

加振実験による長周期帯域での
各種地震計記録の評価

EVALUATION OF LONG-PERIOD COMPONENT OF STRONG-MOTION SEISMOGRAMS
OBTAINED FROM SHAKING TABLE TEST

山田善一* 野田 茂** 岡市明大***

By Yoshikazu YAMADA, Shigeru NODA and Akihiro OKAICHI

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 displacement meter. 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。湖成層が厚く堆積した地盤に地震波が入り、従来の耐震工学ではほとんど盲点となっていた長周期成分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、長周期地震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)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。従って、長周期の地震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、長周期の地震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。

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、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、近年の構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の仕様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、強震計の技術的改善が進められ、良質な記録の収集が途についたところである。しかし、一方、従来のSMACなどで得られた強震記録の蓄積は

* 工博	京都大学 教授	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
** 工修	京都大学 助手	工学部土木工学科	(同上)
***	京都大学大学院生	工学研究科土木工学専攻	(同上)

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（2~20秒）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を目的としている。

本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（V 401BR）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、加振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。

なお、本実験の条件、特に3種類の地震計（1倍強震計・SMAC-B₂・SAMTAC-17E）の本来使われるべき条件や具体的な仕様などについて、各種の資料^{1)~3)}を参照されたい。例えば、「各計器にどのような制御回路が組み込まれているか、また、その特性はどのようなものか」などについては文献1)~3)に記載されている。また、これらの明確な記述をも含めて、本論文の内容の詳細については、著者らの文献4)をも参照して頂ければ、本論文の姿勢・方針などがより一層明らかになると考えられる

2. 加振実験の概要

(1) 実験装置

加振実験に用いた装置の概要をFig.1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）⁵⁾と2)520型の気象庁1倍強震計の水平1成分（以下ではJMAと呼ぶ）¹⁾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）²⁾、4)SMAC-B₂型強震計（SMAC-B₂と呼ぶ）²⁾と5)アナログ式サーボ型振動計（V 401BRと呼ぶ）⁶⁾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（0.1~∞秒）の間でほぼフラットな特性を有している）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、水平方向最大加振力17.6t、最大振幅±15cm、加振周

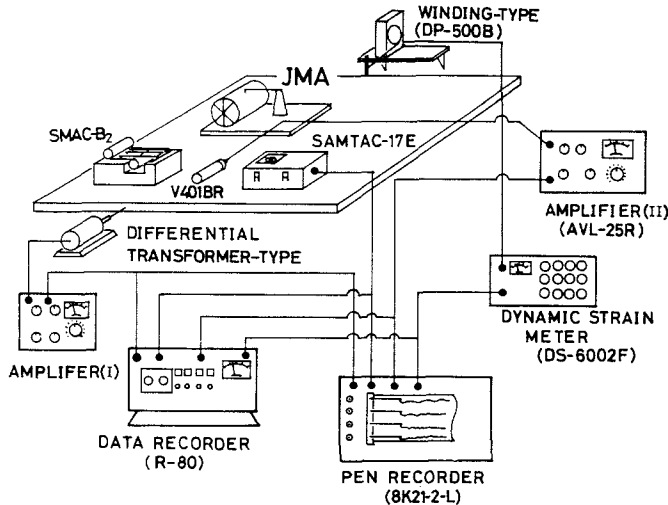


Fig.1 Layout of vibration testing system.

期1/30~∞秒(DC成分)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。なお、アナログレコーダーR80によるデータの解析時のAD変換などについては、京都大学大型計算機センターのFACOM U200システムを使って、標準的な変換と処理を施している。

(2) 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±3cm以内になる正弦波および地震波について行った。次に、±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。

正弦波実験は、強震計の周期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は振り切れたことを示している。

振動台への入力波形は、日本海中部地震時のJMA記録に各種の補正⁷⁾を施し、周期2~20秒の等リップルチェビシェフ型漸化式バンドパスフィルター⁹⁾を通したものである。入力波形には、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。

3. 地震計の性能の定量化手法

(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^{9), 10)}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期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の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^{11), 12)}。

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±A_{gal}(cm)とすると、±A/(2ⁿ⁻¹-1)~±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 $20\log_{10}(2^n-1)$ 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ビットであることが知られている。すなわち、ダイナミックレンジは42~54dBとなる。この関係に従えば、記録が可能な最小振幅は、JMAで±(0.06~0.24)mm、SMAC-B₂で±(0.98~3.9)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 $S(f)$ (f : 周波数)ではなく、スペクトルの推定値 $\tilde{S}(f) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} S\left(\frac{i}{\Delta t} + f\right)$ が求められる。この場合、エリアジングとは、 $1/2f_N$ (Nyquist周期 $1/f_N = 2\Delta t$)の整数倍だけ異なった周期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必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、ドリフト除去用低周波遮断回路が換振器の出力電圧にかけられる。

(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べき性質のものである。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、⑥SN比、⑦コヒーレンスを採用した。

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 $R_{x_1x_i}(\tau)$ ($i=2\sim 6$)が最大となる時間のずれ τ_{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。

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^{9), 10)}。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) 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 $x_1(t)$ 、その他の5つの計器（DP-500B、JMA、SAMTAC-17E、SMAC-B₂、V401BR）の記録波形（変位、速度、加速度）を $x_i(t)$ ($i=2\sim 6$)とする。従来よりのコヒーレンスの定義によれば、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¹³⁾によれば、①2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、②2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、①2つの波形に時間のずれがあるときには、相互相関関数 $R_{x_1x_2}(\tau)$ を計算し、 $R_{x_1x_2}(\tau)$ が最大となる τ_{\max} を求め、 τ_{\max} だけ波形をずらし、波形のずれをそろえる。次に、②2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ずコヒーレンスの値として意味がないものと考えて算出した。なお、各種地震計記録の長さ(A/D区間)は計器によって異なる。そこで、コヒーレンスは、2つの地震計記録の波形のずれをそろえた後、お互いの波形が重なり合う区間を用いて計算した。

ただし、計算に当たっては、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 $\text{coh}^2(\omega)$ と独立波形のアンサンブル平均値であるコヒーレンス $E[\text{coh}^2(\omega)]$ を用いた。ここで、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ウィンドーを採用した。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。

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。その場合、コヒーレンスは、各種地震計から求めた変位・速度・加速度と差動トランス型変位計から求めた変位・速度・加速度をおのおの比較して算出する。すなわち、各種地震計記録ごとに、変位・速度・加速度のコヒーレンスが得られることになる。

4. 波形の比較による記録性能の解析

本章では、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と加速度の形状を目視で比較し、各種地震計の性能を検討した。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。

Fig.2は、3つの地震波(TA5、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秒の変位を比べたものである。Fig.3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、(b)は加速度の結果である。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ある。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.3と同様にして、Fig.4にはMRA14S地震波による変位の結果を示した。

地震計の記録振幅を地動に換算して表示するため、従来の研究では、正弦波加振実験によって検出器の感度周期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忠実に表わすものではない。正弦波加振に対し、実地震波加振では多くの周期成分が混在するため、誤差の評価については平均的には実地震波記録の方がより厳しい基準を要する。こうしたことは、文献12)と14)においても指摘されている。従って、地震計の周期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.2~Fig.4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。ここでは紙面の都合上割愛したが、加速度の波形については、1)TA5とMRAOの最大振幅が若干違うものの、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、という特徴を有していた。これらの詳細については文献4)を参照されたい。JMAの加速度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)ディ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

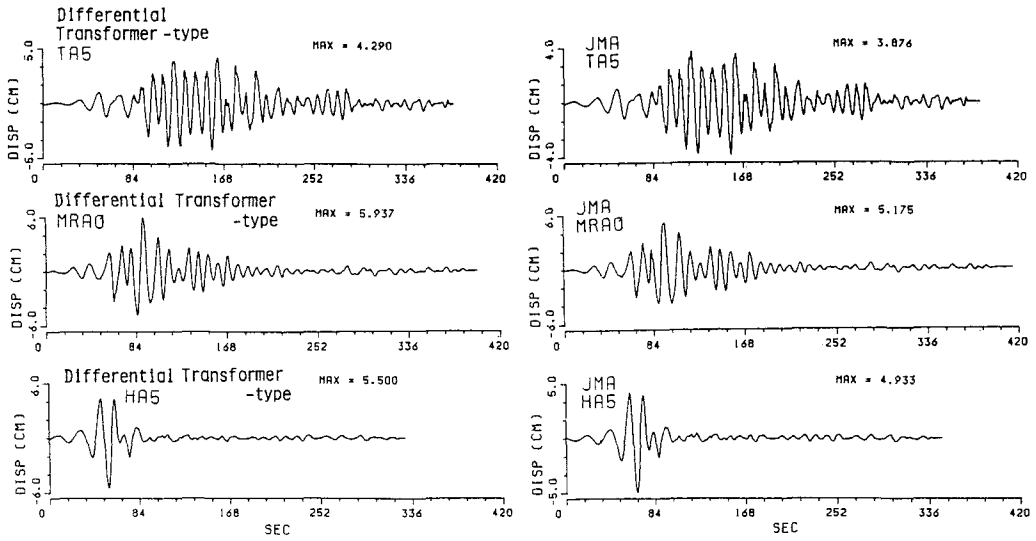
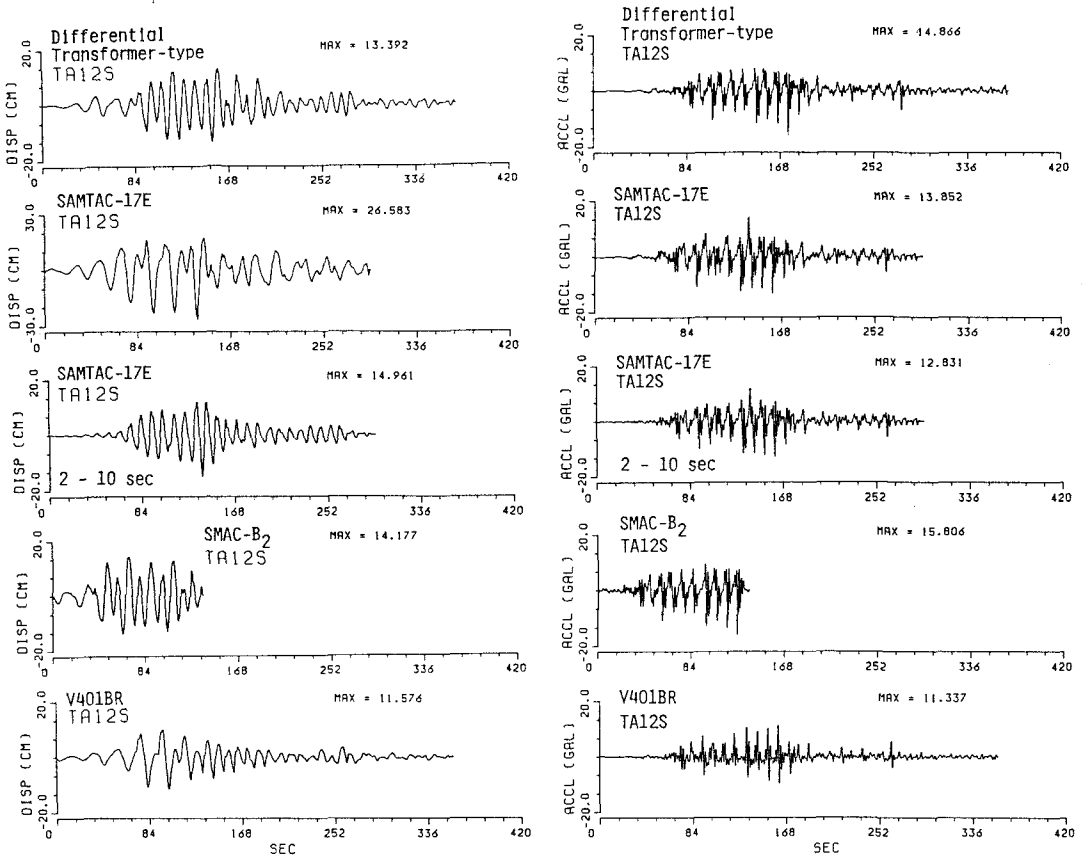


Fig.2 Comparison of displacement waveform (2 to 20 sec) of differential transformer-type displacement meter with that calculated from JMA record subjected to different earthquake excitations.



(a) Displacement

(b) Acceleration

Fig.3 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.

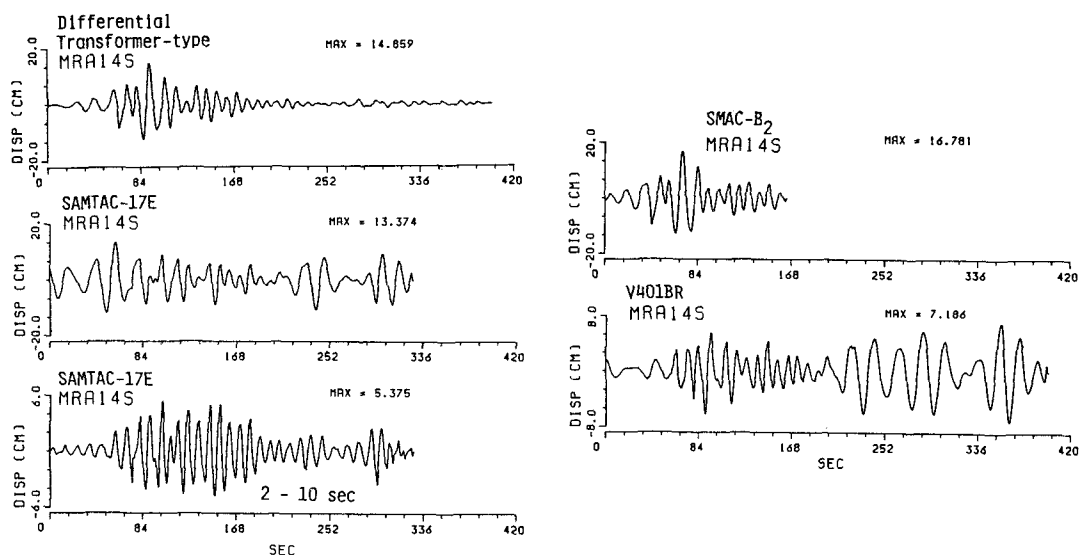


Fig.4 Comparison of displacement waveform (2 to 20 sec) of differential transformer-type displacement meter with those calculated from other kinds of seismographs subjected to MRA14 record.

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0.2～0.3 mmである波形を最小分解能が0.1 mmであるディジタイザー（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短周期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こと、特にこのような状況になりやすいことが考えられる。

なお、1倍強震計記録の読み取りを分解能の高い（0.0254mm）ディジタイザー（セイコー電子工業（株）製のD-SCAN, DH7500）で慎重に行った結果は、文献14）で示した。それによれば、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、平均的には数%であった。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15）においても指摘されている。文献1）では、本研究と同じように、加振実験によって差動トランス型変位計と気象庁1倍強震計の記録を比べている。それによれば、1倍強震計記録から求めた最大変位は総じて過大であり、中には28%の誤差を生じているものもある。本研究の結果は、文献1）による結果よりも全体的に改良されているのが特徴である。

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)振動台への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。このようなノイズが換振器や記録装置（特に、ドリフト除去用低周波遮断回路とエリアジングフィルターとしての高周波遮断回路）など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が、そのメカニズムを明らかにする試みを現在実施中なので、その結果は別論文で報告する予定である。

SAMTAC-17Eの記録精度を実験的に検討した例としては文献16）と17）が挙げられる。しかし、これらの実験では、長周期域（15～20秒）までの的確に作動する振動台を用いておらず、また、本研究のように周期10秒前後の変位を対象とはせず、0.25～1秒ほどの卓越周期を有する加速度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十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に対応する傾向がある。こうした傾向は周期2～10秒の変位（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秒での変位および加速度とも特異な挙動を示していた。他の地震波（TA12

S、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、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の加速度が極端に増幅された原因としては、1)SN比の観点からして波形のピーク付近で短周期のノイズが目立ち、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、短周期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、変位よりも速度・加速度の方が、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になりやすかった⁴⁾。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、SAMTAC-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^{11)、12)}。そして、そのメカニズムが文献17)で明確にされ、さらに文献18)で改善の方法が具体化された。しかしながら、これまで、本研究のように、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.3とFig.4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、本研究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。

前出の3.(1)のように、SMAC-B₂型加速度計の記録可能な最小振幅は±(0.98～3.9)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好であった原因としては、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(いわゆるSMAC-Reader)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.3とFig.4に示す波形の振幅が少し大き目ののは、土岐ら¹⁷⁾が指摘しているように、SMACの記録装置(振子とペンの連結棒)の誤動作がペンの軸の蛇行となって発生した数値化記録中に含まれるノイズ(以下SMACノイズと称する)に起因しているかもしれない。

5. 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.5とFig.6である。計器補正などの処理は実施されている。Fig.5はTA5の地震波によるJMAのフーリエスペクトルである。Fig.6は、TA12S地震波に対し、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。サンプリング間隔が Δt 秒であると、 $2\Delta t$ 秒以下の周期成分は再現できない。従って、フーリエスペクトル図はNyquist周期以上で議論されている。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は、等リップルチェビシェフ型漸化式バンドパスフィルターにより、周期2～20秒の成分波で構成されている。カットオフ周波数(周期)は $f_L=0.05\text{Hz}$ (20秒)、 $f_H=0.5\text{Hz}$ (2秒)、ロールオフ周波数(周期)は $f_{s'}=0.025\text{Hz}$ (40秒)、 $f_s=1\text{Hz}$ (1秒)とした。従って、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となる。Fig.5とFig.6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)振動台への入力波に通したチェビシェフフィルターの振幅応答特性⁹⁾により、カットオフ周波数の0.05Hzからロールオフ周波数の0.025Hzおよび0.5Hzから1Hz近くまで、スペクトルは漸次減少している、2)フィルターの特性と振動台の性能により、20秒以上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、振動台は無加振状態でも短周期のノイズが現われていた、4)2秒以下の短周期側の波は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短周期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2～20秒の帯域に限定したが、短周期のノイズ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、

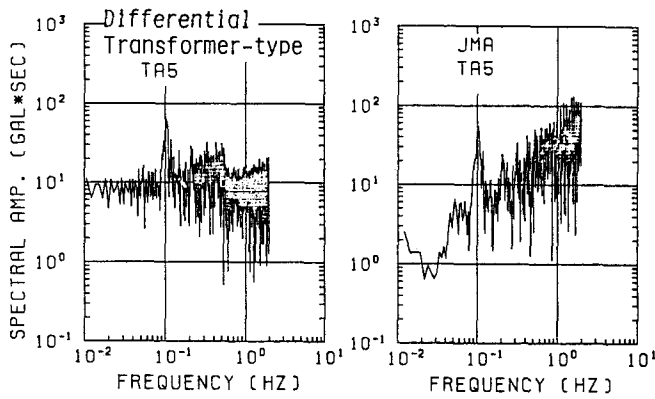


Fig.5 Comparison of acceleration Fourier amplitude spectrum of differential transformer-type displacement meter with that of JMA seismograph subjected to TA5 earthquake excitation.

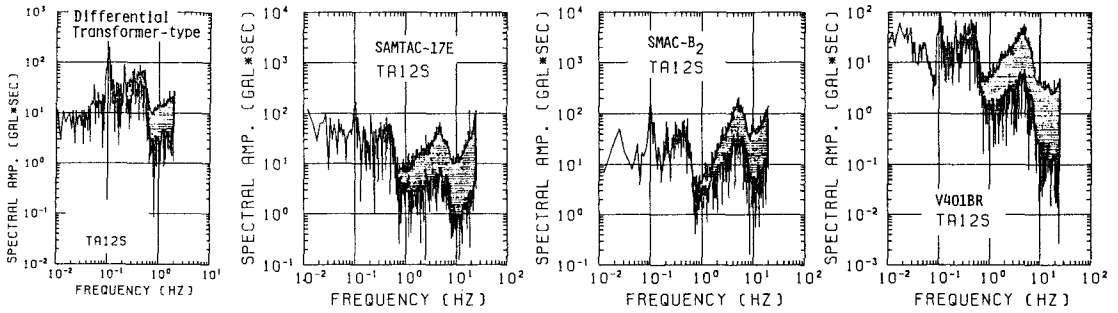


Fig.6 Comparison of acceleration Fourier amplitude spectrum of differential transformer-type displacement meter with those of three accelerographs subjected TA12S earthquake excitations.

大局的にはよく対応している。ただし、JMAのフーリエスペクトルは、約2～6秒の帯域で、差動トランス型変位計のものに比べて若干過小に評価される傾向にある。また、振動台への入力波の有効な周期帯域（2～20秒）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、ノイズによる変位のレベルは入力の大さきによらず一定である。従って、短周期になるとともに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周期とともに減少する。

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との相関性が高い。しかし、Fig.3とFig.4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、2つの計器によるフーリエスペクトル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、長周期のノイズが混入したフーリエスペクトルは、スペクトルと周波数 f の両対数軸上でほぼ45°右下がりの直線状になっている。誤差の発生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^{17),18)}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 $A(f)$ 、位相スペクトルを $\phi(f)$ （補正前後で不変とする）とし、 $(A(f) - \frac{N}{2\pi f}) e^{i\phi(f)}$ （ただし、 N は時間領域でのノイズレベル）で補正を行うことができるかもしれない。

SAMTAC-17Eは短周期側の感度がよく、分解能からして2秒以下のノイズは解析に十分耐えうるということがわかる。短周期のノイズのスペクトルは、1～1.4秒あたりから周期とともに減少し、0.2秒付近で明瞭なピークがあり、その後急激に減少し、0.125秒付近で谷となり、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若干の誤差が見込まれると推察される。

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た。スペクトルの相関性の高さがFig.3 とFig.4 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。入力レベルが大きく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。

6. 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.7～Fig.9である。Fig.7にはJMAの、Fig.8にはSAMTAC-17Eの、Fig.9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と加速度について検討した。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では八戸の記録（HAOとHA14S）が、SMAC-

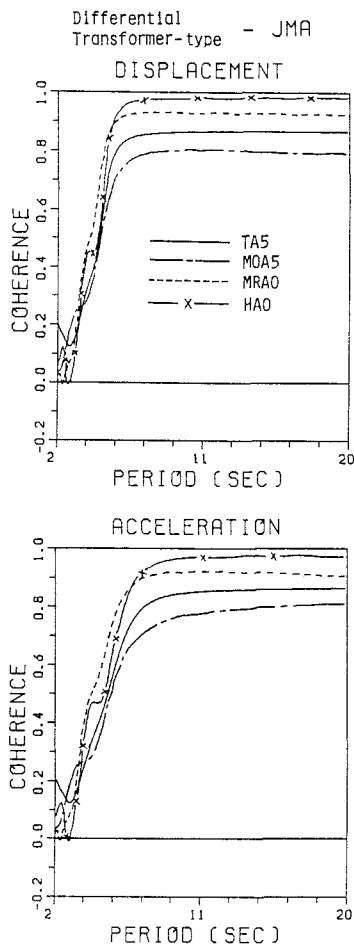


Fig.7 Coherence function estimates of JMA seismograms subjected to different earthquake excitations.

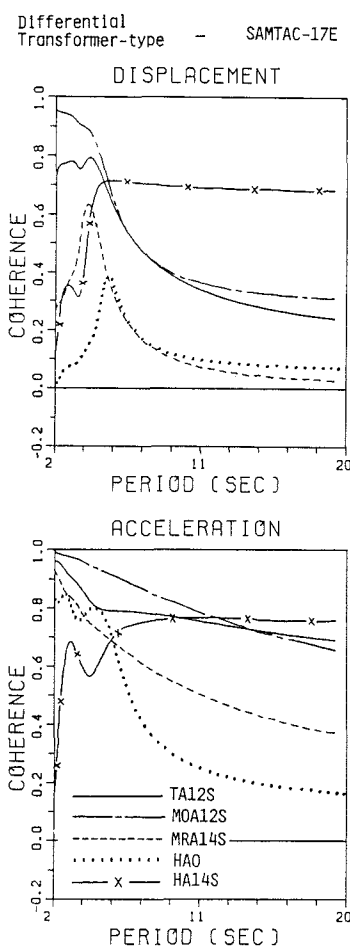


Fig.8 Coherence function estimates of SAMTAC-17E accelerograms subjected to different earthquake excitations.

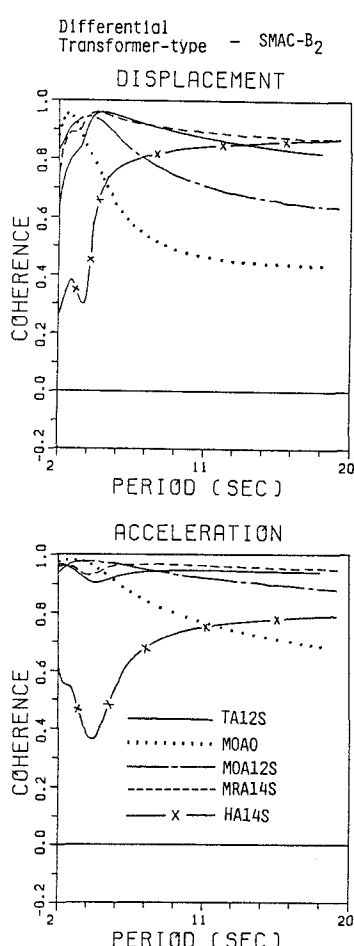


Fig.9 Coherence function estimates of SMAC-B₂ accelerograms subjected to different earthquake excitations.

B₂では森の記録(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。

なお、記録の長さ(A/D区間)、特に主要動部分のみを計算対象とするか、あるいはその前後を含む長い区間を計算対象とするかによって、コヒーレンスの値は多少変化する。しかしながら、このような点がFig.7～Fig.8の結果(特に、SAMTAC-17EとSMAC-B₂を比較した場合)に影響するのは、本質的には、各計器に内在するノイズの成分に起因することによる。すなわち、主要動の部分を用いてコヒーレンスを計算しても、例えばSAMTACとSMACの場合(Fig.3参照)、長周期のノイズ成分はSMACに比べてSAMTACの方が大きい。本来ならば、コヒーレンスは各種地震計ごとに同一の時間区間で比較すべきである。しかし、ここでは、ghost waveの影響を見るために、あえて地震計ごとに異なるA/D区間を用いてコヒーレンスを計算した。

変位であれ、加速度であれ、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。各種の変位計と加速度計記録にノイズが含まれておらず、変位計記録から加速度が、あるいは加速度記録から変位が十分に求まるならば、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.7～Fig.9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と加速度で異なっている。SAMTAC-17Eではその差が特に著しい。これは、Fig.3とFig.4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)である場合の長周期成分(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.8とFig.9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である。

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である。こうした原記録の記録線の太さと紙送り速度を勘案すれば、JMAの使用帯域の下限値は、SMAC-B₂型加速度計における紙送り速度(1cm/sec)と短周期側の遮断周期(約1/12秒)¹¹⁾との対比から、1.6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ジタルタイザの分解能などを考えると、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る。

Fig.7のJMAのコヒーレンスは、変位および加速度において、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.2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、ごく短周期の成分波は顕著でなく、従ってSN比が小さくなること、2)Fig.2からわかるように、短周期の位相を合わすことが難しいこと、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、および4)固有周期が6秒である地震計で短周期波が追従することは難しく、短周期は本来JMAの使用帯域外であることが挙げられる。Fig.7は分解能0.1mmのデジタルタイザによる結果である。上記の1)～4)の原因によって精度が劣化しているわけであるが、文献14)で示すような精度の高いデジタルタイザで慎重に数値化を行えば、コヒーレンスの値は多少とも改善され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.8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、加速度の方が変位よりも相関の程度が大きい、2)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)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ので、さらに検討を加えてみる必要がある。

HA14Sのコヒーレンスを除いて、他の地震波によるSMAC-B₂加速度のコヒーレンスの値が変位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SMACノイズ）は、土岐らが提案した補正法^{17)・19)}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.9の結果よりもさらに改善されるかもしれない。

7. 結論

本研究で得られた成果を列挙すると、以下のようになる。

- (1) 各種地震計の長周期（2～20秒）成分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、変位と加速度のコヒーレンスを考えた。波形の相関の程度を正確に表すため、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、気象庁1倍強震計JMAは、差動トランス型変位計と比べた結果、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波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ので、文献14)で提示した補正法などを採用する必要がある。
- (3) サーボ型デジタル式強震計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、平均的に約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秒ほどより長い周期帯域において、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) 土岐らによれば、SMAC-B₂型加速度計は、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か、八戸の記録を除いて変位の再現性は高く、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。

なお、サーボ型加速度計記録に見られる長周期帯でのghost waveの発生原因としては、 $1/f$ (f =周波数) ゆらぎと $1/f^2$ ゆらぎの存在が考えられる。そこで、その特性を明らかにするために、適応フィルターを用いて実測波から有意な信号の成分とノイズの成分を分離し、波形を補正する試みを現在実施中なので、別の機会に報告する予定である。

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）技術研究所耐震研究室の嶋田三朗室長と同土木設計部のスタッフ（吉田隆治氏、上田達哉氏と石黒健氏）、（財）電力中央研究所企画部の桜井彰雄部長、同土木研究所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、気象研究所地震火山研究部の勝又護部長および（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わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 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。
- 2) (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。
- 3) (株)東京測振：デジタル強震計SAMTAC-17E取扱説明書、SAMTAC-READER SAMTAC-17E用(GPIB)取扱説明書およびデジタル強震計SAMTAC-17E試験成績表など。
- 4) 山田善一・野田茂・岡市明大：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、京都大学防災研究所年報、第30号B-2, pp.57~87, 昭和62年4月。
- 5) (株)東京測器研究所：巻込型変位計DP-500B試験成績表。
- 6) (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。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) 山田善一・野田茂・嶋田三朗・吉田隆治：振り切れた1倍強震計記録の修復波形による長周期応答ベクトル、土木学会論文集, 第386号/1-8, pp.417~426, 1987年10月。
- 15) 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。
- 16) 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。
- 17) 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。
- 18) 土岐憲三・澤田純男・中瀬仁・杉山和久：SMAC強震記録の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。

(1987年10月16日受付)