

パソコンとイメージスキャナよりなるアナログ強震記録の解析システム

A Computer Aided Analyzer for Analog Strong-Motion Accelerograms
Consisting of a Personal Computer and a Scanning Digitizer

年縄 巧 * 翠川三郎 ** 大町達夫 *** 中村 豊 ****

By Takumi TOSHINAWA, Saburoh MIDORIKAWA, Tatsuo OHMACHI and Yutaka NAKAMURA

A semi-automatic analyzer consisting of a personal computer and a scanning digitizer has been developed in order to digitize analog strong-motion accelerograms obtained by a SMAC-B2 accelerograph. The digitization follows a process of; 1) image scanning of the accelerograms, 2) edition of the input image, and 3) delineating operation. The time required for the digitization of a set of 40-second records is about one hour. The digitized records are corrected through a process of; 1) arc correction, 2) base-line correction, 3) conversion of dynamic characteristics of seismometers, and 4) high-pass filtering. Digitization of straight-line traces shows that the noise level of digitized accelerograms is about 3 cm/s² at most. Earthquake accelerograms digitized by the system are compared with those digitized by a conventional system and digitally recorded ones through coherence analysis. The results show that the present system has almost the same accuracy as the conventional system.

1. はじめに

電子技術の進歩により、地震記録はアナログで磁気テープに記録されたり、直接数値化された後に、フロッピーディスクやICメモリーカードに書き込まれたりするようになってきた。しかしながら、SMAC-B2型強震計のような機械式アナログ強震計で記録された波形を数値化して解析する機会もまだまだ多い。

著者らは学童および市民の地震防災教育の一環として首都圏の中学、高校、および公的施設9地点に11台(1990年10月1日現在)のSMAC-B2型強震計を配置し、観測された強震記録を数値化・解析し、その結果を関係諸機関にフィードバックして防災教育や理科教育に活用してもらおうプロジェクトを進めている。強震観測点は最終的に20地点程度を予定しており、数値化、解析作業を簡便かつ効率よく行うことが必要となる。

従来の、人手による数値化作業は多大な労力と時間がかかり、例えば30秒間の記録を数値化および後処理する作業に8時間程度を要するといわれている。このため、ワークステーションを用いた自動数値化装置も既に開発されている²⁾が、価格が高価なためにこのシステムの導入は簡単には行えない。そこで、著者らは記録された強震波形をイメージスキャナを用いてパーソナルコンピュータ上で数値化する比較的安価なシステムを開発した。本稿ではこのシステムの数値化・解析手順を紹介し、このシステムの精度について検討する。

注) 本論文の一部は文献1)に発表したものである。

* 工学修士 東京工業大学助手 大学院総合理工学研究科 (〒227 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

** 工学博士 東京工業大学助教授 大学院総合理工学研究科 (同上)

*** 工学博士 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 (同上)

**** 工学博士 (財)鉄道総合技術研究所 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

2. 数値化システム

(1) システムの構成

本システムは図1に示すようにパーソナルコンピュータ(NEC PC-9801VX), イメージスキャナ(クラボウ社 K-IS-A3)およびデータ編集用のマウスによって構成されている。コンピュータには、メモリーの確保及び処理速度を速めるため、8MBの増設RAMボードと数値演算プロセッサを装着する。イメージスキャナの分解能は200, または400dots/inchの2通りを選ぶことができる。例えばSMAC-B2型強震計の記録は、時間軸で1秒/cm, 加速度軸は125gal/cmであるから、400dots/inchで数値化する場合、分解能はそれぞれ約0.0064秒/dot(約158Hz), 約0.79gal/dotとなる。

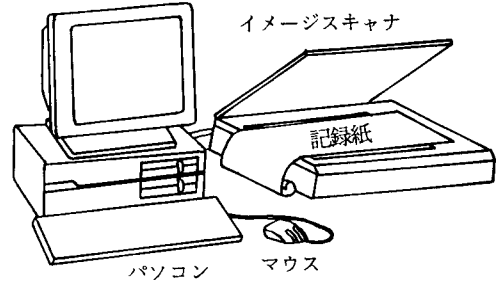


図1 ハードウェアの構成

1度に数値化される成分は、水平2成分、上下1成分及び時間軸の合計4本である。このイメージスキャナは最大でA3版の図面まで入力することができるので、SMAC-B2型強震記録の場合、1度に約40秒間の記録を数値化することができることになる。数値化したデータの大きさは読み取り密度が400dots/inchで約0.4MBである。なお、読み取りのソフトウェアには波形接続の機能も準備されているので、これを用いれば多少手間はかかるが40秒以上の記録も分割して読み取り、連結することも可能である。

(2) 数値化手順

数値化の手順を図2に示す。以下、順に説明を加える。

(a) 画像入力

読み取り濃度を記録紙の鮮明度に応じて濃, 中, 淡のいずれか1つに選び, 波形記録の画像データ(ラスターデータ)を取り込む(写真1参照)。

(b) データ編集1

取り込んだラスターデータのごみや線のかすれ箇所をマウスを用いて対話型で修正する。

(c) 細線化

通常、波形を表す曲線には幅があるため、取り込まれた曲線の幅は数個のドットで表現されている。これを一時刻に対して一つの振幅値が定まるように細線化を行う(写真2, 3参照)。

(d) データ編集2

自動ベクトル化を行うために、細線化したラスターデータの後戻りしているドットや不連続な箇所をマウスを用いて対話型で修正する。

(e) 補正角度入力

記録に基線が記入されている場合、これを読み取って記録紙の傾き(補正角度)を求める。

(f) ベクトル化

各成分の開始点を指定してベクトル化を行う。ベクトル化の条件は(i)ドットが連続していること, (ii)ドットが後戻りしていないこと, である。これらの条件が満たされないと、ベクトル化は途中で中止されるので、再び(d)を行う。

(g) ファイルの書き込み

ラスターデータ及びベクトル化データをフロッピーディスクに書き込む。

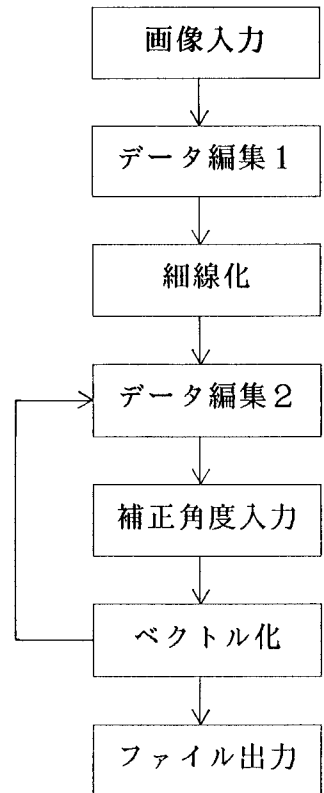


図2 数値化の流れ

(a)～(g)の手順のうち(c)と(f)は自動的に行われる。したがって、数値化作業で時間がかかるのは(b)及び(d)である。記録紙の鮮明度が良くないもの、よごれの程度の大きいもの、及び短周期成分が卓越しているもの程、より多くの作業時間を要するが、記録が良好の場合には約40秒のSMAC-B2型強震計の波形を数値化するために要する時間は、1時間程度である。

(3) 数値化データの補正

数値化したデータを補正解析する手順は、以下の通りである(図3参照)。

(a) 円弧補正

記録が円弧を描くことによる誤差は縦軸方向では小さいが、横軸方向では大きい。そこで、時間軸方向の誤差を次式で求めて、円弧補正を行う³⁾。

$$\Delta t = r - \sqrt{r^2 - y^2}$$

ここに Δt は時間軸方向の誤差(mm)、 r 、 y はそれぞれペンの半径(mm)、記録の縦軸(mm)である。

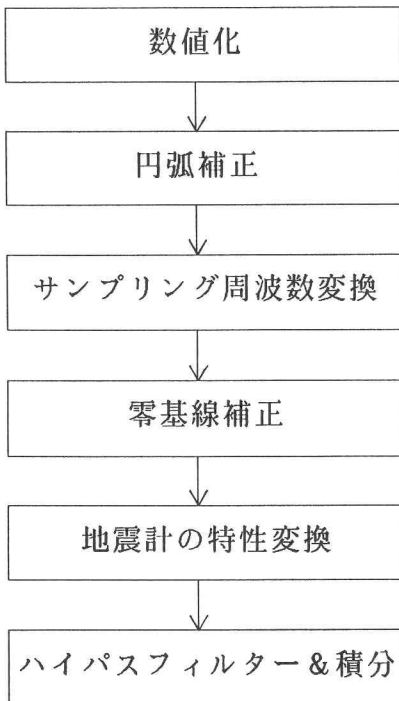


図3 数値化データの補正

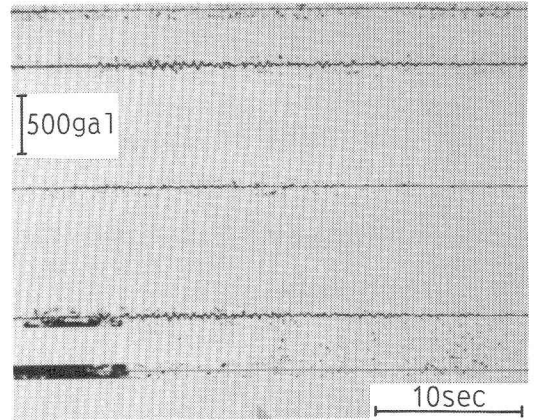


写真1 取り込まれた波形記録の画像データ(ラスターデータ)

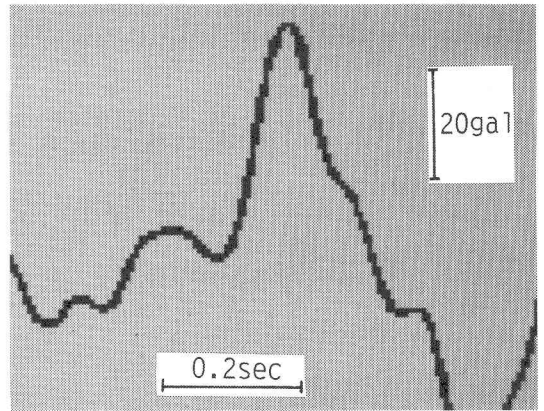


写真2 細線化前のラスターデータ

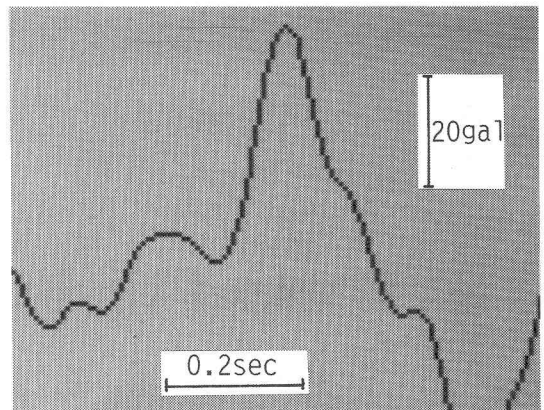


写真3 細線化後のラスターデータ

(b) サンプリング周波数変換

円弧補正されたデータの時間間隔は等間隔ではないため、直線補間を行って 100Hz の時間間隔に補正する。

(c) 零基線補正

数値化された加速度記録の基線の傾きを、(i) 終端速度がゼロ、(ii) 変位が発散しない、の 2 つの条件を用いて 1 次回帰して除去する⁴⁾。

(d) 地震計の特性変換

SMAC-B2 型強震計は固有周期 0.14 秒 ($f=7\text{Hz}$)、減衰定数 100 % であるため、0.5 秒程度から短周期側で感度が落ち始める。短周期側の感度を上げて補正するため、元の加速度記録に SMAC-B2 型強震計の逆特性を与えた後、仮想の地震計 ($h=0.7, f=10\text{Hz}$) の特性を付与して記録の特性を変換する⁵⁾。ここで仮想の振子の固有振動数を 10Hz としたのは、10Hz 程度以上の振動数領域では、真の加速度とノイズの判別が困難となるためである⁶⁾。

(e) ハイパスフィルター&積分

誤差の混入しやすい長周期成分の振幅を落とすため、仮想の地震計 ($h=0.6, f=0.333\text{Hz}$) を利用する。これによって周期 3 秒以上の長周期成分の感度を落とし、同時に積分を実行して速度波形、変位波形を求めることができる。

(d) 及び (e) で周波数領域でのフィルターを使わず、仮想の地震計を用いて時間領域で解析する方法を選んだのは、計算時間が速い、解析区間以上の長周期成分の除去を効率的に行う、などの理由からである。図 4 は 1987 年 12 月 17 日の千葉県東方沖 ($M=6.7$) の際、千葉県野田市で観測された SMAC-B2 型強震記録の E W 成分を補正解析したものである。上から順に (i) サンプリング周波数変換後の波形、(ii) 零基線補正後の波形、(iii) 振子の特性変換後の波形、および (iv) ハイパスフィルターをかけた後の波形である。(i) で波形は右上がりに傾いているが、(ii) でこれが除去され、(iii) で短周期成分が強調され、(iv) で長周期成分が取り除かれている。数値化の後の補正解析に要する計算時間は約 15 分程度である。

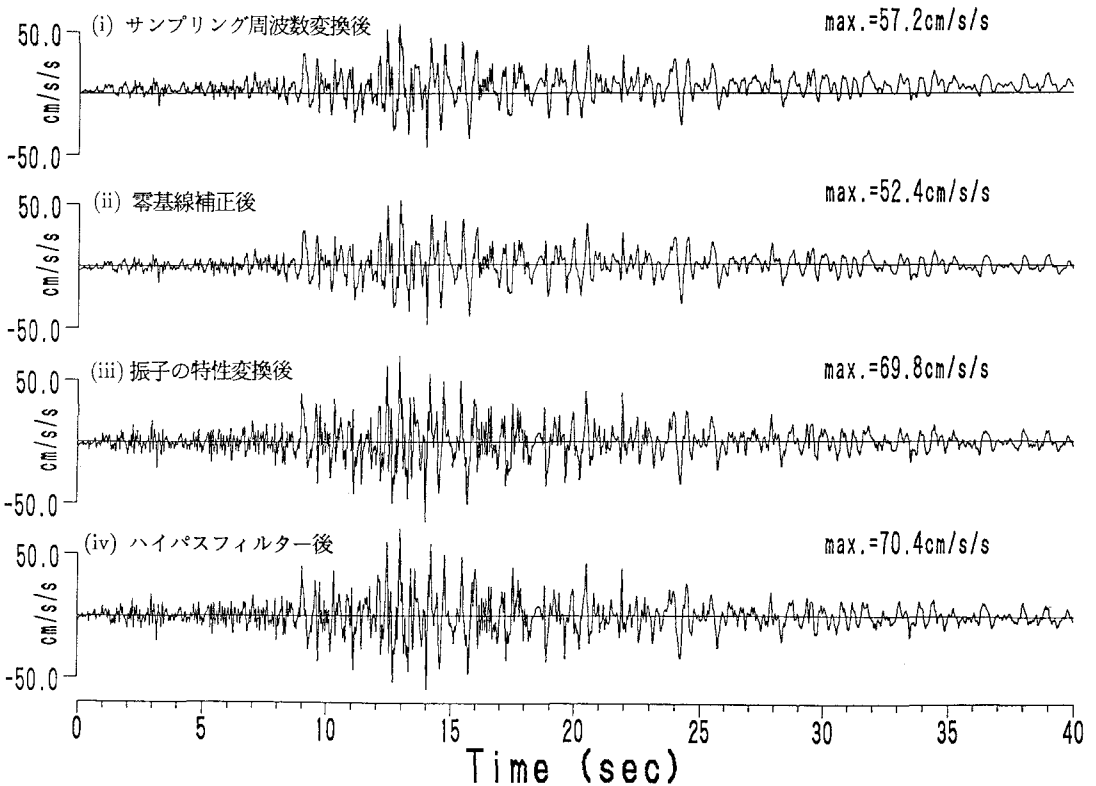


図 4 補正解析の例

3. 数値化の精度

この数値化システムの精度を以下の2通りの方法で検討した。

(1) 基線の数値化

振幅が小さく、基線と考えられる強震記録の尾部の40秒間を数値化した。図5に零基線補正後の波形を示す。最大振幅にして1~3gal程度のノイズが見られる。3つの波形の速度応答スペクトル($h=0.2$)を計算し、その平均を図6の太線で示す。これは本システムでSMAC-B2型強震記録を数値化した場合のノイズスペクトルと考えられる。ノイズは周期とともに増加する傾向にあり、その振幅は周期0.1秒では0.02cm/s程度、周期1秒では0.1cm/s程度である。参考のため米国で用いられているSMA-1型強震計用数値化システムのノイズスペクトル⁷⁾を破線で示す。本システムによるノイズは米国で用いられているシステムのそれに比べて半分程度である。

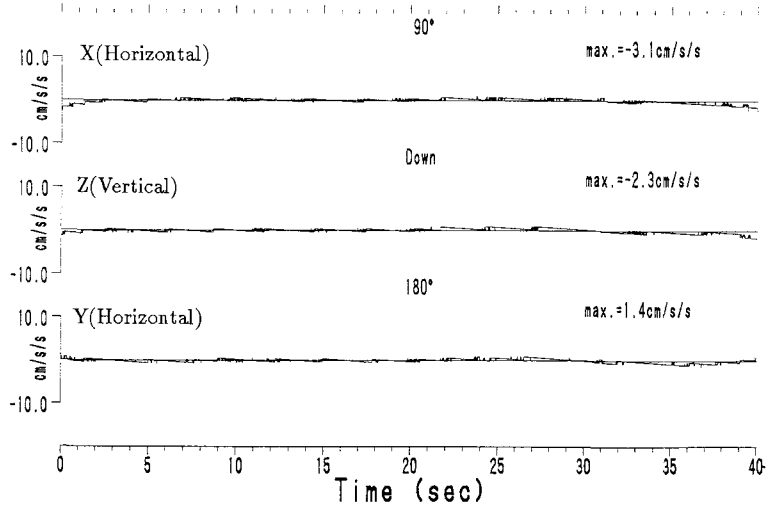


図5 基線の数値化結果(零基線補正後)

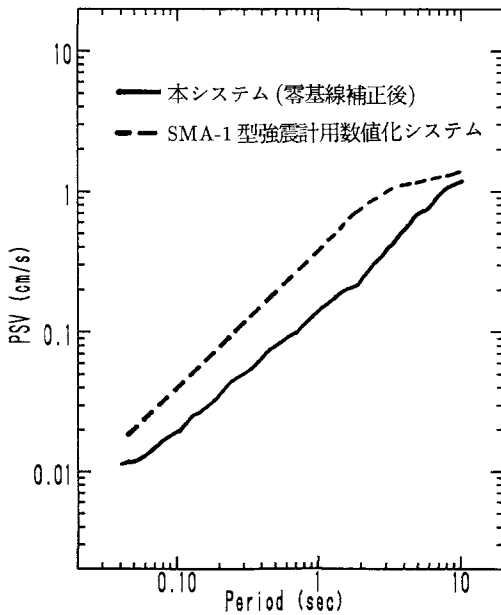


図6 基線の速度応答スペクトル($h=20\%$)

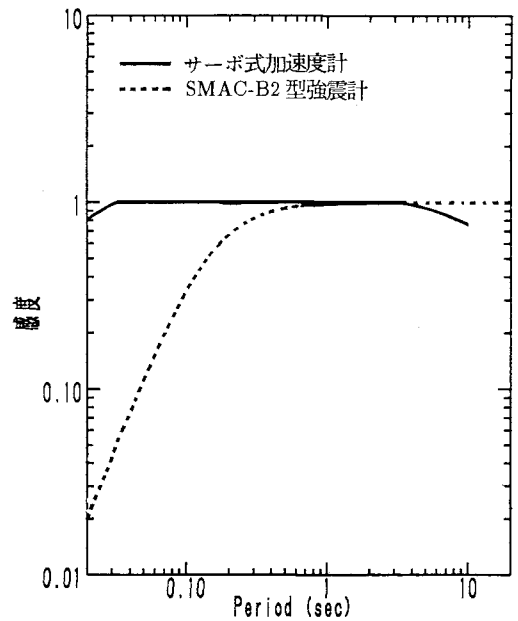


図7 地震計の周期特性

(2) デジタル記録, 従来の数値化手法による数値化記録と本数値化システムによる数値化記録との比較

東工大長津田キャンパスのG3棟(11階建物)の地下1階では, SMAC-B2型強震計による記録の精度を検討する目的で, サーボ式加速度計(STD-3C)とデジタルレコーダ(DR-F1)からなる高精度の観測システムとSMAC-B2型強震計とが隣接して設置されている。デジタルレコーダは14bitsのA/D変換器を持ち, 最大測定範囲を240galとセットされているため, 最小分解能は0.03galと非常に小さい。サーボ式加速度計は, 図7に示す周期特性からわかるように, 広い周期範囲で平坦な感度を持っている。

図8は1990年2月20日の伊豆大島近海地震の(a)デジタル式記録計による加速度波形を後述する波形変換を施したものを, SMAC-B2型強震計によって記録された波形を, (b)従来のスマックリーダーで人手により数値化した波形, および(c)本システムによって数値化した波形, の比較である。(a)はデジタル式記録計による記録にサーボ式加速度計の逆特性を与えた後, SMAC-B2型強震計の特性を付与したものを計算し, アナログ記録による波形との相互相関関数が最大となるようにして, アナログ記録と時間軸を合わせたものである。

最大値は5~13galと, 本システムの分解能と比較して十分大きな振幅ではないため, (c)の波形は滑らかさに欠ける部分が見られるものの, 各位相の振幅の大きさは概ねよく一致している。(a),(b),(c)の波形のうち, 水平1成分(図8中, (a)-1,(b)-1,(c)-1)のフーリエスペクトルは図9のようになる。0.1~3秒で3つのスペクトルはよく一致している。スペクトルは0.6秒付近にピークが見られ, 周期0.2秒以下および周期3秒以上では振幅は小さい。

(a)-1の波形と, (b)-1の波形のコヒーレンスを図10に示す。コヒーレンスが0.8を越える周期範囲は0.2~3秒である。振動実験による精度の検討によれば, SMAC-B2型強震記録にはペンと記録紙間の摩擦によって, ゼロ線のシフトやドリフトが生じ, そのフーリエスペクトルは $1/f$ スペクトルの特徴を示す⁸⁾。このノイズの影響が顕著に出て来るのは3秒程度からであるため, これより長周期領域でのコヒーレンスが低下しているものと考えられる。0.2秒付近より短周期側で値が小さくなるのは, スマックリーダーの読み取り精度の問題だけでなく, 比較する波形そのものに短周期成分が少ないことも原因と考えられる。

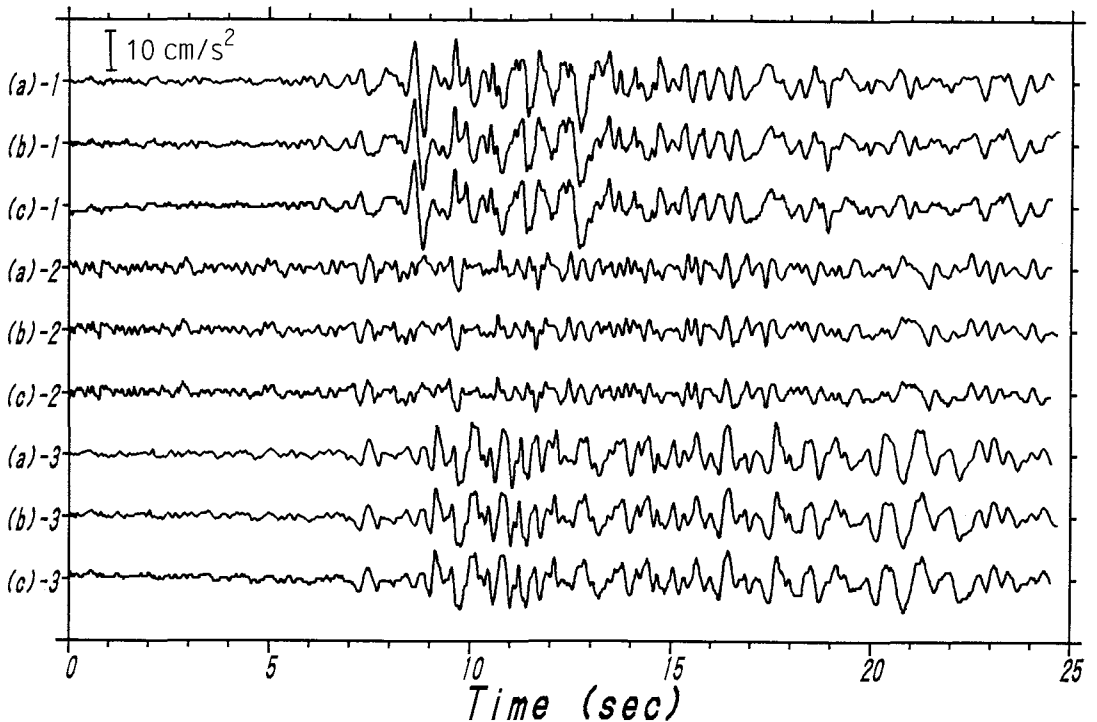


図8 加速度波形(1990年2月20日伊豆大島近海地震)の比較
a: サーボ式加速度計によるデジタル記録
b: SMAC-B2型強震記録をスマックリーダーで数値化した波形
c: SMAC-B2型強震記録を本システムで数値化した波形

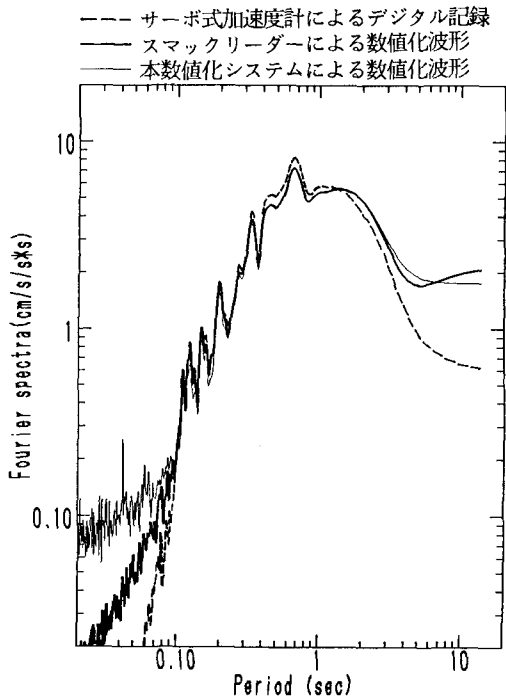


図9 サーボ式加速度計によるデジタル記録, SMAC-B2型強震記録をスマックリーダーで数値化した波形, 及び同記録を本システムで数値化した波形の加速度フーリエスペクトル

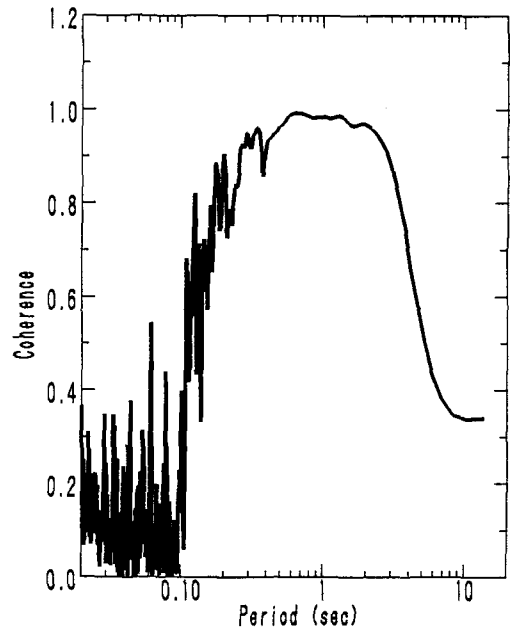


図10 サーボ式加速度計によるデジタル記録とSMAC-B2型強震記録をスマックリーダーで数値化した波形のコヒーレンス

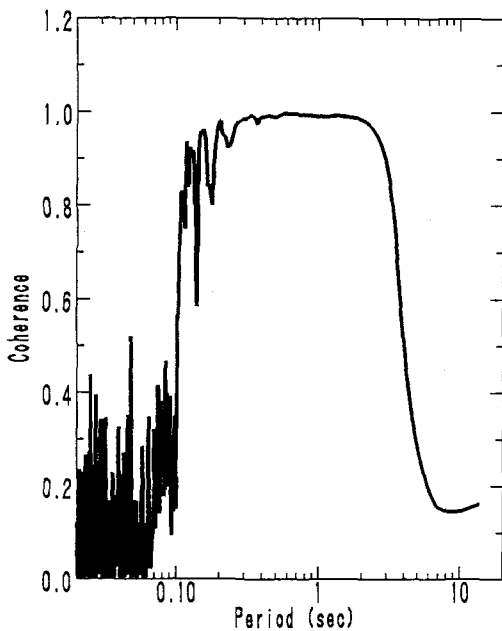


図11 SMAC-B2型強震記録をスマックリーダーで数値化した波形と同記録を本数値化システムで数値化した波形のコヒーレンス

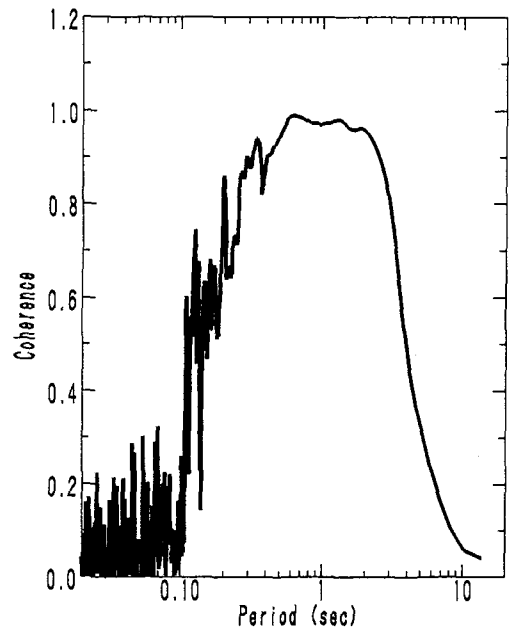


図12 サーボ式加速度計によるデジタル記録とSMAC-B2型強震記録を本数値化システムで数値化した波形のコヒーレンス

図1 1は(b)-1の波形と(c)-1の波形のコヒーレンスを示している。この図は読み取り方式の違いを比較した図といえる。0.2～3秒程度までコヒーレンスの値はほぼ1で、この区間では読み取り方式の違いは見られない。(a)-1の波形と(c)-1の波形のコヒーレンスは図1 2のようになる。図1 0に比べ周期0.2秒以下でコヒーレンスの低下はやや大きい、ほとんど違いはない。結局、本数値化システムによる記録は従来のスマックリーダーによる記録に比べ周期0.2秒以下で精度がやや低下するものの、同等の精度を有するものと判断できる。

5. むすび

パソコンとイメージキャナを用いて、強震記録を簡単に数値化・解析するシステムを開発した。このシステムは、パーソナルコンピュータ上で数値化・補正解析・波形解析・図形処理が行えるために簡便で実用的である。SMAC-B2型強震記録の尾部(基線)を数値化・補正解析したところ、最大で3 gal程度の誤差が読み取りから零基線補正までの過程で発生しうることが判明した。デジタルデータレコーダを用いた精度の高い加速度記録、SMAC-B2型強震記録を従来のスマックリーダーで数値化したもの、および同じ記録をこのシステムによって数値化したものをコヒーレンス解析したところ、従来の数値化手法と同等の精度で数値化することができ、本システムが実用上十分な精度を持つことが確認できた。数値化に要する時間は40秒間の記録で約1時間であり、強震記録の数値化の簡便化が実現できたものと考えられる。

【謝辞】

本研究は文部省科学研究費補助金(課題番号:63890009及び63750596)によった。イメージデータをベクトルデータに変換するためのプログラムは(株)クラボウにより作製されたものである。用いた強震記録の一部は東京理科大学森地重暉教授より提供されたものである。数値化・解析の一部は東京工業大学大学院生亀谷孝君によるものである。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 年繩 巧, 大町 達夫, 翠川 三郎, 中村 豊: パソコンとイメージキャナを用いた強震記録の数値化システム, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要, 1, pp.1058-1059, 1990.
- 2) 乗原 徹郎, 佐々木 康, 吉見 精太郎: 強震記録自動数値化装置について, 第20回地震工学研究発表会講演概要, pp.173-176, 1989.
- 3) 井合 進, 倉田 栄一, 土田 肇: 強震記録のデジタル化と補正, 港湾技研資料No.286, pp.34-35, 1978.
- 4) Ohsaki, Y.: Correction of earthquake accelerogram, Research Report 72-01, Department of Architecture of Engineering, University of Tokyo, 1972.
- 5) 中村 豊: 地震計の特性変換による地震動記録波形の微分, 積分および特性補正, 鉄道技術研究報告 第1315号, 1986.
- 6) 後藤 尚男, 亀田 弘行, 杉戸 真太, 今西 直人: デジタルフィルターによるSMAC-B2加速度記録の補正について, 土木学会論文報告集, No.277, pp.57-69, 1978.
- 7) Shakal, A. F. and Ragsdale, J. T.: Acceleration, velocity and displacement noise analysis for the CSMIP accelerogram digitization system, Proc. of 8th WCEE, pp.111-118, 1984.
- 8) 土岐 憲三, 澤田 純男, 中瀬 仁, 杉山 和久: SMAC強震記録の長周期成分の補正法について, 京都大学防災研究所年報第30号, B-2, pp.19-26, 1987.

(1990年10月12日受付)