

ディジタイザーによる SMAC 型強震計記録の数値化精度

ACCURACY OF DIGITIZATION OF STRONG-MOTION RECORDS
OBTAINED BY SMAC-ACCELEROGRAPH

川 島 一 彦*・高 木 義 和**・相 沢 興***

By Kazuhiko KAWASHIMA, Yoshikazu TAKAGI and Koh AIZAWA

1. ま え が き

強震記録は、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利用されている。近年、解析および設計手法が高度化されるに伴って、地震動に関する情報を提供している強震記録そのものの精度に対する関心が高まってきた。強震記録の精度に対する既往の研究成果によれば、わが国で現在広く用いられている SMAC 型強震計のようなペン書き式記録の精度は、記録の数値化時の読取り誤差に支配されることが指摘されている。

本小文は、上記の観点から、模擬的に作成した地震動波形および直線状の波形を用いて、SMAC 型強震計記録の数値化の精度を検討し、実用上の適用範囲を推定する手法を検討した結果について報告するものである。

2. 数値化システム

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 56 年 3 月末現在で土木研究所が所掌する SMAC 型強震計は、合計約 300 台（約 150 観測地点）である。このうち、全体の約 50% が SMAC-B2 型強震計であり、現在までに土木研究所により数値化された約 800 本の記録の約 70% は、この型の強震計によるものである。記録の読取りは昭和 39 年から実施しているが、当初は、記録波形を約 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法をとっていた。この方式は昭和 44 年までの記録の読取りに適用されていたが、その後、昭和 48 年に座標読取り装置（米国ベ

ンディックス社製、以下ディジタイザーとよぶ）を導入し、昭和 45 年以後現在に至る記録の数値化は、このディジタイザーを用いて行っている。

ディジタイザーは読取りテーブル部、コンソール部、出力装置部から構成されている。読取りの最小分解能（公称値）は 2.5/100 mm である。読取り時には強震記録をテーブル上にセットし、カーソル内に印された直径約 0.3 mm の点を記録波形に沿って手動操作によりスライドさせながら、オペレーターが指示する任意の時間軸とそれに対応する加速度軸を読み取っている。読み取られた値はフロッピーディスクに書き込まれたのち、大型電子計算機により処理される。読み取りには、B2 型強震計の場合にはスタイラスペーパーを密着焼付した印画紙を、また、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波形は、印画紙に焼付した実測記録と同一の縮尺でデジタルプロッターにより再生し、再生した波形と原波形とを重ね合わせて、目視により両者の一致度を検討する。もし、再生波形と原波形が継続時間内のどの 1 点においても一致しない場合（現在までの実績では、平均して全体の 30% 程度）には、もう一度最初から読み直している。原波形と一致しているときみなされた読み取り記録には、円弧補正、刻時マークによる紙送り速度のむらの補正（記録時に 1 秒間隔で記録紙に入る刻時マークを用いて、刻時マーク間の時間が 1 秒となるように時間軸を補正）、最小 2 乗法による中心軸の補正を加えた後に、感度を乗じて加速度記録とする。このようにして得られた強震記録のデジタル値は、応答スペクトル、記録波形とともに土木研究所から刊行されている¹⁾。

3. 数値化時に混入する誤差

数値化時に混入する誤差として考えられるものを挙げ

* 正会員 工博 建設省土木研究所地震防災部振動研究室
主任研究員

** 正会員 建設省関東地方建設局東京国道工事事務所調査課

*** 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室

表—1 数値化時の誤差の原因

分類	原因	摘要
人為誤差	単純な読取りミス	目視による原波形との重ね合わせにより検知可能
	波形の視準位置	波形の線が太い箇所はどこを読み取るかによる誤差
	読取り間隔	読取り間隔の粗密による誤差
機械誤差	機械の分解能	最小分解能による誤差（公称値は2.5/100 mm 以下）
	機械の故障	読取り時あるいは点検時に検知可能
記録紙の変形	記録紙のゆがみ	温度、湿度の変化に伴う記録紙の伸縮による誤差

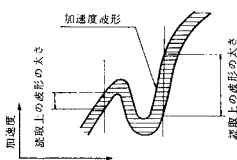
ると表—1 のようになり、これらは大きく人為的な読み取りに伴う誤差と、デジタル化の特性に伴う機械的な誤差に分けられる。いま、表—1 の中から、主要なものについて示すと以下のようになる。

a) デジタル化の最小分解能

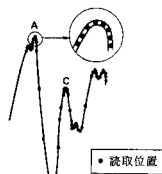
デジタル化の最小分解能は、公称 2.5/100 mm 以下である。いまこれが正しいとすれば、SMAC-B2 型強震計の場合には、加速度軸および時間軸の倍率がそれぞれ 12.5 gal/mm、0.1 秒/mm であるから、加速度および時間の最小分解能はそれぞれ 0.3 gal、2.5/1000 秒となる。このような分解能を直接検定することは難しいが、記録紙の上にある 1 点（たとえば、波形のピークに相当する最大加速度など）を読み取る精度を検討することにより、ある程度の傾向を知ることができる。これによれば、同一の地震記録を繰り返し読み取った場合の最大加速度値（結果は 5. に示す、表—4 参照）は、多少ばらつきがあるものの 0.3 gal 程度の範囲におさまっており、おおむね、上記で期待される最小分解能に近い値が得られている。

b) 記録波形の太さ

SMAC 型強震計の記録ペンは、たとえば、B2 型の場合にはダイヤ針を用いており、その太さは 0.05 mm（公称値）である。したがって、原理的には記録波形の太さは 0.05 mm 程度となるはずであるが、実際には、針でスタイラスペーパーをひっかく際に生じるペン圧の乱れや、印画紙に密着焼付する過程で線が太くなり（特に、ペン圧不足で一部に薄い記録箇所がある場合には、全体を濃く焼付するために正常な記録箇所の線が太くなりがちである）、一般には 0.1~0.4 mm 程度（同一の記録でも、箇所により異なることがある）となる。した



図—1 波形の太さによる
読取り位置の変動



図—2 読取り間隔

がって、これをカーソル内の視準点により読み取る際には、図—1 に示すように波形のどこを読み取るかで読み取り値が異なってくる。こうした誤差は図—1 からわかるように、一般には波形が切り立って大きい場合、すなわち、最大加速度が大きくかつ短周期成分が卓越している場合に著しいと考えられる。

c) 読み取り間隔

数値化は、連続量としての波形を読み取り点の集合として離散化するものであるから、読み取り間隔は波形の精度に対して影響を与える。読み取り間隔は密であるほど一般には精度は向上するが、細かく読んだからといって必ずしも精度がよくなる場合がある。たとえば、図—2 に示すように、比較的短周期成分が卓越した単調な形状で振幅も大きい波形の読み取りでは、 \widehat{AB} 間および \widehat{BC} 間のような箇所をせっかく密に読み取っても、個々の点の読み取り誤差があるため、読み取り波形を書かせてみると多少でこぼこができる。結果的には、このように単調な形状をした箇所では、図中に示すように、中間の 1~2 点を読み取る程度の方が原波形との対応がよい。ただし、波形のピーク部や変曲点の近傍では読み取り間隔を密にし、ピーク値や細かい波形の変化を逃さないようにしている。

4. 数値化精度の検討方法

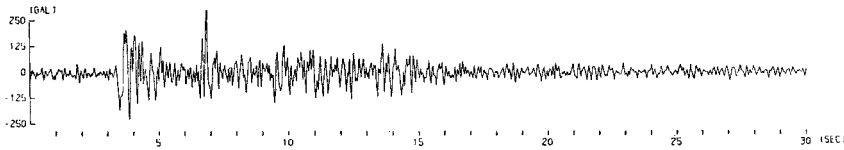
記録の数値化精度を直接評価するためには、読み取るべき対象の記録（原記録）と、これを読み取った記録（読み取り記録）の両者を直接比較することが最も基本的と考えられる。SMAC 型強震計の場合には、読むべき原記録はアナログ記録であるため、あらかじめこのデジタル値を知ることはできない。そこで、ここでは一度、前述した土木研究所の標準数値化システムにより読み取った記録を、最小分解能が 1/100 mm 以下（公称値）のデジタルプロッターによりマイラー紙上に太さ 0.3 mm のボールペンを用いて書かせ、この波形（以下、模擬波形とよぶ）をもって原記録と考えることにした。模擬波形の作成に際しては、SMAC-B2 型強震計を想定して、時間軸および加速度軸はそれぞれ 1 cm=1 sec、1 mm=12.5 gal とした。ただし、記録ペンの描く円弧はここでは考慮していない。マイラー紙を用いたのは、読み取り時に湿気等による変形をできるだけ少なくするためである。

検討対象としたのは、表—2 および図—3 に示す 3 種類の地震波形であり、これらは橋脚天端もしくは周辺の地盤上で、SMAC-B2 型強震計により記録されたものである。ここで、開北橋記録は 0.35 秒付近で卓越した成分をもっているのに対し、伊達橋記録および新石狩大

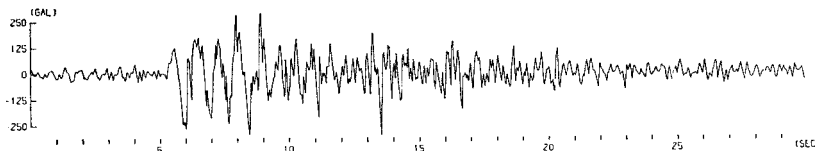
表—2 検討対象とした地震動の記録

No.	記録場所	記録地震	記録時の最大加速度	卓越周期 ¹⁾ (秒)	模擬地震波形 ²⁾	
					データ個数	継続時間
1	開北橋 (地盤上, Tr 成分)	1978. 6.12 (宮城県沖地震)	329 gal	0.35, 0.14~1.0	691	30.0
2	伊達橋 (橋脚上, Tr 成分)	1978. 6.12 (宮城県沖地震)	320 gal	0.80, 0.18~1.4	703	29.9
3	新石狩大橋 (地盤上, EW 成分)	1968. 5.16 (十勝沖地震 (余震))	171 gal	0.85, 0.45~1.4	513	40.0

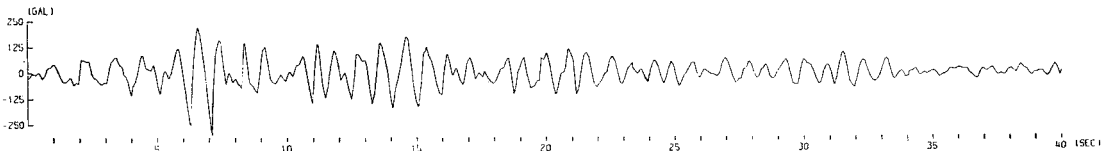
注 1) — は最も卓越した周期を示す
 2) マイラー紙上に模擬地震波形を書かせる場合のデータ個数および継続時間



(a) 開北橋記録



(b) 伊達橋記録



(c) 新石狩大橋記録

図—3 検討対象とした波形

橋記録は 0.8~0.9 秒付近で卓越している。これらの記録をもとに最大加速度をそれぞれ 50, 150, 300 gal の 3 通りに変化させ、合計 3 地震波 @ 3 加速度=9 種類の模擬波形を作成した。

一方、数值化時に混入する誤差としては、人為的な誤差と、機械的な誤差の両者があることは 3. に示したとおりであるが、これらはまた、読み取りのたびごとにランダムに発生する誤差と系統的に発生する誤差に分けて考えることができる。たとえば、同一の記録を同一の様式で複数回読み取った場合を例にとると、このようにして得られた複数回の読み取り記録は相互に同一ではない。このような違いの中には、全体として一定の様式で原波形と異なる傾向を有するものもあれば、読み取りのたびごとにばらつくものもある。

このような系統的な誤差とランダムな誤差を分離して評価するためには、複数回の読み取り記録の平均的な特性と平均値からの分散を検討すれば、一応、前者が系統的な誤差の大きさを、また、後者がランダムな誤差の大きさをそれぞれ表わす指標になると考えられる。したがって、いま、平均値および標準偏差により読み取り誤差の特性を分類すれば、表—3 のようになる。

表—3 平均および標準偏差による誤差の分類

		平均値 \bar{R}	
		$\bar{R} \approx 1.0$	$\bar{R} \geq 1.0$ もしくは $\bar{R} < 1.0$
標準偏差 σ_R	小	精度良好	系統的誤差が卓越
	大	ランダムな誤差が卓越	ランダム+系統的誤差

\bar{R} および σ_R はそれぞれ式 (2), (3) の定義による

以上の点から、上述した 9 種類の模擬波形を、2. に示した土木研究所の標準数值化システムによりそれぞれ 5 回ずつ読み取り、これらを相互に比較することにより数值化の精度を検討することにした。ここで、読み取り回数を 5 回としたのは、読み取りに長時間を要することを考慮し、平均値および標準偏差がばらつかない最小の回数という観点から定めたものである。また、読み取り人が変わると結果も多少変化すると考えられるため、開北橋、伊達橋、新石狩大橋の 3 種類の波形にそれぞれ読み取り人を一人ずつ割り当て、同一種類の波形は同一の読み取り人が読み取るようにした。なお、ここには示さないが、同一の模擬波形から読み取られた 5 本の読み取り波形は、相互に目視により検討した程度では差異は認められない。

このようにして 5 回ずつ読み取られた波形をもとに、

周期 0.05 秒から 10 秒の範囲で
 加速度応答スペクトル（ただし、
 減衰定数は 0.05 とした）を計算
 し、原波形（模擬波形）の加速度
 応答スペクトルとの比を次式によ
 り定義して、読み取り精度を表
 示するパラメーターとした。

$$R_i \equiv S_{A,i} / S_{A}^*, \quad (i=1 \sim 5)$$

$$\dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $S_{A,i}$ および S_{A}^* は、そ
 れぞれ、 i 番目 ($i=1 \sim 5$) の読み
 取り波形の加速度応答スペクトル
 および原波形の加速度応答スペ
 クトルであり、また R_i は以下、応
 答スペクトル比とよぶ。ここで、
 加速度応答スペクトルを読み取り
 精度の検討に用いたのは、強震記
 録の読み取り精度が、構造物の応
 答に与える影響の度合を知るため
 には、応答スペクトルが便利であ
 ると考えたためである。また、式
 (1) をもとに、応答スペクトル比
 R_i の平均 \bar{R} 、標準偏差 σ_R 、変動
 係数 λ_R を以下のように求めた。

$$\bar{R} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (R_i - \bar{R})^2}$$

$$\dots\dots\dots(3)$$

$$\lambda_R = \sigma_R / \bar{R} \quad \dots\dots\dots(4)$$

5. 地震動記録の数値化精
 度

9 模擬波形を各 5 回ずつ計 45

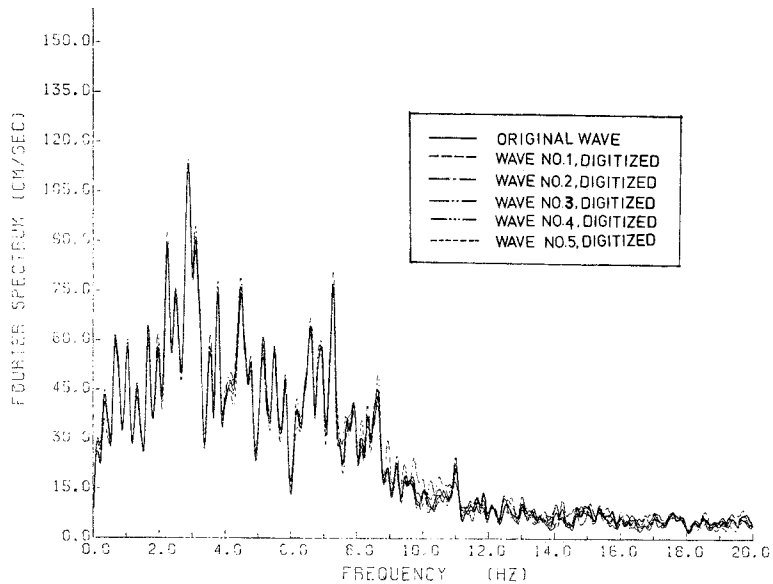
回読み取った最大加速度および読み取りデータ個数を、
 表—4 に示す。これによれば、読み取り波形の最大加速
 度は模擬波形の最大値とよく一致しており、45 回の読
 み取りを平均した両者の差は 0.5% 程度にすぎない。
 なお、模擬波形を読み取る際の読み取りデータ個数（表
 —4 参照）は、模擬波形を書かせた際のデータ個数（表
 —2 参照）の 2~3 倍と多くなっている。これは、両者
 の波形の読み取り人が異なるためであるが、読み取りを
 密にしたからといって、精度が一般的に向上するわけ
 ではないことは前述のとおりである。

次に、読み取り波形の周期特性をフーリエスペクトル
 により示した一例（開北橋記録の場合）を 図—4 に示

表—4 9 模擬地震波形に対する読み取り結果

模擬波形	模擬波形の 最大加速度 [gal]	読み取り波形の最大加速度 [gal]							標準偏差	変動係数
		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均			
開北橋記録	50	49.89 (1 188)	49.35 (1 196)	49.89 (1 485)	48.81 (1 283)	49.74 (1 101)	49.54 (1 250)	0.462	9.3×10^{-3}	
	150	150.09 (1 590)	151.25 (1 441)	149.68 (1 493)	148.47 (1 507)	150.29 (973)	149.96 (1 400)	1.011	6.7×10^{-3}	
	300	299.69 (1 233)	298.07 (827)	300.61 (733)	299.66 (607)	298.95 (678)	299.40 (828)	0.947	3.2×10^{-3}	
伊達橋記録	50	50.17 (2 040)	50.03 (2 118)	49.57 (2 034)	49.85 (2 047)	49.64 (2 146)	49.85 (2 077)	0.254	5.1×10^{-3}	
	150	148.93 (2 526)	150.48 (2 440)	149.30 (2 529)	149.08 (2 324)	149.81 (2 413)	149.52 (2 446)	0.631	4.2×10^{-3}	
	300	300.10 (2 513)	300.11 (2 529)	300.49 (2 225)	299.19 (2 421)	299.24 (2 456)	299.83 (2 429)	0.560	1.9×10^{-3}	
新石狩大橋 記録	50	50.15 (1 284)	49.34 (897)	50.15 (851)	49.55 (800)	50.20 (719)	49.88 (910)	0.403	8.1×10^{-3}	
	150	148.76 (1 607)	147.90 (1 542)	146.22 (1 344)	149.82 (1 018)	149.84 (1 183)	148.51 (1 339)	1.514	10.1×10^{-3}	
	300	281.37 (1 190)	296.50 (713)	301.66 (668)	299.69 (638)	302.22 (492)	296.29 (740)	8.634	29.1×10^{-3}	

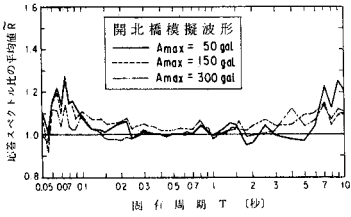
() 内は読み取りデータ個数



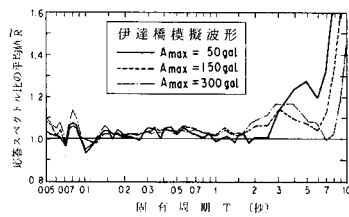
図—4 フーリエ係数で示した読み取り記録の精度
 （開北橋記録、 $A_{max}=300$ gal の場合）

す。全体としての特徴は 5 回の読み取りごとによく一致
 しており、こうした面からは、ここで検討した少なくとも
 20 Hz 程度以下の振動数領域においては、安定した
 読み取りが行われていることを示している。

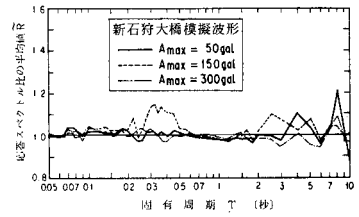
次に、式 (1)~(4) で定義した応答スペクトル比の平均 \bar{R} 、標準偏差 σ_R 、変動係数 λ_R を示すと 図—5~7 の
 ようになる。図中には参考のため、最大加速度で除した
 模擬波形のフーリエスペクトル $F(f)/A_{max}$ も示して
 いる。ここで、スペクトルの平滑化のためのハンギン
 ウィンドウの回数 N は 0 の場合と 10 の場合の両者の結
 果を示している。図—5~7 をまとめると以下のように
 なる。



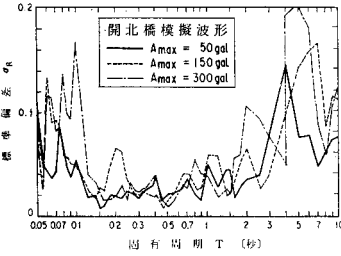
(a) 応答スペクトル比の平均値 \bar{R}



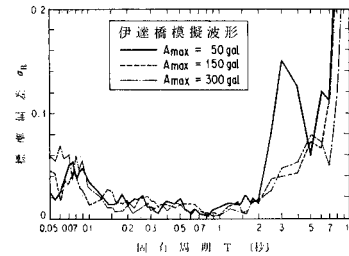
(a) 応答スペクトル比の平均値 \bar{R}



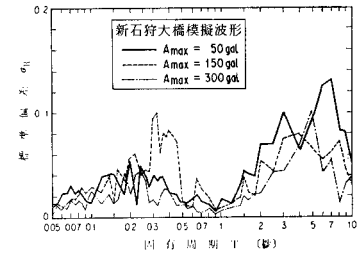
(a) 応答スペクトル比の平均値 \bar{R}



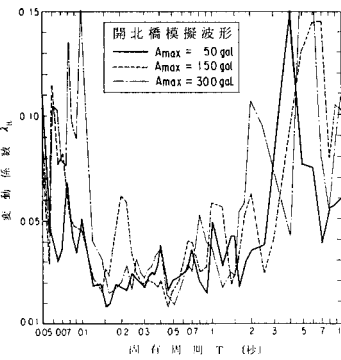
(b) 応答スペクトル比の標準偏差 σ_R



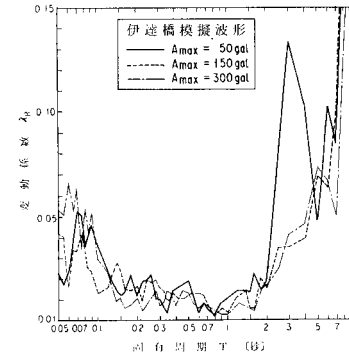
(b) 応答スペクトル比の標準偏差 σ_R



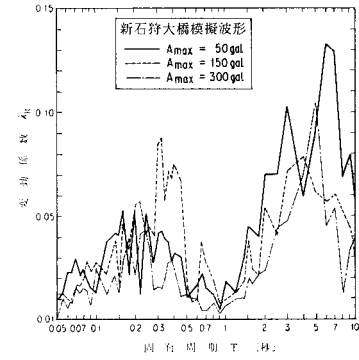
(b) 応答スペクトル比の標準偏差 σ_R



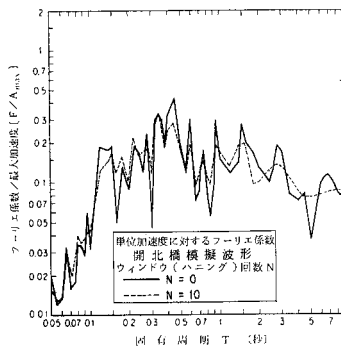
(c) 応答スペクトル比の変動係数 λ_R



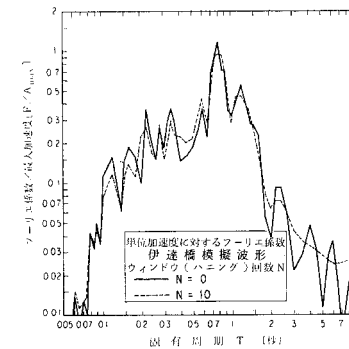
(c) 応答スペクトル比の変動係数 λ_R



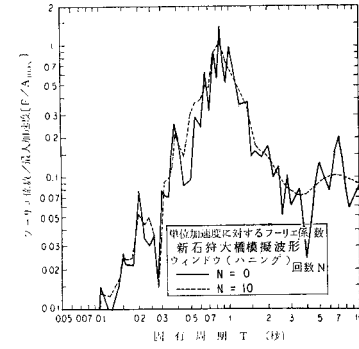
(c) 応答スペクトル比の変動係数 λ_R



(d) 模擬波形のフーリエスペクトル F/A_{max}



(d) 模擬波形のフーリエスペクトル F/A_{max}



(d) 模擬波形のフーリエスペクトル F/A_{max}

図—5 応答スペクトルによる読取り記録の精度 (開北橋記録)

図—6 応答スペクトルによる読取り記録の精度 (伊達橋記録)

図—7 応答スペクトル比による読取り記録の精度 (新石狩大橋記録)

a) \bar{R} による波形の再現性の検討

応答スペクトル比の平均値 \bar{R} は、開北橋、伊達橋、新石狩大橋のいずれの場合にも全体としては 1.0 に近く、読み取り波形は原波形 (模擬波形) の特徴を表わしているといえる。しかしながら、 \bar{R} の分布を周期領域についてみると、周期の長い領域および短い領域

において \bar{R} は 1.0 から変動する傾向にある。特に、伊達橋記録の場合には、周期が 6 秒程度以上において \bar{R} が著しく大きくなっており、しかも、最大加速度が 300, 150, 50 gal と小さくなるにつれて \bar{R} は単調に増加している。また、開北橋記録の場合にも伊達橋記録ほど著しくはないが、周期が 0.1 秒以下および 6 秒以上の領域

で \tilde{R} が 1.2 程度の値となっている。いま、 \tilde{R} が $\pm 10\%$ の変動におさまる周期範囲 ($0.9 \leq \tilde{R}_{SA} \leq 1.1$) を求めると、開北橋、伊達橋、新石狩大橋の各記録に対して、それぞれ、0.1~4 秒、0.1~2 秒、0.05~4 秒（ただし、最大加速度が 150 gal の場合に 限れば、0.3~0.5 秒は除外）程度となる。

次に、同一の加速度記録に対して最大加速度 A_{max} を 50 gal, 150 gal, 300 gal と変化させた場合の \tilde{R} をみると、 A_{max} ごとに多少変化しているが、上記の伊達橋記録の周期 6 秒程度以上の場合を除けば、全体として A_{max} による \tilde{R} の顕著な系統的違いは認められない。

b) σ_R による波形の再現性の検討

次に、応答スペクトル比の標準偏差 σ_R をみると、全体としての傾向は上記 \tilde{R} とよく似ており、周期 1 秒付近を中心とし、これより長周期および短周期の領域においては σ_R が大きくなる傾向にある。すなわち、開北橋記録の場合には 0.1~2 秒、伊達橋記録の場合には 0.08~3 秒、新石狩大橋記録の場合には 0.4~1.5 秒の範囲において、それぞれ、 σ_R はおおむね 0.04 の範囲におさまっているが、これよりも周期が長いもしくは短い領域では σ_R が 0.2 程度まで大きくなる。なお、 σ_R に対する最大加速度 A_{max} の影響は顕著なものではない。

ここで、 \tilde{R} および σ_R に対する A_{max} の影響がともに著しくない理由は、次のように考えることができる。

すなわち、 \tilde{R} および σ_R は式 (1)~(3) の定義より、

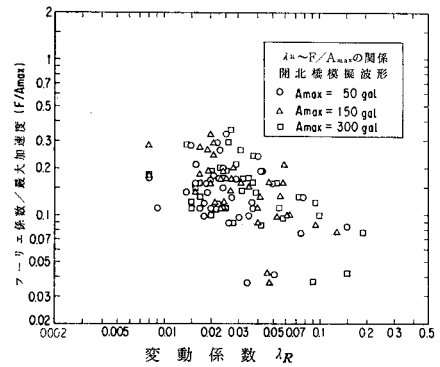
$$\tilde{R} = \tilde{S}_A / S_{A^*} \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_R = \sigma_{SA} / S_{A^*} \dots\dots\dots (6)$$

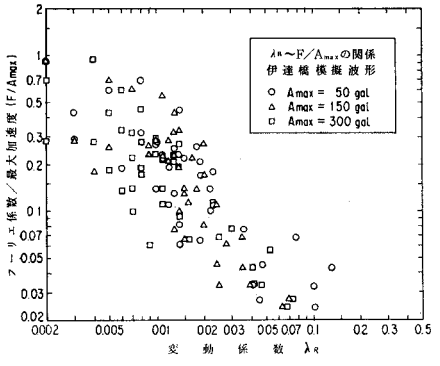
となる。ここで、 \tilde{S}_A および σ_{SA} は、それぞれ $S_{A,i}$ の平均および標準偏差である。したがって、一般に A_{max} が大きくなると \tilde{S}_A および σ_{SA} も大きくなるが、 S_{A^*} も同じように大きくなるため、結果として \tilde{R} 、 σ_R は A_{max} に影響されにくいと考えられる。

c) λ_R とフーリエ振幅 $F(f)$ の関係

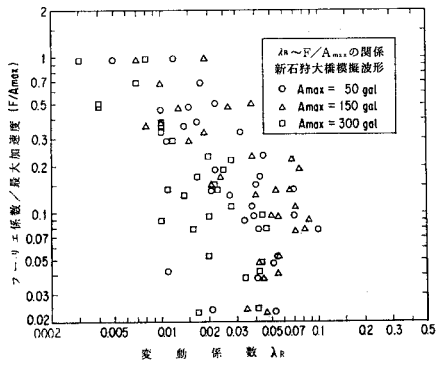
以上は、 \tilde{R} と σ_R による波形特性の再現性の検討であるが、読み取り誤差の生じる原因を問わないとすれば、両者の比、すなわち式 (4) の変動係数 λ_R を精度の指標とすることができる。上述したように、 \tilde{R} が周期領域において全体としてそれほど大きな変化を示さないため、結果的には λ_R は σ_R と比較的相似な形状を示している。いま、これを最大加速度で除したフーリエ係数 $F(f)/A_{max}$ (ハニングウィンドウによる平滑化の回数 $N=10$ の場合を使用) と比較すると、両者の間にははっきりした相関があることがわかる。すなわち、図 1~5~7 に示した同一の周期に対応する λ_R と F/A_{max} の関係をプロットすると図 8 のようになり、応答スペクトル比の変動係数で表わした周期領域の読み取り精度は、波形に含まれる周期特性によって支配されることが



(a) 開北橋記録



(b) 伊達橋記録



(c) 新石狩大橋記録

図 8 応答スペクトル比の変動係数 λ_R とフーリエ係数 F/A_{max} の関係

わかる。ただし図 8 では、模擬波形を書かせる際に使用したデータ個数(表 2 参照)から決まるナイキスト振動数(開北橋、伊達橋、新石狩大橋の各記録に対して、それぞれ、1/0.087 Hz, 1/0.085 Hz, 1/0.156 Hz)以上の成分および周期 4~5 秒以上の成分は、ともにデータとしての信頼性が低いと考えて除外した。図 8 の関係によれば、記録波形の中で卓越する成分に対する読み取り精度(変動係数 λ_R)は高いが、波形の中にわずかしが含まれていない成分の読み取り精度は、低いことがわかる。図 8 に示す λ_R と F/A_{max} の関係では A_{max} の

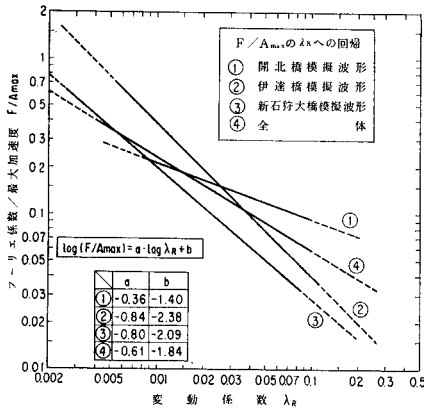


図-9 $\lambda_R \sim F/A_{max}$ の関係

影響は著しいものではないが、これは前述した \tilde{R} および σ_R の場合と同様の理由による。

いま、図-8 の関係を次式のように仮定し、

$$\log(F/A_{max}) = a \log \lambda_R + b \quad \dots\dots(7)$$

未定係数 a, b を最小 2 乗法によって定めると表-5 のようになる。ここで全データを使った場合には、式 (7) は次のようになる (図-9 参照)。

$$\log(F/A_{max}) = -0.61 \log \lambda_R - 1.84 \quad \dots\dots(8)$$

このようにして、変動係数 λ_R で表わした読み取り精度と、最大加速度で除したフーリエ係数 F/A_{max} で表わした波形特性の間の関係が求まると、所要の読み取り精度 (変動係数) を決めることにより対応する F/A_{max} の値を知り、この値が確保される周期範囲から、所期の読み取り精度を満足する周期範囲を定めることができる。たとえば、式 (8) を用いて、5%、10%、20% に対する読み取り可能な範囲を求めると、表-6 のようになる。したがって、10% 程度の変動係数は許容できるものとすれば、ここで検討した 3 種類の波形に対しては、おおむね 0.1~3 秒の範囲が読み取り上信頼できる範囲と考えることができる。

表-5 F/A_{max} と λ_R の関係を与える定数 a, b (式 (7) 参照)

読み取り記録	a	b
開北橋記録	-0.36	-1.40
伊達橋記録	-0.84	-2.38
新石狩大橋記録	-0.80	-2.09
全体	-0.61	-1.84

6. 直線読み取りによる長周期成分の数値化精度の検討

加速度強震記録から地震動の速度あるいは変位を求めするためには、記録の時間積分が必要となる。数値化された加速度記録を単純に時間積分すると、速度、変位が発散することはよく経験するが、この理由は、加速度記録の読み取り時の誤差によるところが少なくない。加速度記録そのものの読み取り精度に関しては前章までに示し

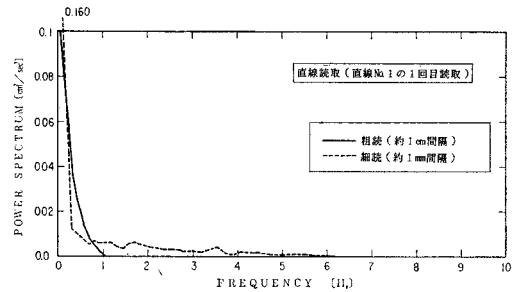
表-6 変動係数とこれに対応する読み取り可能な周期範囲 [秒]

読み取り記録	$\lambda_R=5\%$	$\lambda_R=10\%$	$\lambda_R=20\%$
開北橋記録	0.12~3.5	0.11~4.8	0.09~5
伊達橋記録	0.12~1.8	0.10~2.5	0.09~3
新石狩大橋記録	0.35~2.5	0.30~3.5	0.18~4

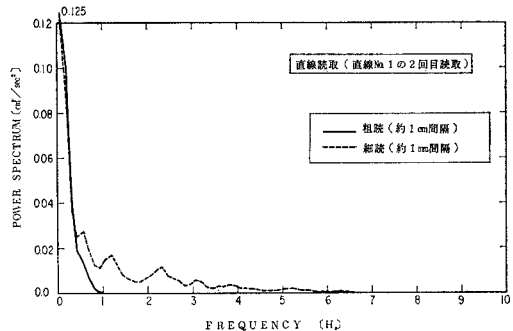
λ_R : 変動係数

たとおりであるが、これを時間積分した場合の誤差を直接評価するために、以下のように直線をディジタイザーで読み取った場合の再現性を検討した。

まず、4. に示したと同じ方法により、約 90 cm の長さの直線をデジタルプロッターにより 2 本描いた。精度の検討のためには、できる限りまっすぐな直線を引くことが要求されるが、“真の直線”を引くことは実際には容易ではなく、種々検討した結果、デジタルプロッターを用いることにしたものである。また、2本の線を引いたのは、プロッターに系統的な誤差があればこれを検知できるようにしたためである。次に、これをディジタイザーにより、(i) 約 1 cm 間隔で読み取った場合 (以下、粗読とよぶ)、(ii) 約 1 mm 間隔で読み取った場合 (以下、細読とよぶ) の 2 種類の方法でそれぞれ同一の読み取り人が 3 回ずつ、合計 12 回 (2 本 @ 2 種類の読み取り方法 @ 3 回読み取り) 読み取った。このようにして読み取った直線を、SMAC-B2 型強震計記録の時間軸および加速度軸に合わせて、1 cm = 1 sec, 1 mm



(a) 直線 No. 1 の 1 回目読み取り



(b) 直線 No. 1 の 2 回目読み取り

図-10 加速度のパワースペクトル (直線 No. 1 の読み取り結果)

=12.5 gal と考え、1/100 秒間隔に直線補間し、これを等時間間隔の加速度記録とみなした。読み取り区間はいずれも約 68 cm (90 cm の直線の中央部のみを用いた) であり、読み取り個数は、粗読および細読に対してそれぞれ約 80 点、約 800 点である。

上記により求めた加速度記録のパワースペクトルの一例 (直線 No. 1 の読み取り結果) を 図-10 に示す。これによれば、加速度記録に含まれる誤差の振動数成分は、細読の場合の方が粗読の場合よりも高くまで存在している。いま、読取りの平均間隔は、粗読の場合が $\Delta t \approx 68 \text{ 秒}/80 \text{ 個} = 0.85 \text{ 秒}$ 、細読の場合が $\Delta t \approx 68 \text{ 秒}/800 = 0.085 \text{ 秒}$ であり、したがって、ナイキスト振動数は約

0.6 Hz (粗読) および 6 Hz (細読) となる。実際の計算は 1/100 秒の等時間間隔に補間して行っているため、これよりやや高い振動数成分が出ているが、基本的にはナイキスト振動数までの誤差が加速度記録には含まれていることがわかる。ただし、粗読のナイキスト振動数である 0.6 Hz 以下の成分に対しては、粗読と細読の違いは少ない。

次に、加速度記録をフーリエ変換により周波数領域で 2 回積分し、これを逆フーリエ変換して求めた変位記録およびそのパワースペクトル (いずれも直線 No. 1 の場合) をそれぞれ、図-11 および 12 に示す。この場合には、変位記録に含まれる卓越周期は、粗読、細読のい

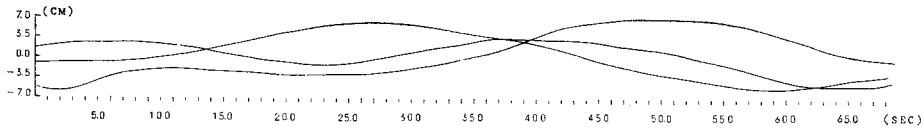
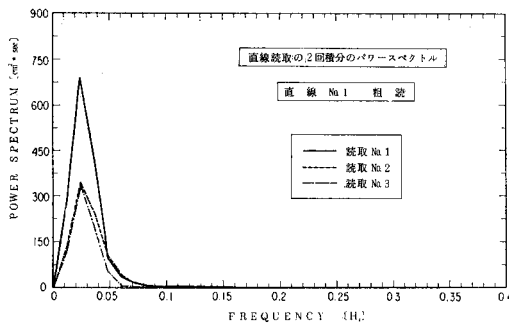
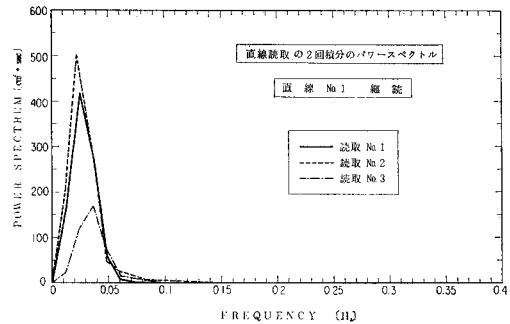


図-11 変位の一例 (直線 No. 1 の細読の場合)



(a) 粗読の場合



(b) 細読の場合

図-12 変位のパワースペクトル (直線 No. 1)

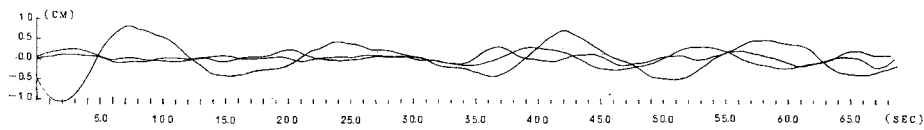
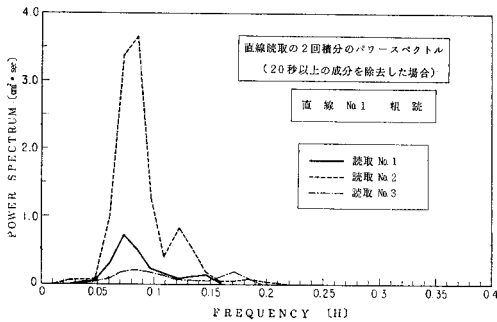
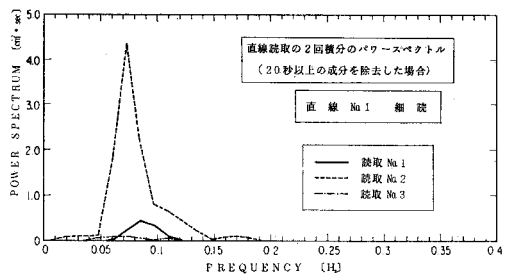


図-13 変位の一例 (20 秒以上フィルターアウト, 直線 No. 1 の細読の場合)



(a) 粗読の場合



(b) 細読の場合

図-14 変位記録 (20 秒以上フィルターアウト) のパワースペクトル (直線 No. 1)

れの場合にも約 40 秒であり、また、誤差の変位振幅は 7~15 cm に達することがわかる。

そこで、図-12 の誤差のパワースペクトルの卓越周期のおおむね下限に対応する 20 秒以上の成分を、ディジタルフィルターにより加速度記録から除いて求めた変位記録とそのパワースペクトルを、それぞれ 図-13 および 14 に示す。この場合には、15 秒程度の誤差の成分が卓越するが、その振幅は 1 cm 以下と比較的小さい値となることがわかる。

7. 結 論

SMAC-B2 型強震計に合わせた 加速度振幅軸、および時間軸をもつ模擬的に作成した地震動波形、および直線を用いて、ディジタイザーによる人為的な数値化の精度を検討した。これより得られた結論は次のとおりである。

(1) 加速度強震記録をディジタイザーで数値化した場合には、読み取り波形をディジタルプロッターで再生し、これを原波形と重ね合わせて目視で比較した程度では両者の区分ができないだけの精度がある。また、同一記録を繰り返し読み取った場合の真値に対する最大加速度値の読み取り誤差は、今回の検討の範囲では、0.5% 程度以下であった。

(2) 読み取り精度を式 (1) で定義した応答スペクトル比により周期領域で評価すると、全体として 0.1~3 秒程度の範囲では読み取り精度が良好で、これからはずれるに従って、精度が低下する傾向にある。これは、加速度記録に卓越する周期成分に対する読み取り精度は高いのに対し、加速度記録に含まれる度合いの少ない周期成分に対する読み取り精度は、低いことによると考えられる。

(3) 読み取り精度を式 (4) により定義した応答スペクトル比の変動係数により表わすと、上記 (2) をよく表わしており、この場合には、読み取りの変動係数と最大加速度で除した記録のフーリエ係数の間には式 (8) に示す相関が認められる。式 (8) は上述した 45 模擬加速度記録全体の平均から求められたものであるが、これ

が、一般の強震記録に対しても適用可能であるとすれば、読み取りで必要とする精度(変動係数)を決めることにより、式 (8) から対応するフーリエ係数の値を知り、所期の読み取り精度を確保できる周期範囲を定めることができる。

(4) 直線状の模擬波形(約 68 秒の区間)をディジタイザーで数値化し、これをフーリエ変換により周波数領域で 2 回積分して求めた変位には、約 40 秒の周期成分が卓越し、その誤差は 7~15 cm 程度となる。しかし、この模擬直線波形から 20 秒以上の成分を除いて変位を求めると、変位記録に卓越する周期成分は約 15 秒となり、誤差も 1 cm 以下となる。

謝 辞：本研究の実施に際しては、建設省土木研究所地震防災部 岩崎敏男室長から種々有益なご指摘を受けました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 高橋龍太郎：SMAC 型強震計，地震，第 2 輯 第 6 巻，1953。
- 2) 伯野元彦・松井芳彦・藤野陽三：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，1978。
- 3) 井合 進・倉田栄一・土田 肇：強震記録の数字化と精度，港湾技術研究所資料，No. 286，運輸省港湾技術研究所，1978。
- 4) Trifunac, M.D., F.E. Udwardia and A.G. Brady: High Frequency Errors and Instrument Corrections of Strong-Motion Accelerograms, Report No. EERL 71-5, California Institute of Technology, 1971。
- 5) 岩崎敏男・川島一彦・若林 進・高木義和：地震応答スペクトルに及ぼす SMAC 型強震計特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 309, 1981。
- 6) Brady, A.G. and D.E. Hudson: Standard Data Processing of Strong Motion Accelerograms, Proc. 5th WCEE, Roma, Italy, 1974。
- 7) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録，その 1~その 7，土木研究所彙報，Vol. 32~38。
- 8) 川島一彦・高木義和：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，1979。
- 9) 川島一彦・高木義和・相沢 興：SMAC 型強震計記録の数値化精度の一検討，および，SMAC 型強震計記録の長周期成分の補正，土木学会関東支部年次学術講演会，1980。

(1981.7.15・受付)