

所 長



177

I S S N 0386-5878

土 研 資 料 第1505号

土 木 研 究 所 資 料

SMAC型強震計の短周期成分特性に関する実験的研究

昭和54年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所

地震防災部・振動研究室

ま え が き

強震記録は、近年その数が豊富になり、地震応答解析における入力地震動として、また、設計地震力を定めるための諸研究に広く各所で利用されるようになってきており、それに伴って記録の精度に対する関心が次第に深まりつつある。本報告は、現在までに多数の強震記録を提供し続けているSMAC-B2型強震計および最近公共土木施設の強震観測に利用される頻度の高まりつつあるSMAC-Q型強震計を対象として、加振台を用いた振動実験によりこれら強震計の特性とそれが観測された記録に及ぼす影響について検討した第1報である。なお、本振動実験に際しては、明石製作所山田進史氏ならびに明豊エンジニアリング古屋和男氏に大変お世話になるとともに、本報告をまとめるに際し明石製作所後藤健一氏から種々貴重な御助言を得たことを記して、厚くお礼申し上げる次第である。

昭和54年3月

建設省土木研究所地震防災部振動研究室

室 長	岩	崎	敏	男
研 究 員	若	林		進
研 究 員	川	島	一	彦
	高	木	義	和

目 次

1. 概 説	1
2. 実験装置および実験手法	2
2-1 実験装置	2
(1) 振動台	2
(2) 計測システム	2
(3) 強震計	2
2-2 実験手法	6
(1) 正弦波加振実験	6
(2) 地震波加振実験	6
3. 実験結果およびその整理	21
3-1 振動数特性および位相特性	21
(1) 振動数特性	21
(2) 位相特性	22
3-2 地震波加振実験	24
4. 加速度応答スペクトルに及ぼす影響の検討	38
5. 結 論	54
参考文献	56
付属資料-1 SMAC型強震計の性能一覧表	57
付属資料-2 デジタルタイザーによるSMAC型強震計記録読取の精度	58
付属資料-3 地震計の原理	68

1. 概 説

建設省の公共土木施設に対する強震観測は昭和33年に開始され、昭和54年3月末現在で土木研究所の所掌するSMAC型強震計は132観測地点で合計262台である。機種別の内訳をみると、SMAC-B2型強震計が124台で全体の約47%を占め、次いで、E2型強震計77台、29%、Q型強震計32台、12%、D型強震計21台、8%と続いており、A型強震計、B型強震計もわずかながら稼働している。SMAC-B2型強震計は500 galまでの地震動を記録することを目標に昭和36年に開発され、 $\pm 40\text{mm}$ の記録が得られるように設計されている。

強震記録を用いた解析は、近年記録数が豊富になったこともあり、各所で実施されるようになってきているが、各種の新しい構造形式の公共土木施設の出現とその規模の大型化に伴ない強震計に要求されていた従来までの諸要求をさらに凌駕した短周期ならびに長周期の振動数領域での性能に対する要求とともに、中程度の周期領域においても記録の精度に関する関心が高まりつつある。強震記録の利用を図るために、精度に関して現在必要とされている検討事項としては以下のものが挙げられる。

- (I) SMAC-B2型強震計は、振子の固有周期が0.14秒(7.14 Hz)であり、短周期領域での感度がよくない。このような短周期領域での感度の低下が、地震応答解析に用いる入力地震動もしくは、応答スペクトルに与える影響の程度とその補正方法
- (II) 加速度記録を数値積分して、速度および変位を算出する場合に、長周期領域の波動成分に混入してくる各種の誤差(記録用紙の回転むら、蛇行、感度低下、記録紙の伸縮、強震計の傾斜、ペンの摩擦、読取誤差等)の影響とそれに対する適切な補正方法

これらの点に関しては、現在までに各所で研究が進められ、いろいろな提案が行なわれているが、これらは主として解析的に取扱ったものが多く、実際の観測に使われている強震計を用いて実験的に検討を加えた研究はきわめて少ない。

ここでは、現在広く一般に使われ、多数の強震記録を提供し続けているSMAC-B2型強震計、および最近になって公共土木施設に設置される頻度の比較的高いSMAC-Q型強震計を対象とし、加振台を用いた強震計の振動実験を行ない、上記の点を検討した。実験の主要な目的は以下の2点である。

- (I) 短周期成分の感度の低下の影響が、加速度記録に及ぼす影響の検討
- (II) 短周期ならびに長周期成分の感度低下の影響を解析的に補正した場合に、解析値との比較照合に利用し得る実験値を提供すること。

2. 実験装置および実験手法

2-1. 実験装置

実験に用いた装置の概要を図2-1および写真2-1に示す。実験装置は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おり、振動台上にSMAC-B2型強震計（以下ではB2型強震計と呼ぶ）およびSMAC-Q型強震計（以下ではQ型強震計と呼ぶ）を同時に設置して後述の実験を行なった。なお、加振の方向は水平1方向であり、水平2方向および鉛直方向の合計3成分を記録できる強震計のうち任意の水平1方向を振動台の加振方向にセットした。実験装置および対象とした強震計の特性は以下の通りである。

(1) 振動台

本実験に用いた振動台は明石製作所所有のものであり動電型の振動台である。主要な仕様は表2-1に示す通りである。

表2-1 振動台の主要仕様

摘 要	諸 元	摘 要	諸 元
名 称	明石動電形加振装置	最 大 速 度	50 cm/sec
形 式	ASE-316L	最 大 加 速 度	1 G
最 大 加 振 力	50 Kg・G	許 容 搭 載 重 量	100 Kg
振 動 数 範 囲	0.2 ~ 50 Hz	振 動 台 寸 法	950×800 (mm)
最 大 振 幅	50mm (両振幅)		

(2) 計測システム

実験に際して計測した項目は、(Ⅰ)振動台の基準加速度、(Ⅱ)振動台の基準変位、(Ⅲ)B2型強震計の加速度記録、(Ⅳ)Q型強震計の加速度記録、の4つである。これらの記録は精度の保持と解析処理を迅速に行なうために、すべて電気信号として取り出し、データレコーダに収録した。

(3) 強震計

本実験に用いたB2およびQ型強震計はともに現在まで土木研究所千葉支所構内において実際の観測にそれぞれ約12年間および約2年間使用してきたものである。B2型およびQ型強震計の公称の仕様はそれぞれ表2-3および表2-4に示す通りである。

振動台の加速度および変位の計測にはそれぞれサーボ加速度計および差動トラス式変位計を用い、サーボ加速度計は振動台中央に、また、変位計は写真 2-2 に示すように振動台とは縁を切った固定壁との間にそれぞれ設置した。変位検出用には共和 DT-50A および明石 LF1526 の 2 種類の変位計を使用した。それぞれの振動数特性曲線は図 2-2 に示す通りであり、いずれも 0~10Hz の間ではおおむねフラットな特性を有している。それ以上の振動数領域では少しずつ特性が落ちてくるが、その度合いは共和 DT-50A の方が著しい。したがって以下の解析では明石 LF1526 の記録を標準として取扱うことにした。

強震計の応答加速度は、これを電気信号として取り出すために、振子の振動を機械的に拡大する SMAC 型強震計の通常の記録方式ではなく、非接触式変位計を B2 型強震計の場合には図 2-3 および写真 2-3 に示すように、Q 型強震計の場合には図 2-4 および写真 2-4 に示すようにそれぞれ振子とは縁を切った固定点に取付け、これと振子に取付けた変位検出用の鉄片との間の微小な空隙の距離の変化（振子の振動振幅）を直接電気信号に変換することによって記録した。またこれとは別に SMAC 型強震計本来の記録方式でスタイラス記録紙およびスクラッチ・フィルム上にも記録を残した。

以上に示した計測器の仕様を表 2-2 に、収録システムを写真 2-5 にそれぞれ示す。

表 2-2 実験に用いた機器

測定機名	メーカー	型 式	用 途
動電型加振装置	明 石	ASE-316L	強震計加振
カセットデータレコーダ	ソニー	FRC-1402D	加振台への入力地震記録収録
データレコーダ	TEAC	R-280	実験結果収録(テープスピードは $3\frac{3}{4}$ インチ/秒)
サーボ加速度計	明 石	V401-BT	加振台の加速度記録(基準加速度記録)測定
テレバイプロメータ (非接触式センサー)	明 石	AVX-92B	B2 型強震計の振子振動測定
テレバイプロメータ (非接触式センサー)	明 石	AVX-92	Q 型強震計の振子振動測定
差動変換器	明 石	LINEAR FORMER 1526	加振台の変位記録(基準変位記録)測定
差動変換器	共 和	LINEAR DISPLACE- MENT DT-50A	加振台の変位記録測定(予備用の測定)
レクチホリー	三 栄	8S51-1-H	加振波形モニター
100Hz クロック	明 石	SMAC-M 刻時	データ解析サンプリング用

表 2-3 B2型強震計の主要諸元（公称値）

	測定成分	水平動 2成分
		上下動 1成分
振 子	固有振動数	各成分共 7.14 Hz (0.14 sec)
	記録感度	記録紙上 40 mm/500 gal
	記録範囲	6 ~ 500 gal
	減 衰	空気減衰機 $h = 1$ (臨界減衰)
	幾何倍率	16 倍
記 録 装 置	記録紙	スタイラスペーパー 幅 280mm、長さ 10m
	送り速度	10 mm/秒
	記録ペン	ダイヤモンド 約 50 μ
起 動 器	記録駆動方式	手捲全舞式、ガバナー調速
	記録時間	約 3 分間
	動作回数	5 回 (連続)
ス タ ー タ	上下動振子	固有振動数 3.3 Hz
	感 度	5 gal
	付帯装置	機械式スタータ 感度 水平 100 gal
刻 時	方 式	天府式 刻時電接時計
	刻時間隔	1 秒
電 源		乾電池 FM-5 (平角 5 号) 4 個 6V $\times$ 2
設 置 方 式		据置形 (M10 アンカーボルト 3 本)
寸 法		幅 540mm $\times$ 長 540mm $\times$ 高 384mm
重 量		約 100 Kg

- (注) 1) 機械番号 70153、1966 年 7 月製造
 2) 建設省土木研究所千葉支所構内において約 12 年間観測に使用してきたものである。
 3) 実験対象成分は前後動 (水平動)

表 2 - 4 Q型強震計の主要諸元（公称値）

	測定成分	水平動 2成分
		上下動 1成分
振 子	固有振動数	各成分共 20Hz (0.05 sec)
	記録感度	記録フィルム上 5mm/1000 gal
	記録範囲	5 ~ 1000 gal
	減 衰	空気減衰機 $h \simeq 0.55$ (振動数特性 0 ~ 20Hz $\pm 10\%$)
	幾何倍率	8 倍
記 録 装 置	記録紙	スクラッチレコードフィルム 幅 35mm、長さ 45m
	送り速度	5 mm/秒
	記録ペン	ダイヤ針 約 10 μ
起 動 器	記録駆動方式	DC マイクロモータ
	記録時間	1 分 30 秒
	動作回数	最大 100 回（連続）
ス タ ー タ	動電形上下動 検 出 器	固有振動数 約 4.5 Hz
		減 衰 $h \simeq 1.5$ (電磁)
		感 度 10 gal (標準) (5 ~ 20 gal)
刻 時	方 式	エレクトロニックスタイマー
	刻時間隔	1/2 秒
電 源 (標 準)		乾電池 UM-1 (単一) 10 個 ± 7.5 V
(特別仕様)		アルカリ蓄電池 (トリクル充電方式) ± 6 V
設 置 方 式		据置形 (M 10 アンカーボルト 1 本)
寸 法		$\varnothing 400$ mm $\times$ 高 320 mm
重 量		約 35 Kg

- (注) 1) 機械番号 150083、1976 年 3 月製造
 2) 建設省土木研究所千葉支所構内において約 2 年間観測に使用してきたものである。
 3) 実験対象成分は前後動（水平動）

2-2. 実験方法

(1) 正弦波加振実験

強震計の振動数特性および位相特性を調べるために行なったものであり、表2-5に示す振動数の組み合わせにより1~25 Hzの定常加振による強震計の応答を測定した。

ここで振動台への入力加速度を100 gal および 300 gal の2種類に変化させて実験を行なったが、これは加速度強度による振動数特性を検討するために行なったものである。

本実験の一例としてペン書レコーダにより収録した応答波形の一例を図2-5（振幅特性）および図2-6（位相特性）に示す。

表 2-5 正弦波加振実験一覧表

シリーズNo	入 力 波	加 振 振 動 数 [Hz]															
I	正 弦 波 100 gal 一定加振	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	17	20	22	25
II	正 弦 波 300 gal 一定加振																
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	17	20	22	25

(2) 地震波加振実験

実測された地震動記録を用いて加振した場合に、強震計の応答がどの程度入力した加速度記録を再現しているのかを調べるために行なったものである。使用したのは表2-6および図2-7に示す5種類の地震動記録である。これらの記録はいずれも0.5~30 Hzの振動数範囲ではフラットな特性を持つ電磁式強震計（地中地震計）により、測定した地表における実測地震動記録である。

図2-8~2-14はこれらの基準地震動記録（振動台上でサーボ型加速度計により測定した加速度記録）のパワースペクトルおよび加速度応答スペクトル S_A 曲線（減衰定数 $h=0.05$ ）を示したものである。これからわかるように、入力地震動記録としては、静内橋の記録のように比較的周期の長い成分が卓越するものから、浮島公園の記録のように短周期成分の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。

表 2 - 6 加振実験に用いた地震動記録

実験 番号	入 力 地 震 動 記 録						加振実験に おける最大 加速度 (gal)	卓越振動数 ²⁾	実験 記号 ³⁾
	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 N S 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 N S 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 N S 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 N S 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 N S 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している。
- 3) 以下の実験結果の表示には、この記号を用いる。

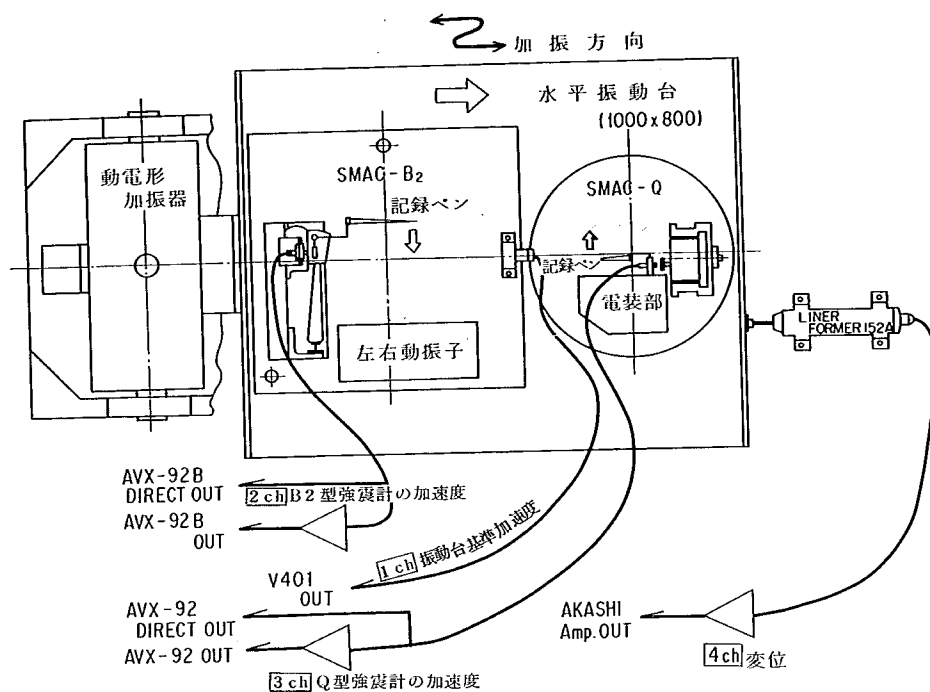


図 2-1 実験装置の概要

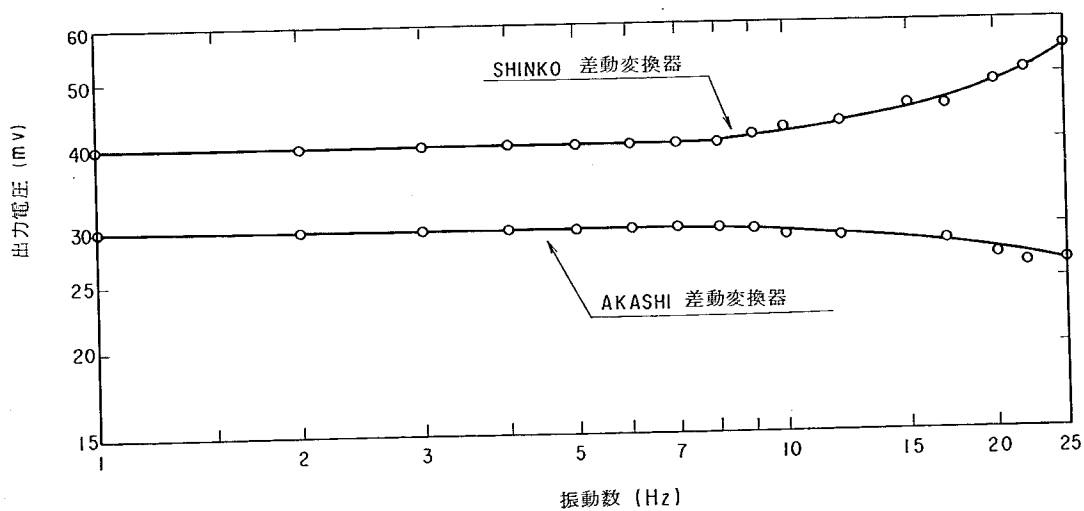


図 2-2 振動台基準変位測定器（差動変換器）の振動数特性

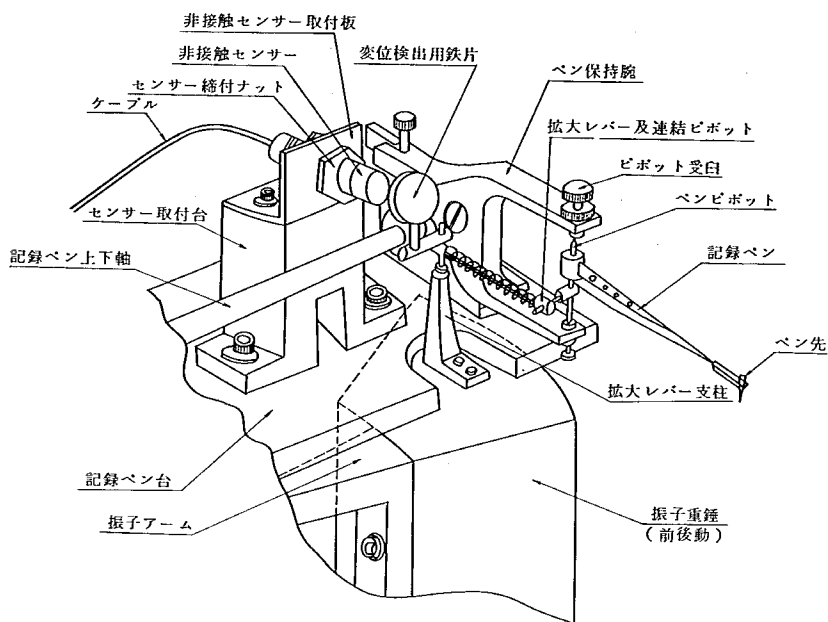


図 2-3 非接触式振動計センサーの取付位置 (B₂ 型強震計の場合)

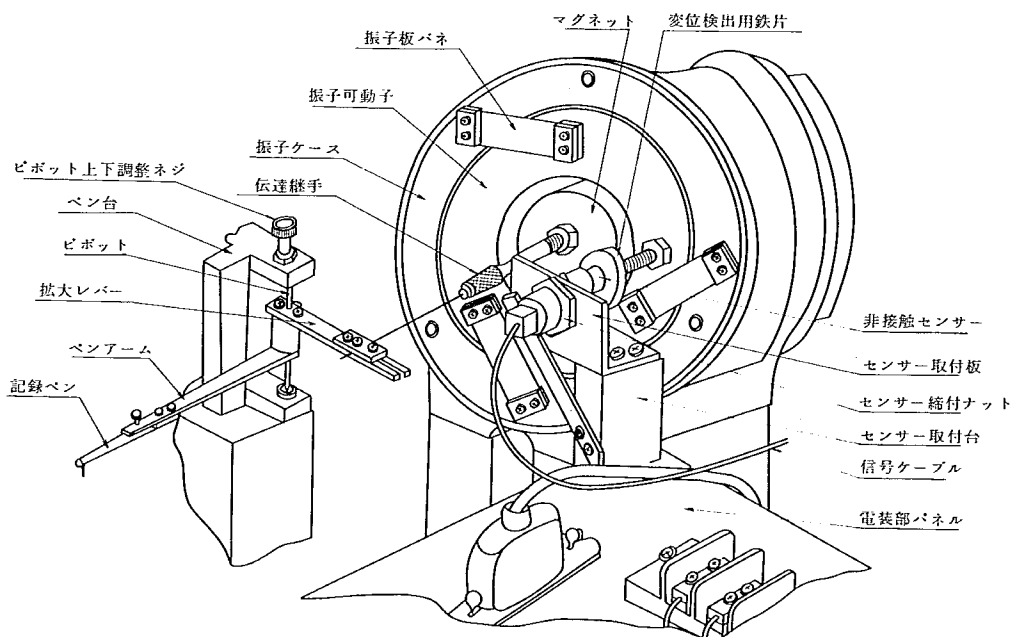


図 2-4 非接触式振動計センサーの取付位置 (Q 型強震計の場合)

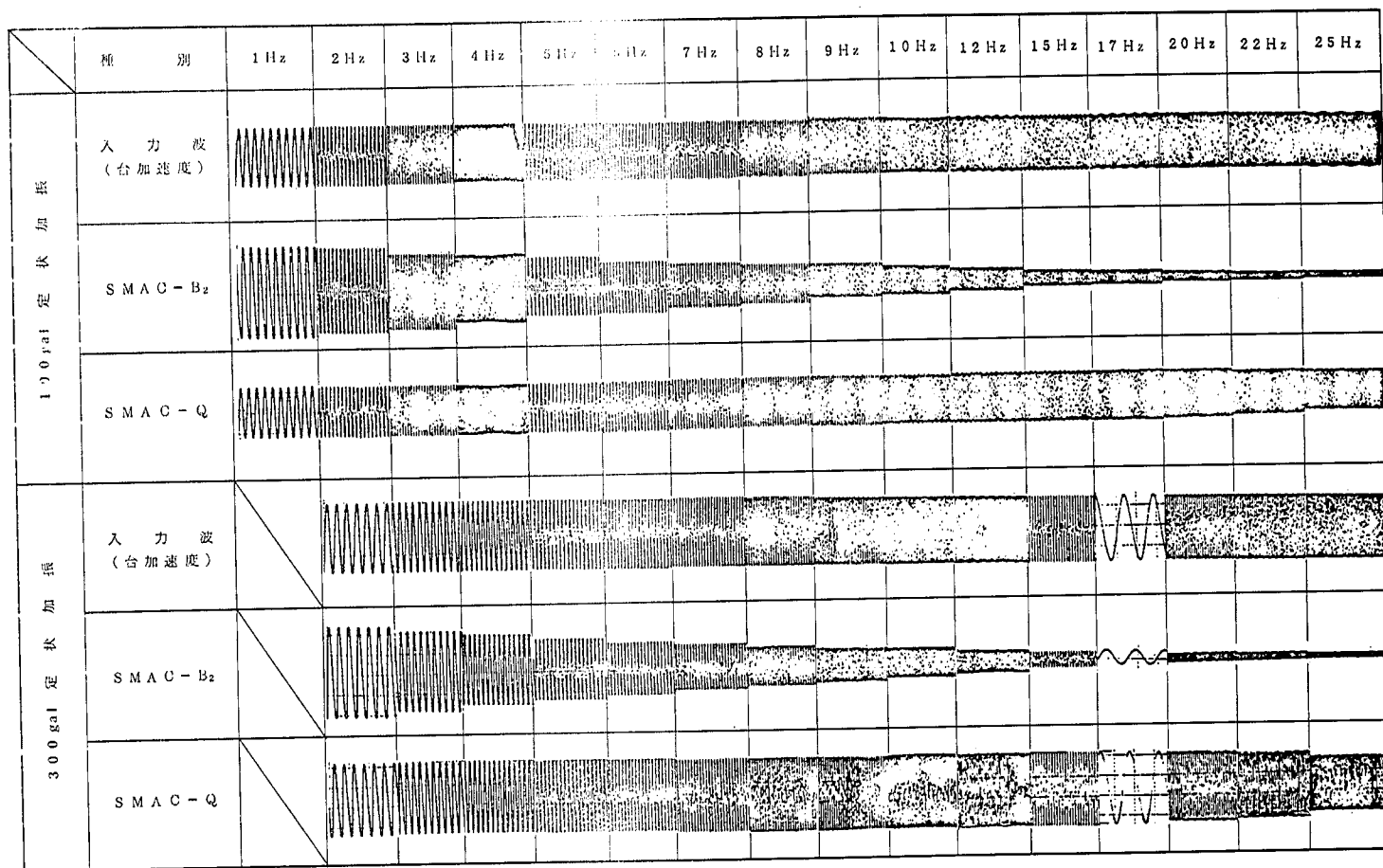


図 2-5 正弦波加振実験による強震計の応答波形（振幅特性）

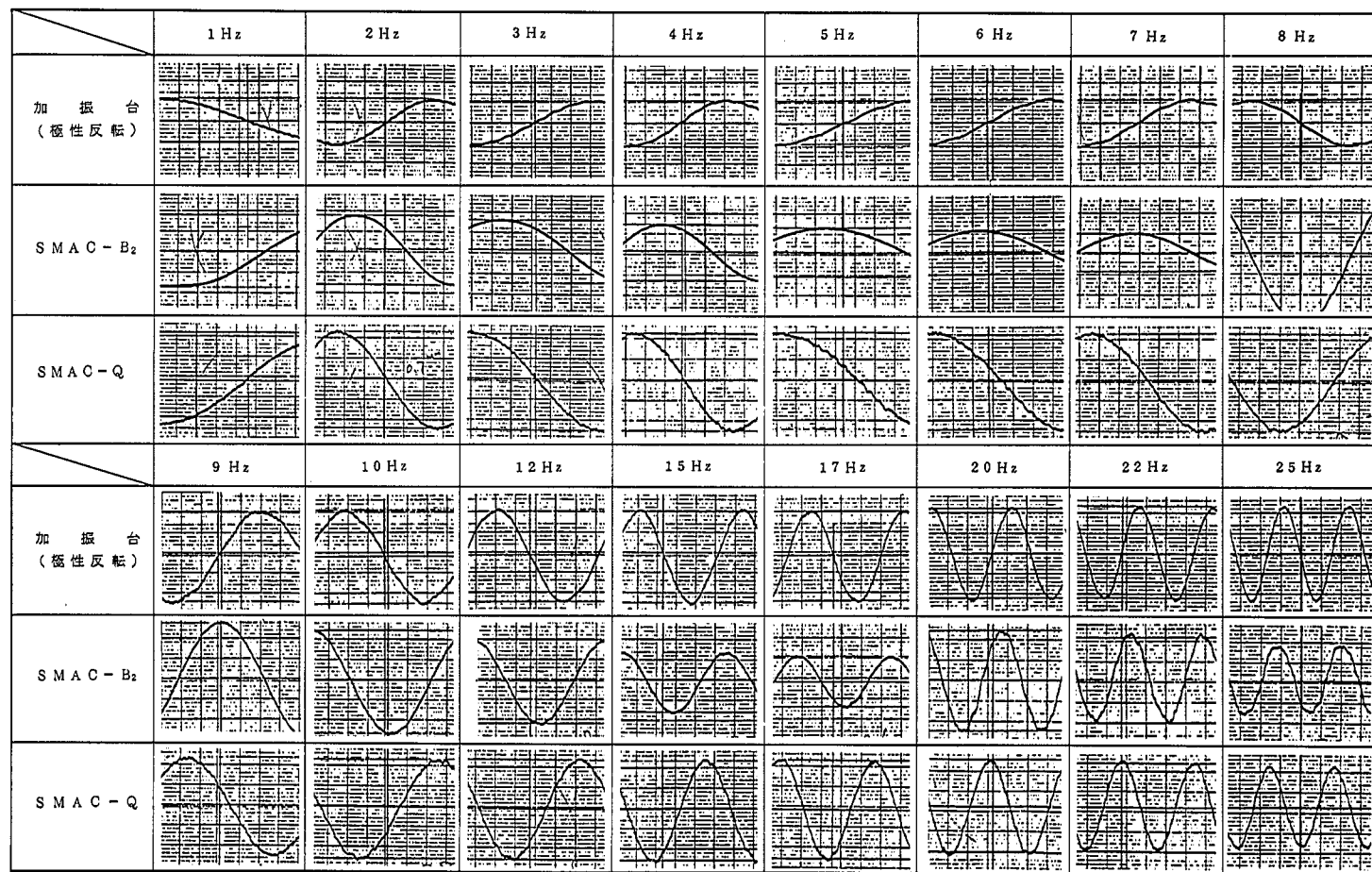


図 2 - 6 正弦波加振実験による強震計の応答波形 (位相特性)

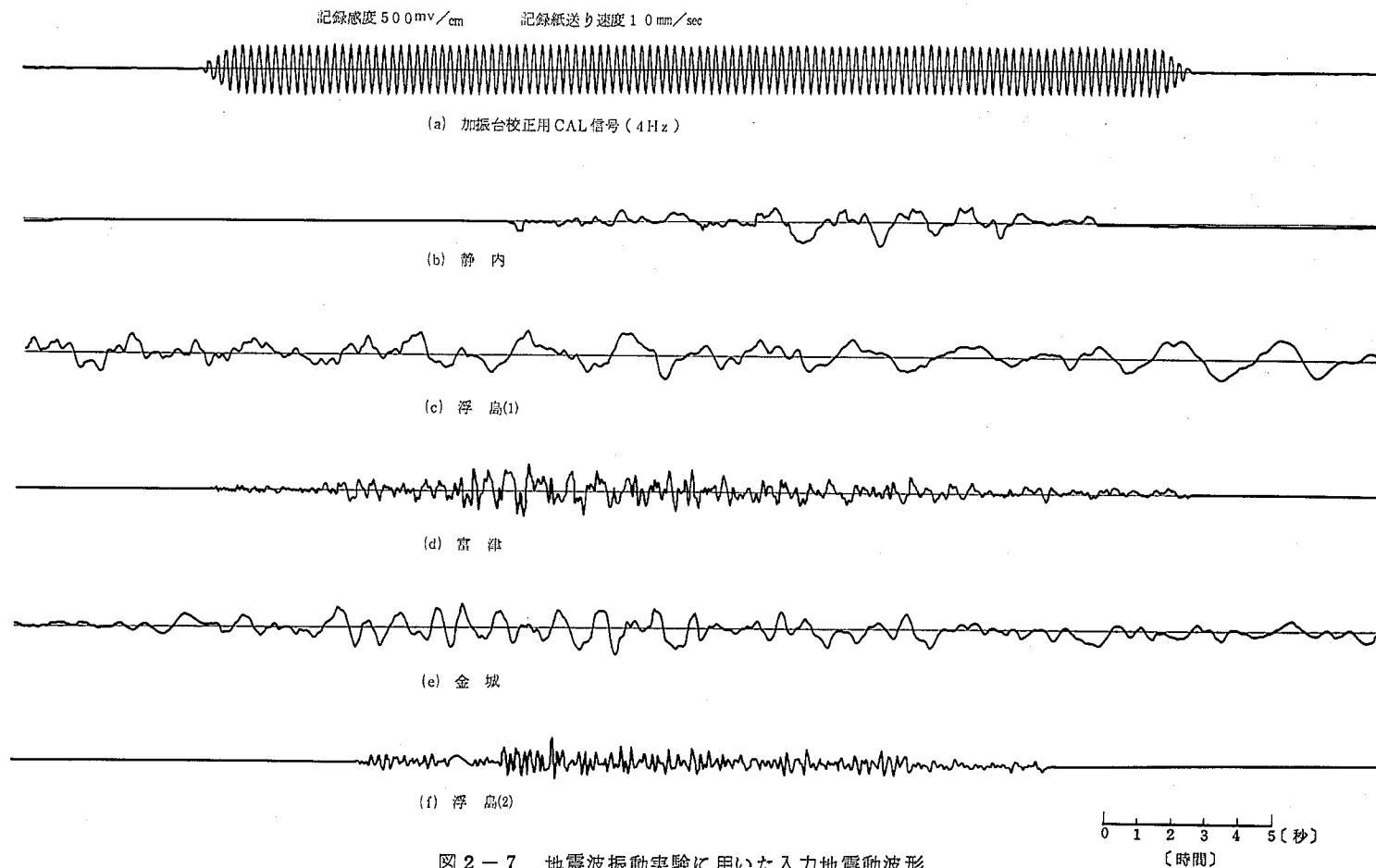
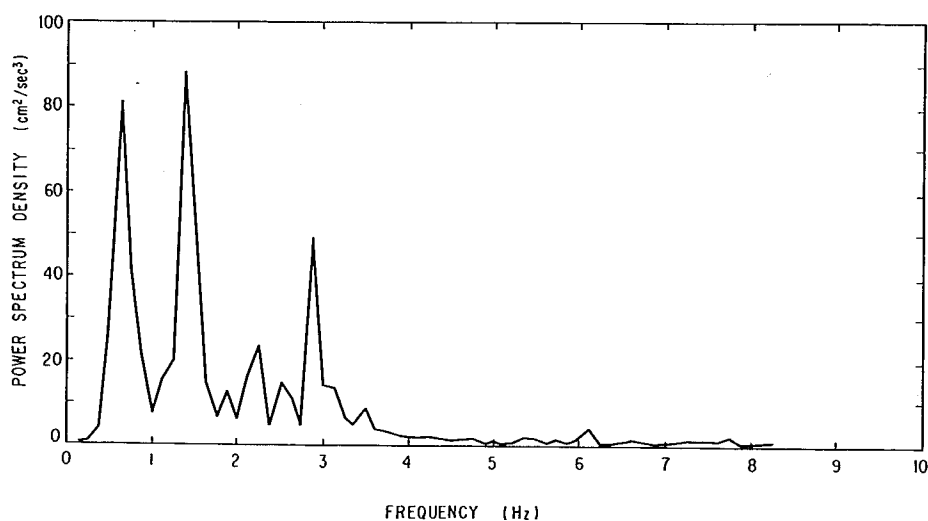
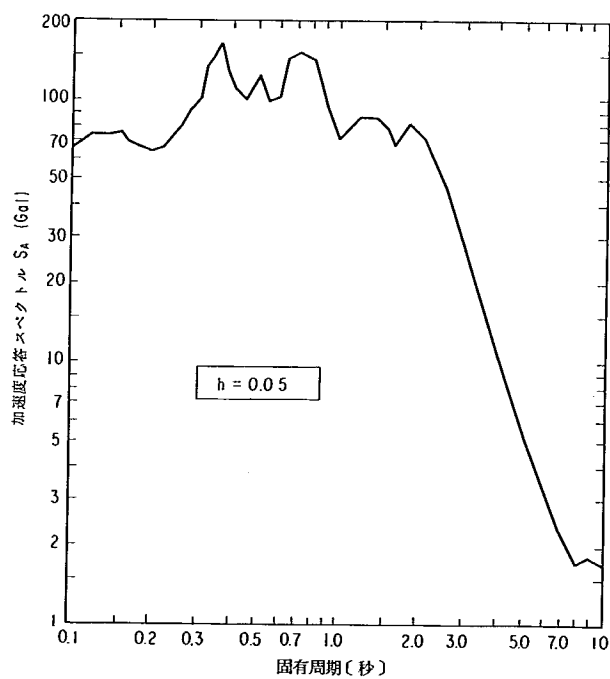


図 2-7 地震波振動実験に用いた入力地震動波形

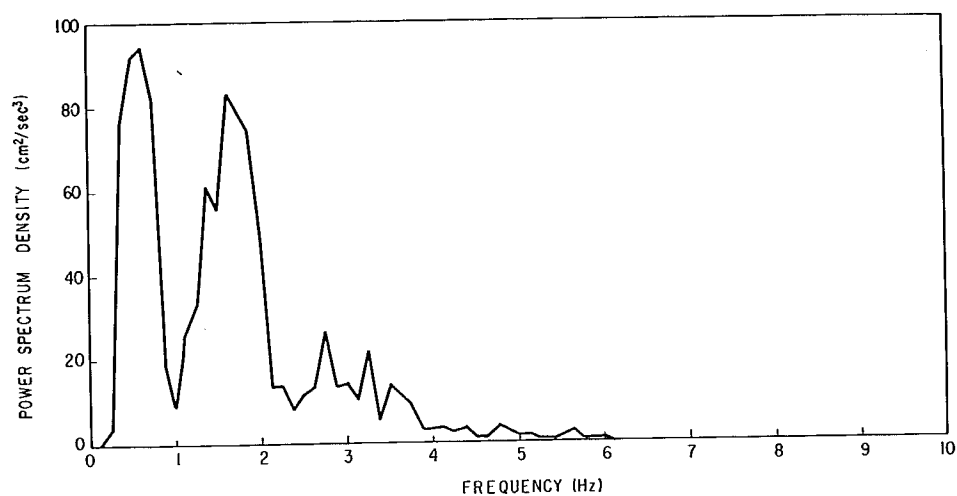


(a) パワースペクトル

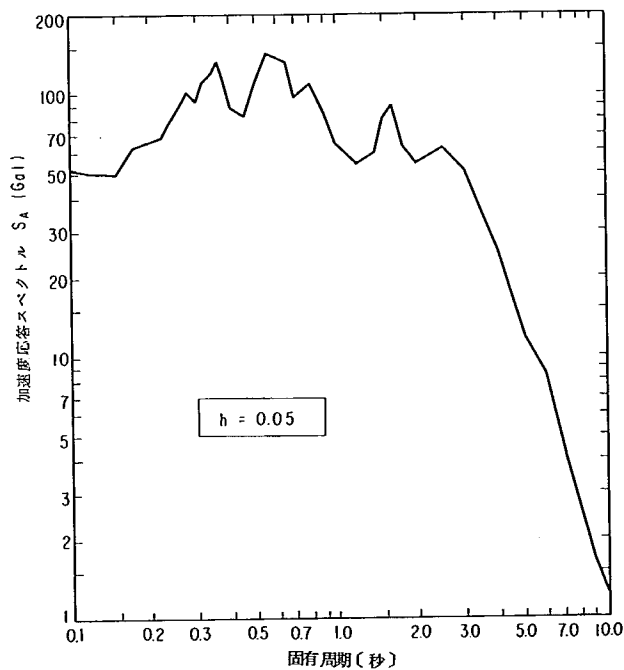


(b) 加速度応答スペクトル

図2-8 実験E-1における加振台基準加速度のパワースペクトルおよび加速度応答スペクトル(根室半島沖地震, 静内, 50 gal)

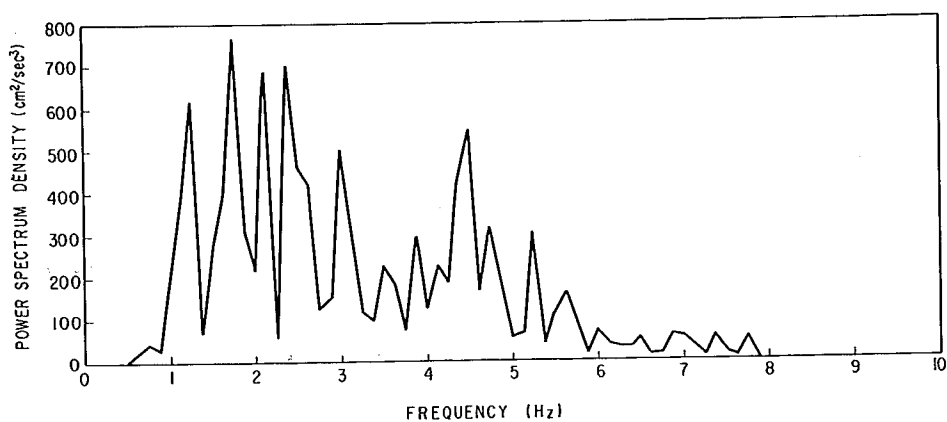


(a) パワースペクトル

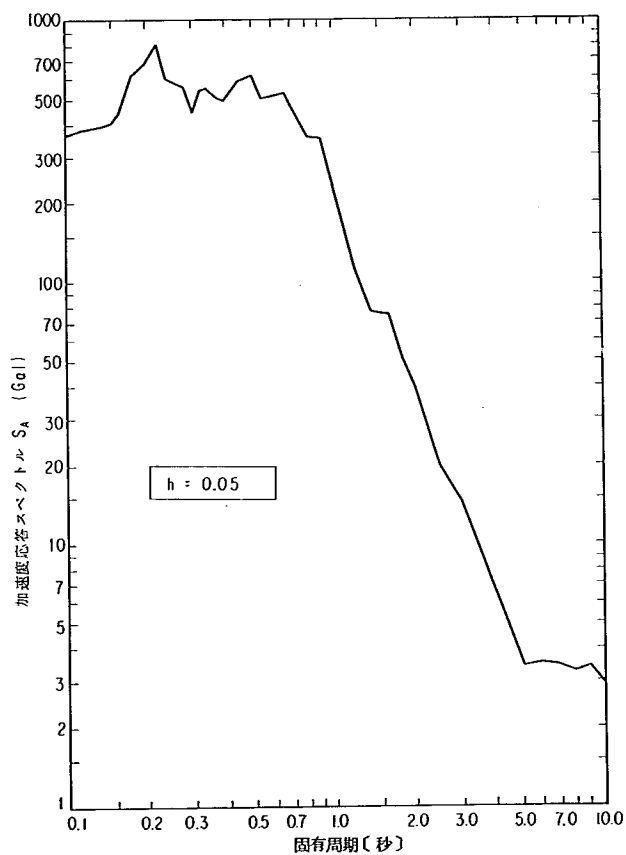


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-9 実験 E-2 における加振台基準加速度のパワースペクトルおよび加速度応答スペクトル (伊豆半島沖地震, 浮島, 50 gal)

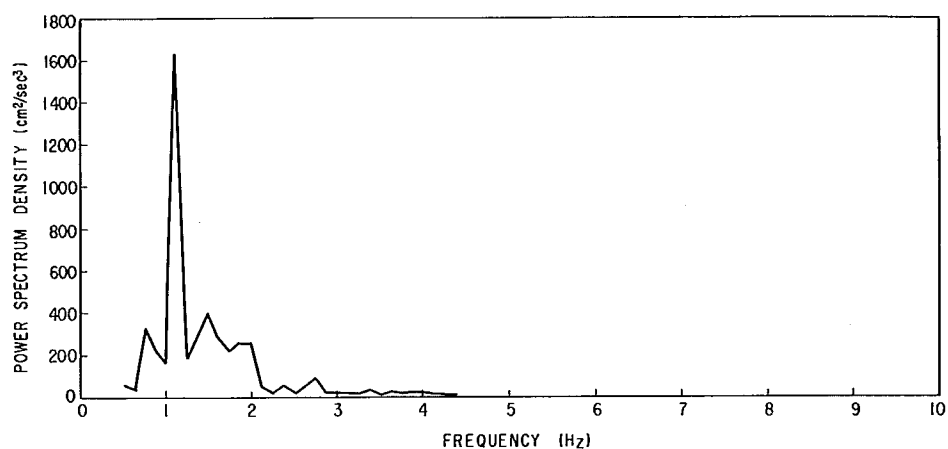


(a) パワースペクトル

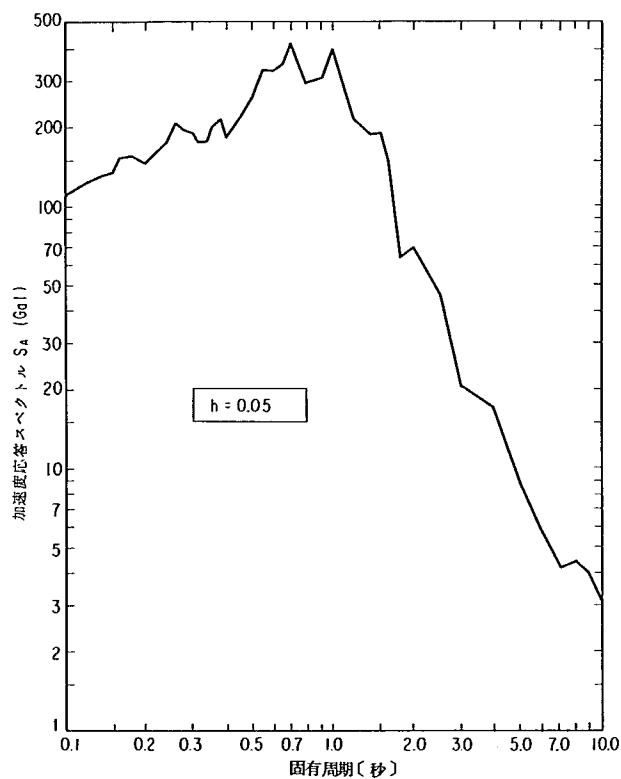


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-10 実験 E-3 における加振台基準加速度のパワースペクトルおよび加速度応答スペクトル (伊豆大島近海地震, 富津, 200 gal)

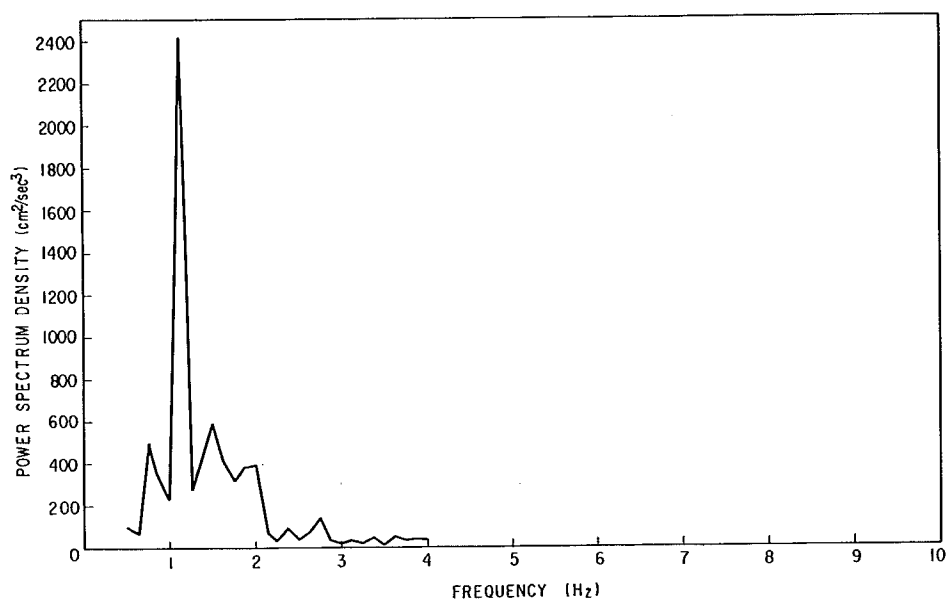


(a) パワースペクトル

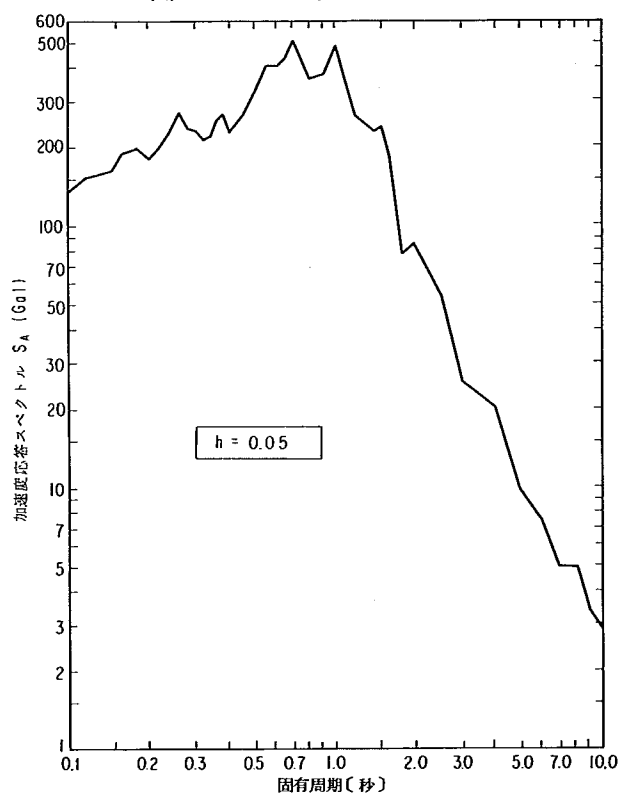


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-11 実験 E-4 における加振台基準加速度のパワースペクトルおよび加速度応答スペクトル (伊豆大島近海地震, 金城, 100 gal)

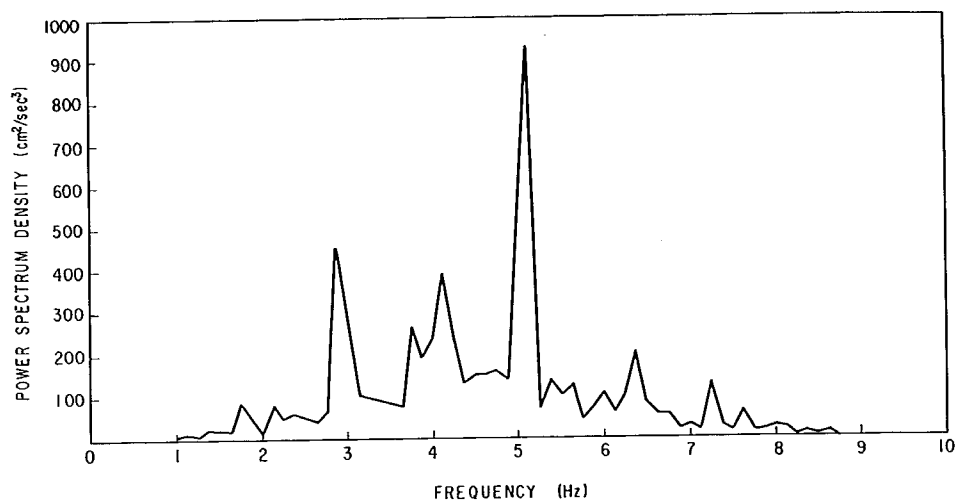


(a) パワースペクトル

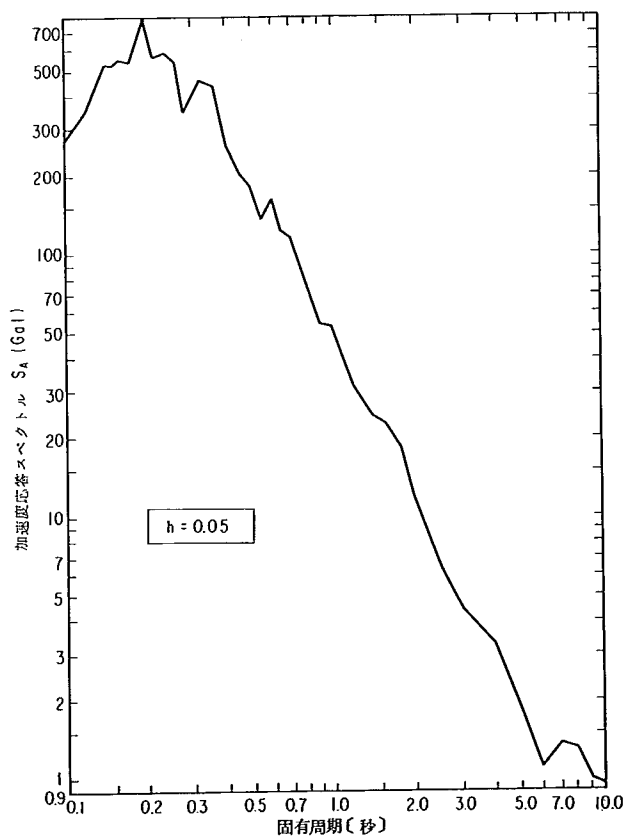


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-1-2 実験 E-5 における加振台基準加速度のパワースペクトルおよび加速度応答スペクトル (伊豆大島近海地震, 金城, 150 gal)

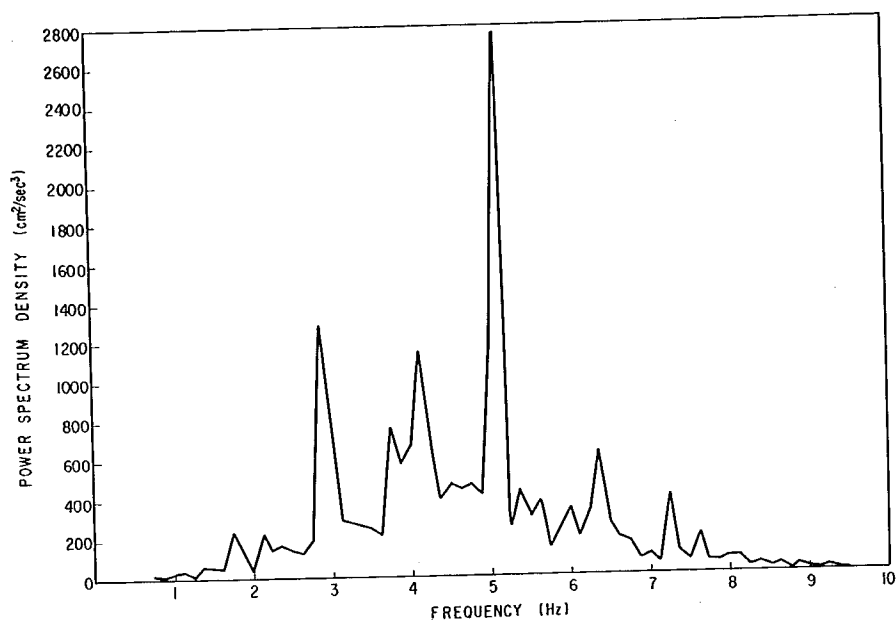


(a) パワースペクトル

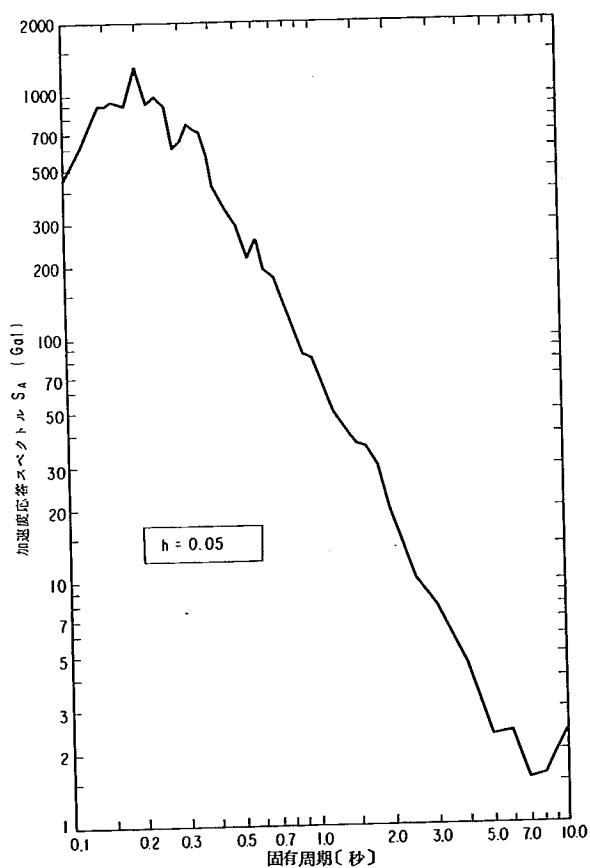


(b) 加速度応答スペクトル

図 2-13 実験 E-6 における加振台基準加速度のパワースペクトルおよび加速度応答スペクトル (多摩川下流地震, 浮島, 200 gal)



(a) パワースペクトル



(b) 加速度応答スペクトル

図 2-14 実験 E-7 における加振台基準加速度のパワースペクトルおよび加速度応答スペクトル (多摩川下流地震, 浮島, 300 gal)

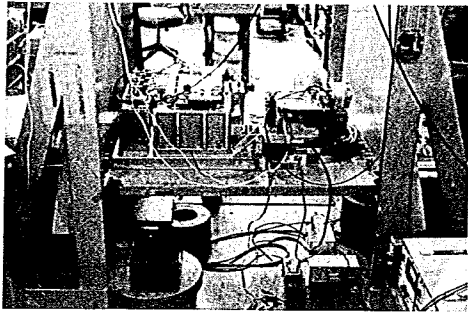


写真 2-1 実験装置の概要

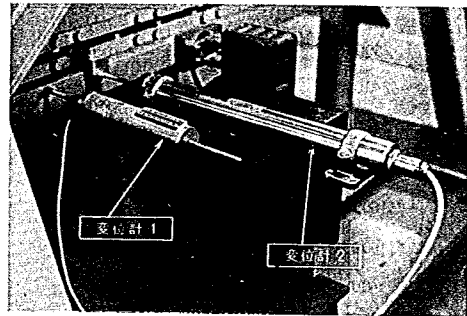


写真 2-2 振動台の変位の測定

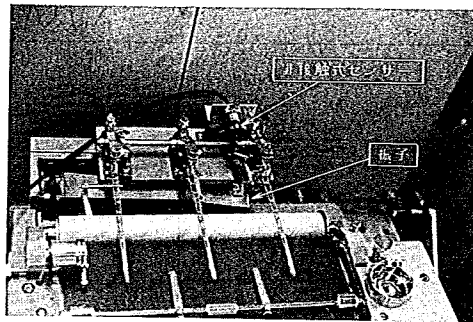


写真 2-3 加速度記録方式 (B2型強震計の場合)

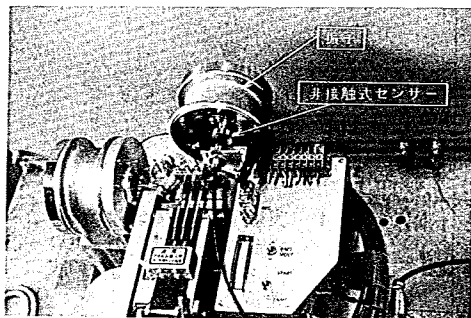


写真 2-4 加速度記録方式
(Q型強震計の場合)

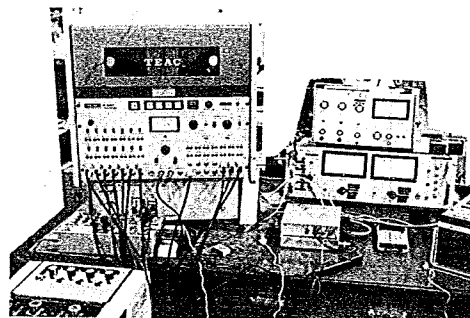


写真 2-5 データ収録システム

3. 実験結果およびその整理

3-1. 振幅特性および位相特性

(1) 振幅特性

定常加振による正弦波加振実験（図2-5参照）から求めたB2型およびQ型強震計の振幅特性をそれぞれ表3-1および表3-2に示す。表中には、100 gal 加振および300 gal 加振時の振幅特性がそれぞれ読取值 $[\mu]$ として示されている。また、これより加振入力振動数1Hzの場合を基準として正規化して求めた振幅特性も同時に示されている。この結果によれば、100 gal 加振の場合と300 gal 加振の場合の振幅特性はほとんど同一の結果となっており、ここで取扱ったB2型およびQ型強震計の振幅特性は100~300 gal の範囲では加速度強度にあまり左右されず、ほぼ一定であると考えてもよいと思われる。したがって、表3-1および表3-2の中には、100 gal 加振の場合と300 gal 加振の場合を平均して求めた振幅特性値を示した。

次に、一自由度系のバネマス系が円振動数 ω (Hz) の定常振動外力を受けた場合の加速度応答倍率は周知のように次式で与えられる（付属資料-3参照）。

$$R(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})^2 + 4h^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \quad \cdots \cdots (3-1)$$

ここで、

$R(\omega)$: 一自由度系の加速度応答倍率

m, k : 一自由度系の質量およびばね定数

ω_0 : 一自由度系の固有円振動数

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

h : 一自由度系の減衰定数

ω : 外力の円振動数

SMAO型強震計では、機械式の振子の応答変位が強震計に作用した加速度に比例するように設計されているから、(3-1)式で表わされる加速度応答倍率が強震計を一自由度系の振動体にモデル化した場合の振幅特性に比例することになる。

B2型強震計の場合には、固有振動数 $f_0 = 7.14\text{Hz}$ 、減衰定数 $h = 1$ （限界減衰）、Q型強震計の場合には、固有振動数 $f_0 = 20\text{Hz}$ 、減衰定数 $h \simeq 0.55$ と設計されているから、これらの設計値をもとに(3-1)式から振幅特性を求めると(1Hzの場合の振幅特性値を1.0として正規化する)、

表 3-1 B 2 型強震計の振幅特性

加振振 動数 (Hz)	100 gal 加振の場合		300 gal 加振の場合		100 gal 加振 と 300 gal 加 振の平均値 (1Hz で正規化) ³⁾	理 論 値 ⁵⁾
	振子振動振幅 (両振幅) (μ) ¹⁾	1Hz で正規化 ²⁾	振子振動振幅 (両振幅) (μ) ¹⁾	1Hz で正規化 ²⁾		
1	1,000	1.000	(3,069) ⁴⁾	1.000	1.000	1.000
2	945	0.945	2,900	0.945	0.945	0.927
3	850	0.850	2,600	0.847	0.849	0.850
4	745	0.745	2,300	0.749	0.747	0.761
5	655	0.655	2,020	0.658	0.657	0.671
6	570	0.570	1,770	0.577	0.574	0.587
7	505	0.505	1,540	0.502	0.504	0.510
8	440	0.440	1,370	0.446	0.443	0.444
9	395	0.395	1,200	0.391	0.393	0.386
10	345	0.345	1,060	0.345	0.345	0.338
12	280	0.280	860	0.280	0.280	0.262
15	200	0.200	630	0.205	0.203	0.185
17	170	0.170	520	0.169	0.170	0.150
20	135	0.135	400	0.130	0.133	0.113
22	115	0.115	350	0.114	0.115	0.0954
25	95	0.095	280	0.091	0.093	0.0755

1) 非接触式センサーで測定した振子の振動振幅 (両振幅) [単位はミクロン]

2) 1Hz で加振した場合の振子の振動振幅で正規化した振幅

3) 2) で求めた正規化した振幅を、100 gal 加振と 300 gal 加振の場合で平均した値

4) 300 gal 加振の場合には 1Hz で加振実験をしていない。そのため、100 gal 加振の場合の 1Hz 加振と 2Hz 加振の振動振幅の比から () 内の数値を推定した。

5) 理論値: (3-1) 式で求めた振幅特性 (1 Hz の値で正規化)

図 3-1 および図 3-2 のようになる。図中には、前述した実測値 (表 3-1) の結果 (100 gal 加振の場合と 300 gal 加振の場合の振幅特性値の平均値) も同時に示されている。この結果によれば、B 2 型強震計および Q 型強震計のいずれの場合にも、実測値は (3-1) 式による理論値と比較的よく一致している。

(2) 位相特性

定常加振による正弦波振動実験から求めた位相特性を図 3-3 に示す。これによれば、B 2 型強震計の場合も Q 型強震計の場合もそれぞれ固有振動数の付近で位相の反転が生じており、全体としての傾向は表われていると思われる。しかしながら位相そのものの値の精度は、それほど精度良く求められていないようである。この理由は、今回の解析ではデータレコーダーに収録した記録をペン書オシログラフに出し、これをもとに位相差を読み取ったため、精度の向上を図ることができなかったためである。

振幅特性の場合と同様に、強震計を一自由度の振幅系に置き直すと、位相は次式で与えられる。

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{2h\omega/\omega_0}{1 - \omega^2/\omega_0^2} \right) \dots\dots\dots (3-2)$$

ここで、記号は(3-1)式で用いたものと同じである。(3-2)式により、B2型強震計およびQ型強震計のそれぞれに対して求めた位相は前述の図3-4に実線で示されている。

表 3-2 Q型強震計の振幅特性

加振振 動数 (Hz)	100 gal 加振の場合		300 gal 加振の場合		100 gal 加振 と300 gal 加 振の平均値 (1Hzで正規化) ³⁾	理 論 値 ⁵⁾
	振子振動振幅 ¹⁾ (両振幅) [μ]	1Hzで正規化 ²⁾	振子振動振幅 ¹⁾ (両振幅) (μ)	1Hzで正規化 ²⁾		
1	60.0	1.00	(180.2) ⁴⁾	1.00	1.00	1.001
2	60.5	1.01	182.0	1.01	1.01	1.004
3	61.0	0.02	183.0	1.02	1.02	1.01
4	61.5	1.03	186.0	1.03	1.03	1.02
5	61.5	1.03	186.0	1.03	1.03	1.02
6	62.0	1.03	186.0	1.03	1.03	1.03
7	62.0	1.03	188.0	1.04	1.04	1.04
8	62.0	1.03	190.0	1.05	1.04	1.05
9	63.5	1.06	190.0	1.05	1.06	1.07
10	63.5	1.06	191.0	1.06	1.06	1.08
12	64.0	1.07	193.0	1.07	1.07	1.09
15	64.0	1.07	196.0	1.09	1.08	1.07
17	63.5	1.06	192.0	1.07	1.07	1.03
20	60.5	1.01	181.0	1.00	1.01	0.91
22	56.0	0.93	170.0	0.94	0.94	0.81
25	50.0	0.83	148.0	0.82	0.83	0.67

- 1) 非接触式センサーで測定した振子の振動振幅(両振幅)〔単位はミクロン〕
- 2) 1Hzで加振した場合の振子の振動振幅で正規化した振幅
- 3) 2) で求めた正規化した振幅を、100 gal 加振と300 gal 加振の場合で平均した値
- 4) 300 gal 加振の場合には1Hzで加振実験をしていない。そのため、100 gal 加振の場合の1Hz加振と2Hz加振の振動振幅の比から()内の数値を推定した。
- 5) 理論値：(3-1)式で求めた振幅特性(1Hzの値で正規化)

3-2. 地震波加振実験結果

データレコーダーに収録した実験結果をA/D変換機により、1/100秒の等時間間隔で数値化し、これをプロッターにより図化した結果を図3-4～図3-10に示す。それぞれ、振動台の変位（基準変位）、振動台の加速度（基準加速度）、B2型強震計の応答加速度およびQ型強震計の応答加速度の4種類の波型を示している。これらの波型を相互に比較すると、B2型強震計による加速度記録は振動台の基準加速度に比較して、全体に波形の山谷がなめらかになっており、明らかに高振動数成分が過小に評価されていることがわかる。

また、それぞれの加振実験（実験E1～E7）ごとに、最大加速度に着目して整理すると表3-3のようになる。Q型強震計によって記録した最大加速度は振動台の基準加速度計による最大加速度の0.99～1.03倍（平均は1.01倍）に収まっているのに対し、B2型強震計による最大加速度は、基準加速度の0.75～0.90倍（平均は0.84倍）になっているのがわかる。

次に、強震計の応答加速度に含まれる振動数成分を調べるために、基準加速度、B2およびQ型強震計の記録のそれぞれのパワースペクトルを示したのが、図3-11～17である。対象とする振動数の範囲は0～10Hzとした。この結果によれば、実験E-2（伊豆半島沖地震による浮島記録（図3-12））の場合を除き、Q型強震計による応答値の卓越振動数成分およびパワー値は、基準加速度と極めてよく一致していることがわかる。実験E-2の場合には卓越振動数成分はよく一致しているものの、両者のパワー値には、約10%程度（1次の卓越振動数近傍で）の違いがある。この原因は、この入力地震動に特有のものというよりも、むしろこの実験における基準加速度値もしくはQ型強震計による応答加速度値のいずれかの計測に問題があったのではないかと考えられる。いずれにしても実験E-2の場合を除く他の6回の地震波加振実験に対しては、Q型強震計の応答加速度と基準加速度のパワースペクトルはよく一致しており、0～10Hzの振動数の範囲においては、Q型強震計は実際の地動をよく再現するといってもよいであろう。

これに対して、B2型強震計の場合には7回の加振実験のいずれの場合にも、3Hz程度以上の振動数の領域において、基準加速度に比較してパワーレベルが低下することが認められる。したがって、このような振動数領域における地震動の再現性の低下に留意して記録を利用することが求められよう。

表 3 - 3 地震波振動実験による最大加速度 (gal) の比較

実 験 番 号 ²⁾	振動台基準加速度	B 2 型強震計	Q 型 強 震 計
E - 1	53.3	46.6 (0.87)	52.8 (0.99)
E - 2	48.7	41.4 (0.85)	49.4 (1.01)
E - 3	213.8	183.9 (0.86)	213.0 (1.00)
E - 4	102.6	92.4 (0.90)	106.2 (1.03)
E - 5	132.0	114.9 (0.87)	134.2 (1.02)
E - 6	175.4	132.9 (0.76)	177.3 (1.01)
E - 7	296.0	220.9 (0.75)	298.9 (1.01)
() 内の平均		(0.84)	(1.01)

(注) 1) ()内の数字は、振動台基準加速度で正規化した場合の強震計の最大加速度

2) 実験番号については表 2 - 6 参照

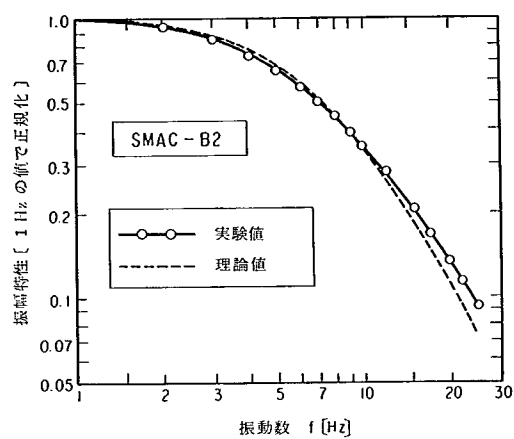


図 3-1 B 2型強震計の振幅特性

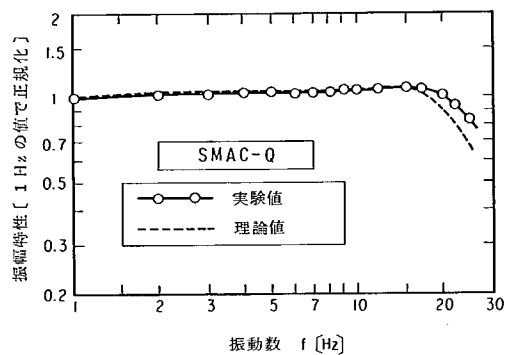


図 3-2 Q型強震計の振幅特性

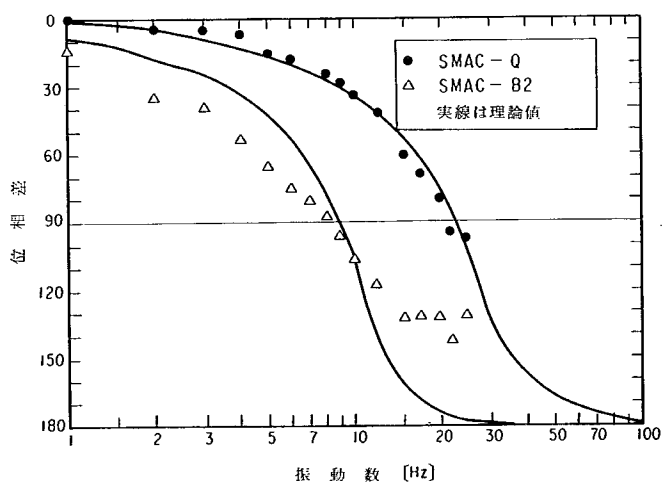
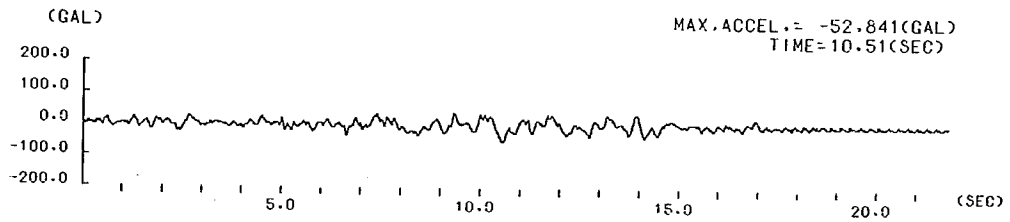
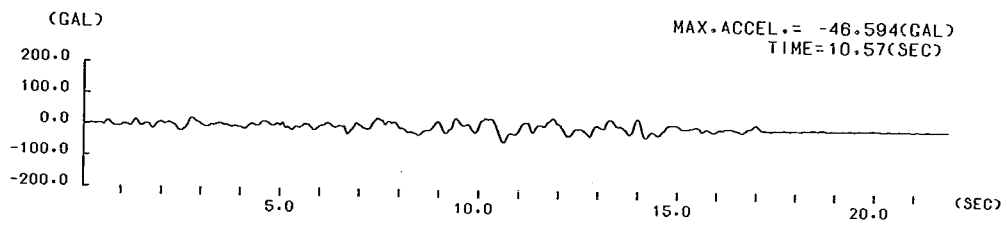


図 3-3 位 相 特 性

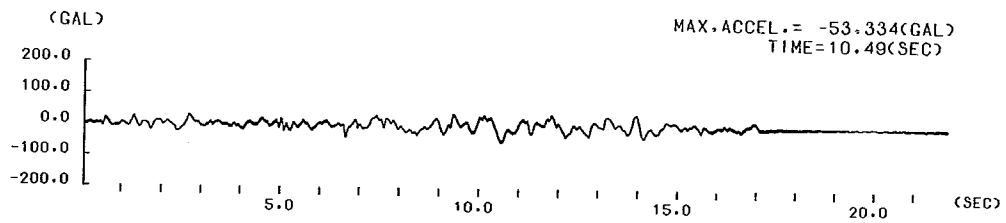
S M A C - Q



S M A C - B 2



基準加速度 (振動台加速度)



基準変位 (振動台変位)

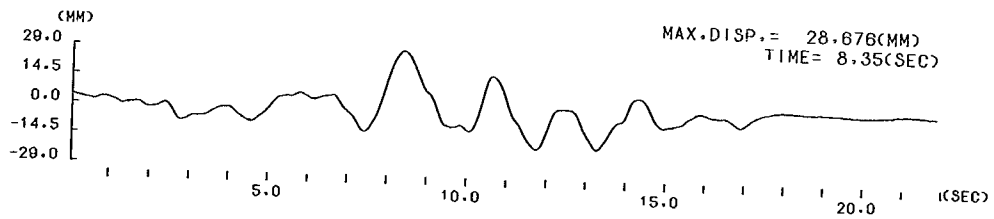
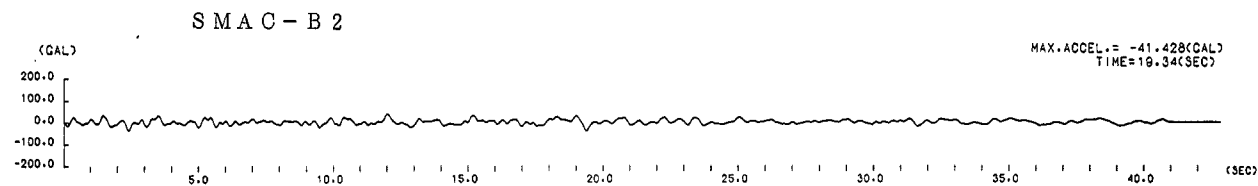
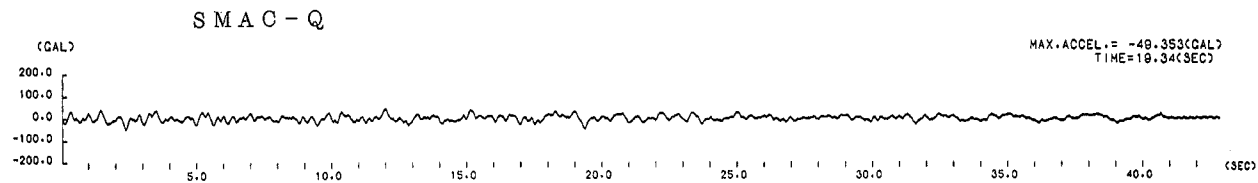
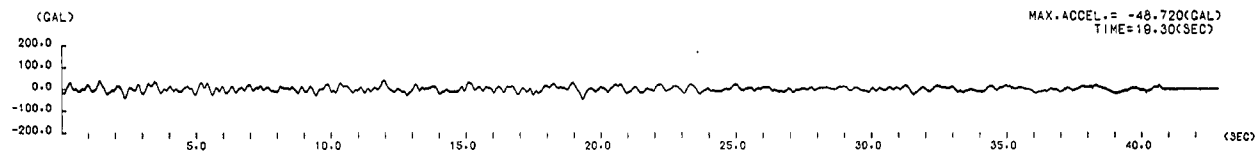


図 3 - 4 静内橋地震動 (根室半島沖地震, 50 gal) を作用させた場合 [実験 E - 1]



基準加速度 (振動台加速度)



基準変位 (振動台変位)

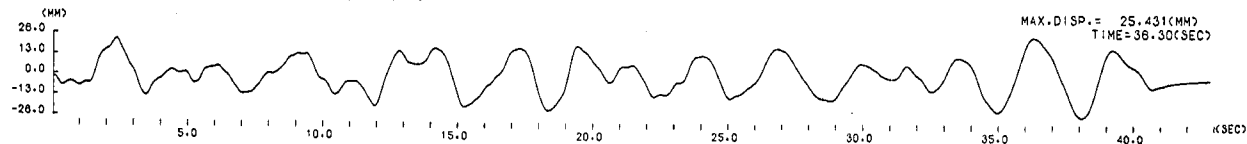
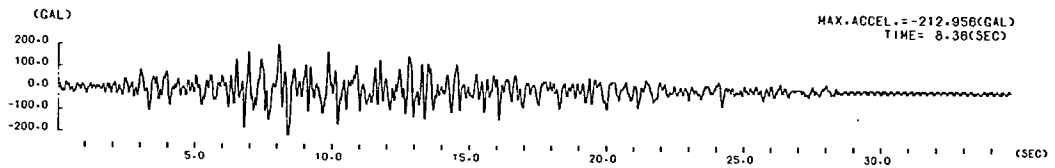
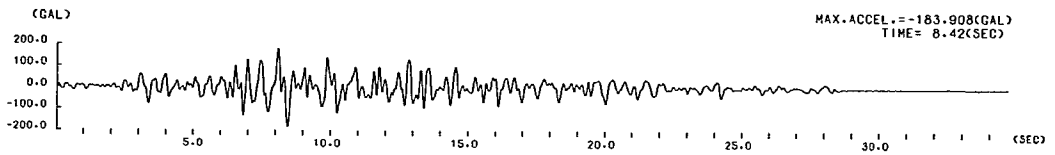


図 3 - 5 浮島地震動 (伊豆半島沖地震, 50 gal) を作用させた場合 [実験 E - 2]

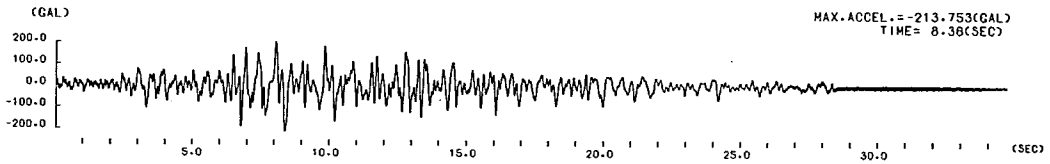
S M A C - Q



S M A C - B 2



基準加速度 (振動台加速度)



基準変位 (振動台変位)

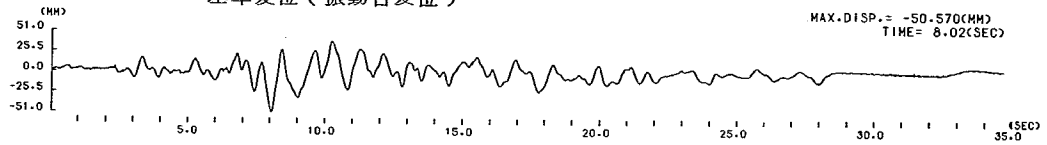


図 3 - 6 富津岬地震動 (伊豆大島近海地震, 200 gal) を作用させた場合 [実験 E - 3]

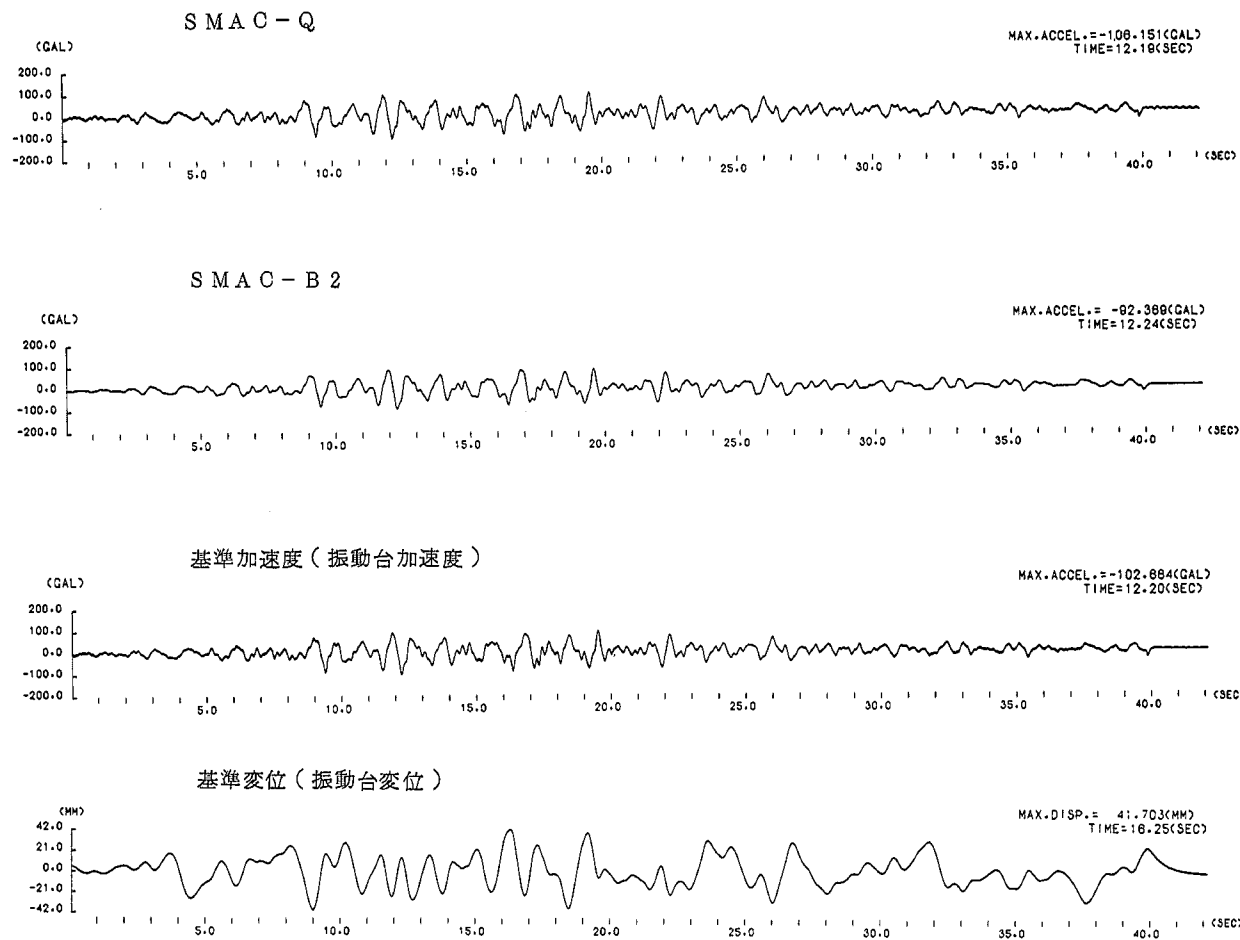
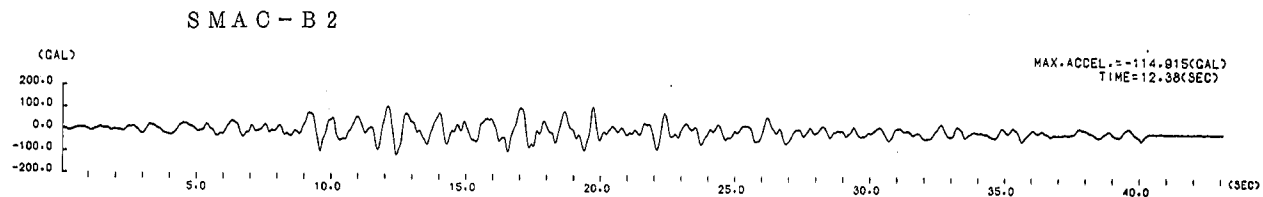
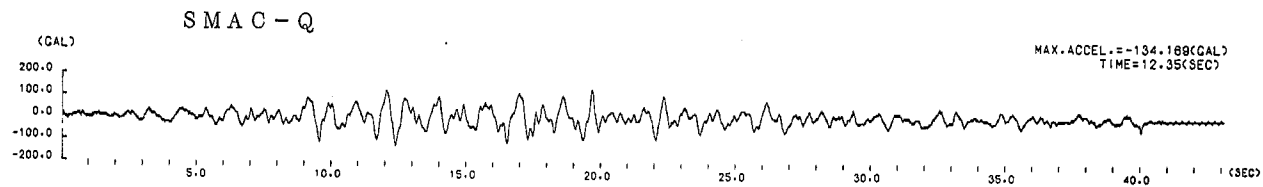
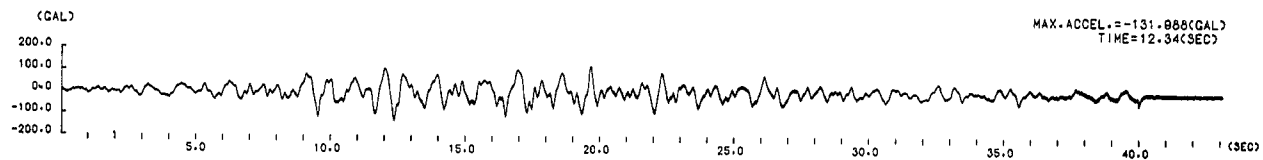


図 3-7 金城埠頭地震動 (伊豆大島近海地震, 100 gal) を作用させた場合 [実験 E-4]



基準加速度 (振動台加速度)



基準変位 (振動台変位)

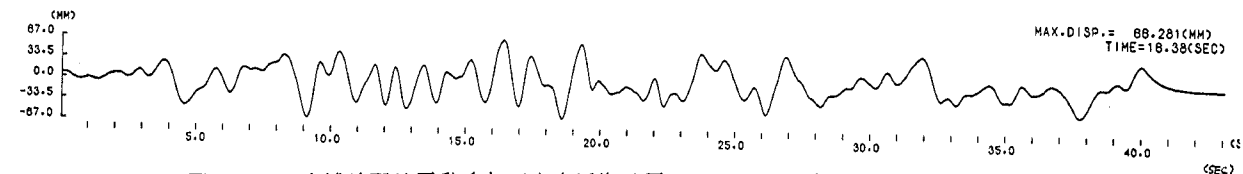
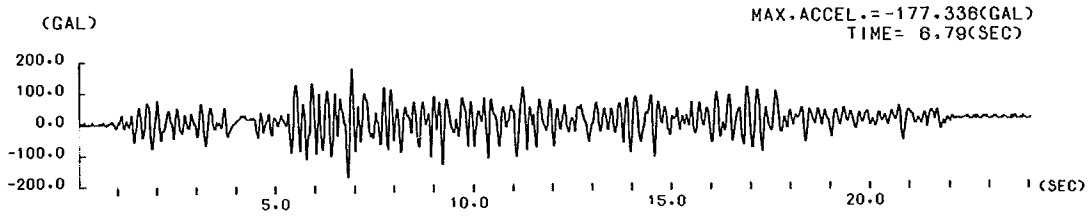
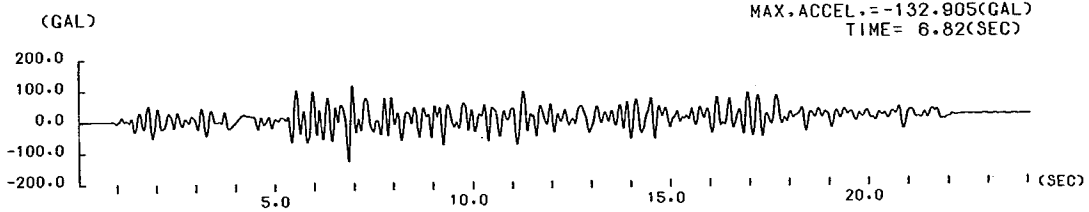


図 3 - 8 金城埠頭地震動 (伊豆大島近海地震, 150 gal) を作用させた場合 [実験 E - 5]

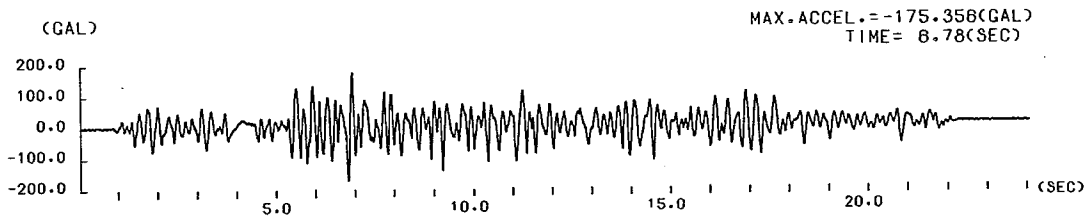
S M A C - Q



S M A C - B 2



基準加速度 (振動台加速度)



基準変位 (振動台変位)

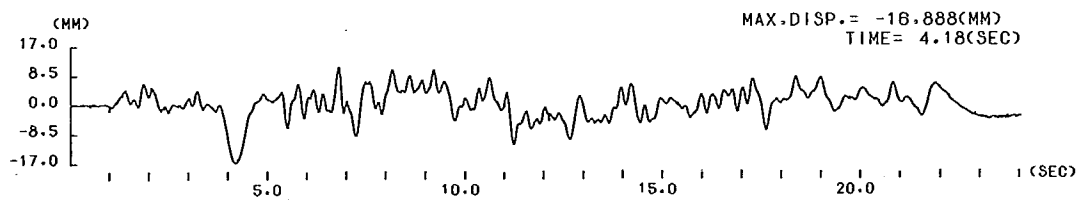


図 3 - 9 浮島地震動 (多摩川下流地震, 200 gal) を作用させた場合 [E - 6]

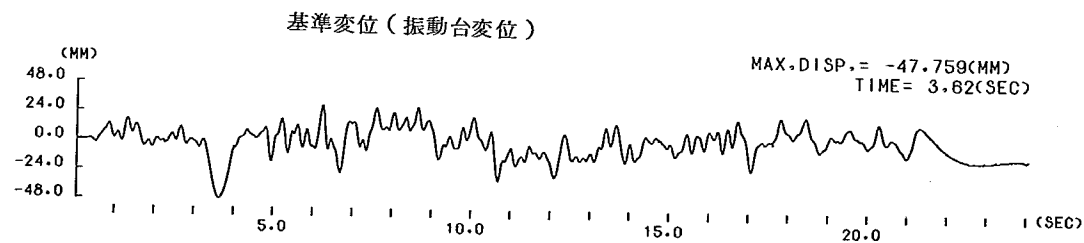
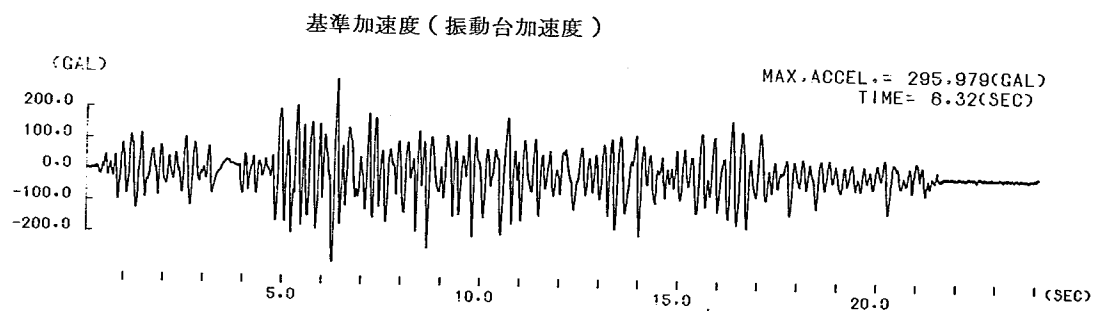
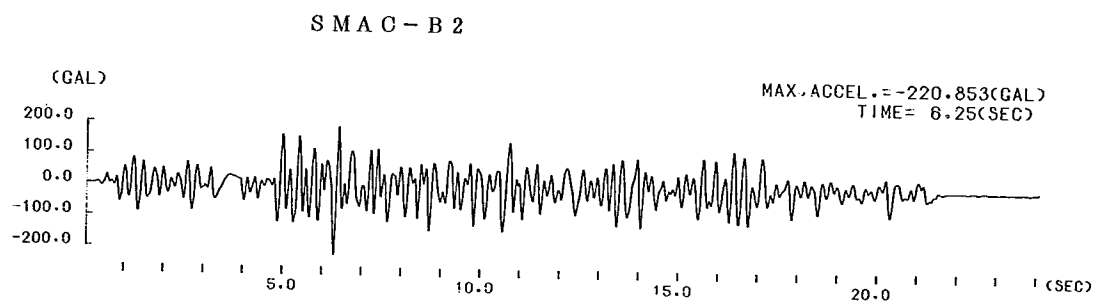
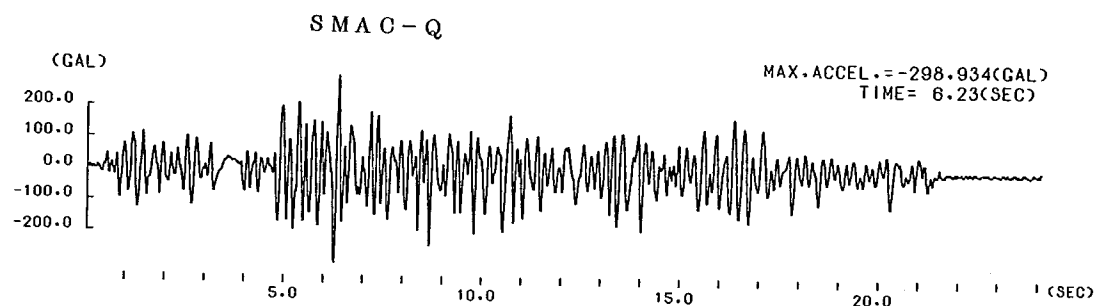


図 3-10 浮島地震動 (多摩川下流地震, 300 gal) を作用させた場合 [実験 E-7]

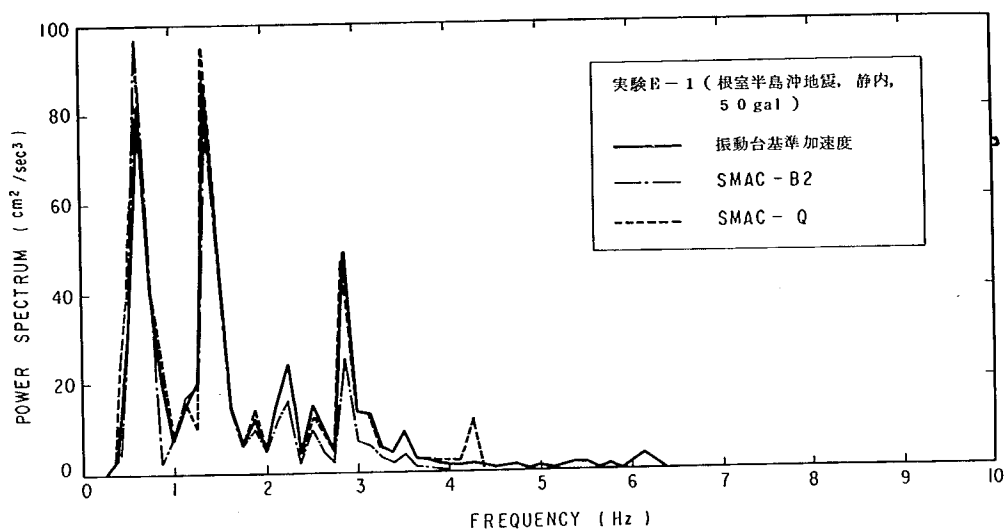


図 3-11 パワースペクトルによる振動数成分の比較〔実験 E-1 (根室半島沖地震, 静内橋, 50 gal)〕

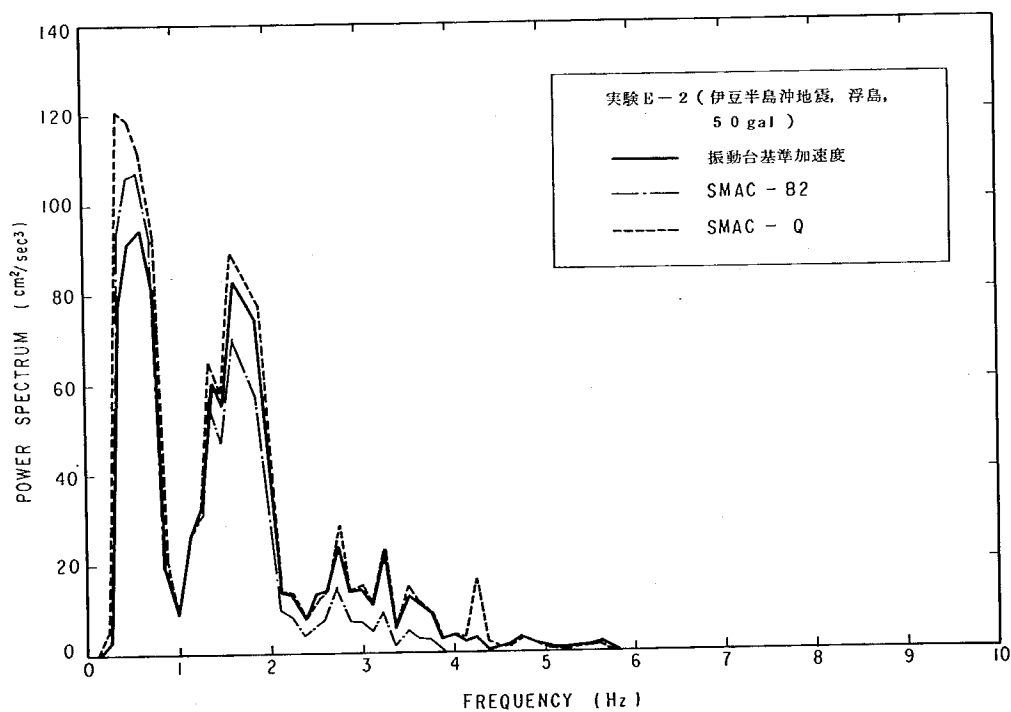


図 3-12 パワースペクトルによる振動数成分の比較〔実験 E-2 (伊豆半島沖地震, 浮島, 50 gal)〕

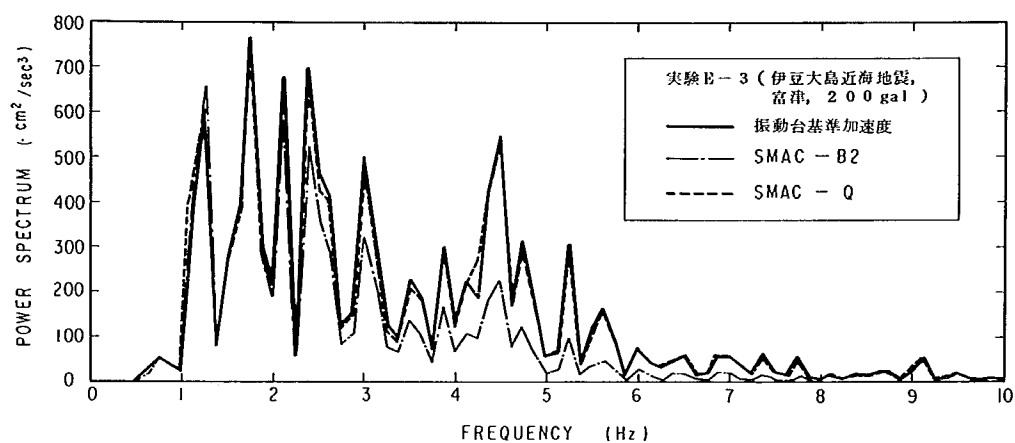


図 3-13 パワースペクトルによる振動数成分の比較〔実験 E-3 (伊豆大島近海地震, 富津, 200 gal)〕

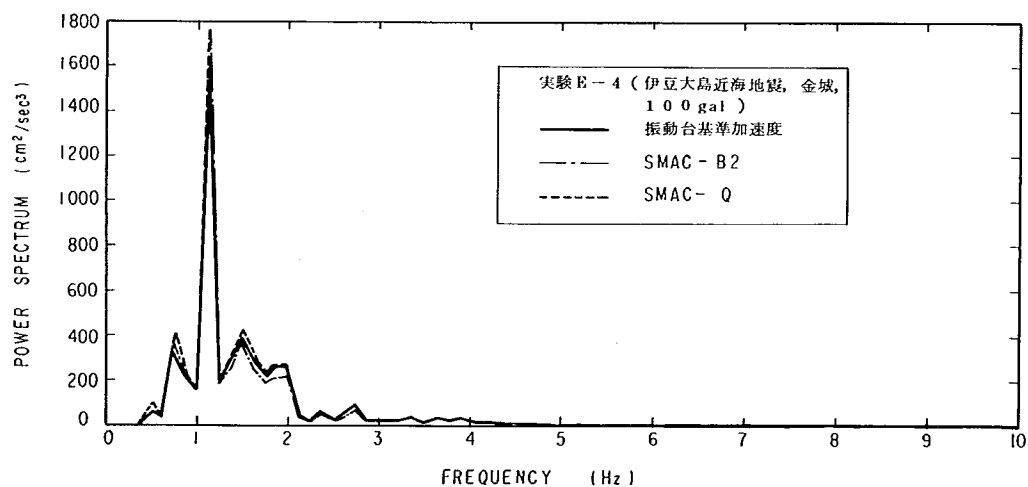


図 3-14 パワースペクトルによる振動数成分の比較〔実験 E-4 (伊豆大島近海地震, 金城, 100 gal)〕

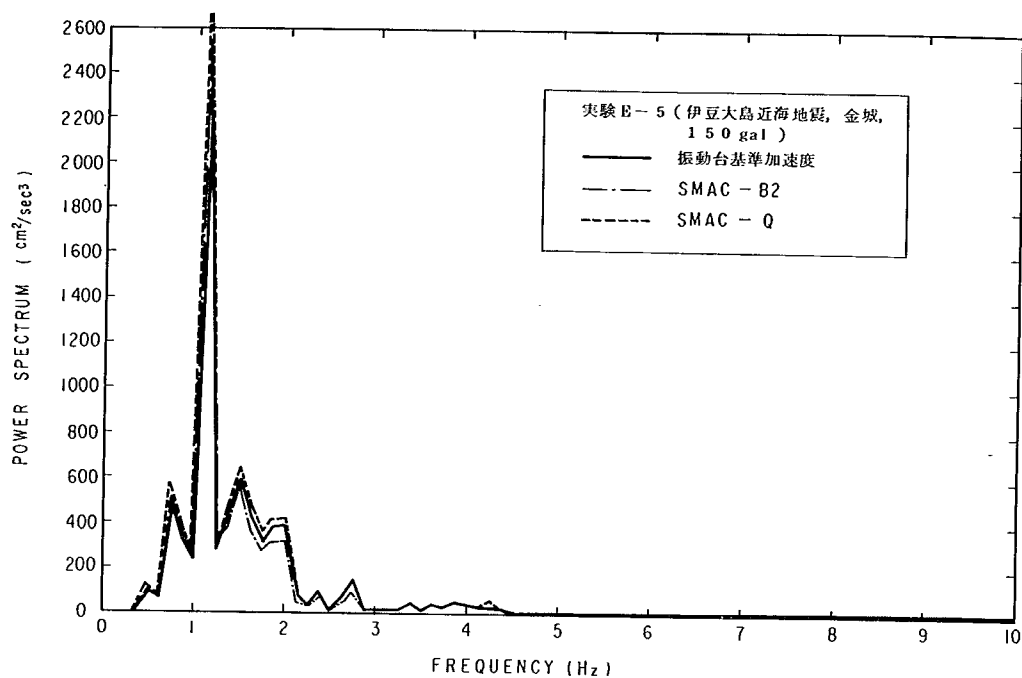


図 3-15 パワースペクトルによる振動数成分の比較〔実験 E-5 (伊豆大島近海地震, 金城, 150 gal)〕

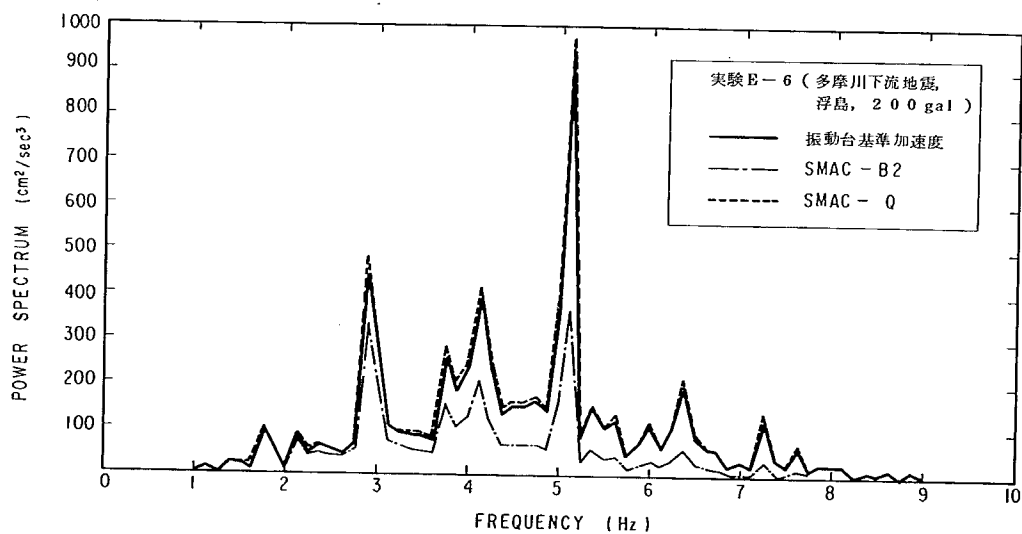


図 3-16 パワースペクトルによる振動数成分の比較〔実験 E-6 (多摩川下流地震, 浮島, 200 gal)〕

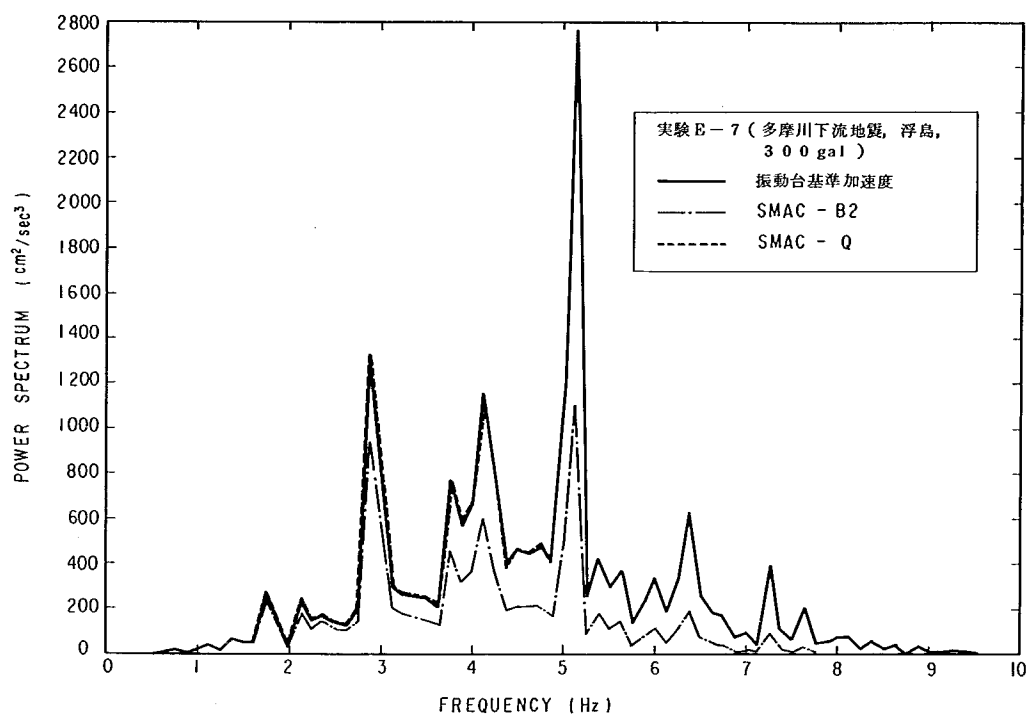


図 3-17 パワースペクトルによる振動数成分の比較〔実験 E-7 (多摩川下流地震, 浮島, 300 gal)〕

4. 加速度応答スペクトルに及ぼす影響の検討

振動実験により求めた SMAC 型強震計の記録を用いて、強震計の特性が、加速度応答スペクトルにどのような影響を与えるかを検討した。対象としたのは絶対加速度応答スペクトル S_A および絶対加速度応答スペクトル倍率 β である。ここで、 S_A は固有周期 T 秒、減衰定数 $h\%$ の線形一自由度の振動系にある任意の入力地震動（最大加速度 $A_{max}[\text{gal}]$ とする）を作用させた場合の振動系の最大応答加速度値 $[\text{gal}]$ であり、 β とは、次の関係がある。

$$S_A = \beta \times A_{max} \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

(4-1) 式で定義した応答加速度スペクトル S_A および応答加速度倍率 β を、7 回の加振実験ごとに基準加速度、B2 および Q 型強震計による記録のそれぞれに対して計算すると図 4-1 ~ 4-7 のようになる。この結果によれば、0.3 秒程度以下の周期成分で感度が低下している B2 型強震計の場合の S_A スペクトル値はおおむね 0.3 秒以下の周期領域において基準加速度および Q 型強震計記録の S_A スペクトル値を下廻っている。また、固有周期が 3 秒以上の領域においては、基準加速度、B2 および Q 型強震計記録の三者間で S_A スペクトルが相互に異なる傾向が認められる。

これに対して β スペクトルの場合には、B2 型強震計によるスペクトル値は、基準加速度記録のスペクトル値に比較して、固有周期がおおむね 0.3 秒以下の周期領域においては小さめ、固有周期がおおむね 0.5 秒以上の周期領域においては大きめの結果を与えている。

以上のような傾向をさらにはっきりさせるため、三者の S_A および β スペクトル値どうしの比を次のように定義した。

$$R_{S_A}^{B2} = \frac{S_A^{B2}}{S_A^*}, \quad R_{S_A}^Q = \frac{S_A^Q}{S_A^*} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

$$R_{\beta}^{B2} = \frac{\beta^{B2}}{\beta^*}, \quad R_{\beta}^Q = \frac{\beta^Q}{\beta^*} \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

ここで、 S_A^* 、 β^* : 振動台基準加速度から求めた S_A スペクトルおよび β スペクトル

S_A^{B2} 、 β^{B2} : B2 型強震計による加速度記録から求めた S_A スペクトルおよび β スペクトル

S_A^Q 、 β^Q : Q 型強震計による加速度記録から求めた S_A スペクトルおよび β スペクトル

(4-2) および (4-3) 式で定義した $R_{S_A}^{B2}$ 、 $R_{S_A}^Q$ および R_{β}^{B2} 、 R_{β}^Q を 7 種類の地震波加振実験に対して示すと、それぞれ図 4-8 ~ 4-11 のようになる。これらの結果を整理すると次のようになる。

(I) Q型強震計による S_A スペクトル (R_{SA}^Q)

図4-8より、 R_{SA}^Q はいずれの入力地震記録の場合も固有周期 T が0.1秒から2.0秒程度までは、おおむね1.0であることから、この範囲の振動数領域ではQ型強震計により観測した加速度記録の S_A スペクトルは、振動台の基準加速度の S_A スペクトルとよく一致していることがわかる。これに対して、固有周期が2秒以上の領域では、 R_{SA}^Q は0.8~2.5の範囲でばらつき、また、7種類の加振実験ごとの変動も大きい。この原因が、Q型強震計の長周期成分の振動の再現性にあるのか、実験時の計測機器等の特性、AD変換時の精度等にあるのかは、今のところはっきりしない。今後、検討する必要があるだろう。図4-12は図4-8に示した7回の加振実験に対する R_{SA}^Q を平均した値と、これに標準偏差を加減した値を示したものである。上述した傾向がよく表われているのがわかる。

以上のような点から、Q型強震計により観測した加速度記録をもとに加速度応答スペクトル S_A を計算した場合には、固有周期が0.1秒から約2秒の範囲では S_A スペクトルは実際の地震動の特性を、ほぼ正しく再現していると考えられる。

(II) B2型強震計による S_A スペクトル (R_{SA}^{B2})

B2型強震計の場合には図4-9より、 R_{SA}^{B2} は固有周期がおおむね0.6秒以下の領域において、1.0以下となっているのがわかる。1.0よりも小さくなる度合いは、入力地震動ごとに変化しており、短周期成分が最も卓越している実験E-6(多摩川下流地震、浮島、卓越振動数は約5.2Hz、表2-6参照)の場合には、固有周期0.1秒付近で R_{SA}^{B2} は約0.8にまで下っている。固有周期が約0.6~2.0秒の範囲では、 R_{SA}^{B2} はおおむね1.0に近く、さらにこれより固有周期の長い領域では、 R_{SA}^{B2} は入力地震動ごとにばらつく傾向を示す。このような点は前述したQ型強震計の場合(R_{SA}^Q)と似かよっているが、 R_{SA}^Q の場合には、この領域で R_{SA}^Q が1.0よりも大きくなるケースが多かったのに対して、 R_{SA}^{B2} の場合には1.0よりも大きくなるケースと小さくなるケースの両者の場合がある点が異なっている。

7回の加振実験ごとの R_{SA}^{B2} を平均し、これに標準偏差の1倍を加減すると図4-13のようになる。

以上のような結果を総合するとB2型強震計により観測した加速度記録をもとに S_A スペクトルを計算した場合には、固有周期が約0.6秒から2.0秒の範囲ではおおむね正しく実際の地震動のスペクトル値を評価することができるが、固有周期が0.1秒から約0.6秒の範囲ではスペクトル値を小さめに評価していることになる。

(III) Q型強震計による β スペクトル (R_{β}^Q)

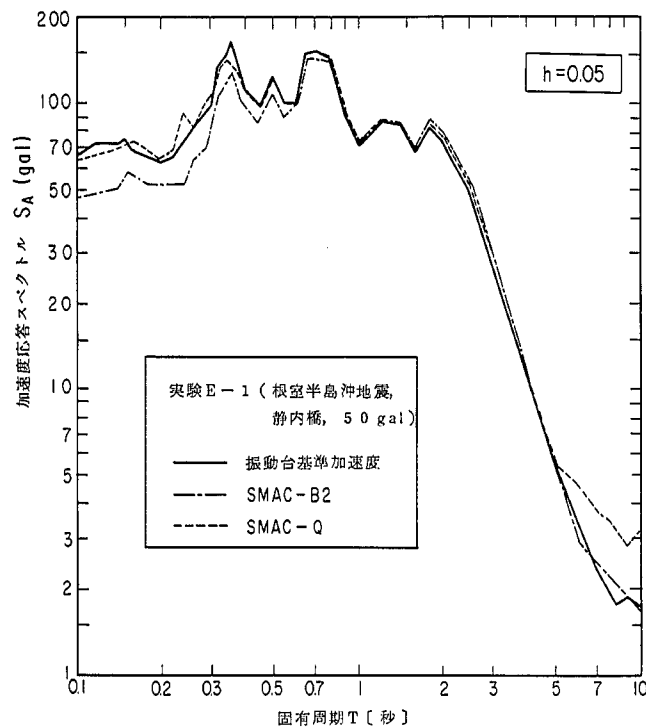
図4-10より、 R_{β}^Q は固有周期が0.1秒から約2.0秒までの領域においておおむね1.0であり、かつ、このような傾向は入力地震動ごとの変動も小さい。固有周期が2.0秒以上の領域になると、 R_{β}^Q は徐々に1.0よりも大きくなり、入力地震動ごとの変動も大きくなる傾向にある。

図4-14は、このような7回の加振実験ごとの R_{β}^Q を平均した結果を示したものであり、以上のような特徴をよく表わしている。

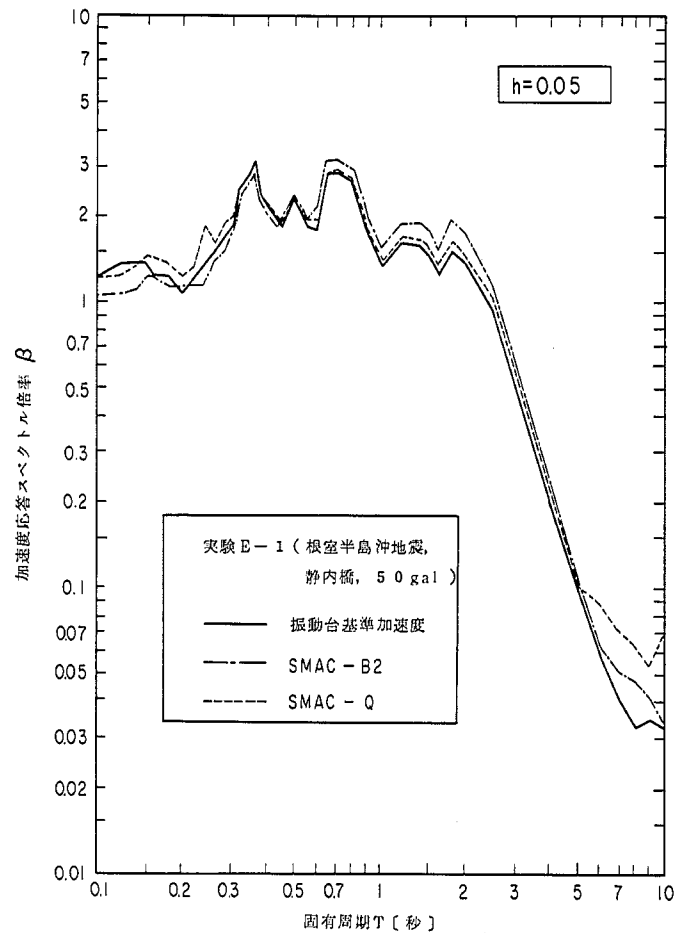
(Ⅳ) B2型強震計による β スペクトル(R_{β}^{B2})

B2型強震計の場合には図4-11より、 R_{β}^{B2} は固有周期がおおむね0.3秒以下の領域においては1.0より小さく、また、0.3秒から約2.0秒までの領域においては1.0よりもやや大きくなっているのがわかる。また、固有周期が2秒以上の長周期領域では、 R_{SA}^{B2} の場合と同様に R_{β}^{B2} は0.4~1.6の範囲でばらつき、また入力地震動ごとの変動も大きい。7回の加振実験ごとの R_{β}^{B2} を平均すると図4-15のようになる。この結果によれば、固有周期が0.1~0.3秒の範囲では、 R_{β}^{B2} は0.86~0.92程度の値をとり、固有周期が0.3秒から約2.0秒の範囲では、 R_{β}^{B2} は1.20~1.25程度の値をとる。

以上のような点を総合すると、B2型強震計により観測した加速度記録をもとに β スペクトルを計算すると、固有周期が0.1~0.3秒の範囲ではスペクトル値をやや小さめに、固有周期が0.3秒から約2.0秒の範囲ではスペクトル値をやや大きめに、それぞれ評価していることになる。

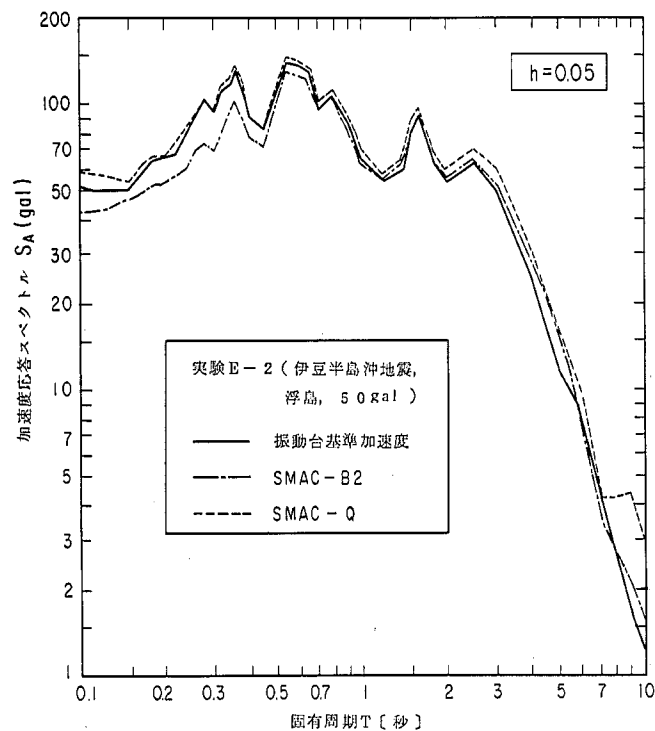


(a) 加速度応答スペクトル S_A

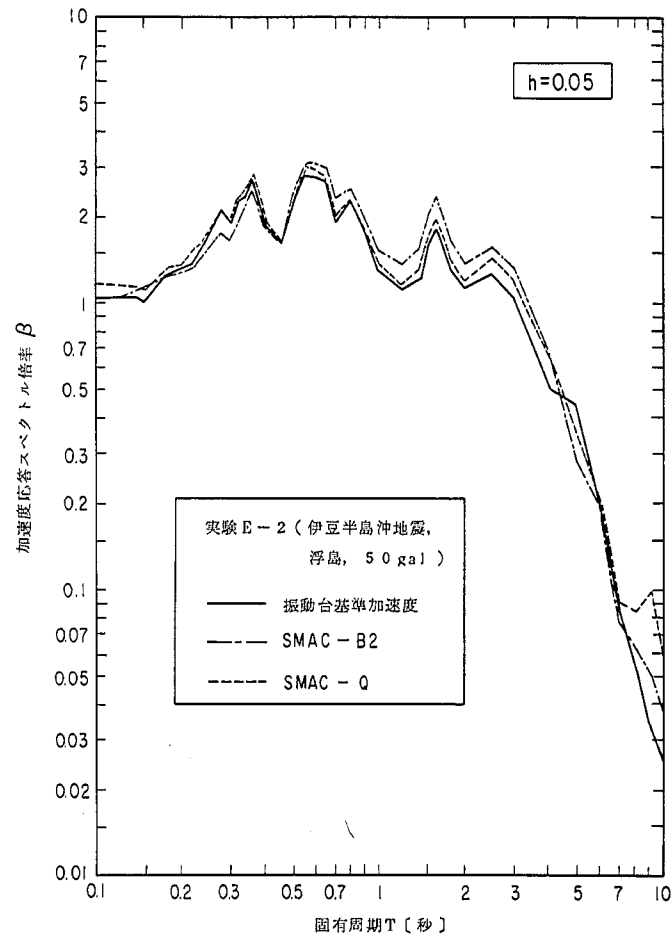


(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図 4-1 加速度応答スペクトルによる比較〔実験 E-1, 根室半島沖地震, 静内橋, 50 gal〕

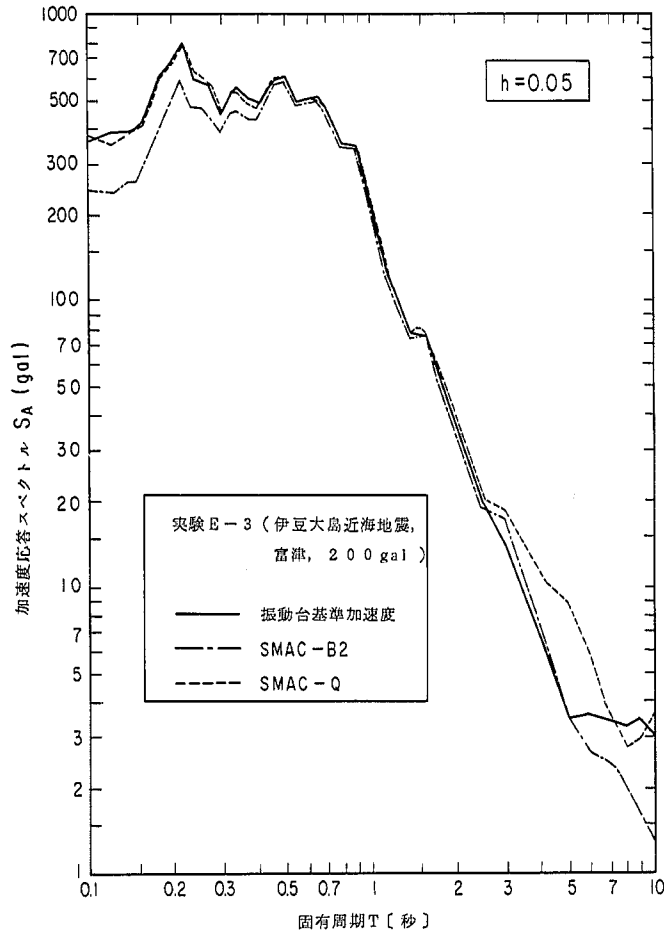


(a) 加速度応答スペクトル S_A

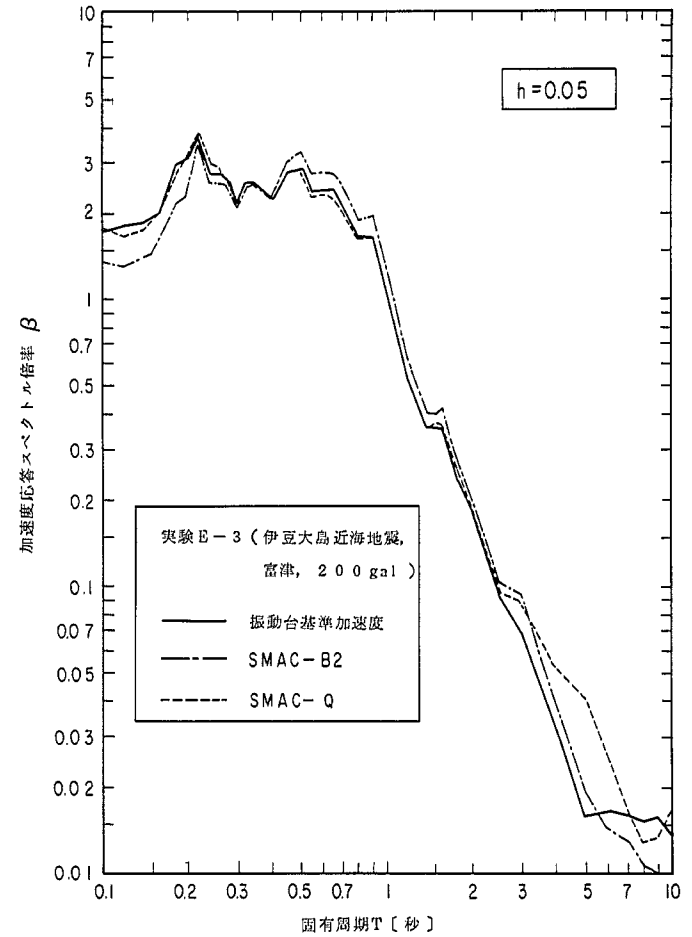


(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図 4-2 加速度応答スペクトルによる比較 (実験 E-2, 伊豆半島沖地震, 浮島, 50 gal)

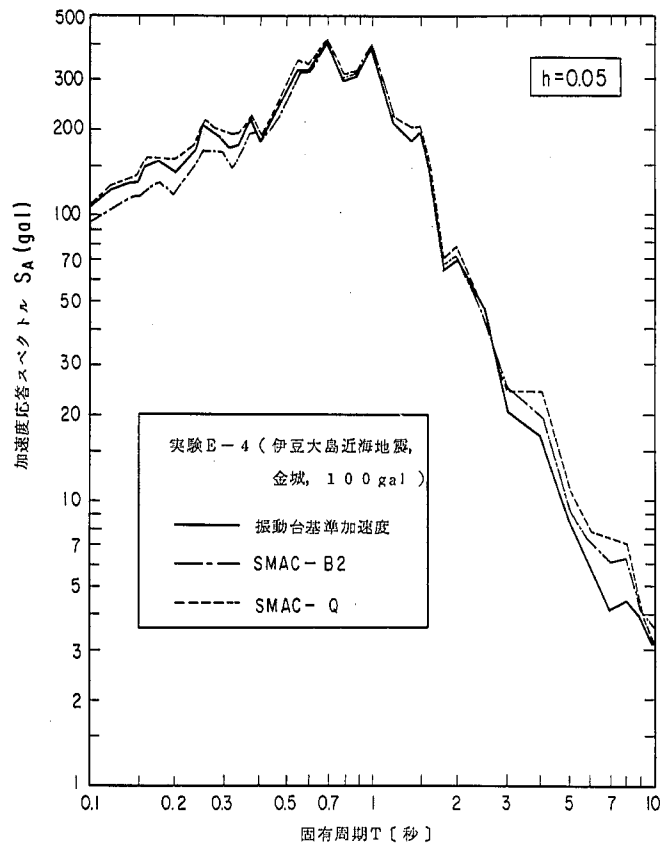


(a) 加速度応答スペクトル S_A

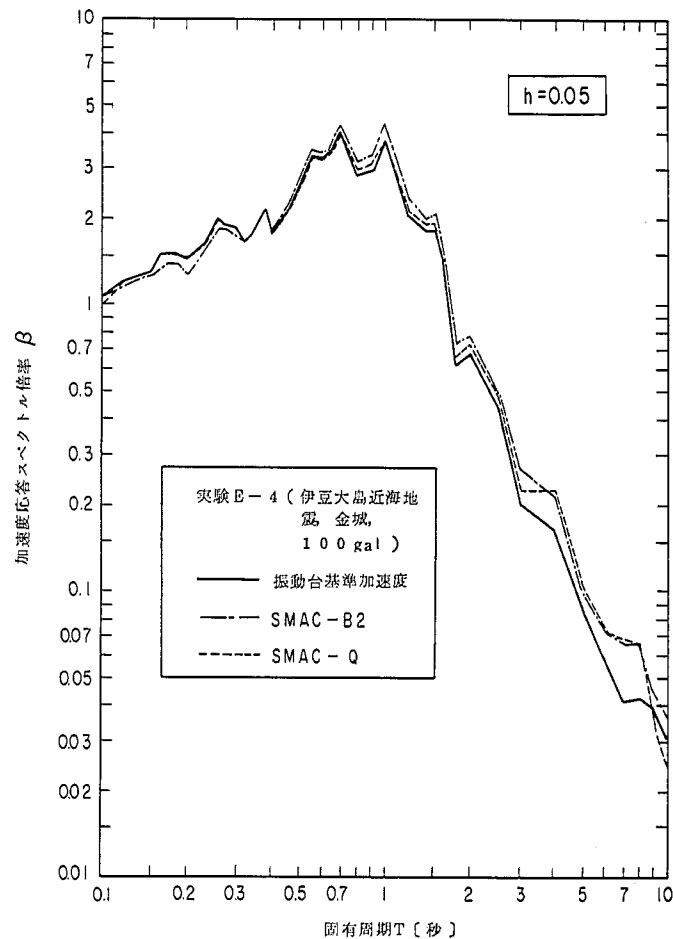


(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図 4-3 加速度応答スペクトルによる比較 (伊豆大島近海地震, 富津, 200 gal)

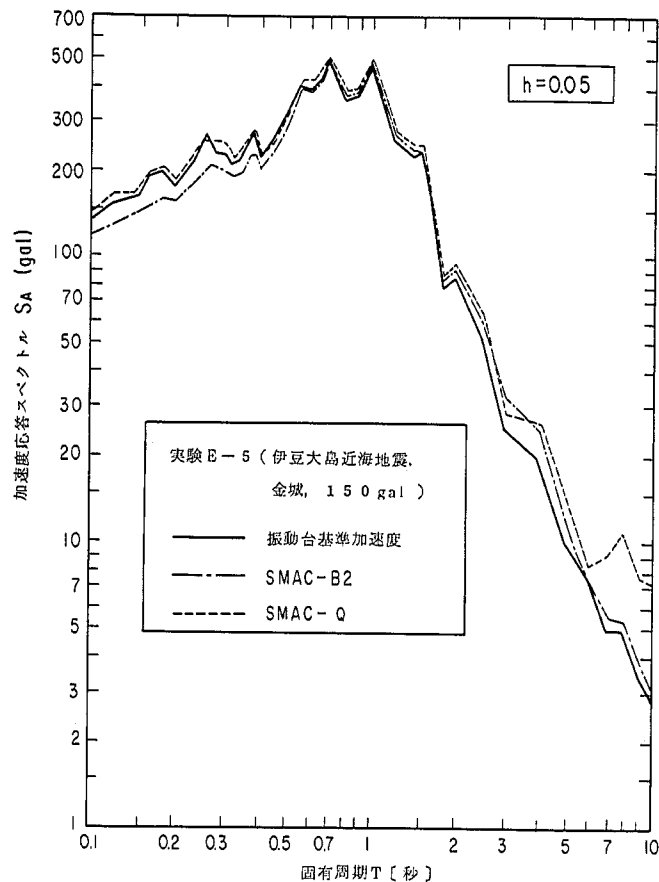


(a) 加速度応答スペクトル S_A

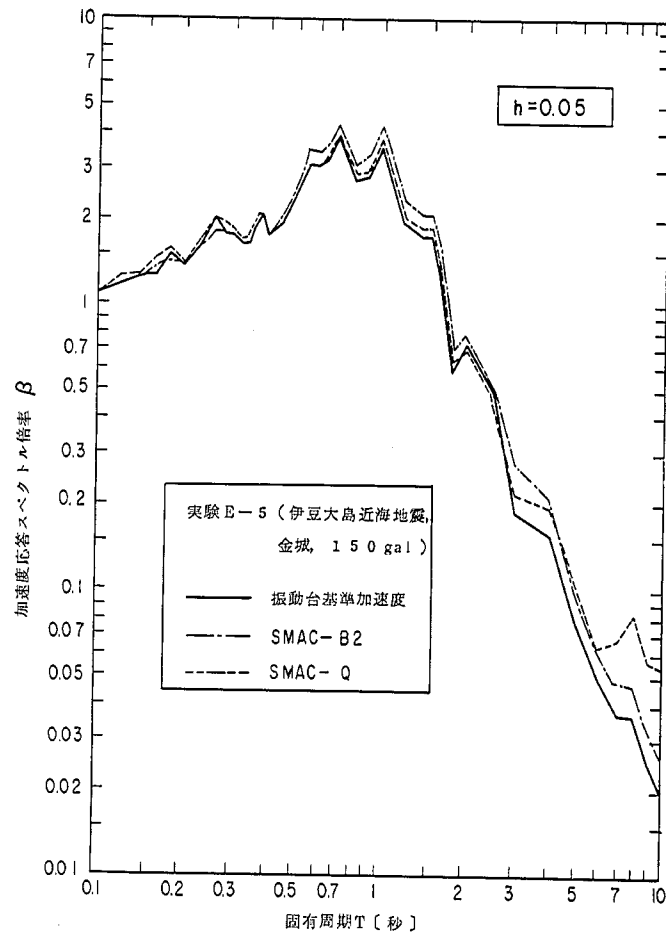


(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図 4-4 加速度応答スペクトルによる比較 (伊豆大島近海地震, 金城, 100 gal)

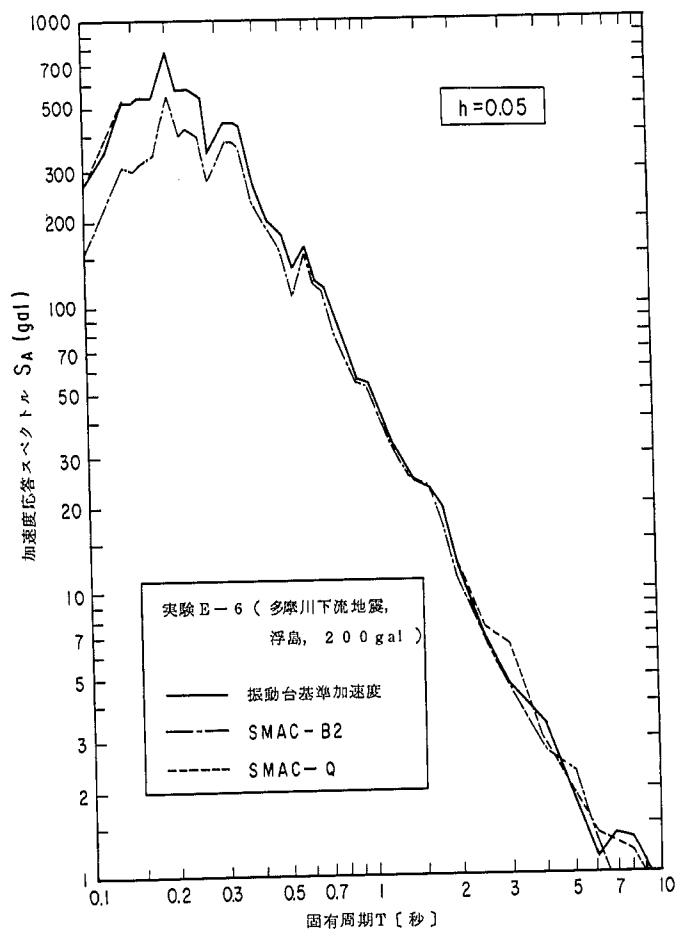


(a) 加速度応答スペクトル S_A

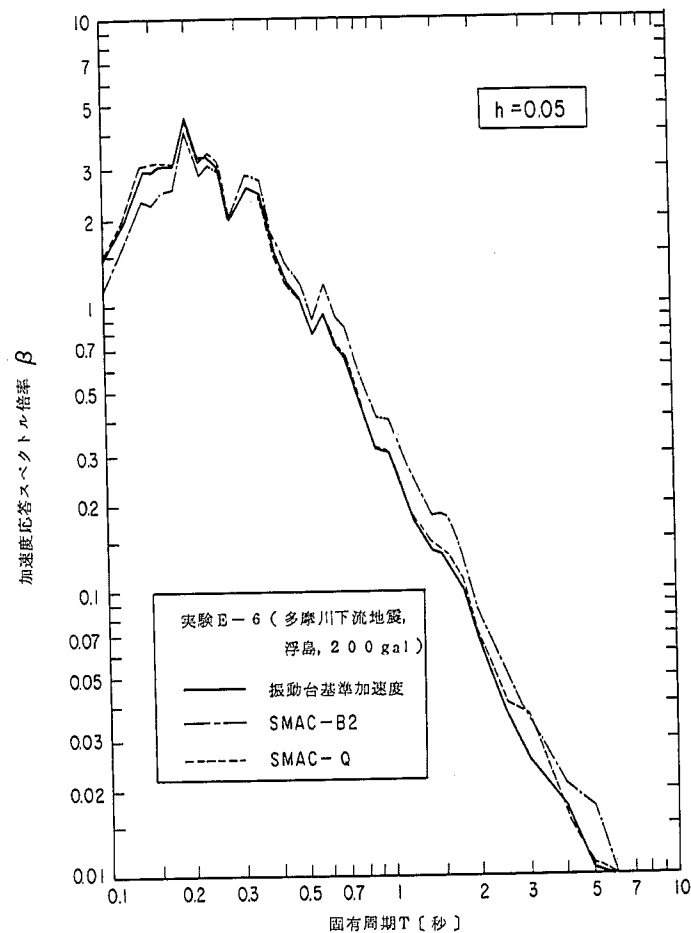


(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図 4-5 加速度応答スペクトルによる比較 (実験 E-5, 伊豆大島近海地震, 金城, 150 gal)

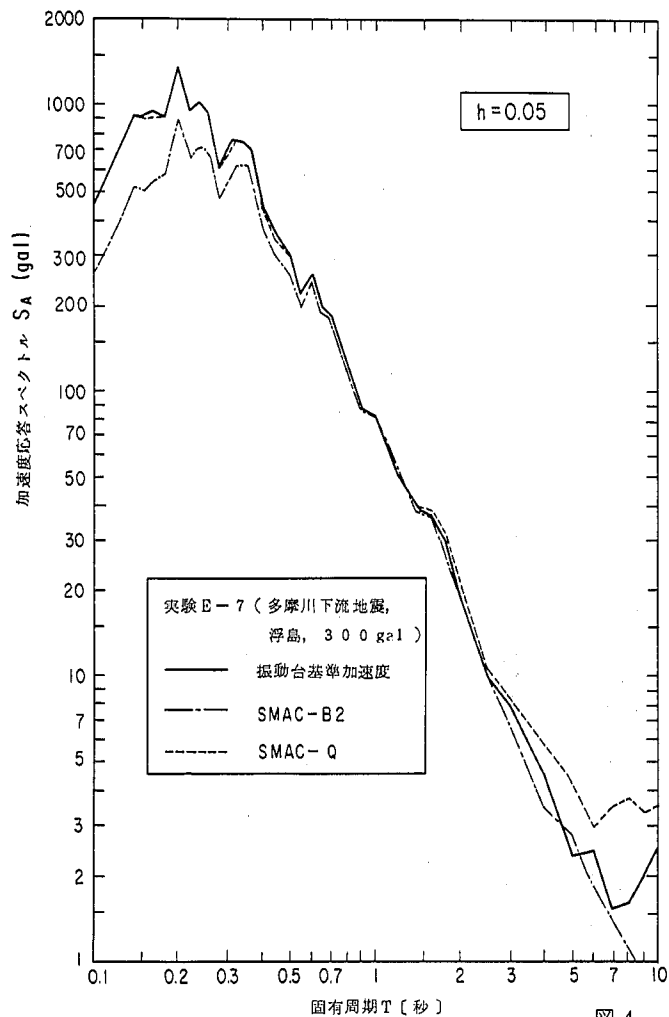


(a) 加速度応答スペクトル S_A

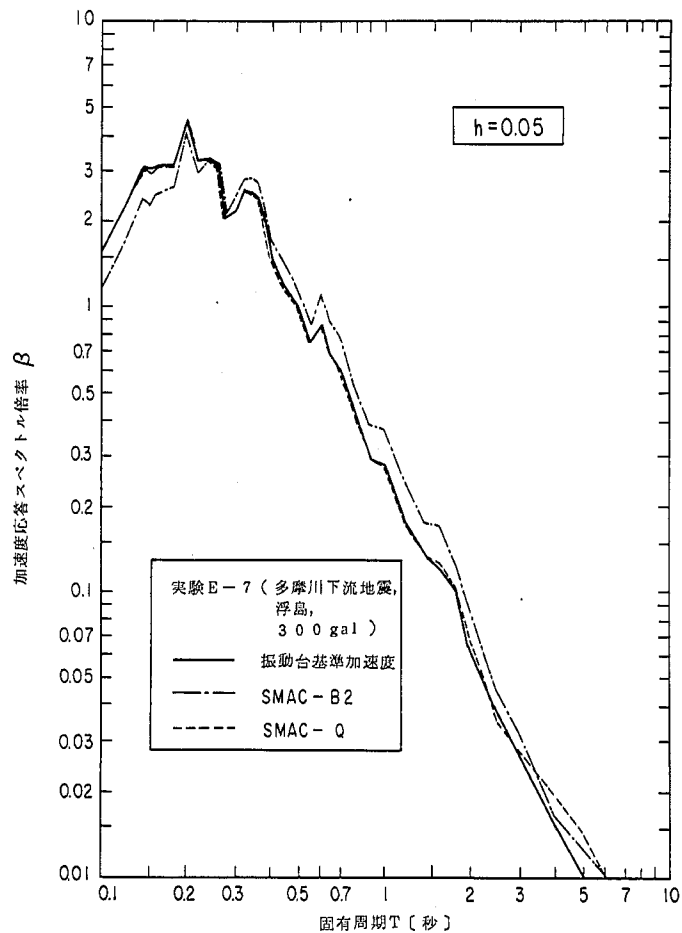


(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図 4-6 加速度応答スペクトルによる比較 (実験 E-6, 多摩川下流地震, 浮島, 200 gal)

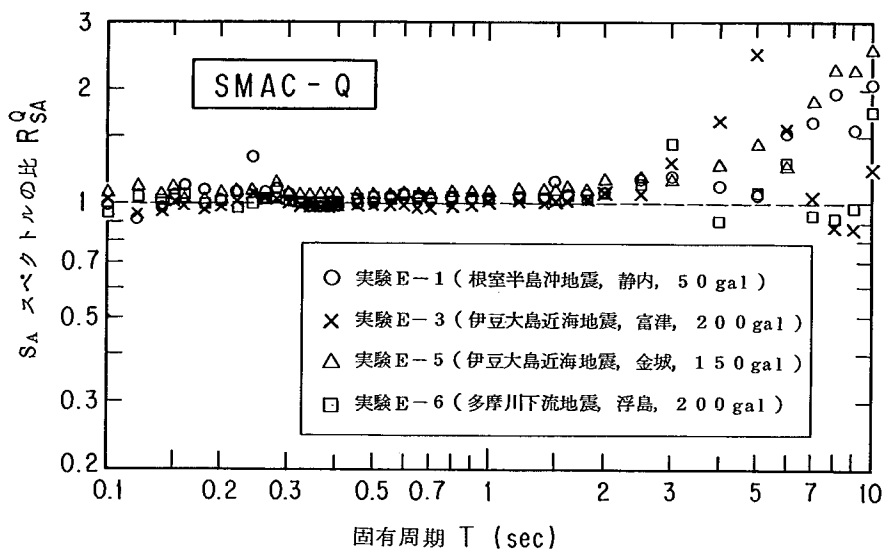


(a) 加速度応答スペクトル S_A

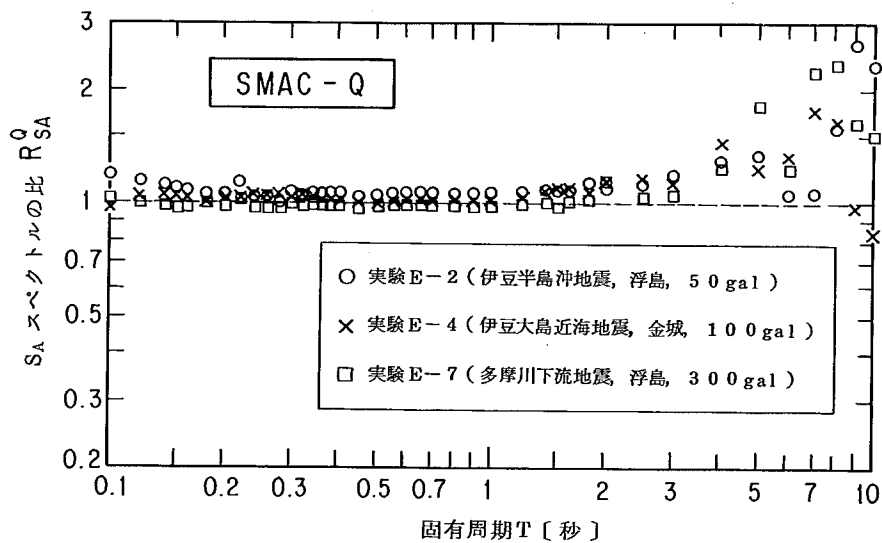


(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図 4-7 加速度応答スペクトルによる比較 (実験 E-7, 多摩川下流地震, 浮島, 300 gal)

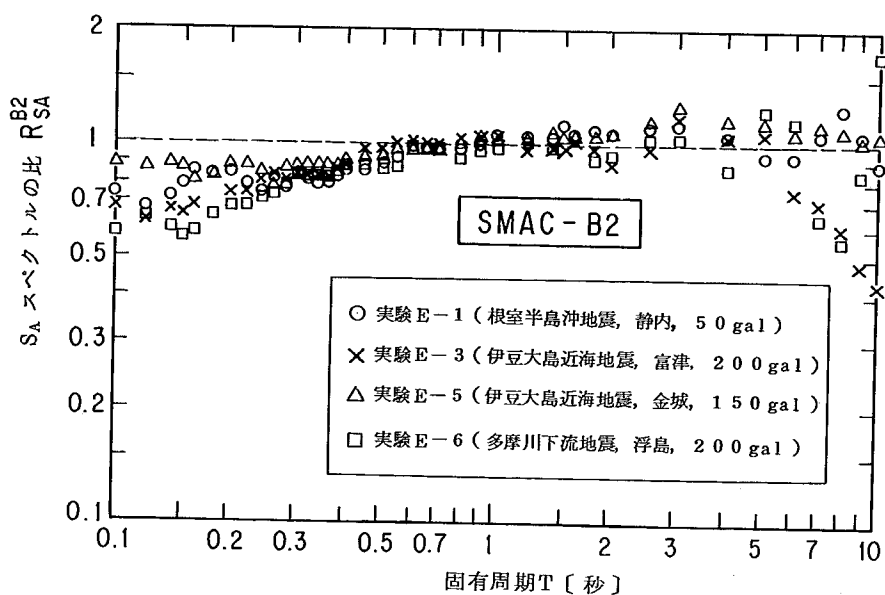


(a) 実験 E-1, E-5, E-6

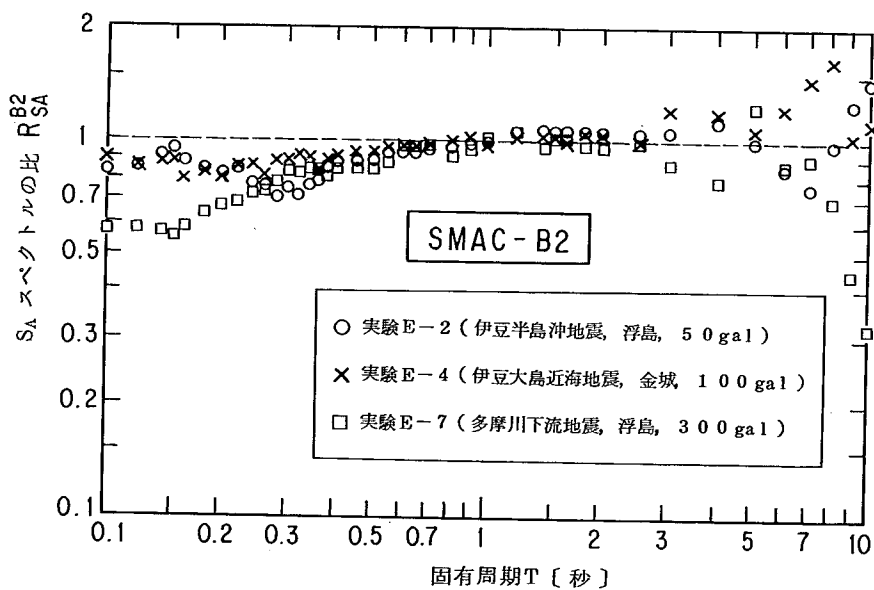


(b) 実験 E-2, E-4, E-7

図 4-8 R_{SA}^Q (SMAC-Q)

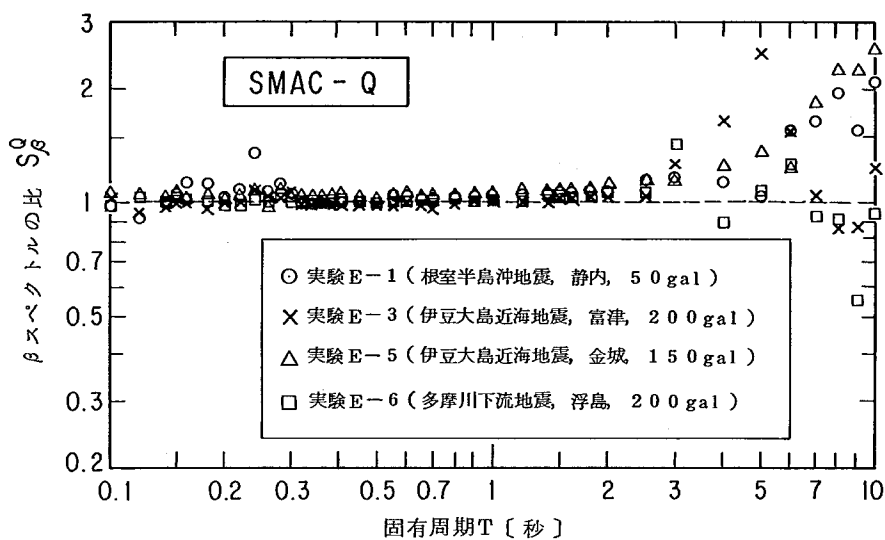


(a) 実験 E-1, E-3, E-5, E-6

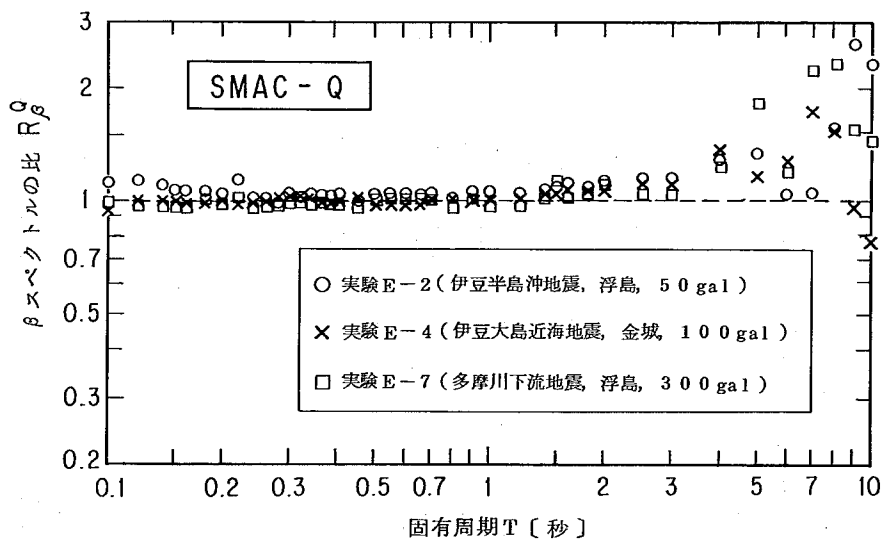


(b) 実験 E-2, E-4, E-7

図 4-9 R_{SA}^{B2} (SMAC-B2)

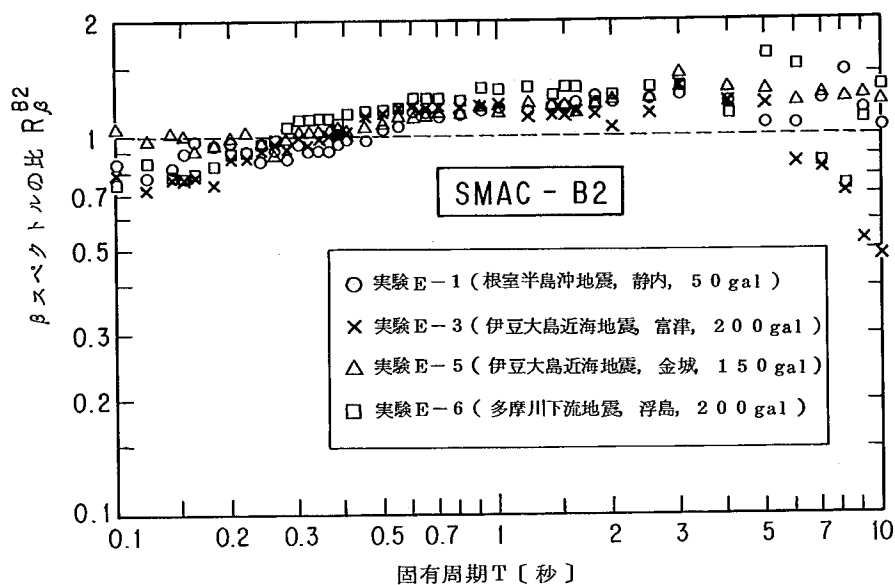


(a) 実験 E-1, E-3, E-5, E-6

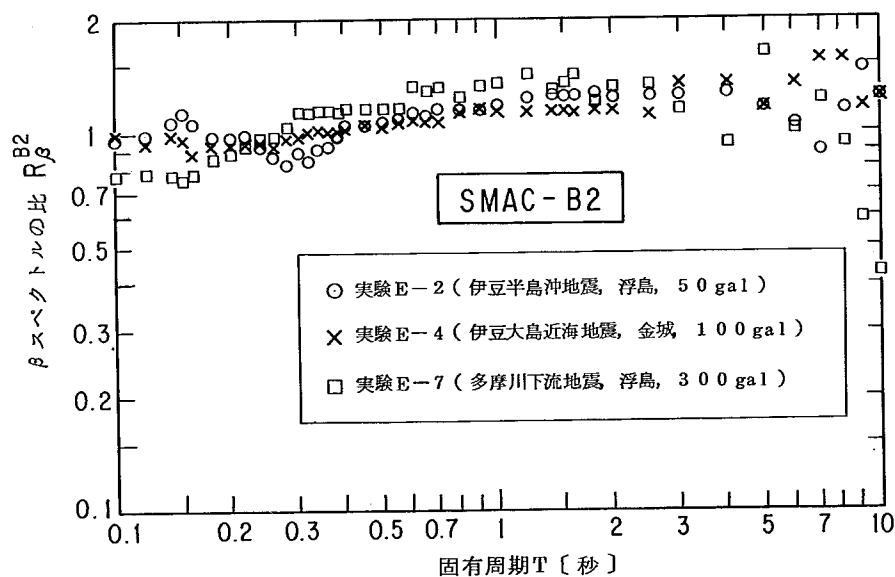


(b) 実験 E-2, E-4, E-7

図 4-10 β スペクトルの比 S_{β}^Q (SMAC-Q)



(a) 実験 E-1, E-3, E-5, E-6



(b) 実験 E-2, E-4, E-7

図 4-11 β スペクトルの比 R_{SA}^{B2} (SMAC-B2)

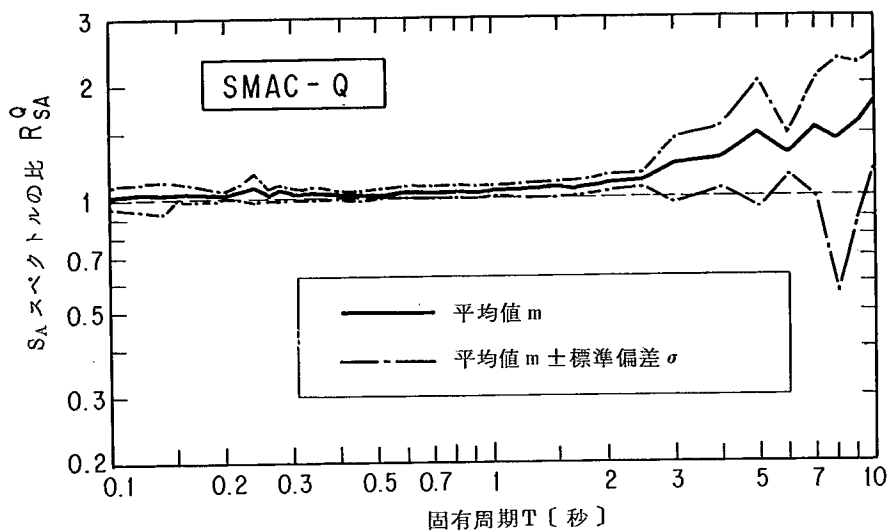


図 4-1 2 S_A スペクトルの比 R_{SA}^Q の平均
値 (SMAC-Q)

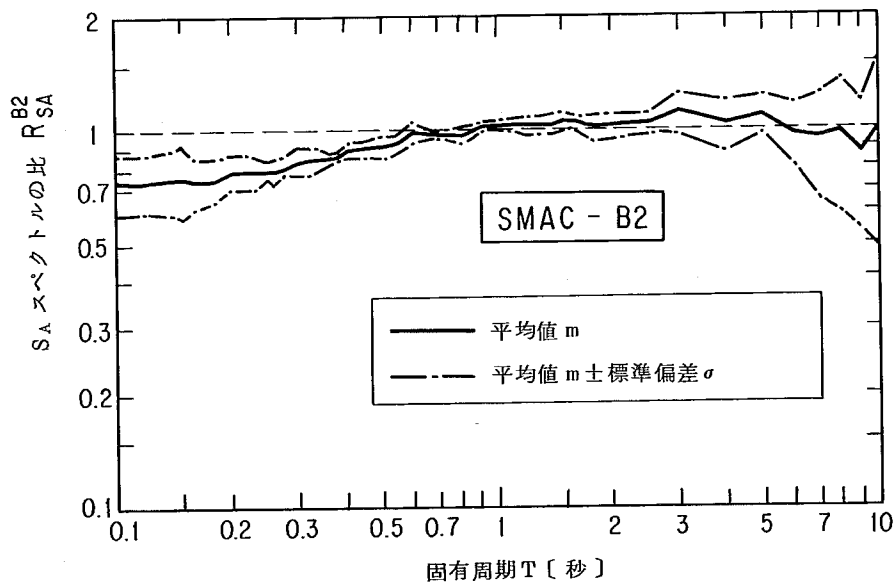


図 4-1 3 S_A スペクトルの比 R_{SA}^{B2} の平均
値 (SMAC-B2)

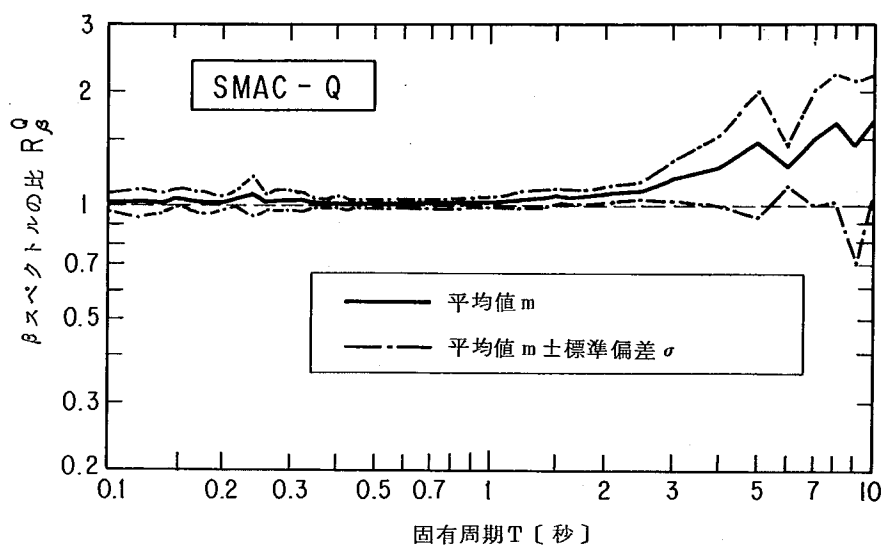


図 4-14 β スペクトルの比 R_β^Q の平均値
(SMAC-Q)

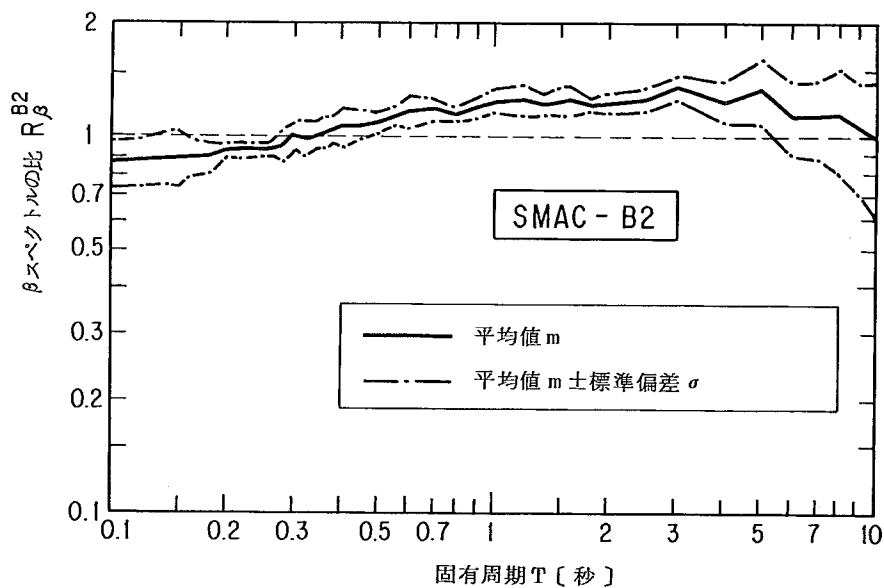


図 4-15 β スペクトルの比 R_β^{B2} の平均値
(SMAC-B2)

5. 結 論

SMAC-B 2 型強震計および SMAC-Q 型強震計を対象として、加振台を用いた振動実験により、これらの強震計がもつ振動特性とこれが強震記録から計算した地震応答スペクトルに及ぼす影響を検討した。本実験の結果から得られた結論をまとめると以下のようになる。

- (1) B 2 型強震計は約 0.3 秒以下の波動成分に対しては感度が低下するため、これにより観測された地震動加速度記録は実際の地震動に比較して最大加速度を小さめに評価し、また、振動数の高い波形の山谷の細部がとれたなめらかな波形となる。今回の加振実験に用いた 7 種類の地震動に対しては、最大加速度の低下率は平均して約 16 % であった。
- (2) B 2 型強震計により観測した強震記録をもとに加速度応答スペクトル S_A を計算した場合には、固有周期が 0.1 秒から約 0.6 秒の範囲では、 S_A スペクトルを最大で 25 % 程度 (7 種類の加振実験の平均値) 小さめに評価する。どの程度小さめの評価になるかは入力地震動の特性に応じて変化するが、一般的には 0.3 秒よりも短い周期範囲で主要動が卓越している地震動ほどより小さめの評価となる。
- (3) B 2 型強震計により観測された記録をもとにして加速度応答スペクトル倍率 β を計算した場合には、固有周期が 0.1 ~ 0.3 秒の範囲においては β スペクトルを最大で 15 % 程度 (7 種類の加振実験の平均値) 小さめに、また、0.3 秒から約 2.0 秒までの範囲においては β スペクトルを最大で 25 % 程度 (7 種類の加振実験の平均値) 大きめに、それぞれ評価する。
- (4) Q 型強震計により観測した地震動加速度記録の最大値は、実際の地震動加速度の最大値をよく再現する。今回の加振実験に用いた 7 種類の地震動に対しては、最大加速度は基準加速度に比較して 1 % 程度大きめに評価しただけであった。
- (5) Q 型強震計により観測した記録をもとにして計算した加速度応答スペクトル S_A および加速度応答スペクトル倍率 β は、いずれも固有周期が 0.1 秒から約 2.0 秒の範囲において実際の地震動の特徴をおおむね正しく再現している。
- (6) 今回の実験では、B 2 型強震計および Q 型強震計のいずれの場合も、固有周期が約 2.0 秒以上の領域において加速度応答スペクトル S_A および加速度応答スペクトル倍率 β がともに、実際の地震動のスペクトル値に対してかけ離れるとともに、入力地震動の種類ごとに変化するという結果を得た。この原因が、SMAC 型強震計 (B 2、Q) の約 2 秒以上の長周期成分の波動の再現性に起因するのか、あるいは実験時の計測機器等の特性もしくは A/D 変換時の精度等に起因するのかは、今後、慎重に検討する必要がある。
- (7) 強震記録をもとにして現在までに各種の平均応答スペクトル曲線が提案されているが、これらのもととなった強震記録は、一般に大部分が B 2 型強震計による記録と考えられる。したがって、上述した B 2 型強震計の特性を考慮すると S_A スペクトルの形でまとめられた平均加速

度応答スペクトル曲線は、一般に固有周期が0.6秒以下の領域においては、スペクトル値を小さめに評価していると考えられる。同様に、 β スペクトルの形でまとめられた平均加速度応答スペクトル曲線は、一般に固有周期が0.3秒以下の領域においてはスペクトル値を小さめに、また、固有周期が0.3秒以上（ただし、上記(6)の理由により、2秒以上の周期成分には今後検討の余地が残っている）の領域においてはスペクトル値を大きめに、それぞれ、評価していると考えられる。公共土木施設では、平均応答スペクトル曲線を用いた動的解析は、一般に固有周期が比較的長い場合（一般には固有周期0.5秒以下の構造物で動的解析を行なう例は少ない）に実施されることが多く、こうした点からは、現在、提案されている平均応答スペクトルを入力地震動として用いることは結果として算出される変位や応力を一般に安全側に評価した結果を導くことになると考えられる。しかしながら、今後は、B2型強震計の特性を正しく補正したうえで、各種の調査研究を積み重ね、地震動の特性を把握していくことが必要とされよう。

参考文献

- 1) 栗林、土岐、若林：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，昭和50年11月。
- 2) 大久保、寺島、山崎：SMAC-B2型強震計と電磁式池中地震計の特性検定について、土木研究所資料第339号，建設省土木研究所，昭和43年3月。
- 3) Berg, G.V. and Housner, G.W.: Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 51, No. 2, April 1961.
- 4) 井合、倉田、土田：強震記録の数値化と補正、港湾技術研究所資料、運輸省港湾技術研究所
- 5) Brady, A.G. and Hudson, D.E.: Standard Data Processing of Strong Motion Accelerograms, Proc. 5 WCEE, 1974.
- 6) 後藤、亀田、杉戸、今西：ディジタルフィルターによるSMAC-B2加速度計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9月。
- 7) 大久保、後藤：高周波強震計の試作，日本地震工学シンポジウム。
- 8) 川島、高木：ディジタイザーによるSMAC型強震計記録読取の精度，土木学会関東支部年次学術講演会，昭和54年1月。
- 9) 伯野、松井、藤野：強震記録による長周期構造物応答計算の精度，土木学会論文報告集、第275号，昭和53年7月。
- 10) 久保、佐藤：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，昭和50年11月。
- 11) 吉田、岡山：地震動加速度記録の積分における濾波計算のアルゴリズム，土木学会論文報告集，第211号，昭和49年1月。
- 12) 栗原、桜井：地震加速度波形の積分，昭和44年2月。
- 13) 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.
- 14) Trifunac, M.D. and Hudson, D.E.: Laboratory Evaluations and Instrument Corrections of Strong Motion Accelerographs, Report No. EERL 70-4, California Institute of Technology, 1970. 8.
- 15) Trifunac, M.D., Udawadia, F.E. and Brady, A.G.: High Frequency Errors and Instrument Corrections of Strong Motion Accelerograms, Report No. EERL 71-5, California Institute of Technology, 1971. 7.
- 16) 栗林、若林、若月、高木：強震記録の検索処理システム，第13回地震工学研究発表会，昭和49年7月

付属資料 - 1 SMA C型強震計性能一覧

		A	A 2	B	B 2	C	C 2	D	E	E 2	Q
	形 式	加 速 度 計	加 速 度 計	加 速 度 計	加 速 度 計	加 速 度 計	加 速 度 計	加 速 度 計	加 速 度 計	加 速 度 計	加 速 度 計
振 子	測 定 成 分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分	水平 2成分 上下 1成分
	固 有 振 動 数	10Hz	7.14Hz	10Hz	7.14Hz	10Hz	7.14Hz	20Hz	20Hz	20Hz	20Hz
	感 度	40 ^{mm} /1000Gal	40 ^{mm} /500Gal	40 ^{mm} /1000Gal	40 ^{mm} /500Gal	40 ^{mm} /1000Gal	40 ^{mm} /500Gal	5 ^{mm} /500Gal	5 ^{mm} /1000Gal	5 ^{mm} /500Gal	5 ^{mm} /1000Gal
	減 衰 倍 率	空気式 h = 1	空気式 h = 1	空気式 h = 1	空気式 h = 1	空気式 h = 1	空気式 h = 1	空気式 h = 0.6	空気式 h = 0.6	空気式 h = 0.6	空気式 h = 0.6
記 録 装 置	記 録 範 囲	10~1000Gal	6~500Gal	10~1000Gal	6~500Gal	10~1000Gal	6~500Gal	5~500Gal	10~1000Gal	5~500Gal	5~1000Gal
	記 録 紙	スタイラスペーパー 280mm×10m	スタイラスペーパー 280mm×10m	スタイラスペーパー 280mm×10m	スタイラスペーパー 280mm×10m	スタイラスペーパー 280mm×10m	スタイラスペーパー 280mm×10m	スクラッチレコード フィルム35mm×45m	スクラッチレコード フィルム35mm×45m	スクラッチレコード フィルム35mm×45m	スクラッチレコード フィルム35mm×45m
	送 り 速 度	10mm/秒	10mm/秒	10mm/秒	10mm/秒	10mm/秒	10mm/秒	5mm/秒	2.5mm/秒	5mm/秒	5mm/秒
	記 録 ペ ン	サファイア針 約100μ	サファイア針 約100μ	ダイヤ針 約50μ	ダイヤ針 約50μ	ダイヤ針 約50μ	ダイヤ針 約50μ	ダイヤ針 約10μ	ダイヤ針 約10μ	ダイヤ針 約10μ	ダイヤ針 約10μ
起 動 器	記録駆動方式	手捲全舞式	手捲全舞式	手捲全舞式	手捲全舞式	DCマイクロモーター	DCマイクロモーター	DCマイクロモーター	DCマイクロモーター	DCマイクロモーター	DCマイクロモーター
	記 録 時 間	3分間	3分間	3分間	3分間	3分間	3分間	1.5分間	1.5分間	1.5分間	1.5分間
	動 作 回 数	3回	3回	5回	5回	5回	5回	最大100回	最大200回	最大100回	最大100回
ス タ ー タ	振 子	上下動	上下動	上下動	上下動	上下動	上下動	上下動	上下動	上下動	動電形上下動
	固 有 振 動 数	3.3Hz	3.3Hz	3.3Hz	3.3Hz	3.3Hz	3.3Hz	3.3Hz	3.3Hz	3.3Hz	4.5Hz
	感 度	10Gal	5Gal	10Gal	5Gal	10Gal	5Gal	10Gal	5Gal	10Gal	5Gal
刻 時	付 荷 装 置	機械式スタータ 水平100Gal	機械式スタータ 水平100Gal	機械式スタータ 水平100Gal	機械式スタータ 水平100Gal	機械式スタータ 水平100Gal	機械式スタータ 水平100Gal	—	—	—	—
	方 式	天府式	天府式	天府式	天府式	天府式	天府式	エレクトロニックス	エレクトロニックス	エレクトロニックス	エレクトロニックス
	間 隔	1又は1/5秒	1又は1/5秒	1秒	1秒	1秒	1秒	1/5秒	1/2秒	1/2秒	1/2秒
電 源	電 源	乾電池	乾電池	乾電池	乾電池	乾電池	乾電池	乾電池	乾電池	乾電池	乾電池
		FM3 6V FM5 12V	FM3 6V FM5 12V	FM5 12V	FM5 12V	FM5 12V	FM5 12V	UM-1 12V	UM-1 12V	UM-1 12V	UM-1 12V
諸 元	設 置 方 式	据置形	据置形	据置形	据置形	壁掛形	壁掛形	据置形	据置形	据置形	据置形
	寸 法	840×740×560 ^{mm}	840×740×560 ^{mm}	540×540×370 ^{mm}	540×540×370 ^{mm}	610×680×280 ^{mm}	610×680×280 ^{mm}	450×450×350 ^{mm}	450×450×350 ^{mm}	450×450×350 ^{mm}	400φ×320 ^{mm}
	重 量	300kg	300kg	100kg	100kg	120kg	120kg	80kg	80kg	80kg	35kg

付属資料—2. デジタイザーによる SMAC—B 2 型強震計の読取精度に関する検討

1. はじめに

建設省の土木施設に対する強震観測は昭和 33 年に始まり、昭和 54 年 3 月末現在で土木研究所の所掌する SMAC 型強震計は 132 観測地点で合計 262 台である。強震計の読み取りは、昭和 39 年から開始しているが、当初は、記録波形を 1/10 秒間隔に区切り、スケールをあてて振幅を読み取るという方式をとっていた。この方式は昭和 44 年までの記録の読み取りに使用されていたが、その後、昭和 48 年に座標読み取り装置（米国ペンディックス社製、以下、デジタイザーと呼ぶ）を導入し、昭和 45 年以後現在に至る記録はこのデジタイザーを用いて行なっている。強震記録を用いた解析は、近年その数が豊富になってきたため、各所で利用されているが、それに伴って記録の精度に対する関心が深まりつつある。そこで、ここではデジタイザーを用いた土木研究所における強震記録の数値化の精度に関する予備的な検討結果を示す。

2. 土木研究所における記録読取システム

デジタイザーの主要諸元は表—1 に示す通りである。本体は写真—1 に示すように、読み取りテーブル部、コンソール部、出力装置部から構成されており、読み取った記録は磁気テープに収録

表—1. デジタイザーの主要諸元

1. 読取り有効範囲 (読取りテーブルの種類)	30×36 インチ (76×91 cm) 36×48 インチ (91×122 cm) 42×60 インチ (107×154 cm)
2. 基準分解能	0.001 インチ
3. 設定単位	0.001 インチ (0.002、0.004、0.008、0.010 インチに特注可能)
4. 総合精度	± 0.005 インチ
5. 復元精度	± 0.001 インチ
6. 走査速度	300 インチ/秒
7. フローティング・キーボード	24 キー (55 キーまで拡張可能)
8. スケール・ファクター	1、1/2、1/4、1/10
9. 可変スケール・ファクター	0.00001～1.00000 (2.99999 まで拡張可能)
10. 連続読取りモード/時間ベース	1 秒から出力装置の記録ステップ速度まで)
11. 連続読取りモード/距離ベース	0.004 インチより 0.999 インチまで
12. グリッド区分間隔	0.010 インチより 0.999 インチまで
13. 電 源	100—125V 50/60 Hz
14. 読取り可能メディア	紙、マイラー、アルミニウム、硝子、プラスチックその他類似物質。 ただし厚さ 0.10 インチまで (銅板は厚さ 0.01 インチまで)
15. 出力装置	磁気テープ・レコーダー

される。読み取りは、強震記録を読み取りテーブル上にセットし、ディジタイザーのカーソルを記録波形に沿ってスライドさせながら、任意の時間軸とそれに対応する加速度値をオペレーターの指示によりピック・アップすることにより行なっている。ここで、読取波形のピーク部や変曲点近傍では、読み取り間隔を細かくし、精度の向上を図るようにしている。また、読み取りに用いる用紙は、B 2 型強震計

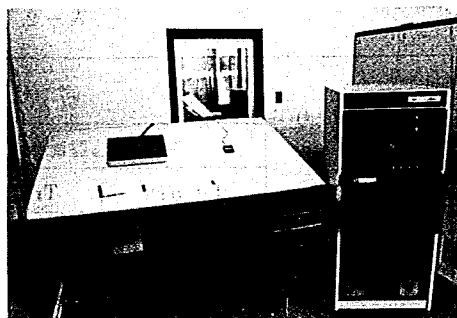


写真-1. ディジタイザーの構成

の場合には記録原紙を密着焼付けした印画紙を、Q 型強震計の場合にはスクラッチフィルムを 6.75 倍に拡大焼付けした印画紙をそれぞれ用いている。

このようにして読み取った記録波形は、図化機により印画紙に焼付けした実測記録波形と同一の縮尺で再生し、再生した波形と原波形を重ね合せて、目視により両者の一致の度合いを検討する。この段階で、再生波形と原波形が一致していないと判断された場合（現在までの実績では 10 % 程度）には、最初から読み直しを行なっている。原波形と一致しているとみなされた読取記録には、最小自乗法による中心軸補正、円弧補正、および刻時マークによる時間軸の補正を施したうえで、土木研究所の地震動記録総合検索システム¹⁶⁾に収録される。以上のような読取システムを図-1に示す。

3. 読取精度の検討方法

上記の読取システムの精度を検討するため、次のような方法で、読み取り記録の安定性を検討した。

まず、同一の読取人（佐賀大学実習生小倉宏君の手を煩わせた）が同一の焼付印画紙をもとに、5 回の読み取りを行ない、読取波形の一致度と、この波形の加速度応答スペクトル倍率曲線 β （減衰定数 $h = 0\%$ ）の一致度を検討した。

次に、異なる 4 人の読取人（上記実習生および土木研究所職員）が同一の焼付印画紙をもとに、それぞれ 1 回ずつ読み取り、波形および加速度応答スペクトル倍率曲線の一致度を検討した。対象とした記録は、1978 年宮城県沖地震による開北橋地盤上の記録（図-2 参照）および伊達橋橋脚上の記録（図-3 参照）であり、ともに、SMAC-B 2 型の強震計により観測されたものである。

4. 最大加速度の読取精度

表-2 は以上のようにして読み取った最大加速度の変動をまとめた結果であり、同一人が読み取った場合と、複数人が読み取った場合の両ケースを示している。

この結果によれば、同一人が読み取った場合には、最大加速度値は読み取り回数によらず、は

表-2. 最大加速度の変動

読み取り 回数	同一人の読み取り				複数人の 読み取り
	開北橋地盤記録		伊達橋橋脚記録		開北橋地盤記録
	Lg 方向	Tr 方向	Lg 方向	Tr 方向	Lg 方向
1	191.12	291.34	478.57	316.21	192.23
2	190.31	290.16	480.65	316.43	190.29
3	190.66	290.59	477.04	316.76	193.26
4	191.53	291.31	482.10	316.86	191.12
5	190.77	290.06	479.86	317.34	—
平均値 m	190.88	290.69	479.64	316.72	191.73
標準偏差 σ	0.465	0.611	1.938	0.433	1.296
変動係数 σ/m	2.44×10^{-3}	2.10×10^{-3}	4.04×10^{-3}	1.367×10^{-3}	6.76×10^{-3}

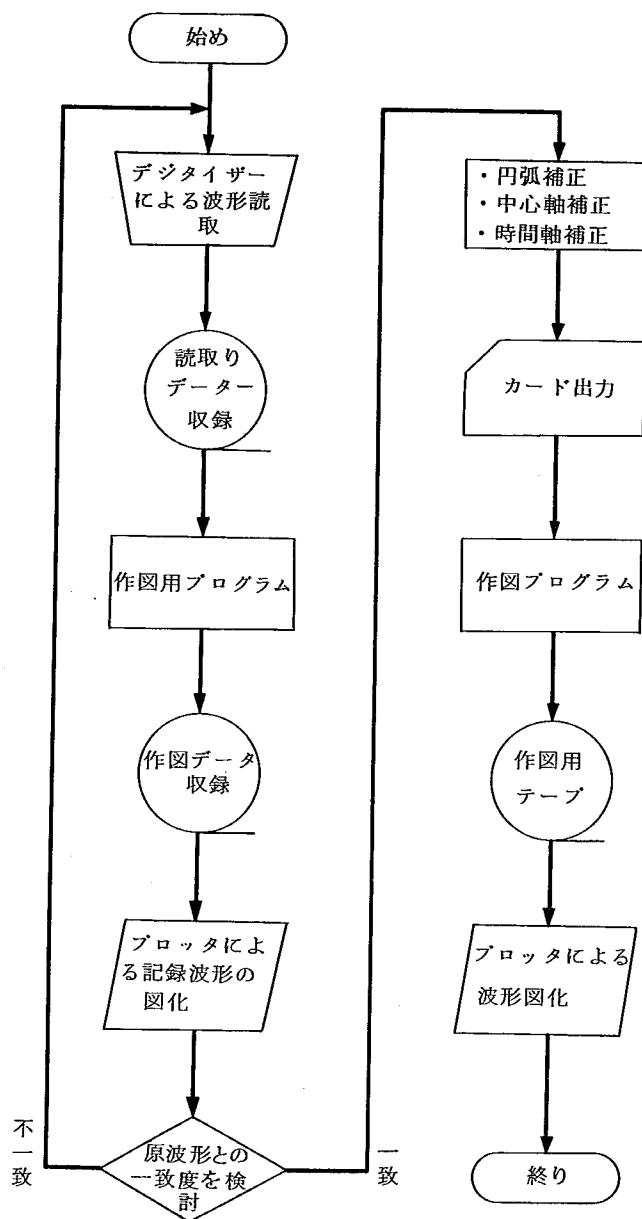
とんども同じであり、例えば、開北橋の橋軸方向の場合には5回平均の最大加速度が190.88 gal に対して標準偏差は0.465 gal であり、変動係数は 10^{-3} のオーダーである。一方、複数人が読み取った場合には、変動係数は同一人が読み取った場合に比較してやや大きくなる傾向にあり、読取人の習性が関係することを示唆している。

5. 加速度応答スペクトル倍率 β に対する影響

同一人が同一印画紙から5回読み取った加速度記録をもとに計算した β スペクトルの平均値とこれに標準偏差の1倍を加減した結果を図-5~8に示す。

また、異なる4人が同一印画紙から読み取った加速度記録をもとに計算した β スペクトル値とこれに標準偏差の1倍を加減した結果を図-9に示す。さらに、これらの関係を変動係数としてまとめた結果を図-10（同一人が読み取った場合）および図-11（複数人が読み取った場合）に示す。

これらの結果を総合すると、同一記録を多数回読み読った場合の β スペクトルの精度は、固有周期が0.2~2.0秒程度の範囲で最も高く（変動係数は約5%）、これより短周期および長周期の領域では精度が低下することがわかる。



図ー１ 読み取りシステムのフローチャート

KAIHOKU BRIDGE 302-GR-35 LG NO.3-2

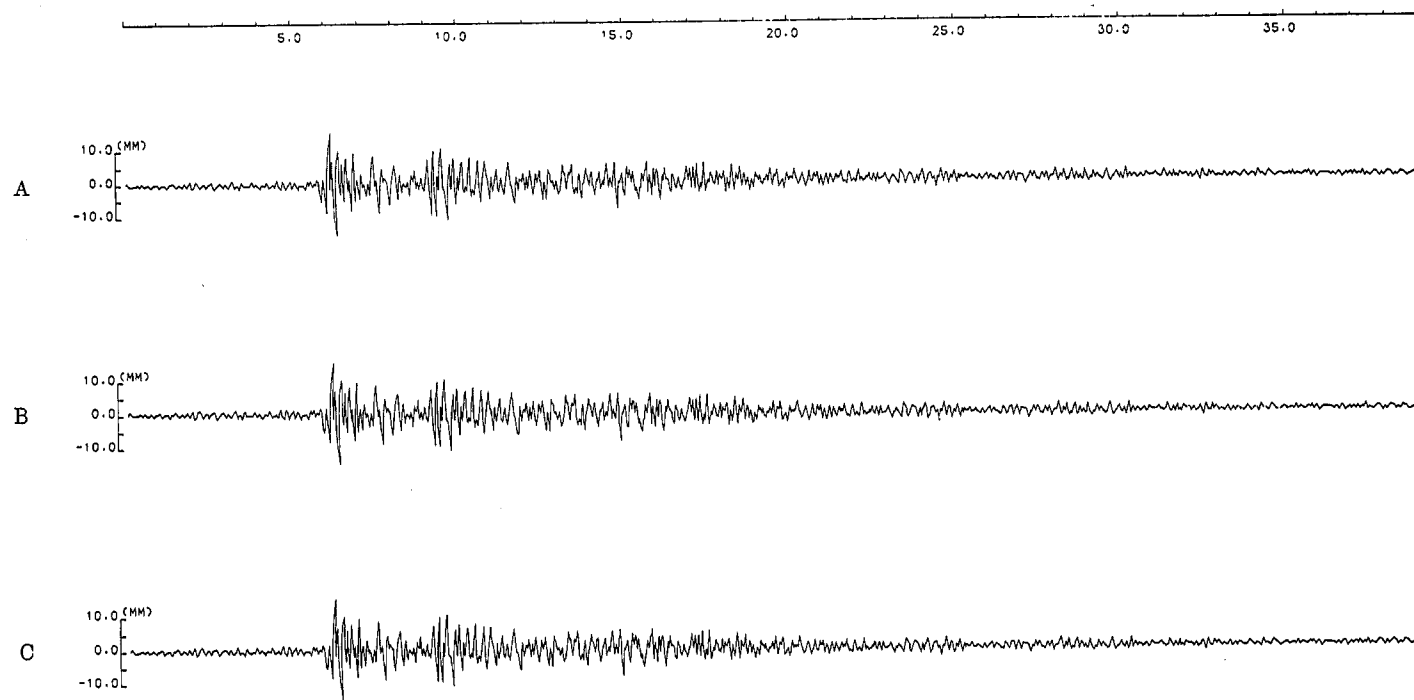


図-2 開北橋（地盤上）の記録（同一人による3回分の読取結果）

DATE BRIDGE 304-P2-41 TR NO.3-4

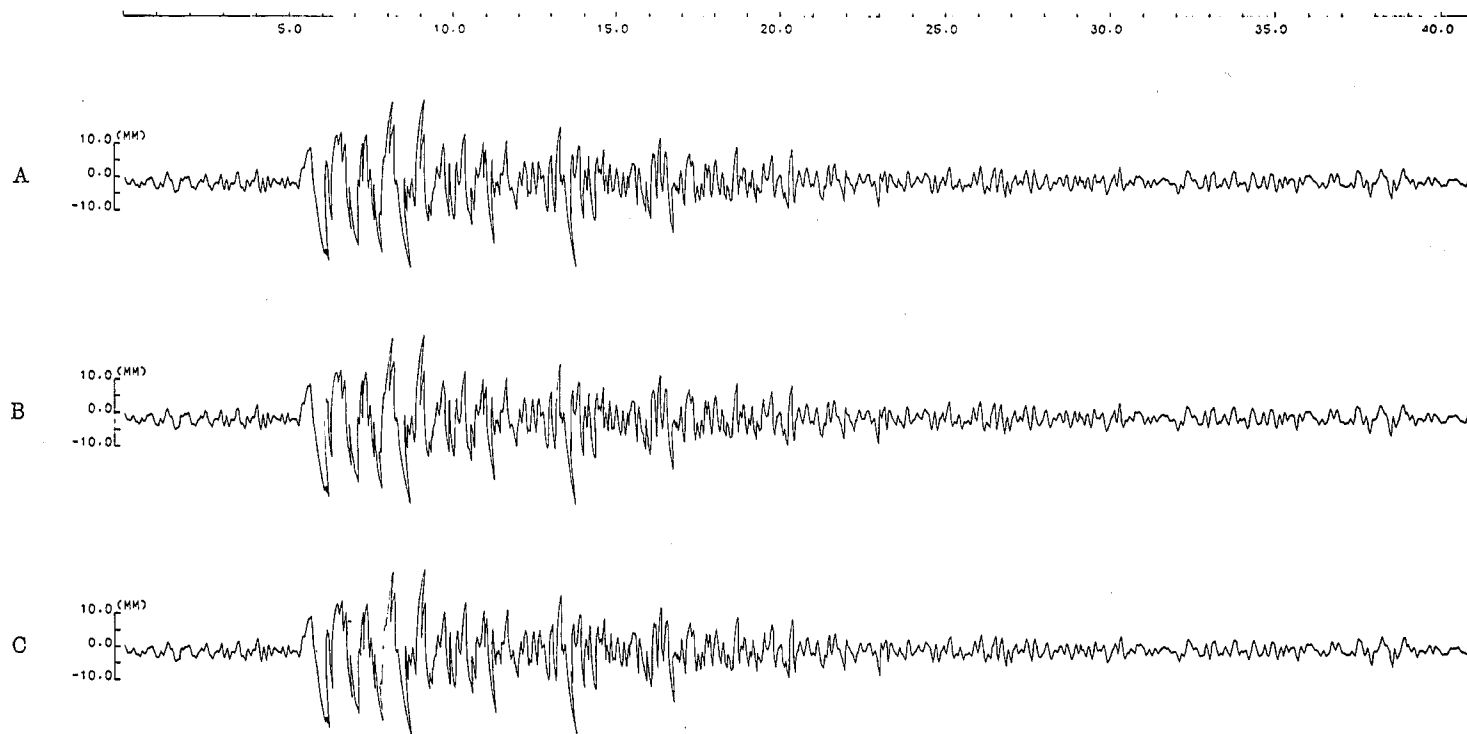


図-3 伊達橋(橋脚上)の記録(同一人による3回分の読取結果)

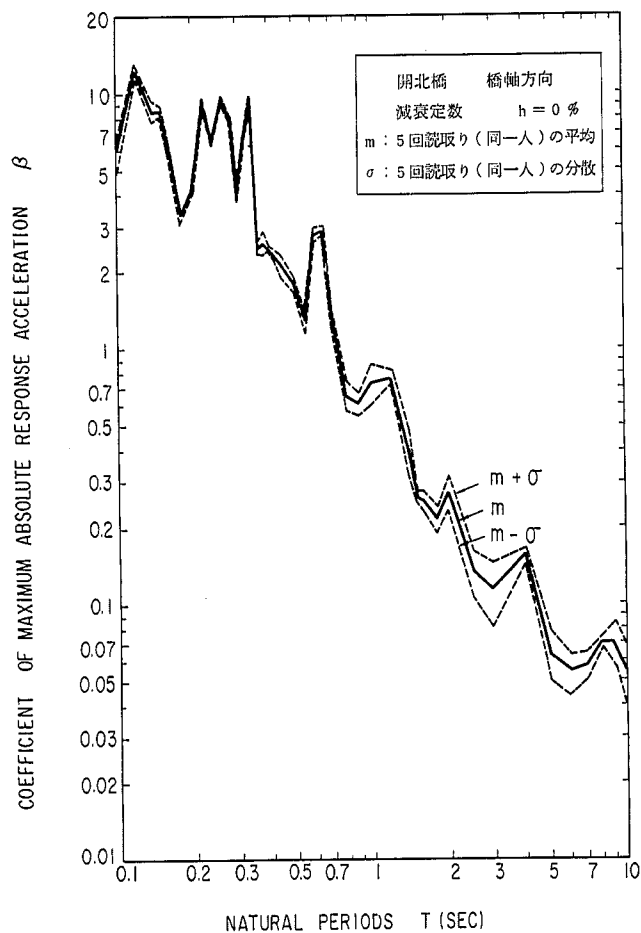


図-5 応答スペクトル倍率曲線の変動(同一読取人, 開北橋橋軸方向成分)

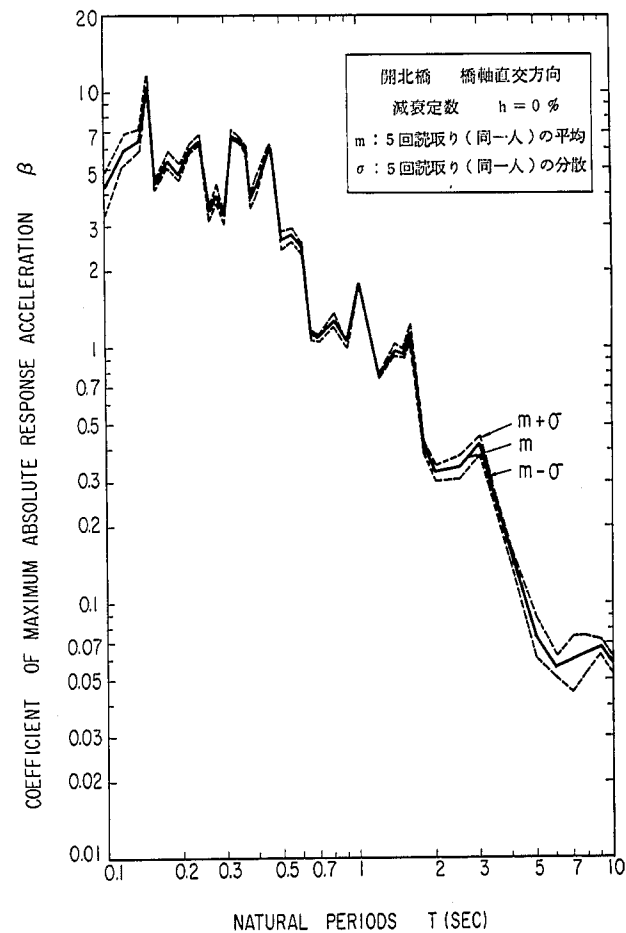


図-6 応答スペクトル倍率曲線の変動(同一読取人, 開北橋橋軸直交方向成分)

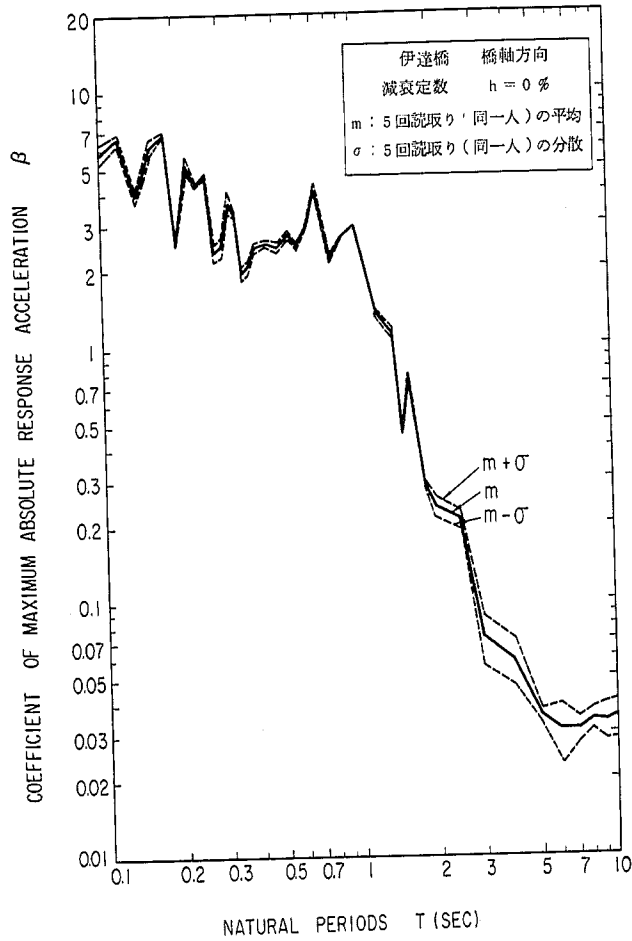


図-7 応答スペクトル倍率曲線の変動(同一読取人, 伊達橋橋軸方向成分)

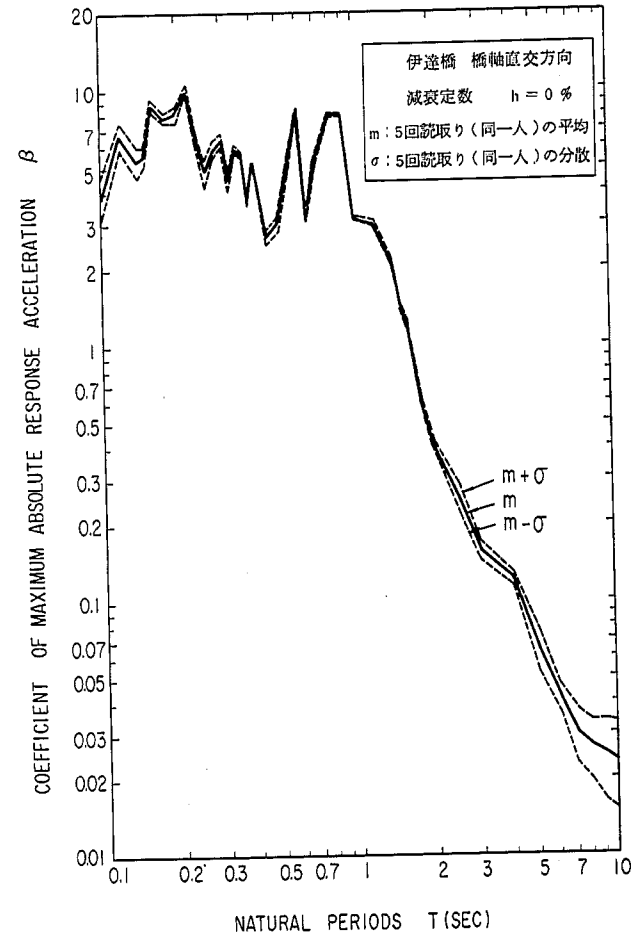


図-8 応答スペクトル倍率曲線の変動(同一読取人, 伊達橋橋軸直交方向成分)

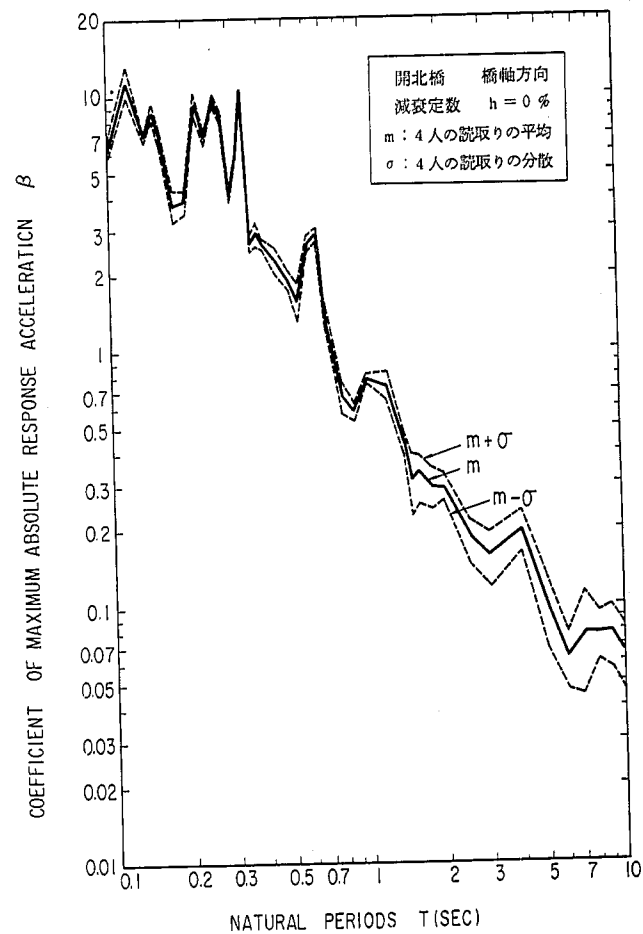


図-9 応答スペクトル倍率曲線の変動（複数読取人，開北橋橋軸方向成分）

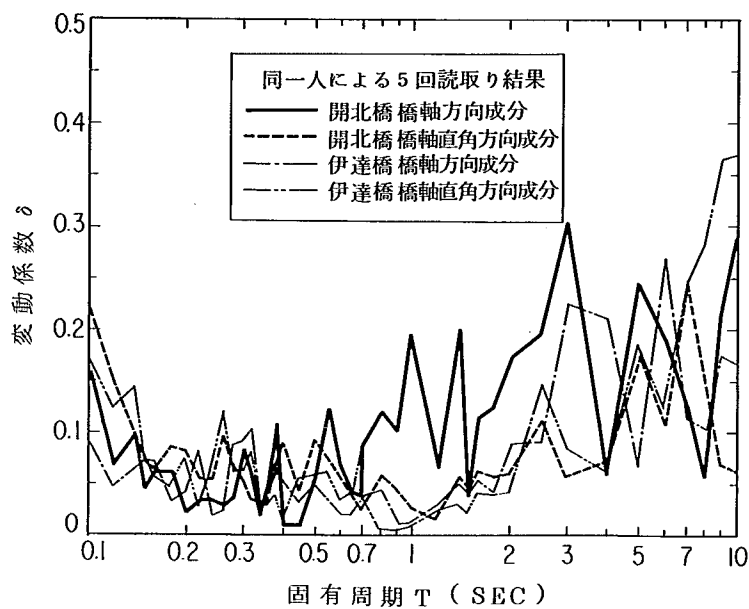


図-10 応答スペクトル倍率曲線の変動係数(同一読取人)

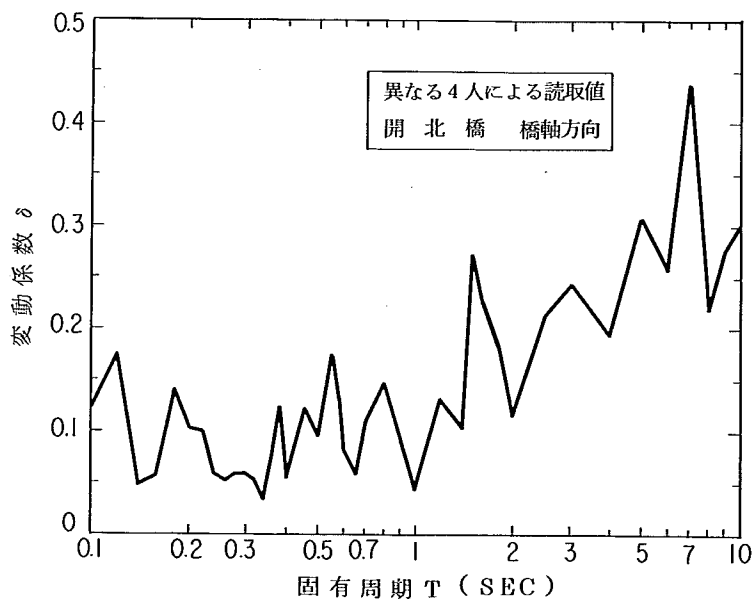


図-11 応答スペクトル倍率曲線の変動係数(複数読取人)

附属資料—3. 地震計の原理

1. はじめに

地震時の地盤の動きを捕えようと試みた装置で、歴史に残っている最初のものは、中国の後漢（136年）に張衡という人が製作したと伝えられている地動儀である。しかし、本格的に地震計の研究がされたのは19C末期であった。

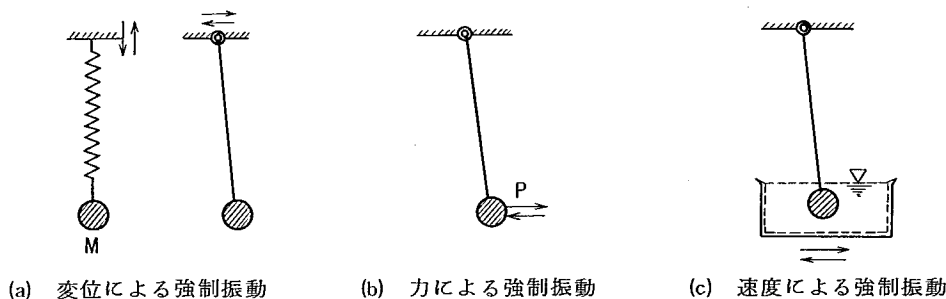
地震計は、土地の空間に対する運動を記録することが理想であるが、地震時に地面が動けば、地盤上にある物体はすべて動くから、現在の地震計は土地の空間に対する運動を間接的に記録する方法がとられている。すなわち、振動応答特性のはっきりわかっている物体と地盤との間の相対運動を記録し、その記録から応答特性のはっきりしている物体の運動の影響をとりぞくことにより、地盤の空間に対する運動を求めようとするわけである。

この振動特性のはっきりしている物体として、地震計には、広い意味での振子が利用される場合が多い。現在までに、主として使われている地震計の振子には、物体の慣性力を利用する方式と、固体の弾性を利用する方式とがある。

2. 振子の振動応答

一度何らかの方法で運動させた振子には、それ以後摩擦力以外は作用しない。この場合、振子は自己の慣性と復元力によって振動を行なう。この場合の振動を振子の自由振動（Free Vibration）という。これに対して、時々刻々、外部から振子に刺激を与えた場合の振子の運動を振子の強制振動（Forced Vibration）という。

強制振動には、図—1に示すように、いろいろの種類があるが、図(a)のように、振子の支えが振子の自由度方向に運動し、そのために生ずる振子の運動を、変位による強制振動といい、図(b)のように、振子に直接力が作用する場合を力による強制振動という。この他、図(c)のように、容器と振



図—1. 振子の強制振動

子の相対速度に比例した力が振子に加わる場合は速度による強制振動と呼ぶ。

一般に地震計に使われているのは、(a)の変位による強制振動である。以下、地震計の振子を支えている板が、ある運動を行なった時、振子が板に対してどのような運動をするかを考えよう。

3. 変位による強制振動

変位による強制振動の運動方程式を立てるに際し、説明の都合上、図-2のように、質量Mの振子がバネに支えられ、左右に直線的に振動する概念的な振子を考える。

図-2において、(1)は静止の状態、(2)は板がxだけ空間に対して変位した状態であって、この時、質量Mは板に対してy、空間に対してξだけの変位をしたことになる。

すなわち、

ξ : 質量Mの空間に対する 変位	} 絶対変位
x : 振子を支える板の空間 に対する変位	
y : 質量Mの板に対する変位 (相対変位)	

とすると、

$$\xi = x + y \quad (1)$$

空間に固定した座標系に対して、振子と板との間の相対速度 $\frac{dy}{dt}$ に比例した抵抗を考慮して運動方程式を立てると、次のようになる。

$$M \frac{d^2 \xi}{dt^2} + C \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (2)$$

ここで、

C : 減衰係数 (viscous damping coefficient)

k : バネ係数 (Spring coefficient)

(2)に(1)を代入すると、

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + C \frac{dy}{dt} + ky = -M \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3)$$

ここで、

$$n^2 = \frac{k}{M}, \quad \varepsilon = \frac{1}{2} \frac{C}{M} \quad (4)$$

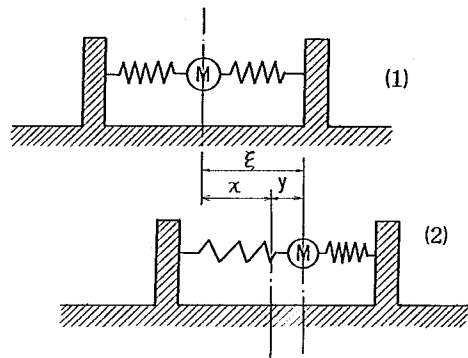


図-2. 振子の変位強制振動

とおくと、(3)はつぎのようになる。

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \varepsilon \frac{dy}{dt} + n^2 y = -\frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5)$$

(5)の右辺は、振子を支えている板の空間に対する変位 x 、すなわち、記録したい地震の変位による強制外力の項である。

今、簡単のため、 x が次式で表わされる単円振動の場合を考えると、

$$x = x_m \sin pt \quad (6)$$

(5)はつぎのようになる。

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \varepsilon \frac{dy}{dt} + n^2 y = x_m p^2 \sin pt \quad (7)$$

(7)の一般解は、つぎのようになる。

$$h > 1 : y = \Gamma_1 e^{-(\varepsilon + n\sqrt{h^2 - 1})t} + \Gamma_2 e^{-(\varepsilon - n\sqrt{h^2 - 1})t} + \frac{x_m}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2 u^2}} \sin(pt - \delta) \quad (8)$$

$$h = 1 : y = (\Gamma_1 + \Gamma_2 t) e^{-\varepsilon t} + \frac{x_m}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2 u^2}} \sin(pt - \delta) \quad (9)$$

$$h < 1 : y = e^{-\varepsilon t} (\Gamma_1 \cos(n\sqrt{1 - h^2}) + \Gamma_2 \sin(n\sqrt{1 - h^2})) + \frac{x_m}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2 u^2}} \sin(pt - \delta) \quad (10)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \tan \delta &= \frac{2hu}{u^2 - 1} \\ h &= \frac{\varepsilon}{n} (= \frac{C}{C_{cr}}) \\ u &= \frac{n}{p} (= \frac{T_p}{T_n}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

4. 変位計の原理

$h < 1$ の場合の振動は(10)で与えられる。(10)で、右辺の第1項は自由振動の項であり、第2項は強制振動の項に他ならない。自由振動の項には $e^{-\varepsilon t}$ がかかっているから、 t が十分大きくなれば、強制振動の項のみが残る。このような状態を定常状態 (Stationary state) という。

強制振動は、板の振動（＝地盤の空間に対する振動）と同じ周期 T_p を持ち、位相の遅れ δ を持つ単円振動である。振動は板の振動の振幅の

$$V_d = \frac{1}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2u^2}} \quad (12)$$

倍になっている。この V_d を変位応答係数（displacement response factor）という。

上述の変位応答係数 V_d と位相の遅れ δ はいずれも u, h の関数であるが、これを概念的に図示したのが図-3である。この図より、 u が十分小さい時には V_d は1に、 δ は 180° に近くなる。また、 h が小さい値（振子の減衰が小さい時）で、 $u = 1$ 付近では、 V_d が著しく大きな値となるが、これが、いわゆる共振現象（Resonance）である。

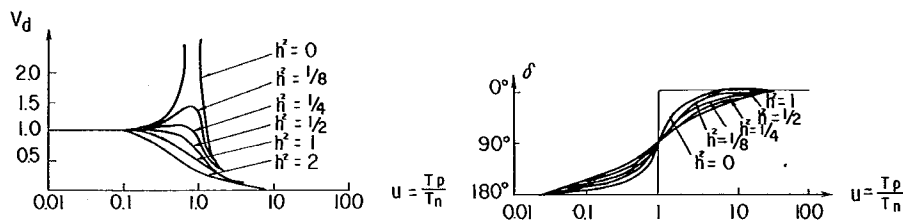


図-3. 変位応答係数 V_d と位相の遅れ δ の概念図

上述のように、 $h < 1$ 、 $u \ll 1$ の時には、 $V_d \approx 1$ 、 $\delta \approx 180^\circ$ となるから、定常状態においては、振子の振動 y はつぎのようになる。

$$y \approx x_m \sin(pt - 180^\circ) = -x_m \sin pt = -x \quad (13)$$

すなわち、振子の揺れ y は、地盤の運動の変位 x の符号を反対にしたものと等しい。したがって、振子の揺れを何らかの方法で記録すると、その記録はそのまま地盤の振動を伝えることになる。これが変位地震計（Displacement Seismograph）の原理である。

この場合、振子には、次の理由より適当な減衰を与える必要がある。

- (1) 一度誘発された自由振動をすみやかに減衰させるため
 - (2) 地盤の振動の周期と振子の周期が近くなった時、共振現象を防ぐため
- 一般に、振子の減衰定数は $h \approx 0.7 \sim 1.0$ 程度にとられることが多い。

5. 加速度計の原理

変位計は $h < 1$ 、 $u \ll 1$ の場合であったが、加速度計では $h < 1$ 、 $u \gg 1$ 、すなわち、振子の周期に比べて、外力の振動の周期が非常に大きい場合を考える。

(10)で、定常状態を考え、強制振動の項のみを考えると、

$$\begin{aligned}
y &= \frac{x_m}{\sqrt{(u^2-1)^2 + 4h^2u^2}} \sin(pt - \delta) \\
&= \frac{1}{u^2} \cdot \frac{x_m}{\sqrt{(1-\frac{1}{u^2})^2 + \frac{4h^2}{u^2}}} \sin(pt - \delta) \\
&= \frac{1}{n^2} \cdot \frac{x_m p^2}{\sqrt{(1-\frac{1}{u^2})^2 + \frac{4h^2}{u^2}}} \sin(pt - \delta) \\
&= \frac{1}{n^2} \cdot V_a \cdot x_m p^2 \sin(pt - \delta)
\end{aligned} \tag{14}$$

ここで、

$$V_a = \frac{1}{\sqrt{(1-\frac{1}{u^2})^2 + \frac{4h^2}{u^2}}} \quad : \text{加速度応答係数 (acceleration response factor)} \tag{15}$$

加速度応答係数 V_a は、 u, h の関数であるが、これを図示すると、図-4 のようになる。

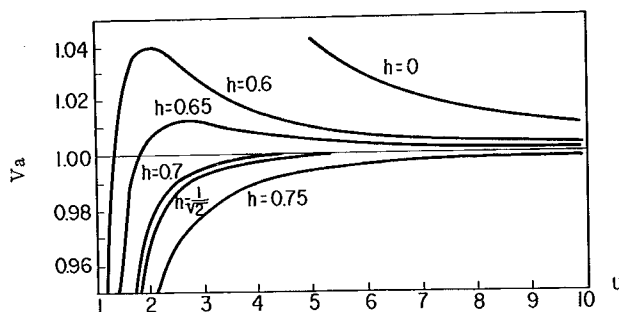


図-4. 加速度応答係数 V_a

今、 $u^2 \gg 1$ であるから、

$$V_a \simeq 1, \quad \tan \delta = \frac{2hu}{u^2-1} \simeq 0 \quad (\delta = 0) \tag{16}$$

となり、(14)はつぎようになる。

$$y \simeq \frac{1}{n^2} x_m p^2 \sin pt = -\frac{1}{n^2} \frac{d^2x}{dt^2} \tag{17}$$

すなわち、振子の振れ y は、地震の空間に対する振動の加速度に比例したものとなる。これが加速度計の原理である。

$h = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 近くにとると、図-4からわかるように、 u のかなり広い範囲にわたって $V_v \simeq 1$ となる。

6. 速度計の原理

変位計、加速度計は $h < 1$ の場合であったが、速度計は $h \gg 1$ 、すなわち、振子に作用する減衰が非常に大きい場合である。

$h > 1$ の場合には、振子の振動は(8)で表わされる。この場合も、 $(\epsilon \pm n\sqrt{h^2 - 1}) > 0$ であるので、自由振動の項は時間とともに減衰し、定常状態においては強制振動の項のみが残る。すなわち、

$$y = \frac{x_m}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2 u^2}} \sin(pt - \delta) \quad (18)$$

(18)を変形すると、

$$\begin{aligned} y &= \frac{x_m p}{2\epsilon \sqrt{(\frac{u^2 - 1}{2hu})^2 + 1}} \sin(pt - \delta) \\ &= \frac{1}{2\epsilon} \cdot V_v \cdot x_m p \sin(pt - \delta) \end{aligned}$$

ここで、

$$V_v = \frac{1}{\sqrt{(\frac{u^2 - 1}{2hu})^2 + 1}} \quad (20)$$

今、 $h \gg 1$ で、 u が1付近を考えると、

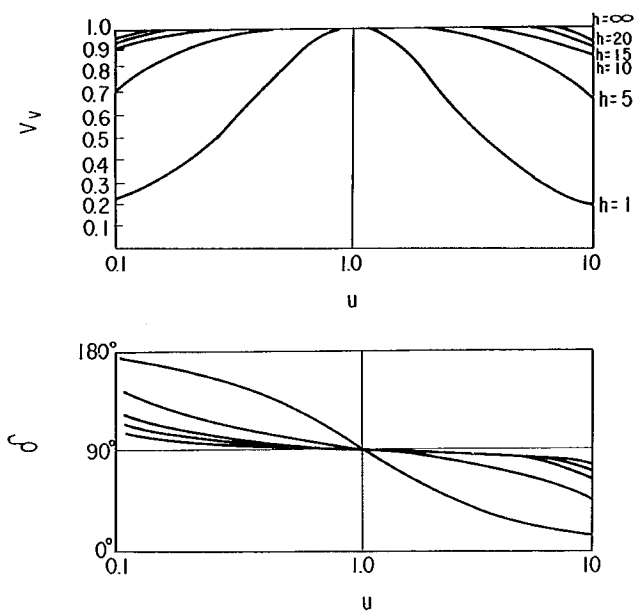
$$V_v \simeq 1 \quad \tan \delta = \frac{2hu}{u^2 - 1} \rightarrow \infty \quad (\delta = 90^\circ) \quad (21)$$

となり、(19)はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} y &\simeq \frac{1}{2\epsilon} x_m p \sin(pt - 90^\circ) = -\frac{1}{2\epsilon} x_m p \cos pt \\ &= -\frac{1}{2\epsilon} \frac{dy}{dt} \end{aligned} \quad (22)$$

すなわち、振子の振れは、外部の振動速度に比例している。これが、速度計の原理である。

図-5に速度応答係数 V_v 、および位相の遅れ δ の変化を示す。



図－5. 速度応答係数 V_v および位相の遅れ δ

7. まとめ

上述の結果をまとめると、表－1 のようになる。

表－1. 地震計の条件

周期に対する条件	標準減衰比	測定記録
$T_n \gg T_p$	$h = 0.7 \sim 1$	変位
$T_n \div T_p$	$h = 5$	速度
$T_n \ll T_p$	$h = 0.7 \sim 1$	加速度

地震計には、通常、変位計、速度計、加速度などの名称が用いられるが、同一の地震計であっても振子の固有周期と地震動の周期との関係によって、表－1 のように測定記録の性質が異なる。したがって、これらの名称は固有なものではなく、むしろ、固有周期何秒の地震計と表現するのが正確な表わし方といえよう。

なお、SMAC－B 2 型強震記録計は固有周期 $T_1 = 0.14$ 秒、減衰比 $h = 1$ の加速度計である。

$$\text{(付録)} \quad \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\epsilon \frac{dy}{dt} + n^2 y = x_m p^2 \sin pt \quad \text{の解} \quad (\text{A}-1)$$

上式の一般解は斉次方程式の解に、特解を加えたものである。

(1) 斉次方程式

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\epsilon \frac{dy}{dt} + n^2 y = 0 \quad (\text{A}-2)$$

$y = \Gamma e^{st}$ とおけば、特性方程式は、

$$S^2 + 2\epsilon S + n^2 = 0 \quad (\text{A}-3)$$

(A-3) の根を S_1 、 S_2 とすれば、(A-2) の解は、 Γ_1 、 Γ_2 を任意定数として、

$$\left. \begin{aligned} y &= \Gamma_1 e^{S_1 t} + \Gamma_2 e^{S_2 t} & S_1 \neq S_2 \\ y &= (\Gamma_1 + \Gamma_2 t) e^{S_1 t} & S_1 = S_2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A}-4)$$

となる。

(A-3) より、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon^2 > 4n^2 & \dots\dots\dots S_1, S_2 = -\epsilon \pm \sqrt{\epsilon^2 - n^2} \\ \epsilon^2 = 4n^2 & \dots\dots\dots S_1 = S_2 = -\epsilon \\ \epsilon^2 < 4n^2 & \dots\dots\dots S_1, S_2 = -\epsilon \pm \sqrt{n^2 - \epsilon^2} i \end{aligned} \right\} \quad (\text{A}-5)$$

$\epsilon = \frac{1}{2} \frac{C}{M}$ 、 $n^2 = \frac{k}{M}$ であるから、 $\epsilon^2 = n^2$ 、すなわち、 $\epsilon = n$ の時には $\frac{1}{2} \frac{C}{M} = \sqrt{\frac{k}{M}}$ より、 $C = 2\sqrt{Mk}$ となる。この場合の減衰係数 C のことを限界減衰 (Critical Damping) といい、 C_{cr} で表わす。すなわち、

$$C_{cr} = 2\sqrt{Mk} \quad (\text{A}-6)$$

また、限界減衰 C_{cr} に対する減衰係数 C の比を減衰比 (damping ratio) といい、 h で表わす。すなわち、

$$h = \frac{C}{C_{cr}} = \frac{2M\epsilon}{2\sqrt{Mk}} = \frac{\epsilon}{\sqrt{\frac{k}{M}}} = \frac{\epsilon}{n} \quad (\text{A}-7)$$

減衰比 h を用いると、(A-5) はつぎのように書き改められる。

$$\left. \begin{array}{ll} h > 1 & S_1, S_2 = -\epsilon \pm n\sqrt{h^2 - 1} \\ h = 1 & S_1 = S_2 = -\epsilon \\ h < 1 & S_1, S_2 = -\epsilon \pm n\sqrt{1 - h^2} i \end{array} \right\} \quad (A-8)$$

したがって、斉次方程式の解はつぎのようになる。

$$h > 1 \quad y = \Gamma_1 e^{-(\epsilon + n\sqrt{h^2 - 1})t} + \Gamma_2 e^{-(\epsilon - n\sqrt{h^2 - 1})t} \quad (A-9)$$

$$h = 1 \quad y = (\Gamma_1 + t\Gamma_2) e^{-\epsilon t} \quad (A-10)$$

$$h < 1 \quad y = e^{-\epsilon t} (\Gamma_1 \cos(n\sqrt{1 - h^2}) + \Gamma_2 \sin(n\sqrt{1 - h^2})) \quad (A-11)$$

(2) 特 解

(A-1) の特解を求めるために、

$$y = A \sin pt + B \cos pt \quad (A-12)$$

とおく。(A-12) を (A-1) に代入して、両辺の $\sin$ 、 $\cos$ の係数を等置して、

$$-A p^2 - 2B\epsilon p + A n^2 = x_m p^2$$

$$-B p^2 + 2A\epsilon p + B n^2 = 0$$

より、

$$A = \frac{(n^2 - p^2) x_m p^2}{(n^2 - p^2)^2 + 4\epsilon^2 p^2}, \quad B = -\frac{2\epsilon p x_m p^2}{(n^2 - p^2)^2 + 4\epsilon^2 p^2} \quad (A-13)$$

したがって、(A-1) の特解はつぎのようになる。

$$y = \frac{(n^2 - p^2) x_m p^2}{(n^2 - p^2)^2 + 4\epsilon^2 p^2} \sin pt - \frac{2\epsilon p x_m p^2}{(n^2 - p^2)^2 + 4\epsilon^2 p^2} \cos pt \quad (A-14)$$

あるいは、

$$y = \frac{x_m p^2}{\sqrt{(n^2 - p^2)^2 + 4\epsilon^2 p^2}} \sin(pt - \delta) \quad (A-15)$$

$$\tan \delta = \frac{2\epsilon p}{n^2 - p^2}$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} T_n : \text{振子の固有周期} &= 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}} = \frac{2\pi}{n} \\ T_p : \text{板の振動の周期} &= \frac{2\pi}{p} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A} - 16)$$

として、 $n = \frac{2\pi}{T}$ 、 $p = \frac{2\pi}{T_p}$ の比を考える。

$$u = \frac{n}{p} = \frac{T_p}{T_n} \quad (\text{A} - 17)$$

振子の固有周期と地震動の周期の比 u を用いると、(A-15) はつぎのように書き改められる。

$$y = \frac{x_m}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2u^2}} \sin(pt - \delta) \quad (\text{A} - 18)$$

$$\tan \delta = \frac{2hu}{u^2 - 1}$$

(3) 一般解

(A-9)、(A-10)、(A-11)、(A-18) より、(A-1) の一般解は次のようになる。

$$\begin{aligned} h > 1 : \quad y = & F_1 e^{-(\epsilon + n\sqrt{h^2 - 1})t} + F_2 e^{-(\epsilon - n\sqrt{h^2 - 1})t} \\ & + \frac{x_m}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2u^2}} \sin(pt - \delta) \end{aligned} \quad (\text{A} - 19)$$

$$\begin{aligned} h = 1 : \quad y = & (F_1 + F_2 t) e^{-\epsilon t} \\ & + \frac{x_m}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2u^2}} \sin(pt - \delta) \end{aligned} \quad (\text{A} - 20)$$

$$\begin{aligned} h < 1 : \quad y = & e^{-\epsilon t} (F_1 \cos(n\sqrt{1 - h^2}) + F_2 \sin(n\sqrt{1 - h^2})) \\ & + \frac{x_m}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4h^2u^2}} \sin(pt - \delta) \end{aligned} \quad (\text{A} - 21)$$