

## SMAC強震記録の長周期成分の補正法について

土岐 憲三・澤田 純男  
中瀬 仁・杉山 和久

### CORRECTION OF LONG PERIOD COMPONENT OF SMAC ACCELEROGRAMS

By *Kenzo TOKI, Sumio SAWADA, Hitoshi NAKASE*  
and *Kazuhisa SUGIYAMA*

#### Synopsis

When response spectra determined from SMAC accelerograms are compared with that from other kind of seismographs, the former gives larger value for the period range over about 5 seconds than the latter. In order to investigate the recording characteristics of longer period range of SMAC accelerograph, a SMAC accelerograph was shaken on a shaking table with other seismometers and displacement meters. The shift and fluctuation are induced in a SMAC record and these undesirable components have commonly so-called  $1/f$  spectral shape. The shift and drift of the pen is caused by a coupling between a defect of the link connecting the mass with the pen and a friction between pen and paper. Therefore, the drift of record must be removed from each record. The proposed correction method can make SMAC accelerograms compareable well with JMA strong motion seismograph of displacement type less than 10 seconds of period range.

#### 1. はじめに

近年、土木構造物はますます大型化、長大化、高層化しつつあり、その固有周期は長くなる傾向にある。こうした長周期構造物の耐震安全性を考える際、振動系の変位応答はその固有周期に対して比例的に増大することから、地震慣性力のみならず変位応答が設計の規範になる可能性が増えると考えられる。

また、沖積平野や盆地にみられる「やや長周期で揺れやすい地盤」<sup>1)</sup>上の長周期構造物を設計する場合には、地盤の卓越周期についても考慮しなければならない。1983年6月21日の日本海中部地震の際、新潟の石油タンクにおいて最大加速度からは想像できないようなスロッシングが生じた。これは石油タンクが「やや長周期で揺れやすい地盤」上にあり、スロッシングの固有周期と地動の卓越周期が10秒程度の周期帯域で一致したためである。このような観点からすれば、大規模な構造物の耐震安全性を高め、設計地震力を設定するためには、特に破壊的地震動の長周期帯域における特性を知ることが急務であり、ますます重要となる。

SMAC-B<sub>2</sub>型強震計記録(以下SMAC記録とする)は建設省土木研究所<sup>2)</sup>や運輸省港湾技術研究所<sup>3)</sup>等によって観測、数値化され毎年印刷刊行されており、強震時の地動の特性に関する研究は、わが国においては従来これを主体として行われてきている。さらに、各種の地震応答解析に際してもSMACによる記録波形が入力として多用されており、耐震工学の発展に対する貢献度は極めて高いものがある。SMACは振子の固有周期が0.14秒の機械式加速度強震計であり、記録はスタイラスペーパー上にアナログ記録として得られる。したがって、各種の解析に用いるためにはこれを数値化しなければならないが、精度の関係でSMAC記録の精度が安定しているのはおおむね0.07~3秒の範囲内とされている。さらに、数秒以上の周期成分の

加速度振幅は極めて小さく、そのような帯域の地動を正確に記録し得るかどうかに関しては検討の余地があると考えられている。

そこで、周期5~15秒程度の長周期地震動を比較的正しくとらえていると考えられる気象庁一倍強震計(以下JMAとする)の記録に着目しSMAC記録と比較検討する事がなされてきた。建設省土木研究所は十勝沖地震を対象としてJMA記録とSMAC記録を比較しており<sup>4)</sup>、これによるとJMA記録とSMAC記録の両者を固有周期2秒, 5秒, および10秒の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)で比較すると、一般に後者のほうが前者よりも2倍~10倍程度大きい値を与える傾向があるとしている。

SMACによる記録の信頼度を検討するには、長周期帯域における信頼度の高い記録計を用いてSMACとの同時観測を実施することが有効である。そこで本研究では港湾技研と共同で、サーボ型デジタル加速度計のSAMTACをSMACの設置されているのと同じ基礎に設置して地震観測を実施している。記録地点は東京都の品川埠頭であり、得られたSMAC記録の読み取りや波形の処理は港湾技研によって行われたものであり、同研究所の通常の処理方式に従っている。一例として1985年10月4日の地震におけるEW成分の応答スペクトルをFig.1に示した。○印はSMAC, △印はSAMTACによるものである。これらの記録は同じ基礎で得られたものであるから応答スペクトルも一致しなければならないはずである。しかしながら周期が約1秒程度まではSMACの計器特性を考えれば両者は良く一致しているが、それ以上の周期帯域においてはSMACのレベルが上回り、2~3秒ではおおむね2倍、それ以上の帯域ではSMACの方が非常に大きくなる。これは、上述した長周期帯域における比較においてSMACがJMAを上回るという結果を裏付けるものである。

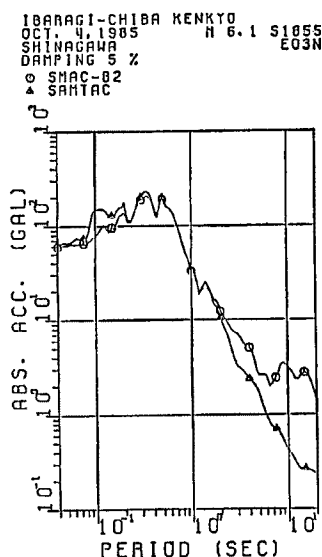


Fig. 1 Comparison of SMAC and SAMTAC records obtained at SINAGAWA site.

したがって地震動のやや長周期成分を解析するためには、主にJMA記録が用いられているのが現状であり、長周期帯域での地動の解析にはSMAC記録は適当でないとされてきた。しかしJMAの最大振幅はたかだか±3cmであり、さほど大きくない地動でもペンが振り切れてしまうため、震源近傍の地動を正しくとらえることができない。一方SMACは、加速度計であるため長周期帯域の記録振幅が小さい他、数値化の過程で生ずる精度の劣化、短い記録長といった長周期地動をとらえるためには著しく不利な点がある。しかしながらSMACはかなり大きな地震時においても震源域での地動を記録できる利点があり、これまでの多くの地震に際して得られた強震記録の膨大な蓄積があり、これは地震工学の分野における貴重な財産である。これらの記録を有効に利用するという観点からは、SMAC記録に固有の長周期帯域での信頼度の問題(地動を2倍程度過大に評価してしまう)があるとすればその原因を解明し、その補正の方法を見いだすことが重要である。

本研究では、運輸省港湾技術研究所(以下港湾技研と称する)との共同研究として地震観測及び振動実験を行い、その結果よりSMAC記録の長周期帯域での精度の劣化の原因究明と、その補正方法の提案を行う。

## 2. 本研究で用いた地震計の特性と記録の数値化の方法

### 2.1 地震計の特性

#### (1) SMAC

SMAC-B<sub>2</sub>型強震計は、機械的な機構を主体とした加速度型強震計であり、内部機構は、スタータ、振子、

記録装置の3つの部分に大きく分けられる。スタータは、普通は 5gal、交通機関の振動を受けやすい地点では、8gal 以上の鉛直振動入力により電気接点が接触し、記録を開始する機構となっている。振子は、おもりとバネと空気ピストン式の減衰器から構成される。地盤の加速度に比例する振子の変位が、リンクを介して記録ペンに伝えられ記録紙に記録される。公称値によれば、SMAC 強震計の固有周期は 0.14 秒、減衰定数 1.0 である。また記録装置は、フィルムの上に金属粉末を塗布した記録紙を、サファイアペンでこすることにより塗布剤を剥離させ、波形を記録するものである。記録紙は、ゼンマイモータにより毎秒 1cm の速さで送られる。

Fig. 2 に実際の SMAC 記録を示す。上からタイムマーク、水平動の一成分の加速度波形、固定線、上下動加速度波形、固定線、水平動の残りの成分の加速度波形の順に並んでいる。この記録は次章で述べる振動実験の際得られたもので、SMAC が一方向にしか振動していないため、顕著な波形は一番上の加速度波形一つだけである。タイムマーク 1 目盛りが 1 秒である。記録振幅の 1mm が 12.5gal である。すなわち、この波形は図面内において、全長約 15 秒であり、最大振幅はおよそ 300 gal である。なお記録中の固定線は、記録ペンの記録紙に対する相対的な位置を正確に知るための重要なデータであり、後に述べる SMAC 記録の補正のため港湾技研が独自に設置している固定ペンによって記録されたものである。

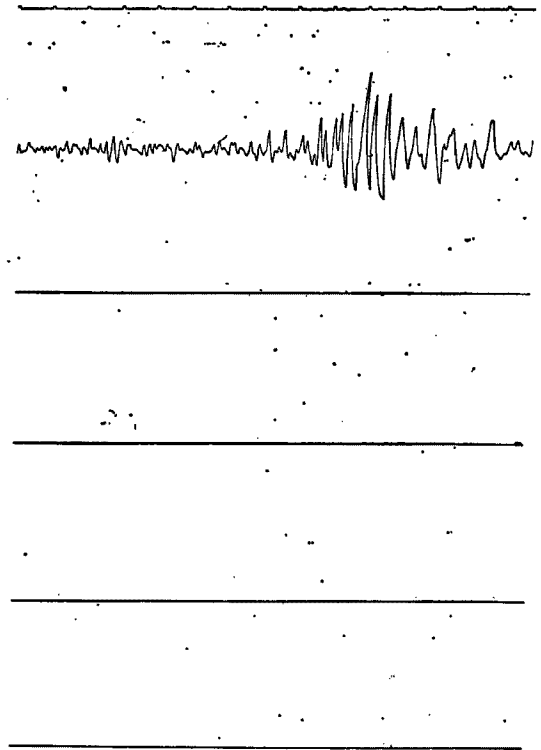


Fig. 2 Example of SMAC record.

### (2) 気象庁一倍強震計

気象庁一倍強震計（以下 JMA とする）は気象庁が震源決定の目的で各気象台に設置している機械式の変位計であり、固有周期は公称値で水平 6 秒、鉛直 5 秒、減衰は 0.55 である。周期 5～15 秒程度の長周期地震動を比較的正しくとらえていると考えられている。しかしながら記録範囲は  $\pm 3$  cm であり、さほど大きくない地震動に対しても簡単に振り切れるため、震源近傍の地震動を正しく捕らえることができない。

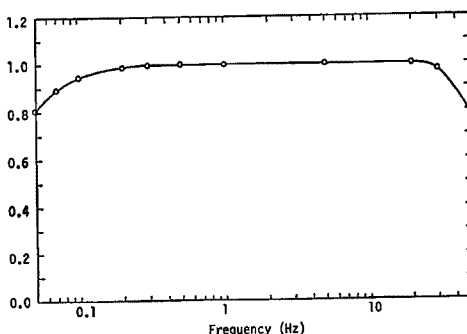


Fig. 3 Frequency characteristic of SAMTAC accelerograph.

### (3) SAMTAC

昭和54年建設省告示第1099号に基づいて開発された<sup>6)</sup>サーボ型の加速度強震計（以下、SAMTAC と称する）であり、カセットテープにデジタル記録されるもので、ここで対象としている周期の帯域においては感度に対する補正は必要でない。SAMTAC の振動数特性を Fig. 3 に示す。

### (4) V401

サーボ型アナログ加速度強震計（以下、V401 と称する）であり、固有周期は 450Hz である。短周期から長周期領域まで信頼性が高い地震計として知られており、本研究では振動実験において、SMAC

および SAMTAC との比較に用いた。

## 2.2 港湾技研による SMAC記録の処理法

前述したように SMAC は機械式強震計であり、記録はスタイラスペーパー上にアナログ記録として得られる。したがって、各種の解析に用いるためにはこれを数値化しなければならない。本研究で用いた SMAC 記録は全て港湾技術研究所により観測、数値化されたものである。ここでは港湾技術研究所による数値化のプロセス<sup>5)</sup>について説明する。

SMAC 記録には、加速度波形と共に、後で述べる補正に利用される固定線と円弧が記入されており、これらは波形と一緒に数値化される。また、平均的な紙送りの速度を求めるためのタイムマークと、記録回収時にダンピングを確認するために記入する振子の自由振動波形も記録されている。記録の数値化は、数値化装置の制約上、記録を30秒ごとに切ってコピーして行われる。この際、記録の後ろの部分で、振幅がほとんどゼロと見なせる部分の数値化は行われない。

まず、原記録をコピーしたものを数値化装置にセットするが、この際にコピーの固定線が数値化装置の X 軸にはほぼ平行になるようにセットし、Y 軸のゼロ点を設定する。その後、オペレータが拡大鏡のクロスマークを波形に合わせ押しボタンを押せば、その点の Y 座標が 0.008mm (0.1GAL に相当) を単位とする整数値で読み取られる。このクロスマークは、一つのデータを読み取るごとに X 軸方向に 0.1mm (0.01秒に相当) ずつ自動的に送られる機構となっている。この操作を繰り返すことにより記録の数値化が行われている。

数値化された記録は、以下に述べるような補正が行われている。ただし、港湾技術研究所では、補正を一次補正と二次補正とに大別しており、本研究では、一次補正のみが施された記録を、原波形として用いた。

一次補正の内容を、行われている順に以下に説明する。

### (1) 固定線補正

記録紙の蛇行や、数値化装置のアームの蛇行、記録紙のセッティングにおいて、発生する記録紙全体の微少な回転の誤差を取り除くことを目的とする。これは、数値化の際に同時に数値化された固定線を平滑化し、平滑化された固定線の数値を地震波形の数値から引くことにより行われる。

### (2) 区分的ゼロ線補正

数値化の際、記録を分割して Y 軸のゼロ点を設定する。このため、数値化装置の Y 軸のゼロ点の設定の誤差は分割区間毎に独立に入り、全体としては、区分的に一定値を取る階段上の誤差が生じることとなる。区分的ゼロ線補正ではこの誤差の補正を目的としている。

補正の方法としては、各区間について区間内の各データに適当な重みをつけた平均をとり、この平均値を対応する区間の全データから引くことにより行っている。

### (3) 円弧補正

SMAC 記録は、ペン先がある支点を中心として円周上を動くペンにより、記録されているため、円弧書きで描かれることになる。また、静止時に、ペン先と支点とを結んだ線が、時間軸に平行になっていないこともある。このために生じる誤差の補正を目的としている。

補正には、記録紙に描かれている円弧を利用し、円弧の中心座標を求めることにより行う。

### (4) 記録紙送りの立ち上がり補正

SMAC では、記録紙送りの装置が始動してから一定速度に達するまで 2-3 秒かかる。この部分の時間間隔を補正することを目的としている。あらかじめ 2 台の SMAC 強震計を用いた実験によって、記録紙送りの立ち上がり曲線が明らかにされているので、この立ち上がり曲線を当てはめることによって、0.01秒間隔のデータを直線補間によって求めている。この補正を行う区間は、時間にして 2 秒、記録紙上では約 1.4cm である。

### (5) 時間間隔補正

記録を0.01秒間隔のデータとするために行う。まず、30秒間分のタイムマーク間の長さを数値化装置で測る。記録が何枚かに及ぶ場合は、それぞれについて測った後平均を行う。そしてこの長さを30秒で割ることにより、平均紙送り速度を求める。これを用いて、データを0.01秒間隔に補間する。補間の方法は、2つのデータ間を直線で結ぶことにより行う。

以上で、一次補正は終了し、原波形が出来上がる。港湾技術研究所では、この後、振子の固有周期が0.14秒と短いことから、短周期側で起こる感度の低下を補正するためにおこなう計器特性補正、及び、トレース時の誤差の影響を取り除くためのフィルタリングを二次補正として行っているが、前述したように本研究では一次補正のみを施された記録だけを使って、後の解析を行う。

### 3. 振動実験による SMAC の記録性能の解析

#### 3.1 実験ケース

強震計の記録特性を比較検討するために、港湾技研と共同で振動台を用いて加振実験を行った。振動台に載せた強震計の種類は SMAC-B<sub>2</sub>、サーボ型デジタル式の加速度計である SAMTAC、サーボ型アナログ式の加速度計 V401 である。他に差動トランス変位計、光学式変位計により振動台の変位を観測した。

振動実験ケースを Table 1 に示す。

Table 1 Cases of experiment

表の左から実験番号、入力地震波、ペンにかけた荷重（以下、ペン圧と称する）、加振の方向を示す。実験例は30であるが、SMACの数値記録の無いものは省いてある。入力地震波には1968年十勝沖地震の八戸、宮古の記録2成分、模擬地震波形（D110, D10）2成分、前述した品川におけるSAMTAC記録2成分（S0107, S1102）、日本海中部地震の余震の秋田での記録2成分（ACCM60, ACCM61）、日本海中部地震本震の秋田での記録2成分、およびEl Centro, Taft波形、各1成分の総計20成分である。

実験番号 No. 10, 12, 13, 14, 30 は加振一回につき、続けて2成分づつを入力したものである。No. 11, No. 15 ~No. 22 は加振一回につき続けて4成分づつ入力したもので、同一入力でSMACのペン圧を変えて測定した。

この時のペン圧の測定値を表中に示す。

No. 22~No. 30 は No. 21 までのものと直交する成分についての実験である。No. 3~No. 21 の加振方向を仮にEW方向、No. 22~No. 30 の加振方向をNS方向と称する。

記録された波形の数は非常に多いので、それらの全てについて示すことは困難である。本章では、一部の波形および加速度応答スペクトルを図示し、結果を述べるにとどめる。

No	Input Earthquake	Loading of pen	Component
3	HACHINOHE-S(NS)		EW
4	HACHINOHE-S(EW)		EW
10	D110, D10		EW
11	S0107, S1102		EW
12	D100, D10		EW
13	ACCM60		EW
14	ACCM60		EW
15	S0107, S1102	3.5gr	EW
16	S0107, S1102	1.5gr	EW
17	S0107, S1102	3.0gr	EW
18	S0107, S1102	2.2gr	EW
20	S0107, S1102	6.3gr	EW
21	S0107, S1102	0.7gr	EW
22	S0107, S1102	2.5gr	NS
23	HACHINOHE-S(NS)		NS
24	HACHINOHE-S(EW)		NS
25	MIYAKO-S(NS)		NS
26	MIYAKO-S(EW)		NS
27	AKITA-S(NS)		NS
29	AKITA-S(EW)		NS
30	EL CENTRO, TAFT		NS

3.2 振動実験による SMAC 波形と他の地震計の波形の比較

No. 22 の記録波形を Fig.4(a)~(c) に示す。(a) は SMAC 波形で (b) が SAMTAC 波形, (c) が V401 波形である。SAMTAC 波形は他の波形と位相が逆になっている。波形を見るかぎりでは, 他の波形と比較して SMAC 記録に特別に特異な点は見当たらない。Fig. 5 に, これらの波形に対する加速度応答スペクトルを示す。左から SMAC, SAMTAC, V401

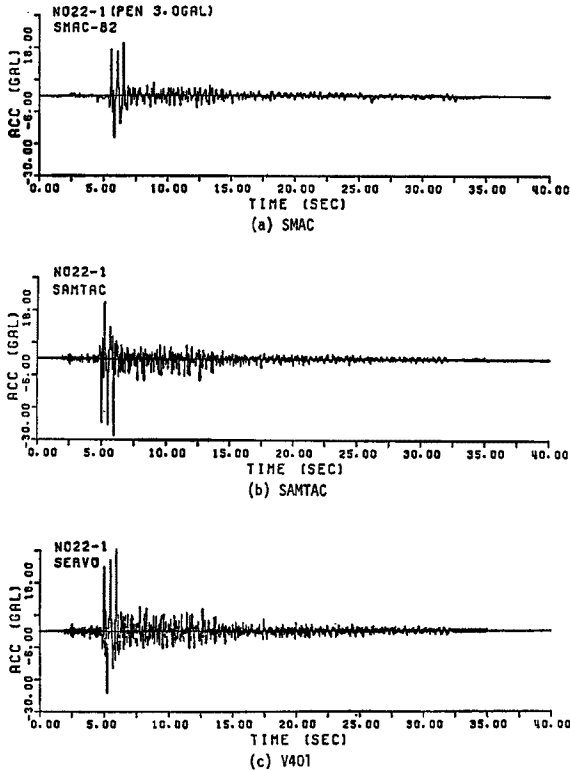


Fig. 4 Accelerograms for the experiment No. 22-1.

のスペクトルである。それぞれのスペクトルの長周期帯域側に注目すると, SMAC のスペクトルは, およそ 0.4 秒にあるピークをすぎて急速に下がりはじめ, おおむね 2 秒付近で急に乱れはじめる。2 秒付近の応答値はおおむね 1~2gal であり, このレベルが SMAC で記録し得る限界であることが推察される。SAMTAC のスペクトルは 2 秒付近で, SMAC に比べてやや緩やかに推移している。しかしながら, この図を見る限りにおいて SMAC と大差ない結果となっている。V401 のスペクトルは 2 秒程度以上の周期に対してもさらに低下している。差動トランスや光学変位計による振動台の変位のモニター記録において 1 cm を越える記録振幅がないことからみても, SMAC や SAMTAC にみられるような, 長周期帯域におけるスペクトルは不自然であり, おそらく V401 に示す加速度応答スペクトルが一番妥当なものであると判断できる。

Fig. 6 に No. 20 の SMAC 記録波形を示す。No. 20 は No. 22 と同一の入力であるが, 加振方向と SMAC のペン圧がそれぞれ異なる。SMAC のペン圧は No. 22 と比較して著しく大きい。

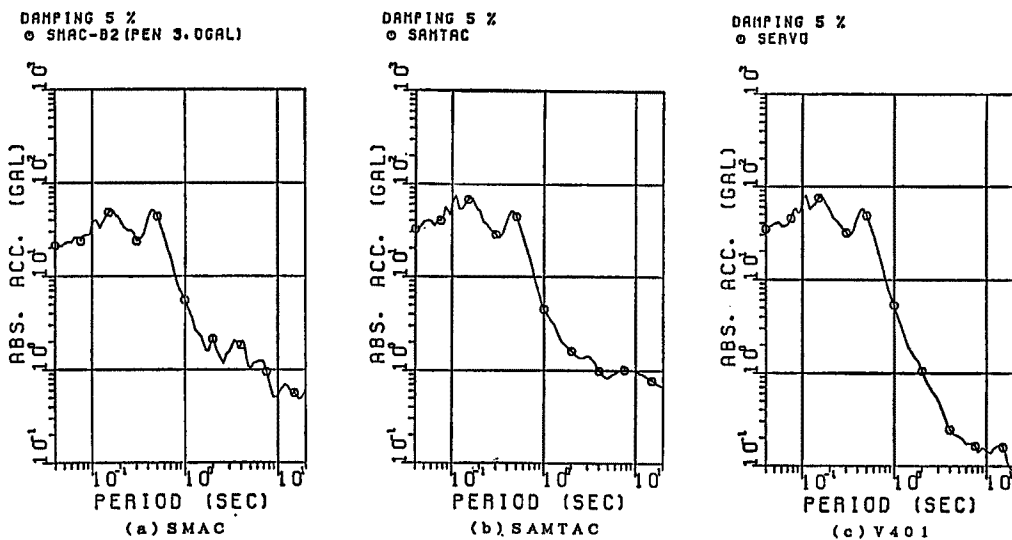


Fig. 5 Response spectra for the experiment No. 22-1.

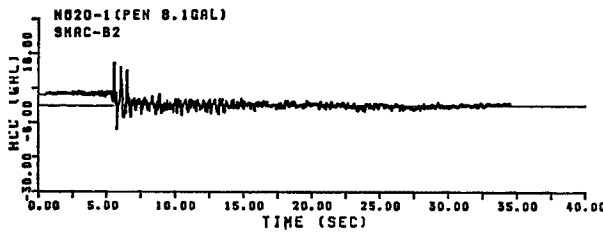


Fig. 6 SMAC accelerogram for the experiment No. 20-1.

SMAC の波形は Fig. 4 (a) に示した No. 22 の SMAC の波形と比べて振幅が著しく小さく、およそ 6 秒のあたりで 4gal 程度ゼロ線がシフトしている。これらの SMAC 波形は固定線補正および区分的ゼロ線補正等の一次補正が施されており、これら一次補正を行っても適正な補正波形が得られないことを示している。これは明らかにペン圧を大きくした結果であると考えられる。ペン圧に比例する摩擦力がペンと記録紙の間に働き、これが記録計に大きな影響を及ぼすことについては次節において詳細に検討する。SAMTAC および V401 の波形は No. 20 の時の波形とほとんど同じである。Fig. 7 に No. 20 の SMAC 記録の加速度応答スペクトルを示す。SMAC のスペクトルは 1 秒以上で周期によらず一定の値となっている。明らかにこのレベル以下の応答値を示す成分がゼロ線のシフトによる誤差に埋もれてしまっていることがわかる。なお SAMTAC および V401 のスペクトルは No. 22 の時のスペクトルと全く同じであった。

次に、記録振幅の大きな場合の実験例について述べる。

Fig. 8 に実験番号 No. 30 の Taft 波形入力の SMAC の記録波形と V401 記録波形を示す。SMAC 波形は計器特性により全体的に幾分か小さめであるが、非常に細かいピークに至るまで良く対応している。Fig. 9 にこれらの加速度応答スペクトルを示す。△印は SMAC のスペクトル、○印は V401 のス

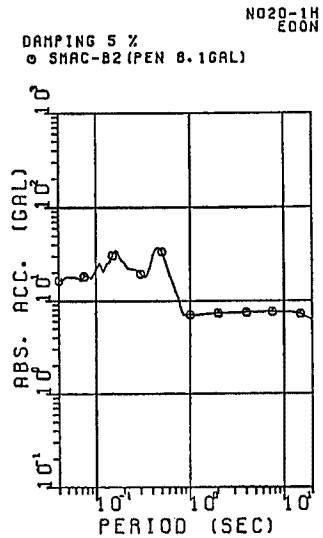


Fig. 7 Response spectrum of SMAC for the experiment No. 20-1.

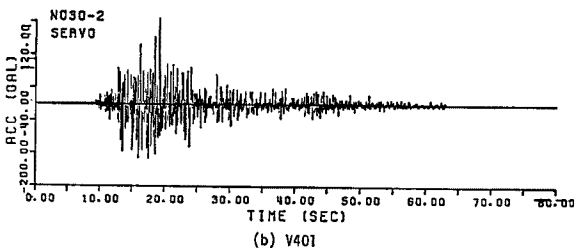
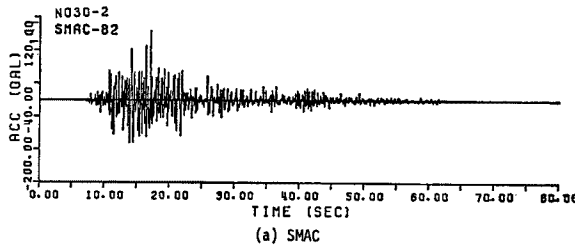


Fig. 8 Accelerograms for the experiment No. 30-2.

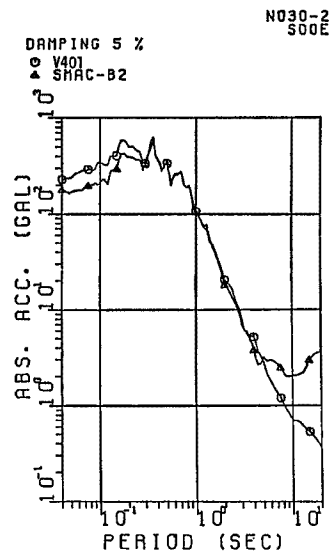


Fig. 9 Response spectra of SMAC and V401 for the experiment No. 30-2.

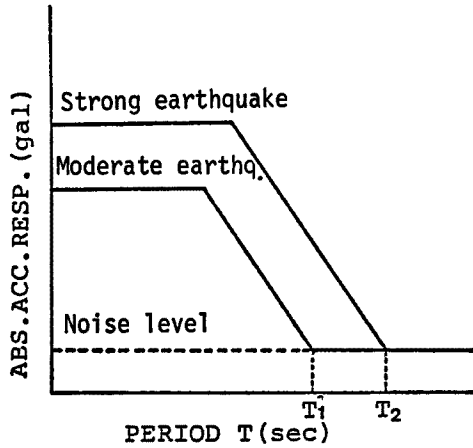


Fig. 10 Effect of Signal-Noise ratio.

ペクトルである。図示のように周期0.5秒から3秒程度までは良く対応しているが、それ以上の長周期帯域で SMAC が V401 を上廻る。このように入力が大きい場合も SMAC がサーボ型を上廻る結果となる。しかし、入力が小さい場合と比較して、両スペクトルの互いに一致する区間が幾分長い周期帯域にまで及んでいる。これは入力が大きい場合は、記録振幅が全成分にわたって大きくなるため、S/N 比が、SMAC 記録においては比較的長周期帯域にわたってまで、見かけ上改善されるからであると考えられる。すなわち、**Fig. 10** に示すようにノイズの加速度応答値のレベルは、通常、入力の大きさによらず一定であるのに対して、入力が大きいものほど、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くなり、その

ため見かけ上 S/N 比が大きくなる結果となる。

最後に加速度計では最も信頼度が高いと考えられる V401 の精度を確認するため、No. 23 の V401 波形と差動トランス変位波形および光学式変位波形の、加速度応答スペクトルを比較検討した結果を **Fig. 11(a)** **(b)** に示す。**(a)**は V401 と差動トランスとを、**(b)**は V401 と光学式とを比較したものである。長周期帯域においては、一般的に変位計の方が加速度計よりも信頼度が高いと考えられる。どちらの図においても V401 と変位計の両スペクトルは0.2秒以上の周期帯域において、完全に一致しているとは言えないが、固有周期10秒程度の、長周期帯域での応答値で約 0.7gal 程度の差しか認められない。これより V401 は比較的高い信頼性を有すると判断してよからう。

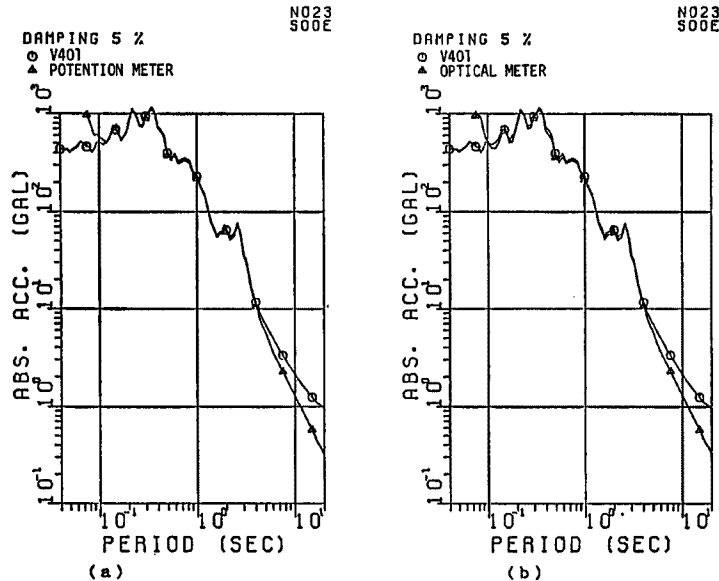


Fig. 11 Comparison of V401 and displacement meters.

(a) Response spectra of V401 and Potention meter

(b) Response spectra of V401 and optical displacement meter

### 3.3 SMAC 記録にみられるゼロ線ドリフト

前節で述べた振動実験の結果について詳細に検討する。**Fig. 12(a)** は No. 23 の実験における SMAC 記録、**Fig. 12(b)** は V401 記録を SMAC と同じ固有周期と減衰定数をもつ 1 自由度振動系に入力した場合



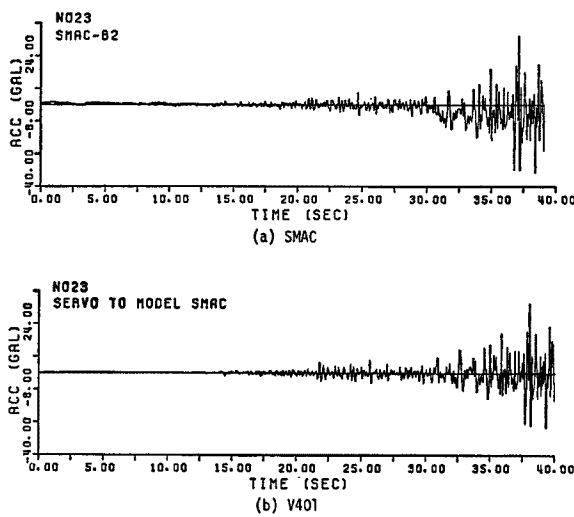


Fig. 12 Comparison of SMAC and V401 for the experiment No. 23.

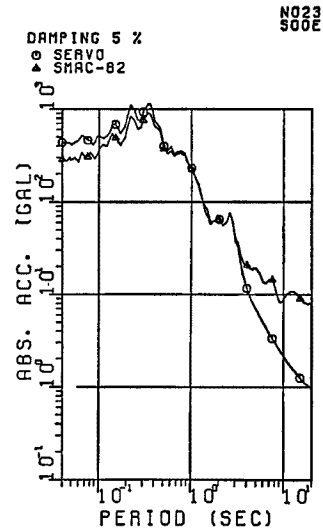


Fig. 13 Response spectra of SMAC and V401 for the experiment No. 23.

のシミュレーション波形である。図から明らかなように SMAC 記録のゼロ線が31秒あたりで紙面下方向に 8 gal 程度ドリフトしている。実験に際しては振動台の入力とした原波形には、このようなドリフトは見られないことから、このような結果になるのは SMAC に原因があると判断してよからう。

Fig. 12(b) に示すドリフトはかなり大きいようであるが記録紙上では 0.6mm 程度である。したがってこのドリフトは肉眼では識別するのが困難である。このようなゼロ線のドリフトに気付かず、これを残したままこの記録に対する加速度応答スペクトルをとれば Fig. 13 の△印で示すように、○印で示す V401 によるスペクトルに比べて長周期帯域において過大な値を取るようになる。SMAC 記録の加速度応答スペクトルが長周期帯域において過大な値を取るのはまさにこのようなゼロ線のドリフトに起因するといえる。

このような例は上述の波形だけではなく、数多くの実験例で認められる。Fig. 6 の波形は Fig. 12(a) の波形とは異なる振動方向の記録であり、従って、記録に用いられたペンもそれぞれ異なる。したがってこのようなドリフトは Fig. 12(a) の波形に特有のものではなく、この波形を記録したペンに特有のものでもない。またドリフトが肉眼で確認できない波形にも、それが記録中に含まれている可能性はおおいにあると考えねばならない。

以上のことから、あらゆる SMAC 記録には多かれ少なかれ、一次補正を施した後も必ずゼロ線がドリフトしているといえる。このようなドリフトが一次補正の後に見られるということは必ずや元の記録にも何等かの存在を示す証拠があろう。次節では一次補正前の SMAC 記録について検討する。

### 3.4 記録紙に残るゼロ線ドリフトの痕跡

記録紙上の記録波形と固定線の距離は、地動を記録する直前と振動が終了し記録を終えた直後で変化しないはずである。ところが実際には、ペンのゼロ線がドリフトしているため、この距離が変化している記録があると考えられる。そこで、このことを調べるために振動実験における SMAC 記録を用いて、記録波形と SMAC の枠との相対的な距離が固定されているペンの描く固定線との距離が記録前後でどう変化するかについて計測をおこなった。

すなわち、記録開始前の固定線から波形までの距離と読み終わり位置での同じ距離を測定し、両距離の差を求めた。本来この差は零でなければならないのに実際には最大で $-0.76\text{mm}$ 、平均 $-0.0828\text{mm}$ であった。これは加速度 (gal) に換算すると、それぞれ  $-9.5\text{gal}$ 、 $-1.035\text{gal}$  に相当する。また両距離の差が大きい

ものはその値が負である場合が多い。仮に 1 gal の直流成分が記録中に誤差として含まれているとすれば、これをそのまま数値積分して変位を計算すると 100 秒後には 50m という非常に大きな値となって現れる結果となる。

このことから記録ペンの軸が記録紙に対して記録中にドリフトし、一次補正後もなお、このドリフトがそのまま残ることがわかる。さらに、このドリフトは決まった方向に起こることを示唆している。

### 3.5 SMAC 記録におけるゼロ線ドリフトの機構

前節までに述べたゼロ線のドリフトの生じる原因について検討を進める。Fig. 14(a) に SMAC の振動子と記録部およびそれらの連結部を簡単に図解する。上の図は平面図、下の図は記録部まわりの立面図である。

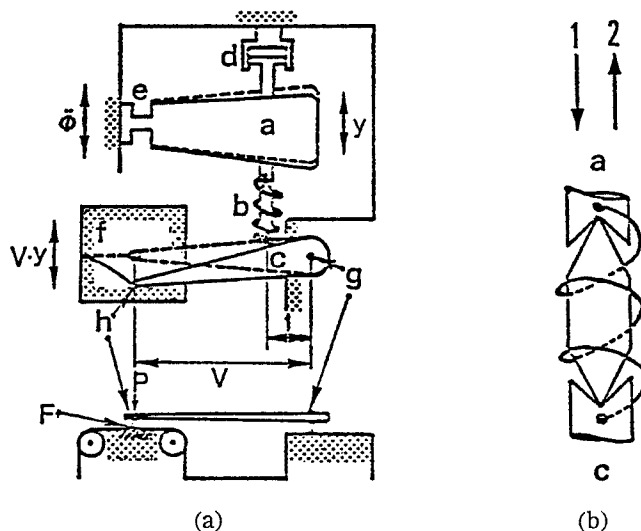


Fig. 14 Schematic illustration of SMAC.  
(a) linkage.  
(b) close-up of connecting rod.

図中の a に示す部分が SMAC のおもりである。e が板バネ、d がダンパーである。すなわち SMAC の振動系は a, e, d で構成される。地動加速度  $\ddot{\phi}$  に対する振動系の応答変位は y となる。系の応答 y は連結部 b を介して記録ペン c に伝えられ、軸 g を支点到 V の機械倍率をかけられ、ペンの針 h により記録紙 f に、 $V \times y$  の記録振幅で記録される。記録ペン c には記録紙を十分に引っかくためペン圧 P が掛けられており、このため P に比例する摩擦力 F がペンと記録紙の間に作用している。この摩擦力 F は連結部 b に作用するとき V 倍となる。第二点はおもりの動きをペンの動きに変換するまでいくつかの連結部を経てリンクを構成し、機械的に増幅される

が、その間に用いられている部品に問題がある。Fig. 14 (b) に連結部 b の拡大図を示す。連結部は曲げや、せん断力が働かないように両端がピボットとなっている連結軸と、おもり a とペン c を引き寄せさせる連結バネからなっている。おもりが Fig. 14 (a) の点線に示す位置から実線に示す位置に動いたときは連結部に図中の 1 に示す方向の力が加わり、ペン c は連結軸により同方向に Fig. 14 (a) の点線に示す位置から実線に示す位置に押し出されて記録紙に実線の記録を残す。次に、おもりが Fig. 14 (a) の実線に示す位置から点線に示す位置に動いたときは、連結部には図中の 2 に示す方向の力が加わり、ペン c は連結バネにより同方向に Fig. 14 (a) の実線に示す位置から点線に示す位置に引き寄せられ、ペンは記録紙の実線の位置から点線の位置に戻るはずである。しかるに、もし連結バネのバネ定数がペンを引き戻すのに十分でなければ問題が生じる。すなわち、おもりは Fig. 14 (a) の実線に示す位置から点線に示す位置に動いているにもかかわらず、ペンに作用している摩擦力が抵抗し、連結バネは記録ペンを点線の位置にまで引き戻せないということが生じる可能性がある。この結果、ペンの軸すなわちゼロ線が実線に示すようなドリフトを生じることになる。そこで実験に用いた SMAC の連結バネのバネ係数を実測したところ 12gf/mm 程度であった。SMAC の記録紙とペンの摩擦等に起因する不感加速度は数 gal 程度であることが知られている。仮に SMAC の不感加速度を 1gal としても、おもりの質量が 1kg であるから、このバネには最大 1gf の力が働くことを考えると、明らかにバネの剛性が不足していることがわかる。

3.3 節で示したドリフトの方向はすべて紙面下方であった。この方向は連結軸がペンを押す方向であり、以上に述べた考えを裏付けるものである。したがって、連結バネのバネ定数が小さい場合には、摩擦と連結

バネの複合作用により、ゼロ線が徐々にずれたり、階段状にずれたりし、その結果 SMAC 記録の長周期帯域におけるレベルの増大という現象が生じるものと考えてよからう。

### 3.6 各種のノイズ

SMAC 記録にはゼロ線ドリフトをはじめとするノイズが含まれていることは前述した。これに加えて、SMAC を静止状態にしたまま SMAC の記録系を駆動させた際に得られる記録波形（以下、無加振記録）にも同じ性質のノイズが含まれていることが以下の様な検討の結果明らかになった。

**Fig. 15(a)** に無加振記録波形、**(b)** にはその波形に対する加速度応答スペクトル、**(c)** にその波形のフーリエスペクトルを示す。SMAC の本体は振動していないので、波形は本来図中の原点を通る直線でなければならないはずであるが、図に示すように最大 1 gal 程度の揺動が見られる。しかも 0 秒および 30 秒付近を始点に右下がりになっているように見える。このような揺動の原因の一つは、駆動系の振動によっておもりが揺れ動き、摩擦と連結バネの複合作用によりペンが一方方向にドリフトしたためであろう。これに区分的ゼロ線補正を行い数値化された結果が **Fig. 15(a)** に示されるような揺動であり、これはノイズと考えてよい。**Fig. 15(b)** に示される応答スペクトルにより、このような波形に対する加速度応答スペクトルは周期によらずほぼ一定の値をとることがわかる。また、**Fig. 15(c)** よりこのような加速度応答スペクトルである波形のフーリエスペクトルは  $45^\circ$  右下がりの直線に沿う、いわゆる  $1/f$  スペクトルとなることがわかる。

無加振記録のもう一つの例として、No. 30 の振動実験における加振方向と直角な方向成分の SMAC 記録を **Fig. 16(a)** に示す。これに対応する V401 記録は振動台はこの方向には振動していないことを示しているにもかかわらず、SMAC 記録は図に示すように大きく揺動している。また、0 秒および 30 秒付近を始点に右下がりになる揺動の特徴は前述した通りである。**Fig. 16(b)** に加速度応答スペクトルを示した。○印が SMAC、△印が V401 のスペクトルである。SMAC には V401 をはるかに上回るノイズレベルがあることがわかる。この SMAC 記録のフーリエスペクトルを **Fig. 16(c)** に示す。前述の通り  $45^\circ$  右下がりの直線に沿う  $1/f$  スペクトルとなる。このような  $1/f$  スペクトルは“ゆらぎ”のある物理現象ではしばしば見られるものであり、SMAC のノイズもこれらの“ゆらぎ”の一つと考えられる。

このように、無加振記録ならびに加振方向と直角な成分のいずれにも、同じ特性を持つノイズが含まれていることが明らかになったが、この事実は加振方向成分にも同様のノイズ成分が含まれていることを強く示唆するものと考えられる。以上の検討結果から、SMAC 記録中には無加振記録に見るような SMAC ノイズが常に含まれていると考えてよからう。これは、上述の検討結果を勘案すれば、本来の地動による震動成分とノイズ成分とが重なり合ったものと考えられる。

次に、SMAC のゼロ線のずれを二つのモデルに分け、それらのスペクトル特性について検討を行った。**Fig. 17(a)** は地震波が入力した時点から 15 秒後に階段状のシフトが生じたもの、**Fig. 18(a)** は地震波が入力すると同時にゆっくりとした記録のドリフトが生じたものである。これらの波形に対して区分的ゼロ線補正を行った結果を **Fig. 17(b)** および **Fig. 18(b)** に示す。区分的ゼロ線補正では前述したように、30 秒ごとの区間に分割してその区間内での平均値が 0 になる様に補正を行うことから、図示のように 15 秒においてジャンプが生じる。補正をした後の両波形の加速度応答スペクトル **(c)** に、フーリエスペクトルを **(d)** に示す。加速度応答スペクトルは両者共に前述した無加振記録のスペクトルと酷似している。フーリエスペクトルにおいても  $45^\circ$  右下がりの直線に沿う  $1/f$  スペクトルとなる。以上の検討から、SMAC におけるゼロ線のずれはノイズ成分と同様なスペクトル特性を持っていることが明らかであり、いずれもフーリエスペクトルは  $1/f$  スペクトルの特徴を示す。

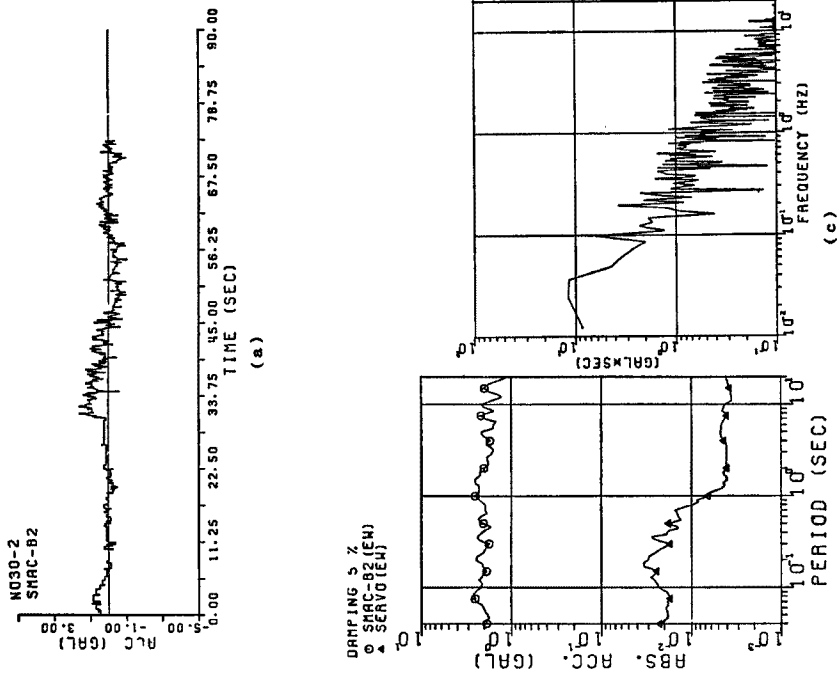


Fig. 15 Record and spectra of non excited case.  
 (a) Acceleration.  
 (b) Response spectrum.  
 (c) Fourier spectrum.

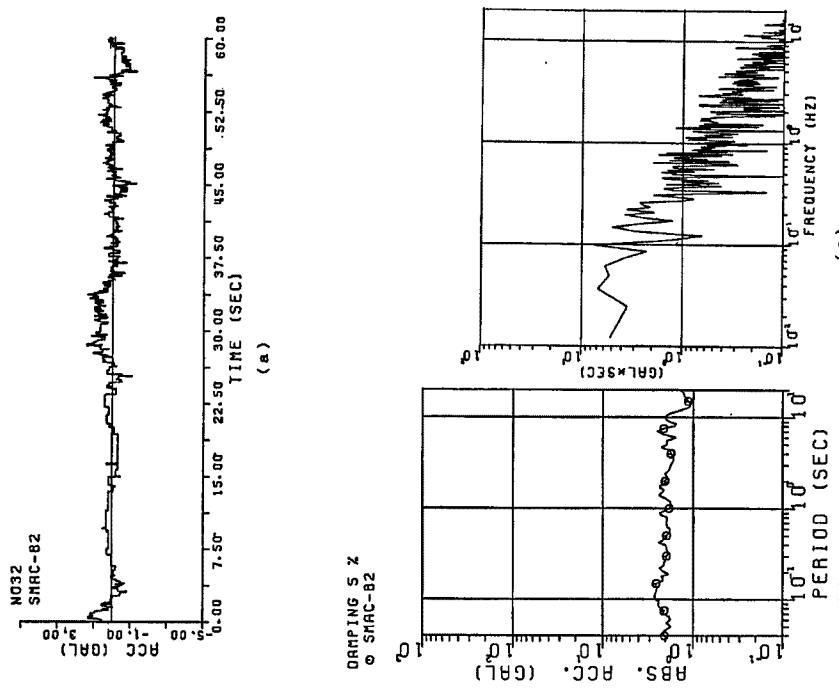


Fig. 16 Record and spectra of the case of which component is transverse to the exciting direction.  
 (a) Acceleration.  
 (b) Response spectrum.  
 (c) Fourier spectrum.

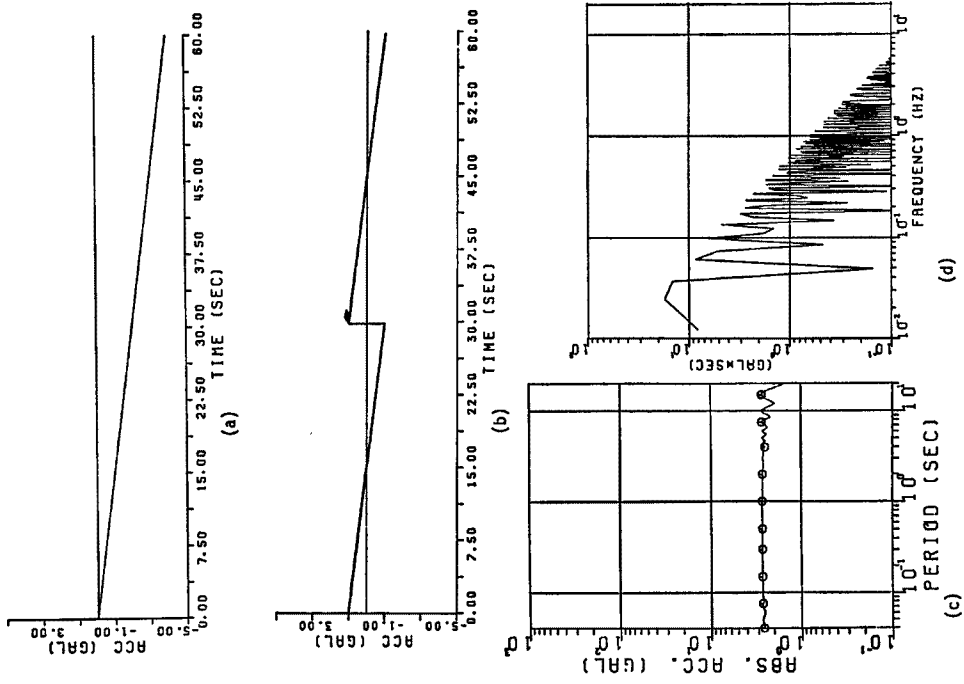


Fig. 18 Effect of drift on spectra.

(a) Time trace.

(b) Time trace after preliminary correction.

(c) Response spectrum. (d) Fourier spectrum.

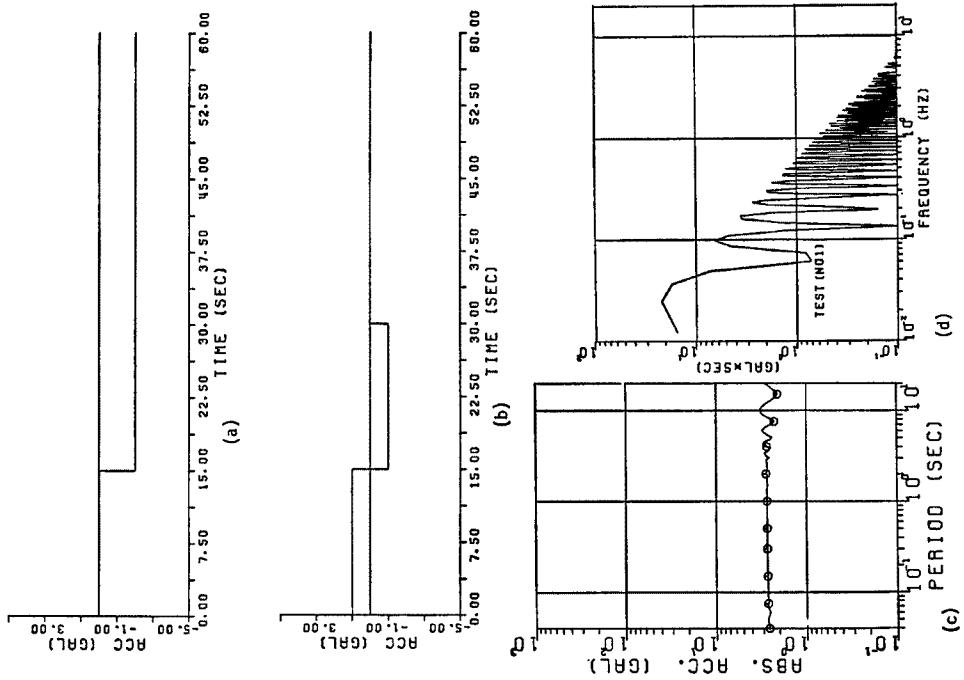


Fig. 17 Effect of step wise shift on spectra.

(a) Time trace.

(b) Time trace after preliminary correction.

(c) Response spectrum. (d) Fourier spectrum.

### 4. SMAC 強震記録の補正法の開発

#### 4.1 補正の手順

前章で 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つて、読みとり誤差などとともに数値化記録中にノイズとして含まれており、この影響が応答スペクトルの1~3秒程度以上で顕著に現れることを述べた。以後、前章で述べた SMAC 記録中のノイズを総称して SMAC ノイズと称する。本章において、SMAC 記録から SMAC ノイズを除去し、10秒程度以下の周期範囲に対して、サーボ型加速度強震計による記録と同程度の信頼を有する時刻歴波形を得る方法を開発する。

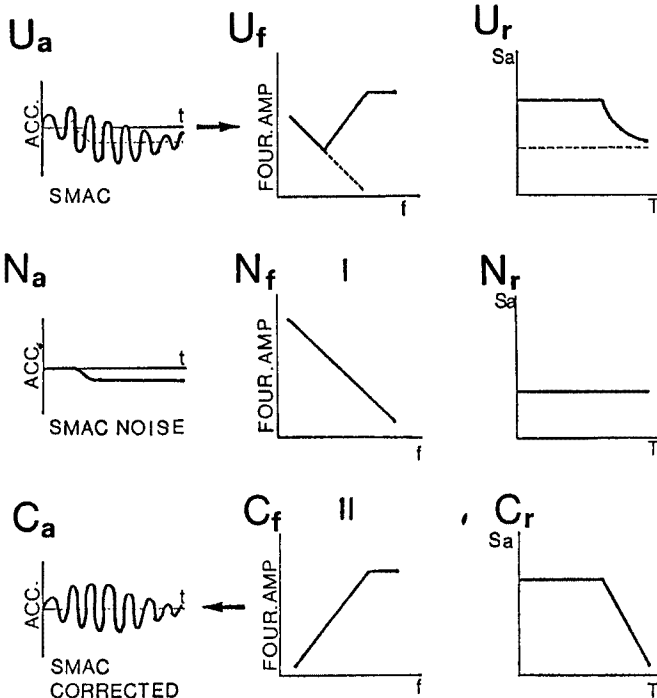


Fig. 19 Procedure of correction of SMAC record.

前章で得られた結論を要約すると Fig. 19 のようになる。図は左列に加速度波形、中列にフーリエスペクトル、右列に応答スペクトルを示している。なおスペクトルはいずれも両対数軸で描かれている。図の上段に示したように、典型的な生の SMAC 波形にはゼロ線ドリフト等によるノイズ (SMAC ノイズ) を含んでおり、 $U_a$  のような概形をしている。この波形のフーリエスペクトルが  $U_f$  であり、応答スペクトルが  $U_r$  である。

一方、中段は SMAC ノイズ  $N_a$  と SMAC ノイズのフーリエスペクトル  $N_f$  の関係を図示したものである。すなわち、SMAC ノイズは時刻歴上ではゼロ線ドリフトとして表現され、フーリエスペクトル上では図示のように水平に対して  $45^\circ$  右上がりとなる。 $N_a$  に対する加速度応答スペクトルが  $N_r$  であり、図に示すように周期によらずほぼ一定の値をと

る。SMAC ノイズのフーリエスペクトルの概形は  $N_f$  に示すような  $45^\circ$  右下がりであり、次式で表すことができる。

$$F_{SN}(f) = A_{SN} / (2\pi f)$$

ここに、 $F_{SN}(f)$ : SMAC ノイズのフーリエスペクトル

$A_{SN}$ : 記録によって異なる SMAC ノイズのレベル (gal)

$f$ : 振動数 (Hz)

すなわち、 $U_a$  に示す SMAC 波形は本来の波形に  $N_a$  の SMAC ノイズを時間軸上で足し合わせたものであり、 $U_r$  に示す SMAC のスペクトルは  $N_r$  のスペクトルを有する SMAC ノイズの影響によって  $C_r$  で示される本来のスペクトルが  $U_r$  の点線に示すレベルまで全体的に持ち上げられた結果であると考えられる。そこで、 $U_f$  の SMAC 記録から  $N_f$  の SMAC ノイズ分を差し引けば本来のフーリエスペクトル  $C_f$  が得られるはずである。補正の手順を示すと  $U_a - U_f - N_f - C_f - C_a$  となる。すなわち、 $U_a$  の SMAC 記録に対してフーリエ変換を行い、周波数領域で表したものが  $U_f$  である。 $U_f$  中の点線は周波数領域での SMAC ノイズのレベルであり  $N_f$  に等しい。このノイズ分  $N_f$  を  $U_f$  から差し引く。この結果、 $C_f$  に示すような補正 SMAC 記録のフーリエ振幅が得られるから、この  $C_f$  に対してフーリエ逆変換を行えば時刻歴  $C_a$  を得

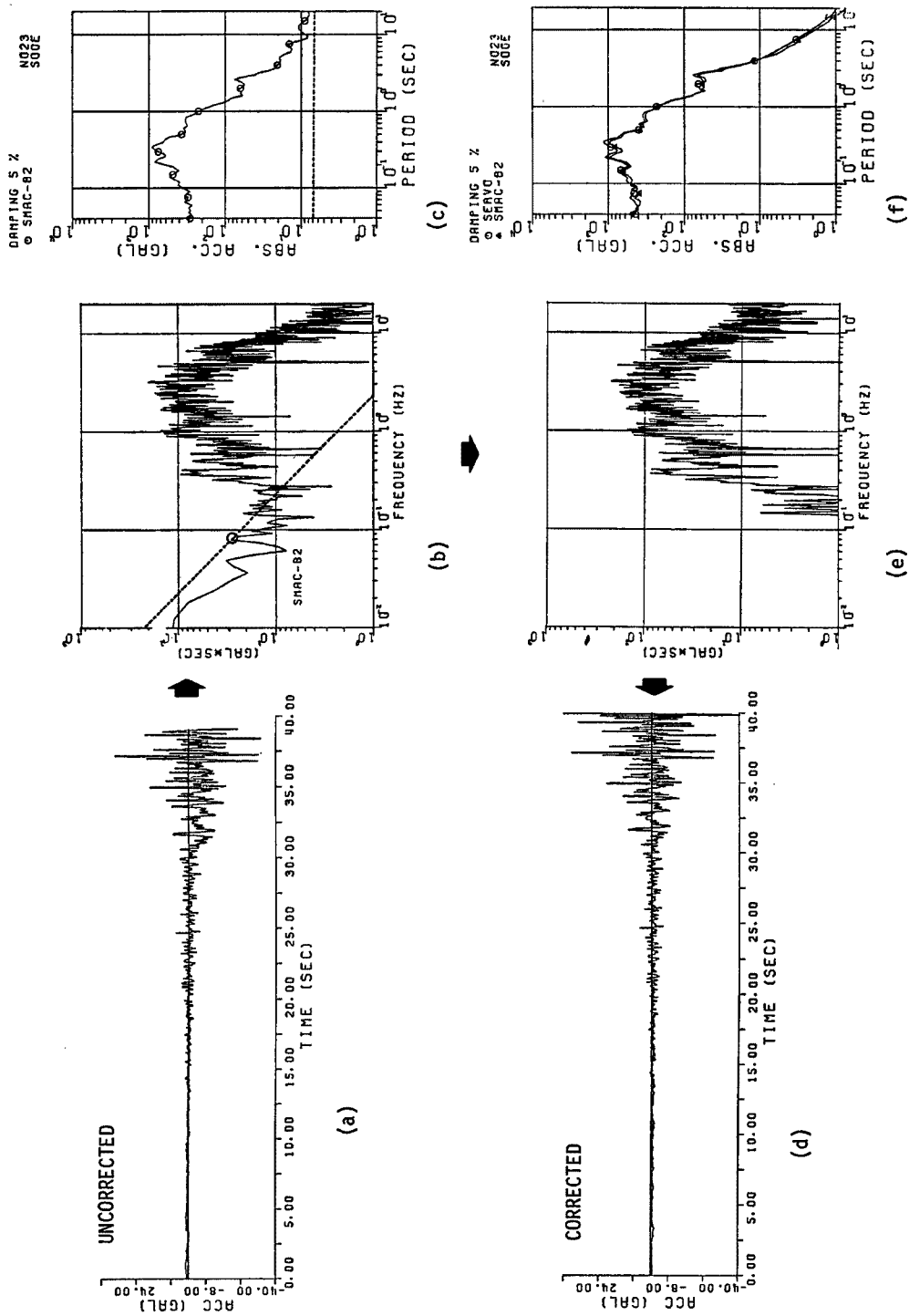


Fig. 20 Example of correction. (a)Uncorrected acceleration. (b)Uncorrected fourier spectrum. (c)Uncorrected response spectrum. (d)Corrected acceleration. (e)Corrected fourier spectrum. (f)Corrected response spectrum.

る。ただし、位相は元の記録の位相をそのまま用いる。この  $C_e$  が求めるべき補正された (SMAC ノイズを取り去った) SMAC 記録である。こうして得られた SMAC 記録に対して応答スペクトルを定めると  $C_r$  が得られるが、これは本来のスペクトルとほぼ等しいものとなる。したがって、SMAC ノイズのレベル  $A_{SN}$  を記録ごとに定めることができれば、以上の手順で SMAC 記録を補正することができる。

ところが、SMAC ノイズは SMAC 記録中に真の波形と区別できない状態で混在する。したがって、 $N_f$  に示すような SMAC ノイズはあくまでも仮想的なものであり、通常はノイズだけを単独に取り出して示すことはできない。そこで、SMAC ノイズレベル  $A_{SN}$  をどのようにして求めるかが問題となる。実際の強震記録において SMAC ノイズレベルを求める手法は後述することとし、本節では周期10秒以上の信号成分は記録に全く含まれていないと仮定することにより SMAC ノイズレベル  $A_{SN}$  を求め、Fig. 12 (a) で示した大きなゼロ線ドリフトのある波形 (振動実験 No. 23 で得られたもの) に対して上述した補正法を適用した結果を示す。

Fig. 20 (a) は一次処理後の SMAC 記録であり既に Fig. 12 (a) に示したものである。Fig. 20 (b) は

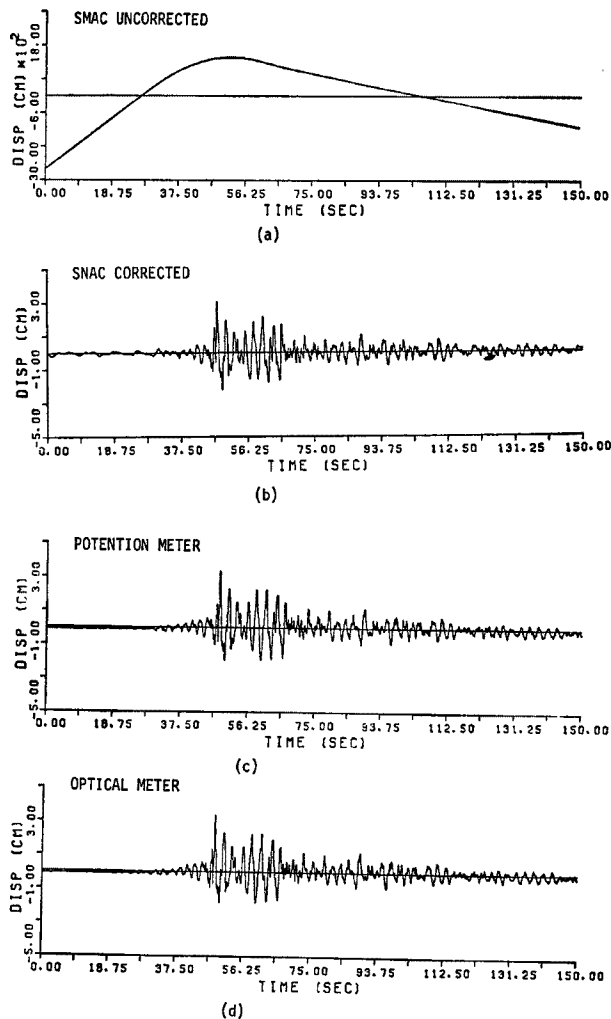


Fig. 21 Comparison of displacement curves.  
 (a) SMAC uncorrected.  
 (b) SMAC corrected.  
 (c) Potention meter.  
 (d) Optical displacement meter.

Fig. 20(a) の SMAC 記録のフーリエスペクトルである。ここで SMAC ノイズのレベル  $A_{SN}$  は以下のようにして定める。すなわち、傾き -1 の直線を十分大きなレベルから徐々に下げて行く際、SMAC 記録のフーリエスペクトルにおいて振動数 0.1Hz 以下の周波数領域におけるピークと最初に接する直線 L (Fig. 20(b) の点線) を SMAC ノイズのフーリエスペクトルとし、この直線を与える  $A_{SN}$  を SMAC ノイズのレベルとする。この例においては  $A_{SN}$  は約 11gal となる。こうして定めた直線 L を、SMAC ノイズのフーリエスペクトルとして SMAC 記録のフーリエスペクトルから差し引く。Fig. 20(e) はノイズ分を差し引いた SMAC 記録のフーリエスペクトルであり、このスペクトルに対してフーリエ逆変換を行って Fig. 20 (d) に示す補正された SMAC 波形を得る。この図においては、Fig. 20 (a) に見られた 31 秒付近のゼロ線のドリフトは完全に取り除かれている。Fig. 20 (f) に SMAC 補正波形 ( $\Delta$ 印) と V401 ( $\circ$ 印) に対する加速度応答スペクトルを示す。3 秒程度以上の周期領域において、SMAC ノイズの影響で持ちあがっていたスペクトルのレベル Fig. 20 (c) がスムーズにさがり結果となっており、SMAC と V401 の両者はほとんど一致している。

Fig. 21 (a), (b) に、補正を行う前の SMAC 記録、および上述の補正を行った記録のそれぞれを直接積分して求めた変位波形の例を示す。(a) は SMAC ノイズによる長周期



成分が卓越し、変位振幅が非常に大きくなっている。振動台の可動最大変位が 5 cm であることから明らかに無意味なものであることがわかる。一方、(b) の補正記録の変位波形は最大振幅が 3 cm と妥当なものとなっている。Fig. 21(c), (d) にはこの実験に際して同時に計測した差動トランス型変位計、および光学式変位計による振動台の変位記録をそれぞれ示す。Fig. 21(b) の補正記録の変位波形をこれらと比較してみれば、若干の相違はあるものの非常に良い対応を示しており、提案する補正法が妥当なものであることを示している。

#### 4.2 JMA 記録との対比による SMAC ノイズレベルの設定

前章で述べたように SMAC 記録の長周期成分に混入する誤差の大きさ (SMAC ノイズレベル) は、記録毎に異なった値をとる。前節では SMAC に入力する地震波に、長周期成分が全く含まれていないと仮定することにより SMAC ノイズレベルを求めた。しかしながら、実際の記録では長周期領域にも有為な信号が記録されており、これらとノイズの判別は、非常に困難となる。

本研究の目的は、過去の SMAC 強震記録の周期10秒程度までの長周期成分の補正法の開発であり、そのためには SMAC 記録のみから SMAC ノイズレベルを求めなければならない。そこで前もって適正な SMAC ノイズレベルを何等かの方法で設定し、しかる後に設定した SMAC ノイズレベルを SMAC 記録のみから求める手法を開発するという過程を経ることとした。

まず、同一都市内で観測された JMA 記録と対比することにより SMAC ノイズレベルを定めた。本節で取り扱う SMAC 記録<sup>3),4),7)</sup>は、同一都市内の JMA 記録<sup>2),8),9),10)</sup>が得られている日本海中部地震13成分(本震 8 成分, 余震 5 成分), 宮城県沖地震18成分, 十勝沖地震 4 成分, それに日向灘地震 4 成分の記録で、合計 37成分である。Table 2 に観測点と成分を示す。ただし、この表中左端の列の ( ) 内は、耐震工学データベース SERM-II<sup>7)</sup> の記録番号である。SMAC 記録と JMA 記録の観測点はいずれの都市においても異なる地点であるが、数秒以上の周期帯域においては地表面近くの地盤構成の影響を受ける度合いが低くより深い基盤での震動特性に支配されると考えられることから、周期5-10秒程度の帯域に関しては SMAC と JMA の比較は可能と考えられる。しかし個々の記録に関しては明らかに両記録の特性や振幅が大きく異なるものも存在するが、これらについては後述する。

これら 4 地震の SMAC 記録のフーリエスペクトルを見較べたとき、その概形が、記録の年代によって大きく異なることがわかる。すなわち、1983年の日本海中部地震(例, Fig. 22(a) 酒田)や1978年の宮城県沖地震(例, Fig. 22(b) 小名浜)等の比較的新しい記録では、フーリエスペクトルの長周期領域が、どちらかといえば減少する傾向を示すのとは対照的に、1968年の十勝沖地震(例, Fig. 22(c) 宮古)や同じく1968年の日向灘地震(例, Fig. 22(d) 高知)等の古い記録になると、摩擦により生じる誤差の影響でフーリエスペクトルの長周期領域が増大する現象が顕著に現れる典型的な SMAC 記録の形をしている。この違いの原因として、例えば数値化の精度の問題や、処理法の違い、また強震計自体の性能の差などが考えられる。仮に強震計自体に差がないとすれば、古い記録を新しい処理法によって数値化し、一次補正を施すことによって、長周期成分の誤差を小さくすることが可能であると考えられるが、本研究では、新旧の記録を同等に扱って、適正な SMAC ノイズレベルを求める手法を開発することを目的としたので、十勝沖地震や日向灘地震の記録も何等手を加えることなく用いた。

本研究では周期5-10秒における減衰定数 2% の変位応答スペクトルの残差の自乗和を最小にする方法により SMAC ノイズレベルを設定した。具体的には、あらかじめ SMAC ノイズレベルを 0.5 GAL ごと変化させて残差の自乗和を計算し、それらの中で残差の自乗和を最小にするものに対して、その前後で再び収束計算を行い、残差の自乗和を最小とする SMAC ノイズレベルを求めた。Table 2 に上述の方法により求めた SMAC ノイズレベルを、またその値で補正を行った SMAC 記録より求めた変位応答スペクトルと、JMA 記録から求めた変位応答スペクトルとを比較することにより算出した、周期 5-10秒における最大値の差及び残差の自乗和をあわせて示した。

Table 2 List of SMAC record compared with JMA seismograms

No.	Earthquake	Station	Component	Noise Level (gal)	Peak difference*	Least square**	Adoption
1(323)	NIHONKAI-CHUBU(1983-05-26)	AKITA	U-D	5.870	0.005	196.14	○
2(326)	NIHONKAI-CHUBU(1983-05-26)	SAKATA	U-D	2.500	2.547	186.88	○
3(328)	NIHONNAI-CHUBU(1983-05-26)	MURORAN	E-W	1.669	-0.709	3.27	○
4(329)	NIHONKAI-CHUBU(1983-05-26)	MURORAN	U-D	2.000	0.410	8.699	○
5(330)	NIHONKAI-CHUBU(1983-05-26)	MURORAN	N-S	0.0	-2.217	155.03	○
6(333)	NIHONKAI-CHUBU(1983-05-26)	HACHINOHE	N-S	3.500	-2.224	36.14	○
7(334)	NIHONKAI-CHUBU(1983-05-26)	HACHINOHE	U-D	0.290	-1.958	87.12	○
8(335)	NIHONKAI-CHUBU(1983-05-26)	HACHINOHE	E-W	14.000	4.793	92.5	○
9(336)	NIHONKAI-CHUBU(A. S.) (1083-06-09)	AKITA	N-S	2.817	-0.505	2.907	○
10(337)	NIHONKAI-CHUBU(A. S.) (1983-06-09)	AKITA	U-D	1.514	0.030	0.473	○
11(338)	NIHONKAI-CHUBU(A. S.) (1983-06-09)	AKITA	E-W	0.500	0.444	1.076	○
12(345)	NIHONKAI-CHUBU(A. S.) (1983-06-09)	MURORAN	E-W	1.000	-0.101	1.679	○
13(346)	NIHONKAI-CHUBU(A. S.) (1983-06-09)	MURORAN	U-D	1.308	-0.002	2.121	○
14(009)	TOKACHI-OKI(1968-05-16)	MURORAN	N-S	21.000	-1.255	68.61	○
15(010)	TOKACHI-OKI(1968-05-16)	MURORAN	E-W	23.000	0.774	108.89	○
16(014)	TOKACHI-OKI(1968-05-16)	MIYAKO	N-S	11.000	0.100	10.11	○
17(015)	TOKACHI-OKI(1968-05-16)	MIYAKO	E-W	10.000	4.142	47.82	○
18(005)	HYUGANADA(1968-04-01)	KOUCHI	N-S	4.268	0.0	6.59	○
19(006)	HYUGANADA(1968-04-01)	KOUCHI	E-W	4.000	-1.892	13.787	○
20(184)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	NIIGATA	E-W	0.0	-3.317	404.289	○
21(185)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	NIIGATA	U-D	0.0	-2.608	63.970	○
22(186)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	NIIGATA	N-S	0.0	-3.718	57.479	○
23(187)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	AOMORI	N-S	15.500	2.752	54.615	○
24(188)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	AOMORI	U-D	1.000	-0.474	9.206	○
25(189)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	AOMORI	E-W	20.000	2.537	74.302	○
26(190)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	AKITA	N07W	0.500	0.267	27.529	○
27(191)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	AKITA	U-D	11.500	2.410	32.072	○
28(192)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	AKITA	E07N	1.000	0.605	18.347	○
29(196)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	ONAHAMA	W25N	3.000	-0.838	2.669	○
30(197)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	ONAHAMA	U-D	0.278	-0.001	1.156	○
31(198)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	ONAHAMA	N25E	0.465	0.003	3.887	○
32(208)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	HACHINOHE	N-S	6.000	-0.399	1.432	○
33(209)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	HACHINOHE	U-D	1.000	2.820	15.708	○
34(210)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	HACHINOHE	E-W	4.085	-0.002	3.785	○
35(193)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	MIYAKO	E-W	1.000	0.631	31.405	○
36(194)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	MIYAKO	U-D	0.899	-0.130	67.028	○
37(195)	MIYAGIKEN-OKI(1978-06-12)	MIYAKO	N-S	2.000	-0.274	27.365	○

\*Difference of peak value of response spectrum between SMAC and JMA seismograms.

\*\*Least square od difference of response spectrum between SMAC and JMA seismograms.

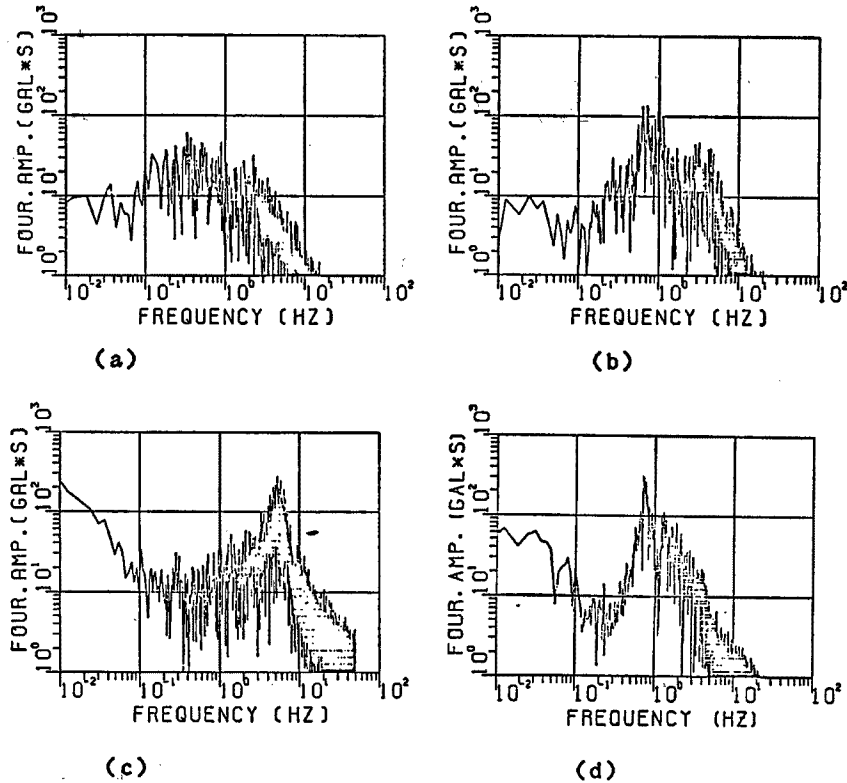


Fig. 22 Comparison of fourier spectra.

- (a) SAKATA record during NIHONKAI-CHUBU earthquake.  
 (b) ONAHAMA record during MIYAGIKEN-OKI earthquake.  
 (c) MIYAKO record during TOKACHI-OKI earthquake.  
 (d) KOUCHI record during HYGANADA earthquake.

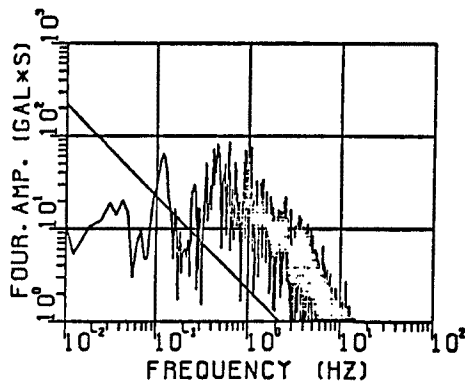


Fig. 23 Fourier spectrum of HACHINOHE record obtained during NIHONKAI-CHUBU earthquake (No. 8).

SMAC 記録と JMA 記録は同一都市内とはいえ全く同じ地点ではなく震央距離にして最大 6 km 程離れている場合もある。さらに JMA は、各地の気象台にあり、一般には市街地の中心部で地盤条件のしっかりした場所に設置されていることが多いのに対して、SMAC 強震計は、本章の検討では全て港湾技術研究所の記録を用いたため、ほとんどが港湾地域の軟弱な地盤上に設置されている。また、SMAC 強震計の設置されている地点の地盤条件は、比較的詳しくわかっているが、気象台のある地点の地盤条件はほとんど明らかにされていない。従って、JMA 記録と SMAC 記録が、振動数特性や振幅レベルなどが大きく違うことがあり得る。Fig. 23 には日本海中部地震の八戸の記録 (No. 8) の無修正のフーリエスペクトルと SMAC ノイズレベルを表す 45° 右下がりの直線を描いたものを示した。図からわかるように、この場合には明らかに SMAC ノイズレベルを大きくとり過ぎていることがわかる。この様に、設定した SMAC ノイズレベルが明らかに不適切である場合には、当該記録は、観測点の違いによる影響が大きいとして除外することにした。除外するかどうかの判断基準としては、次の 2 点を設定した。

- 1) フーリエスペクトルの周波数 0.01-0.1Hz 付近において、記録のフーリエスペクトルと SMAC ノイ

ズレベルを示す直線が、全く交点をもたないもの：SMAC 強震計は、計器特性上長周期側で S/N の劣化が激しい。したがって、0.01-0.1Hz 程度の範囲では、ノイズがかなり卓越している。しかしながら、強震記録が信号とノイズとの合成である以上、原記録より求めたフーリエ振幅を、ノイズのみのフーリエ振幅が、全域で上回るということは考えられない。この観点からこの基準を設定した (No. 8, 14, 15, 23, 25, 27, 32 が該当)。

2) SMAC ノイズレベルが 0.0gal のもの：SMAC ノイズレベルが 0.0gal というのは、JMA 記録による変位応答スペクトルの方が、SMAC 記録のそれより、周期 5-10 秒の範囲で大きいことを示している。一般に SMAC 記録には誤差が混入することにより長周期域で変位応答値が増大すると考えられることから、SMAC 記録に記録されている長周期領域のレベルは、JMA 記録のそれより相当高いと考えられ、従って、この様な一般性に反する記録も除外すべきであろう (No. 5, 20, 21, 22 が該当)。ただし、0.0gal に近い小さい SMAC ノイズレベルの記録は、疑わしい点はあるものの、明確な基準を決めることができないので、一応適正なレベルを与えているとして扱うことにした。

以上のような検討の結果、37成分のうち11成分が観測点の違いによる影響が大きいとして除外され、26成分が残った。その内訳は、日本海中部地震11成分 (本震 6 成分, 余震 5 成分), 十勝沖地震 2 成分, 宮城県沖地震 11 成分, 日向灘地震 2 成分であり、Table 2 の右端の覧に○印をつけて示した。この数は、以後の検討にはまず十分な個数であると思われるので、今後はこの26成分について解析を行う。

#### 4.3 記録の特性値と SMAC ノイズレベルとの相関

前節では、JMA 記録と比較することにより SMAC ノイズレベルを設定した。その結果として適正な SMAC ノイズレベルが設定された26の記録に基づいて、SMAC 記録の補正法の開発を本節において行う。このため、SMAC ノイズレベルと関係の深い特性値を記録から見いだすことがもっとも重要となる。

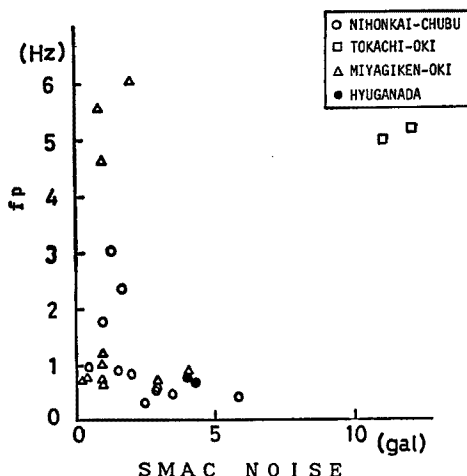
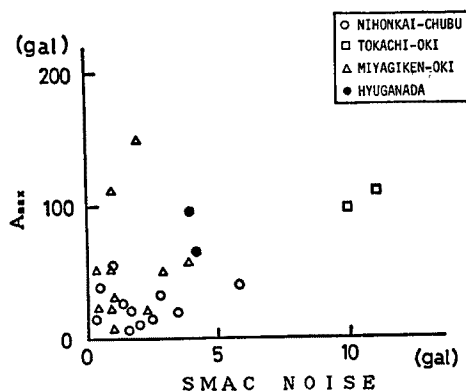
従来長周期成分に混入する誤差と関係が深いとされてきた記録の特性値を縦軸に取り、前節で設定した SMAC ノイズレベルを横軸にとって、各々の記録の値をプロットすることにより、記録の特性値と SMAC ノイズレベルとの相関を調べた。本研究では様々な特性値との相関を検討したが、その全てを示すことは困難であるので、ここでは原波形の最大加速度振幅および卓越周期についてのみ示す。なお各々のプロットがどの地震の記録かを表すため、十勝沖地震を□印、日向灘地震を●印、宮城県沖地震を△印、日本海中部地震を○印でプロットしている。

さらに、SMAC 強震計の計器特性や数値化の方法などから、あるいはフーリエスペクトルや応答スペクトルなどの傾向から、SMAC ノイズレベルと関係があると思われる特性値についても同様にして相関関係を検討した。

##### a) 卓越振動数

フーリエ加速度スペクトルの最大値を与える卓越振動数  $f_p$  と SMAC ノイズレベルとの相関関係を Fig. 24 に示す。

鈴木・後藤・亀田・高森<sup>13)</sup>は、卓越振動数を従来の台形フィルターなどによる補正を行う際の低域遮断振動数を決定する要因の一つに挙げている。すなわち卓越振動数が小さくなるにつれて、低域遮断振動数も小さくなる傾向があるとしている。この傾向は、前述したように SMAC 記録が信号とノイズとの合成であると考え、卓越振動数が小さくなるにつれて、長周期領域における信号成分が大きくなり、相対的にノイズレベルが小さくなるということから説明できる。しかしながら、Fig. 24 で示されるように、卓越振動数と SMAC ノイズレベルとは、ほとんど相関関係がないことがわかった。特に宮城県沖地震の記録 (△) のように卓越振動数が 5 Hz 程度の記録でも、SMAC ノイズレベルがかなり小さい記録が存在するということは、本研究のような補正法を用いれば、従来の台形フィルターを使った場合より、ずっと長周期まで信頼しうる記録として、用いることができることを示しており、台形フィルターによる補正法自体の妥当性に問題があることがわかる。

Fig. 24 Relationship of  $f_p$  and SMAC noise.Fig. 25 Relationship of  $A_{max}$  and SMAC noise.

## b) 原波形の最大加速度振幅

数値化の際の一次補正のみで、計器特性やフィルタリングなどの処理を施していない原波形より求めた最大加速度と SMAC ノイズレベルとの相関関係を Fig. 25 に示す。この図によれば、最大加速度と SMAC ノイズレベルは一見関係があるように見える。しかしながら、最大加速度が、100gal 程度以上の大きい記録と、100gal に満たない小さい記録とに分けて考えた場合、100gal 以下の記録は最大加速度によらず SMAC ノイズレベルが 5gal 程度以下の範囲に様に散らばっている。また、100gal 以上の大きな記録については、プロットした点が宮城県沖地震 2 成分 ( $\Delta$ ) と、十勝沖地震 2 成分 ( $\square$ ) と少ないので、これだけで判断するのは危険ではあるものの、大きく散らばっていることがわかる。以上のようなことを考え合わせると SMAC ノイズレベルとの相関が明確であるとはいいがたい。

## c) 周期30秒におけるフーリエ振幅

SMAC 強震計は、固有周期が 0.14 秒と短いため、周期数十秒程度の成分は振子の応答振幅が小さくなるために殆ど記録できない。したがって、SMAC 記録のフーリエスペクトルは、周期が数十秒程度の範囲になれば、極めて小さい値しか持たないはずである。しかし、前述のように原記録から求めたフーリエスペクトルは、この領域でも十分大きな値を取る。したがって、この領域での値は、記録に混入した誤差の大きさを表していると思っても差し支えないであろう。一方、港湾技術研究所では記録を 30 秒毎に区切って数値化を行ない、区分ごとの補正を施しているため、周期 30 秒以上の成分については信頼度が極めて低い。これらの理由により周期 30 秒でのフーリエ振幅が、SMAC ノイズレベルを表していると考えた。

Fig. 26 に周期 30 秒におけるフーリエ振幅と JMA との対比により設定した SMAC ノイズレベルとの相関を示す。ただし、縦軸の周期 30 秒におけるフーリエ振幅は、円振動数 ( $2\pi/30$ ) を乗じて gal に変換し示してある。すなわち、SMAC ノイズとして周期 30 秒においてフーリエ振幅を通る  $45^\circ$  右下がりの直線を引いた場合の SMAC ノイズレベルを表しており (Fig. 27)、SMAC ノイズレベルの推定法の開発という目的からすれば、こうした方が分かりやすいと考えたことによる。Fig. 26 の破線は傾き 1 の直線を表しており各記録のプロットがこの破線上にあるということは、周期 30 秒におけるフーリエ振幅を以て SMAC ノイズレベルとした場合に、これが JMA 記録との対比に基づいて設定した SMAC ノイズレベルと等しいことを表している。2 変量の回帰式は、直線に限ることはなく、また傾きが 1 である必要もないが、SMAC ノイズレベルとして算定している以上原点を通る傾き 1 の直線にのることが望ましい。

Fig. 26 を見ると、両者は比較的良好な対応関係を示していると考えられる。しかしながら、周期 30 秒でのフーリエ振幅の大きな十勝沖地震 2 成分 ( $\square$ ) と日向灘地震 1 成分 ( $\bullet$ ) を除くと、相関は、決してよくな

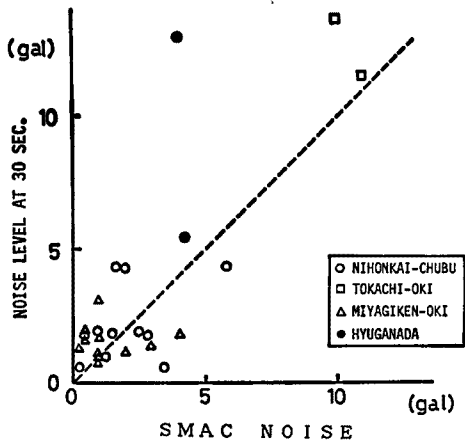


Fig. 26 Relationship of noise level determined at 30 seconds and SMAC noise.

いことがわかる。また、日向灘地震1成分は傾き1の直線から大きくずれている。さらに、傾き1の直線から比較的外れている記録について検討した結果、これらは周期30秒のところをフーリエスペクトルの山や谷がちょうど来る記録が多いことがわかった。すなわち、これらの記録はSMACノイズレベルを過大に、或は過小に評価することを示している。

この問題点を改善することを目的として、周期20-30秒の平均振幅との相関関係を調べた。この結果をFig. 28に示す。全体として、相関がかなり良くなっており、SMACノイズレベルの小さな範囲でも、傾き1の直線上に各点が集まってきている。破線から大きく外れている日向灘地震の1成分(●)を除けば、傾き1の直線に沿っていると考えてもよからう。即ち、周期20-30秒におけるフーリエ振幅の平均値からSMACノイズを推定すれば、その結果はJMAとの対比から定まるノイズレベルに近いことになり、したがって、20-30秒の範囲での平均でノイズレベルを設定すればその結果としての変位波形はJMAに近いものになっていると期待できる。

#### d) 平滑化したフーリエスペクトルの極小値

SMAC記録のフーリエスペクトルの典型的な概形は、卓越振動数から、低振動数側へいくにつれて一旦減少するものの、ある振動数を境にして、SMACノイズが卓越することによりスペクトルの振幅が増大する。したがって、SMACノイズを含む記録のフーリエスペクトルは、この様に長周期側で一旦極小値をとることが期待される。特に十勝沖地震や日向灘地震の記録では、前述したように、これが顕著である。

この極小点より長周期側では、フーリエ振幅は、ほぼ誤差の大きさを表していると考えても差し支えない。そこで、この極小点を求める手法について検討する。まず原波形から求めたフーリエスペクトルは、一般に大変入りの激しい形状をしており、そのまま機械的に極小点を求めることは困難であることから、スペクトルの平滑化<sup>12)</sup>を試みた。ここでは、0.1Hz以下の長周期領域では、最小ウィンドウ幅で、また、それより短周期側では、振動数に比例してウィンドウ幅を広くとるような、可変幅の長方形パルスを用いて振動数領域で平滑化を行なった。最小ウィンドウ幅は、0.012Hzと0.024Hzの2通りについて計算した。長方形パルスは、振動数領域で以下ようになる。

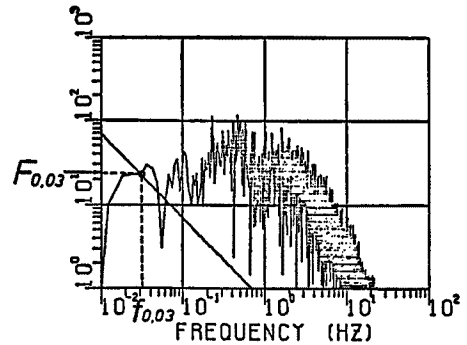


Fig. 27 Noise level determined at 30 seconds.

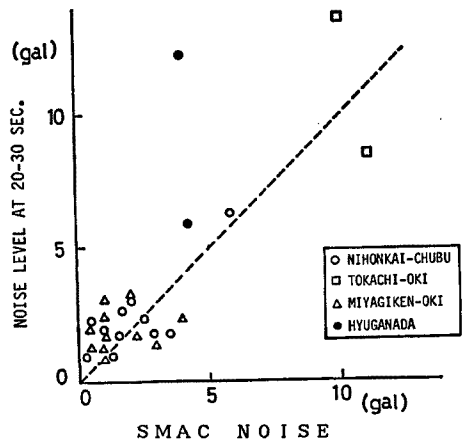


Fig. 28 Relationship of noise level determined at 20-30 seconds and SMAC noise.

$$W(f) = 1/b \quad (|f - f_0| \leq b/2)$$

$$W(f) = 0 \quad (|f - f_0| > b/2)$$

ここに

$$b = 0.012, \text{ or } 0.024 \quad (f_0 < 0.1)$$

$$b = 0.12 \cdot f_0 \text{ or } 0.24 \cdot f_0 \quad (f_0 \geq 0.1)$$

$f_0$ : 中心振動数 (Hz)

次に、平滑化したフーリエスペクトルより極小点を次の方法で求めた。

周期30秒以下の領域において平滑化フーリエスペクトル  $F_s(\omega)$  に振動数  $\omega$  を掛けた値を最小にする振動数  $\omega$  をもって、極小点とした。言い替えば、SMAC ノイズレベルを表す  $45^\circ$  右下がりの直線を SMAC ノイズレベル 0.0gal から次第に大きくし、周期30秒以下の領域における平滑化フーリエスペクトルと最初に接した点を表しており、このときの SMAC ノイズレベルが前述の  $F_s(\omega) \cdot \omega$  の最小値と等しい (Fig. 29)。

$F_s(\omega) \cdot \omega$  の最小値と前節で設定した SMAC ノイズレベルとの相関を Fig. 30 (a), Fig. 30 (b) に示す。ただし、Fig. 30(a) は、最小ウィンドウ幅 0.012Hz であり、Fig. 30(b) は 0.024Hz である。図より明らかであるが、平滑化フーリエスペクトルの極小点と JMA との対比による SMAC ノイズレベルは非常に良い相関を示す。特にウィンドウ幅 0.024Hz の Fig. 30(b) では特異な記録がなく、破線で表した傾き 1 の直線にほぼ沿っていると考えるとよからう。すなわち、 $F_s(\omega) \cdot \omega$  の最小値は、前章で設定した SMAC ノイズレベルとほぼ一致することを示している。また各記録のプロットは、傾き 1 の直線より下方にプロットされている点が Fig. 30(a), (b) とともに多い。これは、平滑化スペクトルより求めた SMAC ノイズレベルは、やや小さめに求まることを示しており、このことは、本補正法を適用した記録から定まる地動振幅は JMA によるものよりごく僅か大きくなることを意味しており、これを耐震設計の際に用いても応答を大きめに評価することになり、安全側に作用する結果とならう。

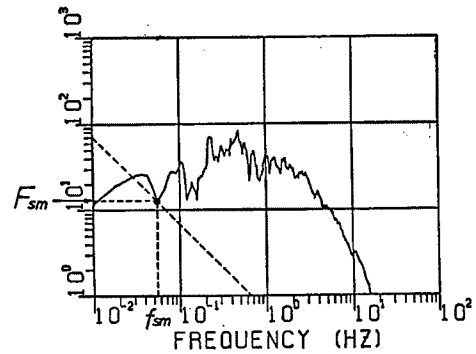
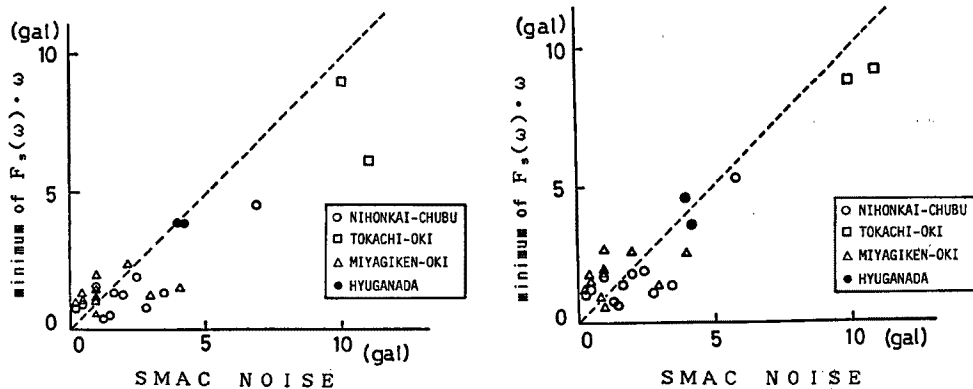


Fig. 29 Noise level determined at minimum of  $F_s(\omega) \cdot \omega$ .



(a) Minimum band width is 0.012Hz.

(b) Minimum band width is 0.024Hz.

Fig. 30 Relationship of minimum of  $F_s(\omega) \cdot \omega$  and SMAC noise.

#### 4.4 SMAC 記録の補正法の提案

SMAC ノイズレベルと記録の特性値との相関を相互に比較し総合的に判断することにより SMAC 記録の長周期領域の補正法を提案する。前節において比較的相関が良いと考えられるものは c) の 30 秒におけるフーリエ振幅と d) の平滑化したフーリエスペクトルの極小値であったので、これらの優劣について比較検討する。

まず c) の周期30秒におけるフーリエ振幅は、SMAC ノイズレベルとの物理的な関係が明瞭であるので、当初はもっとも相関が良いのではないかと考えられたが、実際には余り良い相関は示さなかった。しかし、周期 20-30 秒でのフーリエ振幅の平均を用い、フーリエスペクトルの山や谷の影響を除くことによって相関は相当改善された。

しかしながら、傾き 1 の直線から大きく外れた記録が 2 成分存在し、さらにそのずれが直線の上方向であるため、この特性値を用いて求めた SMAC ノイズレベルは、非常に大きなものとなり、耐震設計の面からは危険側になる。結局 SMAC ノイズを求める指標としては余り適さないことがわかった。

d) の平滑化スペクトルは、他の方法に比べて、SMAC ノイズとの相関が非常に良い。特に他の特性値では特異な値を示すことが多い十勝沖地震や日向灘地震についても適正な値を得る。また、傾き 1 の直線より下方にプロットされる成分が多く、これは耐震設計上安全側となる。しかしながら SMAC ノイズレベルの小さい記録については、特に相関が良いとは思われないこと、最小ウィンドウ幅が結果に及ぼす影響が大きいかかわらずこれを設定する根拠に欠けるなどの欠点がある。しかしながらこの方法は、本研究に於て検討した指標の中では最も適正に SMAC ノイズレベルを求めることが出来る指標であり、最小ウィンドウ幅は、0.024Hz 程度を用いるのが望ましいと結論できる。

以下に、本研究で提案する SMAC 記録の補正法を示す。

- (1) 一次補正の施された原記録  $A_u(t)$  をフーリエ変換し、フーリエスペクトル  $F_u(\omega)$  を求める。

$$F_u(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A_u(t) e^{-i\omega t} dt$$

- (2) フーリエスペクトル  $F_u(\omega)$  を最小ウィンドウ幅 0.024Hz の長方形パルスウィンドウを用いて、平滑化フーリエスペクトル  $F_s(\omega)$  を求める。長方形パルスウィンドウは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} W(f) &= 1/b & (|f-f_0| \leq b/2) \\ W(f) &= 0 & (|f-f_0| > b/2) \\ b &= 0.024 & (f_0 < 0.1) \\ b &= 0.24 \cdot f_0 & (f_0 \geq 0.1) \\ f &= \omega/2\pi \end{aligned}$$

- (3) 平滑化フーリエスペクトル  $F_s(\omega)$  から、周期が30秒より短い領域において  $F_s(\omega) \cdot \omega$  の最小値を求める。これが SMAC ノイズレベル  $A_{SN}$  である。すなわち、

$$A_{SN} = \min(F_s(\omega) \cdot \omega)$$

- (4) フーリエスペクトル  $F_u(\omega)$  から SMAC ノイズ成分  $F_{SN}$  を引く。

$$\begin{aligned} F_c(\omega) &= F_u(\omega) - F_{SN} \\ F_{SN} &= A_{SN}/\omega \end{aligned}$$

- (5) SMAC ノイズ成分を引いたフーリエスペクトル  $F_c(\omega)$  を逆フーリエ変換して補正記録  $A_c(t)$  を求める。

$$A_c(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^t F_c(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

## 5. 結 論

SMAC-B<sub>2</sub> 強震計は、従来から長周期帯域において記録精度に問題があるとされてきた。本研究では記録精度の劣化の原因を究明するために、記録紙とペンの摩擦に着目して地震観測と振動実験を行い、SMAC記録の長周期成分に混入するノイズの特性と、その発生機構について明らかにした。さらに SMAC 記録を補正する際に問題となるノイズの大きさを、SMAC 記録のみから算定する手法を開発し、SMAC 記録の長周



期成分に混入するノイズを取り除く補正法を提案した。以下に結論を示す。

(1) SMAC 記録波形を詳細に検討した結果、目視では識別できない程度のゼロ線のドリフトやシフトが生じていることが判明した。このゼロ線のシフトを加速度に換算するとおよそ 10gal におよぶ例もある。

(2) SMAC では記録ペンでスタイラスペーパーをひっかくため、ペンと記録紙の間には無視できない程度の固体摩擦が存在する。一方、SMAC の振動系と記録系を連結する連結バネが固体摩擦に抵抗するだけの十分なバネ係数を有しないため、記録ペンを正しい位置にまで引き戻すことができない。この結果、ゼロ線のドリフトが生じる。

(3) ゼロ線ドリフト波形のフーリエスペクトルは  $1/f$  スペクトルの特徴を有するため、ドリフトに関与する振動数成分をおおよそ識別することができる。そこで、ドリフトによるノイズ分 (SMAC ノイズ) を SMAC 記録のフーリエスペクトルから差し引くことで SMAC 記録をほぼ適正に補正することができる。しかしながら、実際の SMAC 記録には長周期領域にも有意な信号が記録されており、信号成分とノイズの判別は困難である。

(4) SMAC ノイズの大きさを SMAC 記録のみから求める手法を開発するため、まず同一都市内で観測された JMA 記録と対比することにより、SMAC ノイズの大きさ (SMAC ノイズレベル) を設定し、これと従来 SMAC 記録の補正に用いられてきた台形フィルターなどの低域遮断振動数に影響するとされてきた記録の各種特性値との相関関係を調べた。その結果、明確な相関関係は見いだせなかった。

(5) 計器特性や記録の数値化のプロセスなどから、新たな指標として周期30秒でのフーリエ振幅、及び平滑化したフーリエ振幅の極小値を考え、これらと設定した SMAC ノイズレベルとの相関を調べた。その結果、SMAC ノイズレベルの算定法として平滑化したフーリエスペクトルの極小値より求める方法が最も優れていることが明らかとなった。

(6) SMAC 強震記録の長周期成分の補正法を提案した。本手法によって SMAC 記録を周期10秒程度までの周期帯域で気象庁 1 倍強震計と整合性をもつ信頼性の高い記録に補正することができる。

## 謝 辞

本研究は運輸省港湾技術研究所との共同研究の一環として行われたものであり、同研究所の土田肇、野田節男、倉田栄一の諸氏には大変御世話になった。また、品川での同時観測に際しては東京都港湾局の長沼哲夫、穴沢雄次、山田豊の諸氏の協力を得た。本研究で用いた気象庁 1 倍強震計の記録は、建設省土木研究所、茨城大学工学部建設工学科井上涼介助手、並びに京都大学工学部土木工学科耐震工学研究室野田茂助手から提供して頂いた。振動実験の入力として用いた日本海中部地震の余震記録は京都大学防災研究所入倉孝次郎助教授から提供して頂いたものである。また SMAC 強震記録は、京都大学工学部交通土木工学科路線施設学研究室のデータベースを使用させて頂いた。なおこのデータベースを構成する強震記録は運輸省港湾技術研究所、建設省土木研究所により提供されたものである。本研究の研究費は文部省科学研究費補助金試験研究 (2) によるものである。これらを記し、謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 田中貞二・吉沢静代・大沢 胖：やや長周期帯域における強震動の特性—低周期低倍率地震計記録の解析—, 地震研究所彙報, Vol. 54, 1979.
- 2) 川島一彦・相沢 興・高橋和之：気象庁 1 倍強震計記録に基づく長周期地震動特性の解析—1968年十勝沖地震記録の解析, 土研資料第1869号, 1983.
- 3) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録 No. 1~8, 土木研究所彙報, 第32号~第38号.
- 4) 運輸省港湾技術研究所：港湾地域強震観測年報, 港湾技研資料, No. 55~No. 446.

- 5) 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.
- 6) 建設省：評価書 地動加速度測定に用いる普及型強震計の開発，建技評第80203号，1981.
- 7) 恒川裕史・亀田弘行・杉戸真太・後藤尚男：改良型耐震工学データベース (SERM-II) について，第18回地震工学研究発表会講演概要，1985.
- 8) 建設省土木研究所：気象庁1倍強震計記録に基づく長周期地震動特性（その2）—1968年日向灘地震記録の解析—，土研資料，第2245号，1985.
- 9) 大塚秀行：気象庁1倍強震計記録の数値化データベースの作成—1968年十勝沖（本震，2大余震）および1978年宮城県沖地震，茨城大学工学部建設工学科卒業論文，1987.
- 10) 山田善一・野田 茂・富本 信：日本海中部地震の気象庁1倍強震計に基づく周期10秒前後の地震動特性，京大防災研年報，第28号 B-2, 1985.
- 11) 鈴木 裕・後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太・高森清人：機械式強震計とデジタル強震計の記録精度と補正法に関する実験的研究，土木学会第41回年次学術講演会，1986.
- 12) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会.