

土 木 研 究 所 資 料

高密度強震観測用デジタル強震計の記録精度
に関する実験的検討

昭和58年 8 月

建設省土木研究所
地震防災部振動研究室

Copyright © 1983 fiscal year by P.W.R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。
したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ま え が き

建設省土木研究所では、昭和56年度より駿河湾周辺の相良、焼津、沼津等で高密度強震観測を実施しており、観測には16ビットのA/D変換機能を有する同一仕様のデジタル強震計を使用している。高密度強震観測の目的は、地震動に及ぼす地盤条件を明らかにするとともに、地震時に地盤に生じるひずみや波動の伝播特性を検討することであるが、このためには、地震動の加速度を正しく測定することが必要であり、また、これから計算で求めた速度および変位も精度の高いものでなければならない。このために、小型振動台を用いた強震計の加振実験により、強震計の加速度記録およびこれから数値積分により求めた変位の精度を検討し、数値積分時の遮断振動数を検討した。また、A/D変換のビット数および記録時間間隔が変位の再現性に及ぼす影響を検討した。

本報告は、これら一連の実験結果をとりまとめ、高密度強震観測用強震計の特性およびこれにより得られる記録の精度に関して報告するものである。

昭和58年8月

建設省土木研究所地震防災部振動研究室

室 長 荒 川 直 士

主任研究員 川 島 一 彦

研 究 員 田 村 敬 一

相 沢 興

高 橋 和 之

目 次

ま え が き

1. 概 説	1
2. 実験装置および実験方法	2
2.1 概 説	2
2.2 実験装置	2
2.3 実験方法	4
3. 記録精度の検討	16
3.1 変位の計算方法	16
3.2 変位の精度	17
3.3 数値フィルターの遮断振動数の影響	17
3.4 A/D変換器のビット数の影響	18
3.5 サンプリング間隔の影響	20
3.6 強震計相互間の変位の再現性	20
4. 結 論	41
参 考 文 献	42
付属資料1 数値積分に及ぼすビット数とサンプリング間隔の影響の検討	43
付属資料2 地震動波形の数値微分精度に関する検討	49
付属資料3 刻時用時計の精度の検討結果	73

1. 概 説

建設省土木研究所では、昭和 56 年度より、特定地域に多数の強震計を系統的に配置し、三次元的な地盤振動を観測する高密度強震観測を行っている。^{5)~11)} 高密度強震観測では、個別記録方式を採用し、16ビット A/D 変換器を有するデジタル強震計が使用されている。高密度強震観測で得られる記録は、地震動に及ぼす地盤条件の影響の解析の他に、地震時の地盤ひずみの解析、地震波の伝播特性の解析等、各種の解析に用いられるが、こうした解析に用いる前に、記録波形が所期の精度を有しているかどうかの検討が必要とされる。記録の解析目的に照らして、精度の検討が必要とされる事項を示すと以下ようになる。

- (i) 地震動の伝播特性を検討するためには、低振動数から高振動数に至る広い振動数帯域内で加速度波形を正しく測定する必要がある。振幅の大きい波形の観測は比較的問題が少ないと考えられるが、振幅の小さい波形の精度が、A/D 変換のビット数やサンプリング間隔によってどのように変化するかの検討が必要とされる。
- (ii) 地震時の地盤ひずみを解析するために、加速度記録から変位波形を計算で求めなければならない。一般に、数値積分により、加速度波形から変位波形を求める際には、長周期成分のノイズがあると、このために変位波形が発散することがある。したがって、一般に、数値積分に際しては、長周期成分を除去するのが普通であるが、本強震計では、どの程度の周期までを数値積分に見込めるかの検討が必要とされる。
- (iii) 従来の個々の箇所における強震観測では、強震計の感度および特性に多少のばらつきがあっても、解析には、測定された波形をそのまま使用するため、これらがあまり問題となることは少ない。しかしながら、高密度強震観測では、観測点相互の波形の比較が主目的であるため、強震計間の感度および特性を厳しく知ることが必要とされる。たとえば、地震時の地盤ひずみを求めるためには、任意の 2~3 箇所における記録間の差が重要であり、仮に、強震計同士の感度や特性がばらばらであると、計算された地盤ひずみは全く役に立たないことになる。したがって、強震計ごとの感度および特性は、現地設置前の検査、および現地設置後の感度校正等により、極力揃えるようにしているが、これらが現実的に有しているばらつきにより、どの程度の影響が生じるかを検討しておくことが重要となる。

本研究は、以上のような強震計に必要な精度を動電型の小型振動台を用いた加振実験により検討したものであり、以下 2 章においては、実験装置およびデジタル強震計の概要、実験方法を示す。3 章では、強震計で得られた加速度記録を数値積分して変位を求める際の遮断振動数を検討し、A/D 変換のビット数およびサンプリング間隔が変位の再現性に及ぼす影響について示す。さらに、地盤ひずみを計算する際の基礎となる複数の強震計間の変位の再現性について示す。最後に、4 章では、本検討結果から得られた結論を示す。

2. 実験装置および実験方法

2.1 概 説

強震計の精度および特性を検討するために、振動台の加振実験を行い、台の振動を真の値とみなして、強震計により観測される振動がこれをどの程度再現しているかを検討することとした。この際に、振動台の動きをどの程度正しく測定することができるかが重要となる。どのように正しく測定したつもりでも測定値はどこまでも測定値であり、真値ではないが、一応、特性にくせの少ない機器を選定し、これにより測定した値が真値であると取り扱うことにした。また、振動台の加速度波形と強震計により得られる加速度波形を比較すると、両者は非常に良く一致しており、この程度の比較では、強震計の精度の検討としては十分でないと考えられたため、以下の手順により、数値積分の記録を検討することとした。

- (i) 強震計により観測された加速度記録を $a(t)$ とし、これを周波数領域で2回数値積分した変位 $d(t)$ を計算する。
- (ii) $d(t)$ の計算に際しては、低振動数側の遮断振動数、AD変換のビット数、および積分時間間隔を変化させ、これらの影響を検討する。
- (iii) 直接測定した振動台の変位を $D(t)$ とし、これと $d(t)$ を比較する。

2.2 実験装置

実験装置は、図 2.1 に示すように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、動電型小型振動台（強震計検定装置）上にデジタル強震計を設置して後述の実験を行った。加振方向は水平1方向とし、強震計の水平方向1成分が加振方向となるように強震計を固定した。実験装置およびデジタル強震計の特性は以下のとおりである。

(1) 振 動 台

本実験に用いた振動台は、土木研究所所有の強震計検定装置であり、主要な仕様は、表 2.1 に示すとおりである。本装置の特徴は、 ± 20 cmの加振ができるため、比較的低振動数領域の地震動に対する再現性が良いことと、動電型であるため、振動波形にノイズが少なく、きれいなことである。

(2) 計測システム

実験に際しては、(i)振動台の加速度および(ii)振動台の変位を計測し、これらと強震計により収録した加速度記録との比較を行うことにした。(i)および(ii)の測定は、それぞれ、変位帰還型サーボ加速度計および差動トランス型変位計によって行い、強震計検定装置に付属する12ビットAD変換器で変換したのち、デジタルデータをオープンMTに収録した。

(3) デジタル強震計^{9), 10)}

本実験で用いた強震計は、相良地区および焼津地区の高密度強震観測場で観測に供している強震計と同一仕様の強震計である。記録は水平2成分、鉛直1成分の合計3成分が可能であり、換振器には速度帰還型サーボタイプ加速度計を使用している。換振器からの信号は、AD変換器により数値化され、自動時刻校正された時刻情報（タイムコード）とともにデジタルカートリッジに記録される。AD変換は、逐次

比較方式の16ビットAD変換器により、1/200秒間隔で行う。また、時刻修正は公称精度 10^{-7} （月差0.3秒）の水晶時計を毎正時にNHKの時報で自動校正することにより行う。なお、デジタル強震計の主要な仕様は表2.2に示すとおりであり、また、水晶時計の精度を現地で確認した結果は付属資料3に示すとおりである。

次に、強震計の振幅特性および位相特性は以下のとおりである。すなわち、換振器からAD変換器に至るまでの回路構成は、図2.2に示すとおりであり、各段階での振幅特性および位相特性は次のようになる。

1) 換振器

換振器の構成は、図2.3に示すとおりである。地動加速度と出力電圧 E_s との振幅特性 $A_1(\omega)$ および位相特性 $\phi_1(\omega)$ は、それぞれ、次式で与えられる。

$$A_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1-u^2}{2hu}\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\phi_1(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{2hu}{1-u^2} \right) - \frac{\pi}{2} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、

$$u = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 31.4 [1/\text{sec}]$$

h : 減衰定数 ($h = 240$)

f_0 : 振子の固有振動数 ($f_0 = 5 \text{ Hz}$)

2) ドリフト除去用ハイパスフィルター

強震計の傾斜等による長周期のドリフトを除去するため、図2.4に示すハイパスフィルターを用いている。入力電圧 E_s と出力電圧 E_u との振幅特性 $A_2(\omega)$ 、および位相特性 $\phi_2(\omega)$ は、それぞれ、次のように与えられる。

$$A_2(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\phi_2(\omega) = -\tan^{-1} \frac{1}{\omega CR} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、

$$C = 10 [\mu F]$$

$$R = 1 [M\Omega]$$

なお、式(2.4)の符号がマイナスであることは、出力電圧 E_u の位相が入力電圧 E_s の位相に対し

て進むことを意味している。

3) エリアジングフィルター

エリアジングフィルターは、図 2.5 に示す RC 2 次ローパスフィルターであり、入力電圧 E_u と出力電圧 E_a との振幅特性 $A_3(\omega)$ および位相特性 $\phi_3(\omega)$ は、それぞれ、次式で与えられる。

$$A_3(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - u_c^2)^2 + \left(\frac{u_c}{Q}\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\phi_3(\omega) = \tan^{-1} \frac{\frac{u_c}{Q}}{1 - u_c^2} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、

$$u_c = \frac{\omega}{\omega_c}$$

$$\omega_c = 347 [1/\text{sec}]$$

$$Q = 0.73$$

4) 強震計の振幅および位相特性

式 (2.1) ~ (2.6) より、強震計の総合的な振幅特性 $A(\omega)$ および位相特性 $\phi(\omega)$ は、それぞれ、次のようになる。

$$A(\omega) = A_1(\omega) \cdot A_2(\omega) \cdot A_3(\omega) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\phi(\omega) = \phi_1(\omega) + \phi_2(\omega) + \phi_3(\omega) \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

また、式 (2.7)、(2.8) による $A(\omega)$ および $\phi(\omega)$ を示すと、図 2.6 のようになる。

2.3 実験方法

加振実験では、表 2.3 に示すように 5 種類の実測記録に遮断振動数を 20 Hz としたローパスフィルターをかけたものを振動台への入力として用いた。これは、変位の精度には高振動数側の成分はあまり重要ではないため、この程度の振動数まで考慮すれば実用上問題がないと考えたためである。また、実験ケースとしては、表 2.4 に示すように 5 種類の入力地震動のそれぞれに対して、加速度レベルを 2 種類に変えることにより、合計 10 ケースとした。

実験ケースごとに振動台の加速度をサーボ加速度計により測定した結果を図 2.7 に示す。また、これらのフーリエスペクトルは、図 2.8 に示すとおりである。図 2.8 からわかるように、入力地震動は、富津岬記録のように短周期で卓越するタイプのものから、南港記録のように長周期で卓越するものまで、広い周期範囲をカバーするように選定している。また、継続時間が、精度に及ぼす影響を検討するために、継続時間の観点からも種々変化するよう地震動を選定している。

表 2.1 強震計検定装置の主要諸元

摘 要	諸 元	摘 要	諸 元
加振振動数範囲	0.5~100Hz(アナログ制御の場合) 0.1~20Hz(デジタル制御の場合)	最大載荷重量	100 kg
加振方向	水平または上下方向(切換式)	振動台寸法	800×800 mm
最大加振力	60 kg・G	型 式	動電型
最大加速度	1.4 G(無載荷時) 0.84 G(100 kg載荷時)	加振制御	アナログ制御またはデジタル制御
最大速度	60 cm/sec	加振モード	正弦波またはランダム波
最大変位	20 cm	データ収録チャンネル数	10 ch
		データサンプル長	90 sec(10 msecで10ch収録時)
		サンプリング間隔	10~100,000 msec

表 2.2 実験に用いたデジタル強震計の主要仕様

換振部	タ イ プ	速度帰還型サーボタイプ加速度計
	フルスケール	±1,000 gal
	固有振動数	5 Hz
	減衰定数	240
起動部	感振方向	上下成分
	起動加速度	5 gal(可変)
記録部	方 式	デジタル(16ビット)
	成分数	信号3, 時間1, 計4
	テ ー プ	デジタルカートリッジテープ
	ダイナミックレンジ	96 dB(公称値)
	サンプリング間隔	1/200 秒
	記録時間	約30分
	遅延時間	5 秒
タイムコード	時計精度	10 ⁻⁷ (公称値)
	自動時刻校正	NHK時報により毎正時に校正

表 2.3 加振実験に入力として用いた強震記録

発生年月日	地震名	マグニチュード	震央距離 [km]	記録地点
1972. 2. 29	八丈島近海地震	7.1	300	富津岬地盤上 (NS成分)
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)
1974. 8. 4	栃木-茨城県境の地震	5.8	90	扇島地盤上 (EW成分)
1980. 6. 29	伊豆半島東方沖の地震	6.7	47	沼津バイパス地盤上 (NS成分)
1968. 8. 6	豊後水道沖地震の余震	5.3	18.4	板島橋周辺地盤上 (LG成分)

表 2.4 加振実験の一覧

実験 番号	強震記録	最大応答値		
		振動台加速度 [gal]	振動台変位 [cm]	強震計加速度 [gal]
1-a	富津岬記録	191.8	2.8	196.2
1-b		779.2	11.9	806.7
2-a	南港記録	129.8	4.5	133.9
2-b		458.7	16.3	469.9
3-a	扇島記録	188.6	3.5	196.0
3-b		639.4	9.2	656.4
4-a	沼津記録	257.0	1.2	274.3
4-b		693.0	3.1	746.1
5-a	板島橋記録	237.3	0.8	257.7
5-b		714.9	2.5	782.5

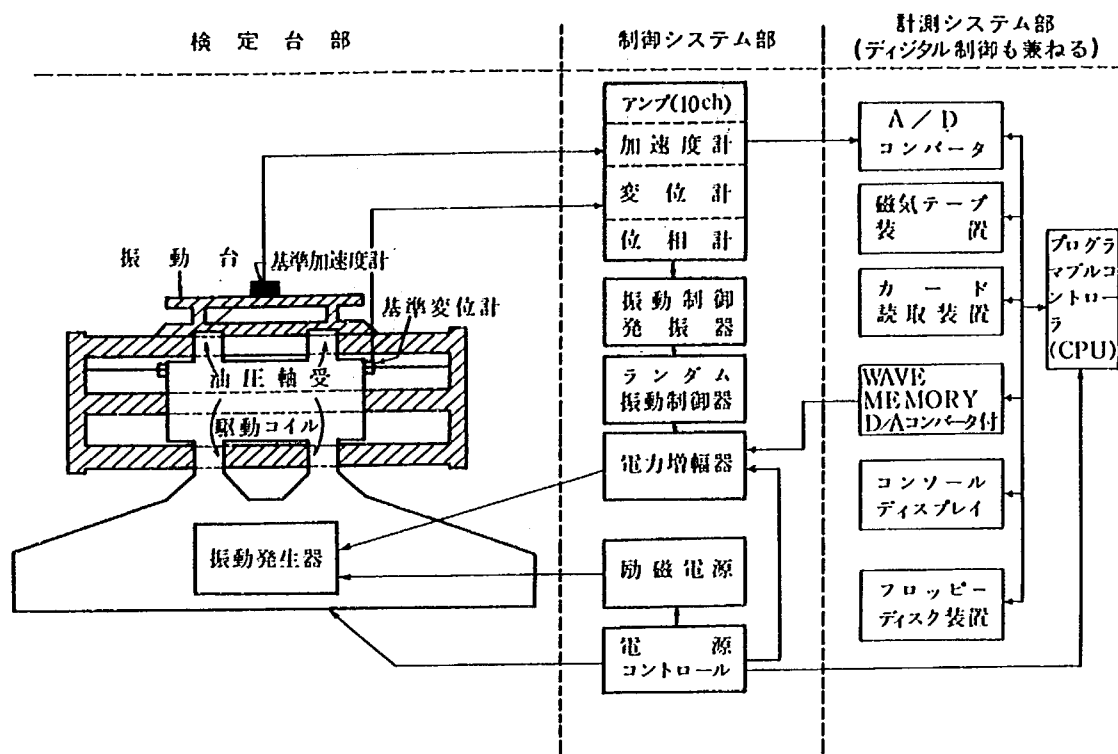


図 2.1 実験システムの概要

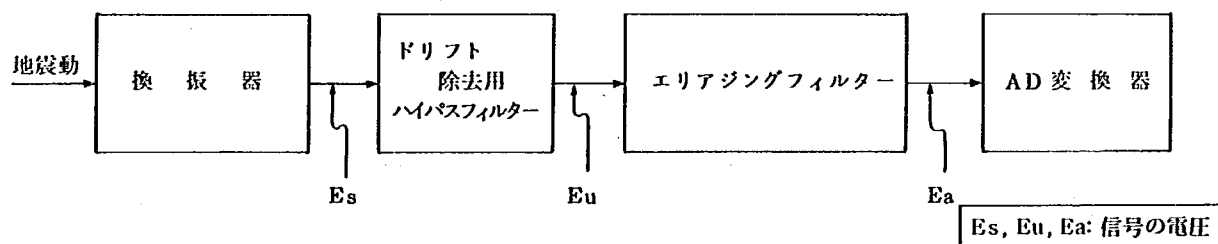


図 2.2 換振器からA/D変換器に至るまでの構成

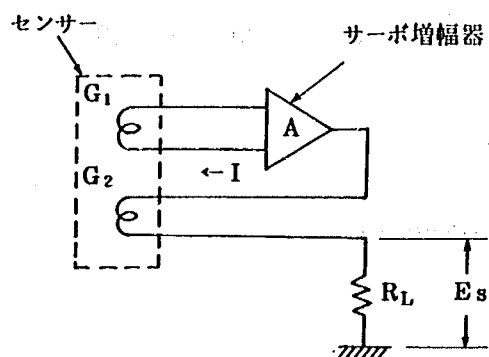


図 2.3 換振器の構成

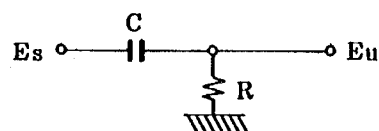


図 2.4 ドリフト除去用ハイパスフィルターの構成

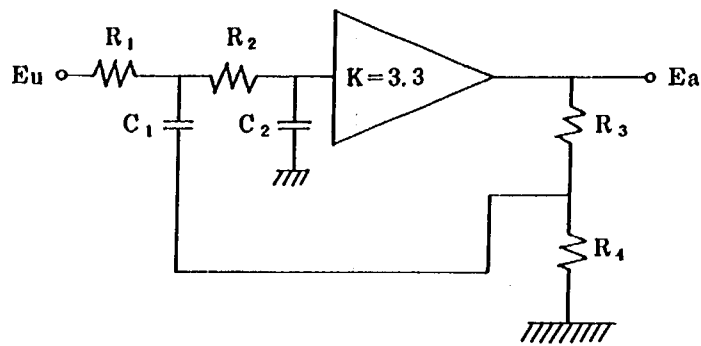
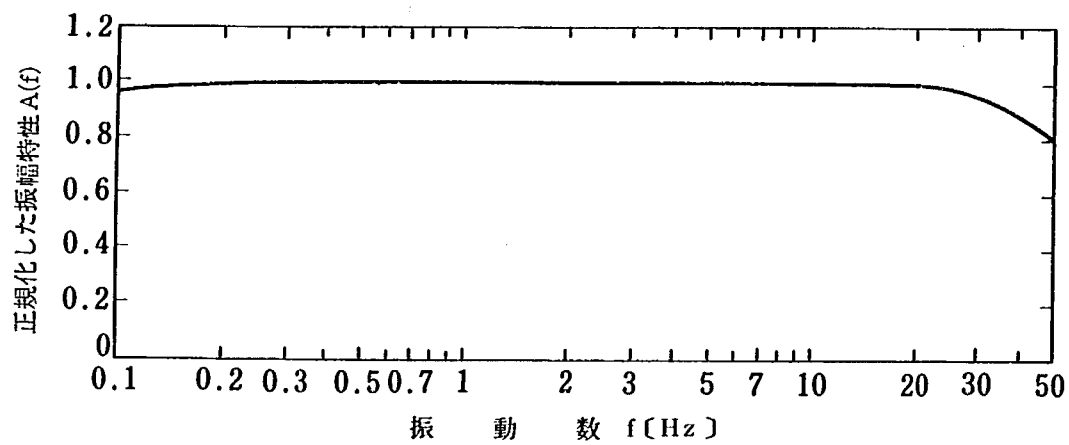
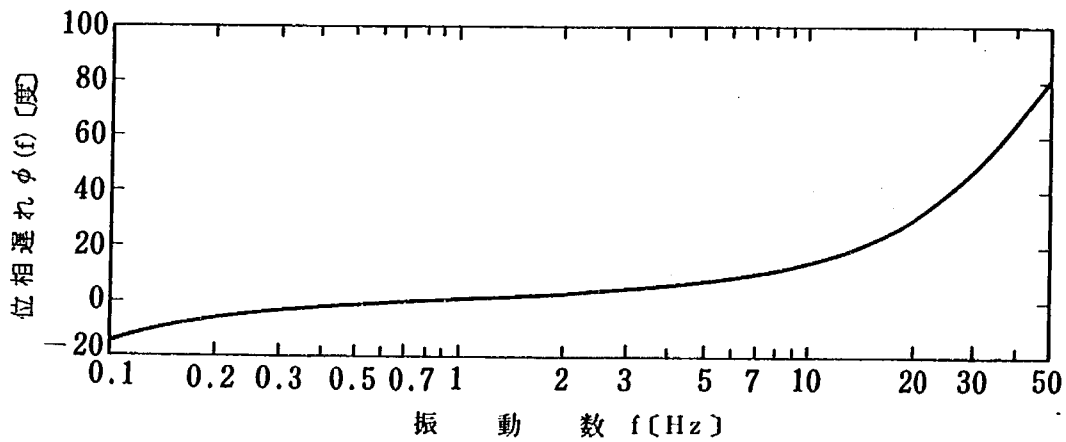


図 2.5 エリアジングフィルターの構成

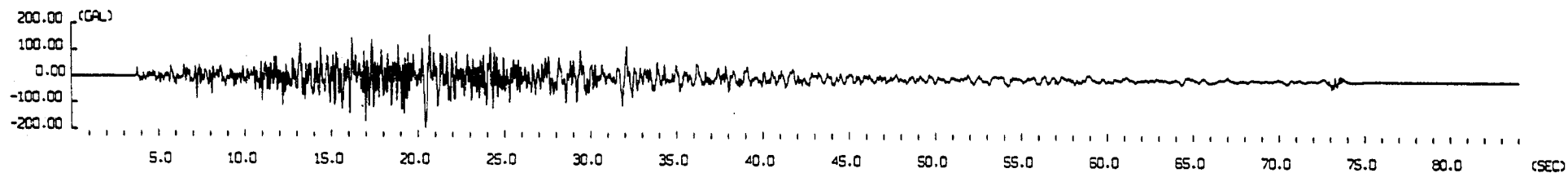


(a) 振幅特性 A (f)

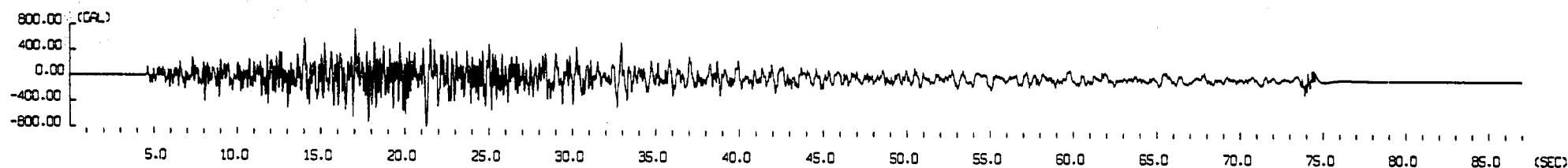


(b) 位相特性 phi (f)

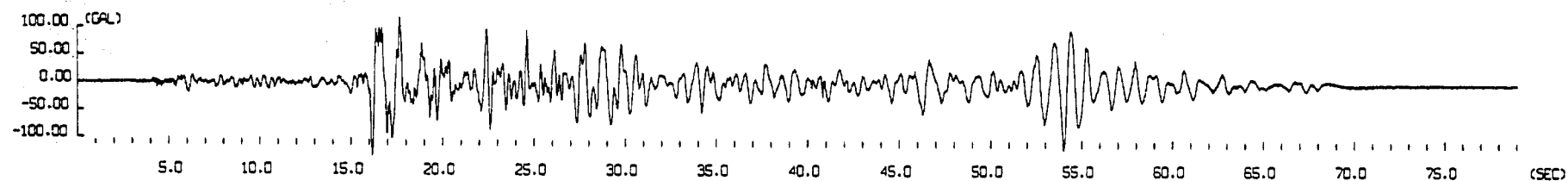
図 2.6 強震計の振幅および位相特性



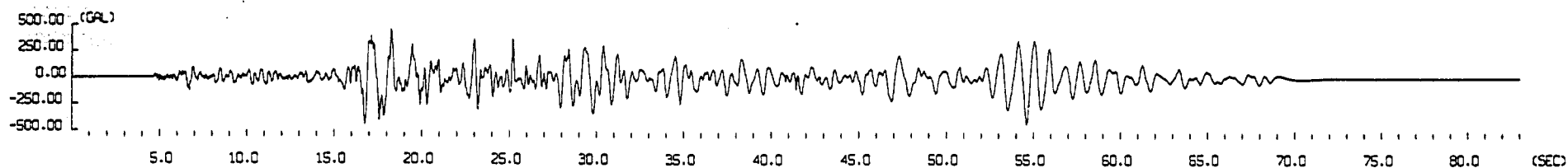
(a) 1-a 富津岬記録



(b) 1-b 富津岬記録

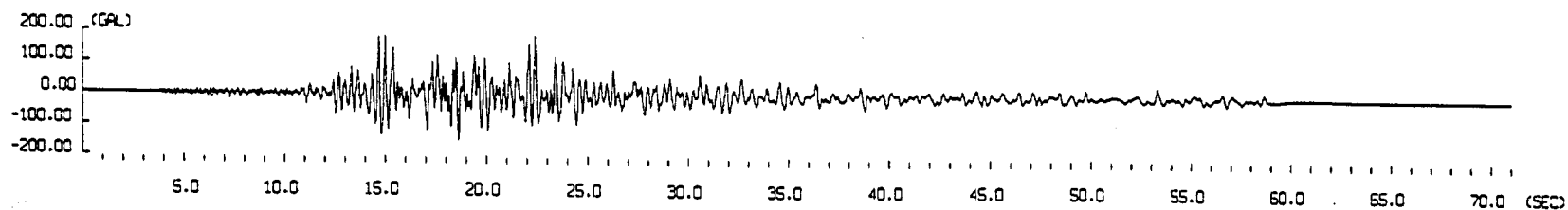


(c) 2-a 南港記録

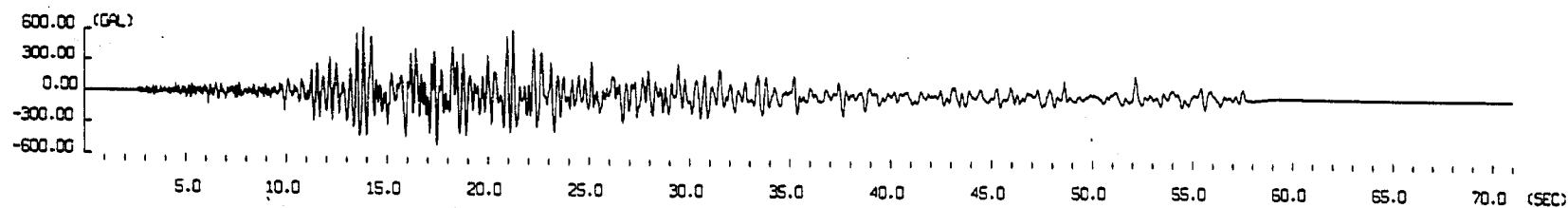


(d) 2-b 南港記録

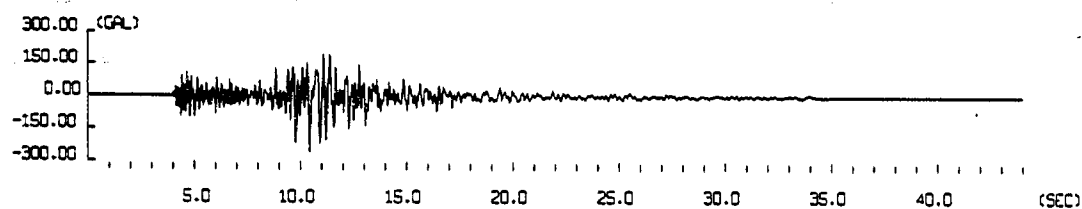
図 2.7 (1) 加振実験に用いた加速度記録



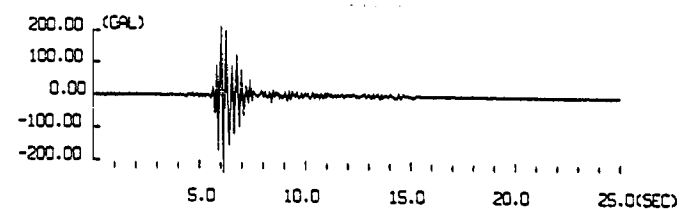
(e) 3-a 扇島記録



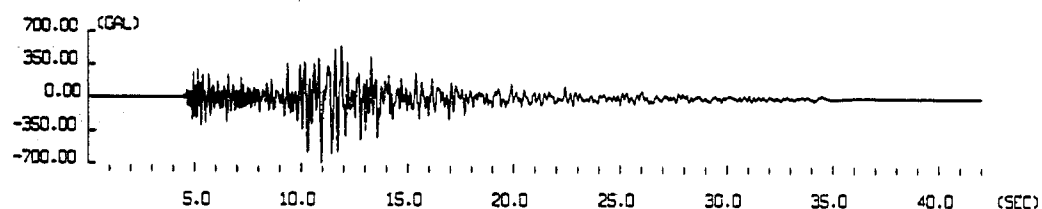
(f) 3-b 扇島記録



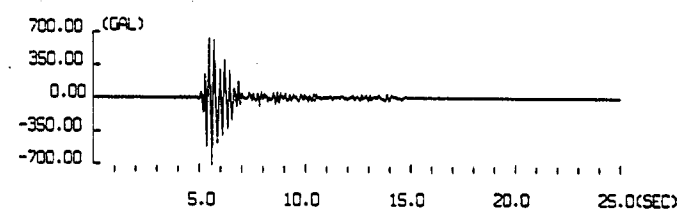
(g) 4-a 沼津記録



(i) 5-a 板島橋記録

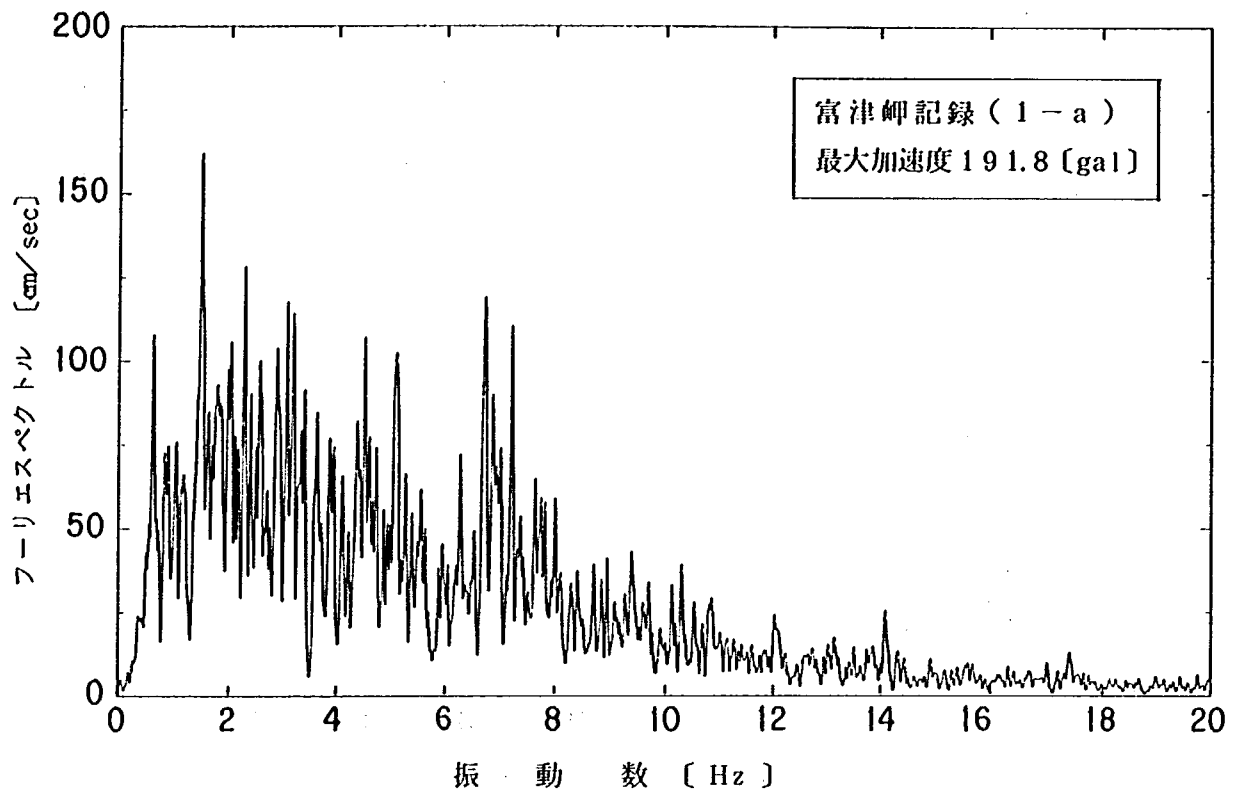


(h) 4-b 沼津記録

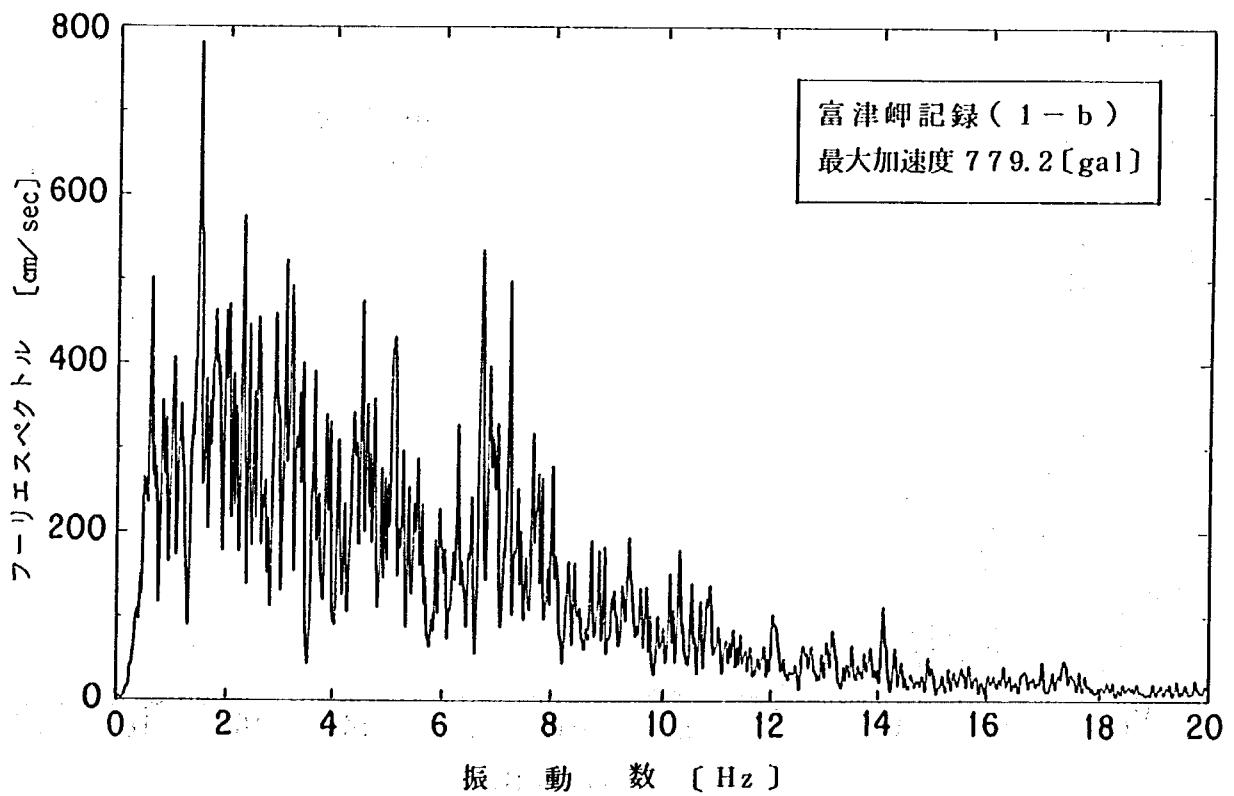


(j) 5-b 板島橋記録

図 2.7 (2) 加振実験に用いた加速度記録

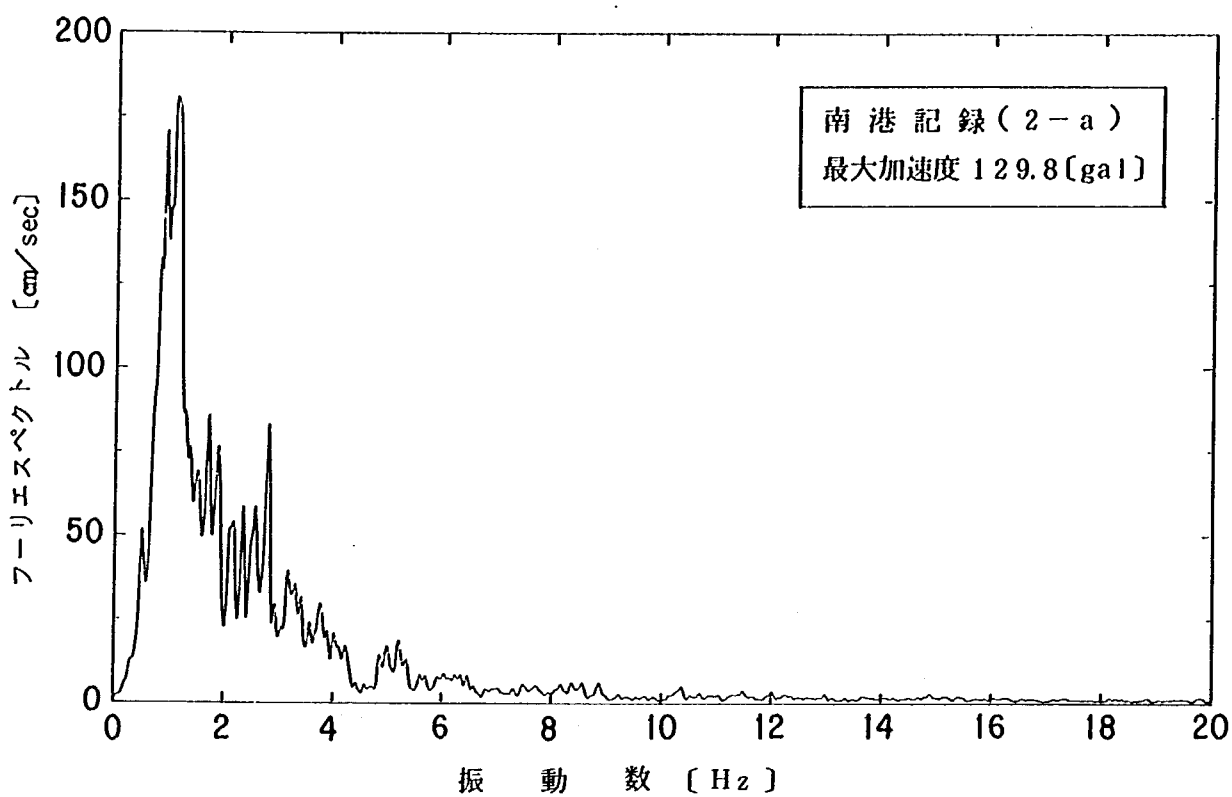


(a) 1-a 富津岬記録

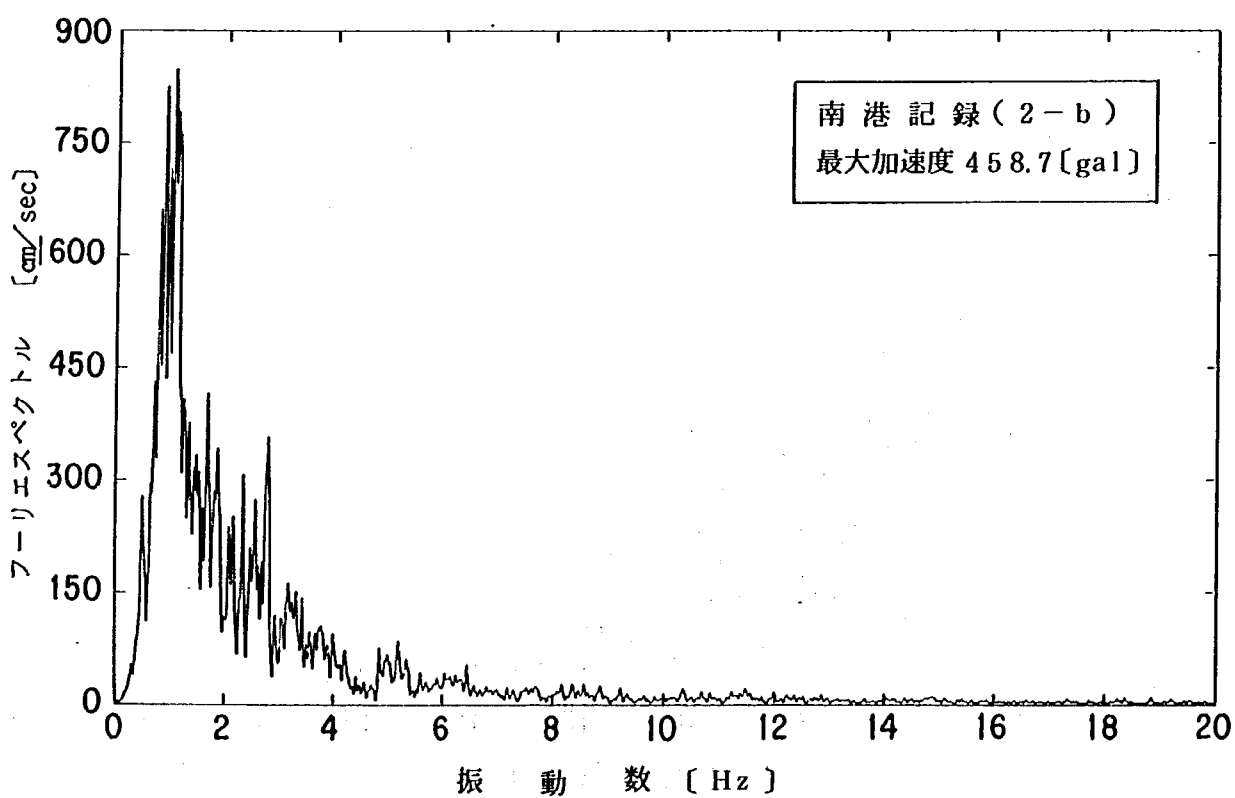


(b) 1-b 富津岬記録

図 2.8 (1) 加振実験に用いた強震記録のフーリエスペクトル

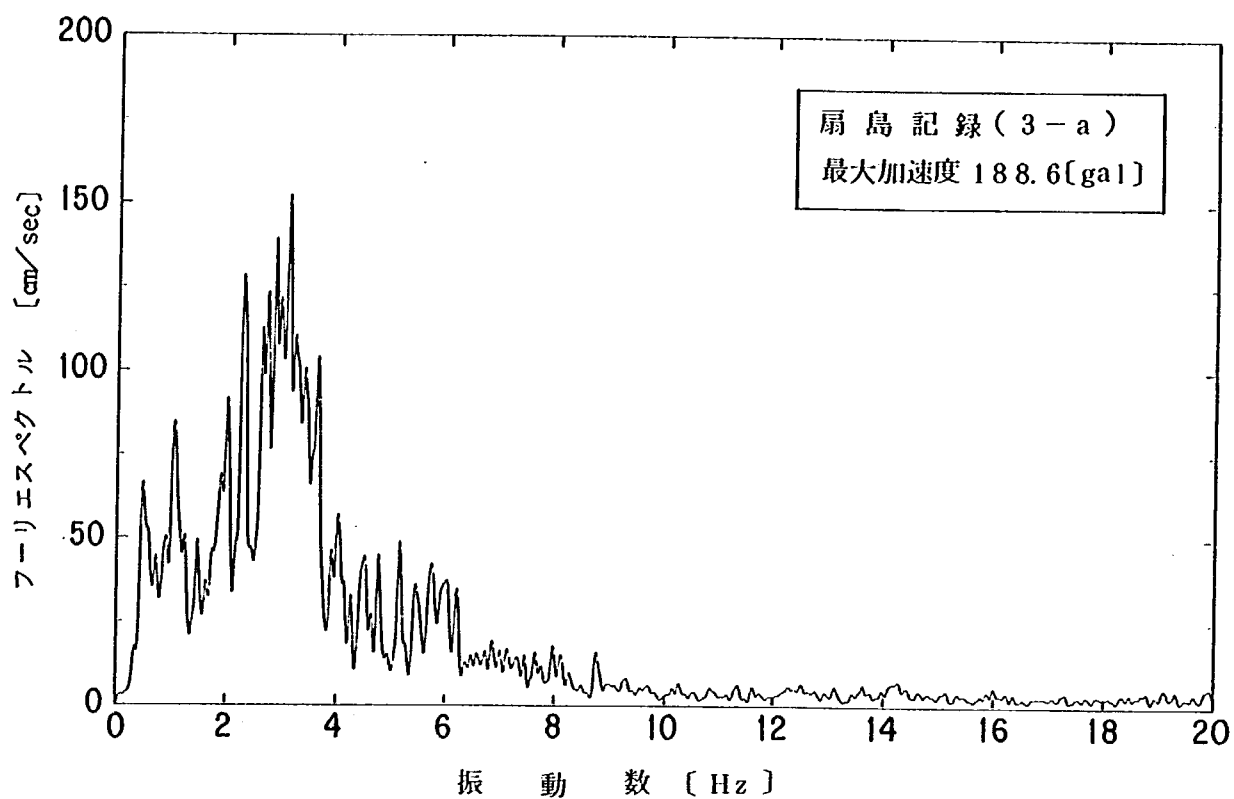


(c) 2-a 南港記録

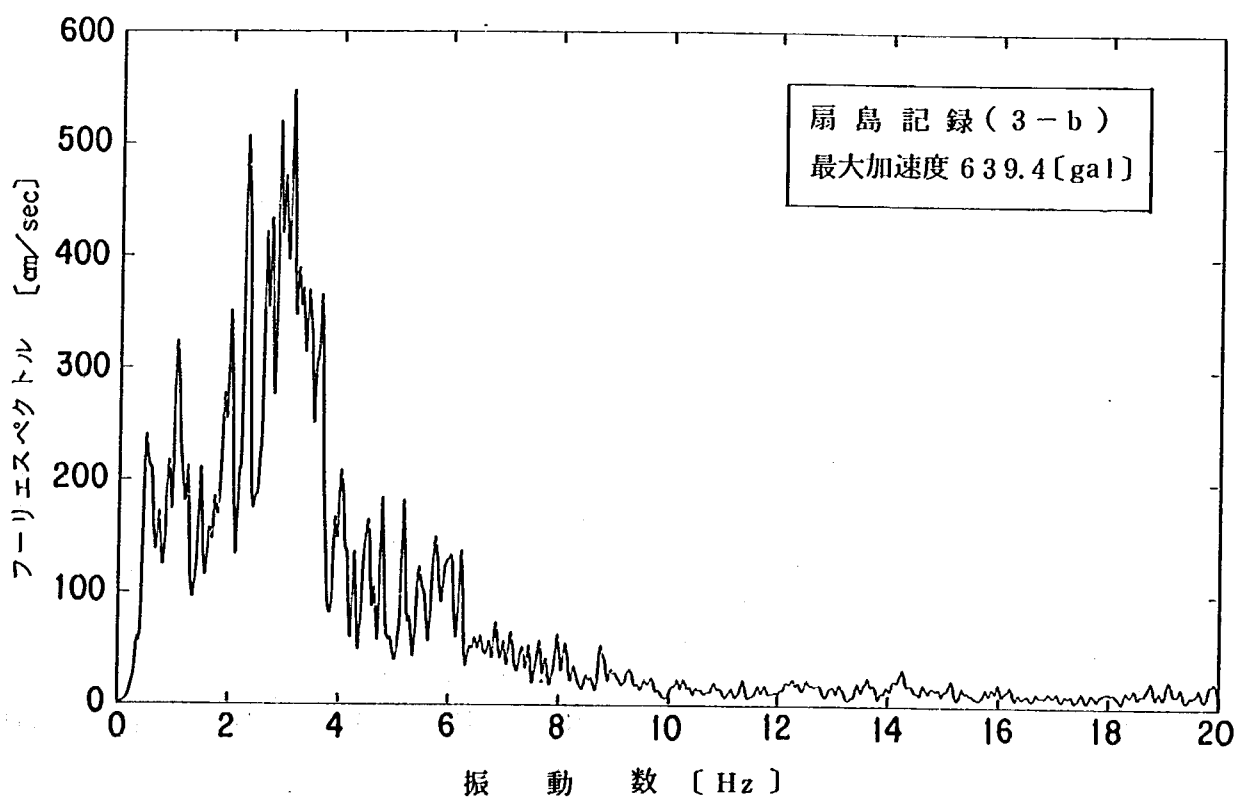


(d) 2-b 南港記録

図 2.8 (2) 加振実験に用いた強震記録のフーリエスペクトル

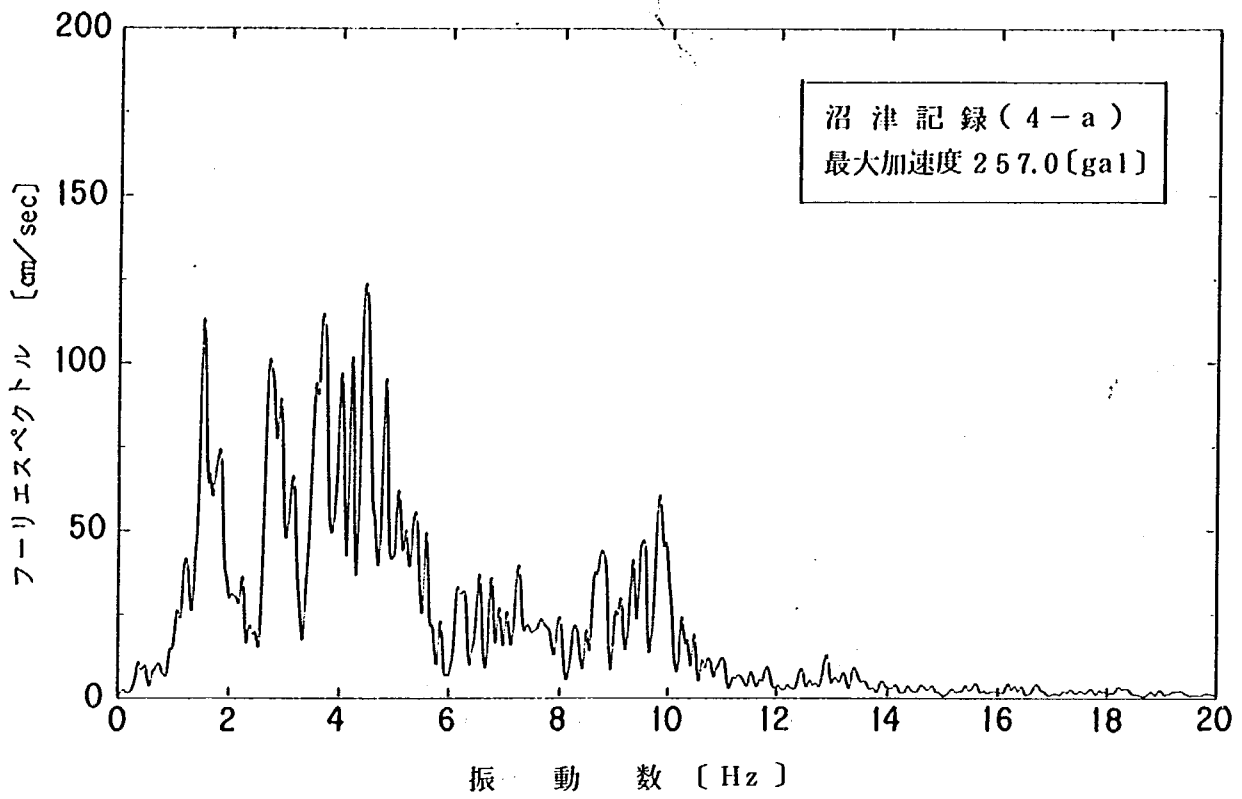


(e) 3-a 扇島記録

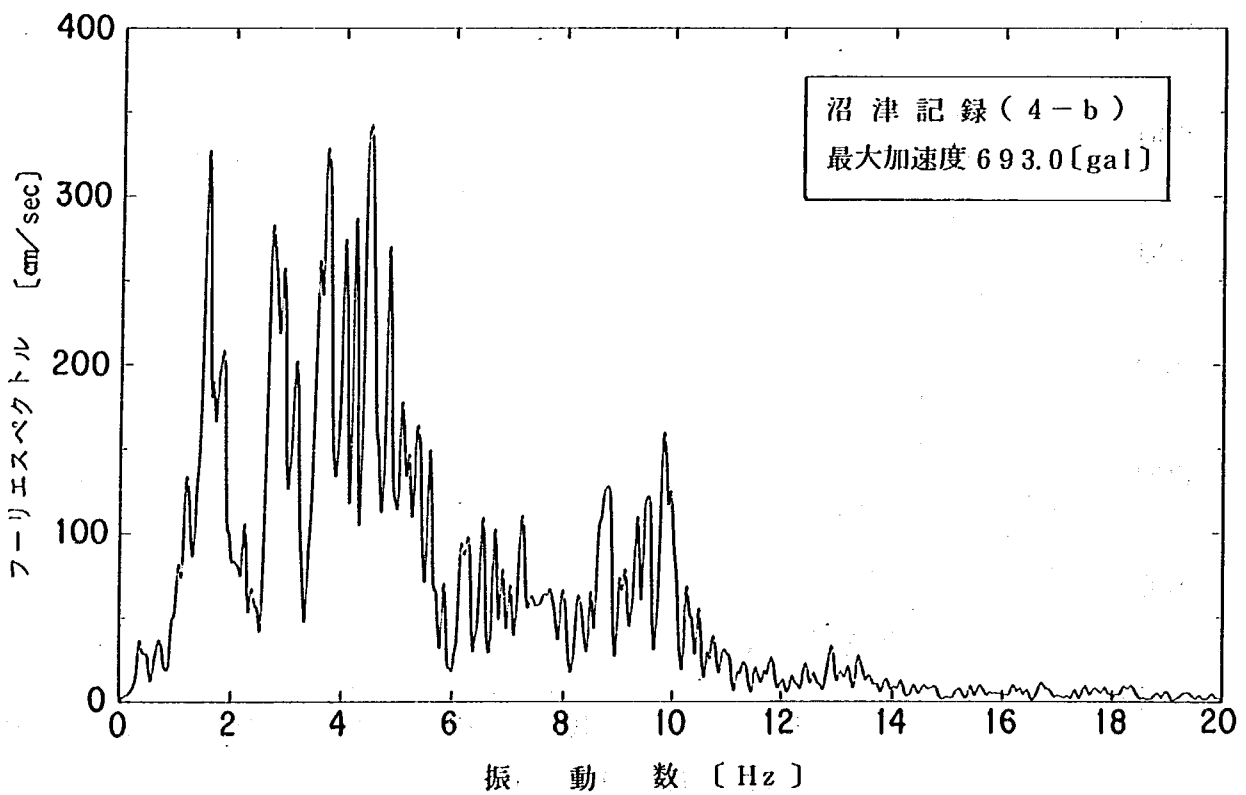


(f) 3-b 扇島記録

図 2.8 (3) 加振実験に用いた強震記録のフーリエスペクトル

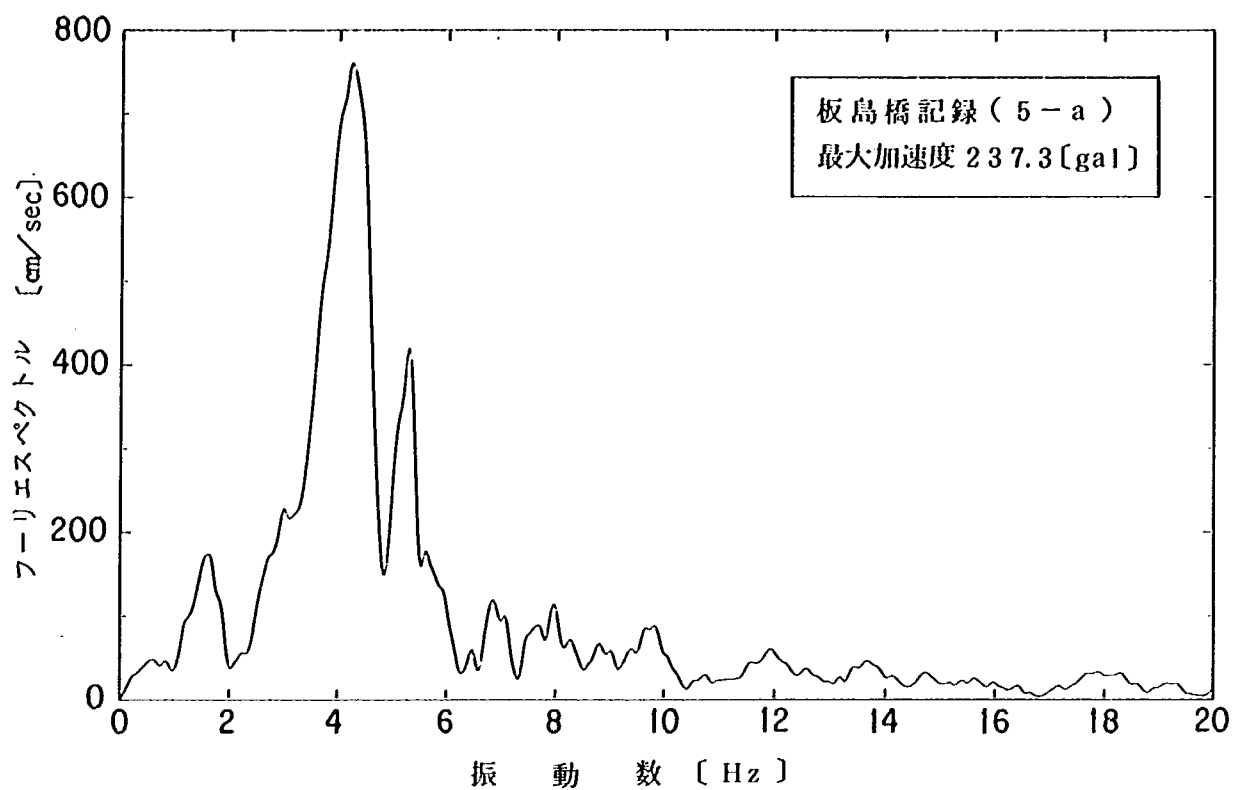


(g) 4-a 沼津記録

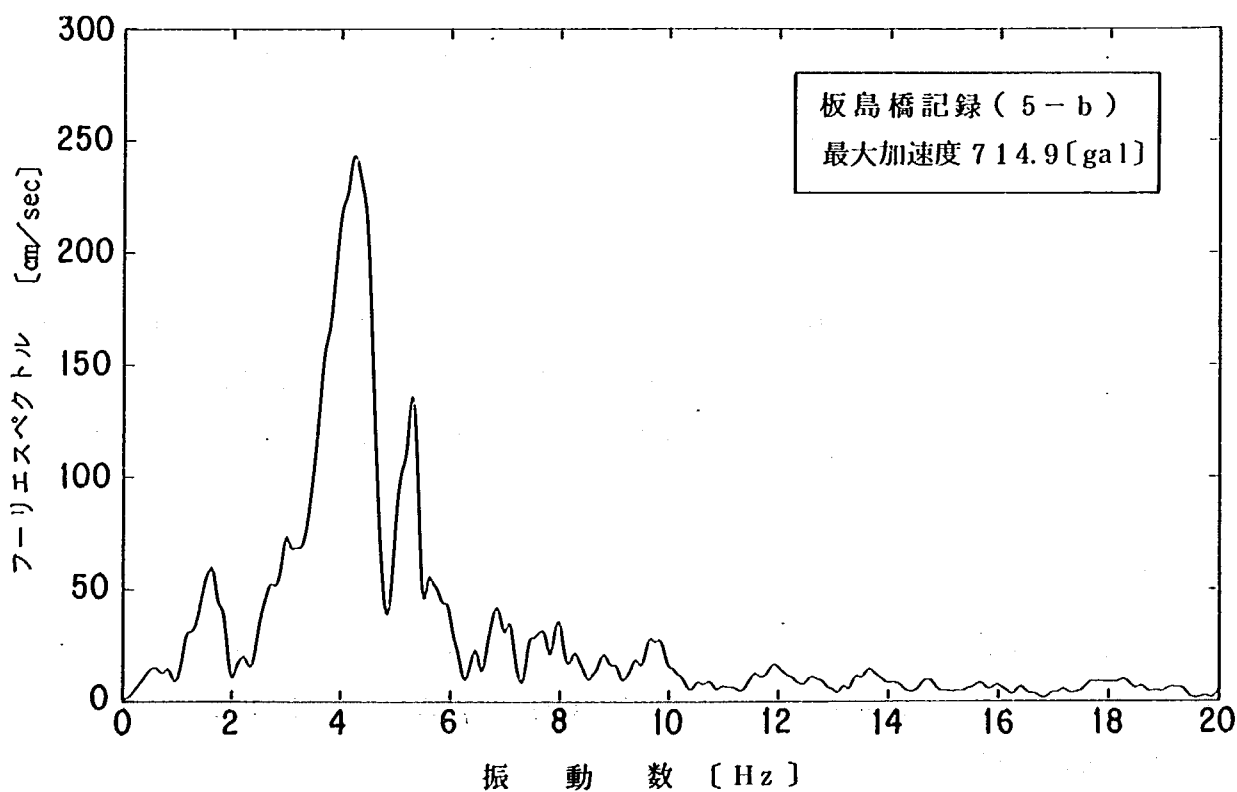


(h) 4-b 沼津記録

図 2.8 (4) 加振実験に用いた強震記録のフーリエスペクトル



(i) 5-a 板島橋記録



(j) 5-b 板島橋記録

図 2.8 (5) 加振実験に用いた強震記録のフーリエスペクトル

3. 記録精度の検討

3.1 変位の計算方法

強震計による加速度記録を $a(t)$ とすれば、そのフーリエ変換 $F(f)$ は、

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

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 $\tilde{a}(t)$ は次式となる。

$$\tilde{a}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{F}(f) e^{i2\pi ft} df \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、

$$\tilde{F}(f) = F(f) \cdot F_c(f) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

フィルター $F_c(f)$ の振動数特性は次のようにした。¹⁵⁾

$$F_c(f) = \begin{cases} 0 & f < f_{\ell\ell} \\ \frac{f - f_{\ell\ell}}{f_{\ell u} - f_{\ell\ell}} \frac{e^{i\rho(f)}}{R(f)} & f_{\ell\ell} \leq f \leq f_{\ell u} \\ \frac{e^{i\rho(f)}}{R(f)} & f_{\ell u} < f < f_{u\ell} \quad \dots\dots\dots (3.4) \\ \frac{f_{uu} - f}{f_{uu} - f_{u\ell}} \frac{e^{i\rho(f)}}{R(f)} & f_{u\ell} \leq f \leq f_{uu} \\ 0 & f_{uu} < f \end{cases}$$

ここで、 $f_{\ell u}$ および $f_{u\ell}$ 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、 $f_{\ell\ell}$ および f_{uu} は、それぞれ、 $f_{\ell u}$ および $f_{u\ell}$ 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、 $R(f)$ および $\rho(f)$ は強震計の振幅および位相の補正関数であり、それぞれ、式(2.7)、(2.8)を用いて次のように表される。

$$R(f) = A(f) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\rho(f) = \phi(f) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

変位は、加速度記録を振動数領域で以下のように数値積分して求めた。すなわち、式(3.2)より、変位 $d(t)$ は次式で表わされる。

$$d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{F}(f)}{-4\pi^2 f^2} e^{i2\pi ft} df \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

ただし、変位の計算に際しては、式(3.4)における高振動数側の遮断振動数は支配的な要因ではなく、

また、2.2で述べたように入力地震動には20 Hzまでのローパスフィルターをかけているので、 f_{ul} および f_{uu} は、それぞれ、20 Hz および 21 Hz とした。

3.2 変位の精度

強震計の加速度記録から計算した変位を $d(t)$ 、差動トランス型変位計で直接測定した振動台の変位（以下、基準変位と呼ぶ）を $D(t)$ とし、 $d(t)$ の精度を検討するために次の3種類のパラメータを定義する。⁴⁾

$$\sigma = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} |d(t)^2 - D(t)^2| dt \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\mu = \frac{\int_0^{T_d} d(t)^2 dt}{\int_0^{T_d} D(t)^2 dt} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\xi = \frac{d_{\max}}{D_{\max}} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

ここで、 T_d は、 $d(t)$ および $D(t)$ の継続時間であり、また、 $d_{\max}$ および $D_{\max}$ は、それぞれ、 $d(t)$ および $D(t)$ の最大値である。式(3.8)～(3.10)から明らかなように、 $d(t)$ が $D(t)$ によく一致するほど、 σ は0に、また、 μ および ξ は1に、それぞれ近くなる。

3.3 数値フィルターの遮断振動数の影響

式(3.4)で定義したフィルターの低振動数側の遮断振動数とこれを用いて式(3.7)により計算で求めた変位の精度との関係を検討するために、遮断振動数 f_{lu} および f_{ll} を、それぞれ、1/5, 1/10, 1/15, 1/20 [Hz]、および 1/6, 1/11, 1/16, 1/21 [Hz] の4種類に変化させて変位の計算を行った。このようにして計算した変位波形を図3.1に示す。図中には、基準変位計で測定した振動台の変位も同時に示されている。これによれば、波形の形状をもとに計算変位 $d(t)$ を基準変位 $D(t)$ と比較しても、遮断周期が5秒から20秒の範囲では著しい差異は認められないことがわかる。

次に、各遮断周期 $1/f_{lu}$ に対する変位の精度を式(3.8)～(3.10)で定義した3種類のパラメータ σ 、 μ 、 ξ で表わすと、表3.1～3.3および図3.2～3.4に示すようになる。これより、変位の精度を検討すると、以下ようになる。

(1) σ による精度の検討

図3.2によれば、実験1-a（富津岬記録）、2-a（南港記録）、3-a（扇島記録）の場合には、 σ の値は $1/f_{lu} = 5$ [秒] では比較的大きく、 $1/f_{lu}$ が10秒になるにつれ減少し、10秒ないし15秒で最小値をとる。また、 $1/f_{lu} = 20$ [秒] では、 σ の値は15秒の場合に比べてわずかに増加はするが、 $1/f_{lu} = 5$ [秒] の場合よりは小さい。同じ富津岬記録、南港記録、扇島記録を用いて加速度レベルを大きくした実験1-b、2-b、3-bの3ケースの場合にも、 σ の値は $1/f_{lu} = 10 \sim 15$ [秒] 付近で最小値をとる。ただし、この場合には上述した実験1-a、2-a、3-aとは異なり $1/f_{lu} = 5$ [秒] の場合

と $1/f_{lu} = 20$ [秒] の場合を比較すると、 σ の値はあまり大きく変わらない。

また、沼津記録（実験 4 - a, 4 - b）および板島橋記録（実験 5 - a, 5 - b）の場合には、 $1/f_{lu} = 5 \sim 10$ [秒] で σ は最小値をとり、 $1/f_{lu} > 10$ [秒] では、 σ は単調に増加する。 $1/f_{lu} = 5$ [秒] の場合と $1/f_{lu} = 20$ [秒] の場合を比較すると、 σ の値は、前者の方が後者よりも小さい。

以上をまとめると、いずれの実験でも全体として $1/f_{lu}$ が $10 \sim 15$ 秒の範囲で σ の値は最小値をとり、 $1/f_{lu}$ がこの範囲外では σ の値が相対的に大きくなる傾向が認められる。この理由として以下の事項が考えられる。 $1/f_{lu}$ の値は、振動台の動きに含まれている範囲で本来なるべく大きくとることが必要とされるが、一般に大きい $1/f_{lu}$ に対応する加速度振幅は小さく、観測上の S/N 比は低下する。したがって、 $1/f_{lu}$ を 15 秒以上と長くとり過ぎた場合には、加速度記録に含まれる長周期成分の誤差が 2 回数値積分の過程で増幅される結果、かえって全体としての精度が低下すると考えられる。これに対して、 $1/f_{lu}$ を 10 秒以下と短くした場合には、当然ながら加速度記録に含まれる $1/f_{lu}$ 以下の成分を評価できないために、計算された変位は実際の変位よりも一般に小さくなり、結果的に精度は低下すると考えられる。以上の点を総合すると、本実験の範囲では、低振動数側の遮断振動数 f_{lu} を、 $1/15 \sim 1/10$ Hz 程度にとった場合が最も変位の再現性が高いと考えられる。ただし、加速度記録から計算される変位の精度は、加速度記録に含まれる長周期成分の誤差に強く影響されるので、ここでは一応、 $f_{lu} = 1/10$ [Hz] とすることにする。

(2) μ による精度の検討

図 3.3 によれば、 μ による精度は、上述の σ の場合とおおむね一致している。すなわち、 μ が最も 1 に近くなる遮断周期 $1/f_{lu}$ は、10 秒ないし 15 秒であり、この場合に変位の再現性が良いことを示している。ただし、 μ の値の変化は、 σ の値の変化と比較して、遮断周期の影響をそれほど敏感に受けず、精度のパラメータとしては、 σ よりも鈍感であると言えよう。

(3) ξ による精度の検討

ξ についても上述の μ と同じであり、 ξ は、遮断周期 $1/f_{lu}$ によって大きく変化しない。ただし、その値は、 $1/f_{lu}$ が $5 \sim 20$ 秒の範囲では、いずれの $1/f_{lu}$ に対してもおおむね 1 に近く、 ξ による精度は妥当であると言える。

3.4 AD変換器のビット数の影響

本実験で使用したデジタル強震計は 16 ビット AD 変換器により AD 変換を行っているが、AD 変換のビット数が変化すると、変位の再現性はどのように変化するのであろうか。これを検討するために、ビット数を 14, 12, 10 ビットと変化させた場合の変位の精度を検討した。まず、上述した実験により、16 ビットで AD 変換した場合の結果が得られているため、これを以下のように数値的に処理し、ビット数が減少した場合の記録を求めることとする。

いま、ある加速度の値 A があり、これを 16 ビットで表示することを考えよう。16 ビットで表し得る整数値 X_{16} は次のようになる。

$$X_{16} = \sum_{i=0}^{15} a_i 2^i \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

ここで、 a_i は図 3.5(a)に示すように第 i ビットに対応する 0 もしくは 1 の値を表わす。いま、強震計のフルスケールは、 $\pm 1000 \text{ gal}$ とされているので、 X_{16} の上限 $\sum_{i=0}^{15} 1 \cdot 2^i = 2^{16} - 1$ が 1000 gal に対応し、 X_{16} の下限 $\sum_{i=0}^{15} 0 \cdot 2^i = 0$ が -1000 gal に対応する。したがって、16 ビット A/D 変換では加速度 A の値は次のように表されることになる。

$$\begin{aligned} A_{16} &= \frac{2000 X_{16}}{2^{16} - 1} - 1000 \\ &= 1000 \left(\frac{2 X_{16}}{2^{16} - 1} - 1 \right) \quad [\text{gal}] \quad \dots\dots\dots (3.12) \end{aligned}$$

次に、同じ加速度を 14 ビットで表した場合には、図 3.5(b)に示すように、16 ビットの場合の下位の 2 ビットが切捨てられるため、14 ビットで表し得る整数値 X_{14} は次のようになる。

$$\begin{aligned} X_{14} &= \sum_{i=0}^{13} a_{i+2} 2^i \\ &= [X_{16}/4] \quad \dots\dots\dots (3.13) \end{aligned}$$

ここで、 $[\quad]$ はガウス記号を表す。また、14 ビットの場合は、 $\sum_{i=0}^{13} 1 \cdot 2^i = 2^{14} - 1$ が 1000 gal に、また、 $\sum_{i=0}^{13} 0 \cdot 2^i = 0$ が -1000 gal にそれぞれ対応する。

よって、

$$A_{14} = 1000 \left(\frac{2 X_{14}}{2^{14} - 1} - 1 \right) \quad [\text{gal}] \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

となる。

式 (3.13) および (3.14) を用いれば、16 ビット A/D 変換器を有する強震計で得られた記録 X_{16} をもとに、これを仮に 14 ビット A/D 変換器を有する強震計で記録したとすれば、どのような加速度の値となるかを求めることができる。同様に、12 および 10 ビットの A/D 変換に相当する加速度記録も作り出すことができる。

加速度記録を積分して変位を求める際の遮断振動数は、高振動数側については、3.1 に示したように、 $f_{ul} = 20 [\text{Hz}]$ 、 $f_{uu} = 21 [\text{Hz}]$ とした。また、低振動数側の遮断振動数は、3.3 の検討により変位の再現性が全体として良いことが確認された $f_{lu} = 1/10 [\text{Hz}]$ 、 $f_{ll} = 1/11 [\text{Hz}]$ とした。なお、検討を行ったのは、表 2.4 に示す実験 1-a、1-b、2-a、2-b、3-a、3-b の 6 ケースとした。このようにして、計算した変位波形的例 (実験 2-a の場合) を図 3.6 に示す。

また、式 (3.8) ~ (3.10) で定義した 3 種類のパラメータ σ 、 μ 、 ξ を計算した結果を表 3.4 ~ 3.6 および図 3.7 ~ 3.9 に示す。図 3.7 ~ 3.9 によれば、今回検討を行った範囲内では、16 ビットから 10 ビットまで変化させても、変位の再現性にはほとんど差が認められないことがわかる。

この理由としては、表 2.4 に示したように最大加速度が最も小さい実験 2-a (南港記録) の場合でも約 130 gal であり、10 ビット A/D 変換の分解能 1.96 gal (表 3.7 参照) に比べて十分に大きいことが挙

げられる。

なお、AD変換器のビット数が数値積分の精度に及ぼす影響について、模擬波形（正弦波）を用いて検討した結果を付属資料1に示す。これによれば、加速度振幅が小さい場合には、ビット数の影響がはっきり表れてくることがわかる。

3.5 サンプリング間隔の影響

本実験で使用した強震計のAD変換器のサンプリング間隔は1/200秒であるが、サンプリング間隔が変位の再現性に及ぼす影響を検討するために、これを1/100、1/50秒に変化させた場合の変位の計算を行った。

ここで、サンプリング間隔が1/100秒および1/50秒の加速度波形は、1/200秒間隔の加速度記録を、それぞれ2個置きおよび4個置きに間引いて求めた。なお、3.4の場合と同様に、加速度記録を積分する際の数値フィルターの遮断振動数は、 $f_{ul} = 20$ [Hz]、 $f_{uu} = 21$ [Hz]、 $f_{lu} = 1/10$ [Hz]、 $f_{ll} = 1/11$ [Hz]とした。検討の対象としたのは、表2.4に示す実験1-a、1-b、2-a、2-b、3-a、3-bの6ケースである。

まず、計算された変位波形の例（実験2-aの場合）を示すと図3.10のようになる。図3.10より、サンプリング間隔が1/200秒の場合と1/100秒の場合には、変位波形に著しい差異は認められないが、サンプリング間隔が1/50秒の場合には、波形の先頭の部分に長周期の誤差が乗っていることがわかる。

次に、式(3.8)～(3.10)で定義した変位の精度のパラメータを求めた結果を表3.8～3.10および図3.11～3.13に示す。図3.11によれば、 σ の値は、サンプリング間隔が1/100秒と1/200秒の場合ではほとんど変わらない。ただし、実験3-bを除く5ケースでは、これらの結果に比較してサンプリング間隔を1/50秒にすると、 σ の値はかなり大きくなることがわかる。すなわち、サンプリング間隔が1/100秒以下の場合には、変位の精度に大きなちがいは見られないが、サンプリング間隔が1/50秒になると一般に変位の精度が極端に悪くなる。

なお、AD変換器のサンプリング間隔が数値積分に及ぼす影響について、模擬波形（正弦波）を用いて検討した結果を付属資料1に示す。

3.6 強震計相互間の変位の再現性

建設省土木研究所で実施している高密度強震観測では、観測記録が個々の強震計毎に独立である個別記録方式を採用している。したがって、観測で得られた記録をもとに、地盤ひずみ、相対地動変位などを求める際には、各々の強震計の絶対時刻、感度等に不揃いがないことを確認しておく必要がある。そこで、複数の強震計から求められる変位の同一性を次のような方法で検討した。

いま、観測に用いようとしている強震計の中から、任意に2台の強震計を選び、これらを振動台上に固定して加振実験を行う。これにより得られた2台の加速度記録を両強震計のタイムコードにより時間軸を合わせてそれぞれ $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ と表す。また、式(3.7)を用いて、 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ から計算した変位をそれぞれ、 $d_1(t)$ 、 $d_2(t)$ とする。ここで、フィルターの遮断振動数は、3.4の場合と同様に、 $f_{ul} =$

20 [Hz], $f_{uu} = 21$ [Hz], $f_{lu} = 1/10$ [Hz], $f_{ll} = 1/11$ [Hz] とする。変位波形 $d_1(t)$ および $d_2(t)$, また, 両者の差 $d_1(t) - d_2(t)$ を求めた例 (実験 2-a の場合) を示すと, 図 3.14 のようになる。

また, $d_1(t), d_2(t)$ の同一性を検討するために, 式 (3.8) ~ (3.10) と同様に, 次の 4 種類のパラメータ σ, μ, ξ, η を定義する。

$$\sigma = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} |d_1(t)^2 - d_2(t)^2| dt \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

$$\mu = \frac{\int_0^{T_d} d_1(t)^2 dt}{\int_0^{T_d} d_2(t)^2 dt} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

$$\xi = \frac{d_{1, \max}}{d_{2, \max}} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\eta = \frac{|d_1(t) - d_2(t)|_{\max}}{|d_2(t)|_{\max}} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

ここで, T_d は, $d_1(t)$ および $d_2(t)$ の継続時間であり, また $d_{1, \max}$ および $d_{2, \max}$ は, それぞれ $d_1(t)$ および $d_2(t)$ の最大値である。また, 検討を行ったのは, 表 2.4 の実験 1-a, 1-b, 2-a, 2-b, 3-a, 3-b の 6 ケースである。

パラメータ σ, μ, ξ, η を求めた結果を示すと表 3.11 のようになる。表 3.11 を図 3.2 ~ 3.4 と比較すると, σ, μ, ξ とともに両者は大きく変われず, 2 台の強震計間の変位の一致度は, 強震計の計算変位と振動台の変位の一致度と同程度であることがわかる。

また, μ, ξ の値が完全に 1 とはならない原因としては, 2 台の強震計間の換振器, 増幅器の感度およびタイムコードの不一致等をすべて包含したものであると考えられる。しかしながら, 不一致の度合を, パラメータ η , すなわち, 相対変位の最大値と変位の最大値との比で比較すると, 5% 程度であることがわかる。

いま, この程度の誤差が 2 台の強震計記録から求めた地盤の有限ひずみにどの程度影響するかを考えてみよう。地震時の有限地盤ひずみ (伸縮ひずみ) の最大値 $\epsilon_{\max}$ は, 2 台の強震計間の距離を L とすれば, 次のようになる。

$$\epsilon_{\max} = \frac{|d_1(t) - d_2(t)|_{\max}}{L} \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

いま, 上記の検討より, 2 点間の相対変位の最大値には, 以下の誤差が含まれている。

$$|d_1(t) - d_2(t)|_{\max}^{\text{ERROR}} = \eta \times d_{1, \max} \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

ここで, $\eta = 0.05$ とすると, 変位の誤差により, 有限地盤ひずみ $\epsilon_{\max}$ には, 次の誤差が伴うことになる。

$$\epsilon_{\max}^{\text{ERROR}} = \frac{\eta \times d_{l,\max}}{L} \dots\dots\dots (3.21)$$

上式より、 $d_{l,\max}$ 、 L を種々変化させて $\epsilon_{\max}^{\text{ERROR}}$ を求めると表 3.12 のようになる。これより、たとえば、2点間の距離が 100m の場合を考えると、最大変位が 1 cm および 5 cm の場合には、有限地盤ひずみに含まれる誤差の最大値はそれぞれ 5×10^{-6} および 25×10^{-6} となる。

今後地盤ひずみの解析を行う際には、このような点を十分考慮することが求められる。

表 3.1 遮断周期と変位精度 σ [cm] の関係

実験番号	遮断周期 $1/f_{\text{cut}}$ [秒]			
	5	10	15	20
1-a	0.143	0.071	0.068	0.078
2-a	0.153	0.089	0.086	0.083
3-a	0.140	0.112	0.095	0.097
4-a	0.023	0.023	0.026	0.030
5-a	0.011	0.007	0.009	0.013
1-b	1.114	0.916	0.964	1.347
2-b	1.779	1.421	1.639	1.898
3-b	0.880	0.668	0.624	0.758
4-b	0.225	0.220	0.387	0.808
5-b	0.087	0.110	0.202	0.273

表 3.2 遮断周期と変位精度 μ の関係

実験番号	遮断周期 $1/f_{\text{cut}}$ [秒]			
	5	10	15	20
1-a	0.882	0.986	1.023	1.036
2-a	0.924	0.974	0.991	0.996
3-a	0.908	0.937	0.953	0.960
4-a	0.913	0.956	0.976	0.997
5-a	0.777	0.874	0.952	1.105
1-b	1.093	1.107	1.112	1.129
2-b	1.082	1.112	1.129	1.164
3-b	1.026	1.042	1.046	1.069
4-b	0.949	1.052	1.160	1.508
5-b	1.125	1.204	1.325	1.428

表 3.3 遮断周期と変位精度 ξ の関係

実験番号	遮断周期 $1/f_{\text{cut}}$ [秒]			
	5	10	15	20
1-a	1.026	1.020	0.958	0.961
2-a	0.943	0.996	1.002	0.993
3-a	0.880	0.906	0.935	0.935
4-a	1.004	1.053	1.062	1.076
5-a	1.047	1.058	1.109	1.132
1-b	1.070	1.074	1.048	1.013
2-b	0.936	0.997	1.040	1.084
3-b	1.093	1.086	1.068	1.027
4-b	1.030	1.157	1.274	1.478
5-b	1.125	1.204	1.325	1.428

表 3.4 A/D変換のビット数と変位精度 σ [cm] の関係

実験番号	ビット数 [ビット]			
	10	12	14	16
1-a	0.070	0.071	0.071	0.071
2-a	0.092	0.089	0.089	0.089
3-a	0.113	0.112	0.112	0.112
1-b	0.941	0.920	0.917	0.916
2-b	1.414	1.420	1.421	1.421
3-b	0.663	0.670	0.668	0.668

表 3.5 A/D変換のビット数と変位精度 μ の関係

実験番号	ビット数 [ビット]			
	10	12	14	16
1-a	1.008	0.986	0.985	0.986
2-a	0.970	0.973	0.974	0.974
3-a	0.939	0.939	0.938	0.937
1-b	1.109	1.107	1.107	1.107
2-b	1.114	1.112	1.112	1.112
3-b	1.043	1.043	1.043	1.042

表 3.6 A/D変換のビット数と変位精度 ξ の関係

実験番号	ビット数 [ビット]			
	10	12	14	16
1-a	1.014	1.021	1.020	1.020
2-a	1.002	0.996	0.996	0.996
3-a	0.903	0.907	0.906	0.906
1-b	1.076	1.074	1.074	1.074
2-b	0.999	0.997	0.997	0.997
3-b	1.085	1.086	1.086	1.086

表 3.7 A/D変換器のビット数と最小分解能の関係

ビット数[ビット]	最小分解能[gal]
16	0.03
14	0.12
12	0.49
10	1.96

表 3.8 A/D変換のサンプリング間隔と変位精度 σ [cm] の関係

実験番号	サンプリング間隔[秒]		
	1/200	1/100	1/50
1-a	0.071	0.075	0.245
2-a	0.089	0.135	0.299
3-a	0.112	0.112	0.349
1-b	0.916	0.905	1.644
2-b	1.421	1.496	1.970
3-b	0.668	0.633	0.604

表 3.9 A/D変換のサンプリング間隔と変位精度 μ の関係

実験番号	サンプリング間隔[秒]		
	1/200	1/100	1/50
1-a	0.986	1.033	1.301
2-a	0.974	0.990	1.292
3-a	0.937	0.941	1.389
1-b	1.107	1.105	1.142
2-b	1.112	1.117	1.144
3-b	1.042	1.037	1.039

表 3.10 A/D変換のサンプリング間隔と変位精度 ξ の関係

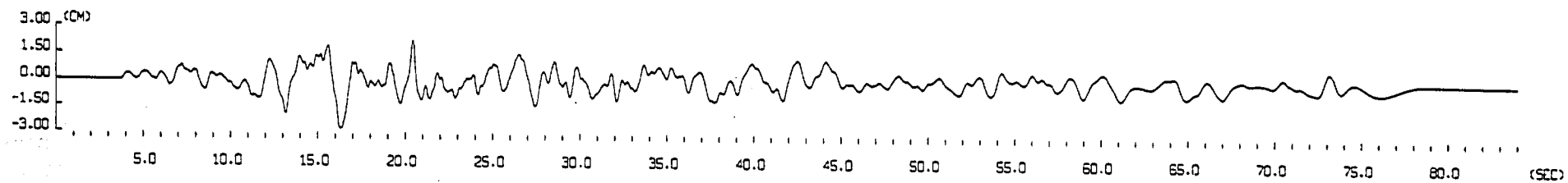
実験番号	サンプリング間隔[秒]		
	1/200	1/100	1/50
1-a	1.020	1.006	0.965
2-a	0.996	0.966	0.979
3-a	0.906	0.911	0.835
1-b	1.074	1.073	1.017
2-b	0.997	1.009	1.013
3-b	1.086	1.064	1.071

表 3.11 2 台の強震計の変位の同一性の検討

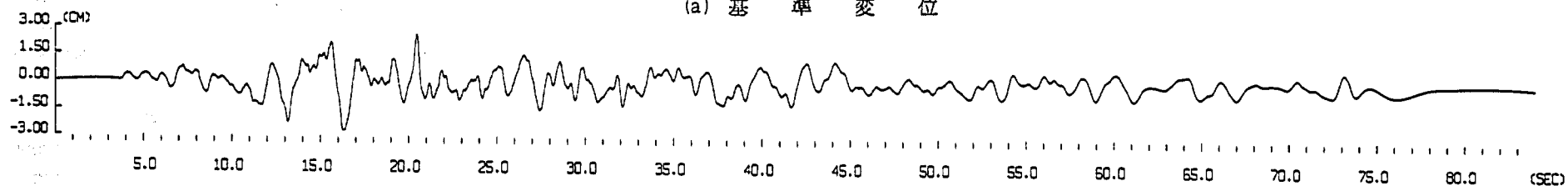
実験番号	精度のパラメータ			
	σ [cm]	μ	ξ	η
1-a	0.0319	0.914	0.957	0.0512
2-a	0.0617	0.895	0.937	0.0675
3-a	0.0392	0.907	0.964	0.0466
1-b	0.541	0.923	0.957	0.0478
2-b	0.687	0.925	0.970	0.0587
3-b	0.413	0.923	0.965	0.0546

表 3.12 強震計間距離および最大変位と有限地盤ひずみの誤差との関係

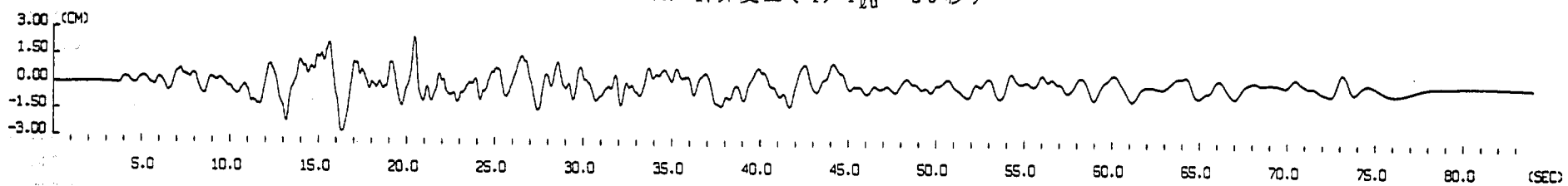
強震計間距離 L [m]	最大変位 $d_{1,max}$ [cm]			
	1	5	10	20
10	5.0×10^{-5}	2.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}
50	1.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
100	5.0×10^{-6}	2.5×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}
200	2.5×10^{-6}	1.3×10^{-5}	2.5×10^{-5}	5.0×10^{-5}



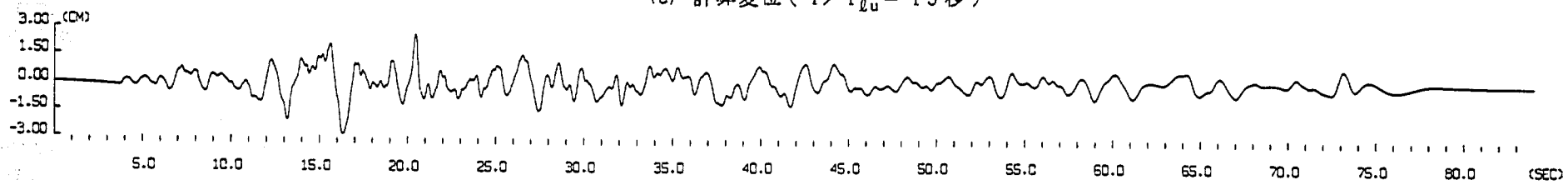
(a) 基準変位



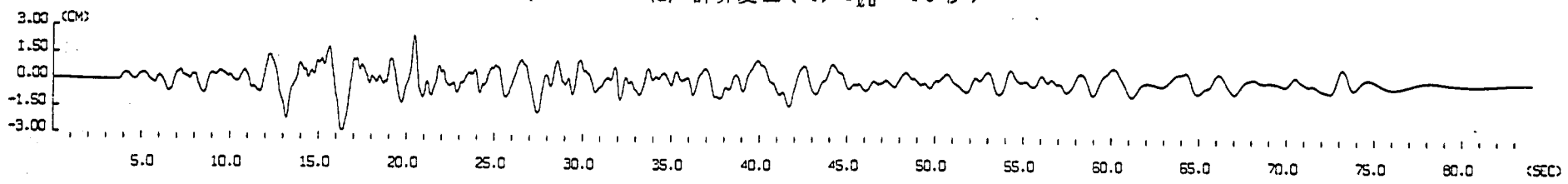
(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)

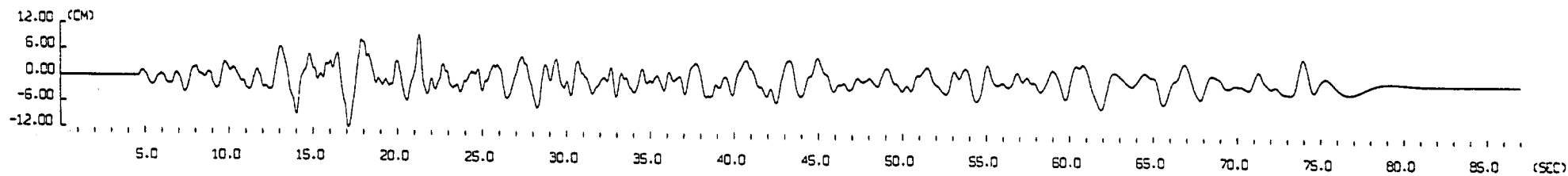


(d) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)

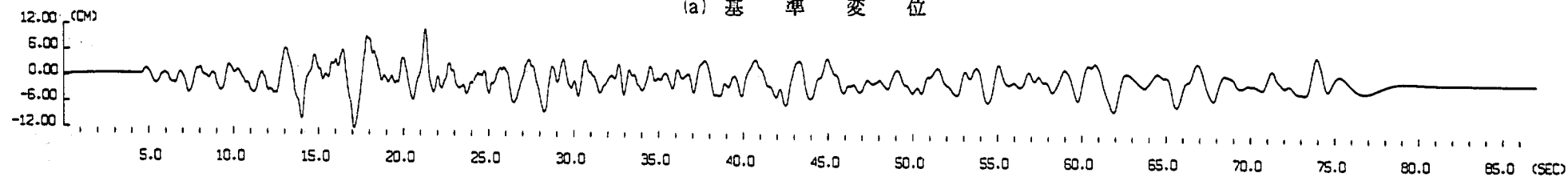


(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

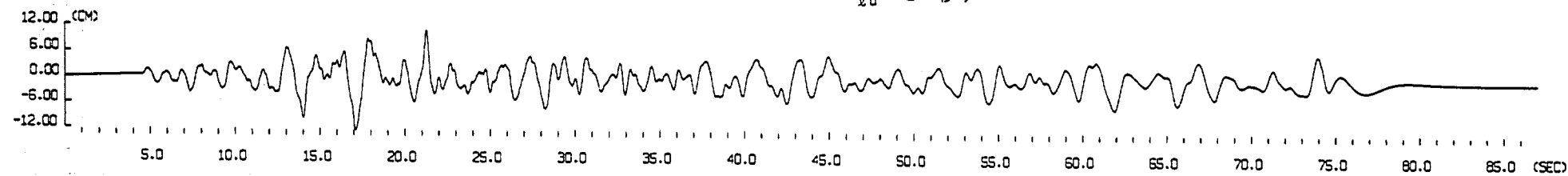
図 3.1 (1) 基準変位と計算変位の比較 (実験 1 - a)



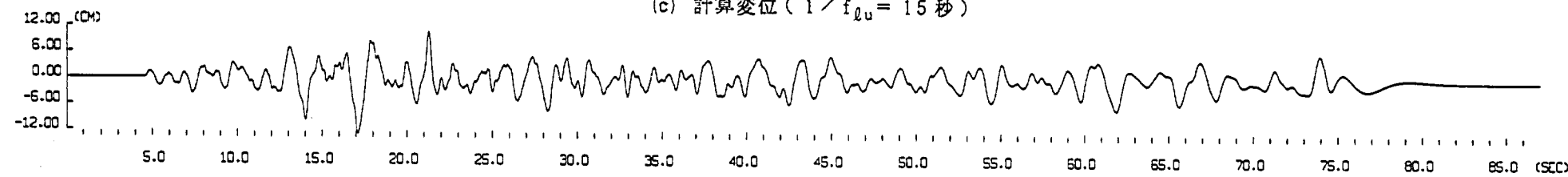
(a) 基準変位



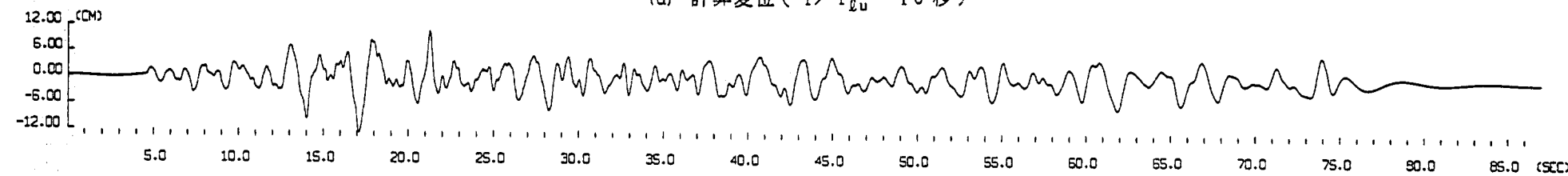
(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)

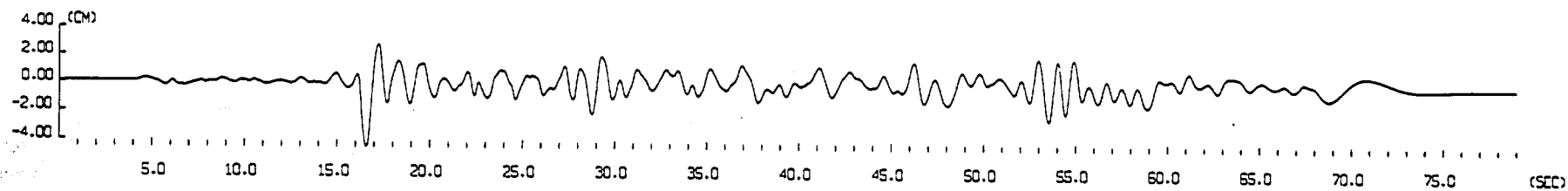


(d) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)

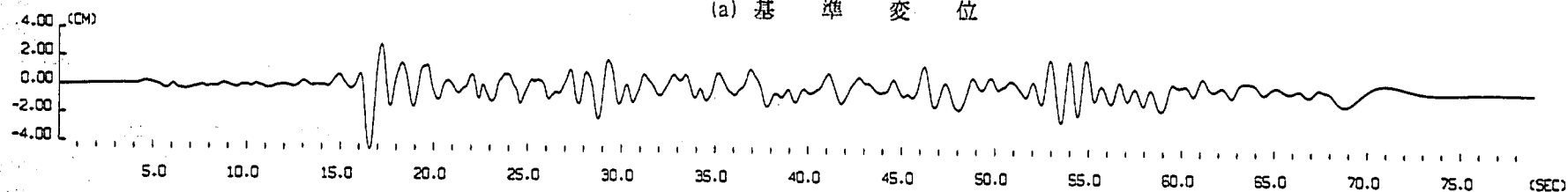


(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

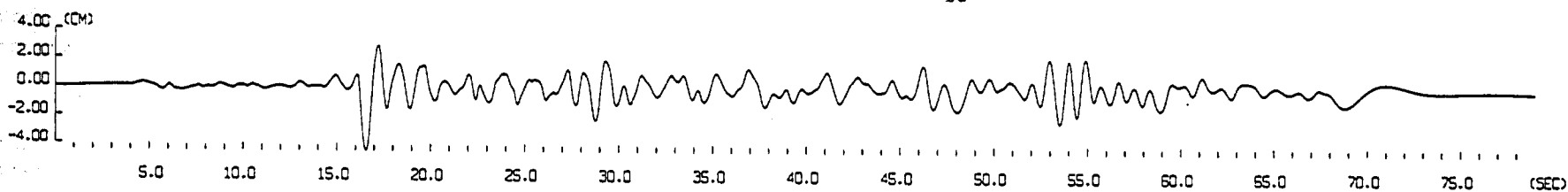
図 3.1 (2) 基準変位と計算変位の比較 (実験 1 - b)



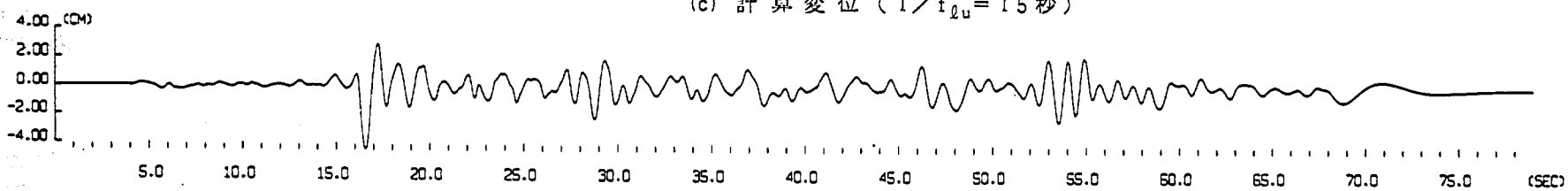
(a) 基準変位



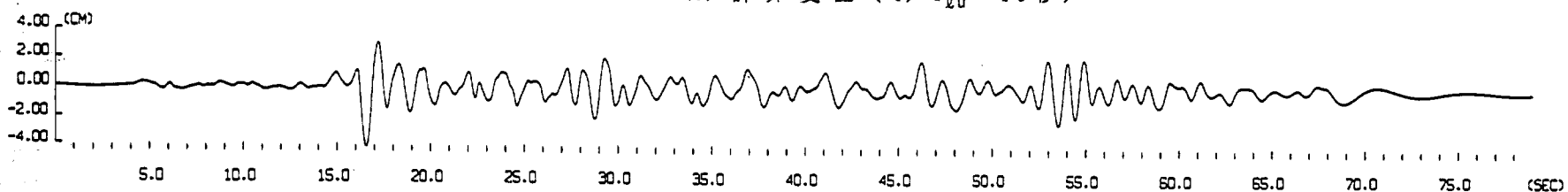
(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)



(d) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)



(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

図 3.1 (3) 基準変位と計算変位の比較 (実験 2 - a)

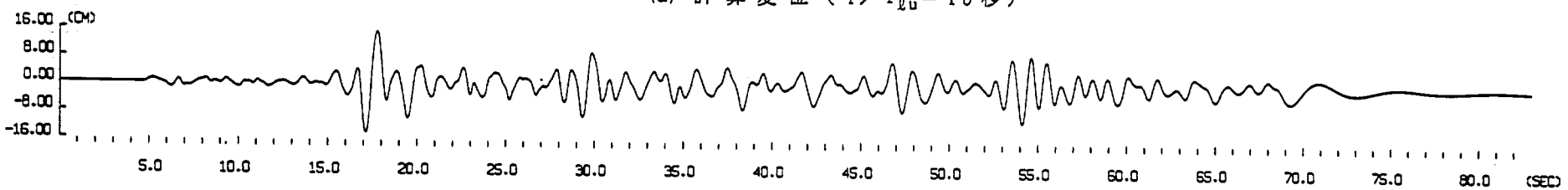
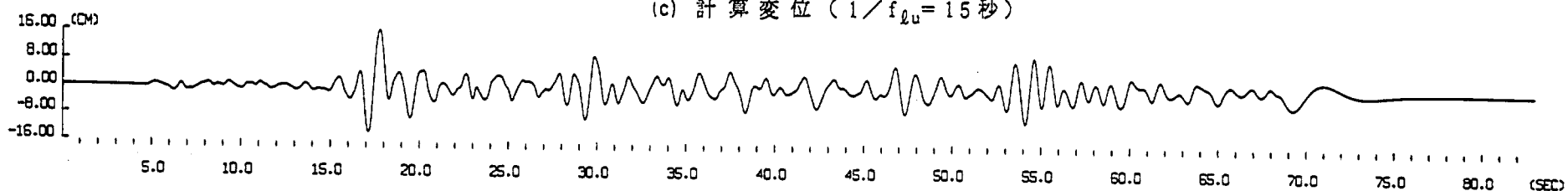
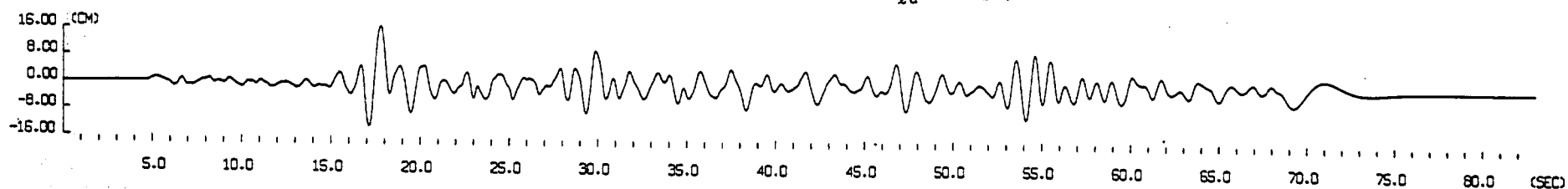
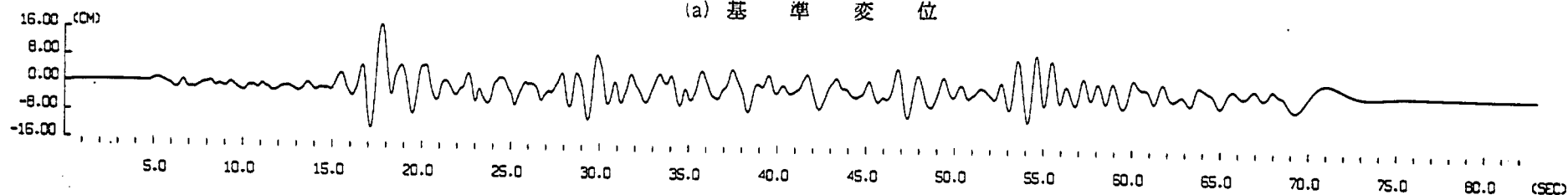
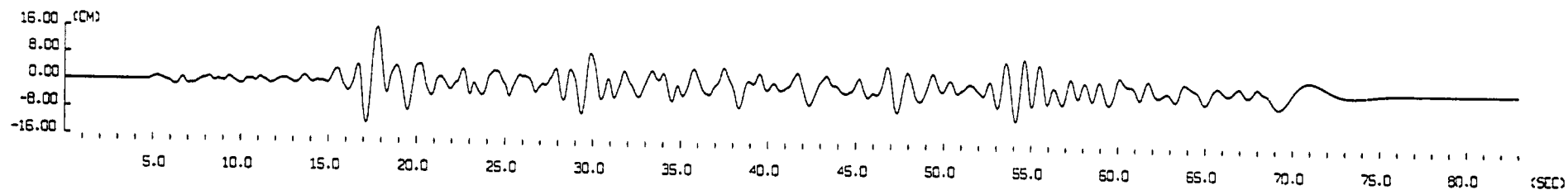
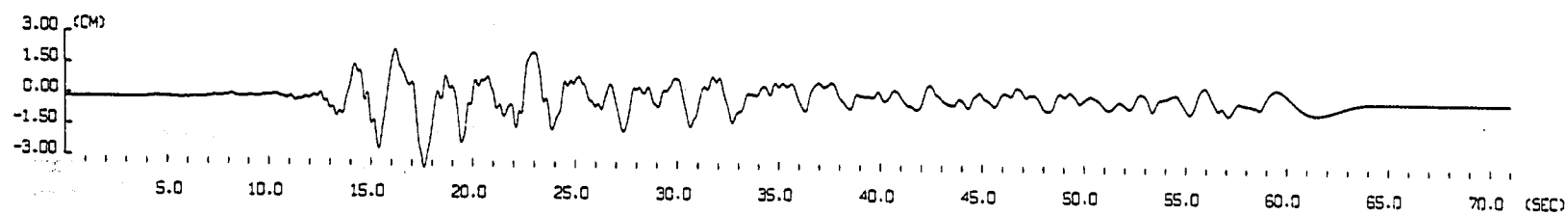
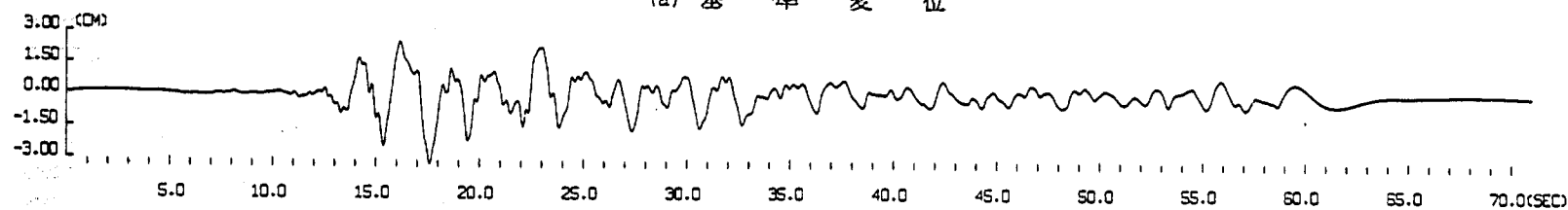


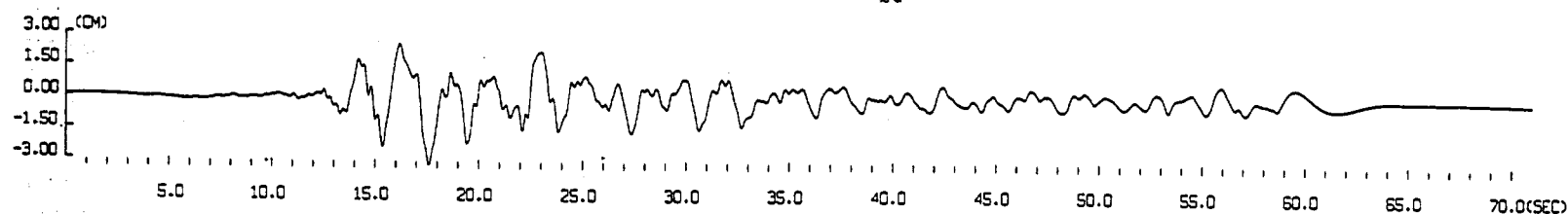
図 3.1 (4) 基準変位と計算変位の比較 (実験 2 - b)



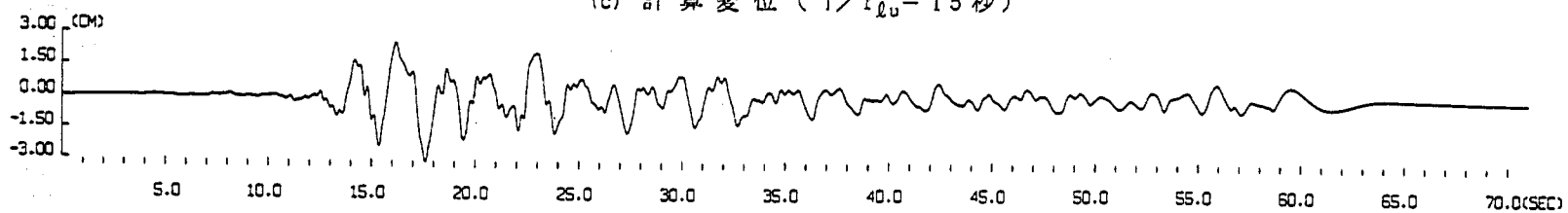
(a) 基準変位



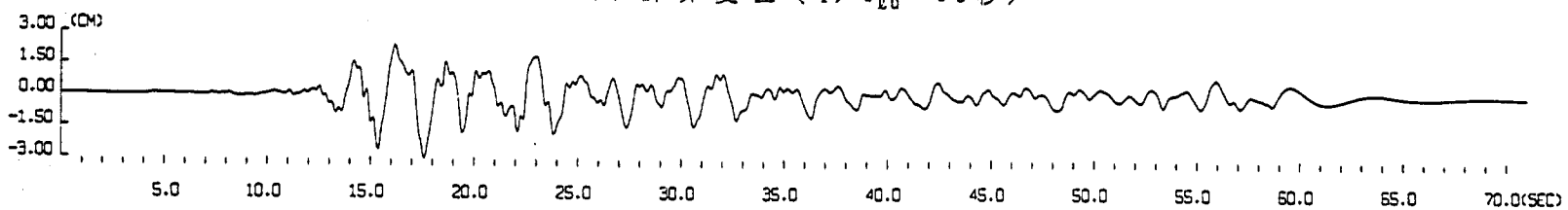
(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)

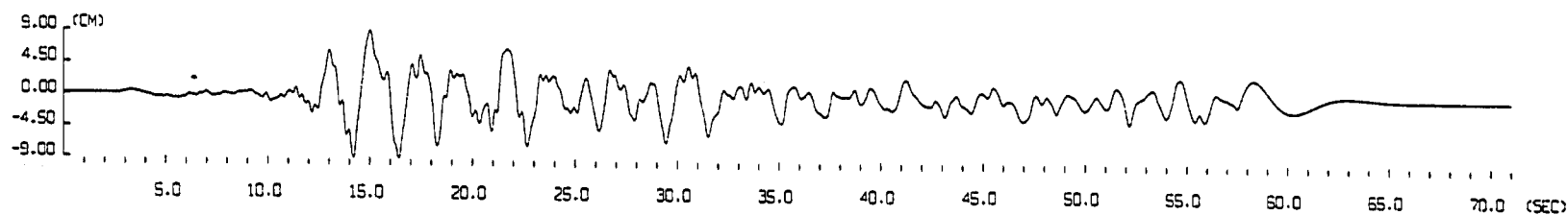


(d) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)

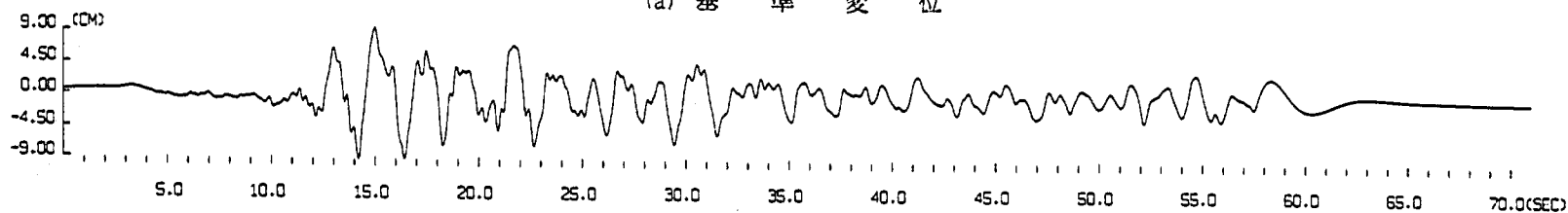


(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

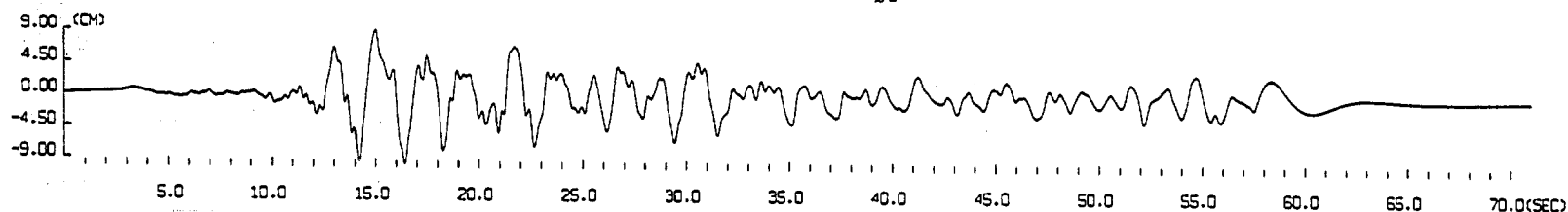
図 3.1 (5) 基準変位と計算変位の比較 (実験 3 - a)



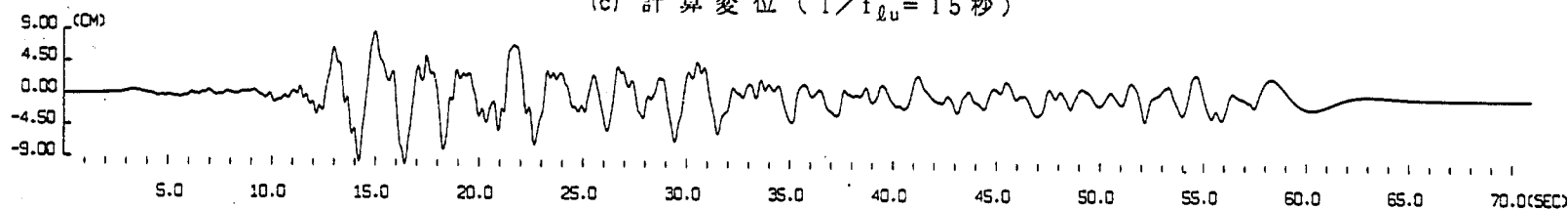
(a) 基準 変 位



(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)

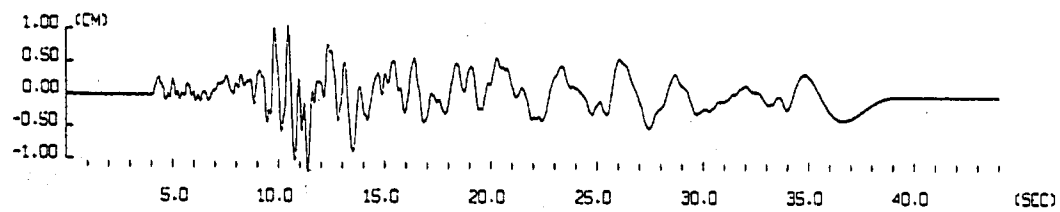


(d) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)

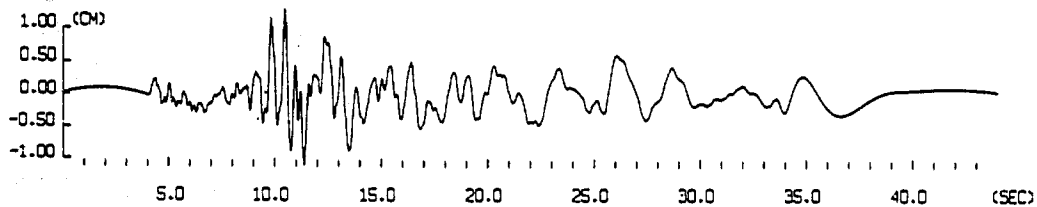


(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

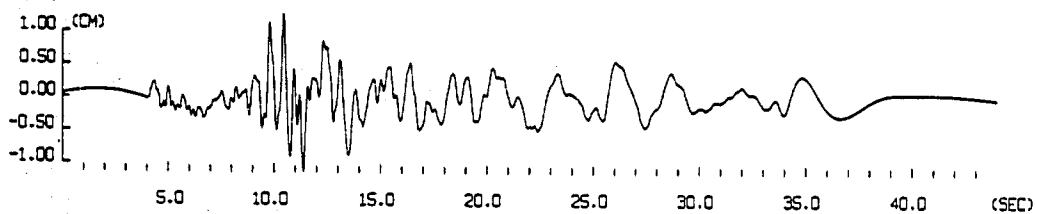
図 3.1 (6) 基準変位と計算変位の比較 (実験 3 - b)



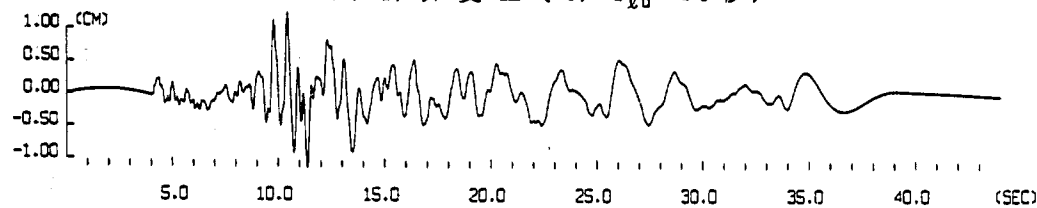
(a) 基準変位



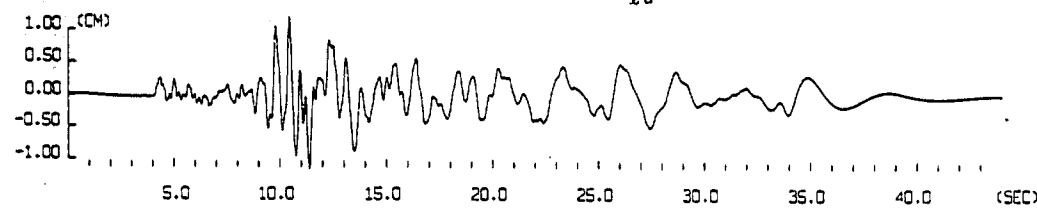
(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)

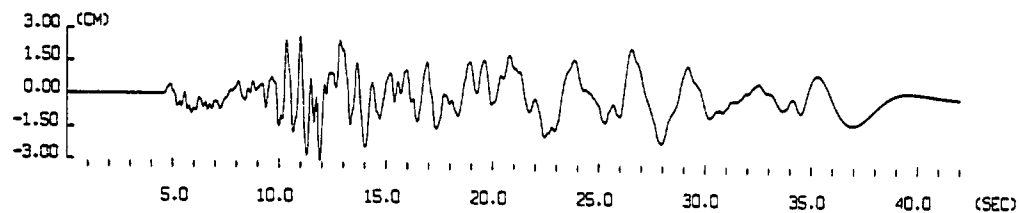


(d) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)

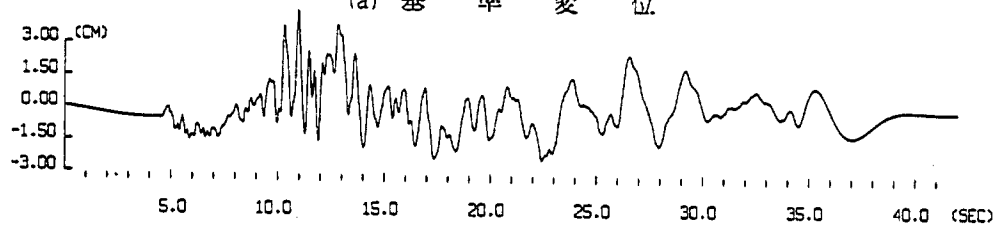


(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

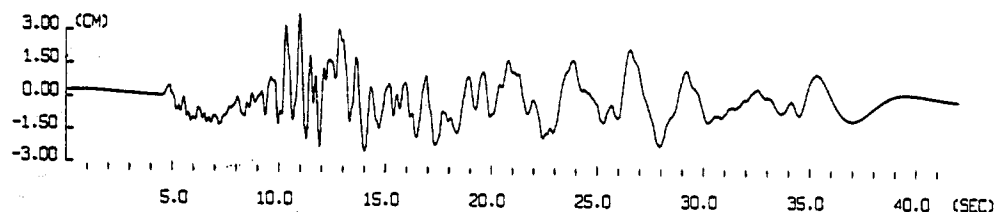
図 3.1 (7) 基準変位と計算変位の比較 (実験 4 - a)



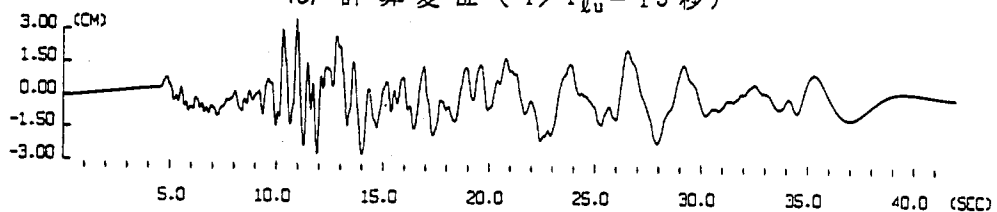
(a) 基準変位



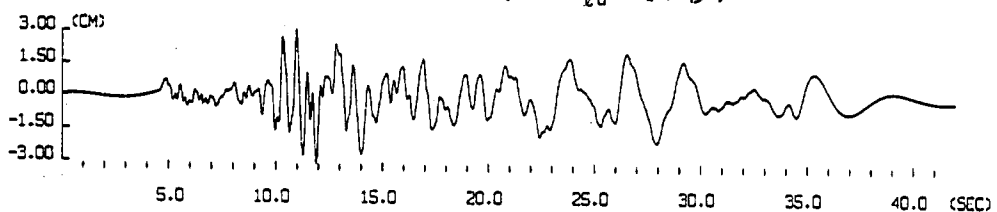
(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)

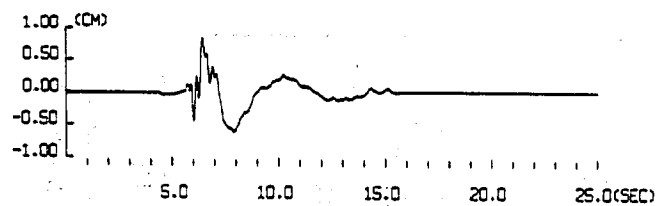


(d) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)

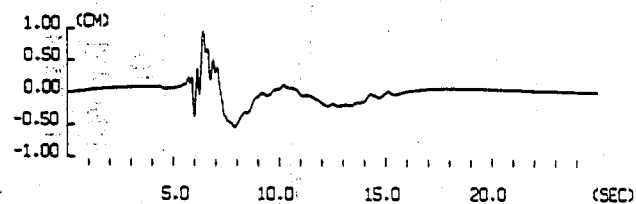


(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

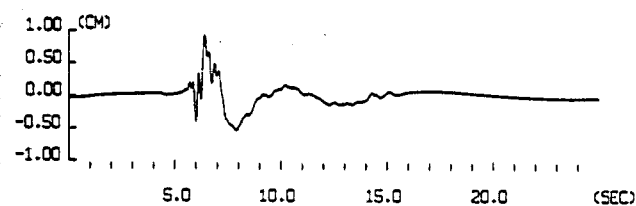
図 3.1 (8) 基準変位と計算変位の比較 (実験 4 - b)



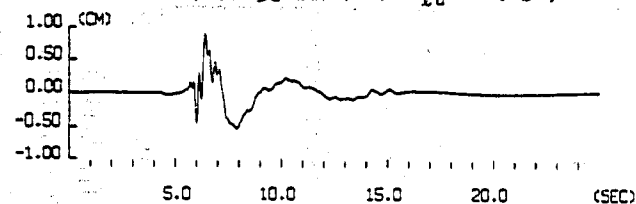
(a) 基準変位



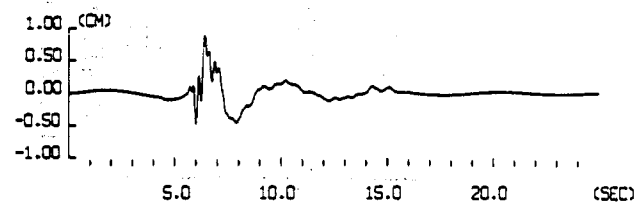
(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)

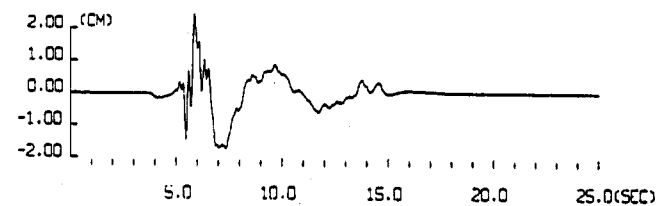


(d) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)

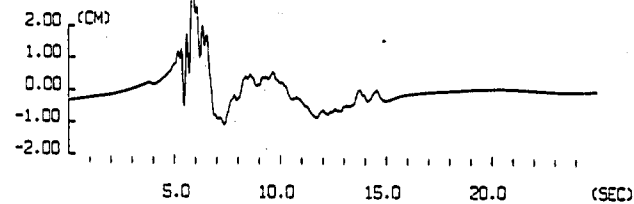


(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

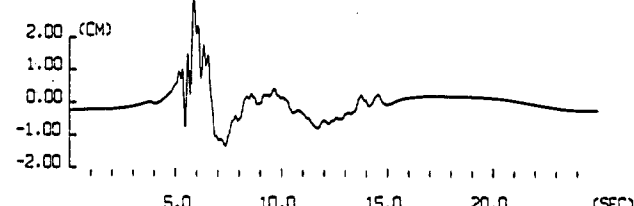
図 3.1 (9) 基準変位と計算変位の比較 (実験 5 - a)



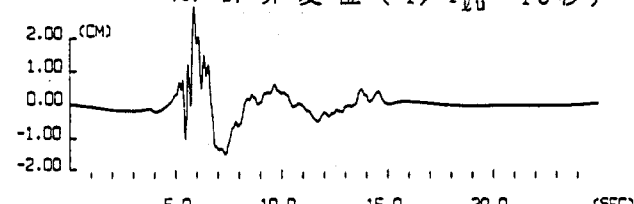
(a) 基準変位



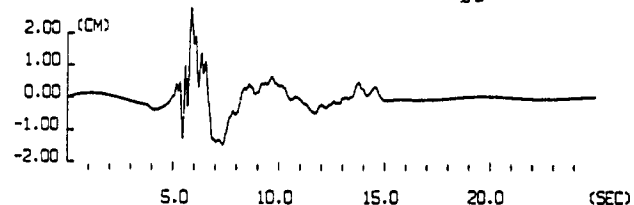
(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 20$ 秒)



(c) 計算変位 ($1/f_{lu} = 15$ 秒)

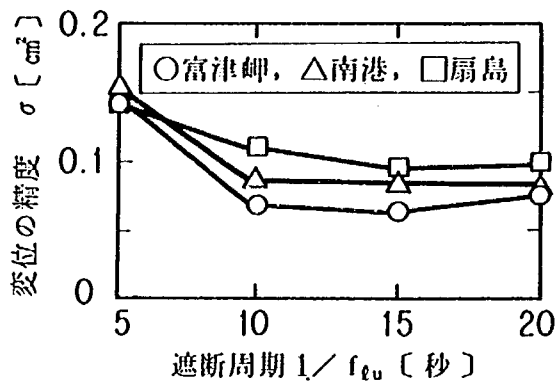


(b) 計算変位 ($1/f_{lu} = 10$ 秒)

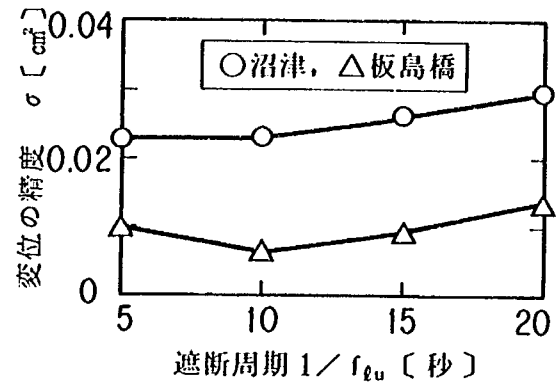


(e) 計算変位 ($1/f_{lu} = 5$ 秒)

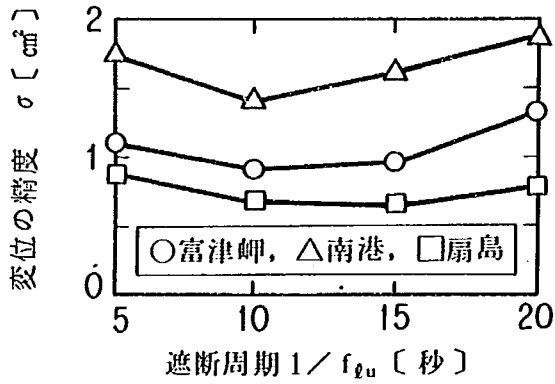
図 3.1 (10) 基準変位と計算変位の比較 (実験 5 - b)



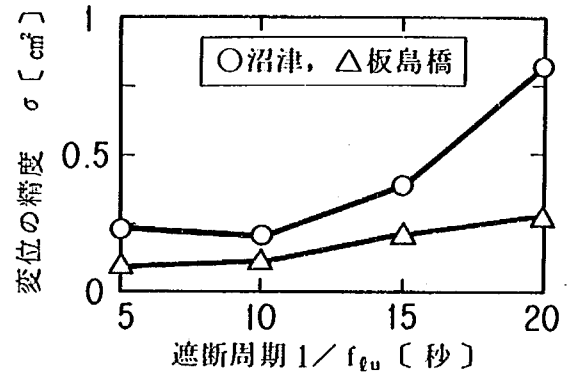
(a) 実験 1-a, 2-a, 3-a



(b) 実験 4-a, 5-a

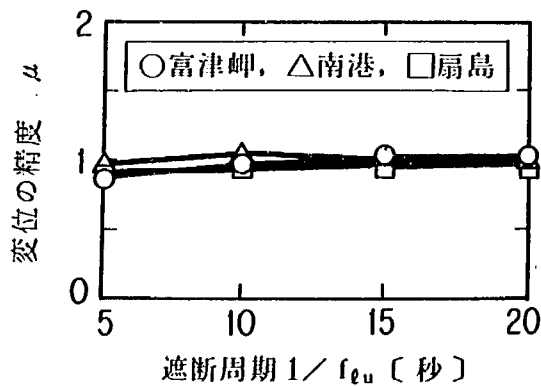


(c) 実験 1-b, 2-b, 3-b

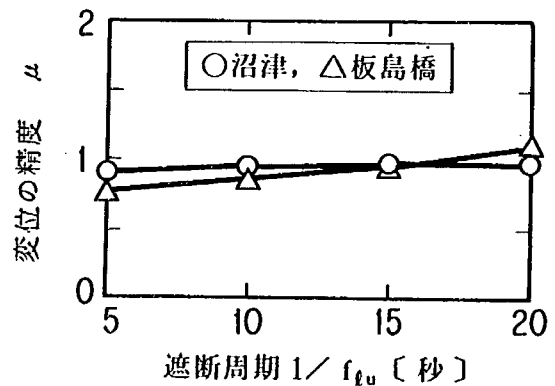


(d) 実験 4-b, 5-b

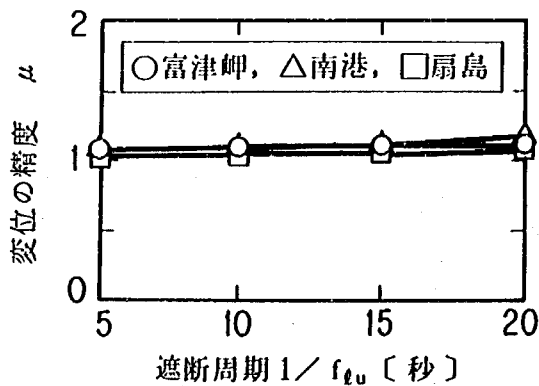
図 3.2 σ による変位精度の検討



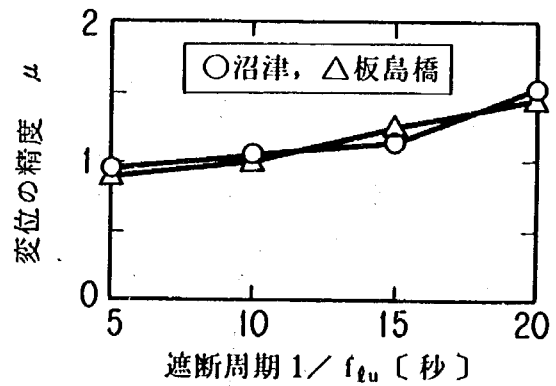
(a) 実験 1-a, 2-a, 3-a



(b) 実験 4-a, 5-a

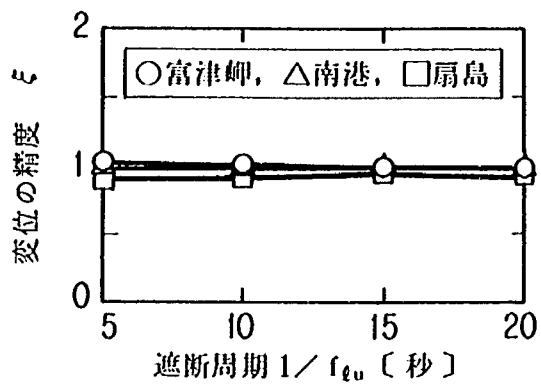


(c) 実験 1-b, 2-b, 3-b

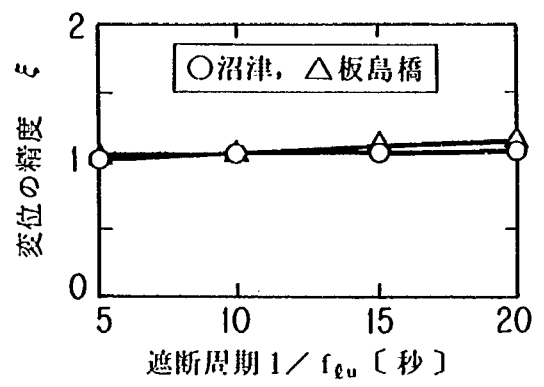


(d) 実験 4-b, 5-b

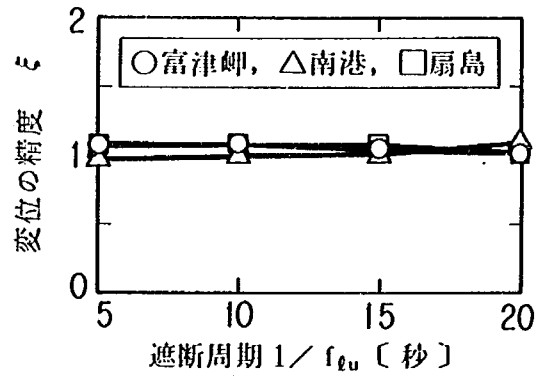
図 3.3 μ による変位精度の検討



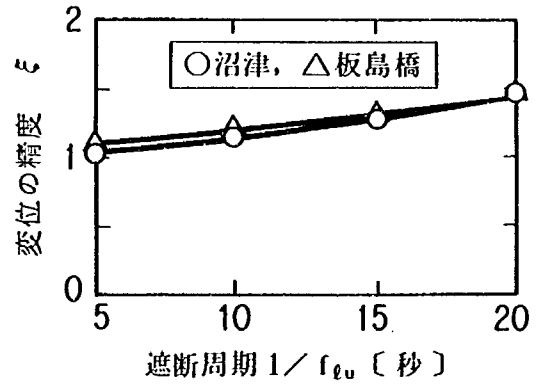
(a) 実験 1 - a, 2 - a, 3 - a



(b) 実験 4 - a, 5 - a



(c) 実験 1 - b, 2 - b, 3 - b



(d) 実験 4 - b, 5 - b

図 3.4 ξ による変位精度の検討

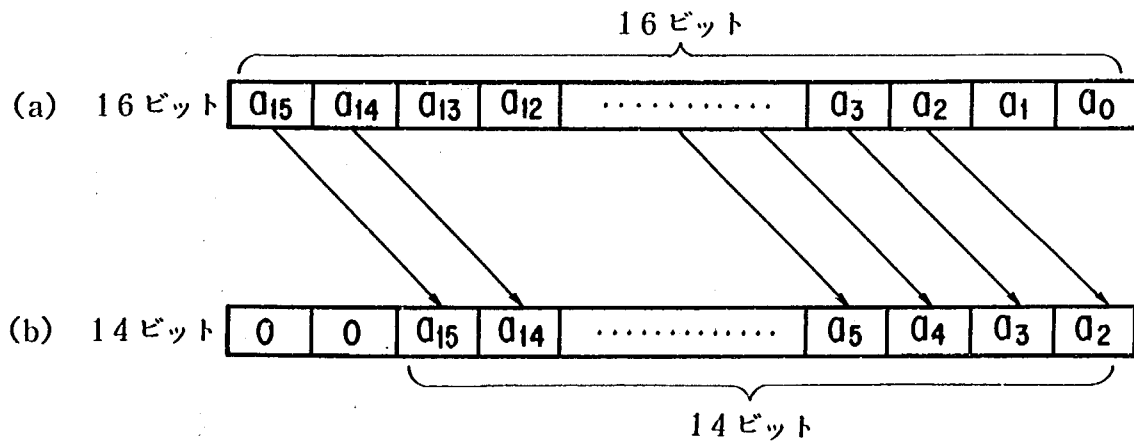


図 3.5 16 ビットと 14 ビットの比較

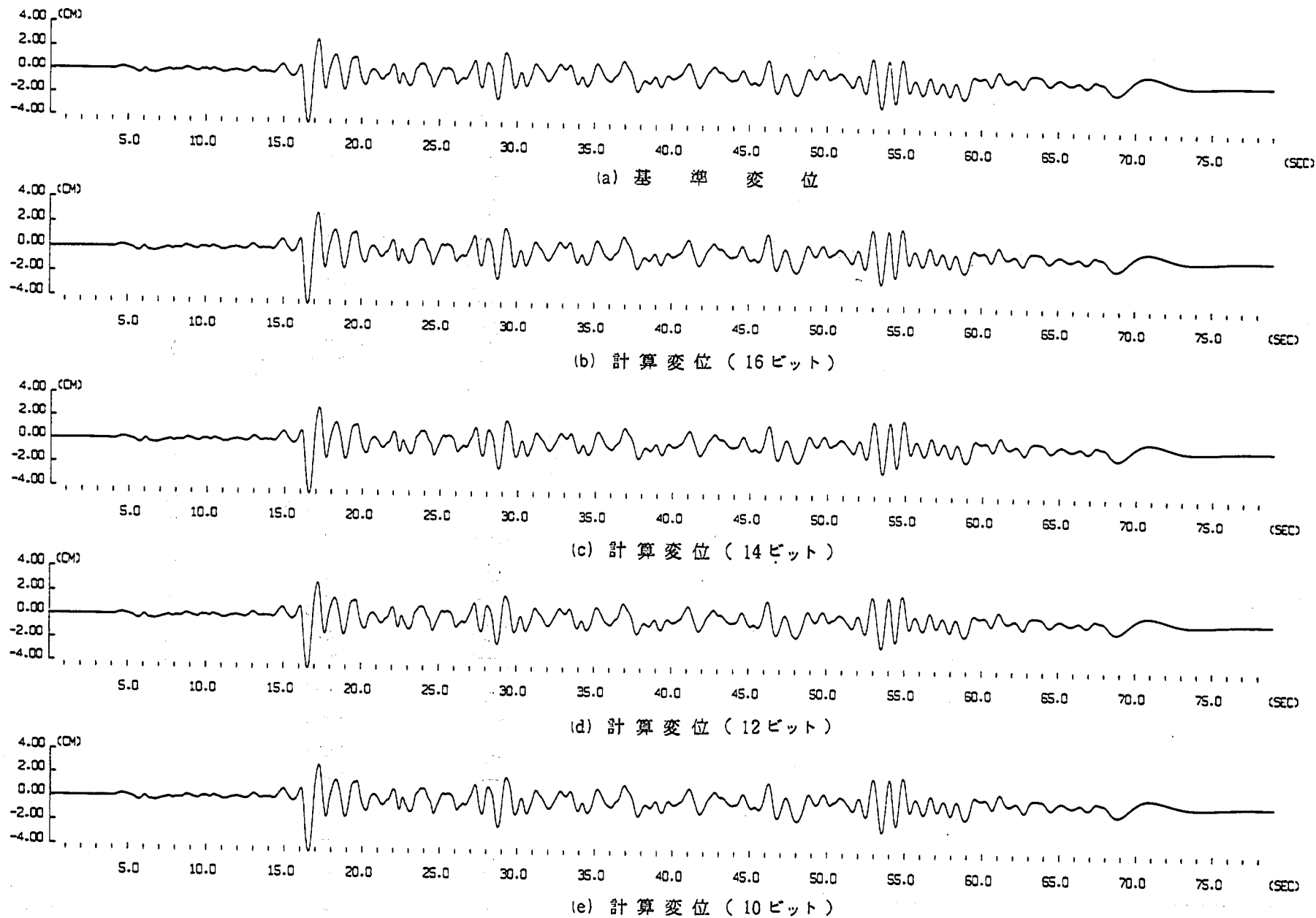
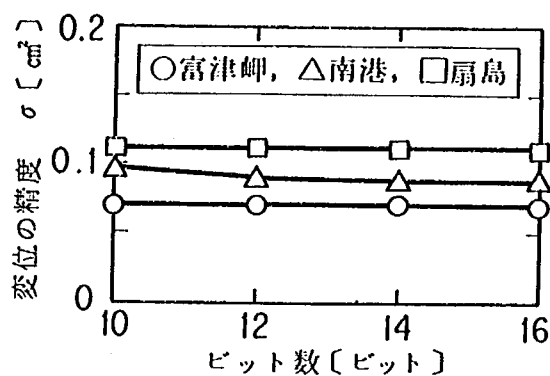
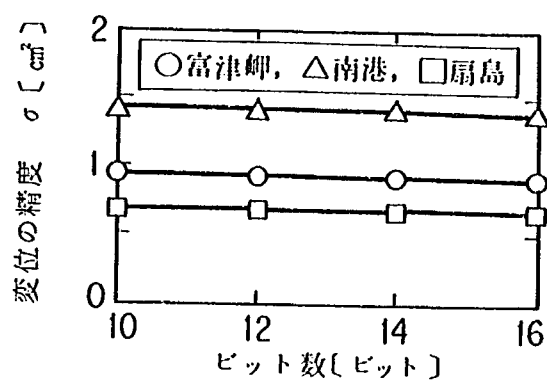


図 3.6 AD変換のビット数のちがいによる変位波形の比較例 (実験 2 - a)

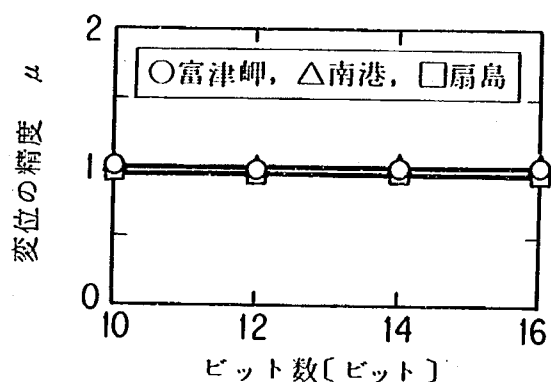


(a) 実験 1-a, 2-a, 3-a

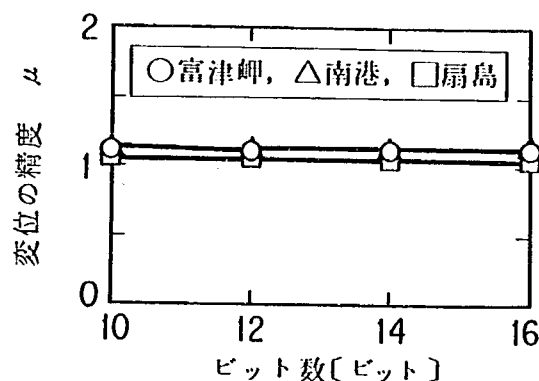


(b) 実験 1-b, 2-b, 3-b

図 3.7 σ によって表した A/D 変換のビット数と変位精度の関係

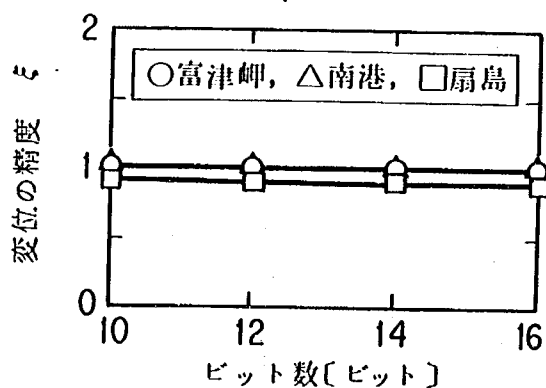


(a) 実験 1-a, 2-a, 3-a

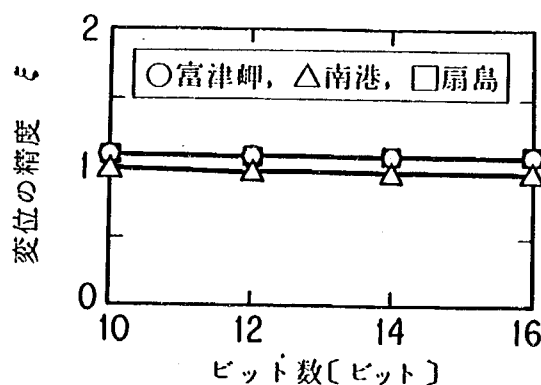


(b) 実験 1-b, 2-b, 3-b

図 3.8 μ によって表した A/D 変換のビット数と変位精度の関係

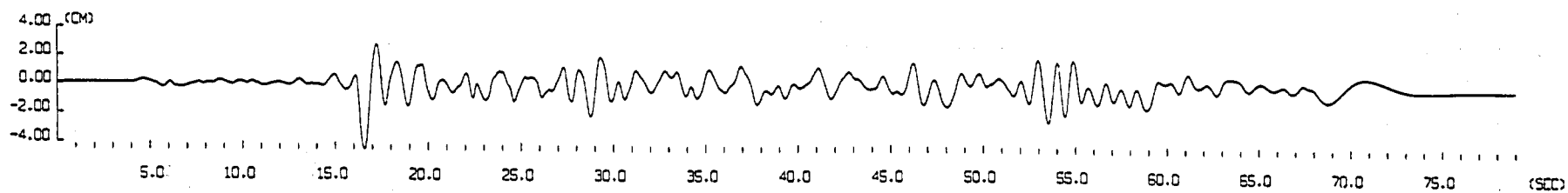


(a) 実験 1-a, 2-a, 3-a

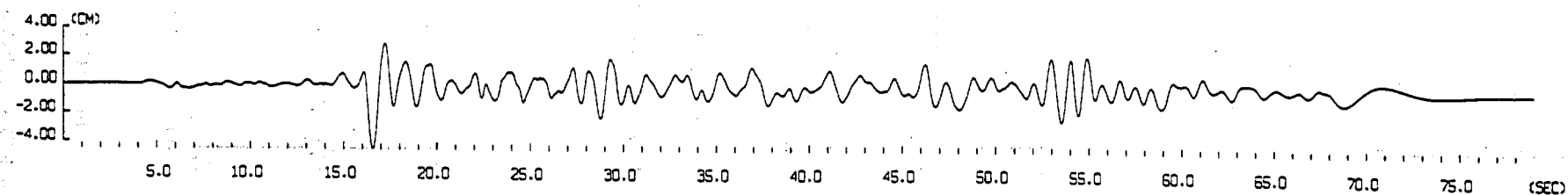


(b) 実験 1-b, 2-b, 3-b

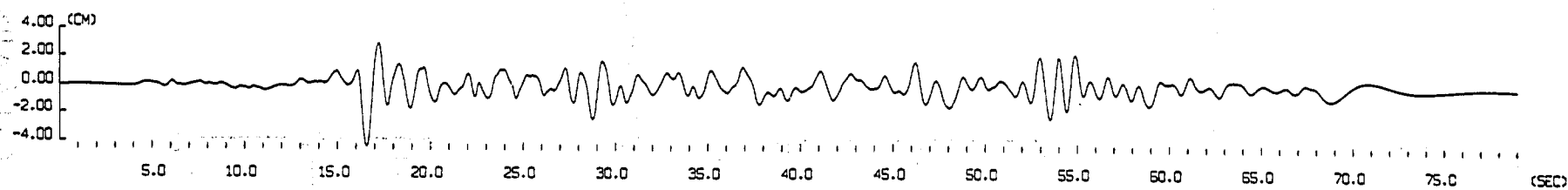
図 3.9 ξ によって表した A/D 変換のビット数と変位精度の関係



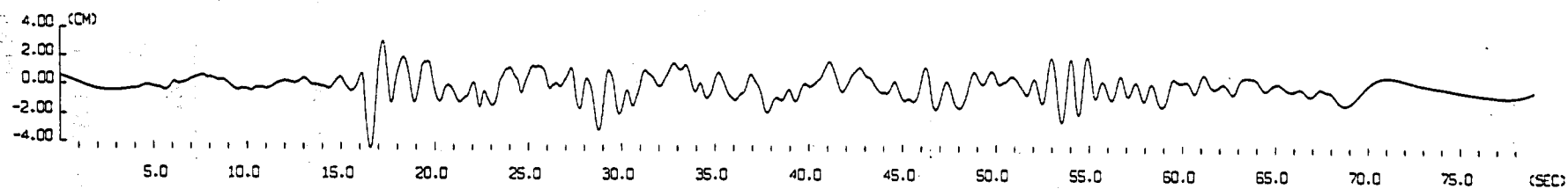
(a) 基準変位



(b) 計算変位 (1/200 秒サンプリング)

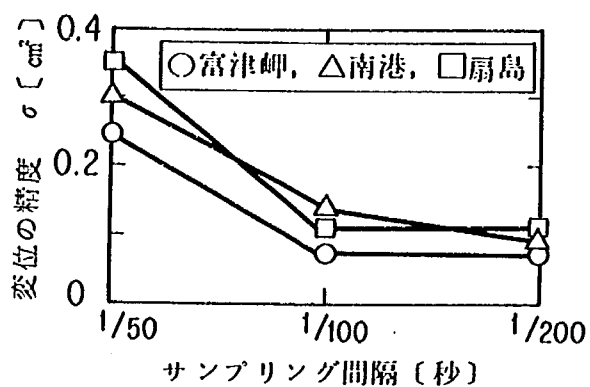


(c) 計算変位 (1/100 秒サンプリング)

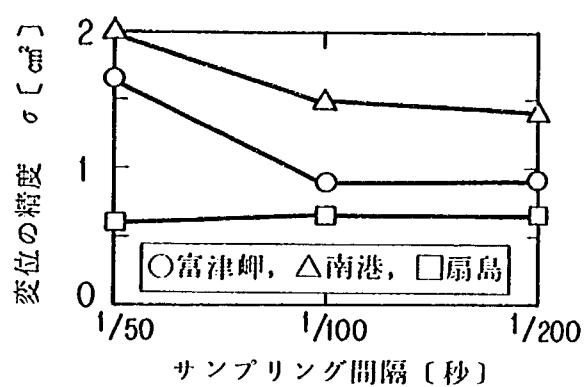


(d) 計算変位 (1/50 秒サンプリング)

図 3.10 サンプリング間隔のちがいによる変位波形の比較例 (実験 2 - a)

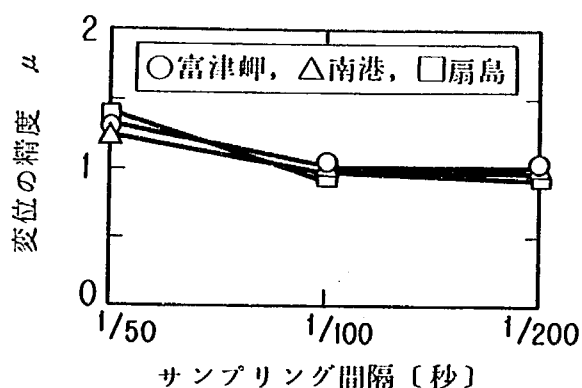


(a) 実験1-a, 2-a, 3-a

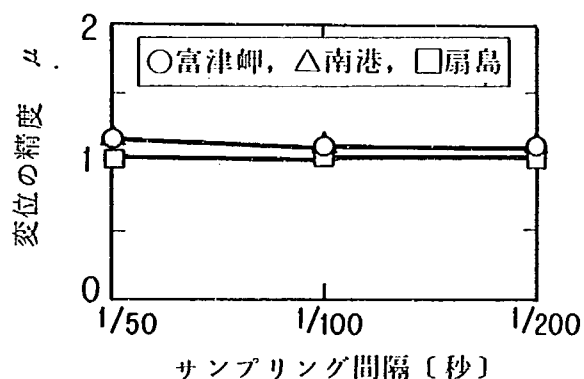


(b) 実験1-b, 2-b, 3-b

図3.11 σ によって表したサンプリング間隔と変位精度の関係

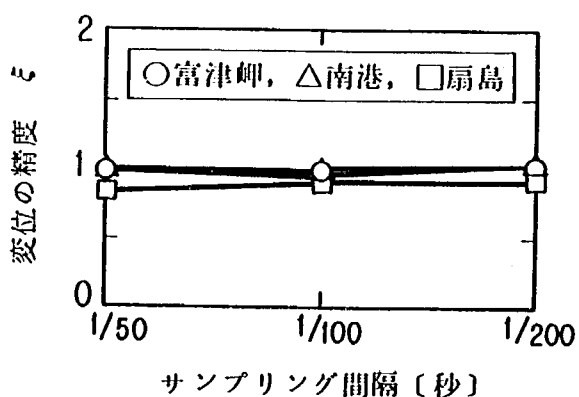


(a) 実験1-a, 2-a, 3-a

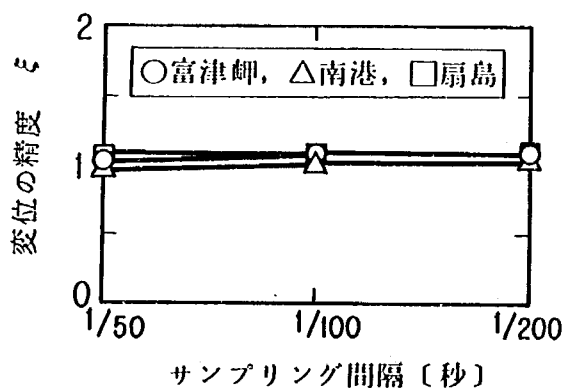


(b) 実験1-b, 2-b, 3-b

図3.12 μ によって表したサンプリング間隔と変位精度の関係

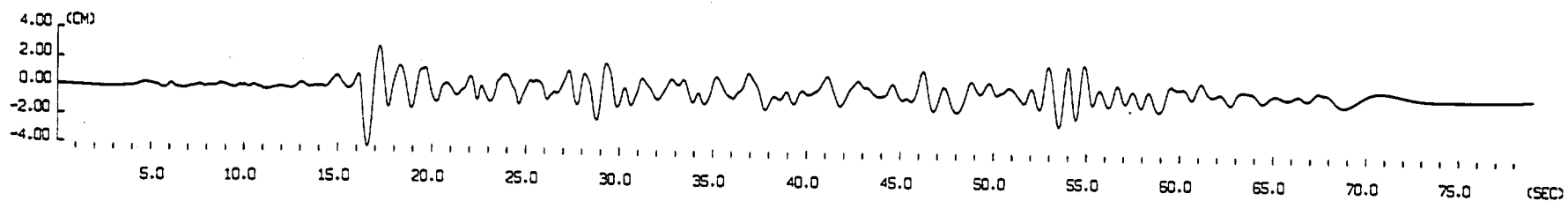


(a) 実験1-a, 2-a, 3-a

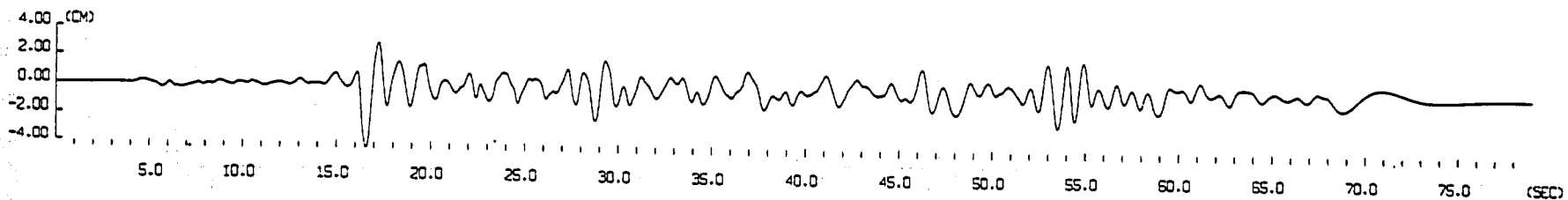


(b) 実験1-b, 2-b, 3-b

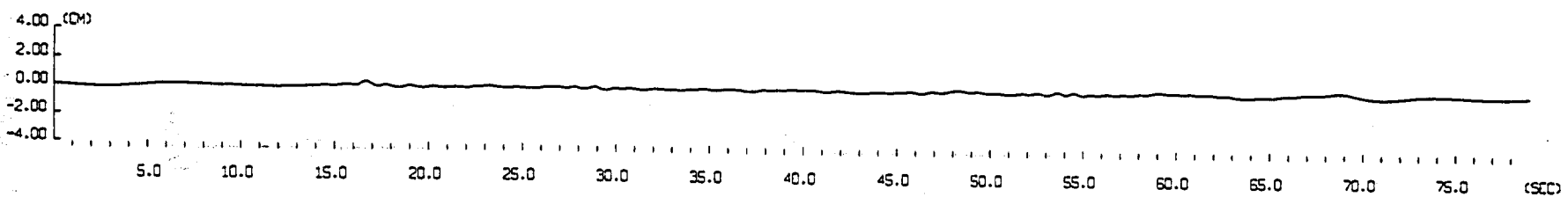
図3.13 ξ によって表したサンプリング間隔と変位精度の関係



(a) 計算変位 $d_1(t)$



(b) 計算変位 $d_2(t)$



(c) 計算変位の差 $d_1(t) - d_2(t)$

図 3.14 同時加振した 2 台の強震計の計算変位の比較例 (実験 2 - a)

4. 結 論

1/200秒のサンプリング間隔で16ビットAD変換器を有するデジタル強震計の加速度記録の精度を、これから数値積分して求めた変位の精度を中心として検討を行った。本検討より得られた結論は、以下のとおりである。

- (i) 加速度記録から数値積分により求めた変位の再現性を検討すると、低振動数側の遮断振動数を $1/10\text{Hz}$ 程度にとった場合が最も変位の再現性がよい。
- (ii) 今回検討を行った範囲内では、AD変換器のビット数を16ビットから10ビットまで変化させても、変位の再現性に有意な差は認められない。これは、加振実験の加速度レベルがAD変換器の分解能より十分に大きかったためであると考えられる。ただし、付属資料1に示したように、加速度レベルが小さい場合には、AD変換器のビット数が小さくなるとともに変位の再現性は著しく低下する。
- (iii) 変位の再現性に対するAD変換のサンプリング間隔の影響は、1/200秒と1/100秒の間ではほとんど差位が認められない。ただし、サンプリング間隔を1/50秒にすると、これらに比較して変位の精度は著しく低下する。
- (iv) 同一の振動台上で同時に加振した任意の2台の強震計記録から別々に計算される変位の一致度を検討すると、両者の変位の差(相対変位)の最大値は、変位の最大値の5%程度である。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：SMAC型強震計の短周期成分特性に関する実験的研究，土木研究所資料，第1505号，昭和54年3月
- 2) 岩崎敏男，川島一彦，若林 進，高木義和：地震応答スペクトルに及ぼすSMAC型強震計特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第309号，1981年5月
- 3) 川島一彦，高木義和，相沢 興：ディザタイザーによるSMAC型強震計記録の数値化精度，土木学会論文報告集，第323号，1982年7月
- 4) 川島一彦，高木義和，相沢 興：数値化精度を考慮したSMAC-B₂型強震計記録の計器補正法および変位計算法，土木学会論文報告集，第325号，1982年9月
- 5) International Association for Earthquake Engineering：Strong-motion Earthquake Instrument Arrays, Proc. of the International Workshop on Strong-motion Earthquake Instrument Arrays, Edited by Iwan, W. D., 1978, Honolulu, Hawaii, U. S. A.
- 6) 大久保忠良：高密度強震観測計画について，土木技術資料，第22巻，第4号，昭和55年4月
- 7) 大久保忠良，岩崎敏男，川島一彦：土木研究所における高密度強震観測計画および記録の解析，日米天然会議耐風耐震構造専門部会，第13回合同部会，昭和56年5月
- 8) 大久保忠良，荒川直士，川島一彦：土木研究所における高密度強震観測および記録の解析，日米天然会議耐風耐震構造専門部会，第14回合同部会，昭和57年5月
- 9) 建設省土木研究所：土木研究所における高密度強震観測システム — (1) 相良地区の観測システム — 土木研究所資料，第1847号，昭和57年7月
- 10) 建設省土木研究所：土木研究所における高密度強震観測システム — (2) 焼津地区の観測システム — 土木研究所資料，第1994号，昭和58年3月
- 11) 佐藤和夫，荒川直士，川島一彦，田村敬一：土木研究所における高密度強震観測，第17回地震工学研究発表会，講演概要，昭和58年7月
- 12) 田村敬一，川島一彦，相沢 興：ディジタル強震計の加速記録から求めた変位の精度，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，第1部，昭和58年9月
- 13) 大久保忠良，荒川直士，川島一彦：地震時の地盤ひずみの解析，土木技術資料，第24巻，第11号，昭和57年11月
- 14) 建設省土木研究所：線状地中構造物の耐震設計に用いる地盤時地盤ひずみの解析 — (1) 土研構内三次元同時地震観測記録の解析 — ，土木研究所資料，第1991号，昭和58年3月
- 15) 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，1978年9月

付 属 資 料 1

数値積分に及ぼすビット数とサンプリング間隔
の影響の検討

1. 10. 1944

2. 10. 1944

3. 10. 1944

1. 目 的

数値積分に及ぼすビット数およびサンプリング間隔の影響については、本文に示したとおりであるが、ここでは、これを補足するために、積分の正解値が得られる正弦波状の模擬波形（正弦波の $1/2$ 波長、付図 1.1 参照）を用いて、別途、ビット数およびサンプリング間隔が数値積分の精度に及ぼす影響を検討した。

2. 検討方法

付図 1.1 において斜線をひいた部分の面積 S_R は、次のように求められる。

$$\begin{aligned} S_R &= \int_0^{\frac{T}{2}} A_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} t \, dt \\ &= A_{\max} \frac{T}{2\pi} \left[-\cos \frac{2\pi}{T} t \right]_0^{\frac{T}{2}} \\ &= \frac{A_{\max} T}{\pi} \dots\dots\dots (付 1.1) \end{aligned}$$

ここで、 $A_{\max}$ 、 T はそれぞれ、模擬波形の振幅 [gal] および周期 [秒] である。一方、この部分の面積を付図 1.2 に示すように分解能 ΔA [gal]、サンプリング間隔 Δt [秒] の AD 変換に相当する離散型データを数値積分して求める場合は次のようになる。まず、 i 番目の Δt 区間における加速度の値を区間の中央 $t = t_i$ の時の加速度 A_i で代表することにする。すなわち、

$$t_i = \Delta t \left(i - \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (付 1.2)$$

$$A_i = A_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} t_i \dots\dots\dots (付 1.3)$$

ここで、AD 変換の分解能は ΔA であるから、AD 変換後の加速度の値 $A_{AD,i}$ は、次のように表される。

$$A_{AD,i} = \Delta A \left[\frac{A_i}{\Delta A} \right] \dots\dots\dots (付 1.4)$$

ここで、 $\left[\quad \right]$ は、ガウス記号を表す。したがって、数値積分により得られる面積 S_{AD} は、次のようになる。

$$S_{AD} = \sum_i A_{AD,i} \Delta t \dots\dots\dots (付 1.5)$$

式 (付 1.1) および (付 1.5) より、数値積分の精度を表す指標 α を次式で定義する。

$$\alpha = \frac{S_{AD}}{S_R} \dots\dots\dots (付 1.6)$$

なお、ここでは簡単のために半周期 $\frac{T}{2}$ がサンプリングタイム Δt の整数倍になるように周期を選ぶものとする。また、分解能 ΔA とビット数 N との関係は、ディジタル強震計のフルスケールを ± 1000 gal

とすると、

$$\Delta A = \frac{2000}{2^{N-1}} \dots\dots\dots (\text{付 1.7})$$

と求められる(3.4 参照)。

試算を行った最大加速度と周期の組合せは、付表 1.1 に示す $5 \times 4 = 20$ 組であり、また、ビット数は、10, 12, 14, 16 ビット、サンプリング間隔は $1/200$, $1/100$, $1/50$ 秒とした。

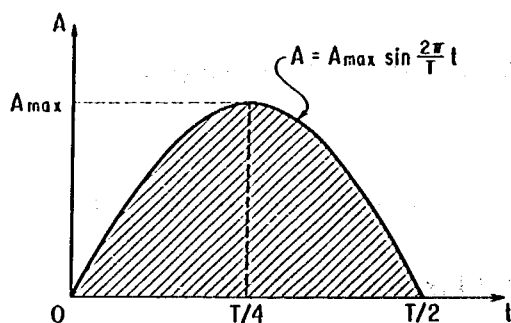
3. 考 察

α の計算結果を示すと、付図 1.3 のようになる。ここで、数値積分の精度が悪い場合を明らかにするために、付図 1.3 では $0.9 < \alpha \leq 0.95$, または、 $1.05 \leq \alpha < 1.1$ となる α の値を枠で囲んである。また、同様に、 $\alpha \leq 0.9$, または、 $\alpha \geq 1.1$ となる α の値は、2 重枠で囲まれている。付図 1.3 から以下の事項がわかる。

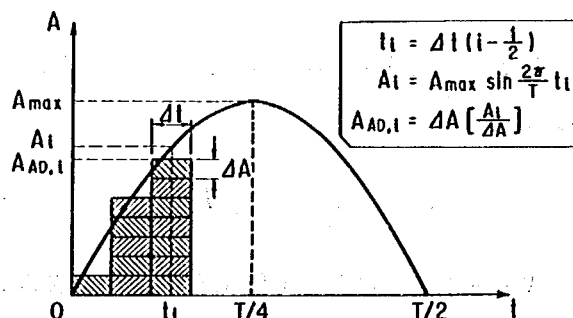
- (i) 加速度レベルが大きい場合には、一般に、数値積分の精度は、ビット数にはあまりよらず、サンプリング間隔が長くなると悪くなる。
- (ii) 逆に、加速度レベルが小さい場合には、一般に、数値積分の精度は、サンプリング間隔にはあまりよらず、ビット数が小さくなると悪くなる。
- (iii) 周期が長い場合には、サンプリング間隔の長短による精度の差は認められないが、周期が短い場合には、一般に、サンプリング間隔が長くなると、精度が悪くなる。

付表 1.1 試算を行った最大加速度と周期の組合せ

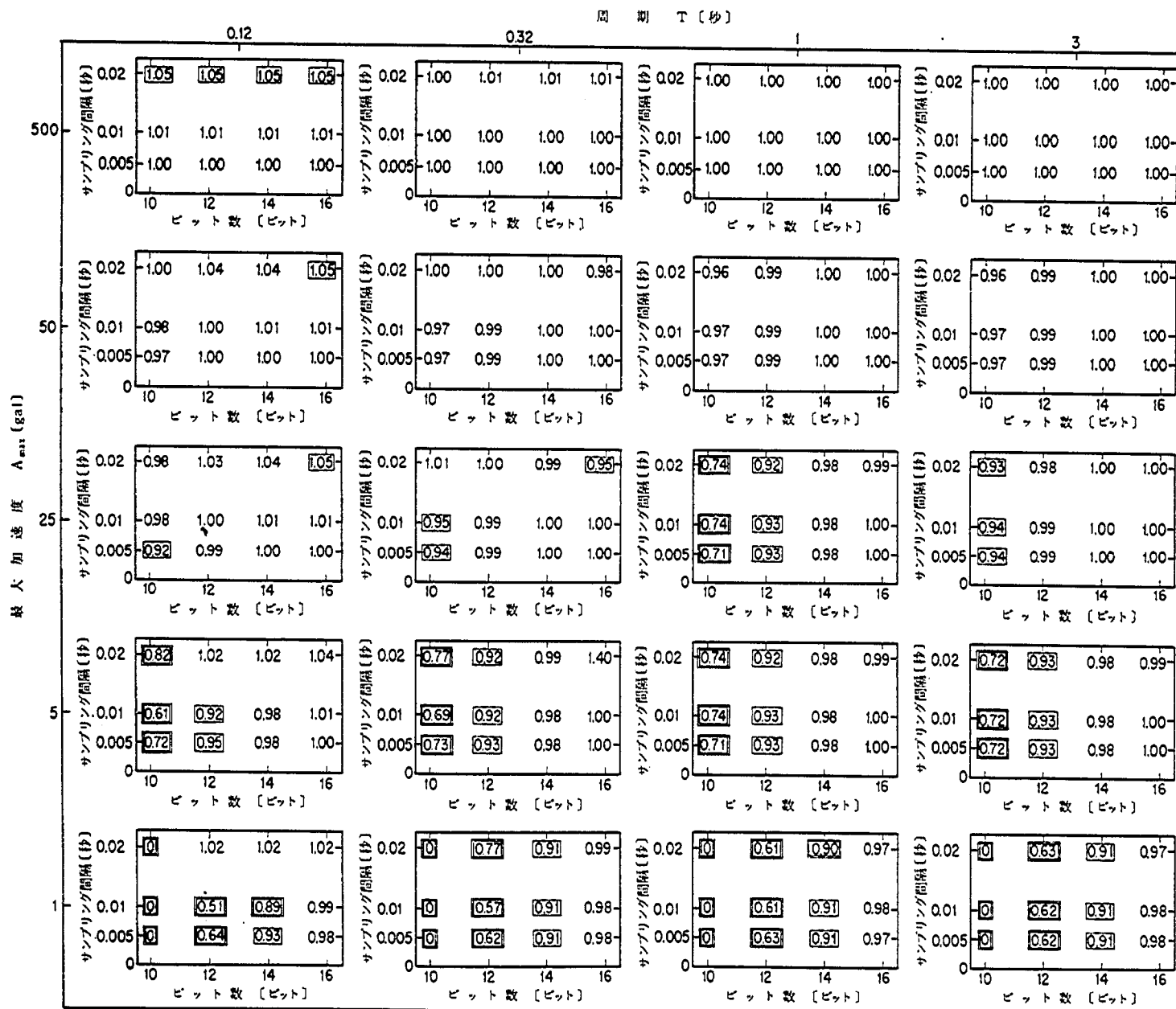
最大加速度 $A_{\max}$ [gal]	1, 5, 25, 50, 500
周期 T [秒]	0.12, 0.32, 1, 3



付図 1.1 解析の対象とした正弦波



付図 1.2 数値積分の原理



付図 1.3 ビット数およびサンプリング間隔と数値積分の精度の関係

付 属 資 料 2

地震動波形の数値微分精度に関する検討

1944-1945

1946-1947

1. まえがき

加速度記録を2回数値積分して変位を求める手法に関しては、現在までに各種の提案が行われているが、変位からの数値微分の精度の検討を行った例は非常に少ない。ここでは、模擬地震波を用いたデジタル強震計の加振実験結果をもとに、地震動変位記録を振動数領域および時間領域で数値微分した際の精度を微分時間間隔に着目して、検討した結果を示す。

2. 数値微分の方法

デジタル強震計（16ビットA/D変換器，サンプリング間隔 $\Delta t = 1/200$ 秒）の加振実験により，得られた加速度記録 $a_0(t)$ を振動数領域で2回数値積分して変位 $d(t)$ を求め，これを微分精度の検討に用いる変位波形とした。ここで，数値積分時には高振動数側および低振動数側の遮断振動数（ f_{ul} および f_{lu} ）は，それぞれ，20 Hz，1/20 Hzとした。これを以下のように2種類の方法で数値微分した。

(i) 振動数領域での微分：数値積分より求めた変位 $d(t)$ のフーリエ変換 $F_0(f)$ を次式により求めた。

$$F_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} d(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad \text{..... (付 2.1)}$$

これに台形状のバンドパスフィルター $F_c(f)$ を見込み，加速度 $a_1(t)$ を次式で求めた。

$$a_1(t) = - \int_{-\infty}^{\infty} 4\pi^2 f^2 F(f) e^{2\pi i f t} df \quad \text{..... (付 2.2)}$$

ここで， $F(f) = F_0(f) \cdot F_c(f)$ であり， $F_c(f)$ は次のようにした。

$$F_c(f) = \begin{cases} 0 & \text{..... } 0 \leq f < f_{ll} \\ \frac{f - f_{ll}}{f_{lu} - f_{ll}} & \text{..... } f_{ll} \leq f \leq f_{lu} \\ 1 & \text{..... } f_{lu} \leq f \leq f_{ul} \\ \frac{f_{uu} - f}{f_{uu} - f_{ul}} & \text{..... } f_{ul} \leq f \leq f_{uu} \\ 0 & \text{..... } f > f_{uu} \end{cases} \quad \text{..... (付 2.3)}$$

ここで， f_{ll} ， f_{lu} ， f_{ul} ， f_{uu} は，それぞれ 1/21，1/20，20，21 Hzとした。

(ii) 時間領域での微分：時間差分を2回行い，加速度 $a_2(t)$ を次式で求めた。

$$v(t) = \frac{d(t + \Delta t) - d(t)}{\Delta t} \quad \text{..... (付 2.4)}$$

$$a_2(t) = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} \quad \text{..... (付 2.5)}$$

以上のようにして求めた加速度 $a_1(t)$ ， $a_2(t)$ の精度を検討するため， $a_1(t)$ ， $a_2(t)$ および式（付 2.3）のバンドパスフィルターをかけた $a_0(t)$ の加速度応答スペクトル $S_1(t)$ ， $S_2(t)$ ， $S_0(t)$ （減衰

定数2%)を求め、これらの比(応答スペクトル比)を次のように定義した。

$$\eta^F(T) = S_1(T)/S_0(T) \quad \dots\dots\dots (付2.6)$$

$$\eta^T(T) = S_2(T)/S_0(T) \quad \dots\dots\dots (付2.7)$$

以上に示した数値微分の精度の検討フローチャートを付図2.1に示す。

3. 試 算 例

式(付2.2)、(付2.4)および(付2.5)を用いて、付表2.1に示す6ケースの地震動変位 $d(t)$ を数値微分し、加速度 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ を求めた。微分に際しては、1/200秒間隔の $d(t)$ の値を間引きすることにより、微分時間間隔 Δt を1/200秒の他に1/100、1/50、1/20、1/10秒の5種類に変化させた。ここで、もととなった6ケースの実測加速度波形 $a_0(t)$ と、その応答スペクトルおよび $d(t)$ 、 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ の地震動波形を示すと、付図2.2～2.16のようになる。これより、式(付2.6)および(付2.7)の応答スペクトル比 $\eta^F(T)$ 、 $\eta^T(T)$ を求め、その結果を示すと、付図2.17および付図2.18のようになる。また全体の傾向をとらえるために最大加速度の似かよったケース1、3、5間およびケース2、4、6間で応答スペクトル比 $\eta^F(T)$ 、 $\eta^T(T)$ をそれぞれ平均すると付図2.19～付図2.22のようになる。

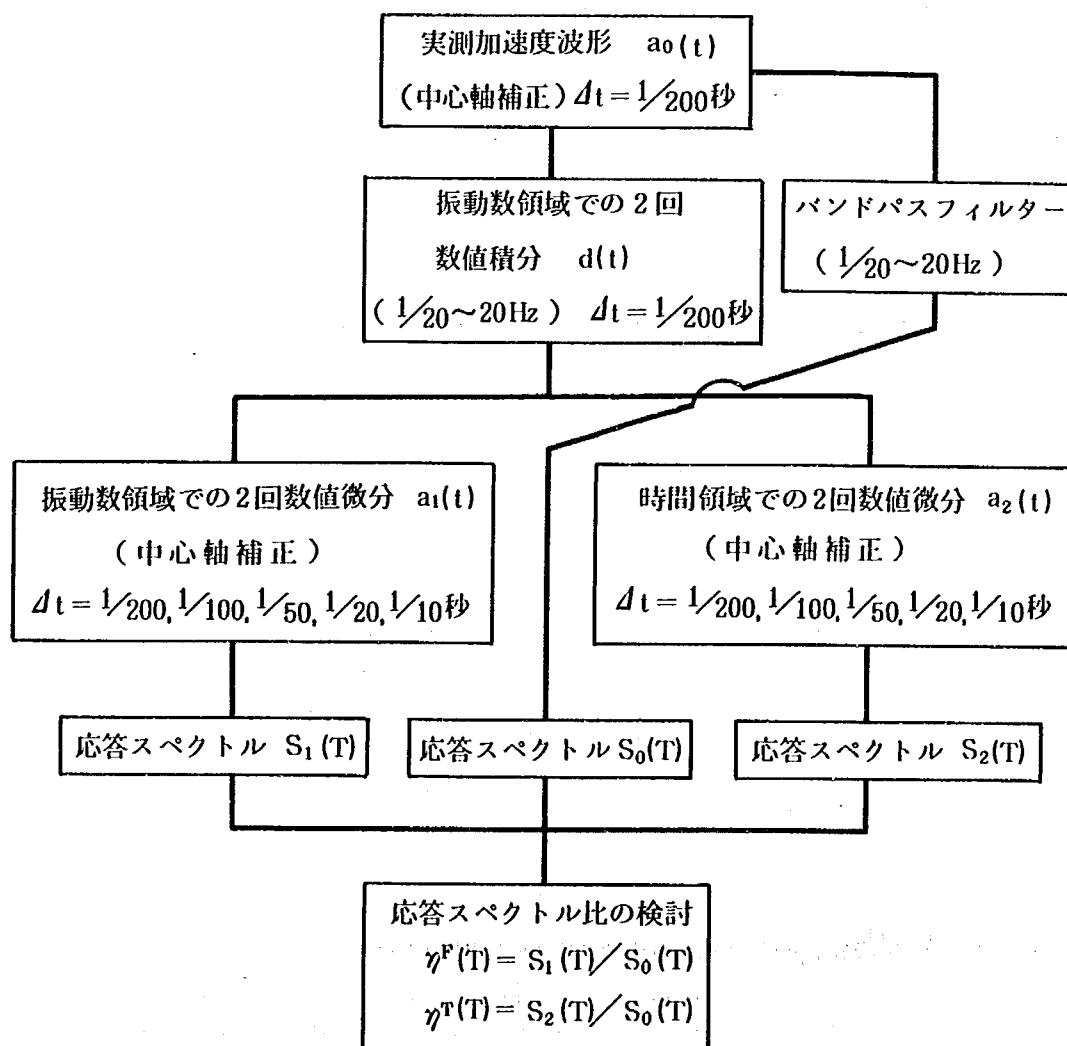
4. ま と め

以上の検討結果より、数値微分の精度に関して、以下の事項が指摘できる。

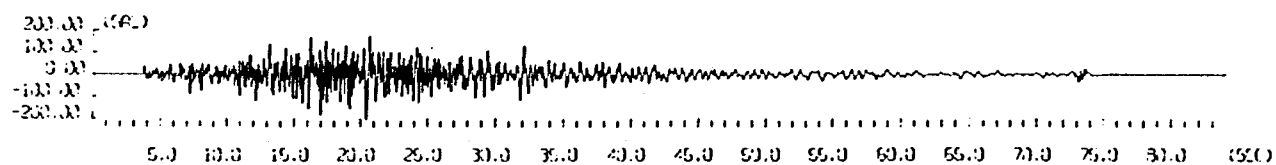
- (i) Δt が1/200秒の場合には、周期が0.07～7秒の範囲で $\eta^F(T)$ 、 $\eta^T(T)$ は、共にほぼ1.0となっており、この周期範囲では、数値微分精度が安定している事を示している。また7秒以上の周期範囲においては、応答スペクトル比の変動が多少認められる。これについては、今後、慎重に検討していきたい。
- (ii) Δt が大きくなると短周期領域における、波形の形状が正しくとらえられない。また、応答スペクトル比で表わした微分精度の安定した周期範囲が狭くなる。
- (iii) 周波数領域の微分と時間領域の微分を比較すると、一般に、前者の方が後者より精度がよい。

付表 2.1 加振実験に用いた地震動記録

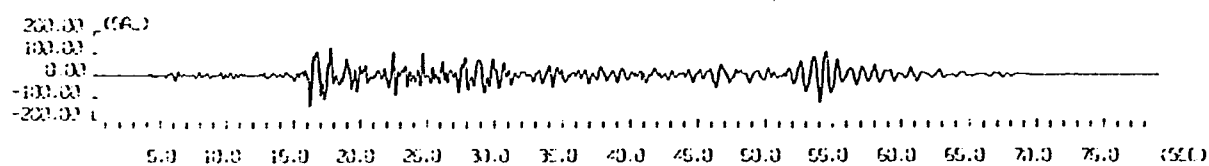
実験 ケース	入 力 地 震 動 記 録					最大加速度	最大変位
	発生年月日	地震名	M	記録地点	最大加速度 [gal]	$a_{0, \max} [\text{gal}]$	$d_{\max} [\text{cm}]$
1	1972. 2.29	八 丈 島	7.1	富津岬地盤上	2 3	2 0 0.7 6	2.8 2
2		近 海 地 震		(N-S成分)		8 1 9.3 5	1 1.9 6
3	1973.11.25	和歌山県中部	5.6	南港橋周辺地盤	1 3	1 3 8.9 4	4.3 9
4		の 地 震		上(N-S成分)		4 8 5.8 2	1 7.6 7
5	1974. 8. 4	栃木県-茨城	5.8	扇 島 地 盤 上	8	2 0 2.2 3	3.3 2
6		県 境 の 地 震		(E-W成分)		6 6 4.7 3	9.6 0



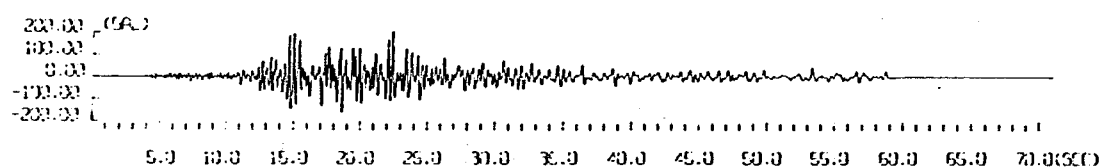
付図 2.1 数値微分精度の検討フローチャート



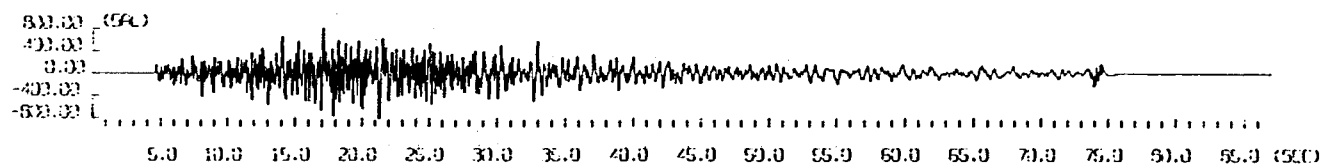
(a) ケース 1



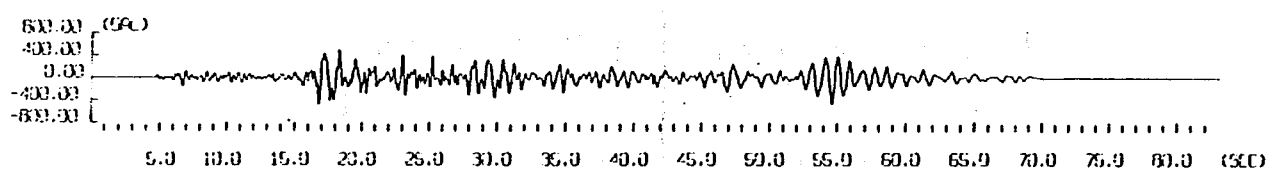
(b) ケース 2



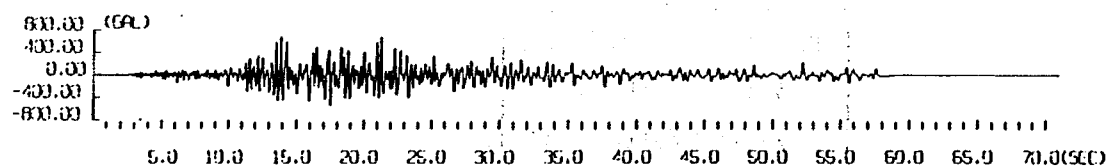
(c) ケース 3



(d) ケース 4

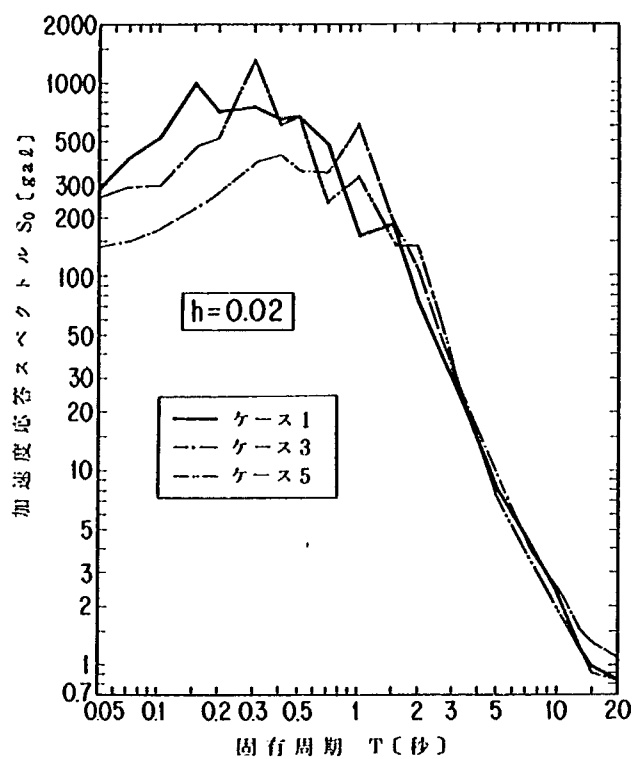


(e) ケース 5

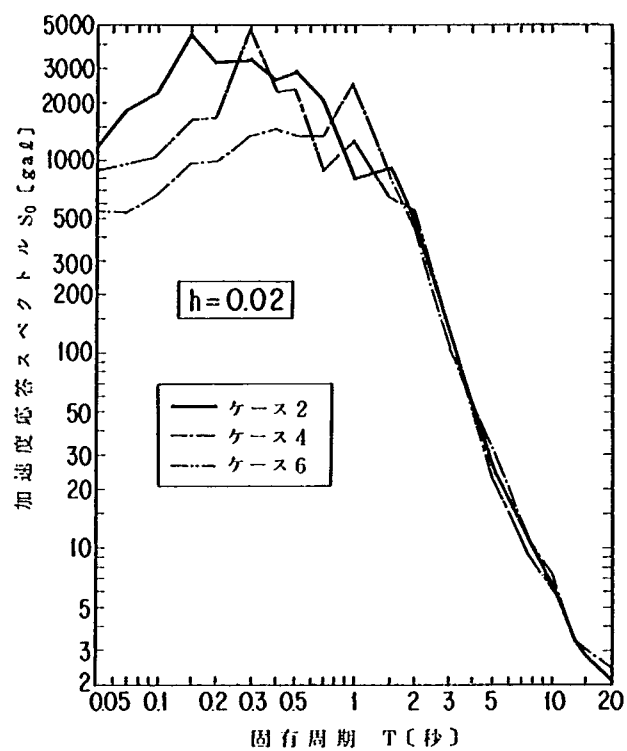


(f) ケース 6

付図 2.2 デジタル強震計の加振実験により得られた加速度波形 $a_o(t)$

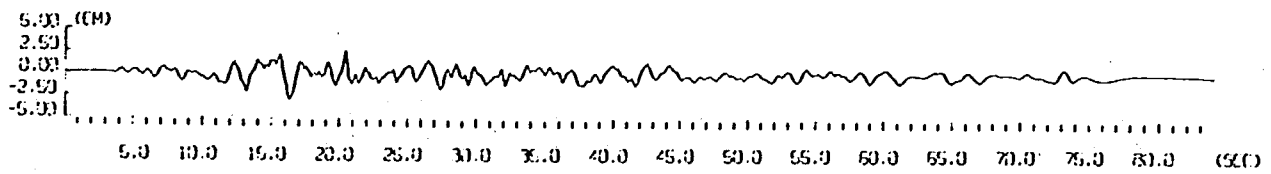


(a) ケース 1, 3, 5



(b) ケース 2, 4, 6

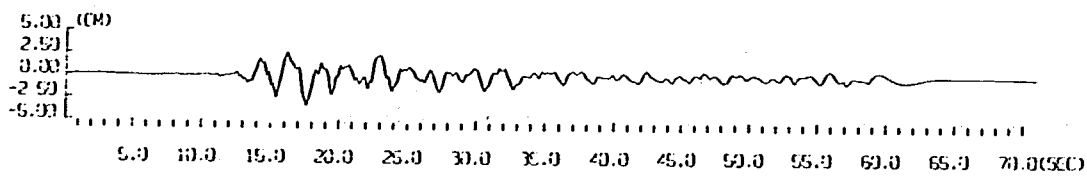
付図 2.3 実測加速度 $a_0(t)$ の応答スペクトル



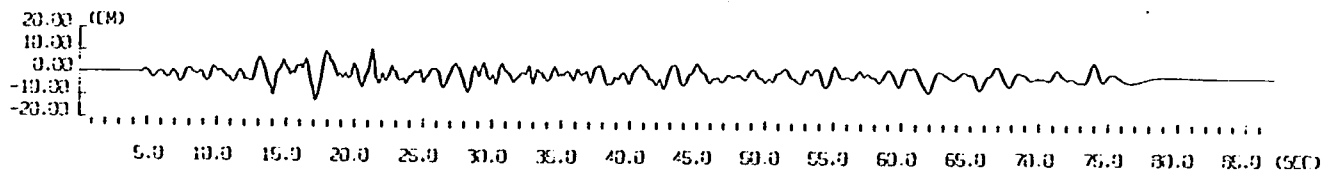
(a) ケース 1



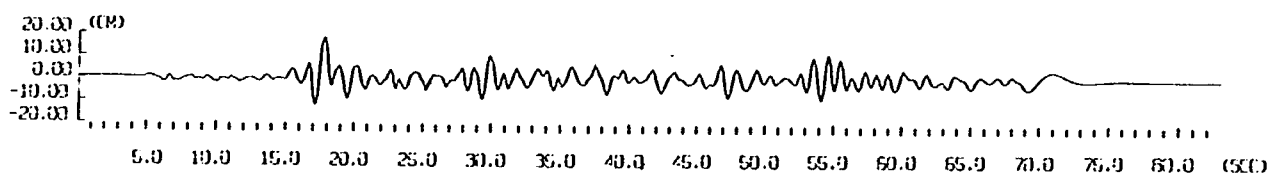
(b) ケース 2



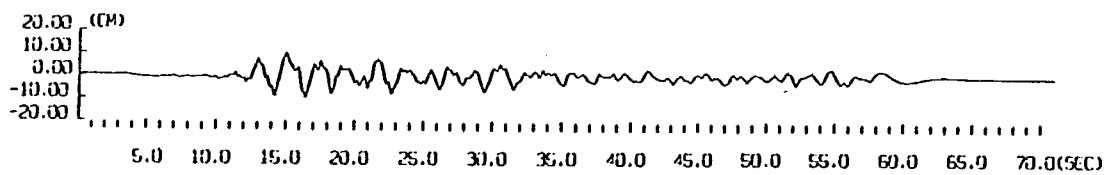
(c) ケース 3



(d) ケース 4

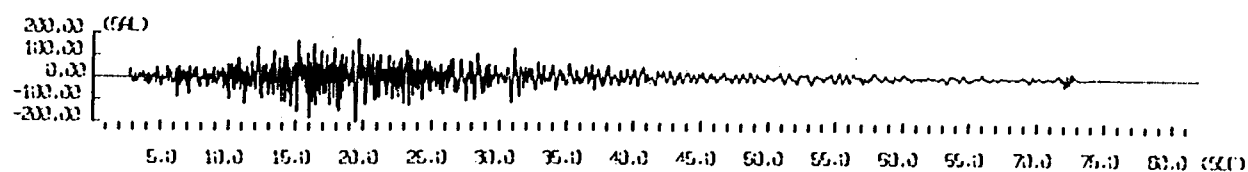


(e) ケース 5

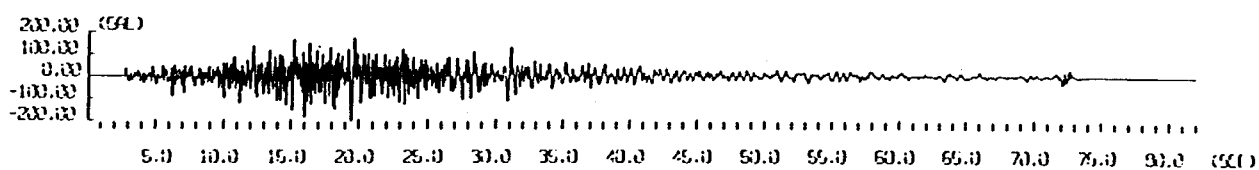


(f) ケース 6

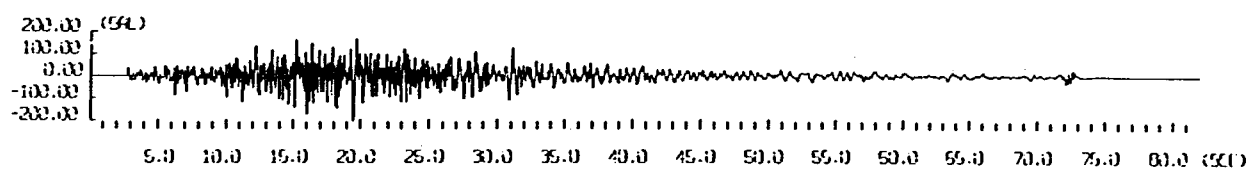
付図 2.4 振動数領域で積分した変位波形 $d(t)$



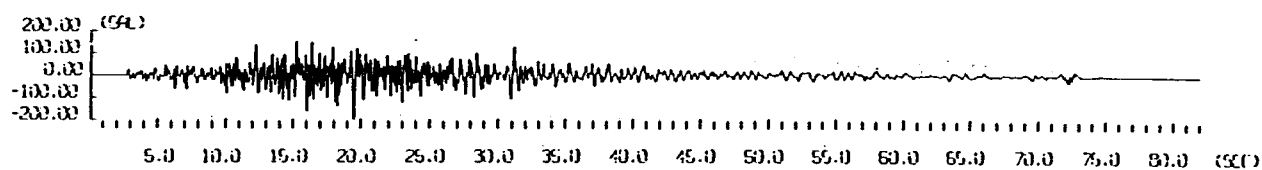
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



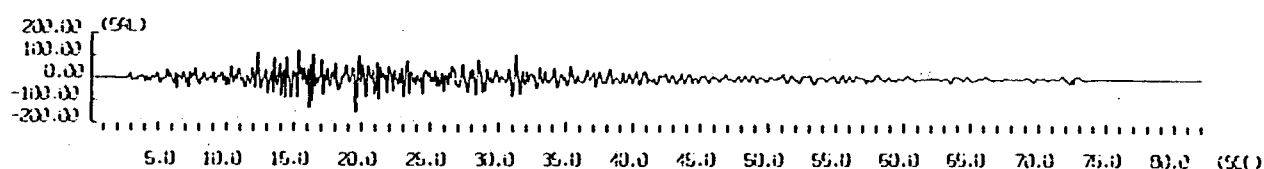
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

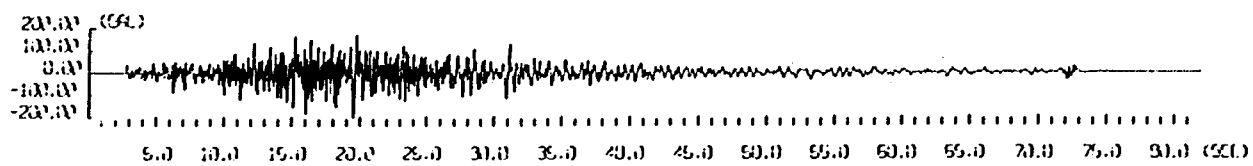


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

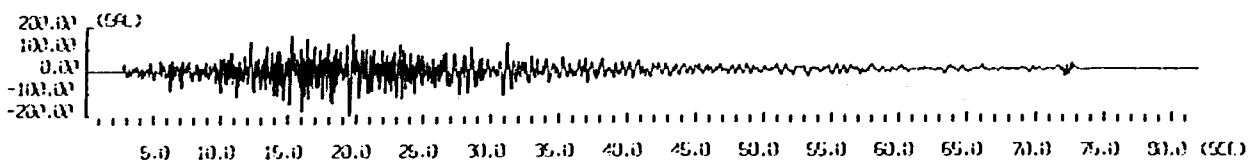


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

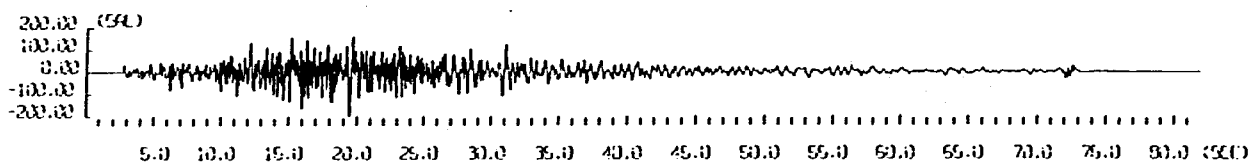
付図 2.5 振動数領域で微分した加速度波形 $a_1(t)$ (ケース 1)



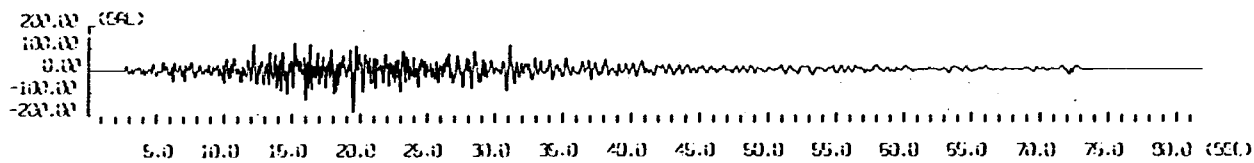
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



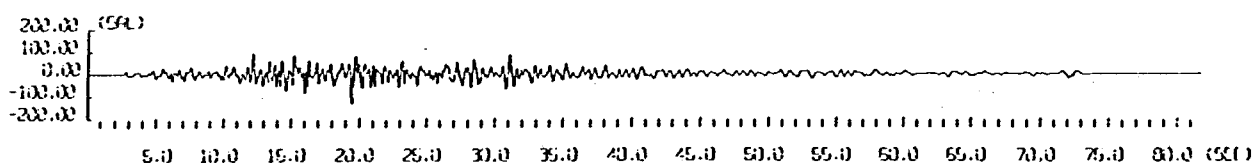
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

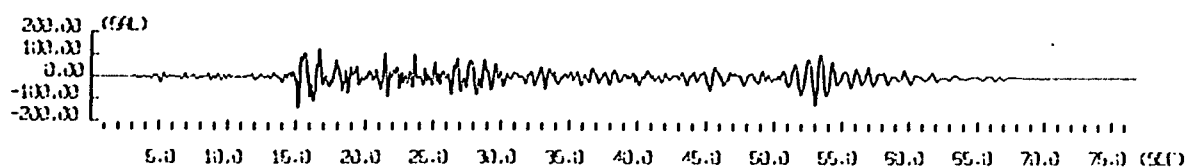


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

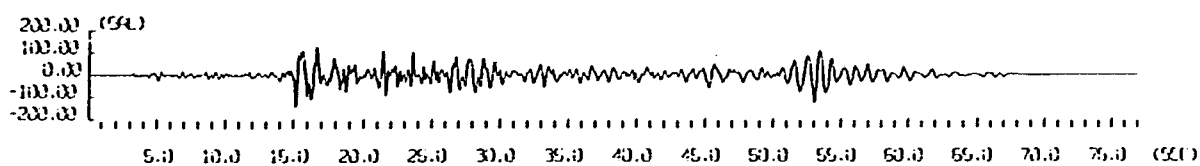


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

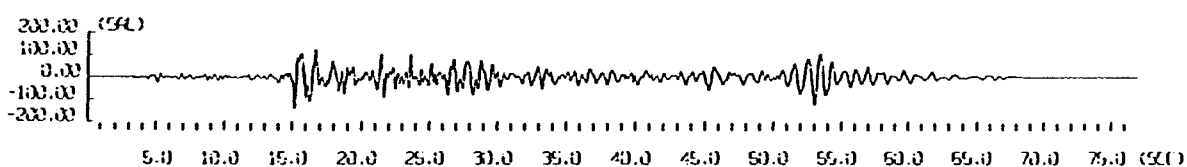
付図 2.6 時間領域で微分した加速度波形 $a_2(t)$ (ケース 1)



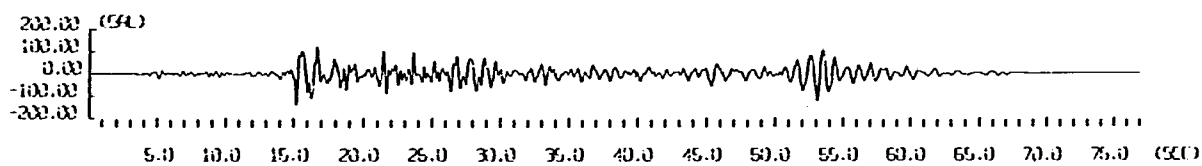
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



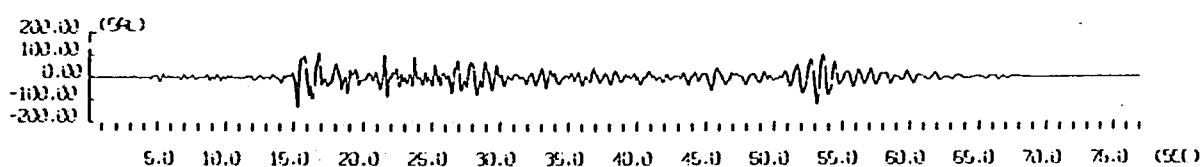
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

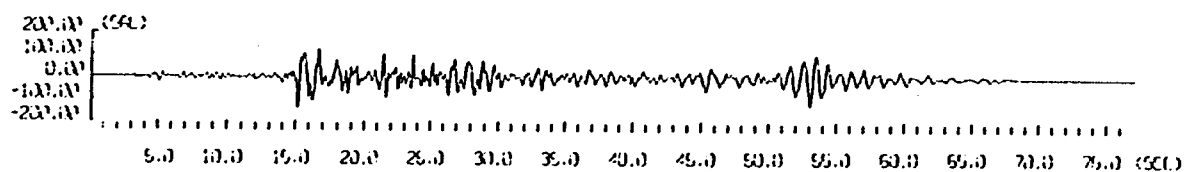


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

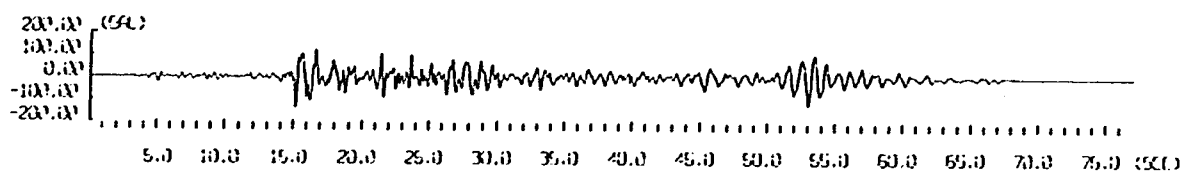


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

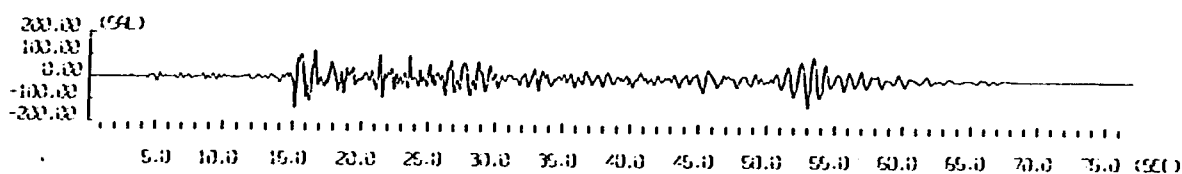
付図 2.7 振動数領域で微分した加速度波形 $a_i(t)$ (ケース 2)



(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



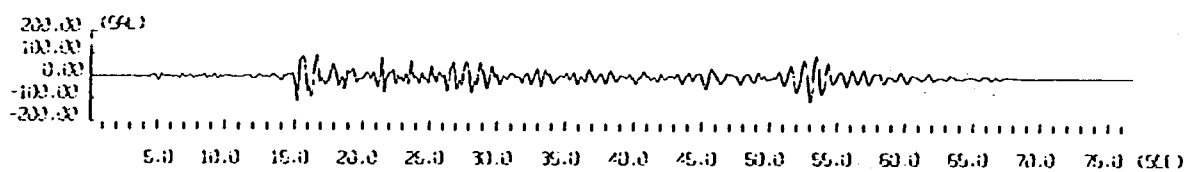
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

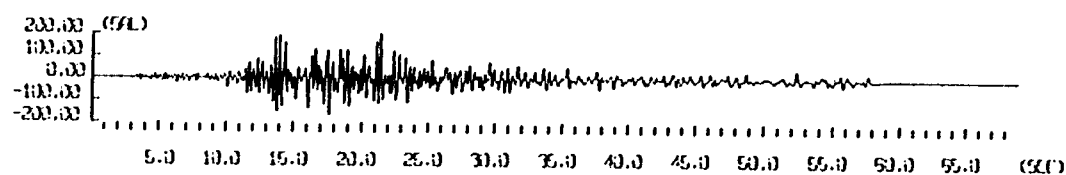


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

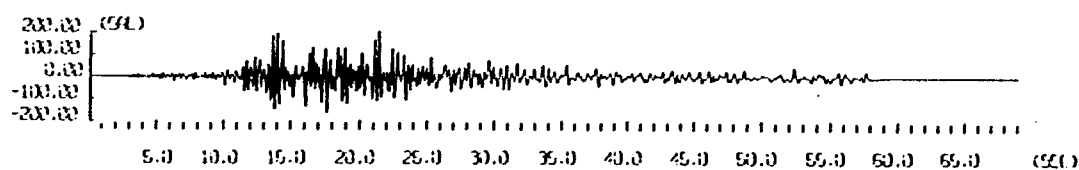


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

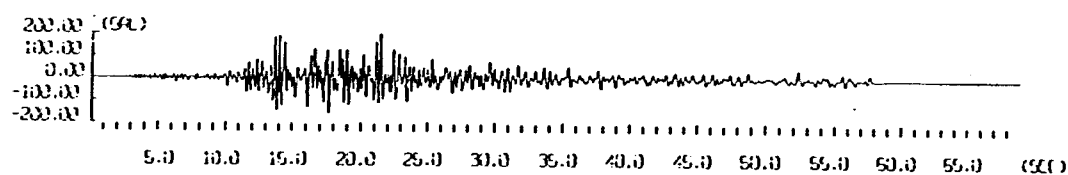
付図 2.8 時間領域で微分した加速度波形 $a_2(t)$ (ケース 2)



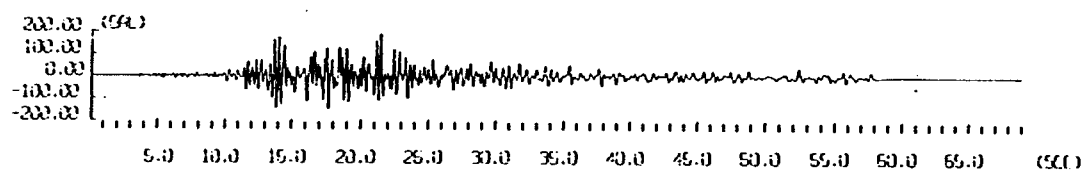
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



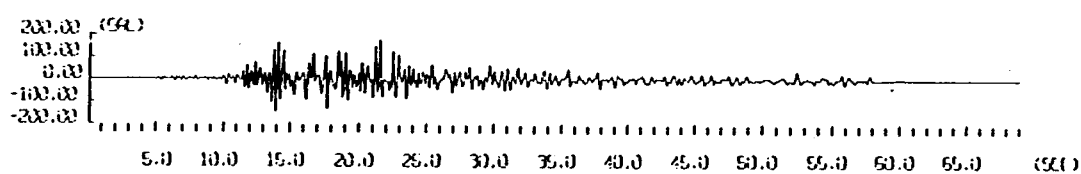
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

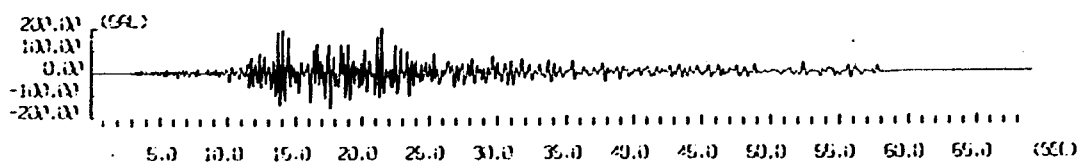


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

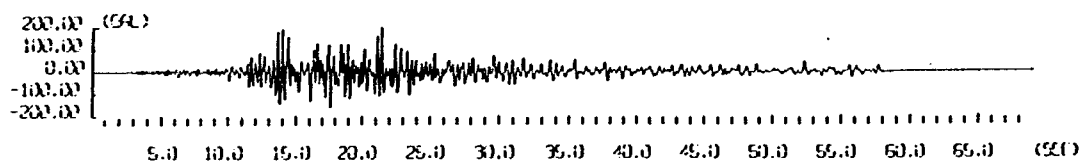


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

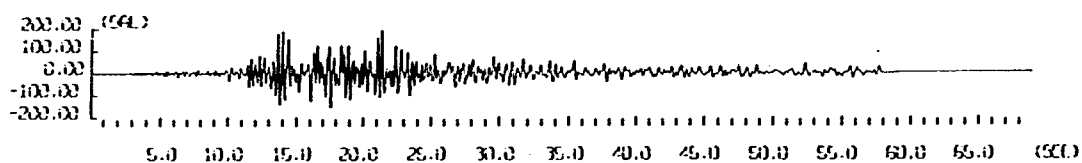
付図 2.9 振動数領域で微分した加速度波形 $a_1(t)$ (ケース 3)



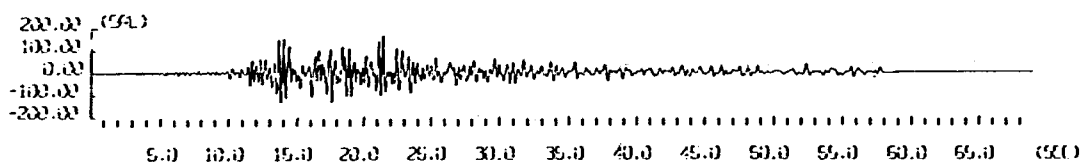
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



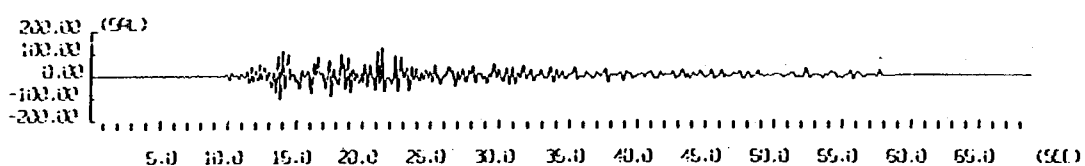
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

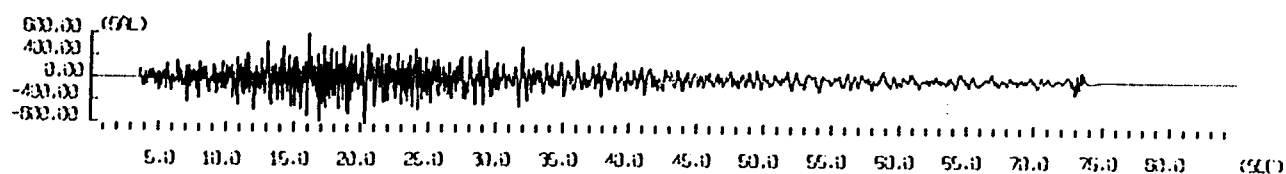


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

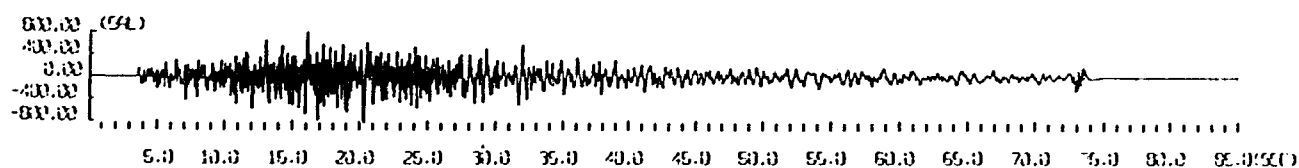


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

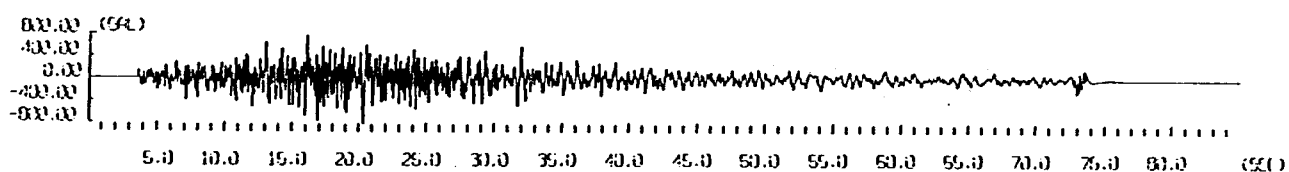
付図 2.10 時間領域で微分した加速度波形 $a_2(t)$ (ケース 3)



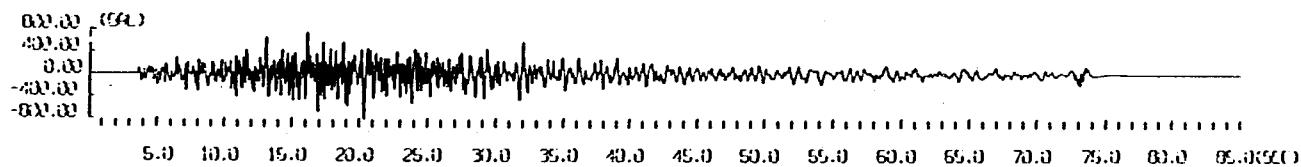
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



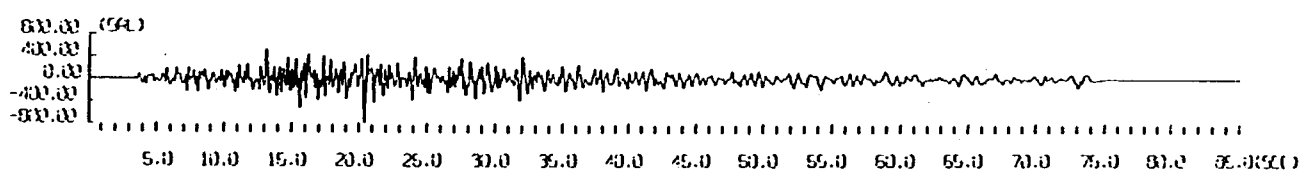
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

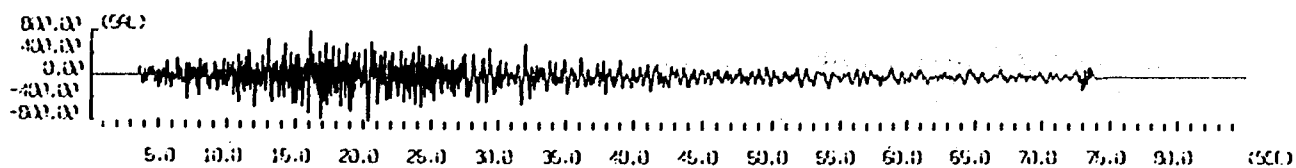


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

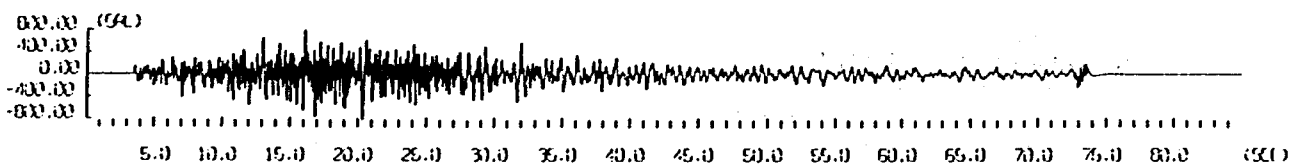


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

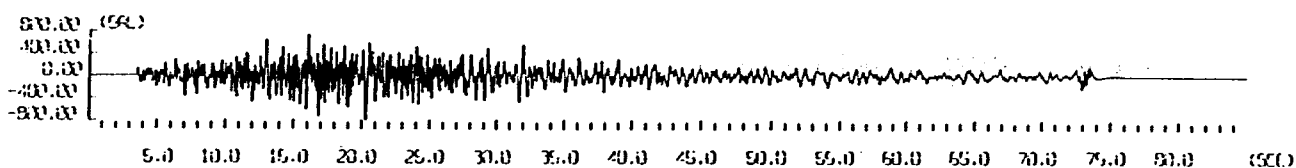
付図 2.11 振動数領域で微分した加速度波形 $a_1(t)$ (ケース 4)



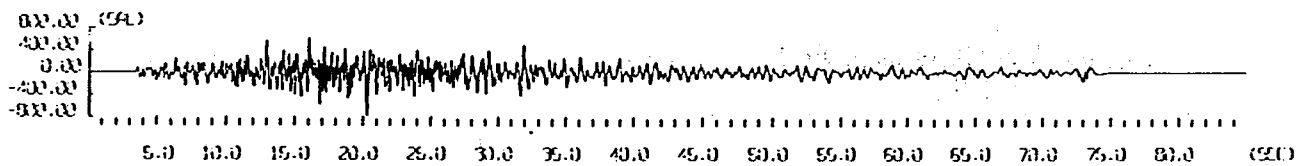
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



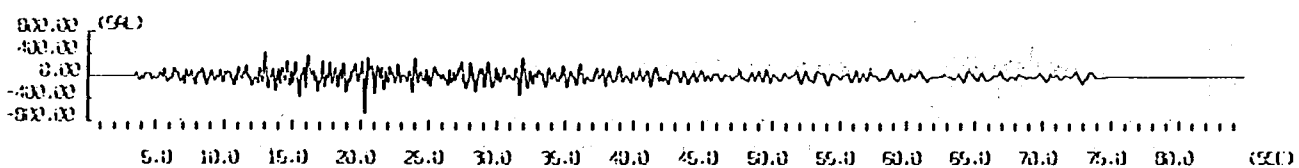
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

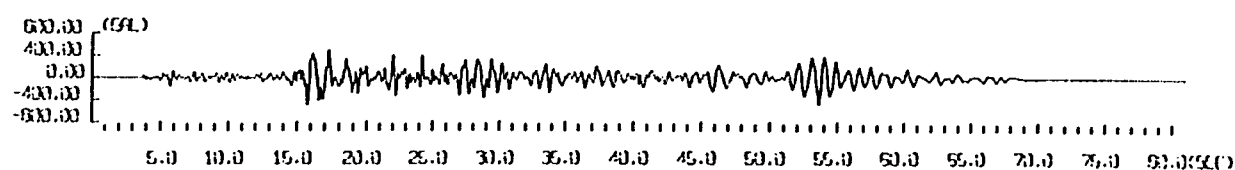


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

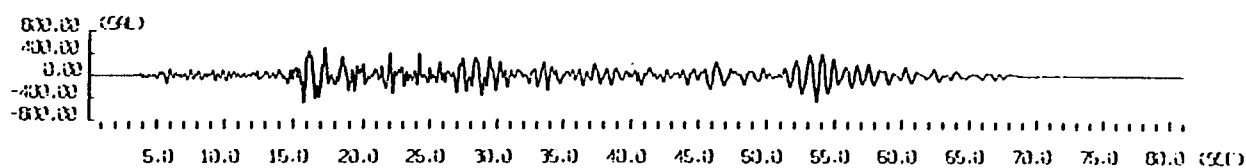


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

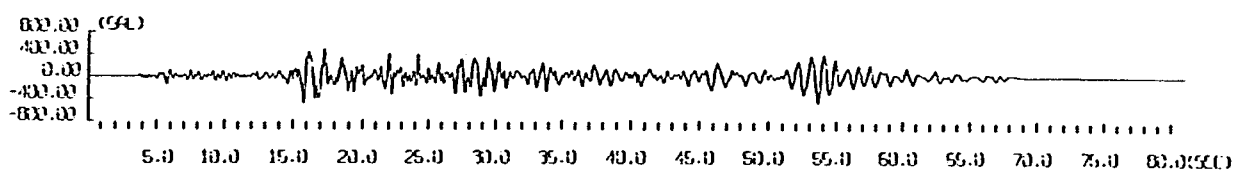
付図 2.12 時間領域で微分した加速度波形 $a_2(t)$ (ケース 4)



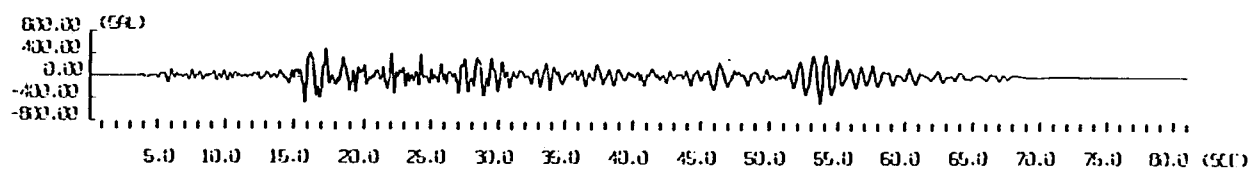
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



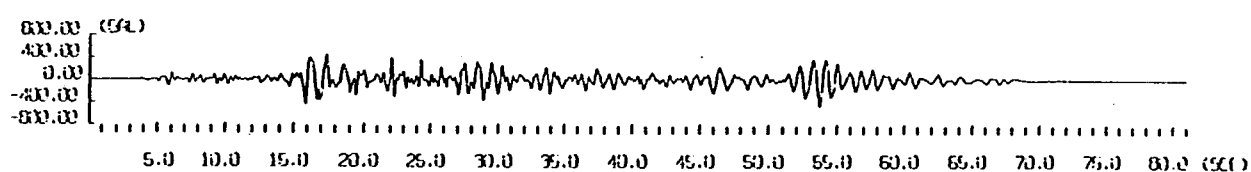
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

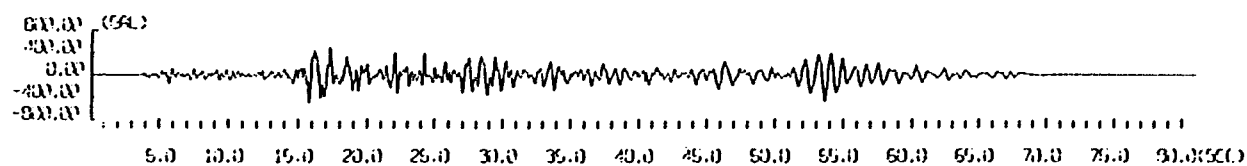


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

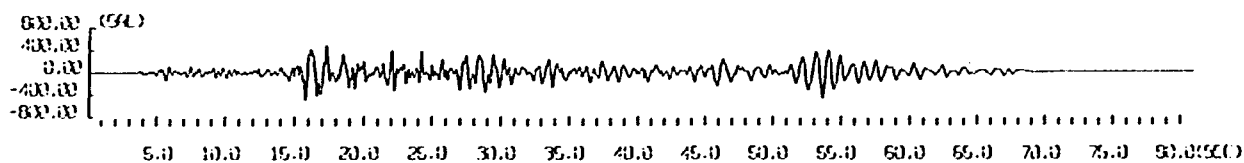


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

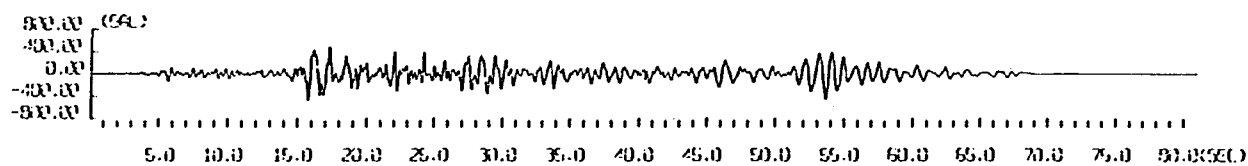
付図 2.13 振動数領域で微分した加速度波形 $a_1(t)$ (ケース 5)



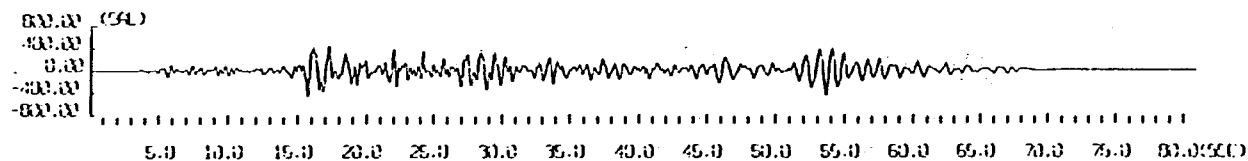
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



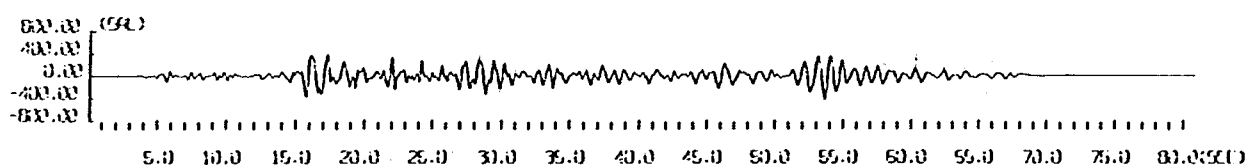
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

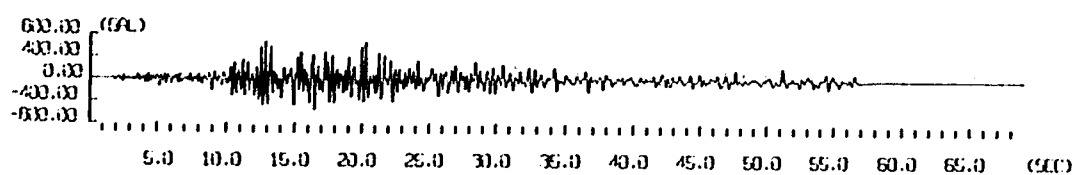


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

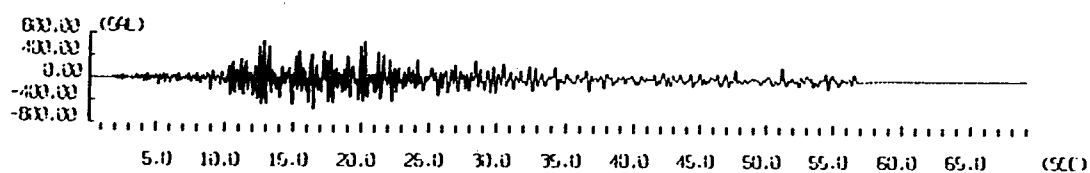


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

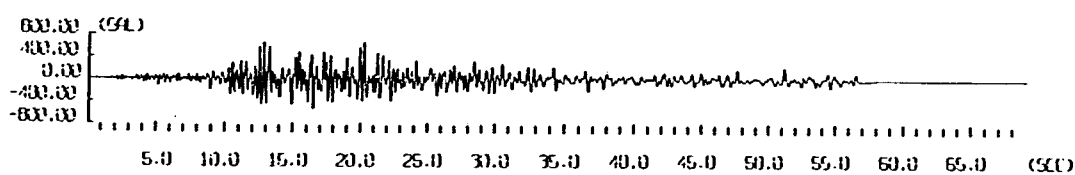
付図 2.14 時間領域で微分した加速度波形 $a_2(t)$ (ケース 5)



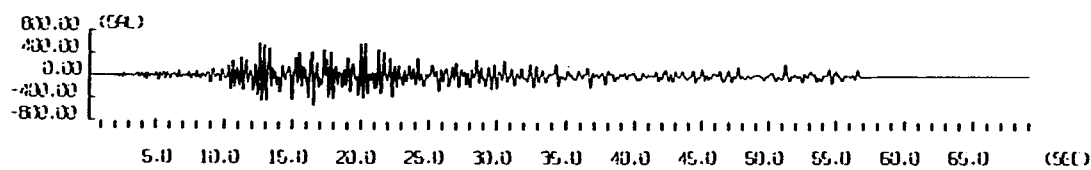
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



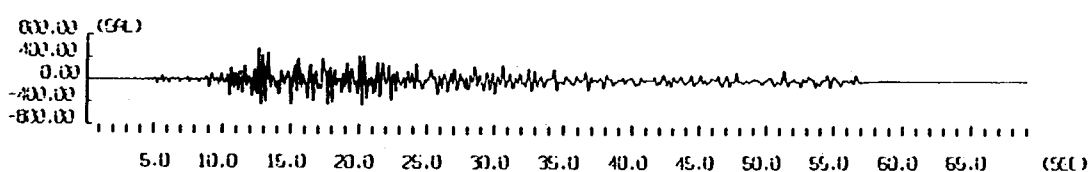
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

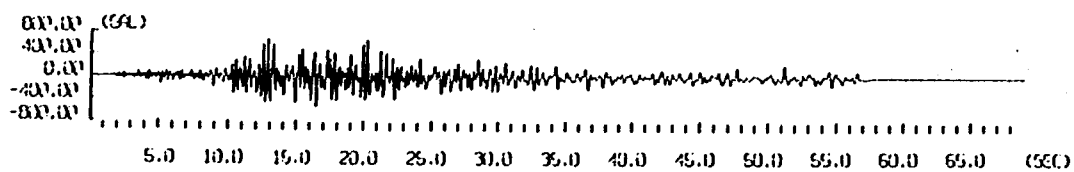


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

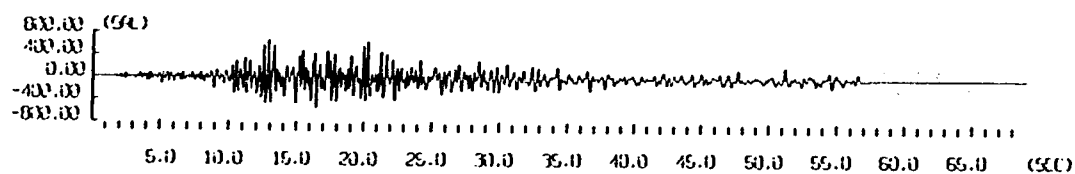


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

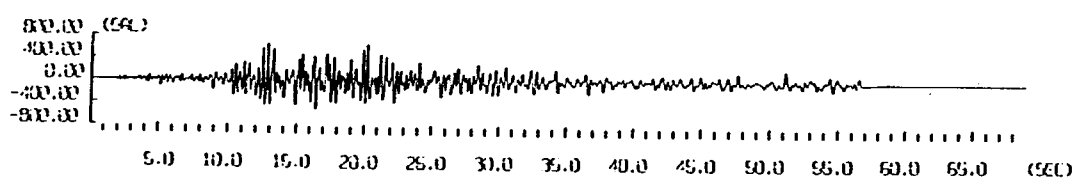
付図 2.15 振動数領域で微分した加速度波形 $a_1(t)$ (ケース 6)



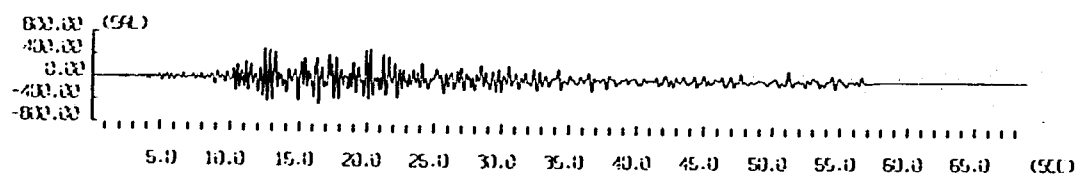
(a) $\Delta t = 1/200$ 秒



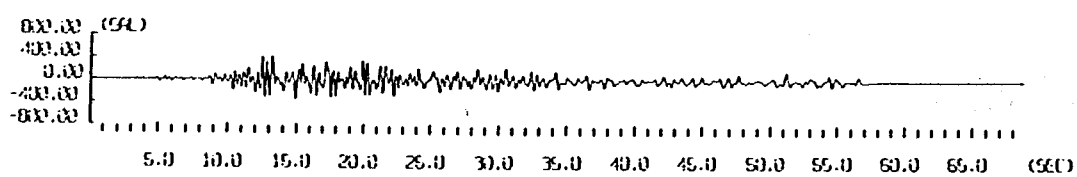
(b) $\Delta t = 1/100$ 秒



(c) $\Delta t = 1/50$ 秒

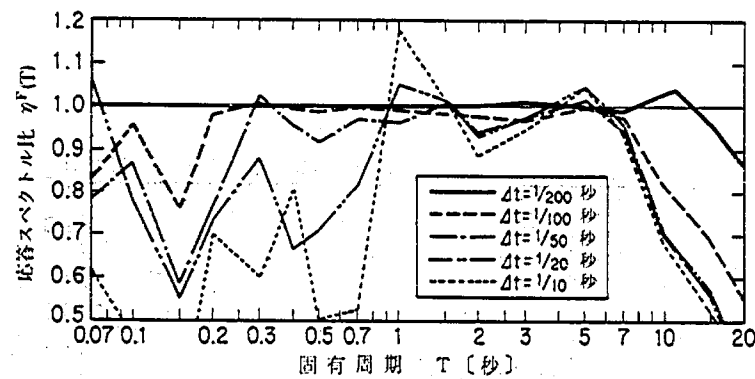


(d) $\Delta t = 1/20$ 秒

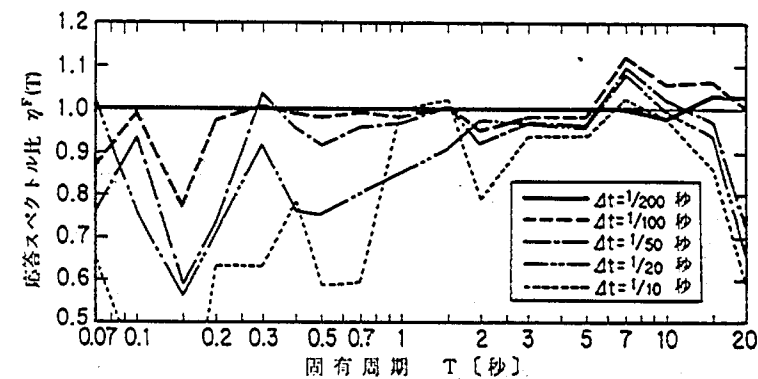


(e) $\Delta t = 1/10$ 秒

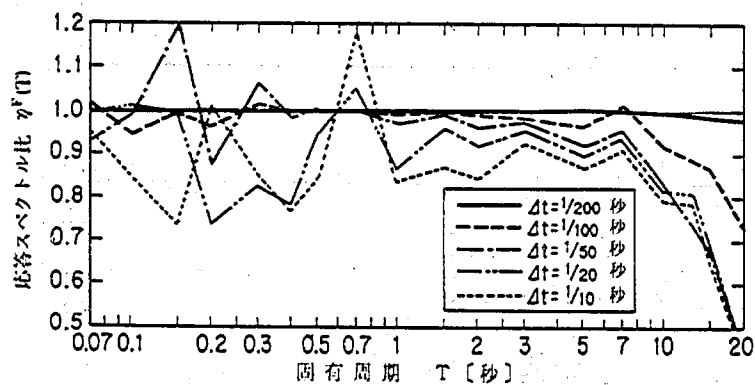
付図 2.16 時間領域で微分した加速度波形 $a_2(t)$ (ケース 6)



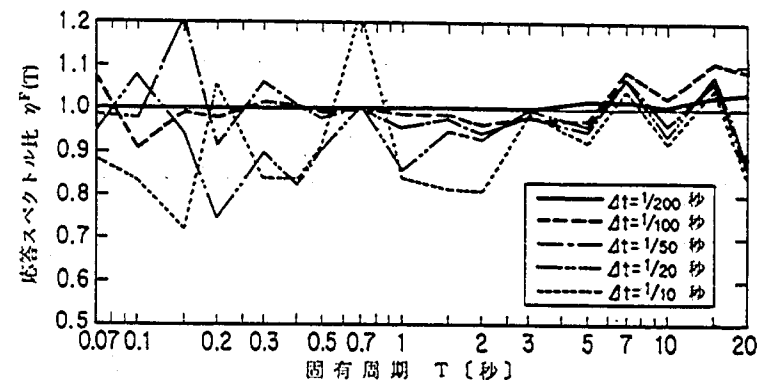
(a) ケース 1



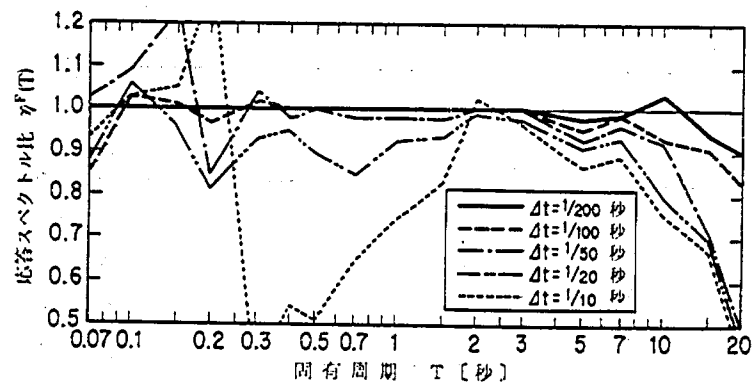
(d) ケース 4



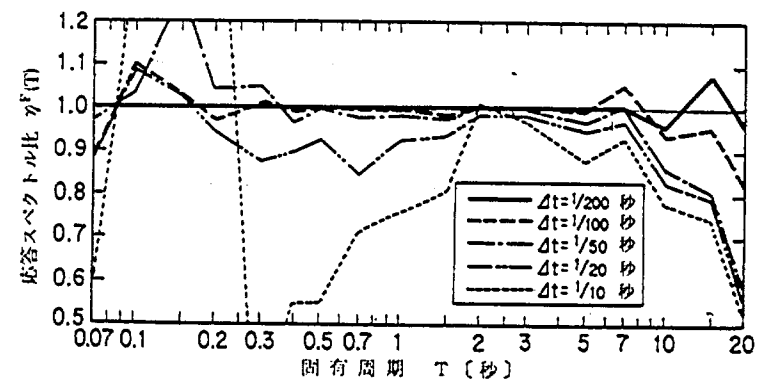
(b) ケース 2



(e) ケース 5

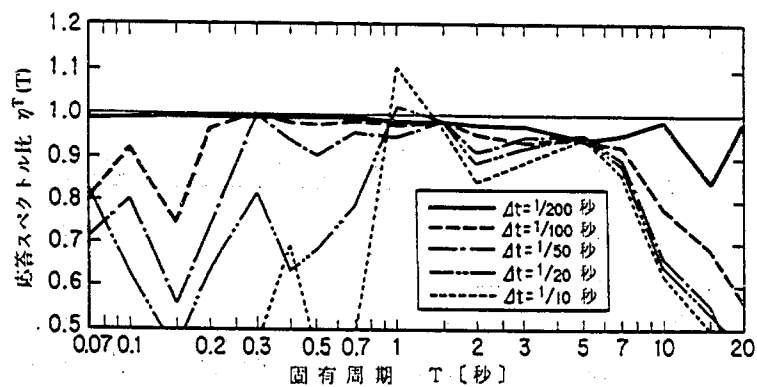


(c) ケース 3

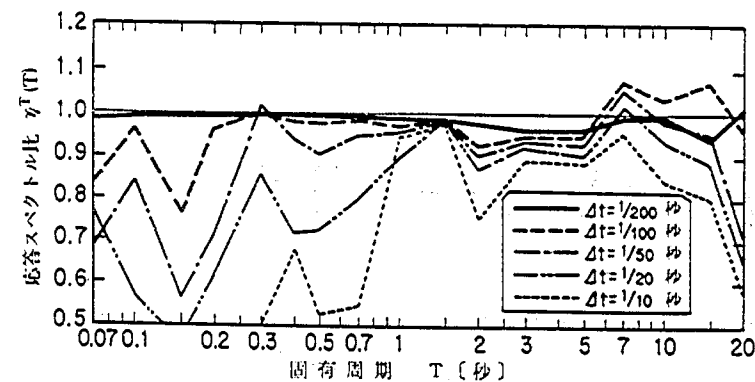


(f) ケース 6

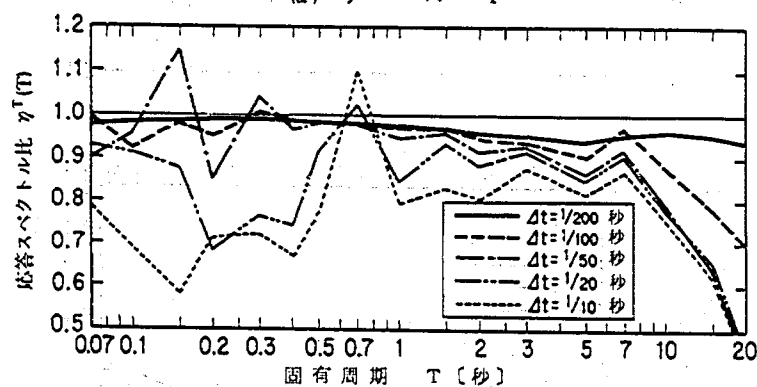
付図 2.17 応答スペクトル η^F と固有周期 T の関係



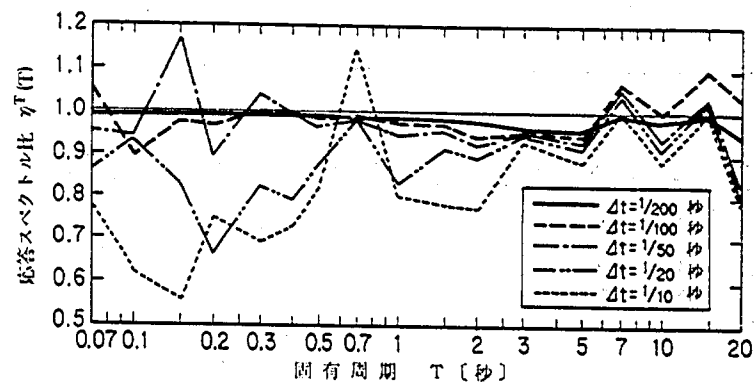
(a) ケース 1



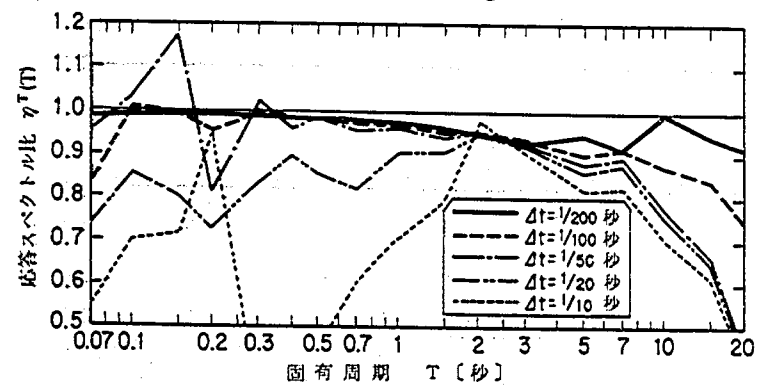
(d) ケース 4



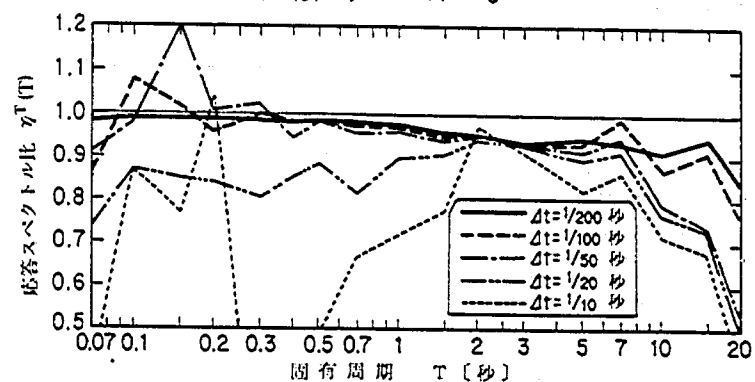
(b) ケース 2



(e) ケース 5

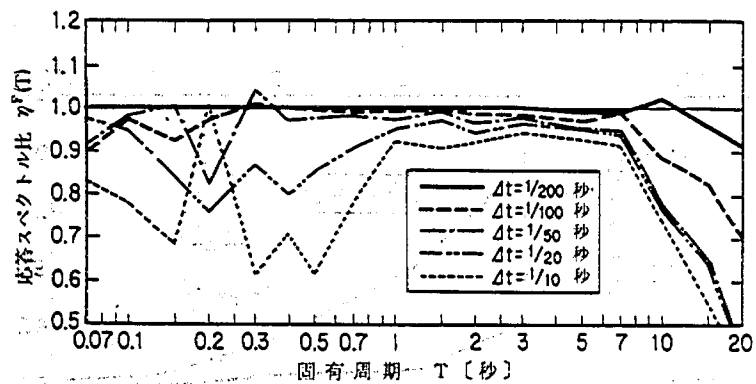


(c) ケース 3

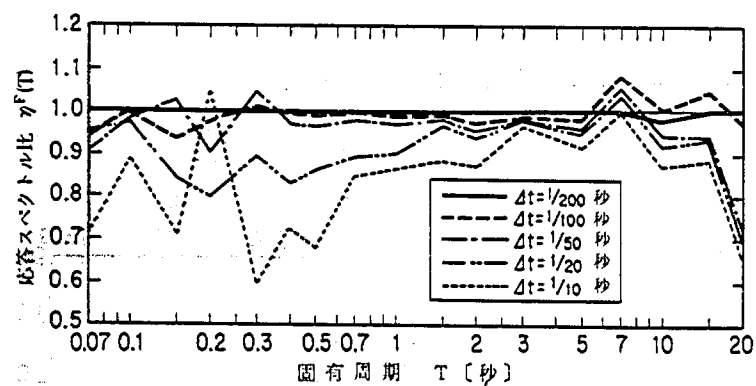


(f) ケース 6

付図 2.18 応答スペクトル η^T と固有周期 T の関係

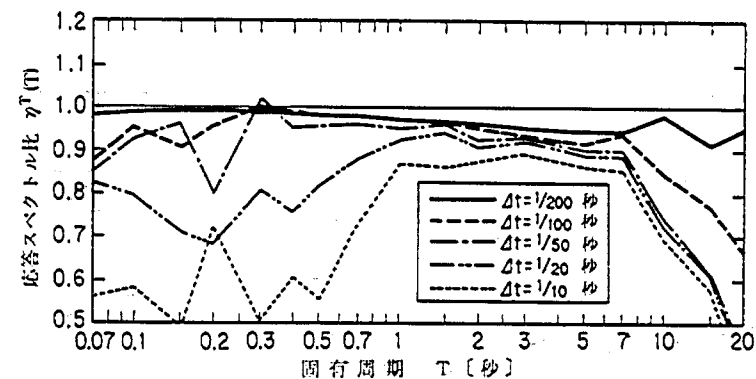


(a) ケース 1, 3, 5 の平均

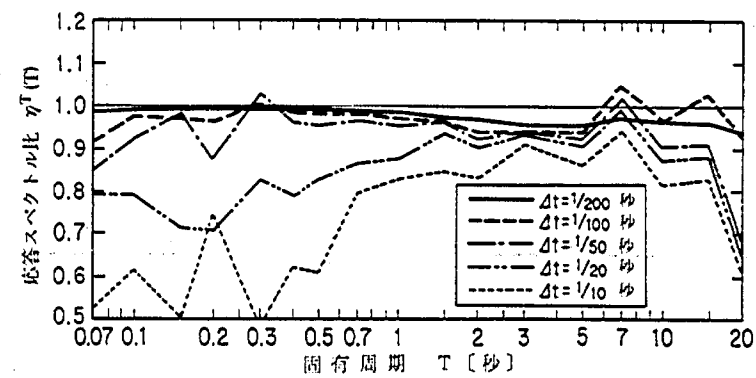


(b) ケース 2, 4, 6 の平均

付図 2.19 応答スペクトル比 η^F と固有周期 T の関係

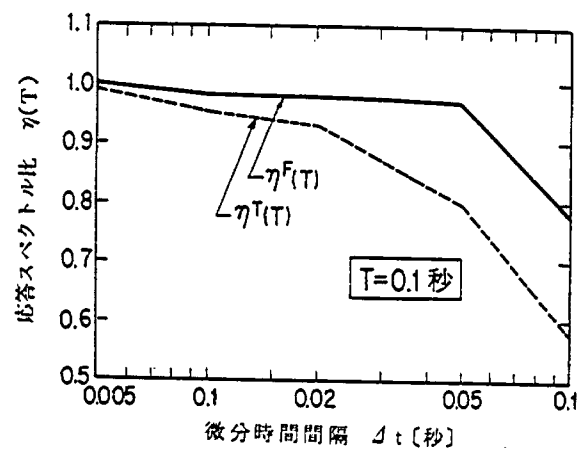


(a) ケース 1, 3, 5 の平均

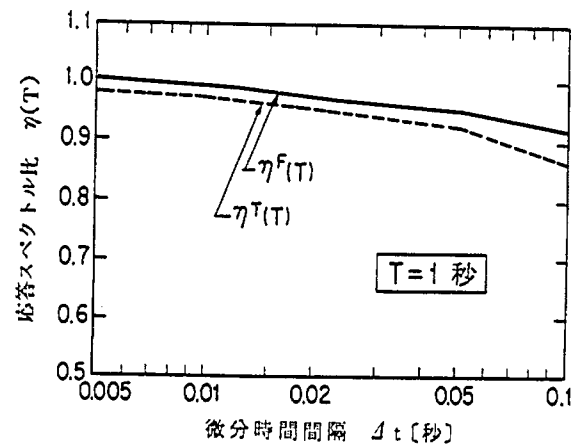


(b) ケース 2, 4, 6 の平均

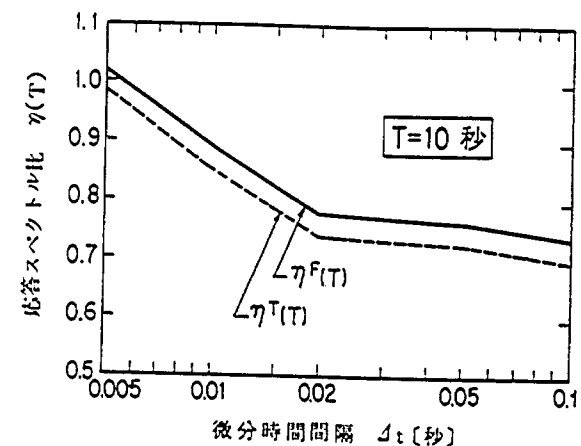
付図 2.20 応答スペクトル比 η^T と固有周期 T の関係



(a) $T = 0.1$ 秒

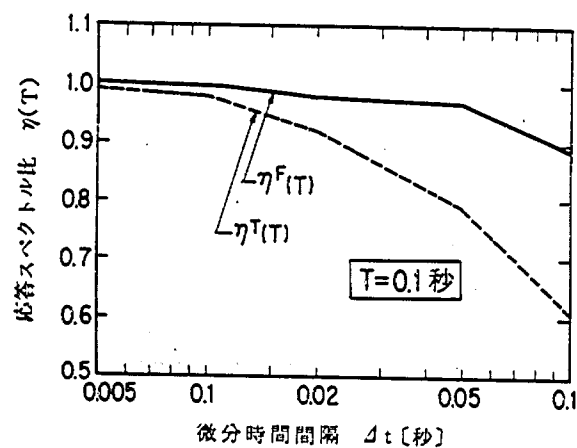


(b) $T = 1$ 秒

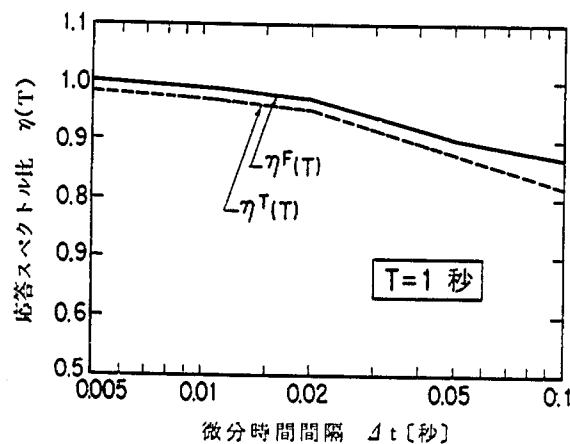


(c) $T = 10$ 秒

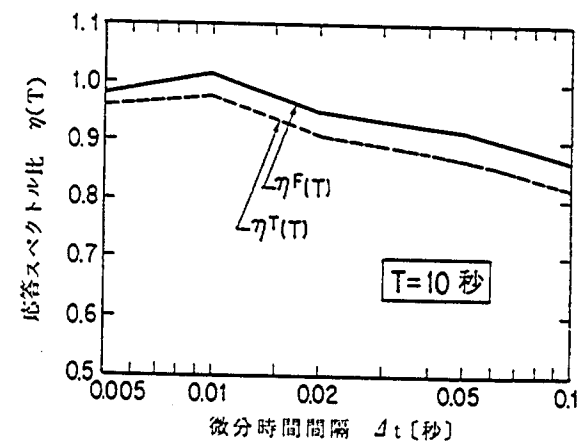
付図 2.21 応答スペクトル比 $\eta^F(T)$, $\eta^T(T)$ と微分時間間隔 Δt の関係 (ケース 1, 3, 5 の平均)



(a) $T = 0.1$ 秒



(b) $T = 1$ 秒



(c) $T = 10$ 秒

付図 2.22 応答スペクトル比 $\eta^F(T)$, $\eta^T(T)$ と微分時間間隔 Δt の関係 (ケース 2, 4, 6 の平均)

付 属 資 料 3

刻 時 用 時 計 の 精 度 の 検 討 結 果

THE NEW YORK PUBLIC LIBRARY

ASTOR LENOX TILDEN FOUNDATION

高密度強震観測で使用しているデジタル強震計では、強震計が起動した際の時刻および、これより以前に行った時刻修正のうち、起動時刻に最も近い時刻（以下、修正時刻と呼ぶ）をカートリッジテープに記録するようになっている。そこで、この修正時刻を利用して以下に述べる方法で、相良、焼津の両観測場の強震計について、時計の精度を確認した。なお、公称の時計精度は 10^{-7} とされている。

- (i) ラジオを切り、時刻修正がかからないようにして、強震計を放置する。
- (ii) 強震計を人為的に起動させて、放置前の修正時刻をカートリッジテープに記録させる。
- (iii) ラジオを入れ、時刻修正をかける。
- (iv) 強震計を人為的に起動させて、放置後の修正時刻を記録させる。
- (v) (iv)より時間の修正量を知り、また、(ii)および(iv)の時刻の差から放置時間を求め、時計の精度を求める。

このようにして求めた時計の精度を示すと、付表 3.1 のようになる。

付表 3.1 より、時計精度は 10^{-8} 程度から 3.8×10^{-7} の範囲でばらついているが、全体として 4×10^{-7} 程度の精度は十分に有していることがわかる。

付表 3.1 デジタル強震計の水晶時計の精度

(a) 相良地区高密度強震観測場

地点 番号	設 置 箇 所	放 置 開 始 時 刻	放 置 終 了 時 刻	放置時間 〔時間〕	修正時間 〔秒〕 ^{注)}	精 度
1	波津配水池	1983年8月12日 8時	1983年8月23日11時	2 6 7	0.0 1	0.10×10^{-7}
2	相良町営住宅	1983年8月12日 8時	1983年8月23日13時	2 6 9	0.0 1	0.10×10^{-7}
3	相良高等学校	1983年8月12日 9時	1983年8月23日13時	2 6 8	0.0 1	0.10×10^{-7}
4	相良小学校(地表)	1983年9月 9日11時	1983年9月19日12時	2 4 1	0.0 2	0.23×10^{-7}
"	相良小学校(-30m)	1983年8月11日16時	1983年8月23日12時	2 8 4	0.0 1	0.10×10^{-7}
5	相良中学校(地表)	1983年8月11日17時	1983年8月23日12時	2 8 3	0.0 6	0.59×10^{-7}
"	相良中学校(-32m)	—————	—————	—————	—————	—————
6	大沢保育園	1983年8月12日10時	1983年8月23日12時	2 6 6	0.0 2	0.21×10^{-7}
7	相良中学校サブグラウンド	1983年8月12日12時	1983年8月23日12時	2 6 4	0.0 2	0.21×10^{-7}
8	相良中学校プール(地表)	1983年8月12日11時	1983年8月23日11時	2 6 4	0.0 1	0.10×10^{-7}
"	相良中学校プール(-36m)	1983年8月12日11時	1983年8月23日11時	2 6 4	0.0 1	0.10×10^{-7}
9	相良町児童館	1983年8月12日13時	1983年8月23日13時	2 6 4	0.0 1	0.10×10^{-7}
10	相良小学校プール(地表)	1983年8月12日11時	1983年8月23日11時	2 6 4	0.0 1	0.10×10^{-7}
"	相良小学校プール(-30m)	1983年8月12日11時	1983年8月23日11時	2 6 4	0.0 1	0.10×10^{-7}

(b) 焼津地区高密度強震観測場

地点 番号	設 置 箇 所	放 置 開 始 時 刻	放 置 終 了 時 刻	放置時間 〔時間〕	修正時間 〔秒〕 ^{注)}	精 度
1	石脇下区有地(-10m)	1983年4月 9日10時	1983年4月16日10時	1 6 8	0.0 1	0.17×10^{-7}
2	サッポロビール	1983年4月 8日16時	1983年4月15日16時	1 6 8	0.0 2	0.33×10^{-7}
3	東益津幼稚園	1983年2月26日10時	1983年3月 4日15時	1 4 9	0.1 0	1.86×10^{-7}
4	東益津小学校	1983年4月 9日11時	1983年4月15日16時	1 4 9	0.0 1	0.19×10^{-7}
5	東益津小学校体育館	1983年4月 8日16時	1983年4月16日 7時	1 8 3	0.0 3	0.46×10^{-7}
6	東益津公民館	1983年2月26日10時	1983年3月 4日14時	1 4 8	0.1 1	2.06×10^{-7}
7	東益津中学校	1983年2月26日 9時	1983年3月 4日16時	1 5 1	0.0 1	0.18×10^{-7}
8	中里ちびっこ広場	1983年4月 8日14時	1983年4月16日10時	1 8 8	0.0 1	0.15×10^{-7}
9	朝比奈川橋(地表)	1983年2月26日 9時	1983年3月 4日12時	1 4 7	0.2 0	3.78×10^{-7}
"	朝比奈川橋(-112m)	1983年2月26日 9時	1983年3月 4日12時	1 4 7	0.1 4	2.65×10^{-7}
"	朝比奈川橋(-63m)	1983年2月26日 9時	1983年3月 4日12時	1 4 7	0.0 3	0.57×10^{-7}
"	朝比奈川橋(-30m)	1983年2月26日 9時	1983年3月 4日12時	1 4 7	0.0 7	1.32×10^{-7}
10	牛田資材置場	1983年2月26日 8時	1983年3月 4日16時	1 5 2	0.0 1	0.18×10^{-7}
11	中 公 園	1983年2月26日 8時	1983年3月 4日17時	1 5 3	0.0 1	0.18×10^{-7}
12	焼津西小学校	1983年2月26日 8時	1983年3月 4日17時	1 5 3	0.0 1	0.18×10^{-7}

注) 修正時間は0.01秒単位で記録されるため、修正時間0.01秒とは0.01秒以下のことである。

高密度強震観測用デジタル
強震計の記録精度に関する
実験的検討

ISSN 0386-5878

土研資料第2019号

昭和58年8月

荒川直士, 川島一彦, 田村敬一

相沢 興, 高橋和之

キーワード 高密度強震観測, デジタル強震計

要 旨

本資料は, 加振実験により, 高密度強震観測用のデジタル
強震計の記録精度について検討した結果をとりまとめたもので
ある。



郵便はがき

40円切手
を貼って
下を切り
下

305-□□

建設省土木研究所

振動研究室御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No.183

No.183

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 2019 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

