

磁気バブルメモリを用いた強震動観測装置

赤 松 純 平

A DIGITAL STRONG MOTION SEISMOGRAPH SYSTEM UTILIZING MAGNETIC BUBBLE MEMORY

By *Junpei* AKAMATSU

Synopsis

A digital strong motion seismograph system (SMS) is designed making use of a non-volatile, solid-state magnetic bubble memory (MBM) for recording medium during strong earthquake motion. After the strong motion or relief of earthquake damage the data in MBM are read and recorded on digital cassette magnetic tape (CMT). Signal processing algorithm including event triggering, selection of sample rate and data compression for economy of memory area, and data acquisition process for CMT are implemented by a microprocessor Z-80, with use of analog filtering technique and hard logic circuits. In case of power stoppage the system is supported with a battery, charged by a thermo-controlled charger.

Three events of Hyuganada earthquake swarm occurring in March 1982 were recorded with the SMS system installed at Miyazaki Crustal Deformation Observatory.

1. は じ め に

地震観測における記録方法は、電子計算機を中心とする解析方法の発達に伴ない高品質のデータを得ることを目的に、磁気テープに記録する方向で発展してきている。このことはいわゆる強震観測においても例外ではない。しかしながらこの場合、(1) 強震発生に到るまでの長期にわたる待機期間中装置と記録媒体の性能や品質を高く維持できること、(2) 強震や激震時に記録するための耐震性能、(3) 被害地震発生時の停電対策等、強震動観測装置が満たさねばならない基本的条件から、この方式は観測を維持するうえでの本質的欠陥となっている。このことは地震波データの集録方法と記録媒体についての従来の考え方を見直す必要のあることを示している。

以上の観点からデータ集録のプロセスを2段階に分け、それぞれの段階が強震観測装置としての条件を分担し機能を補足する方式、すなわち強震時のデータ集録（一次記録）とデータの解析や保存のための二次記録に分ける方式を検討した。一次記録は先に述べた強震観測の条件に対処できるよう純電子式記録方法によることとし、この記録媒体として数十G以上の衝撃や振動に対する耐震性があり停電時にもデータを保存する不揮発性の磁気バブルメモリ (MBM) を採用する。二次記録は強震動の終了後あるいは災害復旧後自動的にまたは手動操作によって一次記録媒体のデータを解析処理や保存に用いるための二次記録媒体に転送する。この二次記録媒体として手軽で信頼性の高いデジタルカセット磁気テープ (CMT) を用いる。最近大容量で信頼性の高い MBM システムが手軽に入手できるようになったことからこのような方式の強震動観測用記録装置を作成した。

強震動を観測するための換振器は使用目的に応じて種々の方式のものが用いられている²⁾³⁾。しかし多くの地震観測所では換振器を設置する地震計台と記録室とが数百メートルも離れているうえ、ほとんど全ての観測所で地震計台は湿気の多い坑道内にある。このためサーボ型やマグネセンサ利用のように換振器の近傍

にアンプ類を置く型のは不向きである。この理由からここでは動コイル型の換振器 ($f_0=3\text{ Hz}$, $h=12$) を用いる。動コイル型は記録室からの校正電流により容易に動作の確認と校正を行なえることも都合がよい。ただし自然地震のデータとしては解析上加速度記録よりも速度記録の方が便利であるし、dynamic range も有効に使えることから集録データは速度記録に変換したものとする。

装置の総合精度と分解能は換振器のそれによって決るので、記録部の回路構成やソフトシステムはこれに合わせて作成する必要がある。地震波の周波数成分とデータのサンプルレートおよび記録時間は一次記録媒体の容量との関係で問題となる。これらについて装置の概要を述べ、観測された記録の例とその特徴について報告する。

2. 装置の概要

2-1 換振器の特性

強震観測の目的に規模の大きい地震の震源近傍での波動特性を研究することが挙げられるが、この場合周期数秒〜数十秒の長周期成分が精度よく記録されていることが重要である。ここで用いた換振器 (PK-130, $f_0=3\text{ Hz}$, $h=12$, 5 mv/gal) の周波数特性をブリッジを用いた振動実験で調べた結果、周期20秒においても良好に動作することから、地震時にも周期10秒以上の長周期成分を良好に記録するものと思われる。

装置の総合 S/N 比としては換振器の横方向感度による直交成分の影響が最も大きい。Fig. 1 は振動台の上に台の振動方向とそれに直角な方向に換振器をセットして振動実験をした記録例である。ゲージとレベルを用いて換振器をセットしただけでは直交成分の混入が $40\sim 50\text{ db}$ もある。台の上で種々の調整をくり返すことにより 50 db 以上にまで改良することは可能であったが加振周波数の倍モードで生じる振子の振動は改善することができなかった。地震計台の上にセットする場合この実験のように最適の状態であることは確認できないので、地震観測では直交成分の混入による S/N 比は $40\sim 50\text{ db}$ と考えられる。なお、水平2成分の相互の直交方向を正しく出すために水平動換振器を互いに直角に固定する治具を作成し、これにネジ止めてある。

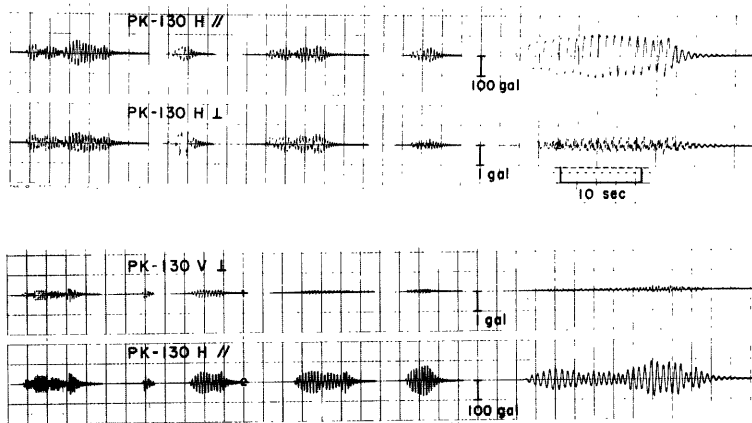


Fig. 1. Vibration test for comparison of the sensitive and non-sensitive (normal) direction of seismometers. // and $\perp$ denote the simultaneous records of seismometers set in the parallel and normal direction of oscillation. As a result, S/N ratio of seismometer from non-sensitive direction noise is thought to be about 50 db .

2-2 記録装置

記録装置の回路構成ブロック図を Fig. 2 に示す。全体はアナログ系、ハード論理系、デジタル系から成る。アナログ系は、換振器の加速度出力を速度記録に変換する積分アンプ（時定数10秒）、aliasing を除くための low pass filter から成り、3CH のアナログ信号はサンプルレート 100Hz でホールドされ、12 bits の ADC により数値化される。地震波の判定は上下動成分の振巾弁別 (TRG. 1) を利用する。高周波成分の小さい地震波は後述するようにソフト的にサンプルレートを 50Hz に落して集録して記録時間を延ばすこととし、このために高周波成分によるトリガー回路 (TRG. 2) が設けてある。この他、外部標準時計の刻時コード、手動操作のためのスイッチ類がデジタル入力 (16 bits) としてデジタル系に与えられる。刻時コード中の 1 bits は serial code であり可視記録を作成する際に利用される。またシステムのクロックはハード論理により標準時計に同期している。

デジタル系は host CPU として Z-80 をのせたワンボードのマイコン (SMB-80T)、一次記録媒体である磁気バブルメモリシステム (BPK-72)、および二次記録を行なうカセット磁気テープ装置 (MT-20) から成る。CPU は入力データを 6K バイトの RAM に順次とり込みながらデジタル入力のトリガビットを監視し、地震波の到来を判定するとデータを MBM に書いていく。MBM は容量 128K バイトであり、1 ページは64バイト構成になっている。1 ページ分のデータを転送するのに 6.4msec 要する。トリガビットを用いたソフト論理により地震の終りを判定すると CMT の故障やテープの終了等の状態を判断して二次記録の動作 (MBM→CMT) に移る。観測中の入力波形のモニタや CMT データの再生のためにアナログ出力 1 チャンネルが用意されており、スイッチ操作で任意のチャンネルの波形が出力できる。

Fig. 3 に観測における仕事のフローチャートを示す。観測に先立ち MBM の 0 ページには種々の制御情報が書き込んである。電源投入または手動のリセットボタンによって各装置の初期設定をした後 0 ページ

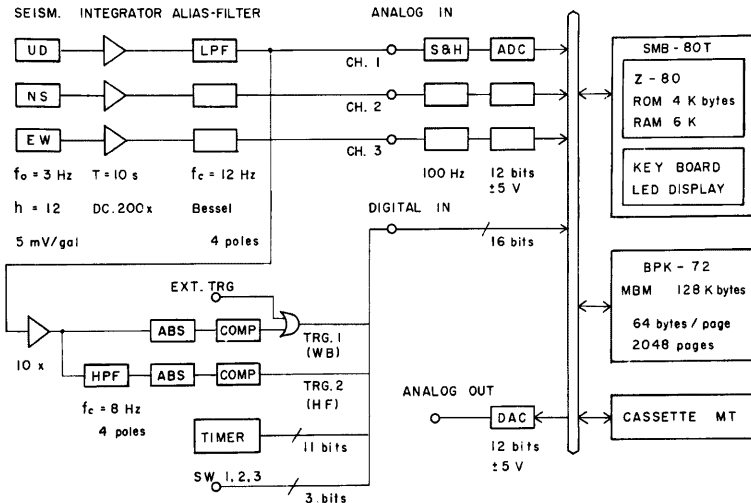


Fig. 2. Block diagram of the SMS system. A non-volatile, solid-state MBM is utilized for recording medium during the strong earthquake motion. After the motion or relief of damage the data in MBM are read and sent to CMT. Signal processing algorithm and system control functions are executed by a processor Z-80, utilizing analog filtering technique and hard logic circuit.

の情報を解析して仕事の流れを決める。MBM にデータが記録されていない場合、data logging ルーチンで地震の発生を待機する。ここではトリガビットを利用した地震判定、終りの判定、後に述べるデータの圧縮、digital low pass filtering operation 等が行なわれる。地震を検知すると MBM にデータを転送し、終了すると地震番号、トリガ時刻、MBM の記録ページ、サンプルレート等の情報を 0 ページに書いて一次記録における地震の 1 ファイルとする（この時点で停電してもデータは保存される）。仕事の流れは元に戻り、CMT の状態を調べて二次記録を行なうルーチン (MBM→CMT) を実行する。二次記録が完全に実行された場合にのみ MBM データは消去可能となる。CMT の故障や磁気テープが無い場合等は MBM のデータは保存され MBM に空領域がある限り観測を続けて地震のファイルを重ねる。このようにデータ集録の各段階で装置全体の状態をチェックして 0 ページの情報を更新し、これに基づいて仕事の流れを制御する。地震のファイル番号、MBM の記録ページ数、CMT の記録ブロック数と故障の有無等 MBM の 0 ページの情報はスイッチ操作により観測状態でマイコンの LED 表示に出して確認できる。

前節で述べたように換振器の S/N 比は40~50db と考えられる。従って、ADC は12ビットであるがこれによる66db もの分解能は無駄であるので、Fig. 4 に示すように10ビットへの圧縮を行ないメモリの節約を企る。これにより1サンプル8バイトのデータを4バイトに縮めることができる。Fig. 4 に示されるビットTは serial time code であり波形の可視記録を作成する際時刻信号とする (Fig. 7 の CH. 4)。

地震を速度波形で観測する場合、震源距離が数百キロメートルであっても地震規模が大きければ記録の対象となることが多い。このような地震はサンプルレートを落して記録時間を延ばす方が有利である。高周波

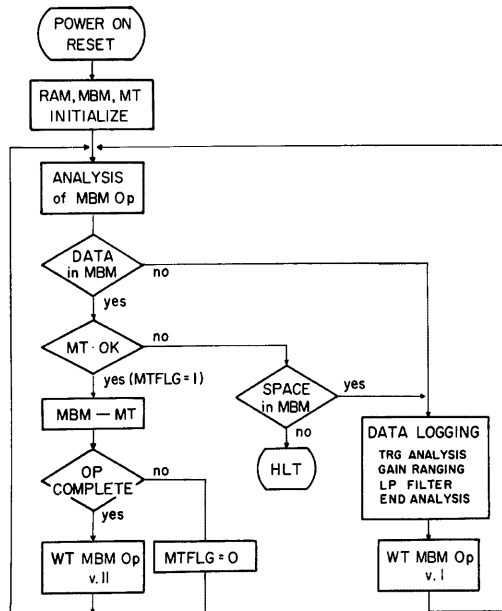


Fig. 3. Software flow chart of the SMS system. The data logging routine services data acquisition and filing of events in the MBM system. The electronics and software functions are controlled analyzing the control data on the 0 page of MBM that are updated checking the state of the functional equipments.

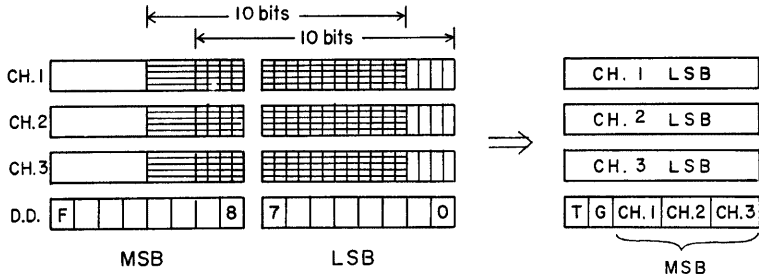


Fig. 4. Method for economy of memory area with compression of 12 bits data to 10 bits ones. T and G denote serial time code bit and gain bit, respectively.

成分識別論理の信号 (TRG. 2) によって 50Hz でのサンプルレートを選択するが、これは地震のトリガ時点（多くは P 初動）の周波数成分によって決定する。従って振巾の大きい later phase や S 波部分または連発地震等によって aliasing を生じることが考えられる。（アナログの alias-filter は 100Hz サンプル用に設計している）。これを防ぐためには 100Hz サンプルのデータに digital low pass filter をかけて高周波成分を除き、その出力データを抜きとることによって 50Hz サンプルデータを作る（Appendix）。Fig. 5 に示すようにこの操作によって cut off が約 8Hz, 6dB/oct の傾度を持つアナログフィルタに似た特性が得られる。50Hz でサンプルする時の Nyquist 周波数 25Hz では約 1/5 に減衰している。

Fig. 6 に換振器、積分アンプ、alias-filter および高周波成分監視用の high pass filter の振巾特性を示す。総合特性は 100Hz サンプル時 (1) と 50Hz サンプル時 (2) とでは先の digital low pass operation によって cut off が異っている。表 1 に主な諸性能が挙げられている。震源近傍での地震動の極値は数十 Kine と考えられているので記録レンジが ± 5.5 Kine であるのは強震動観測装置としては小さい値となっている。これは炭山地震観測室（宇治市炭山）で行なわれているデジタル磁気記録装置による地震観測 ($\max \pm 33$ mkine, 16μ kine/dig)⁴⁾ で scale out する地震（京都で震度 III 程度）を記録する最小レベルの地震とし、これが S/N 比 30 dB 程度となるようにアンプの増巾度を設定したことによる。

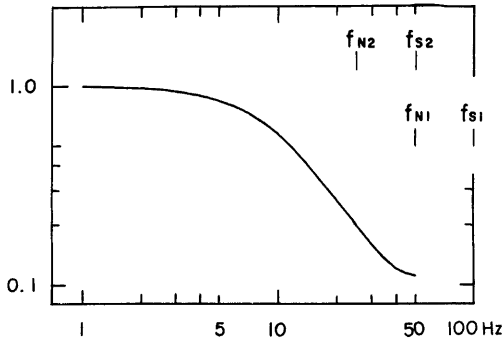


Fig. 5 Transfer function of digital filtering operation as alias-filter for 50 Hz sample rate. f_{S1} and f_{N1} denote clocked sampling frequency (100 Hz) and Nyquist one, that are reduced to f_{S2} and f_{N2} by software logic based on the hard logic (TRG. 2).

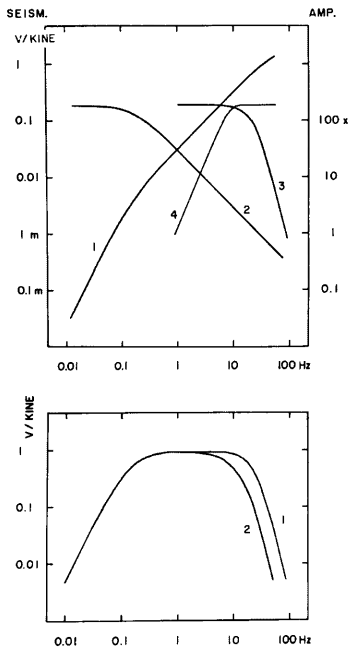


Fig. 6. Frequency characteristics of each element and total recording channel. Upper: 1—seismometer (5 mV/gal, $k=12$) figured in the velocity scale, 2—pre-amplifier with integral characteristics ($\tau=10$ sec), 3—alias-filter, 4—high pass filter for trigger and sample rate logic. Lower: overall response in velocity scale, 1—100 Hz sample rate, 2—50 Hz one.

部分 (水平 2 成分, 10.24 秒間) のフーリエスペクトル密度を示す。いづれの地震も 0.3~2 Hz のスペクトル密度が高く, 2.5 Hz 以上の高周波成分は急激に減衰している。4 Hz での振巾は 2 Hz の振巾の P 波で

2-3 無停電装置

磁気バブル自体不揮発性であるので一次記録データは停電が発生しても保存される。ただし一次記録で地震の 1 ファイルを完了するためには少なくとも強震動が継続している間の無停電対策を講ずる必要がある。このため 20~30 分程度バックアップ可能な小型電源 (40w) を導入した。この電源は密閉型鉛蓄電池をトリクル充電方式で用いるが, 電池の温度をサーミスタで監視して充電を制御することによって過充電を防止し, 電池の寿命と信頼性を高めている。

3. 観測と記録例

前節で述べた方式によって装置を試作し 1981 年 7 月以来炭山地震観測室に設置して観測を実施しながら装置の安定性, 信頼性等を検討している。これに基づき新たに回路やソフトシステムに若干の改良を加えた装置を作成し 1982 年 3 月には宮崎地殻変動観測所に設置して強震観測を開始した。

宮崎では観測を開始した 3 日後の 3 月 6 日から数日間九州南部, 中部で地震が連続して発生し宮崎県地方に軽微な被害がでた。これらの地震の震源域は宮崎市東~東南方の日向灘であり, このうち 3 個の地震がこの装置により記録された。**Fig. 7** に 3 成分の波形を示す。No. 1 の地震は延岡, 宮崎, 大分で震度Ⅲを記録し今回の地震群の中では最も大きい。No. 3 は日南で震度Ⅲ, 宮崎, 延岡でⅡが報告されている。しかし観測所での揺れは小さくいずれも震度Ⅰであった⁵⁾。記録上最大速度振巾は No. 1 が 0.40 Kine (NS 成分), No. 3 が 0.38 Kine (EW 成分) であること, 卓越周期が 1.3~0.7 秒と比較的長いことなど観測所での震度が小さかったことを示している。**Fig. 8** に P 波部分

(上下動成分, 解析区間 5.12 秒間) と S 初動以後の主要動

Table 1. Specification of the SMS system.

Analog In	3ch. ADC: 12 bits, sample rate: 100 Hz (50 Hz) dynamic recording range 66 db, (max ± 5.5 kine) resolution 54 db (2.7 m kine/dig.)
Digital In	16 bits (TRG. 1, TRG. 2, Time Code 11 bits, SW 1,2,3)
Analog Out	1ch. DAC: 12 bits, ± 5 V
Delay Time	14.08 sec
Recording	MBM: 5 m 27 s (100 Hz), 10 m 54 s (50 Hz)
Time	CMT: 9 m 30 s (100 Hz), 19 m (50 Hz)

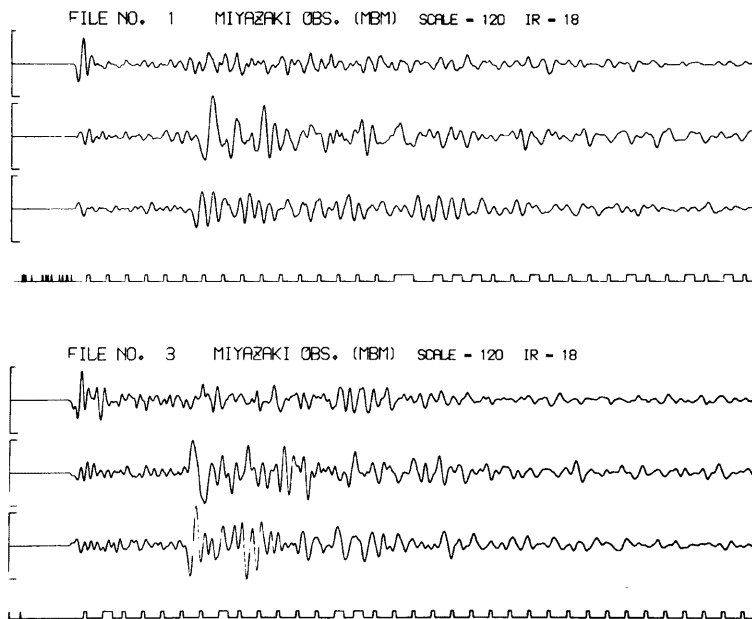


Fig. 7. Example of Hyuganada earthquakes recorded with the SMS system.
Upper: Mar. 6, 19 h 16 m, 1982, lower: Mar. 8, 23 h 19 m, 1982.

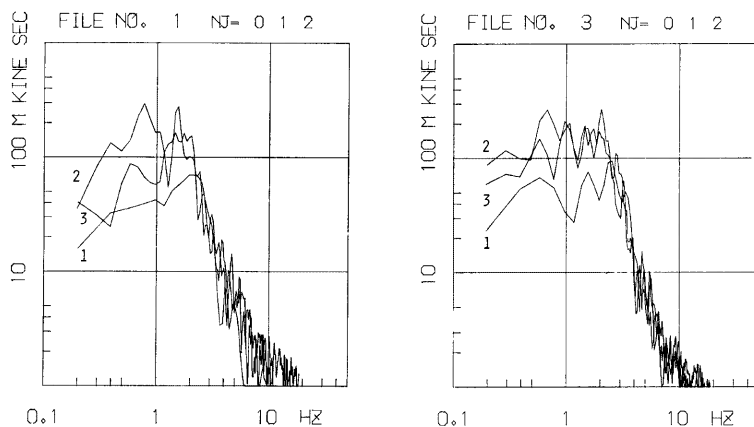


Fig. 8. Fourier spectral density of Hyuganada earthquakes shown in figure 7. 1—P-vertical component, $T=5.12$ sec, 2,3—NS and EW components of S wave parts, $T=10.24$ sec.

1/5, S波で1/10以下である。いづれの地震も P-S 時間は6.0秒であるから震源距離は 50 km 以下であるにもかかわらずこのように高周波成分が小さいのは近畿地方で発生する小地震と比べて非常に特徴的である⁶⁾。このように近距離の地震であるにもかかわらず 4 Hz 以上の高周波成分のない特徴的な周波数特性であったため記録された3個の地震は全て 50 Hz のサンプルレートで集録されていた。さらに No. 1 と No. 3 の地震を比較すると P 波第2動の方向や S 波の polarization が異っており、2日後に発生した No. 3 の方が波形は複雑で、0.3~0.8 Hz の低周波成分の振巾密度が 1~2 Hz の成分に比して増加している。これらの現象はこの地域の地震発生メカニズムや地質構造に関連して非常に興味深い。

Figs. 7, 8 に示された CMT データの図化、周波数解析とその結果の表示はデータ図化・処理装置によって行なわれた。この装置はオープンリール MT 装置、カセット MT 装置、ADC 等を入出力装置としてマイコン (PS-85) によってデジタルプロッタ (DPL-2321) を制御するもので、地震波のデータ解析における初期処理 (編集、波形の図化、particle motion diagram の作成、スペクトル解析等の基礎資料の収集) を行なうと共に、種々の形式の地震記録を統一した形式で磁気テープに編集し大型計算機による高次の解析処理を行なうためのデータベースを作成する。

4. お わ り に

今回作成し観測に用いている強震動観測用記録装置は、一次記録を行なう MBM の容量が大きいため、強震動の継続時間に比して記録時間を長くすることができた。特に宮崎地殻変動観測所では震源の近い地震でも高周波成分が小さくサンプルレートは50Hz で充分であり一次記録の時間が2倍に延びている。このことから二次記録媒体である CMT を装着せずに、一次記録のみによる観測を行っている。CMT を長期間装着したまゝにしておくことによる信頼性の低下を回避することができ保守面で楽になっている。保守は、通常、地震の有無と MBM の空領域を LED の表示で確認し、MBM→CMT の二次記録が必要と判断される場合に CMT を装着してリセットボタンを押すだけでよい。このような操作の簡便さは 依託観測を行なう場合などに有効になってくる。

データ集録のプロセスを2段階に分け、その第一段階の記録媒体として不揮発性の磁気バブルメモリを用いる方式は、強震動観測の場合だけではなく、地震のテレメータ観測における定時送信や呼出し方式での現地記録媒体に利用できるほか、地殻変動の連続観測におけるデータ集録とその停電対策にも利用できる。

終りに種々御助力下さった吉川宗治教授、宮崎地殻変動観測所で観測を始めるにあたりいろいろと便宜をはかって下さった高田理夫教授はじめ観測所の方々、有益な討議をして下さった古澤、保助教授に感謝の意を表します。換振器固定治具の製作を西 正男技官にお願いした。また装置の電気回路の製作は木下電気木下嘉一郎氏に負うところが大きい。これらの方々に心からのお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 後藤典俊, 岡田成幸, 太田 裕, 小池信夫: 強震観測装置の開発 2, 地震学会講演予稿集 1978, No. 2, pp. 148.
- 2) 田 望, 飯沼龍門, 松本英照, 高橋道夫: 気象庁用の新・強震計, 地震学会講演予稿集 1981, No. 1, pp. 167.
- 3) 村松郁米: 速度型強震計の製作, 地震第2輯第30巻, 1977, pp. 317-338.
- 4) 赤松純平: 炭山地震観測室における地震観測 (2), 京都大学防災研究所年報第23号 B-1, 1980, pp. 107-114.
- 5) 寺石眞弘: 私信
- 6) Akamatsu, J.: Attenuation Property of Seismic Waves and Source Characteristics of Small Earth-

quakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 30, 1980, pp. 53-80.

- 7) Prothero, W.: Earthquake Signal Processing and Logging with a Battery-Powered Microcomputer, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 70, 1980, pp. 2275-2290.

Appendix

digital filter はサンプル周期に依存した伝達函数を持つので alias-filter を実現するには有効な方法である。ただし数値演算が Z-80 のシフト命令による 2^N (N : シフト数) の乗除算に限られるうえ、除算での桁落ちを防ぐための工夫が必要であり、このために実現可能な operation は限られてくる。ここでは digital event recorder のトリガ判定に使用されている STA/LTA を求める平均化フィルタを 2 次の型で使した⁷⁾。すなわち、入力データを $X(i)$, フィルター出力を $Y(i)$ とすると、

$$Y(i) = 2Y(i-1) - Y(i-2) + \frac{X(i) - Y(i-2)}{N^2} - \frac{2}{N} \{Y(i-1) - Y(i-2)\} \quad (1)$$

N は平均化の項数。この伝達函数は

$$H(f) = \frac{1}{\{N - (N-1) \cdot \exp(-j \cdot 2\pi f t)\}^2} \quad (2)$$

ここで t はサンプル時間間隔。(1)式をシフト命令と加減算で演算するには N は 2 の階乗でなければならない。演算を 2 バイトの数値として行なう場合入力データは 12 ビットであるので 4 ビットの余裕があり、これを除算の桁落ち防止に利用する。 $N=2$ の時、(1) は

$$Y(i) = Y(i-1) + \frac{X(i) - Y(i-2)}{4} \quad (3)$$

このとき振巾の周波数特性は

$$|H(f)| = \frac{1}{5 - 4 \cos(2\pi f t)} \quad (4)$$

Fig. 5 に $t=0.01$ sec での特性が示されている。folding frequency ($f_t=0.5$) では振巾は 1/9 に減衰する。