

加振実験による地震計記録の長周期成分の信頼度の照査

山田 善一・野田 茂・岡市 明大

EXAMINATION OF RELIABILITY OF LONG-PERIOD COMPONENT OF STRONG-MOTION SEISMOGRAMS FROM SHAKING TABLE TEST

BY *Yoshikazu YAMADA, Shigeru NODA and Akihiro OKAICHI*

Synopsis

In this paper, the performance of three different kinds of seismographs, that of, a SMAC-B₂ accelerograph, a SAMTAC-17E which is a digital servo-type accelerograph, and a JMA low-magnification strong-motion seismograph, were examined from a shaking table test with the differential transformer-type and winding-type (DP-500 B) displacement meters, as a means to disclose inadequacy of long-period (2-20 sec) component of conventional accelerograms. A shaking table was driven by input of JMA records observed during the Nihonkai-chubu earthquake of 1983. The analyzable ranges in terms of amplitude and period of the records given by these instruments were discussed by using performance criteria such as waveform, cross correlation, coherence function, Fourier spectrum and energy, etc. The results obtained indicate that: (1) JMA seismograms without saturation were largely satisfactory in the period over about 5 sec, (2) The recording accuracy of SAMTAC-17E instrument was found insufficient over the period range from 5 to 6 sec, resulting in quite different displacement waveform, and (3) The observation capacity in view of signal to noise ratio of long-period component of SMAC records is not very high, resulting in the larger value than record amplitude obtained by strong motion seismometer of displacement-type.

1. 序 論

1985年9月19日、メキシコ市は、震央距離の遠い(約390km)巨大地震($M_s=8.1$)の洗礼を受けた初の近代都市となった。地震波が不規則地盤に入り、従来の耐震工学ではほとんど盲点となっていた長周期波により引き起こされたものである。最近のビルの高層化、橋の長大化やタンクの大型化とともに、長周期波の性状の考察が重要になっている。

従来は、加速度型強震計記録に基づく短周期(数秒より短い)波の研究が日米を中心に極めて盛んであった。しかし、数秒より長い周期成分の工学的重要性が認識されだしたのは比較的最近であり、その研究の歴史は浅い^{1)~3)}。従って、長周期波の揺れについて合理的でかつ十分な耐震対策が施されているとは言えないのが現状である。メキシコ地震のように、地盤などの悪い条件がそろえば、遠くから伝播してきた地震波でも中高層ビルを破壊するのであるから、長周期波は今後の耐震工学の新しい問題点と言える。こうしたことから、各種地震計の長周期成分における信頼度を定量的に解明することが求められている。

気象庁1倍強震計は全国的な地震観測網として設置されている。しかも、やや長周期帯域の地震動を精度よく記録(連続記録である)するものとして知られている。記録可能な最大振幅は、水平動で3cm、上下動で2.5cmである。従って、大地震時には、特に震央距離の小さい($<100\text{km}$)ところで、振り切れてしまう可能性がある。

一方、SMAC-B₂ 型地震計に代表される加速度強震計はある加速度レベルでトリガーし、変位型強震計記録の飽和するような震央距離の範囲でも、観測が可能である。この SMAC 型加速度計の固有振動数は7.14 Hz、減衰定数は1である。従って、SMAC-B₂ 型強震計の加速度に関する振幅特性は、周期が1秒より長いと、ほぼフラットとなる。しかし、加速度フラットの地震計の特性と入力特性との関係から、周期数秒以上の地震動をどの程度の精度で捉えているかには疑問が残る。

強震観測に基づく地震入力の評価は耐震設計の基本であり、前述の如く、従来 SMAC 型に代表される強震計により、資料の蓄積が図られてきた。しかし、近年の建造物の多様化に伴い、考慮すべき周期の領域も長周期の側へ拡大し、従来の SMAC の使用では到底カバーしきれないことは種々指摘されてきているところである。これを解決するため最新のデジタル技術を導入するなどして、強震計の抜本的改善が進められ、良質な記録の収集が途についたところである^{4)~6)}。しかし、一方、従来の SMAC などで得られた強震記録の蓄積は大きく、これらの記録の信頼性限界を実証的に明らかにしておくことも重要な課題である。

本研究の目的は、上記のような理由から、各種地震計の加振実験を行い、長周期帯域での特性や記録精度を検討して、長大構造物に対するより合理的な耐震設計へと近づけることである。

研究の主な検討項目は次の通りである。

- 1) 地震計の記録特性を比較検討するため、長周期振動台上で加振実験を行うこと。計器としては、1 倍強震計・差動トランス型変位計・巻込型変位計および SMAC-B₂・サーボ型デジタル式 (SAMTAC-17E) とアナログ式 (V401BR) の加速度計を用いる。入力は調和波と実地震波とする。
- 2) 確率システム論などの各種の方法を用いて、振動実験による記録性能を解析し、記録波形やスペクトルなどの信頼度を定量的に検討すること。

2. 加振実験の概要

2.1 実験装置

加振実験に用いた装置の概要を、Fig. 1 および Photo. 1 と Photo. 2 に示す。

実験装置は、長周期振動台と加速度および変位の計測システムから構成されている。振動台上には、変位計として、1) 巻込型変位計 (DP-500B と呼ぶ) と 2) 52C 型の気象庁1倍強震計の水平1成分 (以下では JMA と呼ぶ) を、加速度計として、3) デジタル式サーボ型強震計 (SAMTAC-17E と呼ぶ)、4) SMAC-B₂ 型強震計 (SMAC-B₂ と呼ぶ) と 5) アナログ式サーボ型振動計 (V401BR と呼ぶ) を同時に設置して後述の実験を行った。振動台の挙動は差動トランス型変位計 (0~10Hz の間ではほぼフラットな特性を有している)

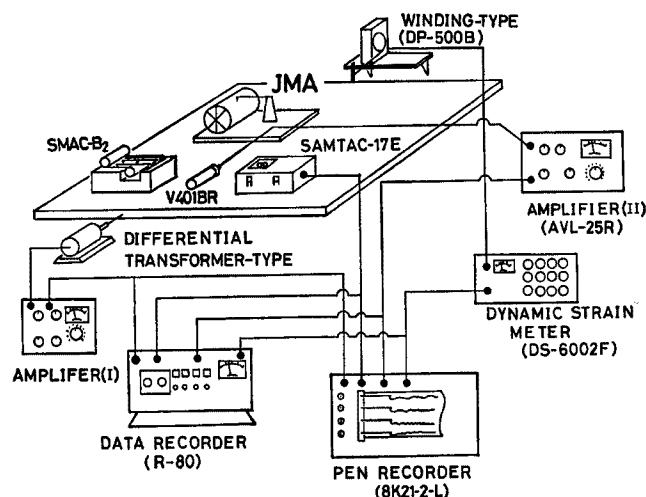


Fig. 1 Layout of vibration testing system.

で計測した。この変位計は、振動台と振動台とは縁を切った固定壁との間に設置されている。JMA と SMAC-B₂ は機械式地震計である。従って、記録は、おのおの、ドラム上に巻きつけた紙上にペンで、またスタイラスペーパー(黒色)上にダイヤ針で描かれる。

実験に用いた振動台は、(財)電力中央研究所内の土木研究所が所有しているものである。この振動台は電気-油圧サーボ制御による水平・上下の連成振動台である。なお、加振方向は水平1方向とした。使用した振動台はテーブル寸法 3m×3m、最大積載重量 10t、水平方向

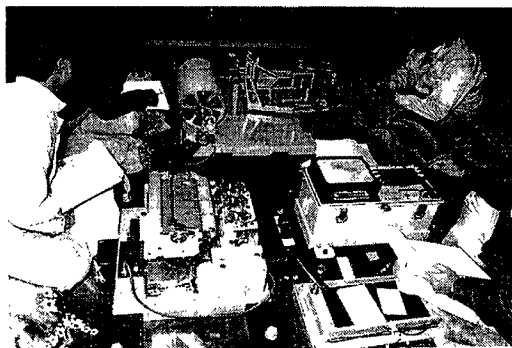


Photo. 1 View of seismographs on shaking table.

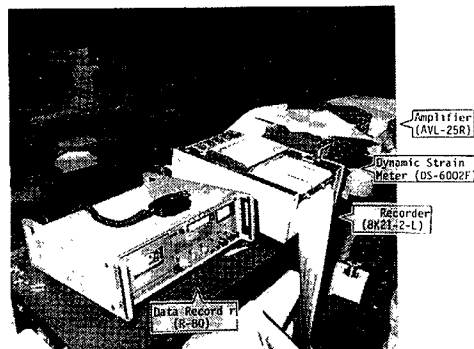


Photo. 2 Layout of recording system.

最大加振力 17.6t, 最大振幅 $\pm 15\text{cm}$, 加振振動数 $\text{DC}\sim 30\text{Hz}$ の性能を有するものである。

JMA と SMAC-B₂ 以外の計器の計測は, Fig.1 に示すようにした。すなわち, 差動トランス型変位計は (財)電力中央研究所に設置されている増幅器を介して, DP-500B は動ひずみ測定器 DS-6002F (新興通信工業社製) を介して, V401BR は振動増幅器 AVL-25R3 (明石製作所製) を介して, SAMTAC-17E は直接, 同一のカセットデータレコーダー R-80 (TEAC 社製) に収録した。なお, SAMTAC-17E は, 本体内蔵の記録装置であるカートリッジテープにも記録する。各計器の記録は, 絶対時刻を確保するために, またすべて電気信号として取り出し, 精度の保持と解析処理の迅速化のために, データレコーダーの磁気テープに収録した。同時に, ペンオシログラフ 8K21-2-L (三栄測器社製) にも記録を描かせ, 計器の作動状況を目視でチェックした。また, 実験の全体像はビデオカメラで撮影し, 後日ビデオコーダーの記録を再生して, 地震計の挙動を確認した。

2.2 使用した地震計

前節で述べたように, 振動台に載せた地震計は, 気象庁 1 倍強震計 JMA, サーボ型 デジタル式加速度計 SAMTAC-17E, SMAC-B₂ 型加速度計とサーボ型アナログ式加速度計 V401BR である。他に, 差動トランス型変位計と巻込型変位計で振動台の変位を計測した。

1) 差動トランス型変位計

前述したように, この変位計は振動台と固定壁の間に設けられている。差動トランスは非常に便利なもので, 機械量の電気測定という面では欠くことのできない重要な存在である。差動トランスは振動の測定にも適しており, その性能から判断して, 所期の効果を十分に上げることができる。そこで, 各種の地震計との比較・検討に当たって, この計測値をそのまま振動台の変位 (基準変位波) と見なした。

2) 巻込型変位計 DP-500B (東京測器製作所製)⁷⁾

この計器はひずみゲージ式変位変換器であるので, Fig.1 に示したように, 動ひずみ測定器に連結する。変位は巻込型のステンレスワイヤで測定し, ワイヤは Photo.3 の如くドラムに巻き取られる。すなわち, ワイヤの先端部を被検出部に取り付け, 本体を振動台とは縁を切った固定面に設置することにより, ワイヤのひずみを測定して変位波を検出する。ただし, 零点を調整するために, 実験ケースの開始のたびに, キャリブレーションを実施した。この計器の定格出力は 5000×10^{-6} で, 感度は $10 \times 10^{-6}/\text{mm}$ である。

3) 気象庁 1 倍強震計 JMA (勝島製作所製)

最近ではこの 1 倍強震計の記録を数値化し, それを工学の分野に活用しようとした研究が各所で進められてきた^{1)~3), 8), 9)}。また, この地震計の長周期成分に対する計器補正の効果および記録精度に対して, 強震計の加振実験の検討結果が報告されている^{10)~12)}。基本仕様や 振子部・ドラム部・制振器・起動部の特徴については文献¹²⁾を参照されたい。

気象庁 1 倍強震計は, 水平方向 2 成分と上下方向 1 成分の 3 成分で構成されている。そのうちの水平方

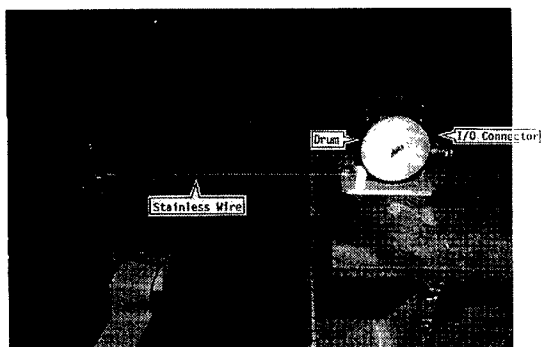


Photo. 3 Winding-type displacement meter DP-500B.

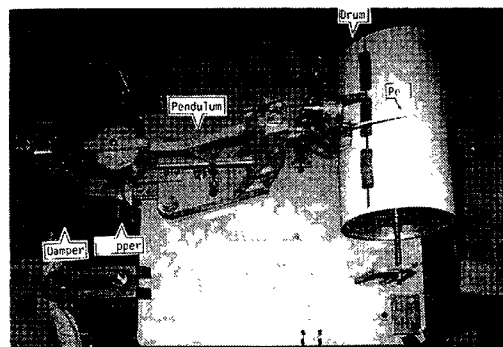


Photo. 4 52C-type low-magnification strong-motion seismograph of the Japan Meteorological Agency (JMA).

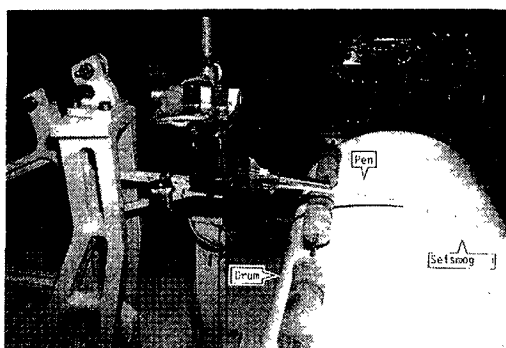


Photo. 5 Recording part of JMA seismograph.

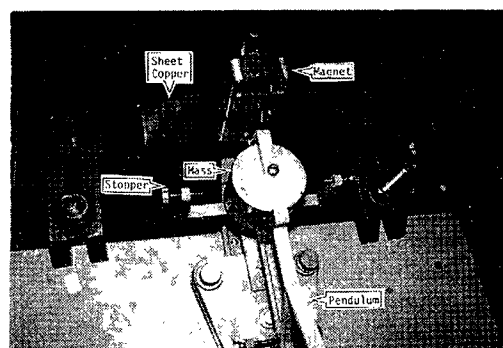


Photo. 6 Damper and stoppers of JMA seismograph.

向1成分のみを組み立てたもの(52C型)を **Photo. 4** に示す。**Photo. 5** は主に記録部(ドラム・ペン・インク)を、**Photo. 6** は振子部の質量、ストッパー(振子が当たる部分で、ボルトで調節可)と制振器(マグネットと制振板としての銅版)を示したものである。以下、水平成分のみを対象とする。

Photo. 4 の1倍強震計の自由振動実験を行ったところ、**Fig. 2**のように、自由振動波形と減衰波形が得られた。これより、計器特性は、固有周期が5.95秒、減衰定数が0.55(制振度=8)となる。この地震計は、上記の如く固有周期が比較的に長いため、やや長周期の地震動を記録するのに適している。減衰機構は、**Photo. 6** のように、マグネットによっている。この計器特性のため、周期6秒以下の波動と比べ、周期8秒で1/1.66, 周期10秒で1/2.55, 周期15秒で1/5.92まで感度が低下する。

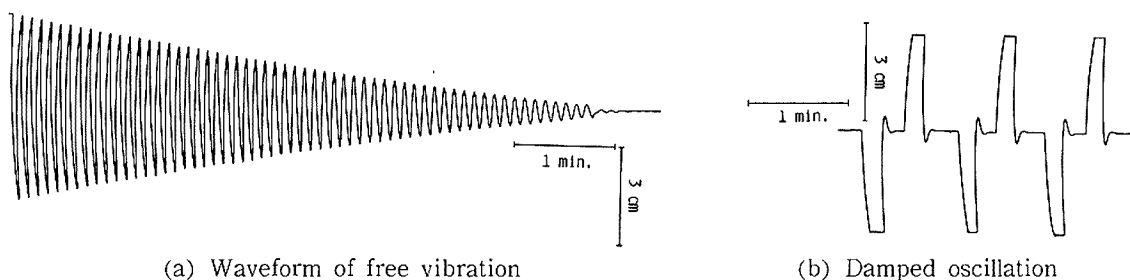


Fig. 2 Tests for examining characteristics of low-magnification strong-motion seismograph of the Japan Meteorological Agency (JMA).

記録は、**Photo. 4** と **Photo. 5** で見られるように、直径約 24cm のドラムに巻きつけた紙上にペンで描かれる。ドラムの回転による紙送り速度は 3cm/分で、ペンによる記録線の太さは **Photo. 4** の計器の場合で 0.2~0.3mm である。ドラムは電動で 1 回転約 25 分の速度で常時回転しており、記録の重なりを避けるため、1 回転で 1.5mm づつドラムが回転軸方向にずれていく。記録紙は実験のケースに応じて適当に交換した。

この計器は（株）勝島製作所の協力のもとに借用したものである。

4) デジタル強震計 SAMTAC-17E (東京測振製)¹³⁾

この強震計はコンピューター制御の全デジタル式地震計である。換振部には速度帰還形サーボタイプの加速度計を有しており、その固有振動数は 5Hz、減衰定数は 240 である。換振部からの信号は AD 変換器により数値化され、自動時刻校正 (NHK 時刻) とともにカートリッジテープに記録される。AD 変換の方式は 16ビットである。ダイナミックレンジは 96dB (公称値)、サンプリング間隔は 1/200 秒、記録の遅延時間は 5 秒、測定周波数は 0.1~30Hz (公称値) となっている。入力加速度が 62.5gal 以下の場合、感度は 80mV/gal である。

Photo. 7 は、SAMTAC-17E の計器本体の蓋を開けた状況を示している。**Fig. 1** とこの写真からわかるように、加速度波形は、本体のテープに記録されるとともに、モニター端子から DA 変換されてデータレコーダーのテープにも記録される。

5) SMAC-B₂ 型強震計 (明石製作所製)¹⁴⁾

SMAC による記録波形が耐震工学の発展に対してかなり貢献していることは衆知の事実である。またその記録は膨大な数となっており、貴重な財産である。構造物の応答解析の際には、地震計の器械的誤差や基線誤差に加えて、数値化誤差などが解析結果に影響を与える。こうしたことから、加振実験によってこの強震計の精度を検討したり^{15)~20)}、観測評価能力を体系づける研究^{21)~23)}が行われてきた。最近では、土岐ら²⁰⁾によって、記録の長周期成分の誤差が現象論的かつ理論的に解明され、それを適切に補正する方法が提案された。

本研究で用いた SMAC-B₂ 型強震計は、本学工学部交通土木工学教室路線施設講座が地震観測に使用しているものである。**Photo. 8** は蓋を取りはずした様子を示したものである。実験には、前後動の水平振子のみを用いた。地震観測では電気的スターターで起動することが多い。しかし、本実験では 10gal 前後の小さな加速度波を対象にしていること、および地震波の始動部から記録することを目標としているので、器械的スターターを用いた。そして、オペレーターが振動台をコントロールして加振する直前に、感度ボールをマニュアルでボール受軸から落とし、スタートウェイトを落下させることにより、起動器をスタートさせた。実験ケースごとに、ゼンマイをまき、最大 3 分間の記録が得られるようにした。

計器特性としては、固有周期が 0.136 秒、減衰定数が 1、感度が 12.5gal/mm である。この計器の検査

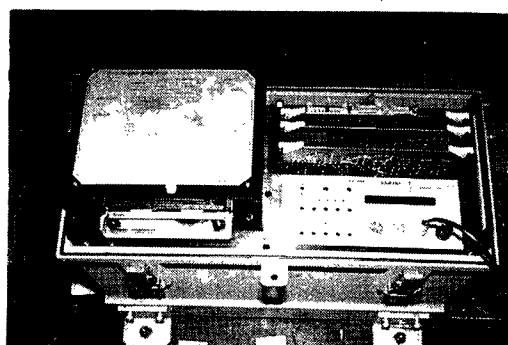


Photo. 7 Digital servo-type accelerograph SAMTAC-17E.

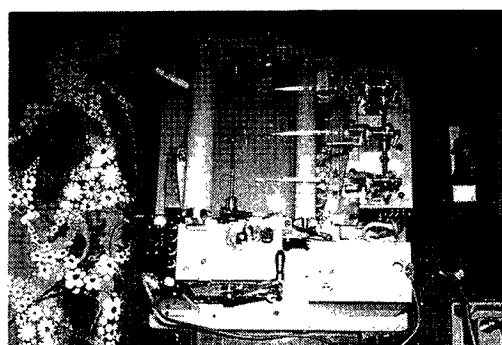


Photo. 8 SMAC-B₂ type accelerograph.

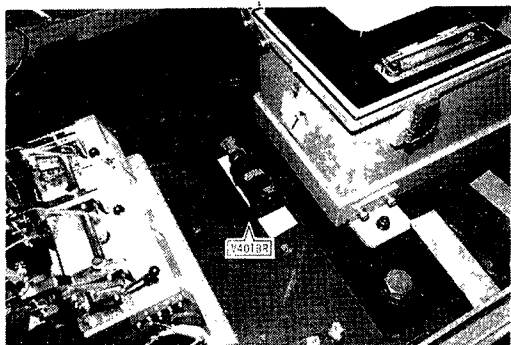


Photo. 9 Analog servo-type accelerograph V401BR.

となる。加速度の測定範囲は $0.0002 \sim 1g$ である。実験では5段階の測定レンジを活かして、精度の高い記録を得るようにした。

振動検出器の V401BR は、Photo. 9 のように、振動台に固定した。

2.3 実験方法

加振実験は、まず、1倍強震計が振り切れない場合の記録精度を検証する目的で、記録最大振幅が $\pm 3cm$ 以内になる正弦波および地震波について行った。次に、 $\pm 3cm$ を越える大振幅の正弦波および地震波により、1倍強震計を振り切らせた実験を行った。

以下、実験番号として、AiPj と表記する場合は、振幅が i cm で周期が j 秒の正弦波入力 (i, j とも、実験の際の目標値を示している) を意味し、さらにその末尾に S を付けた場合は1倍強震計が振り切れたことを示す。正弦波実験は、強震計の振動数特性および位相特性を調べるために、加振周期 (2 ~ 15 秒の範囲で1秒ずつ) と加振振幅 (3, 5, 10, 14cm) の組み合わせを変えて実施した。

また、地震波としては、1983年日本海中部地震のときに各気象台あるいは測候所で観測された1倍強震計記録を数値化したもの4波を用いた。すなわち、森、苫小牧、八戸および室蘭の記録の NS 成分である。実験番号は、おのおの、頭部に MO, T, H, MR の記号を付し、続く Ai で入力最大振幅 i cm を示している。ただし、AO と表記してあるのは原波形のまま入力したことを示し、末尾の S は、正弦波実験と同様、振り切れたことを示している。

Fig. 3 には、振動台への入力波形のうち、TAO, MOAO, MRAO と HAO の変位波の例を示す。これらの波形は、日本海中部地震時の JMA 記録に各種の補正²³⁾を施し、周期2~20秒のチェビシェフ型漸化フィルター²⁵⁾を通したものである。入

表によれば、刻時精度は 1 ± 0.05 秒である。記録範囲は $6 \sim 500gal$ となっている。

6) 携帯式振動測定装置 (テレバイプロメーター) V401BR (明石製作所製)²⁴⁾

この計器は、内部にサーボ機構を有しており、取り扱いが容易であるので、現場測定用として最適な高振動数用振動計である。測定装置は振動検出器 V401BR と振動増幅器 AVL-25R3 よりなる。V401BR の振動数範囲は $DC \sim 400kHz$ 、固有振動数は約 $450Hz$ 、感度は $3V/g$ となっている。AVL-25R3 の振動数範囲の下限は $0.7Hz$ である。実験の際にはフィルターを施したので、振動数範囲は $0.7 \sim 30Hz$

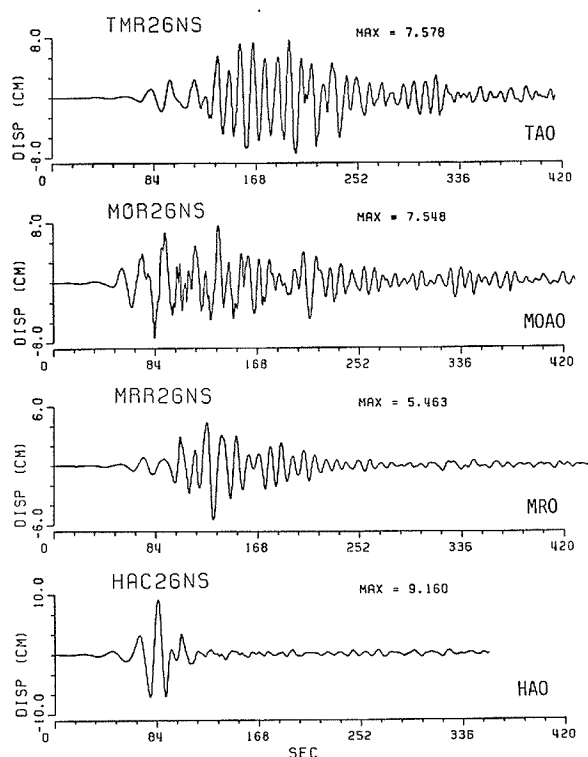


Fig. 3 Ground displacement motions calculated from JMA seismograms at four observation stations during the Nihonkai-chubu earthquake of 1983.

Table 1 Analytical cases for earthquake excitations

Seismographs Input Waves		Displacement Meter			Accelerograph		
		Differential Transformer-type	Winding-type DP-500B	JMA	SAMTAC-17E	SMAC-B ₂	V401BR
Tomakomai	TA5	○	○	○	×	×	○
	TAO	○	○	×	○	○	○
	TA12S	○	○	×	○	○	○
Mori	MOA5	○	○	○	○	×	○
	MOAO	○	○	○	○	○	○
	MOA12S	○	○	×	○	○	○
Murooran	MRAO	○	○	○	×	×	○
	MRA14S	○	○	×	○	○	○
Hachinohe	HA5	○	○	○	○	×	○
	HAO	○	○	○	○	×	○
	HA14S	○	○	×	○	○	○

力波形には、種々異なる周期特性・波形特性・継続時間を有する記録を選定した。

本研究では主に地震波実験の結果を報告する。地震波加振実験のうち、Table 1 に示す11ケースについて、特に記録のAD変換を行い、後述の解析に使用した。

2.4 記録の数値化と波形の処理

差動トランス型・巻込型変位計、サーボ型加速度計のSAMTAC-17EとV401BRの測定データは、アナログデータとしてカセットテープに記録した。そこで、本学大型計算機センター内のAD変換器を用いて、サンプリング間隔0.02秒で磁気テープに収録した。AD変換で作成されたデータはFortranで解析できるように処理し、さらに、実験の際のキャリブレーションと定格出力から、波形データを作成した。

1倍強震計JMAとSMAC-B₂型加速度計の数値化と補正は次のように実施した。

1) 1倍強震計 JMA

記録の数値化は、本学工学部土木工学教室計算機室所有のディジタイザーを用いて主に実施した。ディジタイザーは関東電子(株)のModel K510で、読み取りの最小分解能(公称値)は0.1mmである。まず、原記録は読み取り可能な程度に拡大した。次に、ディジタイザーにより波形をトレースするために、x, y座標を読み、これをフロッピーディスクに入力した後、大型計算機に転送した。また、確認のためプロッターにより記録波形を再生し、再生波形と実測波形を重ね合わせることで、目視で両者の一致度を調べた。なお、不正確な部分については、原則として、数値化をし直すことにした。ただし、記録を読み取る際に、波形が途切れていたり、不明確な箇所があるときには、前後の波の形状から推測した。

機械式地震計の記録には、零線、紙送りむら、円弧(ペンアームの長さ=30cm)、波形のゆがみ、等時間間隔(0.1秒)、摩擦や計器特性などに関する各種の補正を施した。次節で示すように、ペンの摩擦力を含めた非線形な運動方程式を解くことにより、記録波形から計器補正を考慮し、かつ摩擦の影響を除いた振動台の加速度が得られる。各種補正の詳細な説明については文献8)を参照されたい。

2) SMAC-B₂

まず、スタイラスペーパー上の記録を数値化する全長にわたって密着コピーにとり、数値化する区間ごとに区分線を挿入する。記録のコピーを数値化装置のテーブルにセットし、(x, y)座標のゼロ点を設定し、波形のトレースを行うと、数値化データはカードにパンチされる。地震波実験による記録の最大振幅は小さく(インパルスのピークを除くと、1~2mm程度)、SMAC-B₂の感度が12.5gal/mmであることか

ら、数値化は精度よく実施する必要がある。そこで、運輸省港湾技術研究所（以下では港湾技研と称する）や建設省土木研究所などが使用しているのと同じのディジタイザー（東京大学地震研究所所有）によって数値化した。このディジタイザーは通称 SMAC Reader と呼ばれている。分解能は 0.008mm（量子化の単位は 0.1gal に相当する）である。サンプリング間隔は 0.2mm（0.02 秒相当）とした。数値化の範囲は読み取り可能なものとし、おおよそ 138cm～175cm（2.3分～2.9分）であった。

SMAC-B₂ 強震計の記録は、港湾技研²¹⁾によると、①固定線補正、②区分的ゼロ線補正、③円弧補正、④記録紙送りの立ち上り補正、⑤時間間隔補正（以上は一次補正）と、⑥計器特性補正、⑦フィルタリング（二次補正）の各種補正が実施されている。実験に用いた SMAC-B₂ の計器には固定線を描くペンが装備されていないので、上記の①は実施していない。②の補正は港湾技研と同一の重みつき移動平均法²¹⁾によった。記録の数値化は始動部から数～10秒後から実施したので、④の補正は行わなかった。③と⑤の補正を含めた名種の補正は 2.4 1) で述べた方法と同じ手続によった。ただし、ペンのアーム長は 150mm とした。記録のタイムマークの間隔は 0.975～0.979cm/秒 であったので、特に時間間隔の補正に留意した。

2.5 地震計の計器特性

差動トランス型変位計、巻込型変位計 DP-500B とアナログ式サーボ型加速度計 V401BR の記録には、特に計器補正を施さなかった。本節では、他の地震計の計器補正について述べる。

1) 1 倍強震計 JMA

計器の変位波形 y は、その固有振動数を ω_0 、減衰定数を h 、摩擦値を r 、振動台の加速度を $\ddot{x}$ とすると、次式の運動方程式で表わされる。

$$\ddot{y} + 2h\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = \ddot{x} \pm \omega_0^2 r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、複号の $\pm$ は $y < 0$ のとき $+$ 、 $y > 0$ のとき $-$ となる。なお、摩擦値の r は、Photo. 4 の計器の場合、Fig. 2(a) から平均的に 0.012mm と求まる。

計器補正としては、周波数領域で強震計の振幅特性と位相特性を用いて補正するという手続をとらず、直接に式 (1) を解く方法によった⁸⁾。

2) SAMTAC-17E

強震計の総合的な計器特性 $F_s(f)$ は、総合的な振幅特性 $A(f)$ と位相特性 $\phi(f)$ を用いると、次式で表わせる⁸⁾。

$$F_s(f) = \exp\{i\phi(f)\} / A(f) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} A(f) &= A_1(f) \cdot A_2(f) \cdot A_3(f) \\ \phi(f) &= \phi_1(f) + \phi_2(f) + \phi_3(f) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A_1(f) &= 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{1-u^2}{2hu}\right)^2} \\ \phi_1(f) &= \tan^{-1} \left(\frac{2hu}{1-u^2} \right) - \frac{\pi}{2} \\ u &= f/f_0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} A_2(f) &= 1 / \left\{ 1 + \frac{1}{(2\pi fCR)^2} \right\} \\ \phi_2(f) &= -\tan^{-1} \{ 1 / (2\pi fCR) \} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} A_3(f) &= 1/\sqrt{(1-u_c^2)^2 + \left(\frac{u_c}{Q}\right)^2} \\ \phi_3(f) &= \tan^{-1}\left\{\frac{u_c}{Q}/(1-u_c^2)\right\} \\ u_c &= f/f_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

強震計の換振器からの信号はAD変換器により数値化される。地震動は、①換振器→②長周期のドリフト除去用ハイパスフィルター→③エリアジングフィルター→④AD変換器に至る過程により、記録される。従って、強震計の総合的な計器特性は、上記の①・②・③の影響を考慮したものではない。式

(4)は換振器の、式(5)は長周期のドリフト除去用ハイパスフィルターの、式(6)はエリアジングフィルターの特性を示したものである。

式(4)～(6)において、フィルターのパラメーターとしては、① $f_0=5\text{Hz}$, $h=240$, ② $C=10\mu F$, $R=1\text{M}\Omega$, ③ $f_c=55.3\text{Hz}$, $Q=0.73$ を用いた。

3) SMAC-B₂

強震計の加速度記録をフーリエ変換し、これに次式の振幅と位相の補正関数からなるフィルターをかけ、逆変換して補正加速度を求めた。

$$\left. \begin{aligned} A(f) &= \sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right\}^2 + 4h^2\left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \\ \phi(f) &= \tan^{-1}\left[2h\left(\frac{f}{f_0}\right)/\left\{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right\}\right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $f_0=1/0.136\text{Hz}$, $h=1$ とした。

差動トランス型と巻込型変位計の変位記録から速度と加速度波を得るには、高速フーリエ変換を利用した微分の操作により実施した。1倍強震計については、まず、式(1)により振動台の加速度波 $\ddot{x}$ を逆算した。そして、SAMTAC-17E, SMAC-B₂ と V401BR の加速度計記録と同様に、記録を線形加速度法によって積分し、変位と速度波を求めた。求めた波形にはチェビシェフ型の等リップル漸化式フィルター²⁵⁾のうち、特にバンドパスフィルター(2～20秒の範囲)を通した。

漸化式フィルターは、ある時刻における出力をその時刻以前の入力と出力から計算しているので、因果律を満たすが、位相は一般に零ではない。一方、一度フィルターを施して得られた出力にもう一度時間軸上で後から前にむかって同じフィルターを施せば、総合位相は零となるが、因果律は満たされない。そこで、位相が零になるように時間軸上で前後2回のフィルターを施し、かつ記録波形の端部においてはできる限り因果律を満たすようにフィルターのパラメーターを決めた。

3. 地震計の性能の定量化手法

3.1 計器の能力評価項目

地震計の総合的な精度を評価するには、換振器の振子系、記録系と処理系の各段階で、所要の精度を検討しておくことが必要である。すなわち、記録時の誤差混入と換振器特性などによる誤差の増幅、エリアジングの影響、数値化の誤差などを検討しなければならない。ここで対象としているような長周期(2～20秒)帯域での性能を評価する項目には、1)記録の最大振幅、2)分解能、3)エリアジング、4)低周波遮断特性と5)換振器の特性(特に気象庁1倍強震計)が考えられる。岡田^{22),23)}は、このような評価項目に関して定量的な解明を行うとともに、ダイナミックレンジと周波数レンジを詳細に議論した。ここでは、計器の能力評価項目の要点を記述する。

計器の振幅範囲としては、分解能とダイナミックレンジを検討しなければならない。岡田によれば、「分解能によるノイズとは換振器の分解能(固体摩擦など)・周辺温度環境変化などによる振子感度特性のゆらぎ(仕様では温度特性として表示)・振子の取り付け座標軸の不正による他成分振動の影響(横感度として表示)・記録系のA/D変換器の2進数値化丸め操作あるいは処理段階におけるアナログ記録の波形読み取

りに起因するノイズ, それらを総称したものを言い, いずれも周波数依存性のない白色雑音的スペクトル形を有する」とされている。SMAC-B₂ については, 後処理段階での零基線設定や記録の数値化などによる人為的誤差が伴い, これまで十分な検討がなされてきた^{17), 18), 21)}。

ダイナミックレンジとは, 記録最小振幅に対する最大振幅の比を言う。今, 分解能が n ビットであれば, 計器の取り扱い最大値を $\pm A$ gal (cm) とすると, $\pm A/(2^{n-1}-1) \sim \pm A$ gal (cm) の範囲で記録が可能である。ダイナミックレンジは $20 \log_{10}(2^{n-1}-1)$ dB となる。アナログ記録方式 (1 倍強震計 JMA あるいは SMAC-B₂ 型加速度計) の分解能は 8~10 ビットである。すなわち, ダイナミックレンジは 42~54 dB となる。この関係に従えば, 記録が可能な最小振幅は, JMA で $\pm(0.06 \sim 0.24)$ mm, SMAC-B₂ で $\pm(0.98 \sim 3.9)$ gal となる。ただし, この振幅まで解析が可能という意味ではない。

記録を Δt 間隔でサンプリングする場合, 真のスペクトル $S(f)$ ではなく, スペクトルの推定値 $\hat{S}(f) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} S\left(\frac{i}{\Delta t} + f\right)$ が求められる。この場合, エリアジングとは, $2f_N$ (Nyquist 周波数 $f_N = \frac{1}{2\Delta t}$) の整数倍だけ異なった周波数をもつ短周期成分波のスペクトルが長周期側のスペクトルに折り重なり合う現象を言う。この現象が著しく現われないようにするためには, 1) Δt を小さくするか, 2) サンプリングの前段で不要な短周期成分波を除去する高周波遮断回路 (エリアジングフィルター) を設けなければならない。

低周波遮断特性によるみかけ上の SN 比低下の原因は次の通りである。すなわち, 岡田に従えば, 「計器設置点の傾斜, 換振器のドリフトなどにより, 零基線が片寄り, その出力電圧が記録系の増幅器などへの入力電圧レベルを越えてしまうことがある。それを防ぐために, 記録系に低周波遮断回路が内蔵されているのが通常であるが (ただし, 装置が機械系のみから構成される場合には考慮の要はない), この回路が見掛け上分解能によるノイズの長周期帯を持ち上げ, SN 比を低下させてしまう。」とされている。このため, ドリフト除去用ハイパスフィルターが換振器の出力電圧にかけられる。

1 倍強震計は, 振子の固有周期よりも長い周期帯で, 変位感度特性が激減し, かなり大きな補正効果を持つ。例えば, 水平成分の補正は, 周期 10 秒で 2.6 倍, 15 秒で 5.9 倍, 20 秒で 10.8 倍となる。従って, 見かけ上分解能によるノイズがこれらの周期帯で持ち上げられるため, 長周期側の SN 比が低下する。なお, 換振器の固有周期や減衰定数の評価も, 記録の信頼度に影響を及ぼす。

3.2 所要の精度の検討

地震計の信頼度の評価とは, 従来よく行われているように, 波形や応答スペクトルを目視で比較して, 「この程度合致しておれば, 信頼性は高い」というような定性的な判断ではなく, 定量的に行う必要がある。本来, この問題は, 地震計の特性と入力スペクトル特性との関係で理論的に評価される性質のものである。何を判断基準として一致度を検討するのか, また「この程度」というあいまいな表現ではなく, 計器の能力的側面から, 誤差の基準を明らかにしなければならない。そうすることにより, 工学的利用の立場から見て, この程度の誤差は認容でき, 実記録はこれをクリアーしているということが言える。本研究では, できる限り, これらの目標の実現を図ることとする。

本研究では, 定量的な評価基準として, ①最大振幅の比, ②エネルギーの比, ③エネルギーの残差, ④相互相関誤差関数, ⑤フーリエスペクトル, ⑥ SN 比, ⑦コヒーレンスを採用した。⑦については次節で詳細に述べることにし, ここでは①~④を定義する。

今, 差動トランス型変位計で直接測定した振動台の変位, それから求めた速度・加速度を $x_1(t)$, 強震計の加速度記録あるいは他の変位計記録から計算した波を $x_i(t)$ とする。ここで, $i=2 \sim 6$ は, それぞれ, 巻込型変位計 DP-500B ($i=2$), 1 倍強震計 JMA ($i=3$), デジタル式サーボ型強震計 SAMTAC-17E ($i=4$), SMAC-B₂ 型強震計 ($i=5$), アナログ式サーボ型振動計 V401BR ($i=6$) を示す。

各計器間のコモンタイムは必ずしも共通しているわけではない。従って, 上記①~⑦の評価に当たっては, まず, 時間のずれをなくした。これには, 相互相関関数 $R_{x_1 x_i}(\tau)$ ($i=2 \sim 6$) が最大となる時間のずれ $\tau_{\max}$ を求めることにより, $x_i(t)$ ($i=1 \sim 6$) を補正する方法をとった。 $x_1(t)$ と $x_i(t)$ ($i=2 \sim 6$) の比較は, 共通の

継続時間 T 内で行った。その結果、①～④の評価基準は次式で表わせる。

$$\textcircled{1} \quad a_i = \frac{|x_i(t)|_{\max}}{|x_1(t)|_{\max}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\textcircled{2} \quad b_i = \int_0^T x_i(t)^2 dt / \int_0^T x_1(t)^2 dt \dots\dots\dots (9)$$

$$\textcircled{3} \quad c_i = \frac{1}{T} \int_0^T \{x_1(t)^2 - x_i(t)^2\} dt \dots\dots\dots (10)$$

$$\textcircled{4} \quad d_i = 1 - \frac{\int_0^T x_1(t) x_i(t) dt}{\left\{ \int_0^T x_1(t)^2 dt \right\}^{1/2} \left\{ \int_0^T x_i(t)^2 dt \right\}^{1/2}} \dots\dots\dots (11)$$

式 (8) ～ (11) より明らかなように、 $x_i(t)$ が $x_1(t)$ とよく一致するほど $a_i, b_i \rightarrow 1, c_i, d_i \rightarrow 0$ となる。

解析に必要な記録精度すなわち SN 比は、地震動スペクトルと 3.1 で述べた計器の能力評価項目から理論的に決まる^{22), 23)}。ここで示した評価基準は、本来、SN 比との対応関係により評価されるものである。従って、地震動の振幅レベルによって、地震計記録の分解能・ダイナミックレンジ・サンプリング間隔・エリアジングフィルターなどを検討する必要がある。

3.3 コヒーレンスの算定法

コヒーレンスは波形のゆがみの程度を表わす尺度である。今、差動トランス型変位計の記録波形（変位、速度、加速度）を $x_1(t)$ 、そのパワースペクトルを $S_{x_1}(\omega)$ 、その他の 5 つの計器（DP-500B, JMA, SAMT AC-17E, SMAC-B₂, V401BR）の記録波形（変位、速度、加速度）を $x_i(t)$ ($i=2\sim6$)、そのパワースペクトルを $S_{x_i}(\omega)$ とする。従来よりのコヒーレンスの定義²⁶⁾によれば、コヒーレンスは、 $x_1(t)$ と $x_i(t)$ が完全相関を有するときに 1、相関性を有さないときに 0 になる。しかし、川上ら²⁷⁾によれば、① 2 つの波形が全く同一波形であっても、時間のずれが存在するときにはコヒーレンスが 1 にならない、② 2 つの波形が独立であっても、コヒーレンスは 0 にならない、ことが指摘されている、そこで、本研究では川上らが提案したコヒーレンスの算定法を用いて、各地震計の長周期成分の精度を検討した。

改良されたコヒーレンス $\text{coh}^2(\omega)$ は、まず、① 2 つの波形に時間のずれがあるときには、相互相関関数 $R_{x_1 x_i}(\tau)$ を計算し、 $R_{x_1 x_i}(\tau)$ が最大となる $\tau_{\max}$ を求め、 $\tau_{\max}$ だけ波形をずらし、波形のずれをそろえる (Fig. 4 の上図を参照)、次に、② 2 つの波形が独立なときのアンサンブル平均値をコヒーレンスの下限値とし、それ以下の値は相関の程度を表わすコヒーレンスの値として意味がないものと考え (Fig. 4 の下図参照)、次式で算出した。

$$\text{coh}^2(\omega) = \frac{\text{coh}^2(\omega) - E[\text{coh}^2(\omega)]}{1 - E[\text{coh}^2(\omega)]} \dots\dots\dots (12)$$

上式の $\text{coh}^2(\omega)$ は、ウィンドーを用いたスペクトルの平滑化によって得られる従来のコヒーレンスであり、次式で求められる。

$$\text{coh}^2(\omega) = \frac{|\hat{S}_{x_1 x_i}(\omega)|^2}{\hat{S}_{x_1}(\omega) \hat{S}_{x_i}(\omega)} \quad (i=2\sim6) \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $x_1(t)$ と $x_i(t)$ のクロススペクトルを $S_{x_1 x_i}(\omega)$ とし、ウィンドー $W(\omega)$ を用いると、次式が得られる。

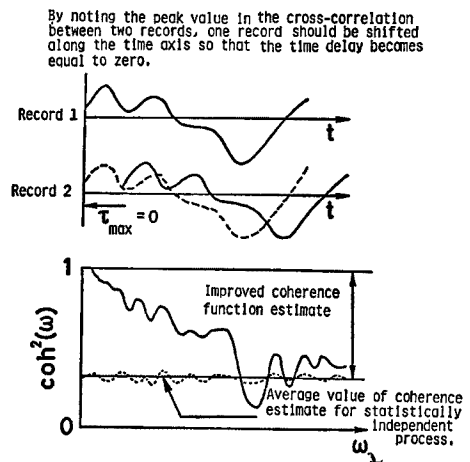


Fig. 4 Improved coherence function estimate after Kawakami et al.

$$\hat{S}_{x_j}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_j}(\omega_1) W(\omega - \omega_1) d\omega_1 \quad (j=1 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\hat{S}_{x_1 x_i}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_1 x_i}(\omega_1) W(\omega - \omega_1) d\omega_1 \quad (i=2 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、ウィンドーとしては、コヒーレンスが理論上の要請どおりに0～1の範囲に抑えられると言われている Parzen ウィンドー²⁶⁾を用いた。本解析では、平滑化のためのバンド幅 b (Hz) として、0.2を採用した。

$$W(\omega_1) = \frac{3}{4} u \left\{ \frac{\sin\left(\frac{\omega_1 u}{4}\right)}{\frac{\omega_1 u}{4}} \right\}^4 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$u = \frac{280}{151b}$$

式 (12) において、独立波形のアンサンブル平均値である $E[c\hat{o}h^2(\omega)]$ は、川上ら²⁷⁾に従い、次式により算出した。

$$E[c\hat{o}h^2(\omega)] = \frac{\hat{S}_{x_1 x_i}(\omega)}{\hat{S}_{x_1}(\omega) \hat{S}_{x_i}(\omega)} \quad (i=2 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、

$$\hat{S}_{x_1 x_i}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_1}(\omega_1) S_{x_i}(\omega_1) W(\omega - \omega_1) d\omega_1 \quad (i=2 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (18)$$

各種の変位計や加速度計から求めた波形は差動トランス型変位計の波形と比較するわけであるが、その場合、コヒーレンスは、変位波、速度波と加速度波どうしで独立に算出する。コヒーレンスがどの程度の値をとれば、どれくらいの周期範囲で地震計に所要の精度があるのかは、SN 比が3.1で述べた能力評価項目に基づいて計算されるレベルを保持している範囲から決定される。

4. 実測地震動記録に対する波形特性の再現性

4.1 補正フィルターのパラメーターの決定

(1) 概 説

加速度記録から地動変位を精度良く求めることが、最近の長周期構造物の発達に伴い、重要視されている。加速度記録の低周波成分は、一般に、地震のないときに得られる計器のランダムノイズにも達することがある。従って、加速度の低周波ノイズを慎重に除去することが必要である。このため、これまで各種の補正フィルターが提案されてきた²⁸⁾。しかし、一般には位相変化のないフィルターによって低周波ノイズを除去することが多く、計算された地動変位の初動部分は大きく歪む。本節では、このような歪をなるべく小さく抑えるために、等リップル通過帯域型のチェビシェフフィルター²⁵⁾ (漸化式フィルター) を用い、フィルタリングの能率を調べて、加振実験で得られた加速度計や変位計の記録を相互比較することにより、補正フィルターのパラメーターを決定した。

(2) 漸化式デジタルフィルター法による地動変位の解析

Fig. 5 は、1983年の日本海中部地震時の余震観測 (秋田) で得られた加速度記録の一例である。Fig. 6 には、Fig. 5 の加速度記録に台形フィルターと漸化式フィルターを施して求めた、0.15～10Hz の周波数帯域の地動変位を示す。台形フィルターは因果律を満たさないで、波は全般的に歪んでおり、実際に

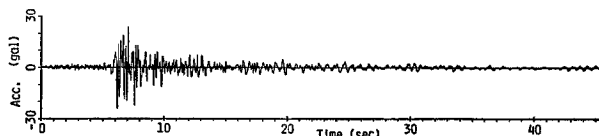


Fig. 5 Acceleration seismogram of aftershock (June 1, A. M. 8: 19) at Akita city during the Nihonkai-chubu earthquake of 1983.

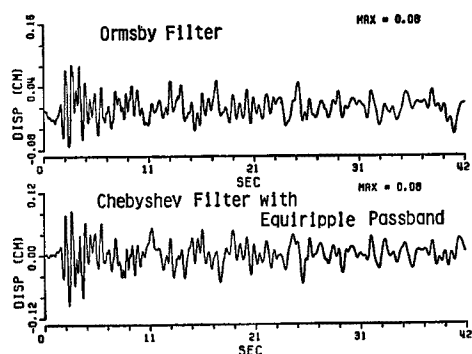


Fig. 6 Comparison of ground displacement calculated from Ormsby filter with one from Chebyshev filter with equiripple passband.

と遮断帯の波の振幅に関係した A_p と A_s のパラメーターによってコントロールされる。本研究では、2.5 で述べたように、加速度から速度・変位を計算するのに線形加速度法を用い、上記の漸化式フィルターを通した。

(3) フィルタリングの能率

加振実験で得られた地震計の記録に基づいて、上記のパラメーター A_p と A_s が波形にどのような影響を及ぼすかを調べてみた。Fig. 8 は、差動

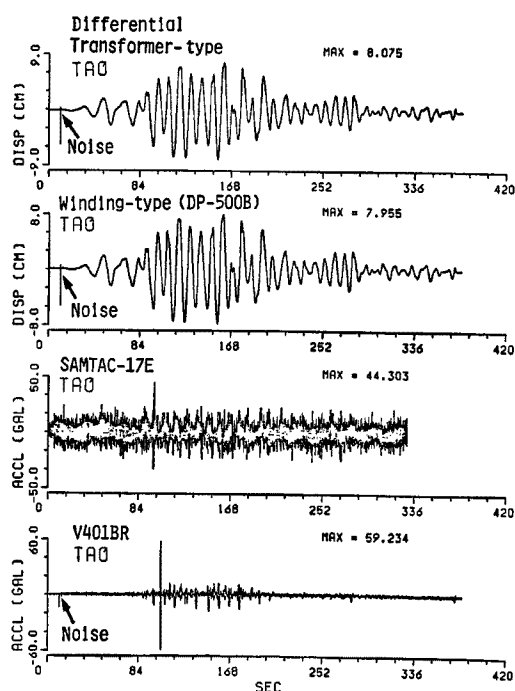


Fig. 8 Records by different kinds of displacement meters and accelerographs on shaking table driven by TAO record.

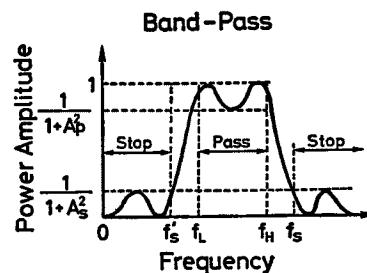


Fig. 7 Schematic frequency response function of Chebyshev bandpass recursive filter.

ない不自然な波が出現している。ここで採用した漸化式フィルターの総合的な周波数応答は Fig. 7 のようになる。フィルタリングの能率は、周波数毎の通過帯

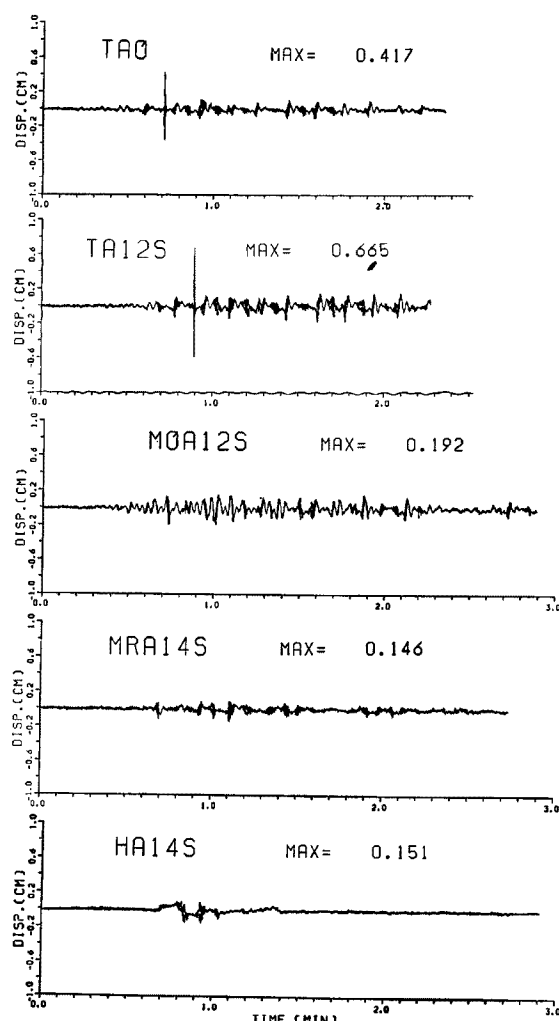


Fig. 9 Records by SMAC-B₂ accelerograph on shaking table driven by five different kinds of earthquake excitations.

トランス型変位計, 巻込型変位計 DP-500B, デジタル式サーボ型加速度計 SAMTAC-17E とアナログ式サーボ型加速度計 V401BR の原記録 (TAO) である。SMAC-B₂ 型加速度計記録 TAO は Fig. 9 のようになる。図中には他の地震記録 (TA12S, MOA12S, MRA 14S, HA14S) も示されている。自記紙上の SMAC 記録の最大振幅は, インパルス部を除くと, たかだか 2mm 程度 (25gal 相当) である。

振動台への入力波は周期 2~20秒の変位波 TAO (Fig. 3 参照) である。Fig. 3 と Fig. 8 を比べてわかるように, 入力波と基準変位波 (差動トランス型変位計記録) の最大振幅はオペレーター操作により若干異なっており, また波の正負が逆転している。いずれにしても, 変位計が正常に作動していることが確かめられた。SAMTAC-17E は, 後述するように, 6 秒程度までに信頼性のあることが検証された。そこで, 0.5~6 秒の周期帯域に対して, 高周波成分がかなり卓越している SAMTAC-17E の加速度計記録 TAO (Fig. 8) から変位波を求めてみた。

Fig. 10 はフィルタリングの能率を調べたもので, 図の上から, 1) 通過帯でのパワー振幅の振動幅 (P) = -0.02dB , 遮断帯でのそれ (S) = -40.09dB , 2) $P = -1.94\text{dB}$, $S = -40.09\text{dB}$, 3) $P = -0.02\text{dB}$, $S = -64.09\text{dB}$, 4) $P = -1.94\text{dB}$, $S = -64.09\text{dB}$ のときの変位波である。同一の A_p に対して A_s を大きくすると, 通過帯域での周波数成分が乱れ, 波の形が変化するとともに, 最大振幅値が小さくなる。一方, 同一の A_p に対して A_s を小さくすると, カットオフ周波数 f_c より低い周波数帯域での波の振幅特性の減衰がゆるやかになり, 低周波のノイズが強調された波形となって, 最大振幅値が大きくなっている。 A_p と A_s の最適値は記録の SN 比に大きく左右されることが考えられる。

Fig. 11 には, $P = -0.09\text{dB}$ 以下に, $S = -64.09$

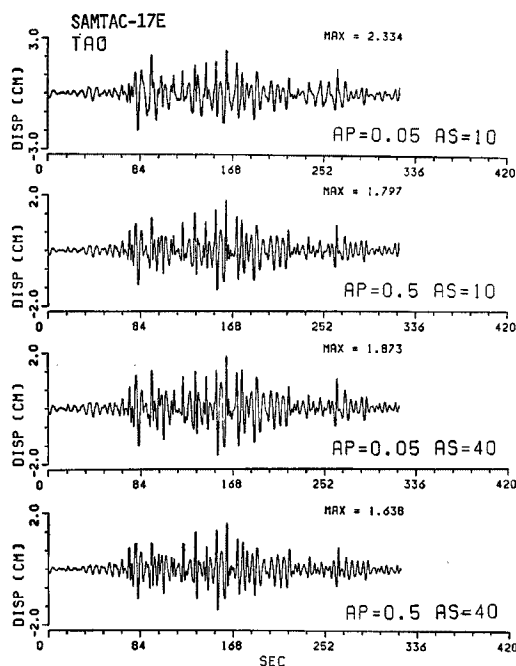


Fig. 10 Effect of nondimensional parameters A_p and A_s , that specify maximum attenuation in passband and minimum attenuation in stopband, on distortion in displacement waveform (0.5 to 6 sec) calculated from SAMTAC-17E record TAO.

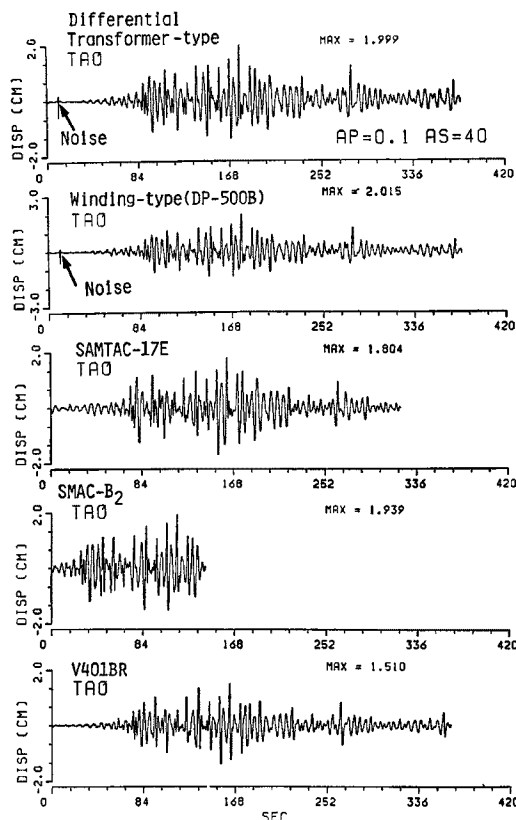
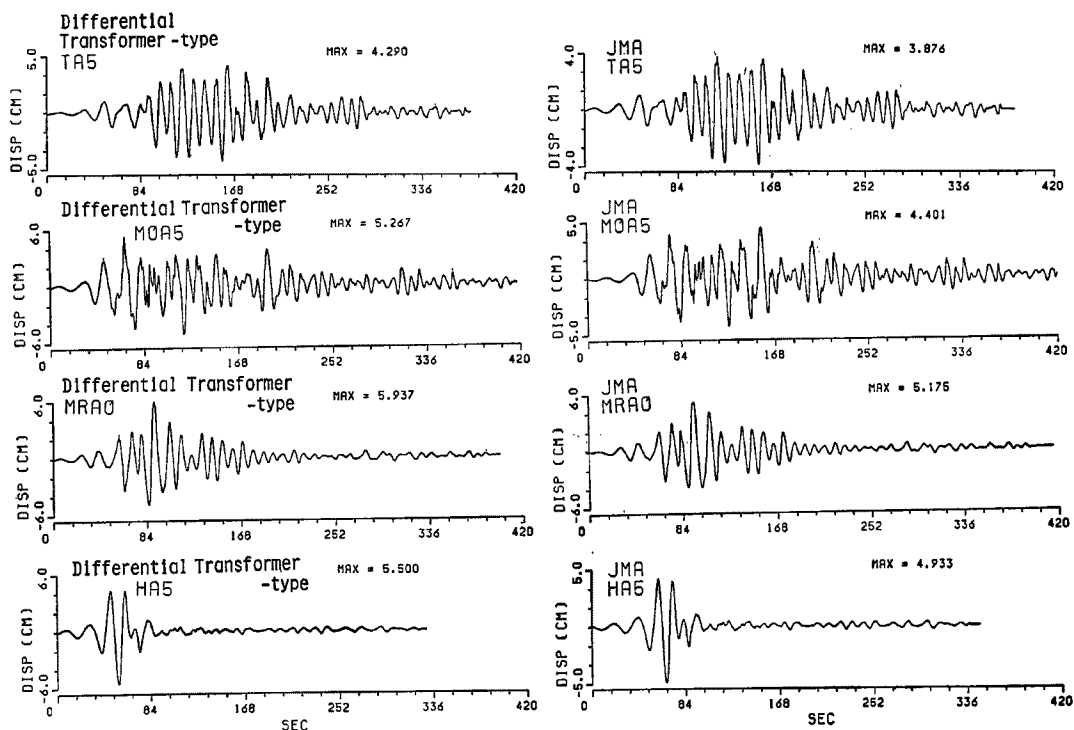
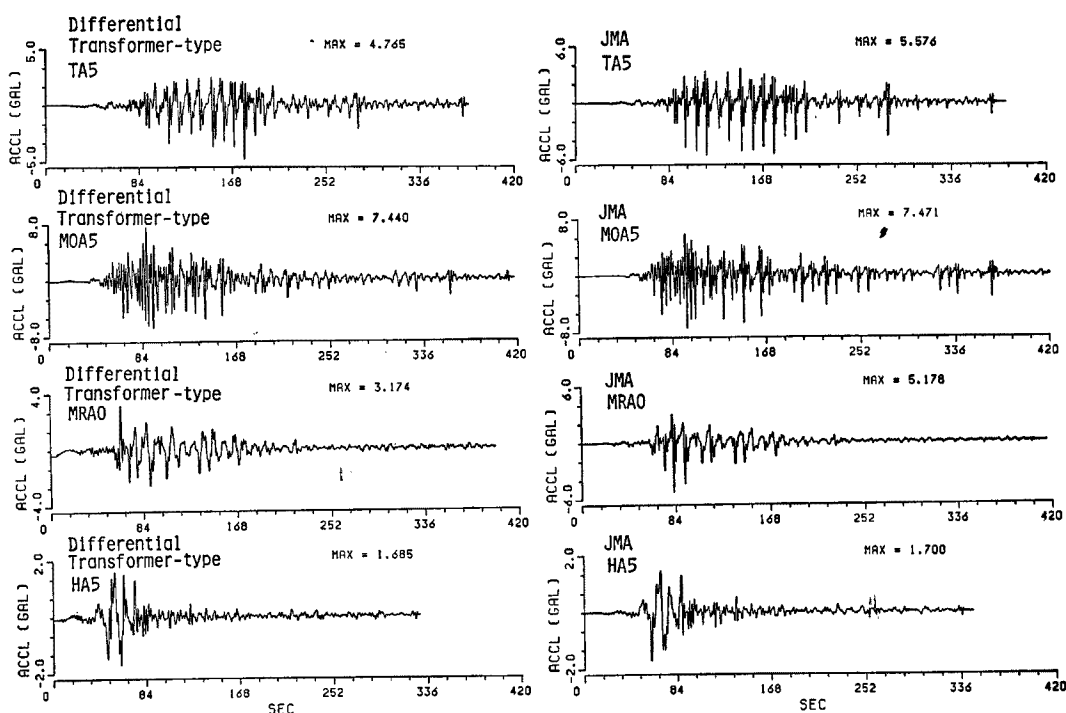


Fig. 11 Comparison of displacement waveform (0.5 to 6 sec) calculated from motion of shaking table with those from other kinds of seismographs and displacement meter.



(a) Displacement



(b) Acceleration

Fig. 12 Comparison of waveform (2 to 20 sec) of differential transformer-type displacement meter with that calculated from JMA record subjected to different earthquake excitations.

dB 以下にして、各種の計器(差動トランス型変位計、巻込型変位計 DP-500B, SAMTAC-17E, SMAC-B₂ 型と V401BR の加速度計)から求めた変位波を比較した。差動トランス型と巻込型変位計の初動部にはインパルスの波が観測されている。このような場合、既往の補正フィルターを用いると、初動変位に因果律を満たさない波が現われて歪むが、漸化式フィルター法では、歪が小さく抑えられている。また、各種計器の変位波を比較すると、初動付近も含めて振幅や位相に対して全般的に良い一致が見られ、漸化式フィルター法は加速度記録から精度良く変位を求めることができる威力ある一方法であると言える。

以上のことから、以後の解析では、漸化式フィルターのパラメーターとして、 $A_p=0.1$ と $A_s=40$ を採用した。

4.2 変位波形の再現性

(1) 波形の比較による記録性能の解析

本項では、まず、差動トランス型変位計と各種地震計の記録から求めた変位波と加速度波の形状を目視で比較し、次に式(8)～(11)の評価基準により、地震計記録の性能を検討した。なお、巻込型変位計 DP-500B の記録波形は差動トランス型変位計のものとはほぼ同一であったので、ここでは割愛した。

Fig. 12 は、4つの地震波(TA5, MOA5, MRAO と HA5)に対し、差動トランス型変位計と気象庁1倍強震計 JMA から計算した周期2～20秒の変位波(図中の(a))と加速度波(図中の(b))を比べたもの

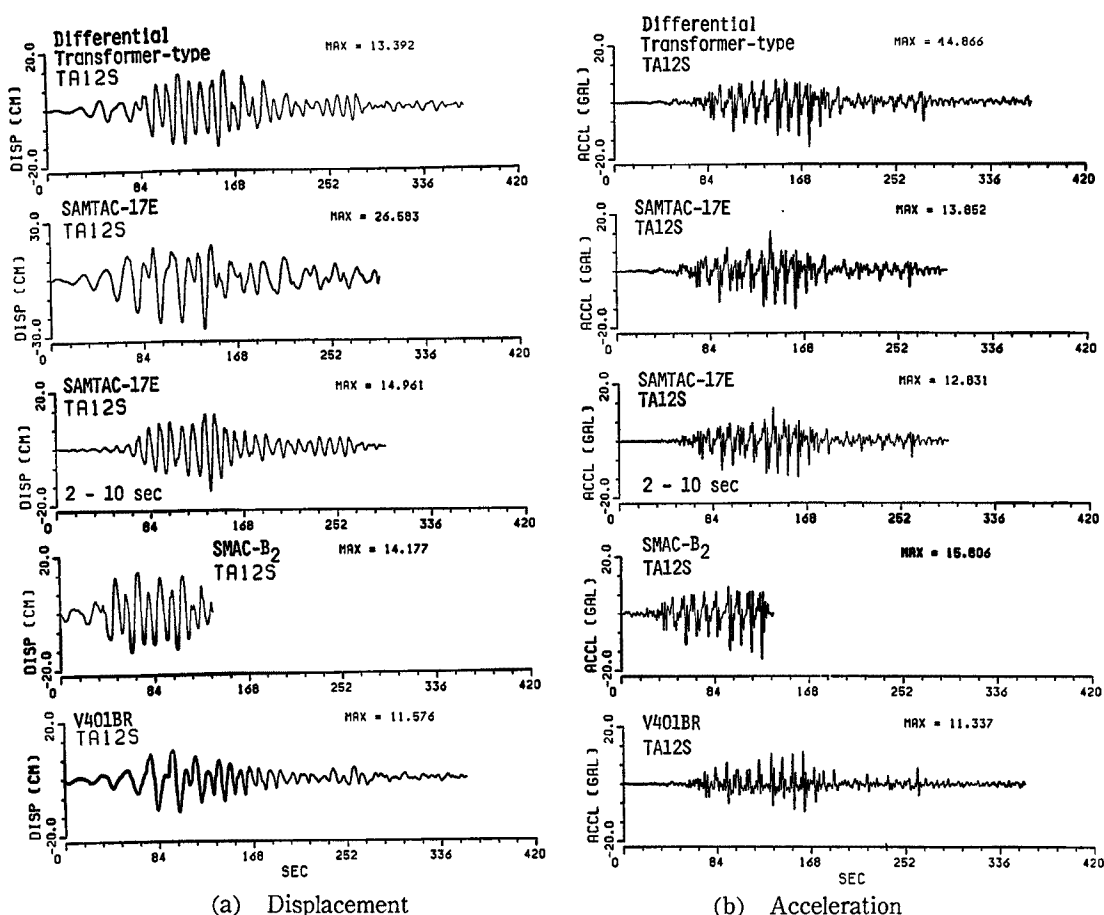


Fig. 13 Comparison of waveform (2 to 20 sec) of differential transformer-type displacement meter with those calculated from other kinds of seismographs subjected to TA12S record.

である。**Fig. 13** では、TA12S 地震波の振動台への入力に対し、差動トランス型変位計と各種地震計（サーボ型デジタル式強震計 SAMTAC-17E, SMAC-B₂ 型強震計, サーボ型アナログ式振動計 V401BR）記録からの波形を比較した。図中、(a) は変位波, (b) は加速度波の結果である。各種計器による記録波形は、周期帯域 2 ～ 20 秒のバンドパスフィルターを通してている。ただし、長周期側の遮断周期 20 秒に対する SAMTAC-17E の変位波形では、極めて長周期の成分が優勢であり、フィルターの遮断周期の影響を調べるために、2 ～ 10 秒の波形も併記した。**Fig. 13** と同様にして、**Fig. 14** には MOA12S 地震波の、**Fig. 15** には MRA14S 地震波の、**Fig. 16** には HA14S 地震波の結果を示した。

Table 2 には、**Fig. 12**～**Fig. 16** の波形の性状に対して、差動トランス型変位計と各種地震計（JMA, SAMTAC-17E, SMAC-B₂ と V401BR）記録の性能を、最大振幅の比（式 (8)）、エネルギーの比（式 (9)）エネルギーの残差（式 (10)）と相互相関誤差関数（式 (11)）の各評価基準を用いて検討した。記録性能は、変位波、速度波と加速度波ごとに独立に調べた。表中 (a) は苫小牧の地震波（TA5, TA12S）の、(b) は森（MOA5, MOA12S）の、(c) は室蘭（MRAO, MRA14S）の、(d) は八戸（HA5, HA14S）の結果である。

地震計の記録振幅を地動に換算して表示するため、従前の研究では、正弦波加振実験によって検出器の感度周波数特性を調べることが多かった。しかし、これは、ある周期を有する単一の正弦波に対する周期ごとの振幅倍率を示すものであり、正弦波のアンサンブルである実地震動の特性を表わすものではない。従って、

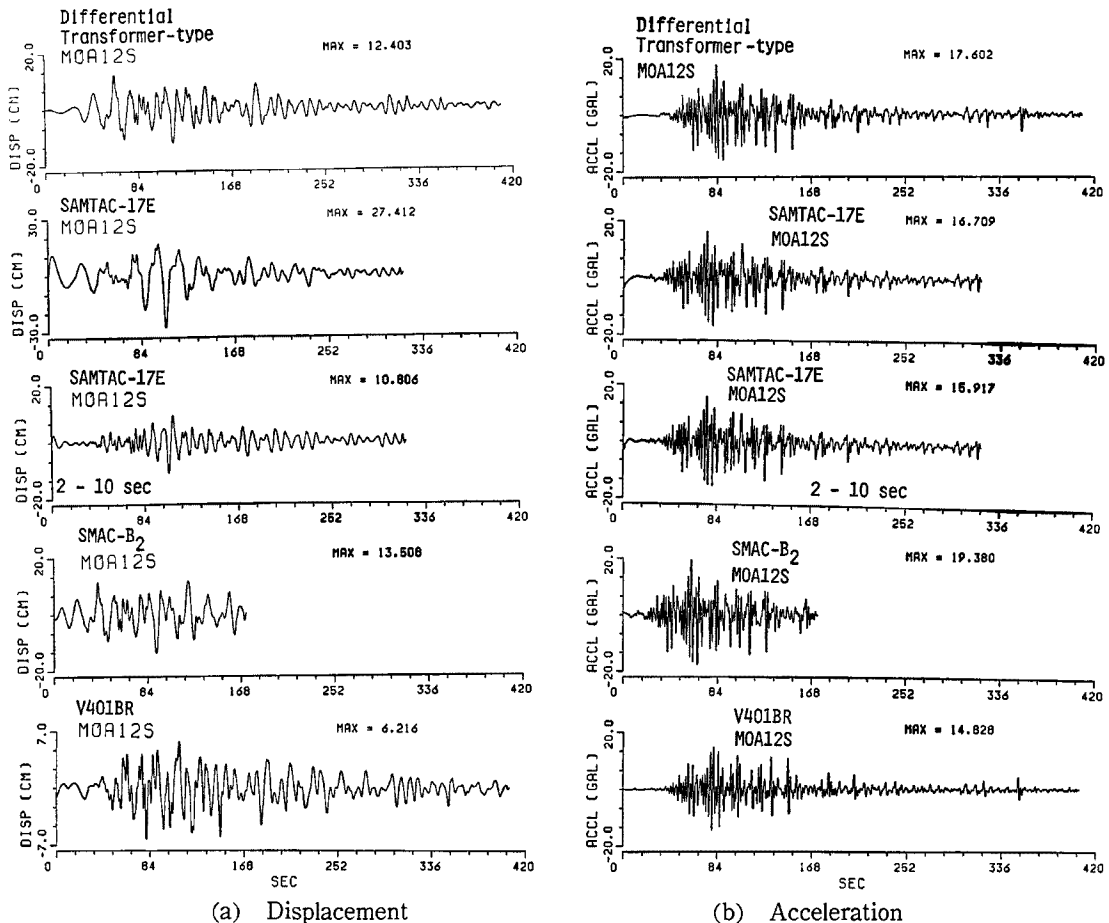


Fig. 14 Comparison of waveform (2 to 20 sec) of differential transformer-type displacement meter with those calculated from other kinds of seismographs subjected to MOA12S record.

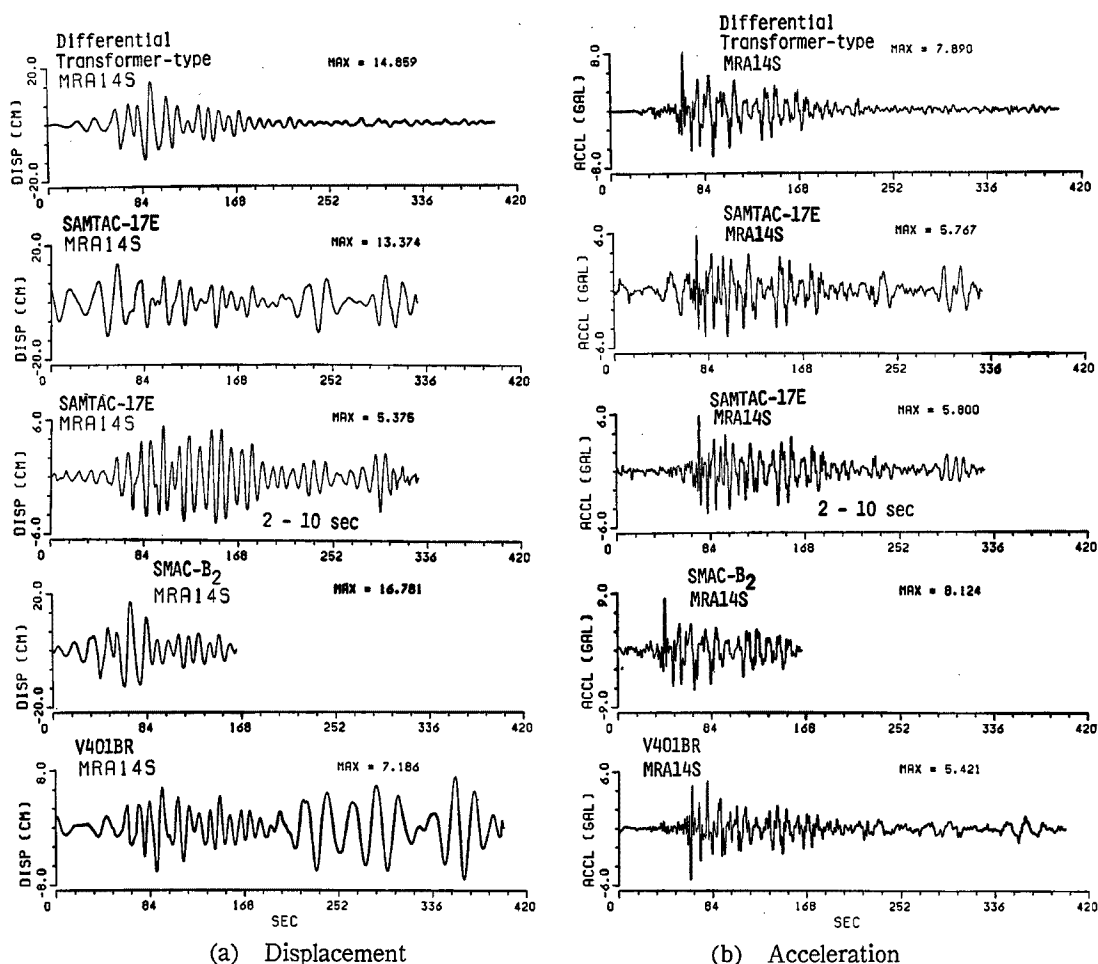


Fig. 15 Comparison of waveform (2 to 20 sec) of differential transformer-type displacement meter with those calculated from other kinds of seismographs subjected to MRA14S record.

地震計の周波数レンジとダイナミックレンジを正確に知るには、正弦波実験ではなく、実地震波の加振実験を行う必要がある。こうした観点から、Fig. 12～Fig. 16 および Table 2 の考察を実施した。

JMA の変位計と差動トランス型変位計の絶対時刻は同期していないが、両者の変位波を重ね合わせると、最大振幅に違いは見られるものの、記録の始動部からコーダ部全体に対して、細かいリップルを含めた波の相は実によく一致している。一方、加速度の波形については、1) TA5 と MRAO の最大振幅が違うものの、MOA5 と HA5 については調和的である、および 2) 波形の強震部や鋭い髭状のいくつかのピークを除いて、波の形状の変化には大差がない、という特徴を有する。JMA の加速度波において髭状のピークが極端に増幅される原因としては、1) デジタイザーによって原記録波形を読み取る場合、振幅の大きい箇所ではできるだけ細かく不等間隔で数値化するようにしたもの、円弧状に描かれた自記紙の読み取りと円弧補正や波形のゆがみの補正のための読み取り時刻の調整の結果、さらには記録線の太さが0.2～0.3mm である波形を最小分解能が0.1mm であるデジタイザー（関東電子（株）社製の Model K510）で読み取ったこと、また人為的誤差も混在して、波形のピーク付近で高周波のノイズが入りやすくなったこと、および 2) 記録の強震部では波形が突出した形状に近いため、特にこのような状況になりやすいことが考えられる。

Table 2 の最大振幅比とエネルギー比からわかるように、低振動数域の波ほどすなわち加速度から速度さらに変位波になるほど、過小に評価されやすい。しかしながら、加速度波よりも変位波の相互相関誤差関数

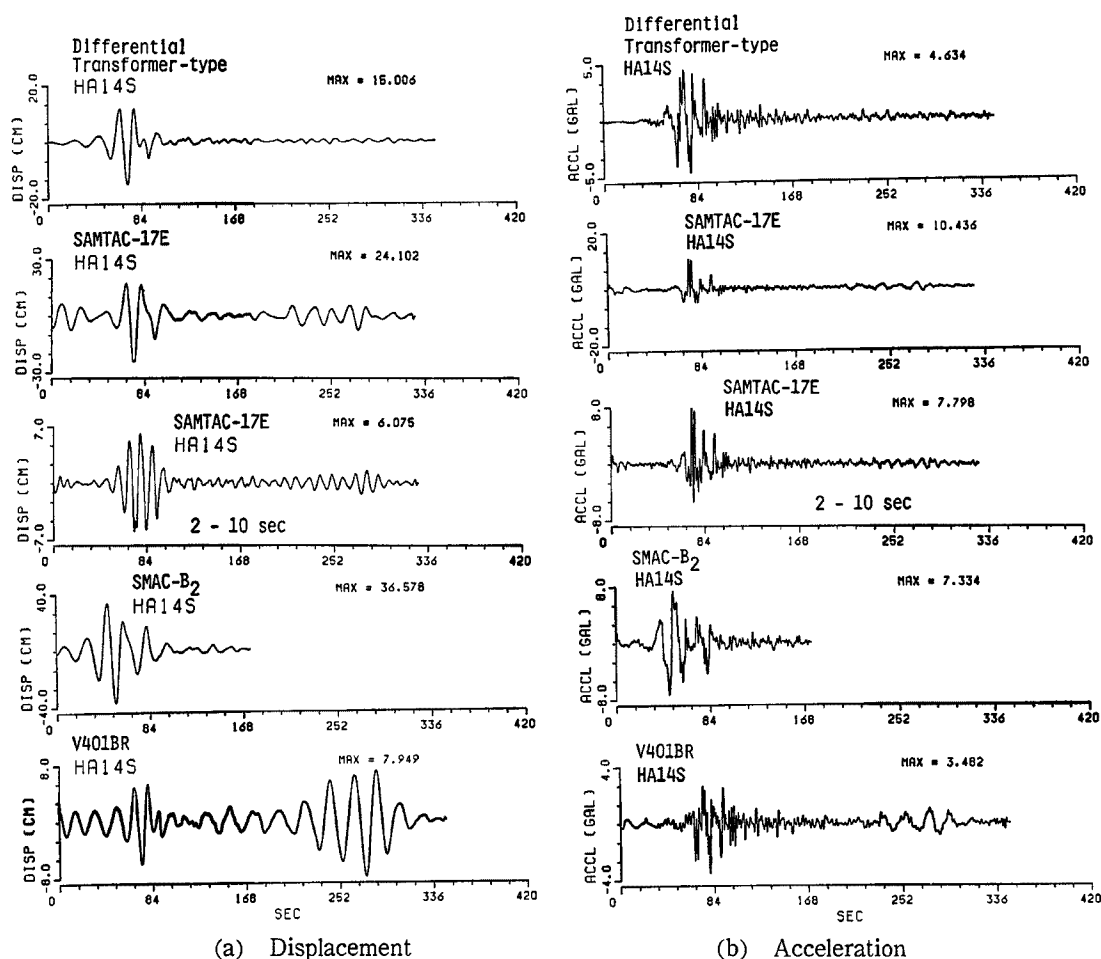


Fig. 16 Comparison of waveform (2 to 20 sec) of differential transformer-type displacement meter with those calculated from other kinds of seismographs subjected to HA14S record.

が0に近く、波形の全体像が明確に識別できている。1倍強震計記録の短周期側の精度が低下しやすいことは文献11)においても指摘されている。JMAの計器は、固有周期より長い周期帯域で感度が極端に低下する(周期>20秒で短周期域の1/10.8以下)。従って、この領域の波形成分のSN比は低下する危険性が高い。Fig. 12およびTable 2の結果は、周期20秒程度を遮断周期に設定しておけば、計器補正の効果が適正であることを示している。記録精度に関するさらに進んだ議論は次項で取り扱う。

周期20秒を長周期側の遮断周期に設定すると、SAMTAC-17Eの変位波形には、差動トランス型変位計記録に比べて、1)長周期の波が卓越しており、最大振幅はかなり過大である、しかも2)振動台入力波形の始動部ならびに最強部以降のコーダ部に長周期のghost waveが出現している。両者の波形の性状は全く異なっており、SAMTAC-17Eの変位波形のゆがみは著しい。このようなノイズ波が換振器や記録装置(特に、ドリフト除去用ハイパスフィルターとエリアジングフィルター)のどの段階で混入したのか、現時点では定量的に解明することは難しいし、そのメカニズムを明確にできない。

SAMTAC-17Eの記録精度を実験的に検討した例としては文献6)と19)が挙げられる。しかし、これらの実験では、本研究のように周期10秒前後の変位波を対象とはせず、1~4 Hzほどの卓越振動数を有する加速度波を振動台に入力している。従って、長周期成分のSN比は低くなることから、これらの文献では、本研究のように、SAMTAC-17Eの長周期帯域での記録性能の不充分さを指摘するまでには至っていない。実際

の地震観測態勢下において、波形のゆがみがどのように現れるかは、今後解明されねばならない問題である。

一方、SAMTAC-17E の加速度波を見ると、長周期成分の誤差が除去され、波の形状や最大振幅が差動トランス型変位計のものと対応する傾向がある。こうした傾向は周期2～10秒の変位波 (TA12S, MOA12S) にも見られ、長周期の成分を除去すれば十分であることを主張している。ただし、HA14S 地震波に対しては、周期2～20秒と2～10秒での変位波および加速度波とも特異な挙動を示している。他の地震波 (TA12S, MOA12S, MRA14S) に比べて、HA14S の強震部の継続時間は短く、衝撃的な変位地動に近い。また、

Table 2 Measures for evaluating quantitatively performance of four seismographs subjected to different earthquake excitations

(a) Tomakomai

Record		TA5	TA12S		
Seismographs		JMA	SAMTAC-17E	SMAC-B ₂	V401BR
Performance Measures					
Ratio of Max. Amplitude	Disp.	0.9034	1.9850	1.0586	0.8644
	Vel.	1.0630	1.3331	1.0127	0.6316
	Acc.	1.1703	0.9318	1.0633	0.7626
Ratio of Energy	Disp.	0.8152	2.6464	1.0915	0.4681
	Vel.	0.8961	1.4036	1.0278	0.3777
	Acc.	1.5701	1.0641	1.0697	0.5743
Residual of Energy	Disp.	0.2836	-31.611	-3.1316	8.5277
	Vel.	0.0647	-3.2013	-0.3947	4.1259
	Acc.	-0.3124	-0.4425	-0.8722	2.4627
Normalized Cross-correlation Error Function	Disp.	0.0776	0.4074	0.0560	1.6962
	Vel.	0.1538	0.2117	0.0266	1.6918
	Acc.	0.4763	0.0840	0.0271	1.3944

(b) Mori

Record		MOA5	MOA12S		
Seismographs		JMA	SAMTAC-17E	SMAC-B ₂	V401BR
Performance Measures					
Ratio of Max. Amplitude	Disp.	0.8356	2.2101	1.0891	0.5011
	Vel.	0.8668	1.2568	1.1087	0.7261
	Acc.	1.0042	0.9493	1.1010	0.8424
Ratio of Energy	Disp.	0.8622	2.5469	1.0743	0.2735
	Vel.	0.8283	1.2322	1.0610	0.4534
	Acc.	0.9963	0.9425	1.1516	0.7170
Residual of Energy	Disp.	0.2295	-18.235	-1.4243	6.8332
	Vel.	0.1327	-1.2848	-0.5352	2.4267
	Acc.	0.0054	0.6062	-2.7376	2.3826
Normalized Cross-correlation Error Function	Disp.	0.1281	0.3793	0.1518	0.5091
	Vel.	0.2818	0.1797	0.0573	0.3261
	Acc.	0.6393	0.0307	0.0254	0.3609

Table 2 Continued.

(c) Muroran

Record		MRAO	MRA14S		
Seismographs		JMA	SAMTAC-17E	SMAC-B ₂	V401BR
Performance Measures					
Ratio of Max. Amplitude	Disp.	0.8716	0.9001	1.1294	0.4836
	Vel.	1.2173	0.6805	1.0405	0.5467
	Acc.	1.6315	0.7309	1.0297	0.6871
Ratio of Energy	Disp.	0.9073	1.9139	1.2539	0.8097
	Vel.	0.9256	1.2664	1.0779	0.4605
	Acc.	1.3334	0.9690	0.9839	0.4455
Residual of Energy	Disp.	0.1182	-9.2951	-4.9006	1.5578
	Vel.	0.0306	-0.8852	-0.4875	1.4445
	Acc.	-0.0702	0.0519	0.0503	0.7497
Normalized Cross-correlation Error Function	Disp.	0.0423	0.7484	0.0559	0.5300
	Vel.	0.0742	0.4810	0.0334	0.3357
	Acc.	0.3659	0.2344	0.0233	0.5424

(d) Hachinohe

Record		HA5	HA14S		
Seismographs		JMA	SAMTAC-17E	SMAC-B ₂	V401BR
Performance Measures					
Ratio of Max. Amplitude	Disp.	0.8970	1.6062	2.4376	0.5297
	Vel.	1.1624	1.5654	2.5993	0.4473
	Acc.	1.0085	2.2519	1.5826	0.7514
Ratio of Energy	Disp.	0.8636	3.3424	8.3615	0.9104
	Vel.	0.8819	2.4959	5.4990	0.5528
	Acc.	0.9005	2.2432	3.0253	0.4887
Residual of Energy	Disp.	0.1136	-14.809	-85.689	0.5328
	Vel.	0.0212	-2.0515	-11.300	0.5773
	Acc.	0.0068	-0.6516	-1.9334	0.2525
Normalized Cross-correlation Error Function	Disp.	0.0109	0.1615	0.0804	0.6393
	Vel.	0.0372	0.1546	0.1112	0.4713
	Acc.	0.3335	0.2017	0.2003	0.5910

HA14S の加速度レベルは 4.6gal であり、他の地震波よりも小さい。このようなことから、HA14S の加速度波が極端に増幅される原因としては、1) SN 比の観点からして波形のピーク付近で高振動数ノイズが目立ち、かつ 2) オーバーハングに近い形状をしているためと考えられる。

SAMTAC-17E は加速度計であるから、1 倍強震計 JMA に比べて、高振動数成分の波形の再現性が高い。明らかに長周期の ghost wave が存在している記録波形を除くと、Table 2 からわかるように、変位波よりも加速度波ほど、TA12S と MOA12S における最大振幅の比・エネルギー比は 1 に漸近し、相互相関誤差関数は 0 になりやすい。このことは、計器が正常に作動して長周期のノイズが増幅されないならば、SAM-

TAC-17E の記録が波形分析に有効に利用されうることを示唆している。

SMAC-B₂ 型加速度計は地震動に含まれる数秒以上の長周期成分の記録精度の劣化が甚だしい。このことは再々にわたり指摘されてきたところである^{15)~18)}。そして、そのメカニズムが文献 19) で明確にされ、さらに文献 20) で改善の方法が具体化された。しかしながら、これまで、**Fig. 9** に示すように、加速度レベルが小さくしかも周期の長い (10秒前後の) 実変位波による加振実験はほとんどなされていない。

Fig. 13~Fig. 15 より、SMAC-B₂ の最大振幅は、差動トランス型変位計の基準記録振幅よりも若干過大であるが、いずれの実地震記録でも、両波形の形状に大差はない。加速度振幅の小さい長周期成分波は、SMAC のようなアナログ式強震計では誤差に埋もれてしまいがちである。しかしながら、図の結果は必ずしも見逃す恐れのないことを示唆している。このことは、**Table 2(a)~(c)** に示す記録性能の定量的な評価基準からも確認できる。

前出の 3.1 のように、SMAC-B₂ 記録の可能な最小振幅は $\pm(0.98\sim3.9)$ gal であった。SMAC 型振子自体の正常な動作下限は 0.01gal ほどであることが知られている。記録性能が比較的良かった原因としては、1) 振動台を変位制御でコントロールし、入力波形に長周期成分が多く含まれていたため、SN 比が上がったこと、および 2) 分解能の高いディジタイザーを用いて、記録の読み取りを慎重に行ったことが考えられる。**Fig. 13~Fig. 15** に示す波形の振幅が少し大き目なのは、土岐ら¹⁹⁾が指摘しているように、記録紙とペンの間に内在する摩擦に起因しているかもしれない。

一方、**Fig. 16** の HA14S 地震波加振に対して、SMAC-B₂ の記録振幅はかなり過大な評価となっている。記録紙上の HA14S の波形は他の地震波による記録波形よりも特異である。原記録の読み取り (**Fig. 9** 参照) は等間隔 (0.02秒) で行った。従って、振幅が急に減少したりあるいは増加する部分の波形の読み取り間隔が粗くなって、ノイズが入りやすくなったことが過大評価につながったものと推察される。

振動検出器 V401BR は、DC-400Hz の振動数帯域で加速度感度がフラットである。しかし、記録信号は振動増幅器 AVL-25R3 を通るため、0.7Hz 以下の周波数成分は正確に再現できない。**Fig. 13~Fig. 16** よりわかるように、記録振幅は当然過小に評価される。**Fig. 15(a)** (MRA14S) と **Fig. 16(a)** (HA14S) の変位波には、SAMTAC-17E で見られた長周期の ghost wave が正常な記録波形の最強部以上に顕著に現われている。

(2) 1 倍強震計の記録精度の検討

振り切れない場合の 1 倍強震計の記録精度を検討した例としては、これまでも振動台実験による篠らの研究¹¹⁾や佐々木らの研究¹²⁾がある。本研究では、これらの結果を参考にしつつ、使用計器の精度および数値化に伴う各種の誤差を把握することを試みた。

1 倍強震計の数値化は主に関東電子 (株) のディジタイザー Model K510 を用いて行った。しかしながら、このディジタイザーの最小分解能は 0.1mm である。従って、数値化時の人為的誤差 (単純な読み取りミス、波形の視準位置や読み取り間隔の誤差)、機械的誤差 (機械の分解能や故障による誤差) や記録紙の変形 (ゆがみ) に伴い、誤差が増幅されることが考えられる。そこで、系統的なあるいはランダムな誤差の発生を避けるために、前項で議論した波形の読み取り人を変え、さらに異なるディジタイザーを採用して、慎重に数値化を実施した。なお、本項での 1 倍強震計記録の読み取りは、セイコー電子工業 (株) 製のディジタイザー D-SCAN, DH7500 (A0 版) で行った。本器の読み取り精度 (分解能) は 0.0254mm である。

まず、振幅が約 3cm、周期が 4 秒から 14 秒の正弦波入力の場合 (A3P4~A3P14) について検討した。1 倍強震計記録に各種の補正⁹⁾を施し、差動トランス型変位計から得た振動台変位の周期および倍振幅と比較したのが **Table 3** である。誤差は、周期および倍振幅ともたかだか 2% (平均的に周期で -0.35%、倍振幅で -0.62% の誤差) であり、十分な記録精度が得られていることがわかる。

次に、地震波入力に対する結果を示す。**Table 4** は、4 種の地震波 (MOAO, TAO, HA12S と MRAO) に対する変位波の最大振幅を比較したものである。-6.2~8.1% の誤差が生じており、平均的には数% の誤差が認められる。Model K510 のディジタイザーを用いた場合、**Fig. 12 (a)** と **Table 2** よりわかるよう

Table 3 Errors for period and maximum amplitude calculated from JMA seismogram subjected to sinusoidal excitations

Experiment code	Period(sec)			Double amplitude(cm)		
	Shaking table	JMA	Error(%)	Shaking table	JMA	Error(%)
A3P4	3. 99	4. 07	2. 01	6. 18	6. 23	0. 81
A3P6	6. 00	5. 89	−1. 83	6. 22	6. 15	−1. 13
A3P8	8. 00	7. 96	−0. 50	6. 20	6. 16	−0. 65
A3P10	9. 99	9. 97	−0. 20	6. 21	6. 22	0. 16
A3P12	11. 98	11. 93	−0. 42	6. 24	6. 17	−1. 12
A3P14	13. 99	13. 83	−1. 14	6. 22	6. 11	−1. 77
Mean value			−0. 35	Mean value		−0. 62

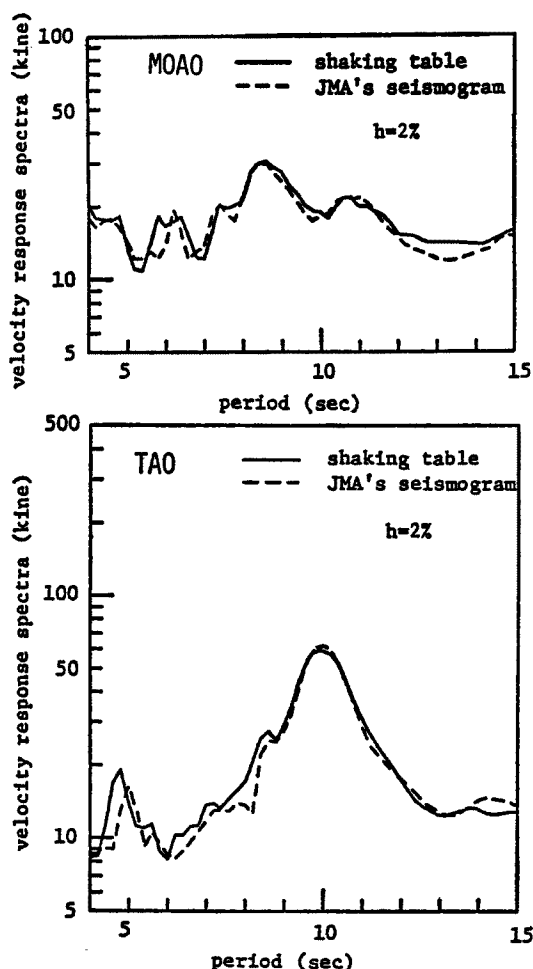
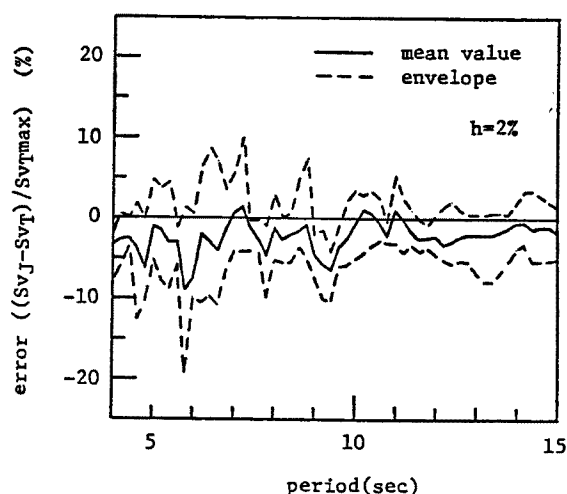
Fig. 17 Comparison of velocity response spectra ($h=2\%$) calculated from motions of shaking table with those from JMA seismograms subjected to two earthquake excitations (MOAO and TAO).

Table 4 Errors for maximum amplitude calculated from JMA seismogram subjected to earthquake excitations

Experiment code	Maximum displacement(cm)		
	Shaking table	JMA	Error(%)
MOAO	7.46	-7.00	-6.17
TAO	-7.99	8.64	8.14
HA12S	-12.26	-12.05	-1.71
MRA8	8.13	8.76	7.75
Mean value			2.00

Fig. 18 Errors for velocity response spectra ($h=2\%$) calculated from JMA seismograms subjected to different earthquake excitations.

に、Table 4 の波形と最大振幅は異なるが同一の変位波形に対し、MOA5 で16.4%、TA5 で 9.7%、HA5 で10.3%、MRAO で12.8%の誤差が生じていた。2つのディジタイザーの分解能は約4倍違うということ、および SMAC 型強震計記録の数値化精度の検討結果¹⁷⁾を参考にして慎重な読み取りを行ったことから、Table 4 の結果は Table 2 に比べてはるかに改善されている。特に、森と八戸の記録の読み取り精度の向上が著しい。

Fig. 17 には、森の波形 (MOAO) と苫小牧の波形 (TAO) を入力した場合の振動台の波形および1倍強震計記録より求めた速度応答スペクトル ($h=2\%$) を示す。両者のスペクトルは周期8秒および10秒前後のピークでよく一致している。Fig. 18 には、Table 4 に示した4種の地震波について、速度応答スペクトル ($h=2\%$) の誤差をまとめた。すなわち、1倍強震計記録と振動台変位の速度応答スペクトル値の差 ($S_{vj}-S_{vr}$) を、4~15秒の周期範囲における振動台の最大応答スペクトル値 ($S_{vr_{max}}$) で基準化し、4地震波についての最大・最小および平均をまとめたものである。図より、周期4~15秒で平均的には-5~1%程度の誤差であり、最大・最小でも±10%程度の誤差で収まっている。正弦波加振実験に比べると、地震波加振実験の誤差は大きくなっている。実記録では多くの振動数成分が含まれるため、誤差の評価は実地震記録の方が厳しいものにならざるを得ない。

以上の検討より、1倍強震計記録の読み取りを分解能の高いディジタイザーで慎重に行った場合、その読み取りおよび各種の補正を含めた総合的な誤差は、±10%程度、平均的に数%であると考えられる。

4.3 フーリエスペクトルの検討

差動トランス型変位計と各種地震計の原記録から求めた加速度フーリエ振幅スペクトルを示したのが、Fig. 19 と Fig. 20 である。計器補正などの処理は実施されている。Fig. 19 は Fig. 12 の地震波による JMA のフーリエスペクトルである。Fig. 20 は、SAMTAC-17E、SMAC-B₂ と V401BR の各加速度計のフーリエスペクトルを示している。図中 (a)~(d) の地震波は、おののおの、Fig. 13~Fig. 16 に対応してい

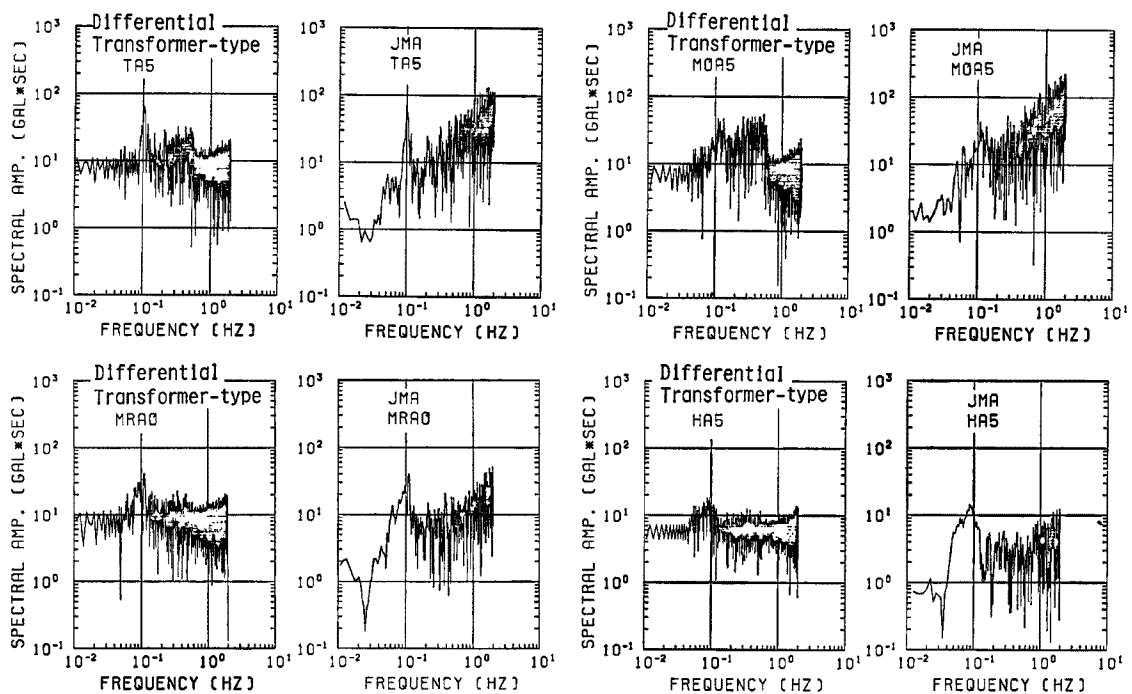


Fig. 19 Comparison of acceleration Fourier amplitude spectra of differential transformer-type displacement meter with those of JMA seismograph subjected to four earthquake excitations.

る。サンプリング間隔が Δt 秒であると、 $\frac{1}{2\Delta t}$ Hz 以上の周波数成分は再現できない。従って、フーリエスペクトル図は Nyquist 周波数以下で議論されている。なお、V401BR についてはフーリエスペクトル図を示すに留めておく。

振動台への入力地震波 (Fig. 3 の変位波) は、Fig. 7 の等リップル通過帯域型チェビシェフフィルタにより、周期 2~20 秒の成分波で構成されている。Fig. 7 のカットオフ周波数は $f_L=0.05$ Hz (20 秒), $f_H=0.5$ Hz (2 秒), ロールオフ周波数は $f'_s=0.025$ Hz (40 秒), $f_s=0.5$ Hz (1 秒) とした。周期 2 秒以下と周期 20 秒以上の成分波は本質的にはノイズ波である。Fig. 19 と Fig. 20 の差動トランス型変位計の加速度フーリエスペクトルから、1) フィルタの特性により、0.05 Hz からおよび 0.5 Hz からロールオフ周波数近くまで、スペクトルは漸次減少している、2) フィルタの特性と振動台の性能により、0.05 Hz 以下の長周期側のフーリエ振幅はほぼ一定の値を保っている、3) 実験の際、振動台は起動中でも、無加振状態で高周波のノイズ波が現われていた、4) 0.5 Hz 以上の短周期側の波は 3) の場合の振動台の揺動が含まれたもので、ノイズ成分の加速度フーリエスペクトルは高振動数になるとともに増大している、ということがわかる。こうしたことから、各種地震計の比較は主に 0.05~0.5 Hz の帯域に限定したが、高周波のノイズ波による加速度計の記録性能も調べた。

差動トランス型変位計記録のサンプリング間隔は 0.02 秒、JMA のそれは 0.1 秒であった。サンプリング間隔の相違により、両者の加速度フーリエスペクトル (2~20 秒) の形状に多少の差は認められるものの、大局的にはよく対応している。JMA のフーリエスペクトルは、約 0.18~0.5 Hz の帯域で若干過小に評価される傾向にある。また、入力地震波の周波数帯域外において、長周期側ではかなり過小に、短周期側ではかなり過大に評価されている。JMA はアナログ式の変位計であり、ノイズの変位波のレベルは入力の大きさによらず一定である。従って、高周波になるとともに SN 比が小さくなり、ノイズ成分が強調され、加速度フーリエスペクトルは振動数とともに増大する。

SAMTAC-17E の加速度フーリエスペクトルは、周期 2~約 10 秒において、差動トランス型変位計のものの相関性が高い。しかし、Fig. 13~Fig. 16 の波形からして、フーリエ位相スペクトルの再現性のよくないことが予想される。約 10 秒あたりから長周期側において、両者の形状に差が目立ち始め、SAMTAC-17E のフーリエスペクトルは長周期領域で増大する傾向にある。すなわち、長周期のノイズ波が混入したフーリエスペクトルは、スペクトルと周波数の両対数軸上で 45° 右下がりの直線状になっている。誤差の発生のメカニズムはよくわからないが、このようなノイズは土岐ら^{19),20)} が提案した方法によって除去できる可能性がある。すなわち、原波形の加速度フーリエスペクトルを $A(\omega)$ 、位相スペクトルを $\phi(\omega)$ (補正前後で不変とする) とし、 $(A(\omega) - \frac{N}{\omega})e^{i\phi(\omega)}$ (ただし、 N は時間領域でのノイズレベル) で補正を行う。

SAMTAC-17E は短周期側の感度がよく、分解能からして 0.5 Hz 以上のノイズ波は解析に十分耐えうることをわかる。短周期のノイズ波のスペクトルは、0.7~1 Hz あたりから振動数とともに増大し、5 Hz 付近で明瞭なピークがあり、その後急激に減少し、8 Hz 付近で谷となり、さらに上昇している。こうした傾向は地震波によらず共通に現われており、ノイズ波は採用した振動台に特有のものと考えられる。短周期のノイズのスペクトル形状は SMAC-B₂ のものとも類似している。ただし、この場合、短周期帯域では分解能が悪すぎて、SMAC-B₂ のフーリエ振幅には誤差があると推察される。

HA14S の入力地震波を除いて、SMAC-B₂ の加速度フーリエスペクトル (2~20 秒) は差動トランス型変位計のものをかなり忠実に再現していることがわかる。スペクトルの相関性の高さが Fig. 13~Fig. 15 の波形にも現われたものと理解できる。加振実験による SMAC-B₂ 原記録 (Fig. 9 参照) の最大振幅はそれほど大きくなかった。入力レベルが大きいかつ長周期の成分が卓越しておれば、長周期側の SN 比は当然高くなる。本結果は、このような場合、適切な補正を施せば、SMAC-B₂ の長周期域での信頼度が高まることを示唆しているものと言える。

4.4 コヒーレンスによる精度の定量評価

異なる地震波に対して、差動トランス型変位計と各種地震計記録のコヒーレンスを求めたのが Fig. 21~Fig. 23 である。Fig. 21 には JMA の、Fig. 22 には SAMTAC-17E の、Fig. 23 には SMAC-B₂ のコヒーレンスを示す。各図とも、コヒーレンスは変位波と加速度波について検討した。入力地震波のレベルが地震計の性能にどのような影響を及ぼすかを調べるため、同一の地震波で振動台への入力振幅が異なる場合のコヒーレンスも計算した。すなわち、SAMTAC-17E では八戸記録 (HAO と HA14S) が、SMAC-B₂ では森記録 (MOAO と MOA12S) がこの場合に該当する。巻込型変位計記録のコヒーレンスは、3 地震波 (MRAO, HA5, HAO) において、5.5 秒から 2 秒へと短周期側に移行するにつれて 0.8 前後に低下していたが、全般的にはほぼ 1 に近い値を示していた。

変位波であれ、加速度波であれ、これらの波形のコヒーレンスは周期とともに同一の挙動を示すことが望ましい。強震計が変位 (加速度) 変換に耐え得る SN 比を有しておれば、このことは当然実現されるべきことである。しかしながら、Fig. 21~Fig. 23 に示されるように、この条件を満足する地震計は 1 倍強震計 JMA だけである。SAMTAC-17E や SMAC-B₂ のコヒーレンスの傾向は変位波と加速度波で異なっている。SAMTAC-17E ではその差が特に

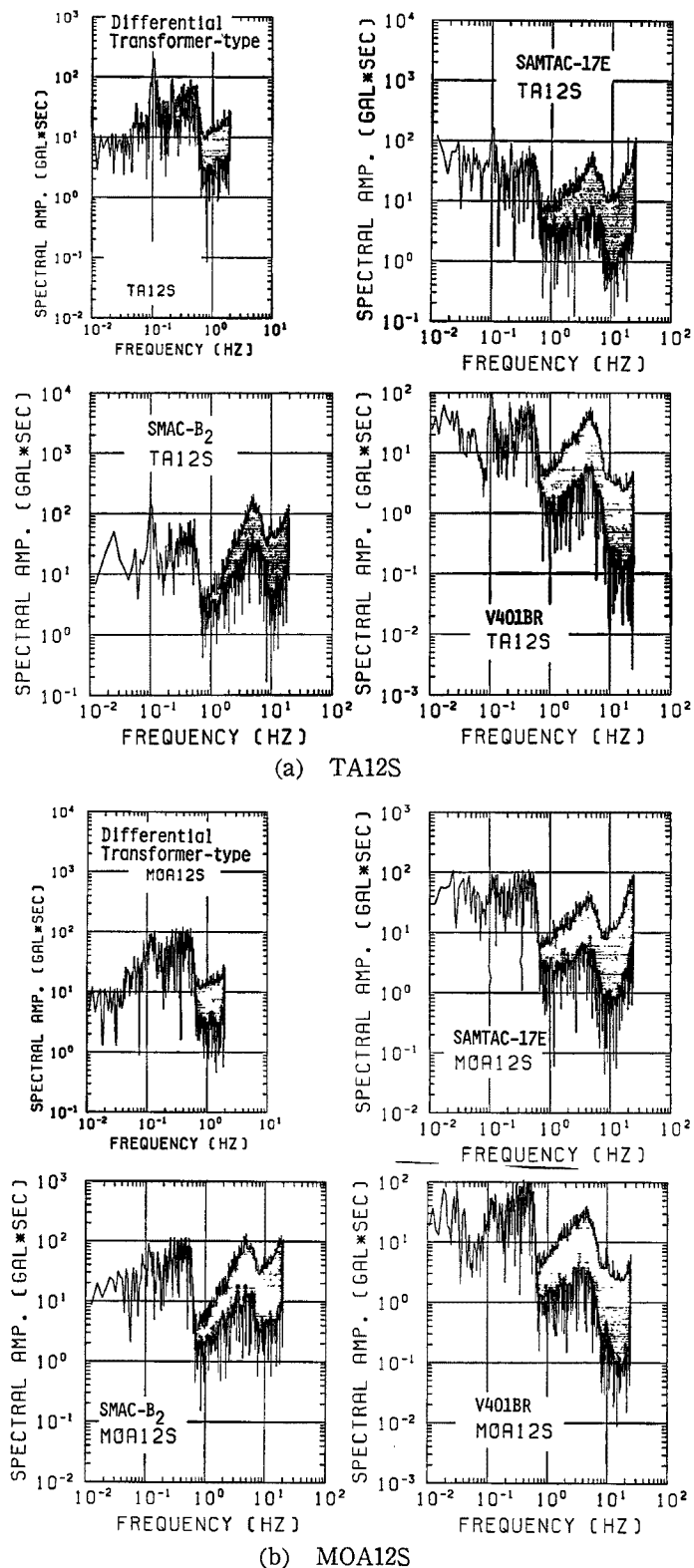
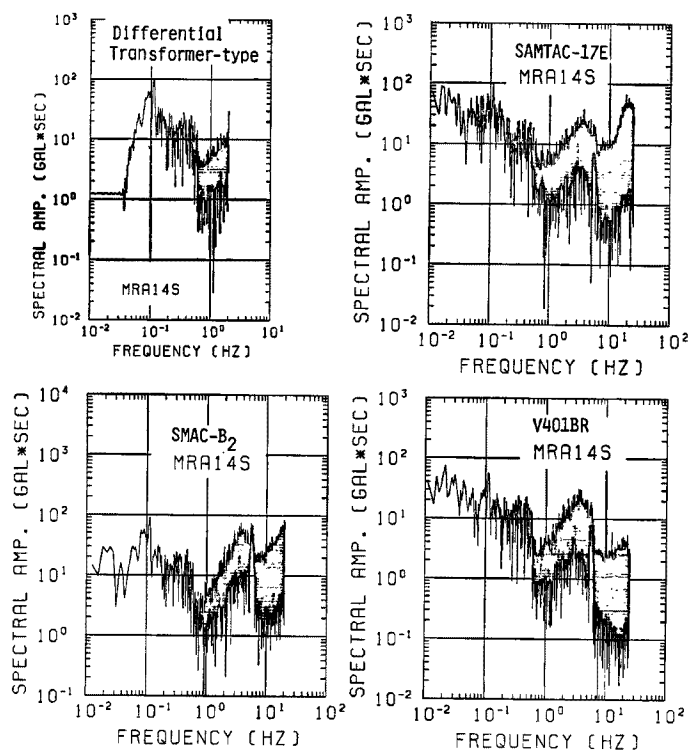
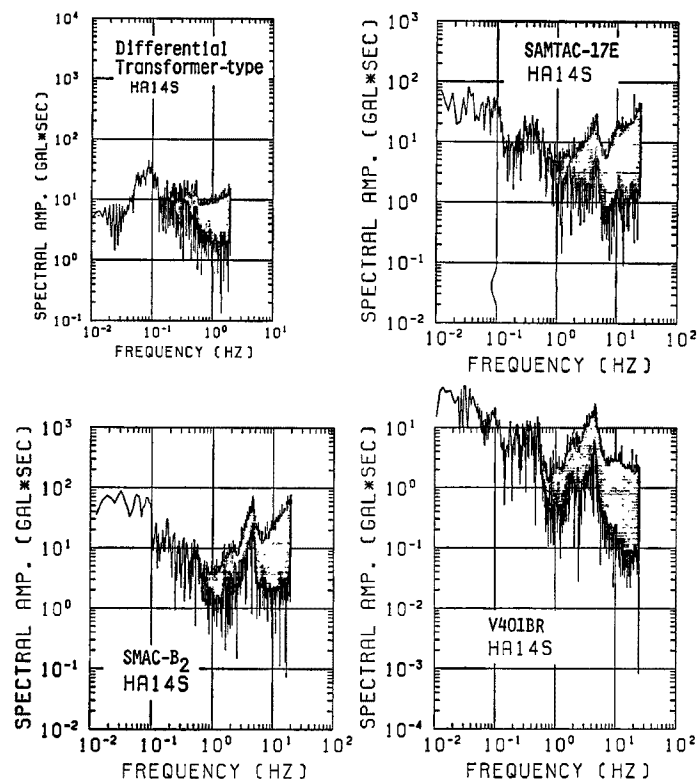


Fig. 20 Comparison of acceleration Fourier amplitude spectra of differential transformer-type displacement meter with those of three accelerographs.



(c) MRA14S



(d) HA14S

Fig. 20 Continued.

著しい。これは、Fig. 13～Fig. 16で示したように、差動トランス型変位計の基準変位波に比べて、SAMTAC-17Eの波形のゆがみの程度が大きいと解すべきである。

振動台への地震波の入力振幅が大きいと、コヒーレンスの値が大きくなっている。SAMTAC-17EではHAOに比べてHA14Sに対するコヒーレンスの長周期成分が、またSMAC-B₂ではMOAOに比べてMOA12Sの結果が著しく改善されている。一般に、換振器が加速度型（変位型）である長周期成分（短周期成分）の記録振幅は小さくなり、ノイズの影響を受けやすくなる。同一の地震波で加振振幅が大きくなれば、波形のスペクトルがノイズのレベル以下になってしまう周期が長周期側へ移行し、記録の長周期成分のSN比は見かけ上大きくなる。このようなことを勘案すると、Fig. 22とFig. 23より、分解能不足はコヒーレンスの算定値の低下を生じる因子であることが明らかになった。

1倍強震計JMAの紙送り速度は0.5mm/秒であるから、記録紙上の1mmが2秒に対応する。記録線の太さは0.2～0.3mmなので、2秒の正弦波では記録線が3～5、4秒の正弦波では6.7～10本含まれることになる。従って、JMAの使用帯域の下限は約2秒と見積れる。しかし、波形の視準位置により読み取る際の人為誤差やディジタイザーの分解能を考えると、下限としては約4秒が実用に供するのではないかと考えられ

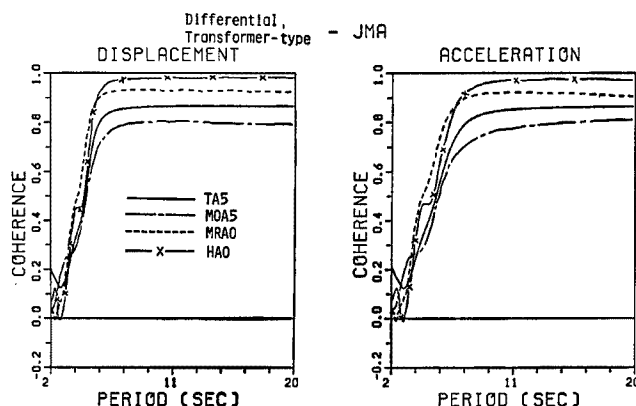


Fig. 21 Coherence function estimates of JMA seismograms subjected to different earthquake excitations.

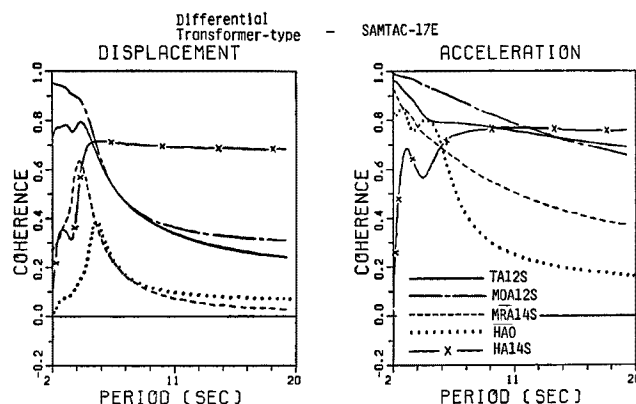


Fig. 22 Coherence function estimates of SAMTAC-17E accelerograms subjected to different earthquake excitations.

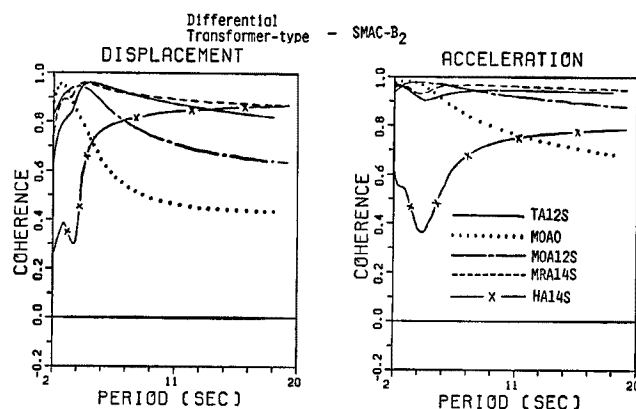


Fig. 23 Coherence function estimates of SMAC-B₂ accelerograms subjected to different earthquake excitations.

る。

Fig. 21 の JMA のコヒーレンスは、変位波および加速度波において、周期約 5.5 秒以上でかなり高い値を示している。このことは Fig. 12 の波形を視察することからも確認できる。短周期になるとともに、コヒーレンスの値は減少している。この原因としては、1) 記録紙上では長周期成分が卓越していて、ごく短周期波は顕著でなく、従って SN 比が小さくなること、2) Fig. 12 からわかるように、短周期波の位相を合わすことが難しいこと、および 3) 短周期の成分は数値化の際に精度上読み取りが困難なことがあげられる。Fig. 21 は分解能 0.1mm のディジタイザーによる結果である。従って、前出の 4.2(2) のような精度の高いディジタイザーで慎重に数値化をすれば、コヒーレンスの値はかなり大きくなることが予想される。いずれにしても、1 倍強震計は、地震動の長周期成分を評価する際、実用に意義を有するものと考えられる。

Fig. 22 に示す SAMTAC-17E のコヒーレンスよりわかることは、1) 地震波の種別に係わらず、加速度波の方が変位波よりも関連の程度が大きい、2) 例外を除いて、長周期になるとともにコヒーレンスが小さくなる右下がりの傾向が明瞭である、3) HAO と MRA14S の変位波のコヒーレンスの値は、周期とともに上昇してピーク (4~5.5 秒) を迎え、その後減少している、および 4) HA14S のコヒーレンスの値は周期の増加につれて大きくなるが、5~6 秒以上になると一定の傾向になっている。上記 3) と 4) の原因は、4.2(1) で述べたように、主に ghost wave に起因していると考えられる。変位変換にも耐え得る標準的な仕様を考えれば、SAMTAC-17E は少なくとも周期 6 秒くらいまでの成分は精度よく記録できると言える。解析に必要な記録精度 - SN 比は入力地震動のスペクトルとも密接な関係があるが、本研究の指摘は文献 6) の結果 (ならびに建設省土木研究所地震防災部の田村敬一氏との私信による) と調和的である。

HA14S のコヒーレンスを除いて、他の地震波による SMAC-B₂ 加速度波のコヒーレンスの値が変位波のものよりも大きい傾向は、SAMTAC-17E のときと同じである。TA12S, MRA14S と MOA12S の加速度波のコヒーレンスの算定値は 0.9 以上を示している。しかも、約 5 秒以下の周期帯域と MOA12S の結果を除けば、変位波の相関の程度は高い。コヒーレンスの値が小さくなるのは、SMAC-B₂ と差動トランス型変位計の波形が異なり、波形のゆがみが生じるからである。波形のゆがみ（長周期成分に混入するノイズ）は、土岐らが提案した補正法^{19),20)}により取り除かれる可能性がある。その結果、コヒーレンスは Fig. 23 の結果よりもさらに改善されるかもしれない。

5. 結 論

本研究は、長周期振動台上に各種地震計（気象庁 1 倍強震計 JMA、サーボ型デジタル式強震計 SAMTAC-17E と SMAC-B₂ 型加速度計）を設置し、正弦波や実地震波加振（2～20秒）により、差動トランス型変位計や巻込型変位計 DP-500B の波形と比べて、地震計の記録性能の評価を実験的に行った。地震波としては、1983年の日本海中部地震時の気象庁 1 倍強震計記録（苫小牧・森・室蘭・八戸）を選定した。いずれも、変位波には周期10秒前後の成分が卓越していた。振動台は変位制御によってコントロールした。

得られた成果を列挙すると以下ようになる。

- (1) 各種地震計の長周期成分（2～20秒）における記録性能を定量的に確認するために、検討項目としては、変位と加速度の波形の性状、変位・速度・加速度波の最大振幅の比・エネルギー比・相互相関誤差関数、速度応答スペクトル、加速度フーリエスペクトル、変位と加速度波のコヒーレンスを考えた。波形の相関の程度を正確に表わすため、コヒーレンスの計算は川上らが改良を試みた算定法によった。
- (2) 振り切れの生じない範囲において、JMA は概して長周期帯域まで波を良く再現していた。コヒーレンスの値は約 5.5～20 秒の範囲において 0.8 以上の値を示しており、かなり信頼度の高いことがわかった。約 2～5.5 秒の帯域でフーリエスペクトルは、数値化などの誤差に伴うノイズのために、差動トランス型変位計のそれよりも過小になる傾向があった。総じて、JMA の記録は長周期地震動の評価に当たって工学的価値の高いものと言える。しかし、振り切れた場合には、真の波の推定法が要求される。
- (3) SAMTAC-17E の長周期帯域における記録精度はそれほど期待できない。加速度記録から求めた変位波形は、差動トランス型変位計のそれに比べて長周期の ghost wave が強調され、平均的に 1.7 倍も過大になった。コヒーレンスの値は周期約 5.5 秒において 0.7～0.8 であり、これ以上の長周期帯域では急激に減少していることなどから、信頼できる範囲は約 5～6 秒程度までと考えられる。なお、フーリエスペクトルは、10 秒ほどより長周期帯域において、差動トランス型変位計のそれよりもかなり過大になった。
- (4) 土岐ら^{19),20)}によれば、SMAC-B₂ は、長周期帯域において、記録精度に問題があるはずである。確かにその傾向はあるが、記録の数値化を慎重に行いかつ SMAC ノイズをいくぶん取り去っているせい、八戸の記録を除いて変位波の再現性は高く、コヒーレンスの値は 0.7 以上とかなり良い結果が得られた。特に 2～5 秒の比較的短周期側では、加速度波のコヒーレンスの値が 0.9 を越えており、かなりの一致度が見られた。最大振幅は差動トランス型変位計のそれに比べて若干過大になっており、土岐らの提案した補正を実施する必要がある。

謝 辞

加振実験を進めるに当たり、本学工学部土木工学教室耐震工学講座のスタッフ（家村浩和助教授、伊津野和行助手と中西伸二技官）、前田建設工業（株）土木設計部のスタッフ（嶋田三朗課長代理、吉田隆治氏、上田達哉氏と石黒健氏）、（財）電力中央研究所・土木研究所の桜井彰雄副所長、同耐震構造部のスタッフ（江刺靖行部長と増子芳夫主任研究員）には多大な御協力を頂いた。さらに、実験に用いた 1 倍強震計に関して

は、気象庁地震火山部の勝又護課長および(株)勝島製作所の丸山昇取締役にお世話になった。SMAC-B₂型加速度計は本学工学部交通土木工学教室の路線施設講座から借用した。その際には、本学防災研究所附属都市施設耐震システム研究センターの亀田弘行教授(実験当時は路線施設講座所属)に大変お世話になった。SMAC-B₂型強震計の記録の数値化は、通称 SMAC-Reader と呼ばれる装置(東京大学地震研究所所有)を用いて行った。数値化に当たっては、東京大学地震研究所強震観測センターのスタッフ(工藤一嘉助手と坂上実技官)の協力を得た。ここに記して、各位に深謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 小林啓美(研究代表者): 長大構造物の地震動災害とその防止に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No. A-53-1, 昭和53年5月.
- 2) (社)土木学会: 屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討のための入力地震波の変位特性に関する調査報告書, 昭和57年12月.
- 3) 片山恒雄(研究代表者): 長周期(約2~20秒)地震動の工学的特性に関する総合研究, 昭和59年度科学研究費補助金(総合研究(A))研究報告書, 課題番号 58350025, 昭和60年3月.
- 4) 村松郁栄: 速度型地震計の製作, 第2輯, 第30巻, 第3号, pp. 317~338, 昭和52年9月.
- 5) 気象研究所: 83型強震計の開発, 気象研究所技術報告, 第7号, 1983年2月.
- 6) 荒川直士・川島一彦・田村敬一・相沢興・高橋和之: 高密度強震観測用デジタル強震計の記録精度に関する実験的検討, 土木研究所資料第2019号, 昭和58年8月.
- 7) (株)東京測器研究所: 巻込型変位計 DP-500B 試験成績表.
- 8) 山田善一・野田茂: 日本海中部地震時の周期10秒前後の地震動特性, 日本建築学会構造系論文報告集, 第378号, pp. 1~15, 1987年8月.
- 9) 山田善一・野田茂: 長周期帯域(2~20秒)における気象庁変位強震計と SMAC 型加速度計記録の信頼度について, 日本建築学会構造系論文報告集, 第379号, pp. 1~14, 1987年9月.
- 10) 小野崎誠一・川上保: 一倍強震計の振動試験, 測候時報, Vol. 38, pp. 103~105, 1971.
- 11) 篠泉・片山恒雄: 気象庁一倍強震計記録による地動の再現性の検討, 第18回地震工学研究発表会講演概要, pp. 69~72, 1985年7月.
- 12) 佐々木康・田村敬一・相沢興・高橋和之: 気象庁一倍強震計の記録精度に関する実験的検討, 土木研究所資料第2386号, 昭和61年6月.
- 13) (株)東京測振: デジタル強震計 SAMTAC-17E 取扱説明書, SAMTAC-READER SAMTAC-17E 用(GP-IB)取扱説明書およびデジタル強震計 SAMTAC-17E 試験成績表など.
- 14) (株)明石製作所: SMAC-B 型強震計取扱説明書および検査成績表など.
- 15) 栗林栄一・土岐憲三・若林進: SMAC 型強震計による地動の再現性について, 第4回日本地震工学シンポジウム(1975)講演集, pp. 153~160, 1975年11月.
- 16) 岩崎敏男・川島一彦・若林進・高木義和: 地震応答スペクトルに及ぼす SMAC 型強震計特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第309号, pp. 13~23, 1981年5月.
- 17) 川島一彦・高木義和・相沢興: デジタイザーによる SMAC 型強震計記録の数値化精度, 土木学会論文報告集, 第323号, pp. 67~75, 1982年7月.
- 18) 川島一彦・高木義和・相沢興: 数値化精度を考慮した SMAC-B₂ 型強震計記録の計器補正法および変位計算法, 土木学会論文報告集, 第325号, pp. 35~44, 1982年9月.
- 19) 土岐憲三・中瀬仁: 強震記録における長周期成分の信頼度に関する研究, 京大耐震研究報告 No. 86-1, 1986年5月.
- 20) 土岐憲三・澤田純男・中瀬仁・杉山和久: SMAC 強震記録における長周期成分の補正法について, 京都大学防災研究所年報, 第30号 B-2, pp. 19~44, 昭和62年4月.

- 21) 井合進・倉田栄一・土田肇：強震記録のデジタル化と補正，港湾技研資料 No. 286, 1978年3月.
- 22) 岡田成幸：強震観測装置開発に関する研究——第1報 在来型強震計の観測能力評価と改善への方向——，日本建築学会論文報告集，第339号，pp. 45～56，昭和59年5月.
- 23) 岡田成幸：強震観測装置開発に関する研究——第2報 仕様の検討と装置の実現——，日本建築学会構造系論文報告集，第355号，pp. 60～69，昭和60年9月.
- 24) (株)明石製作所：テレバイプロメーター L25R—携帯式振動測定装置—形式 AVL-25R 操作説明書および試験成績表.
- 25) 斎藤正徳：漸化式デジタルフィルターの自動設計（技術報告），物理探鉱，第31巻，第4号，pp. 112～135，昭和53年8月.
- 26) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，昭和52年10月.
- 27) 川上英二・佐藤靖彦：コヒーレンスの性質および算定方法に関する考察，構造工学論文集，Vol. 32A, pp. 749～762, 1986年3月.
- 28) Kulhanek, O.: Introduction to digital filtering in geophysics, Elsevier Scientific Publishing Co., 1976.