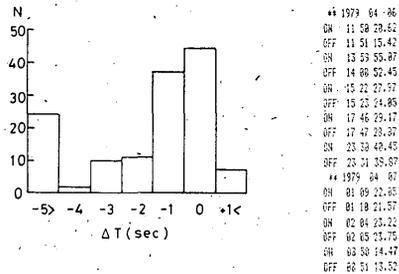
一方、入力信号の大きさは、トリガープログラムの演算に影響する。たとえば、普段のノイズ信号が、±1 カウント前後の場合と、±10 カウントでは、前者はトリガーレベルの刻みが、ノイズに対し相対的に荒くなる。また、オフセットの大きさによっては、信号の極性が偏よって、プログラムの実行に困難性が伴う、ノイズレベルが、±10 カウント程度であれば、トリガーレベルの刻みも、ノイズレベルの10%程度まで細かくすることが可能である。しかし、余り大きくし過ぎると、今度は、実質の入力ダイナミックレンジが狭くなる。SRO方式のトリガープログラムでは、AD変換した信号の内、どのビット範囲をトリガーの演算に用いるかは、選択できるようになっている。実際の使用経験では、冬期と夏期では、脈動レベルが異なるため、信号のうちとり出すビット範囲は、1~2ビットずらす必要がある。

マイコンでトリガーを行なう上でも、AD変換を行なう前の段階で、その周波数範囲、オフセット、入力レベルをどの程度調整するかは、トリガープログラムの複雑さと関係するので、十分に検討する必要がある。

今回のトリガープログラムの試験結果は、気象庁で設置した東海沖の海底地震計のトリガープログラムの改良に応用した。

5.3 トリガー時刻の吟味

このシステムでは、データの時刻管理は、時刻符号化装置からの時刻符号によって行なっている。この時刻符号は Fig. 15 に示すように、時分マークの間に、認識番



Min	4	2	2	2	1	3	9	5	Min
Mark	Min	Hour	Day	ID	Mark				

Fig. 15. Histogram showing the time difference between P arrival and triggered times for the modified method (a'). J.M.A. standard time code is shown. The code indicates the station ID=59, 31 Day, 22 Hour, 24 Minute.

号と日時分をBCDコードで構成されている。地震波信号と同時にAD変換して、時刻データとしてシステムに入力されている。システム内では、データからコードを解読し、日時分を決め、秒位は時分マークに同期させた内蔵タイマー(プログラマブル、40 Hz)によって算出している。このため、収録している地震波データの時刻精度は、使用している時刻符号化装置の精度(日差0.1秒程度)に、最大 $1/40$ 秒のおくれが加わったものとなる。

前述した単純トリガーを改良した方式(a'方式)によるトリガー時刻とルーチンで検出した地震のPの時刻の比較をFig. 15に示した。このトリガー時刻は、トリガーレベルを越えた時の時刻を常に記憶しておき、トリガーONとなった時に出力するようにしてあるので、トリガー判定によるプログラムに要する時間(93 ms)の遅れが見こまれる程度である。Fig. 15右側にトリガーON、

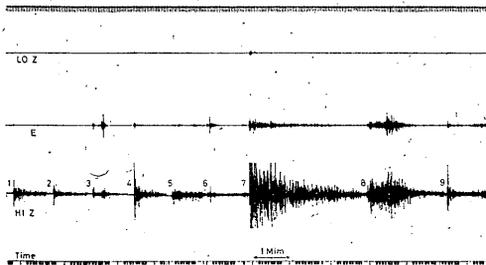


Fig. 16. Earthquake records stored in a half side digital cassette MT.

OFFの時刻出力例を示した。このトリガーONの時刻は、図に示すように、全体に検出時刻より多少遅れているが、大半が1~2秒以内に納まっている。5秒以上の遅れのあるものは、S波でトリガーされたものがほとんどであり、P波がトリガーレベルより小さいために生じたもので、ある程度は止むを得ない。

5.4 デジタルデータの収録・再生およびデータのプリント

これまで述べたように、データの遅延、および、トリガーが確実に動作することが確認できたので、カセットテープに地震のときだけ、データを記録することにした。デジタルカセットテープ1巻のメモリ容量は、約500 Kバイトで、40 Hz サンプルングを行なうと、4成分のデータが約26分間記録できる。

収録は、トリガーが宣言された時、12.8秒遅延されたデータを、12.8秒間ずつ5回(64秒間)、割込み方式によってカセットテープに書き込むことにした。もち論、その間アナログレコーダは始動させ、遅延された4成分のデータを出力し、記録がモニターできるようにした。64秒間のデータ書き込み終了後、再度トリガー判定を行ない、レベルが高い場合は、さらに64秒間のデータを書き込む方式で行なった。

このようにして収録した地震記録は、別のプログラムで、40~100 Hzの速度で再生できるようにした。テープから再生した地震記録の例をFig. 16, 17, 18に示し

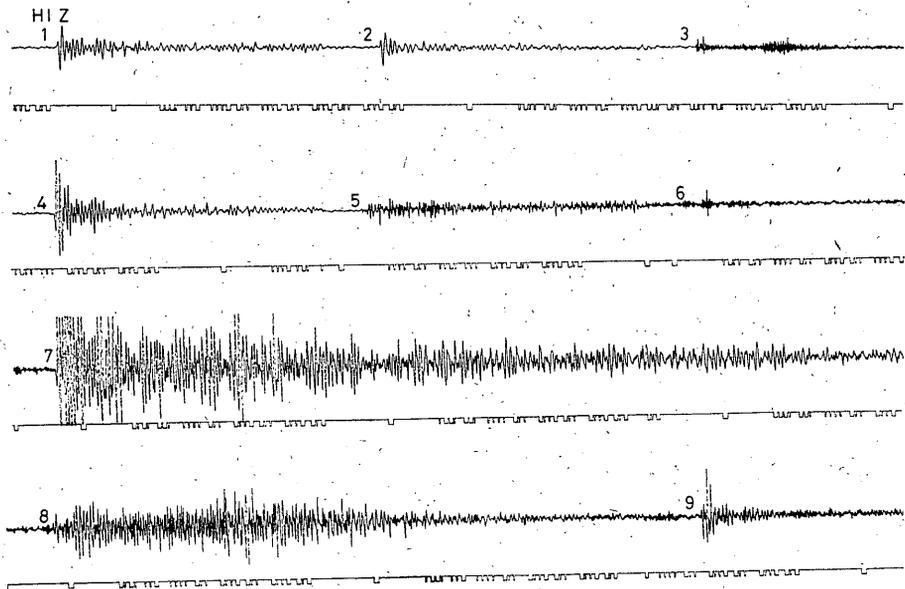


Fig. 17. Prolonged records shown in Fig. 16.

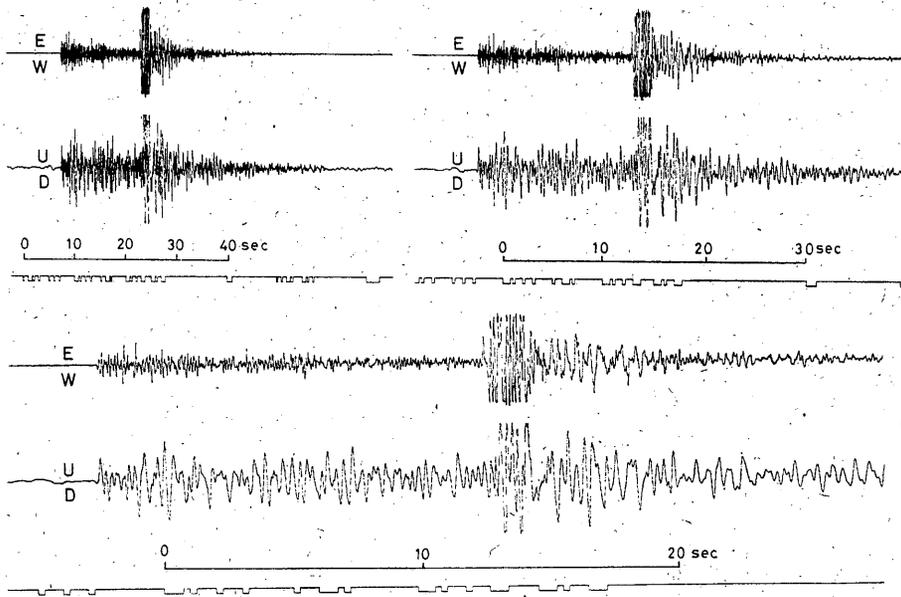


Fig. 18. Examples of the records. Same events are played back by different chart speeds.

た。Fig. 16 は、テープ片面に記録できる地震を全て示したもので、Fig. 17 は、その地震のタイム成分と上下動1成分のみを、時間軸を大きくして再生したものである。Fig. 18 は、ある近地地震を時間軸をかえて再生した例である。

カセットテープに記録された地震のデータを、別の電算機で解析するため、デジタルプリンタに表示するプログラムを作成した。1成分のデータとタイム、または、全データをプリントできるようにした。

この短周期地震波の試験に用いた地震計は、大地震の余震観測を目的として設置されたもので、増幅器から記録器に直結されており、大地震発生後、手動で始動させていた。大地震発生直後は、緊急検測その他の業務のため、記録器を始動させるのを忘れ勝ちである。この試験システムでは、自動的に地震のときだけ記録がとれるばかりでなく、CRT およびプリンタにその時刻が表示される。今後、遅延時間を30秒程度にして、この地震計専用のシステムを製作したいと考えている。

5.5 長周期地震波のデータ収録

これまで、短周期地震波についてだけ試験を行ってきたが、長周期地震波もデジタル記録して利用したいので、長周期波データの収録試験を行なった。

初めは、同じカセットテープに、40 Hz サンプルの短周期波をトリガー方式で、1 Hz サンプルの長周期波は全てのデータを記録する方法で行なってみた。しかし、同

じカセットテープに記録すると、テープが早く終わってしまい、長周期波データの必要部分が収録できないことが多い。また、再生する場合、短周期データ、長周期データが混在しているので、連続した波形が得られないことがある。そのため、同時記録は中止し、Fig. 19 に示すように、長周期データ成分（長周期地震計3成分、ひずみ計2成分、埋込み傾斜計2成分）とタイム1成分を接続し、収録することにした。1 Hz サンプルで8成分収録すると、カセット片面に4時間程度しか記録できない。1 Hz サンプルでは、やや短い周期の解析ができない。ア

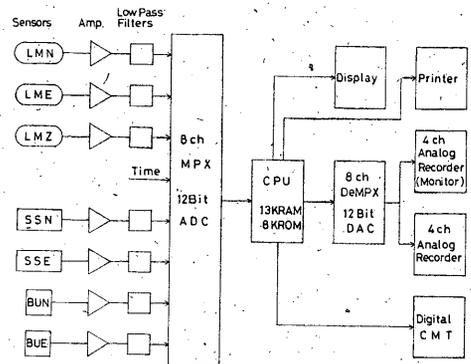


Fig. 19. Recording system for longer period signals. Signal is sampled at 4 Hz.

- LM: Long period seismometer
- SS: Strain seismograph
- BU: Bubble type tiltmeter

ナログレコーダに再生してみると、波形を見るには、もっとサンプル周波数を高くする必要が認められる。このような理由で、カセットテープに収録するには、やはりトリガー方式で行なうことが必要である。結局、8成分を4Hz サンプルで、トリガー方式で収録することにした。この方法で、カセットテープ片面には、約1時間記録できるので、遠地震の主要部分は切れ目なく記録可能である。

デジタルカセットテープに収録した地震のデータは、短周期波データ同様、再生およびデータ値をプリントできるようにした。この収録試験でとれた地震の再生例を Fig. 20 に示した。また、データのプリント例を、Fig. 21 に示した。なお、データをプリントする際は、生データをそのまま表示するばかりでなく、数個のデータの平均値も計算して出力できるようプログラムを作成した。

§ 6. デジタルフィルタの試み

6.1 リアルタイム処理の例

デジタルフィルタは、地震波の波形解析や、トリガー判定による各相の検出に有効な結果をもたらす。一般のデジタルフィルタは、連続的な観測データに重みを乗じ、その平均値を求める手法によっているが、波の減衰特性や、通過帯域の波のゆがみ(サイドローブ)を意識して、理想的なフィルタリングを行なうには、結構ぼう大な演算を必要とする。

ここでは、§ 5. に示したトリガー判定による地震波収録に際して、トリガーの誤動作を軽減する目的で考案したフィルタの例を示す。

方法

マイコンの演算速度があまり速くないこと(たとえば、2バイト・2バイトの乗除算1回で約1.5ms)から、一般的な時系列データに重みをかけ、その平均値を求める方法はリアルタイム処理には用いられない。このため、今回の実験では、中川(1961)による地球潮汐の観測資料よりドリフトを消去する方法に準拠してフィルタを設計した。

中川の方法は、地球潮汐の連続観測データにおいて、任意時刻 t における観測値 Y_t が

$$Y_t = \sum R_n \cos(\omega_n t - \epsilon_n) + D(t) \dots \dots \dots (1)$$

で表わせる(ただし、 ω_n , R_n , ϵ_n はそれぞれ分潮 "n" の速度, 振幅, 位相)として、時刻 t_0 におけるドリフトが、ある条件下で、 t_0 を中心に対称な任意数 (m) のデータを適当に加え合わせ、その平均を求める操作で、各分潮を零またはかなり小さくすることで決められるとす

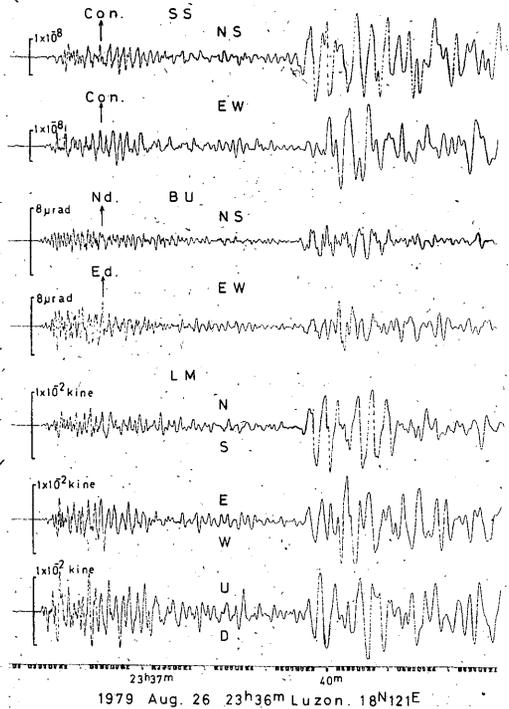


Fig. 20. Examples of a distant earthquake having long duration obtained by various seismographs.

79 08 26 23 37 03.30			
0052	0000	0274	0131
0008	-0075	0105	-0009
0194	0000	0194	-0050
-0012	-0035	-0031	-0324
-0062	0000	0053	-0235
-0015	-0021	-0159	-0408
-0309	0000	-0050	-0379
-0009	0006	-0215	-0528
-0474	-0002	-0105	-0426
0007	0035	-0201	-0443
-0569	-0001	-0119	-0405
0036	0052	-0151	-0282
-0508	-0002	-0120	-0327
0058	0062	-0104	-0090
-0525	0000	-0156	-0255
0060	0076	-0119	0022
-0420	0000	-0104	-0203
0062	0005	-0136	0052
-0312	0000	-0196	-0159
0001	0009	-0130	0050
-0196	-0001	-0103	-0092
0112	0072	-0103	0093
-0103	-0001	-0124	-0035
0125	0042	-0027	0129
-0062	0000	-0020	-0015
0119	0000	0009	0094
-0062	0000	0068	-0007
0113	-0034	0159	0044
-0050	0000	0131	0022
0002	-0030	0100	0050

Fig. 21. Print out of one block data corresponding to a record shown in Fig. 20.

るものである。(1)式は、 ω_n , R_n , ε_n をそれぞれ地震波の周期成分“ n ”の速度、振幅、位相とすれば、そのまま地震波の処理に適用できる。中川は、説明のなかで、加え合わせる基本形として、 \textcircled{a} $t_0 \pm p$, \textcircled{b} $t_0, t_0 \pm p$, \textcircled{c} $t_0, t_0 \pm p, t_0 \pm q$ を示している。ここでは、この3基本形の組み合わせから、演算回数、通過帯域での波のゆがみ(サイドローブ)を考慮してフィルタを構成した。基本形 \textcircled{a} , \textcircled{b} , \textcircled{c} の係数(周期特性) A_n は、次のとおりである。

$$\begin{aligned} \textcircled{a} \quad t_0 \pm p & \quad A_n = \cos p\omega_n \\ \textcircled{b} \quad t_0, t_0 \pm p & \quad A_n = \frac{1}{3}(1+2\cos p\omega_n) \\ \textcircled{c} \quad t_0, t_0 \pm p, t_0 \pm q & \quad A_n = \frac{1}{5}(1+2\cos p\omega_n+2\cos q\omega_n) \end{aligned}$$

ただし、 $t_0 \pm p, t_0 \pm q$ は $t_0+p, t_0-p, t_0+q, t_0-q$ の時刻を意味し、 $0 < p < q$ の整数とする。

フィルタの特性

実験に用いている地震計は、周期約 1~0.5 秒の地震波を観測対象としたものであり、周期 4~5 秒付近の脈動、および、周期 0.3~0.2 秒付近に卓越する観測所付近に発生源のある人工的ノイズが、観測に悪影響を及ぼしている。このことから、フィルタは、通過帯域を 1~0.5 秒とし、他の帯域はできる限り除去することとした。データのサブプリングはマイコンの演算速度を考慮して 20 Hz とした。

High Pass Filter

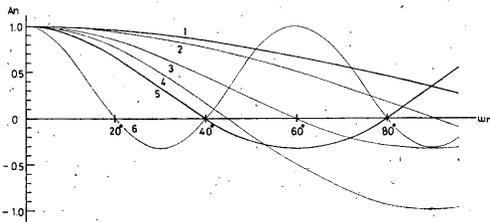


Fig. 22. Relation between amplitude A_n and angular frequency ω_n for the selected mean modes a and b .

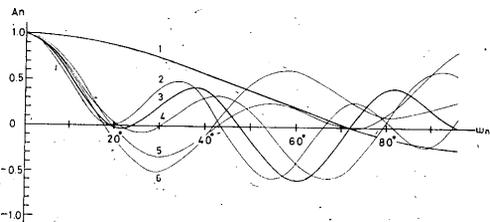


Fig. 23. Relation between amplitude A_n and angular frequency ω_n for the mode c .

前述した3基本形およびその適当な組み合わせ(\textcircled{a} , \textcircled{b} など)から得られる特性は、低域通過または帯域除去になる。また、もとの観測データから計算した結果を減算することで、逆の高域通過または帯域通過特性が求められる。このことから、遮断周期 1 秒の低域フィルタを作るには、 $\omega_n=18^\circ$ で $A_n=0$, $\omega_n>18^\circ$ で A_n が零もしくはかなり小さく、 $\omega_n<18^\circ$ では急激に零に近づく特性をもつ A_n を与える組み合わせを求めればよい〔実際には、後段でかける Low Pass Filter によって、ピークの位置がずれる可能性があるため、遮断周期を 0.9 秒 ($\omega=20^\circ$) とした〕。

Fig. 22, 23に前述した \textcircled{a} : $p=1, 2$, \textcircled{b} : $p=1, 2, 3, 6$, および \textcircled{c} : $p=3, q=8, 9, 10$, $p=4, q=7$, $p=5, q=7$ についての A_n と ω_n の関係を示した。これらはいずれも、 $\omega_n \geq 20^\circ$ で A_n に初めて零を与えることがあるもので、実際に使用可能と思われるもののみを示してある。今3基本形の2つの掛け合わせた組み合わせ(\textcircled{b} \textcircled{c} , \textcircled{a} \textcircled{b} など)で、 $\omega_n=20^\circ$ で、 $A_n=0$ および $\omega_n>20^\circ$ で A_n が常に零に近い状態が保持できる組み合わせを求めるとすると、図から \textcircled{c} の各組に \textcircled{b} : $p=2$ または 3 を組み合わせるのがよいことがわかる。Fig. 24 は、 \textcircled{c} の各組に \textcircled{b} : $p=2$ または 3 を掛けた組み合わせを示したものである。各 A_n に大きい相違はないが、 $\omega_n>20^\circ$ で A_n が常に零に近い状態に保持される。 \textcircled{b} : $p=3$, \textcircled{c} : $p=3, q=9$ の組み合わせを用いることとする。この組み合わせによるデータの演算は次のようになる。

$$A'(t_0) = \frac{1}{15} [3A(t_0) + 2A(t_0 \pm 3) + 2A(t_0 \pm 6) + A(t_0 \pm 9) + A(t_0 \pm 12)]$$

High Pass 特性を持った値 $A''(t_0)$ はもとのデータ $A(t_0)$ から $A'(t_0)$ を引くことで得られる。

Low Pass Filter

Low Pass Filter は、急激な減衰をもつ特性を得ることが難しい(Fig. 22 の \textcircled{a} : $p=1, 2$, \textcircled{b} : $p=1$, \textcircled{c} : $p=1$,

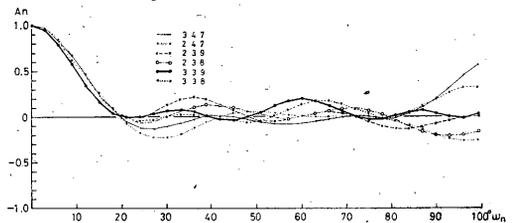


Fig. 24. Relation between amplitude A_n and angular frequency ω_n for the selected mean of combined modes b and c with different pair of p and q .

$q=2$ の特性参照) ので, 0.25 秒 ($\omega_n=72^\circ$) 付近で A_n が零になるようにした. Fig. 23 から $\omega_n=72^\circ$ 付近で A_n を最初に 0 にするのは, ㊸: $p=1, q=2$ であることがわかる. しかし, この A_n の特性は, $\omega_n=105^\circ$, および $\omega_n=180^\circ$ でサイドローブが表われ ($\omega_n=104.48$ で $A_n=-0.25, \omega_n=180^\circ$ で $A_n=0.2$), このままでフィルタを作ると 0.17 秒, 0.1 秒, 0.07 秒付近にサイドローブの影響によって, 短周期ノイズの除去に不十分な面が表われる. このために, $\omega_n=100\sim 110^\circ$ 付近で A_n が 0 になる ㊸: $p=1$ を掛け合わせることにした. Fig. 25 は, ㊸: $p=1, 2$ とフィルタに用いた組み合わせの A_n と ω_n の関係である. 図から第 1, 第 2 のサイドローブの影響は, 十分小さくなっているのがわかる. 前段によって得られた値 $A''(t_0)$ に, ここで示した組み合わせに次式の演算をほどこせば, Band Pass Filter が得られる.

$$A'''(t_0) = \frac{1}{15} [3A''(t_0) + 3A''(t_0+1) + 2A''(t_0 \pm 2) + A''(t_0 \pm 3)]$$

このようにして求めたフィルタの総合特性を Fig. 26 に, 測定した各周期の応答記録例を Fig. 27 に示した. 実際の地震波データに, このフィルタを用いた場合の例を Fig. 28 に, また, 脈動のやや大きいときの例を Fig. 29 に示した. 短周期の人工ノイズおよび数秒の脈動領域の信号は, かなり除去され, 記録はかなり見易くなっていることがわかる.

6.2 Tiny BASIC による演算例

本システムには, 前述したように, 容易に簡単な演算が行なえるように, Tiny BASIC インタプリタが装備されている. Tiny BASIC は, 演算機能としては整数 ($-32768 \sim 32767$ の範囲) の加減乗除算だけであるので, 複雑な計算を行なうことはできない. しかし, 各種の制御ステートメント (GOTO, IF, FOR, NEXT, STOP, GOSUB, RETURN, CALL) および, 一次元配

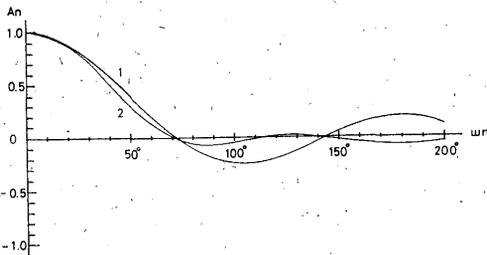


Fig. 25. Relation between A_n and ω_n for the preferred combination of selected mean mode c with $p=1, q=2$ and combined mode b with $p=1$ and c with $p=1, q=2$.

列を使用できる点, プログラムの修正, 編集が, 会話形式で簡単にできるなどの利点がある. また, 装置にインタプリタを移植する際に, SIZE を 8K バイト (4000語) に, 演算結果をプリンタに出力するように機能を拡張したために, 通常の電卓では行なえない多数の時系列データの, 簡単な処理に手軽に利用できる.

ここでは, 地殻変動 (ひずみ観測) データにおける,

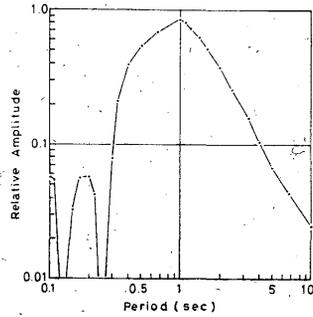


Fig. 26. Frequency response of a digital band-pass filter.

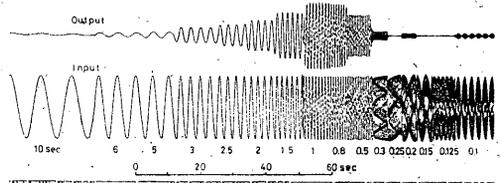


Fig. 27. An example of input (lower) and filtered (upper) signal.

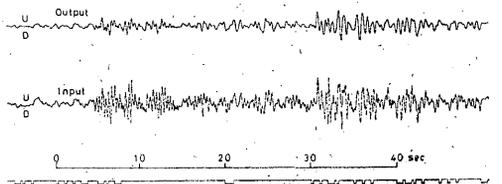


Fig. 28. An example of input and filtered output signal.

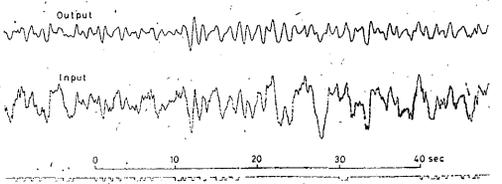


Fig. 29. An example of output processed by a digital bandpass filter and input signal.

地球潮汐成分とそれより長い周期成分〔直流成分 $D(t)$ 〕の分離を行なう演算例を示す。

演算方法は、前項(6.1)で説明した中川(1961)の文献にあるベルチェフによるもので、15個のデータの加算と1回の除算で、潮汐成分の除去ができる。観測データを $A(t_0)$ とした時、時刻 t_0 の直流成分 $D(t_0)$ は次式で求められる。

$$D(t_0) = \frac{1}{15} [A(t_0) + A(t_0 \pm 3) + A(t_0 \pm 5) + A(t_0 \pm 8) + A(t_0 \pm 10) + A(t_0 \pm 13) + A(t_0 \pm 18)]$$

Fig. 30 にプログラムの例を示した。この演算では、観測値の範囲(6000~2000)を考え、3回に分けて $D(t_0)$ を計算している。整数演算であるために、除算によって演算誤差が生ずるが、この例では約0.5%以内に納ま

```
>LIST
10 REMARK *****
11 REMARK *** PERTZEV FILTER ***
12 REMARK *****
20 PRINT " INPUT A : EVERY HOUR'S DATA "
21 PRINT " INPUT D : FIRST DAY "
22 PRINT " INPUT T : FIRST HOUR "
23 PRINT " INPUT I : NUMBER OF DATA "
25 PRINT " GOTO 70, IF DATA ARE INPUT ALREADY "
30 I=0: INPUT D,I
40 I=I+1: PRINT #5,I
50 INPUT A: IF A=9999 GOTO 80
60 G(I)=A: GOTO 40
70 INPUT I
80 N=I-1: B=1
90 FOR I=20 TO N-20: X=2*B+1: Y=3*B+1
100 P=B(1)+B(1-2)+B(1+2)+B(1-3)+B(1+3): P=P/15
110 Q=B(1-5)+B(1+5)+B(1-9)+B(1+9)+B(1-10): Q=Q/15
120 R=B(1+10)+B(1-13)+B(1+13)+B(1-18)+B(1+18): R=R/15
140 G(X)=P+Q+R
150 G(Y)=B(1)-G(X): NEXT I
160 FOR I=1 TO 19: X=2*B+1: Y=3*B+1
170 W=2*B+1+H-20: Z=3*B+1+H-20
180 G(X)=0: G(Y)=0: G(W)=0: G(Z)=0
190 NEXT I
200 U=I-1: V=0
210 FOR I=1 TO N: L=4*B+1: N=5*B+1: B(L)=U+1: IF B(L)=24 GOTO 240
220 U=B(L): G(H)=V
230 NEXT I: GOTO 250
240 G(L)=0: V=V+1: GOTO 220
250 CALL 22172
260 PRINT "DAY HOUR MIN DATA SECULAR TIDE"
270 FOR I=1 TO N: X=2*B+1: Y=3*B+1
280 L=4*B+1: H=5*B+1
290 PRINT #3,G(H),G(L),#5,I,#6,G(1),G(X),G(Y)
300 NEXT I
310 CALL 22105
320 STOP
```

Fig. 30. Tiny BASIC program list of Pertzev filter for a record of the earth tide.

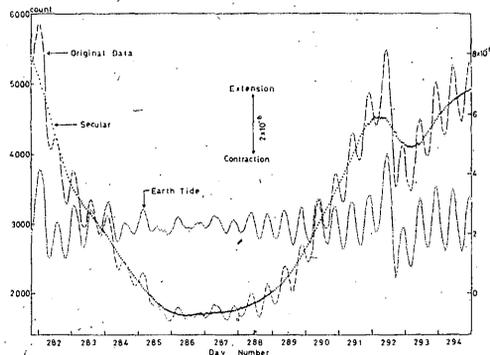


Fig. 31. Secular trend and tidal strain component computed by the program presented in Fig. 30.

っており、詳細な議論をする場合を除き、あまり問題とはならない。Fig. 31 は演算結果を示したもので、潮汐の分離が十分できていることがわかる。このプログラムによって1回に処理できるデータは約500個で、毎時データを扱うとすると、約20日分のデータの処理が一度にでき、観測結果の吟味、現象の監視に有効である。演算時間は約70秒を要し、機械語による演算(前項6.1参照)に比べかなり劣る。

Tiny BASIC は、ここに示したような簡単な演算に結構便利に使用でき、他に、自己相関係数の算出、データのスムージング(移動平均・Hanning Window)処理に利用している。乗除算を多く含む演算では誤差が大きくなったり、整数制限をすぐに越えてしまうために、実質的には直接この BASIC を用いることはできない。しかし、メモリ領域にあらかじめ機械語による演算サブルーチンを設定しておけば、制御ステートメント CALL 文で、演算を直接機械語によって行なうこともできる。

§ 7. その他の試験

このマイコンシステムを使用して、その他各種の試験、および、他のシステムを開発するとき役に立てることができる。現在までに試験した内容の一部についてのべる。

7.1 震源要素から P と S 波の計算走時を求めることについて

地震観測において、震源要素が気象庁や USGS 等で決定されたのち、観測値の点検を行なうが、対応する地

DIST.	146,1 DEG
DEPTH	53 KM
O.T.	10 H 8 M 53 SEC
PKP	10 H 28 M 26 SEC
SKS	10 H 35 M 27 SEC
DIST.	4,5 DEG
DEPTH	35 KM
O.T.	15 H 34 M 31 SEC
P	15 H 35 M 38 SEC
S	15 H 37 M 48 SEC
DIST.	35,8 DEG
DEPTH	6 KM
O.T.	-

Photo. 2. An example of display showing arrival times of some phases calculated from given earthquake parameters using the travel time table in the memory.

DIST.	055.0 DEG	DEPTH	056 KM
O.T.	12 H 34 M	56 SEC	
P	12 H 44 M	23 SEC	
S	12 H 51 M	59 SEC	
DIST.	007.2 DEG	DEPTH	185 KM
O.T.	05 H 52 M	49 SEC	
P	05 H 54 M	33 SEC	
S	05 H 55 M	54 SEC	
DIST.	003.0 DEG	DEPTH	050 KM
O.T.	19 H 10 M	38 SEC	
P	19 H 11 M	36 SEC	
S	19 H 12 M	28 SEC	
DIST.	020.6 DEG	DEPTH	057 KM
O.T.	20 H 43 M	02 SEC	
P	20 H 47 M	38 SEC	
S	20 H 51 M	20 SEC	
DIST.	062.6 DEG	DEPTH	033 KM
O.T.	09 H 50 M	10 SEC	
P	10 H 00 M	32 SEC	
S	10 H 08 M	57 SEC	
DIST.	150.0 DEG	DEPTH	049 KM
O.T.	00 H 13 M	25 SEC	
PKP	00 H 33 M	04 SEC	
SKS	00 H 40 M	06 SEC	

Fig. 32. Print out of P and S arrival times estimated from earthquake parameters and the time table stored in the memory.

ならない。松代では、一般にノモグラムを用いてこの作業を行なっているが、かなりの手間を要する。そこで、このマイコンシステムを用いて、その一部を行なうことを試みた。メモリにP・S波等の走時を秒位まで記憶させ、オリジンタイム、震源の深さ、震央距離をキーボードから入力し、P・S波等の計算値を秒位までCRTとプリンタに表示させるプログラムを作成してみた。ノモグラムで行なうよりは簡単であり、ルーチンで使用可能であることがわかった。松代では地震観測報告を発行しているが、そのデータの点検の一部をこのプログラムで実際に使用している (Photo. 2 および Fig. 32 参照)。

走時表を全て記憶させるには、かなりのメモリ容量 (数十Kバイト) が必要であり、このマイコンシステムで完全に行なうとすれば、デジタルカセットテープを併用しなければならない。しかし、カセットテープを使用すれば、必要なデータをさがし出す動作時間がかなりかかり、実用化しても不便なものしかできない。マイコンをもしこの用途に使用するとすれば、現在、パーソナルコンピュータと呼ばれるマイコンが各種市販されており、そのメモリ容量も数十Kバイトあり、拡張されたBASIC等の高級言語も使用でき、ランダムアクセスが可能なフロッピーディスクのついたものもある。このような機種を使用すれば、上記の用途を完全に果すことができるであろう。

震波の相が、計算値と一致するかどうか点検しなければ

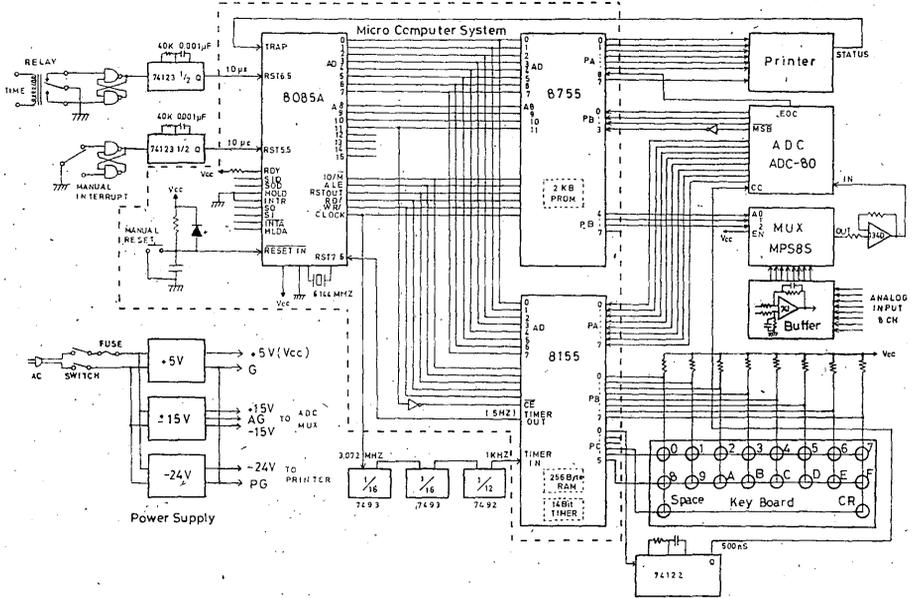


Fig. 33. Circuit diagram of the minimum component microcomputer used in digital printer for the crustal movement observation.

7.2 正弦波発振器の試み

地震計検定に関連して、正弦波発振器の試験を行なった。松代には、周期30秒の地震計があり、検定には、長周期の精度の良い発振器が必要である。マイコンを使用すると、デジタル的に、長周期の発振が容易にでき、周期、出力電圧等を可変で容易に行なうことができる。なお、松代の涌井・松皮は、別のシステム(NEC TK-80とDA変換器だけを組み合わせたシステム)で、同じ試みを行ない、気象庁地震観測所技術報告第1号(1980年2月)に報告している。

7.3 最小マイクロコンピュータを用いたデジタルデータ記録器の製作

前にも述べたが、CPU 8085 A, PROMとI/Oポートの複合素子8755, および、RAM・タイマー・I/Oポートの複合素子8155のわずか3素子で構成したマイコンシステムを用いて、地殻変動データ収録のためのデジタル記録器を製作した。詳しくは、気象庁地震観測所技術報告第1号(1980年2月)に報告してあるが、ここでも簡単に紹介する。Fig. 33にその回路図を示す。この記録器は、地殻変動データを、サンプルで256回の平均値を、指定した時間間隔(1~60分)で、デジタルプリンタにプリントするものである。時刻は、他の時計からの時分信号をもらって、CPUで計数し管理している。製作後約半年を経過したが、ほとんどトラブルも発生せず良好に動作しており、精度の高いデータを取りつづけている。

この記録器を製作するに当たっては、PROM 8755の書き込み、プログラムの作成・デバッグには、本システムの利用が大きく役立った。

§ 8. あとがき

主として、既設地震計の信号をマイコンで制御し、デジタルデータの収録試験を行なった。この結果、短周期・長周期地震波共、トリガー方式で、カセットテープに記録し、再生および必要データをプリントすることができた。また、デジタルフィルタリングについても、2・3の試験を行ない、マイコンでもある程度まで実現できることを確かめた。その他、観測データの点検や、小

なシステムで専用の観測システムの製作を行なって、地震観測に対して、マイコンの応用範囲の広いことがわかった。

マイコンの場合、一つのシステムで何でもできるというのではなく、個々に独立した小さなシステムを製作したり、専用のある決った役割りをさせる方が向いているように思われる。一つのシステムの中に、マイコンを2個も3個も使用する例が増えているのも、マイコンの特長を生かした使用方法と思われる。

例えば、今回いろいろ試みた地震判別(トリガー)に専用のマイコンを用いることなどは、有効な使用方法と考えられる。その他、データ伝送の制御、記録の制御などの応用範囲が考えられる。事実、1980年3月、松代地震観測所のひずみ計が更新されたが、そのシステムでは、主CPUのマイコンにオンラインでデータを収録しているが、前段の3台のマイコンでもってトリガー判別、データのブロック化、および、伝送系制御等の補助的役割りをすべて行なっている。これによって、主CPUのオンラインの負担を大幅に軽減し、バッチ処理能力の向上に成功している。

参 考 文 献

- 藤井 龜(1977): 8080逆アセンブラ, アスキー, 1977年11月, 38~43.
- 松皮久義・柏原静雄・浜田信生(1980): 地殻変動データ収録のためのデジタル記録器について, 気象庁地震観測所技術報告, 1, 1~10.
- 飯田陽一(1977): TK-80+2KBASIC+ 文法解説, アスキー, 1977年11月, 8~19.
- 今井高康(1977): 2K BASIC(東大版 Palo Alto Tiny BASIC) アスキー, 1977年8月, 6~17.
- 稲谷栄己・古屋逸夫(1977): マイクロプロセッサを用いた小型低電力時刻コード発生器, 地震学会秋季大会講演予稿集, 1977, No. 2, 7.
- Intel(1977): Tiny BASIC プログラミング/オペレーションマニュアル.
- 中川一郎(1960): 地球潮汐の観測資料よりドリフトを消去する方法について, 測地学会誌, 6, 第4号, 121~135.
- 中島 聡(1978): TK-80 BS のための1パスリアルタイムアセンブラ, アスキー, 1978年6月.
- 涌井仙一郎・松皮久義(1980): マイコンによるデジタル正弦波発振器について, 気象庁地震観測所技術報告, 1, 19-21.