

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

PROCEDURE OF INSTRUMENT CORRECTION AND DISPLACEMENT
CALCULATION FOR SMAC-B₂ ACCELEROGRAPH RECORDS
WITH CONSIDERING ACCURACY OF DIGITIZATION

川 島 一 彦*・高 木 義 和**・相 沢 興***

By Kazuhiko KAWASHIMA, Yoshikazu TAKAGI and Koh AIZAWA

1. 概 説

強震記録は、地震応答解析における入力地震動、設計地震力算定のための諸研究等に広く利用されている。昭和 56 年 1 月 1 日現在でわが国に設置されている強震計は 1259 台であるが、機種別にみると全体の約 53% が SMAC-B₂ 型強震計である²⁾。また、現在、土木研究所が記録の収録にあたる強震計は合計約 300 台であるが、この約 50% が SMAC-B₂ 型強震計であり、現在までに土木研究所で数値化された約 800 本の記録の約 70% はこの型の強震計によるものである。SMAC-B₂ 型強震計は振子の固有周期が 0.14 秒、減衰定数が 1.0 とされているため、短周期領域の感度が低下しているとともに、記録紙上にペンで描かれたアナログ波形を数値化する際に系統的な誤差が混入する。したがって、SMAC-B₂ 型強震計による記録を加速度入力として利用する場合には、数値化精度を考慮して短周期成分に対する計器補正を加えることが必要とされる。

一方、地下埋設管等地中構造物の動的挙動は周辺地盤の振動特性に支配されており、こうした点に基づく応答変位法による耐震計算では地震時の地盤の変位・変形に対する研究が必要とされている。また、地震時の走行車両の安定解析や橋梁のジョイント間の相対変位の解析等にも地震動の速度・変位が必要とされている。加速度強震記録を単純に数値積分して変位を求めると、解が発散して真の地動変位を近似しないことはよく知られており、この原因には、記録の離散化に伴う誤差、数値化の誤差等が挙げられている。

SMAC-B₂ 型強震計記録の計器特性補正および数値積分の方法に関しては現在までに各種の提案が行われているが、解析的なアプローチが多く、実際の観測に使用されている強震計の特性に基づき数値化精度まで考慮して総合的な検討を加えた研究は少ない。

本小文では、上記の観点から、模擬地震波を用いた SMAC-B₂ 型強震計の加振実験結果に基づき、加速度記録に対する計器補正法を検討した。ここでは、強震計記録を数値化することにより求めた加速度と、振子の動きを非接触式センサーにより直接とらえ、これを AD 変換器で電気的に数値化して求めた加速度のそれぞれに計器補正を加え、これを基準の加速度と比較することにより計器補正法を検討している。また、これとは別に、変位の再現性に関する SMAC-B₂ 型強震計の加振実験を行い、変位計により直接測定した振動台変位と強震加速度記録を数値化し、これを 2 回数値積分して求めた変位との比較から、数値積分に用いるバンドパスフィルターの実用上の遮断振動数を提案した。

なお、本解析に用いた強震計は、建設省土木研究所旧千葉支所構内において現在までに約 12 年間通常の強震観測に供してきたものである。

2. 加速度の再現性に関する加振実験 [8]

本検討に用いた加振実験およびその結果については参考文献 [8] に報告済みであるので、ここでは以下の説明に必要な事項のみを簡単に示すことにする。

加振実験では、振動台上に SMAC-B₂ 型強震計を設置（このほかに SMAC-Q 型強震計も実験されているが、ここでは取り扱わない）し、正弦波および地震波により水平 1 方向に加振した。強震計の応答加速度は、以下の 2 種類の方法により記録、数値化した。

i) 記録ペンを通さず、振子の運動を直接非接触式

* 正会員 工博 建設省土木研究所地震防災部振動研究室主任研究員

** 正会員 建設省関東地方建設局東京国道工事事務所

*** 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室

表一1 加速度の再現性検討加振実験の一覧

実験番号	入力地震動記録						加振実験における最大加速度 ¹⁾ (gal)	卓越振動数 ²⁾	実験記号
	発生年月日	地震名	M	震央距離(km)	記録地点	記録時最大加速度(gal)			
1	1973. 6.17	根室半島沖地震	7.4	305	静内橋近傍地盤上NS成分	45	50	0.6, <u>1.4</u> , 2.9	E-1
2	1974. 5. 9	伊豆半島沖地震	6.9	140	川崎市浮島公園地盤上NS成分	12	50	<u>0.6</u> , 1.6, 2.6	E-2
3	1978. 1.14	伊豆大島近海地震	7.0	90	千葉県富津岬地盤上NS成分	51	200	1.2, <u>1.8</u> , 2.1 2.4, 3.0, 4.5	E-3
4	1978. 1.14	伊豆大島近海地震	7.0	230	名古屋港金城埠頭地盤上NS成分	22	100	<u>1.1</u>	E-4
5							150		E-5
6	1970. 9.30	多摩川下流地震	4.5	8	川崎市浮島公園地盤上NS成分	22	200	<u>5.2</u>	E-6
7							300		E-7

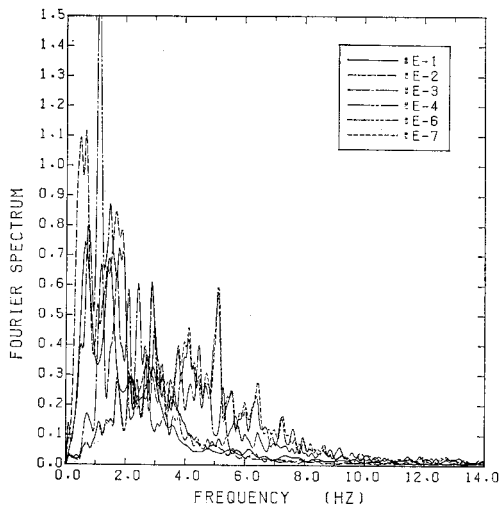
注:1) 最大加速度は実験時における目標値であり、実際に加振台に生じた加速度値ではない。

2) 加振台に生じた加速度応答のパワースペクトルから求めた卓越振動数であり、下横線のついた振動数は最も卓越した振動数を表わしている。

センサーにより電気信号として取り出し、12ビットのAD変換器により1/100秒の等時間間隔で数値化した場合(以下、AD変換記録とよぶ)。

ii) 強震計本来の記録方式によりスタイラスペーパー上に記録し、これをディジタイザーにより土木研究所の標準数値化システム¹³⁾で数値化した場合(以下、数値化記録とよぶ)。

なお、振動台の加速度は変位帰還型サーボ加速度計(固有振動数約400Hz)により計測し、1/100秒間隔にAD変換した(以下、これを基準加速度とよぶ)。また、加振実験には表一1に示す合計7種類の模擬地震記録を用いたが、データ処理の関係で、以下の解析には実験E-5を除く6種類の加振実験結果を用いることとした。数値化記録をもととした模擬地震記録のフーリエスペクトル(ただし、最大加速度で正規化)は図一1に示すとおりである。



図一1 加速度の再現性検討加振実験に用いた強震記録のフーリエスペクトル(最大加速度で正規化)

3. 強震計特性の補正とその効果

(1) 計器補正の方法

加速度記録に対する計器補正法には各種の提案があるが、ここでは振動数領域で適当なバンドパスフィルターをかける方法⁵⁾を用いた。すなわち、いま、強震計による加速度記録を $a(t)$ とすれば、このフーリエ変換 $F(f)$ は

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{-2\pi if t} dt \dots\dots\dots(1)$$

と求められる。これに強震計の特性によるフィルター $F_c(f)$ を見込むと、補正した加速度 $\bar{a}(t)$ は次式となる。

$$\bar{a}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{F}(f)e^{2\pi if t} df \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

$$\bar{F}(f) = F(f) \cdot F_c(f) \dots\dots\dots(3)$$

フィルター $F_c(f)$ の振動数特性は次のようにした⁵⁾。

$$F_c(f) = \begin{cases} 0 & 0 \leq f < f_{l1} \\ \frac{f - f_{l1}}{f_{l1} - f_{l2}} \cdot \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & f_{l1} \leq f \leq f_{l2} \\ \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & f_{l2} \leq f \leq f_{u1} \\ \frac{f_{u1} - f}{f_{u1} - f_{u2}} \cdot \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & f_{u1} \leq f \leq f_{u2} \\ 0 & f > f_{u2} \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 f_{l1} および f_{u1} はそれぞれ低振動数側および高振動数側の遮断振動数であり、 f_{l2} および f_{u2} はそれぞれ f_{l1} および f_{u1} に対応する補正フィルター倍率が0となる振動数である。また、振幅および位相の補正関数 $R(f)$ および $\phi(f)$ は、 B_2 型強震計に用いられ

ている空気減衰器の空気がばねとして作用する効果を考慮して次式とした^{3),4)}。

$$R(f) = \sqrt{\frac{1 + (U/N)^2}{(1-U^2)^2 + \{(1-U^2)U/N + 2hU\}^2}}$$

$$\phi(f) = \tan^{-1} \left[\frac{2hU}{(1-U^2)\{1 + (U/N)^2\} + 2hU \cdot U/N} \right]$$

.....(5)

ここで、 $U \equiv f/f_n$ (f_n は振子の固有振動数で、7.14 Hz とした)、 $N \equiv f_a/f_n$ (f_a は減衰器の抵抗と空気ばねのインピーダンスが等しくなる振動数で 10.8 Hz とした) である。空気減衰器の空気のばね作用を無視した場合は、式(5)において N を無限大ととればよい。これは通常の 1 自由度系の応答振幅および位相を与えるが、図-2 に示す B₂ 型強震計の調和加振実験結果⁸⁾ との比較では、空気減衰器のばね作用を考慮した方が実験値との対応がよいことがわかる。

(2) 計器補正フィルターと補正精度

2. に示した 6 種類の加振実験に対する AD 変換記録および数値化記録の両者を式(2)により補正した。式(4)に定義した高振動数側の遮断振動数は表-2 に示すように変化させた。低振動数側の遮断振動数は加速度波形に及ぼす影響が小さいため、 $f_{lu} = 1/11$ Hz, $f_{lu} = 1/10$ Hz に固定したが、これについては後述する。

補正の精度は基準加速度と強震計記録の両者の絶対加速度応答スペクトル S_A [gal] (減衰定数 5%) の比により次式の応答スペクトル比 $R_{SA}^{R_{SA}}$ で表わすこととした。

$$R_{SA}^{R_{SA}} \equiv S_A^{R_{SA}} / S_A \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $S_A^{R_{SA}}$: 強震計記録 (AD 変換記録もしくは数値化記録) から求めた S_A スペクトル

S_A : 基準加速度から求めた S_A スペクトル
式(6)による応答スペクトル比 $R_{SA}^{R_{SA}}$ を表-1 に示した 6 種類の加振実験ごとに求め、この平均値と標準偏差の幅を示すと図-3,4 のようになる。また、標準偏差/平均値 (変動係数) を図-5 に示す。これらの結果をまと

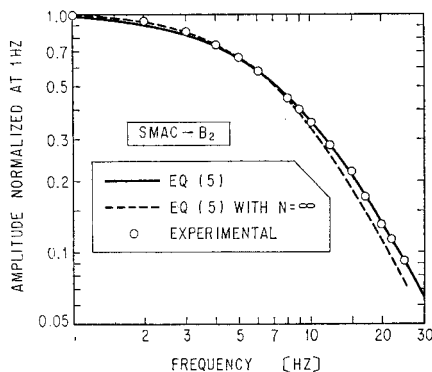


図-2 B₂ 型強震計の振幅特性

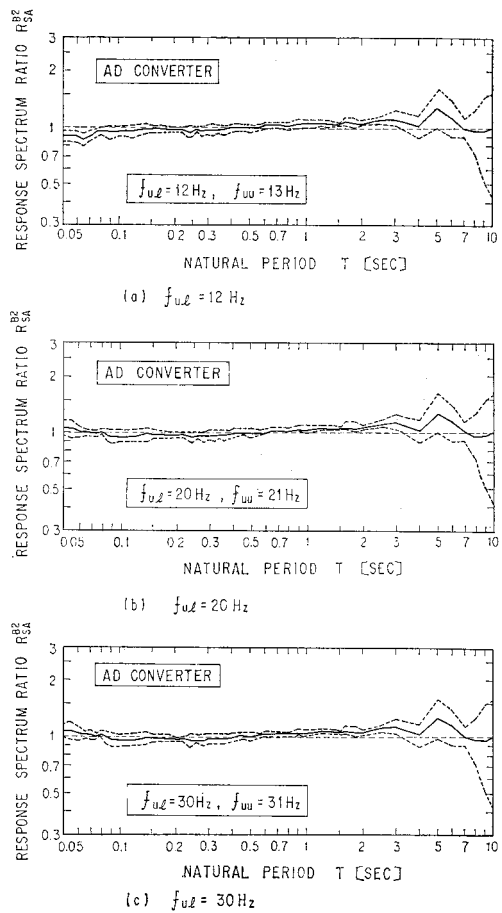


図-3 $R_{SA}^{R_{SA}}$ の平均および標準偏差 (AD 変換記録)

表-2 加速度に対する計器補正に用いた遮断振動数 (Hz)

フィルター No.	f_{ll}	f_{lu}	f_{ul}	f_{uu}
FA-1	1/11	1/10	10	11
FA-2	1/11	1/10	12	13
FA-3	1/11	1/10	15	16
FA-4	1/11	1/10	20	21
FA-5	1/11	1/10	30	31

めると以下のようなになる。

a) AD 変換記録に対する計器補正の効果

f_{ul} を 30 Hz および 20 Hz とした場合には、応答スペクトル比 $R_{SA}^{R_{SA}}$ は固有周期 0.05~3 秒程度の範囲でほぼ 1.0 となり、式(2)の計器補正を加えることにより、基準加速度をよく再現することを示している。ただし、 f_{ul} を 12 Hz とした場合には、当然のことながら短期領域での $R_{SA}^{R_{SA}}$ の平均値は 1.0 を下回っている。

また、固有周期が 3 秒程度以上では、 $R_{SA}^{R_{SA}}$ の平均値が 1.0 からややはずれ、また、標準偏差が大きい。したがって、この領域では実験ごとに $R_{SA}^{R_{SA}}$ がばらつくことを示している。この原因としては、3 秒以上の周期成分

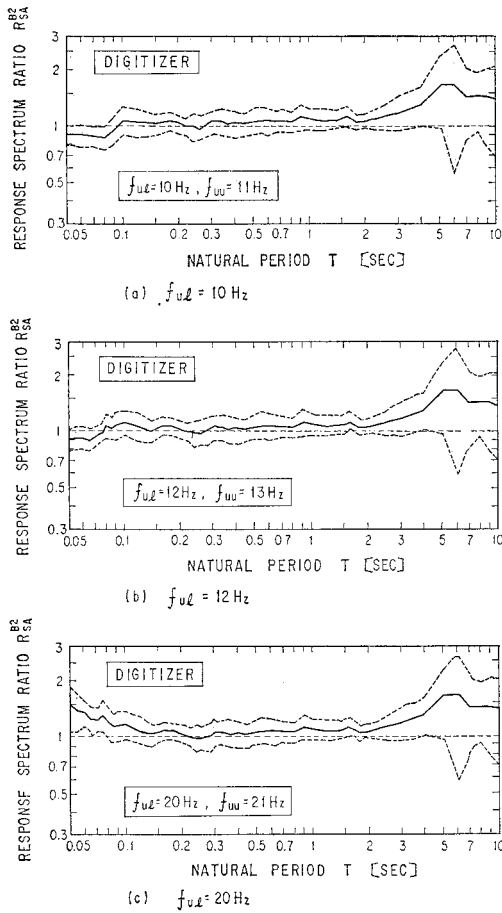


図-4 $R_{SA}^{B_2}$ の平均および標準偏差 (数値化記録)

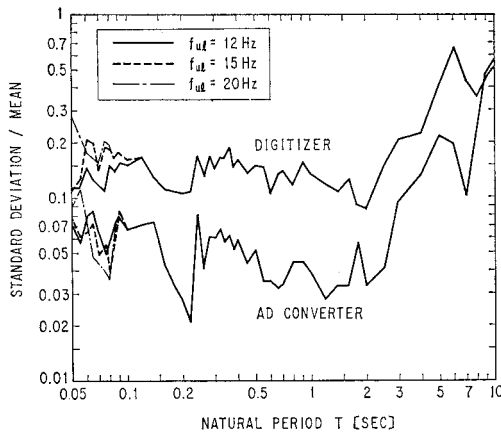


図-5 $R_{SA}^{B_2}$ の変動係数

に対する振子の追従性, AD 変換の SN 等が考えられる。しかし、いずれが卓越しているのかは今後さらに検討することが必要とされる。

b) 数値化記録に対する計器補正の効果

AD 変換記録の場合と異なり、数値化記録の場合には高い振動数まで補正を加えると短周期領域での $R_{SA}^{B_2}$ が大幅に 1.0 よりも大きくなり、意図どおりの補正効果が得られない。たとえば、 $f_{ul}=20$ Hz とした場合には固有周期 T が約 0.15 秒以下の領域において $R_{SA}^{B_2}$ の平均値が 1.0 以上となり、 $T=0.05$ 秒では 1.5 程度の値となる。また、 $R_{SA}^{B_2}$ の標準偏差も上述した AD 変換記録の場合と比較し、一般に非常に大きい。

このように数値化記録に対する補正が AD 変換記録に対する補正ほどうまくいかない理由としては以下の点が考えられる。すなわち、AD 変換記録と数値化記録の主要な違いは、前者には後者に比較し、i) 記録ペンと記録紙の摩擦に伴う誤差 (ペン圧に支配される)、ii) 記録紙の回転蛇行に伴う誤差、iii) 数値化の誤差、の 3 者が含まれていないことである。このうち、i) は一般に影響が小さく⁹⁾、また、ii) の誤差は、記録紙のドラムの直径が 3 cm 程度であるから、この回転に伴う蛇行は 1 周期約 10 秒 (記録紙上では 1 cm=1 秒となっている) であるはずであり、0.15 秒以下という短周期成分に対する回転蛇行による誤差は小さいと考えられる。このような点から考えると、数値化に伴い発生した短周期の誤差成分が式 (2) による補正を受けた結果大きく増幅され、 S_A スペクトルを過大に評価することになると考えられる。ちなみに、30 Hz に対する式 (5) の振幅補正係数 $1/R(f)$ は 15.6 となる。

f_{ul} は高くとることができるならば、本来高い値を使うことが望ましいが上記の点を考慮すると (図-4 参照)、 $f_{ul} \approx 12$ Hz 程度が限界で、これ以上高い振動数までの補正を加えても補正効果が期待できないことがわかる。

4. 変位の再現性に関する加振実験

次に、 B_2 型強震計記録を数値積分して求めた変位の再現性を検討するために、2. および 3. で検討した加振実験とは別に、変位に重点を置いた加振実験を行った。

実験装置は 2. と同様に振動台と、振動台の加速度および変位の計測システムから構成されており、振動台上に強震計 (前後動が加振方向となるようにした) をセットして加振実験を行った。振動台は、強震計の変位精度の検討用に製作したものであり、動電型の小型振動台とデジタルおよびアナログ制御器、デジタル計測器から構成されている。両振幅 400 mm までの加振ができること、および、10 秒まで比較的滑らかな加振ができること等が特徴である。

実験に際して計測した項目は、振動台の加速度 (基準加速度) および振動台の変位 (基準変位) である。基準

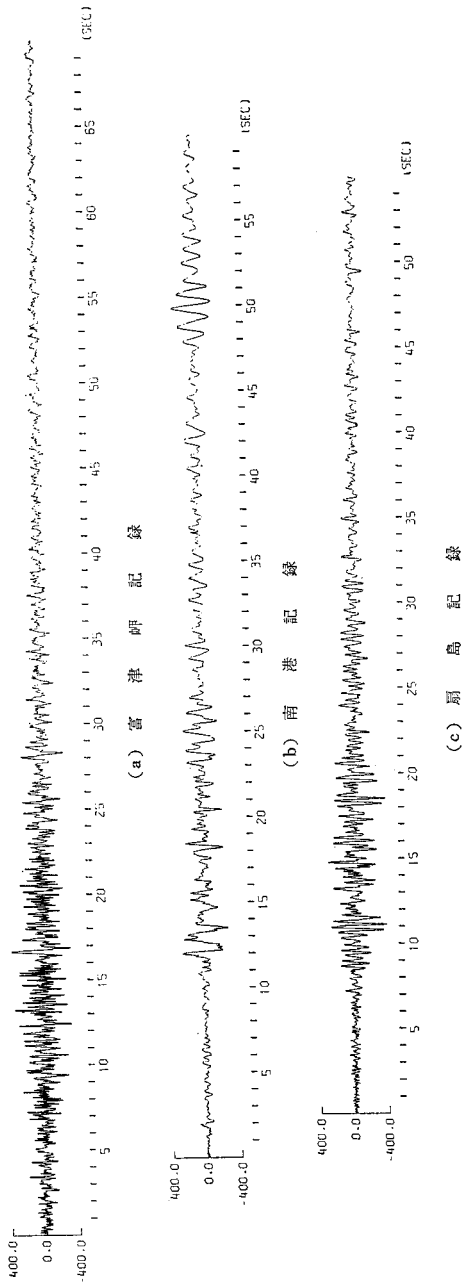


図-6 変位の再現性検討加振実験に用いた加速度記録

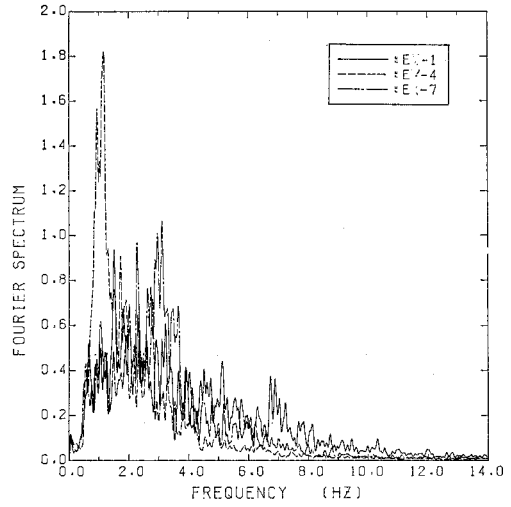


図-7 変位の再現性検討加振実験に用いた強震記録のフーリエスペクトル (最大加速度で正規化)

イラストペーパー上に記録ペンで書かせ、これを土木研究所の標準数値化システム¹³⁾により読み取った。

加振実験には、表-3 に示すように振動数特性の異なる 3 種類の実測強震記録を用いた。加速度波形は 図-6 に示すとおりである。これらはいずれも 0.3~25 Hz の範囲ではおおむねフラットな特性を有する電磁式強震計によって得られた記録である。図-7 に示すフーリエスペクトルからわかるように、入力地震動としては南港記録のように 1 Hz 付近で卓越するものから、富津岬記録のように 7 Hz 付近で卓越するものまで、各種の振動数領域をカバーするように選定している。次に、これら 3 種類の記録のそれぞれに、長周期領域の特性を変化させる目的で低振動数側の遮断振動数 f_u^N を、i) 1/5 Hz, ii) 1/2 Hz, iii) 1 Hz, の 3 種類に変化させたバンドパスフィルターをかけ、合計 9 種類の模擬地震動(実験 E-1~E-9, 表-4 参照)を作成し、これを検定台へのデジタル制御入力とした。ここで、高振動数側の遮断振動数 f_u^N を 20 Hz と固定したが、これは変位精度の検定にはこの程度までとれば実用上問題がないこと、および、前述の数値化の精度の検討からこれ以上の振動数成分を考慮しても無意味と考えたためである。

加振実験に際しては、強震状態を想定し、276 gal~411 gal の範囲の大加速度で加振した。ただし、B₂ 型強震計の記録範囲(±500 gal)を超える強震計の記録ペン等を傷つける可能性があるため、これ以上の加速度で加振することはできなかった。

加速度および基準変位の計測にはそれぞれ 2. で用いたサーボ加速度計および差動トランス型変位計(0~10 Hz の間でフラットな特性を有している)を用いた。また、強震計の記録は B₂ 型強震計本来の記録方式に従いスタ

表-3 変位の再現性検討加振実験に用いた原強震記録

発生日月	地震名	M	震央距離 (km)	記録地点	記録時最大加速度 (gal)
1972. 2.29	八丈島沖地震	7.1	300	富津岬地盤上(NS成分)	23
1973.11.25	和歌山県中部の地震	5.6	100	南港橋周辺地盤上(NS成分)	13
1974. 8. 4	栃木-茨城県境の地震	5.8	90	扇島地盤上(EW成分)	8

表-4 変位の再現性検討用加振実験の一覧

実験番号	強震記録	バンドパスフィルター (秒)	加振実験時の最大応答値		
			基準加速度 (gal)	基準変位 (cm)	強震計加速度 (gal) ³⁾
E-1	富津岬記録	0.05~5	363.0	4.2	328.6
E-2		0.05~2	387.5	4.2	352.9
E-3		0.05~1	411.4	2.3	356.3
E-4	南港記録	0.05~5	275.6	6.5	273.7
E-5		0.05~2	304.3	6.1	244.4
E-6		0.05~1	360.5	5.8	348.9
E-7	扇島記録	0.05~5	375.3	4.4	292.8
E-8		0.05~2	406.8	3.4	313.9
E-9		0.05~1	398.5	1.9	337.0

注: 1) 以下の実験結果の表示には、この記号を用いる。
 2) 表-3 の強震記録に、このバンドパスフィルターをかけた記録を検定台への入力として、加振実験を行った。
 3) スタイラスペーパー上の記録を数値化し、中心軸補正等を実施した後の最大加速度。

表-5 加速度記録の積分に用いたバンドパスフィルター

バンドパスフィルター				
	$1/f_{1l}$ (秒)	$1/f_{1u}$ (秒)	f_{u1} (Hz)	f_{uu} (Hz)
F-1	11	10	12	13
F-2	10	9	12	13
F-3	9	8	12	13
F-4	8	7	12	13
F-5	7	6	12	13
F-6	6	5	12	13
F-7	5	4	12	13
F-8	4	3	12	13
F-9	3	2	12	13
F-10	2	1	12	13
F-11	1	0.5	12	13

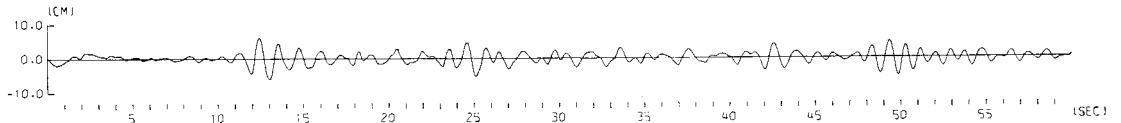
は、3. に示した方式により、振動数領域で積分する方法を用いた。すなわち、いま、強震計による加速度記録を $a(t)$ とすれば、このフーリエ変換 $F(f)$ は式 (1) となり、これに式 (4) に示した強震計の特性によるフィルター $F_c(f)$ を見込むと、変位 $d(t)$ は次のように求められる。

$$d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{F}(f)}{-4\pi^2 f^2} e^{2\pi i f t} df \dots\dots\dots (7)$$

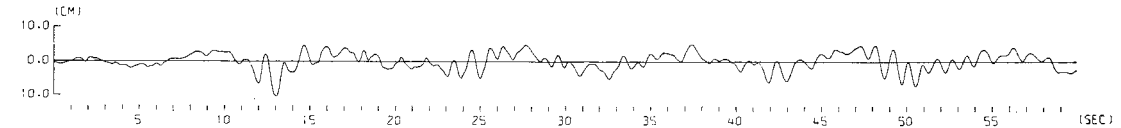
5. 地震動変位の計算とその精度

(1) 地震動変位の計算法

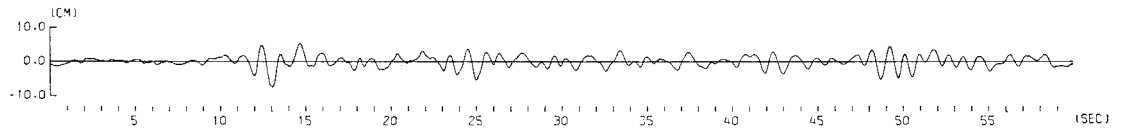
加速度を数値積分して変位を計算するために、ここで



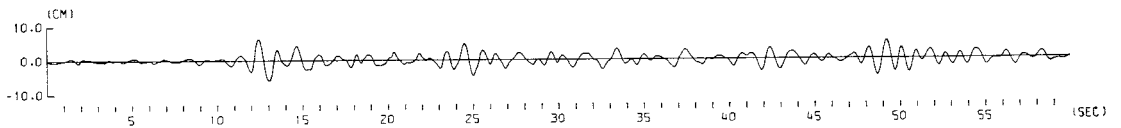
(a) 基準変位



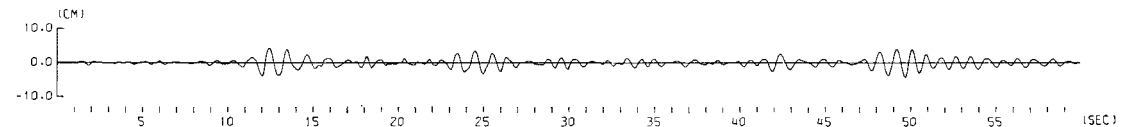
(b) F-1 (1/f_{1u}=10 秒)



(c) F-5 (1/f_{1u}=6 秒)



(d) F-8 (1/f_{1u}=3 秒)



(e) F-9 (1/f_{1u}=2 秒)

図-8 計算変位 $d(t)$ と基準変位 $D(t)$ の比較例 (実験 E-5 の場合)

式(4)において、変位の算出に際しては高振動数側の遮断振動数は支配的な要因ではないことから、3.に示した数値化精度を考慮して $f_{ul}=12\text{ Hz}$, $f_{uu}=13\text{ Hz}$ に固定し、表-5 に示すように低振動数側の遮断振動数を $f_{lu}=1/10, 1/9, \dots, 1/1, 2/1$, また、 $f_{ll}=1/11, 1/10, \dots, 1/1$ と 11 種類に変化させた。

このようにして計算した変位を基準変位と比較した一例を図-8 に示す。なお、 $d(t)$ は強震計で得られた加速度記録によっているため基準変位 $D(t)$ とは時間軸が同一ではない。したがって、ここでは、まず数値化した加速度記録 $a(t)$ と基準加速度 $A(t)$ との波形上の特徴から両者の時間軸の関連を求め、 $a(t)$ と $d(t)$ の時間軸は同一であり、 $A(t)$ と $D(t)$ の時間軸は同一であることから、 $d(t)$ と $D(t)$ の時間軸の対応を求めた。

(2) 変位の精度

計算変位 $d(t)$ の精度を基準変位 $D(t)$ と比較して検討するために、ここでは次の3種のパラメーターを定義した。

$$\sigma \equiv 1/T_d \int_0^{T_d} |d(t)^2 - D(t)^2| dt \dots\dots\dots (8)$$

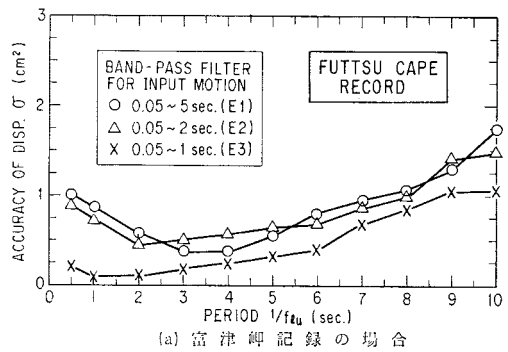
$$\mu \equiv \int_0^{T_d} d(t)^2 dt / \int_0^{T_d} D(t)^2 dt \dots\dots\dots (9)$$

$$\xi \equiv d_{\max}/D_{\max} \dots\dots\dots (10)$$

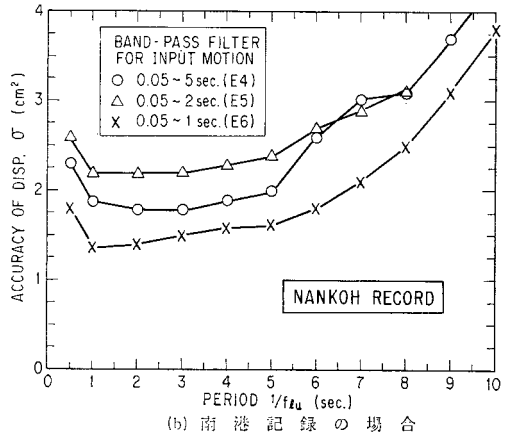
ここで、 d_{\max} および D_{\max} は、それぞれ、 $d(t)$ および $D(t)$ の最大値を表わしており、また T_d は、 $d(t)$, $D(t)$ の継続時間である。表-4 に示した富津岬、南港、扇島の各記録をもととした合計9種類の加振実験結果に対して式(7)により変位を計算し、式(8)~(10)に定義した σ , μ , ξ を求めるとそれぞれ図-9, 10, 11 のようになる。これより、変位の精度を検討すると以下のようなる。

a) σ による精度の検討

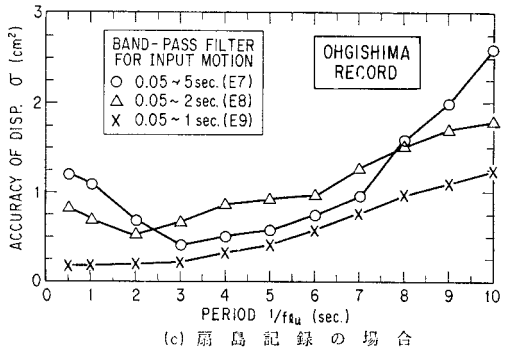
図-9 によれば数値積分時の遮断周期 $1/f_{lu}$ がおおむね 1~5 秒程度の範囲では σ は全体として小さく、 $1/f_{lu}$ が1秒程度以下もしくは5秒程度以上となると、増加する傾向が認められる。この結果を 4. に示した入力地震作成時に考慮したバンドパスフィルターの低振動数側の遮断振動数 f_{lu}^N の値と対応させて検討すると以下のようなになる。すなわち、 $1/f_{lu}^N=1$ 秒とした場合に着目すると、富津岬、南港、扇島の各記録の場合とも σ は $1/f_{lu}$ が 1~2 秒程度の間で小さく、これ以後徐々に増大する。 σ が最小値をとるのは、表-6 に示すように3記録の場合とも $1/f_{lu}=1.0$ の場合である。これは振動台への入力自身が1秒で遮断されているわけであるから、 $1/f_{lu}$ を1秒以下とした場合には、1秒から $1/f_{lu}$ 間の周期成分を評価できないために結果として、



(a) 富津岬記録の場合



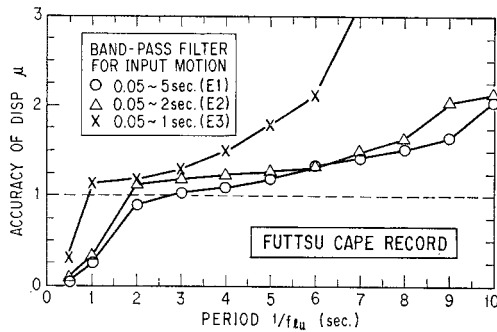
(b) 南港記録の場合



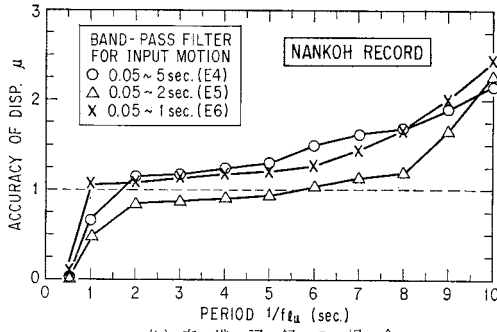
(c) 扇島記録の場合

図-9 σ による変位精度の検討

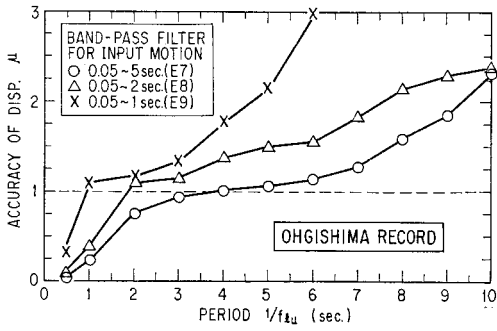
$d(t)$ が $D(t)$ より小さくなる解釈できる。一方、振動台への入力自身が1秒で遮断されているため、 $1/f_{lu}$ を1秒よりも大きくとっても、 $d(t)$ は本来 $1/f_{lu}=1$ 秒とした場合の値と変わらないはずであるが、実際には、数値化時の読取り誤差により加速度記録には長周期の誤差が混入し、これが数値積分により増幅されるため $d(t)$ は $D(t)$ よりも大きくなる考えられる。以上のような理由により $1/f_{lu}^N=1$ 秒とした場合には、数値積分時の遮断周期 $1/f_{lu}$ もこれと同じ1秒とした場合に、 σ で表わした変位再現の精度が最も高くなると考えられる。同様なことは、 $1/f_{lu}^N=2$ 秒とした場合にも成り立っており、この場合にも、 σ は $1/f_{lu}=2$ 秒とした場合に最



(a) 富津岬記録の場合



(b) 南港記録の場合



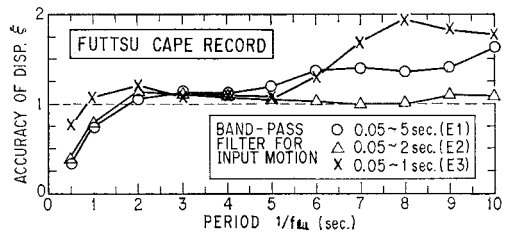
(c) 扇島記録の場合

図-10 μ による変位精度の検討

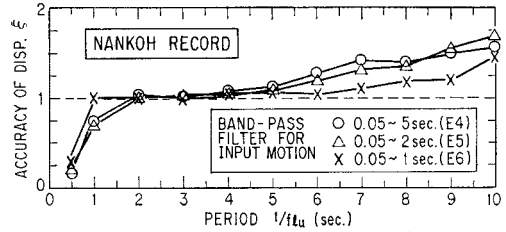
表-6 数値積分時の遮断周期 $1/f_{iu}$ を変化した場合の最も精度のよい σ, μ, ξ の値

実験 ¹⁾ 番号	強震記録	バンドパス フィルター ²⁾ (秒)	最も小さい σ の値 (そのときの $1/f_{iu}$ (秒))	最も 1.0 に近い μ の値 (その ときの $1/f_{iu}$ (秒))	最も 1.0 に近い ξ の値 (その ときの $1/f_{iu}$ (秒))
E-1	富津岬記録	0.05~5	0.41(4)	1.05(3)	1.05(2)
E-2		0.05~2	0.46(2)	1.14(2)	1.01(8)
E-3		0.05~1	0.10(1)	1.13(1)	1.08(1)
E-4	南港記録	0.05~5	1.77(3)	1.15(2)	1.00(3)
E-5		0.05~2	2.16(2)	0.96(5)	1.02(2)
E-6		0.05~1	1.40(1)	1.09(1)	1.01(1)
E-7	扇島記録	0.05~5	0.42(3)	1.02(4)	1.01(4)
E-8		0.05~2	0.64(2)	1.12(2)	1.03(6)
E-9		0.05~1	0.20(1)	1.10(1)	1.15(1)

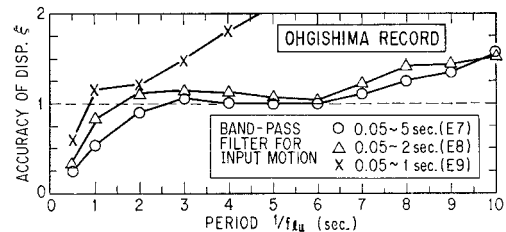
注: 1), 2) 表-4 の注 1), 2) 参照.



(a) 富津岬記録の場合



(b) 南港記録の場合



(c) 扇島記録の場合

図-11 ξ による変位精度の検討

も小さくなり、 $1/f_{iu}$ を 2 秒以下もしくは 2 秒以上とした場合にはこれよりも徐々に大きくなるのがわかる。

これに対して、 $1/f_{iu} = 5$ 秒とした場合には、 σ が最小となるのは $1/f_{iu} = 5$ 秒の場合でなく、富津岬記録では 4 秒、南港記録および扇島記録では 3 秒の場合である。これは $1/f_{iu}$ を 5 秒以下とした場合に、 $1/f_{iu} \sim 5$ 秒間の周期成分を考慮していないことにより計算変位 $d(t)$ が過小評価される分よりも、加速度記録に含まれる長周期成分の誤差が 2 回積分の過程で増幅される方が卓越するためと考えられる。以上の点から、数値化精度を考慮すると、 $1/f_{iu}$ は 3~4 秒が実用上の限界と考えられる。

b) μ による精度の検討

図-10 によれば、 μ による精度は上述した σ の場合とおおむね一致している。すなわち、 μ が最も 1.0 に近くなる数値積分時の遮断周期 $1/f_{iu}$ は表-6 に示したとおりである。 $1/f_{iu}$ を 1 秒および 2 秒とした場合には、実験 E-5 を除く 3 種の入力地震動のいずれの場合にも、 $1/f_{iu}$ をそれぞれ 1 秒および 2 秒とした場合に μ が最も 1.0 に近く、変位の再現性がよいことを示している。一方、 $1/f_{iu}$ を 5 秒とした場合に μ が最も 1.0 に近くなるのは、 $1/f_{iu}$ が 5 秒の場合ではなく、富津岬、

南港、扇島の各記録に対して、それぞれ、3秒、2秒、4秒である。このような点も、上述のσによる精度検討の結果と一致している。1/f^N=5秒の場合を基準とすれば、1/f_{lu}が3秒付近でμが最も1.0に近く、また、1/f_{lu}の値による変化も少ない。

c) εによる精度の検討

実験 E-9 を除けば、1/f_{lu}が2~5秒の範囲では、εは1を中心として±0.2程度以内に収まっている。εが1に最も近くなる1/f_{lu}の値は、1/f^N=1秒の場合には3地震記録の場合とも1.0であるが、1/f^Nが2および5秒の場合には、2~8秒の範囲で多少ばらばらしている。これは、変位が最大となる時間に無関係にεが最大変位 d_{max} および D_{max} から求められているため、誤差を含んだ計算変位がたまたま真の変位を近似する場合があるためと考えられる。

6. 数値化精度とバンドパスフィルターの特性

数値化精度は記録に含まれる振動数成分と密接な関係がある。すなわち、加速度記録を複数回読み取り、この応答スペクトル S_A を計算した場合の変動係数 λ_R と最大加速度 A_{max} で除した記録のフーリエ係数 F の間には次の関係がある¹³⁾。

$$F/A_{max} = 1.45 \times 10^{-2} \times \lambda_R^{-0.61} \dots\dots\dots(11)$$

今回の解析に用いた記録のフーリエ係数は図-1および7に示すとおりである。前章までの検討では、加速度の再現性から求めた高振動数側の遮断振動数は f_{ul} ≃ 12 Hz、変位および加速度の再現性から求めた低振動数側の遮断振動数は f_{lu} ≃ 1/3 Hz となるが、これに対応する F/A_{max} はおおよそ 0.03~0.05 程度となる。いま、これから式(11)により λ_R を求めると 0.3~0.15 程度となる。したがって、複数回読み取りによる S_A の変動係数が 0.15~0.3 程度に抑えられる範囲が、加速度および変位の再現性を保証する1つの目安と考えられる。

7. 結 論

SMAC-B₂ 型強震計記録の短周期成分に対する計器補正の効果および加速度記録の2回数値積分から求めた変位の精度について強震計の加振実験結果をもとに検討した。本検討により得られた前提と結論は以下のとおりである。

(1) 模擬地震動に対する SMAC-B₂ 型強震計の加速度記録を、i) 強震計の通常の記録方式に従い、スタイラスペーパー上にアナログ波形で描き、これを土木研究所の標準数値化システムで数値化(数値化記録)、ii)

振子の運動を電氣的に計測し、これを AD 変換器により 1/100 秒間隔で数値化(AD 変換記録)、の2種類の方法で数値化した。AD 変換記録の場合には高振動数側の遮断振動数 f_{ul} を 30 Hz と高くとり式(2)による計器補正を施すことにより真の(振動台の)加速度(基準加速度)を 0.05~3 秒程度の周期範囲(式(6)による応答スペクトル比により検討した)で再現することができる。しかしながら、数値化記録の場合には f_{ul} を高くとも数値化に伴う短周期の誤差が増幅され基準加速度の再現性は必ずしも向上しない。今回の検討では f_{ul} ≃ 12 Hz が実用上の限界と考えられる。

(2) 上記(1)において、AD 変換記録、数値化記録のいずれも基準加速度に対する3秒程度以上の周期成分の再現性が低下している。この原因としては、強震計の振子の長周期振動に対する追従性、AD 変換を含めた実験記録の処理システム、数値化精度等が挙げられるが、何が支配的な要因かは今後さらに検討する必要がある。

(3) 模擬地震動に対する SMAC-B₂ 型強震計の数値化記録を式(7)により2回数値積分し、これを真の(振動台の)変位(基準変位)と比較した。式(8)~(10)に定義した3種類の精度のパラメーターによれば、低振動数側の遮断振動数 f_{lu} を 1/3 Hz 程度とした場合に計算変位は基準変位を全体としてよく再現する。f_{lu} をこれ以下にとっても数値化に伴う長周期成分が数値積分の過程で増幅されるため、基準変位の再現性は必ずしも向上されない。

(4) 数値化の精度は記録に含まれる振動数成分と関係があるが、上述した f_{ul} ≃ 12 Hz、f_{lu} ≃ 1/3 Hz の遮断振動数は、式(11)に示す同一記録を複数回数値化した場合の S_A スペクトルの変動係数 λ_R が 0.15~0.3 程度に相当している。

(5) 以上を総合すると、数値化精度を考慮して SMAC-B₂ 型強震計の計器補正を施し、また、変位の計算をする場合には、式(4)のバンドパスフィルターにおいて f_{ul} ≃ 12 Hz、f_{lu} ≃ 1/3 Hz 程度とするのが実用上有効と考えられる。ただし、これは今回の検討に用いた一般的な強震記録の場合であり、特に短周期や長周期に富む波形に対しては上記(4)に示した数値化精度の検討結果から定めることが必要とされる。

参 考 文 献

- 1) 高橋龍太郎：SMAC 型強震計，地震第2輯，第6巻，1953。
- 2) 強震観測事業推進連絡会議：全国強震計設置状況一覧，国立防災科学技術センター，昭和56年。
- 3) 萩原尊礼：振動測定，宝文館，昭和26年。
- 4) 後藤健一：SMAC 型強震計の短周期特性，地震学会講演集，1979。
- 5) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太・今西直人：ディジタルフィルタによる SMAC-B₂ 型加速度記録の補正について，

土木学会論文報告集，第 277 号，昭和 53 年。

- 6) 井合 進・倉田栄一・土田 肇：強震記録の数字化と精度，港湾技術研究所資料，No. 286，運輸省港湾技術研究所，1978.
- 7) 栗林栄一・土岐憲三・若林 進：SMAC 型強震計による地震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.
- 8) 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，No. 309，1981.
- 9) 久保慶三郎・佐藤暢彦：地震観測記録から変位波に変換する方法，第 4 回日本地震工学シンポジウム，1975.
- 10) Trifunac, M.D.: Low Frequency Digitization Errors and A New Method for Zero Baseline Correction of Strong-Motion Accelerograms, Report No. EERL 70-7, California Institute of Technology, 1970.9.
- 11) Trifunac, M.D. and D.E. Hudson: Laboratory Evaluations and Instrument Corrections of Strong-Motion Accelerographs, Report No. EERL 70-4, California Institute of Technology, 1970.8.
- 12) Trifunac, M.D., F.E. Udwardia and A.G. Brady: High Frequency Errors and Instrument Corrections of Strong-Motion Accelerograms, Report No. EERL 71-5, California Institute of Technology, 1971.7.
- 13) 川島一彦・高木義和・相沢 興：ディジタイザによる SMAC 型強震計記録の数値化精度，土木学会論文報告集，No. 324，1982.
- 14) Brady, A.G. and D.E. Hudson: Standard Data Processing of Strong-Motion Accelerograms, Proc. 5 WCEE, 1974.
- 15) Berg, G.V. and G.W. Housner: Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 51, No. 2, April 1961.
- 16) 川島一彦・高木義和・相沢 興：SMAC 型強震計記録の短周期成分の補正，土木学会関東支部年次学術講演会，1980.
- 17) 川島一彦・相沢 興・高橋和之：読取精度を考慮した SMAC-B₂ 型強震計記録の計器補正方法とその効果，土木学会関東支部年次学術講演会，1982.

(1981.12.8・受付)