

## 電子計算機による強震記録の読み取り (第3報)

矢 崎 忍\*

国立防災科学技術センター

### Digitizing of Strong-Moting Earthquake Records by Computer (III)

By

**Shinobu Yazaki**

*National Research Center for Disaster Prevention, Japan*

#### Abstract

An automatical SMAC record digitizing system with a-drumscanner-and-a-computer system has been developed in NCRDP.

Efforts have been made especially to shorten the processing time and to improve the accuracy of the digitized values.

With the new system a sheet of record including three components, 25 cm in length, is processed within 10-20 minutes. Several times of trial digitization of a record have revealed that the accuracy of the digitized values is aroues is around 0.03 mm in the sense of mean square error.

#### 1. はじめに

国立防災科学技術センターでは、主に SMAC 強震計を対象として画像化された強震記録を画像入力装置(ドラムスキャナー+A/D変換器)と電子計算機を用いて数値化するシステムを開発してきた(渡辺ほか, 1974; 諸星, 1976).

従来のシステムのいくつかの点を改良し、実用化に耐えるシステムとした。主な改良点の一つは、計算機による処理時間を大巾に短縮したことである。デジタル画像処理の一般的な難点としてデータ量の膨大さによる処理時間の長大性があるが、この点に関しては処理対象の特性を考慮しデータ量を圧縮するとともに、走査-入力と演算処理の並行化を導入するなどして高速化をはかった。もう一点は数値化の精度の向上をはかったことである。特に最近記録計自体の小型化により記録感度が小さくなる傾向があり、高精度の読み取りが要求されるようになってきている。そこでソフトウェアによる精度の向上をはかった。

## 2. システムの概要

システムのハードウェア構成を図1に示す。ここで RTP と記したのはリアルタイム処理装置と呼ばれるもので、マニュアル入出力装置や、アナログ入出力等の実時間で作動する入出力装置とマルチジョブを行なう汎用計算機をつなぐ装置である(勝山ほか, 1979)。

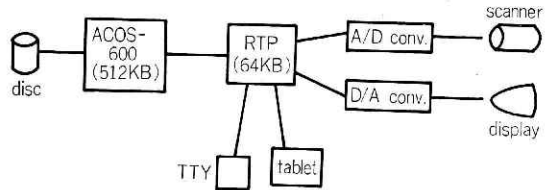


図1 システムのハードウェア構成  
Fig. 1 Configuration of the hardware system.

処理全体の手順を図2に示す。以下各項目ごとに述べる。

### 2.1 読み取り画像の作製

原記録を、ドラムに装着して読み取る画像を作製する。原記録は記録計の型によって種々の形態をしている。SMAC-B のようにろ紙に書かれているものは取り扱いに便利のように写真フィルムに転写する。SMAC-E のように低感度記録されたものは、適当に引き伸ばしをしたほうが数値化の精度がよくなる。また記録の大きさがスキャナーのドラムの有効画角を超えるときは、互いに適当な重りを持たせて分割して作製する必要がある。

### 2.2 走査

走査系の仕様を表1に示す。送りピッチは通常記録時間相当地で0.01秒に最も近いものを選んでいる。走査系の出力はRTPを通して直接ACOS-600に送られ、ACOS-600では送られて来たデータをそのまま、あるいは一部処理をした後磁気ディスクに書き込む。

### 2.3 線座標の検出

走査により得られるデータは、2次元のいわゆる画像データである。我々の対象とする強震記録の場合、画像としては線図形であるから、画像データから線位置の座標の集合へデータ構造を変換することにより、データ量をいちじるしく圧縮することができ、以後の処理の高速化に有効である。

線座標は以下のようにして求めている。読み取り画像は本来白黒の2値画像であるが、検出光学系の口系による平均効果のため濃度読み取り値は平滑化されている。したがって読み取り濃度の極大を与える位置を線の中心として検出することができる。この際、サンプリング格子による量子化の誤差をさけるため、格子点上のサンプリング濃度値を適当な連続関数で補間してこの関数の極大点を実数として

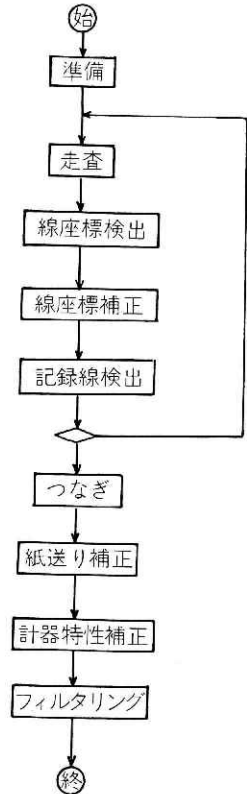


図2 処理の手順  
Fig. 2 Digitizing process.

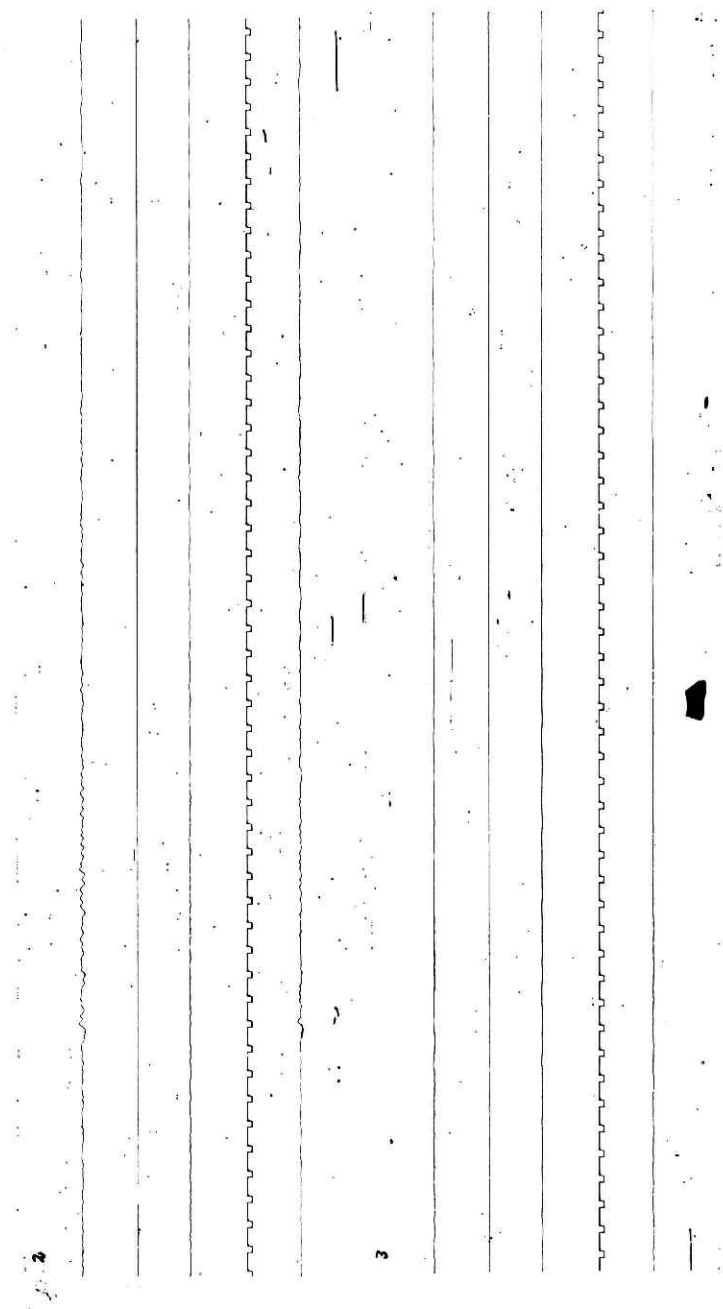


図 3 SMAC-E の記録例  
Fig. 3 An example of image recorded by SMAC-E.

表 1 走査系 (ドラムスキャナー+A/D 変換器) の仕様  
 Table 1 Specification of the drumscanner-A/D converter system.

有効画角	430 mm (走査方向) × 280 mm (送り方向)
ドラム回転速度	300 rpm
回転信号	1パルス/1回転
サンプリングサイズ	0.08 mm
送りピッチ	0.05, 0.1, 0.2 および 0.4 mm
解像度	8 bit/最大濃度差

求めている (図 4). すなわち, 走査方向の距離  $y$  の関数として濃度  $z(y)$  を, 極大濃度を与える格子点 (図で  $y_2$ ) を中心とする前後3点 ( $y_1, y_2, y_3$ ) の濃度読み取り値 ( $z_1, z_2, z_3$ ) からここでは次式で補間し, 線の中心座標  $y_c$  を

$$y_c = y_2 + \frac{\Delta y}{2} \cdot \frac{z_3 - z_1}{2z_2 - z_3 - z_1} \quad (1)$$

により求めている. ここで  $\Delta y$  はサンプリング間隔で, 我々のシステムの場合 0.08 mm である.

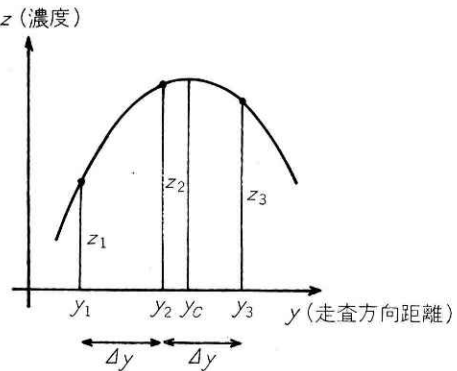


図 4 線中心位置の検出  
 Fig. 4 Estimation of the position of the line center.

#### 2.4 線座標の補正

2.3 で求めた座標に対して次の3つの補正をこの順序で行う.

##### (1) 走査系の機械的誤差の補正

スキャナーの機械的誤差は, ドラムの回転誤差と検出部 (光学台) の送りの誤差が合わさっている. 前者は我々の現在の機械がドラムの回転と A/D 変換サンプリングとの同期式であるため, ドラムの回転速度のムラが検出位置の誤差として現われてくるものである. この誤差成分はほとんどすべての周波数上にほぼ一様に現われ, またその大きさはドラムの先端 (回転パルスが発生する位置) からの距離に比例している. これに対して後者は波長 5 mm の線スペクトルとして現われ, 大きさはドラム上の位置によらず一定である. このように誤差成分は各周波数成分毎にドラム上の位置への依存が異なるため, 補正はドラム上の一端に引かれた直線の読み取り値にドラム上の位置の関数であるフィルターをかけることによって行っている. すなわち補正のための直線の読みの Fourier 変換  $F_0(f)$  とドラムの先端  $y$  mm からの位置における補正值の Fourier 変換  $F_y(f)$  との間に

$$F_y(f) = A(y, f) \cdot F_0(f)$$

の関係を保定している. ここでフィルター  $A(y, f)$  の具体的な形は, 補正のための直接と  $y$  mm の位置においた直線の多数回の読み取りの各周波数成分毎の相関から統計的に決めている.

(2) 装着誤差の補正

記録紙をドラムに装着する際の傾きの補正であり、座標回転で現わせる。すなわち走査格子座標  $(x, y)$ 、記録の時間軸の傾き  $\theta$  から

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる。

(3) 円弧補正

記録時の円弧描きを直交座標に変換するもので、円弧半径を  $r$  として 2) の補正後の座標  $(x', y')$  から

$$\begin{cases} t = x' + r \left( \sqrt{1 - \left( \frac{y'}{r} \right)^2} - 1 \right) \\ a = r \sin^{-1} \left( \frac{y'}{r} \right) \end{cases} \quad (3)$$

によって  $t$  時間および振幅座標  $a$  に変換される (図 5)。

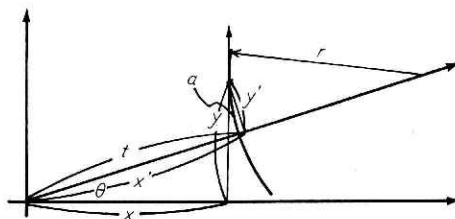


図 5 度標変換  
Fig. 5 Coordinate transformation.

2.5 記録線の検出

読み取り画像は必ずしも非常に鮮明とは限らない。すなわち記録以外のシミがあったり、記録線が途切れている部分があったりする。そこでこのようなノイズを含んだデータから記録線を抽出する処理が必要になる。この部分の処理については、計算機アルゴリズムによる自動検出とディスプレイ装置を使ったマンマシン方式の修正処理とを併用している。

(1) 自動検出

自動検出のアルゴリズムの概略は次のとおりである (図 1)。

i) 時間座標について記録時間相当で 0.01 mm の格子間隔で量子化する。

ii) 隣接する時間軸格子線上の 2 点の振幅座標の差が一定値  $\delta$  以下のとき、それら 2 点を連続と判断し、 $n$  個の点が互いに連続なときその点列を線成分と判断する。

iii) 同一時間軸区間に線成分が一つだけしかないとき、その線成分を記録線の一部と判断する (図 6 の ① の部分)。

iv) iii) で決まった区間の両端から連続性をたどる (図 6 の ②)。

v) 小区間の欠落は直線で内挿する (図 6 の ③)。

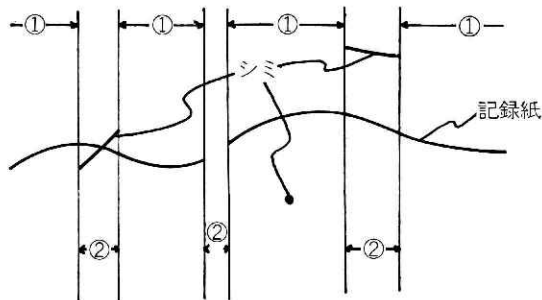


図 6 記録線の検出  
Fig. 6 Detection of the record line.

上記中、実数  $\delta$  と  $n$  はプログラムのパラメーターとして画像の画質や記録の波形に応じて適当な値を与えている。i)~v) の判断で未決定な区間は未決定のまま残しておく。

## (2) マンマシン方式による修正

(1) の処理の結果は直ちにディスプレイ管上に表示される。オペレーターは表示された波形と原記録を見比べて (1) の処理で未決定のまま残された部分や誤判断の部分があれば、タイプライターまたは座標入力装置 (ダブルレット) を用いて種々の修正指示ができるようになってきている。

## 2.6 つなぎ

記録が2枚以上に分割して作られているときは、各々について数値化した後つなぎ合わせる。つなぎの際の位相合わせは、まずタイマー線で合わせ、それから各チャンネルの波形を合わせる。このとき、画像作成の際の等光学系の収差により波形同志が滑らかにつながらない場合がある。こういう場合は便宜的に各分割波形ごとに適当な変形を加えている。つなぎの処理も、自動処理とマンマシン方式を併用している。

## 2.7 紙送り誤差の補正

記録時の記録紙の送りの誤差を補正するものである。送りの誤差には、送り速度のムラと送りの蛇行がある。送り速度の補正は時間軸の変換である。変換は線型補間により行なっている。この場合の補正の情報はタイマー線の読み取りパルス間隔から得られる。一方、送りの蛇行は低周波誤差として現われる。したがって補正の情報は直線の読み取り値の低周波成分として得られるが、タイマー線も本来は低周波成分を含まないから、タイマー線の読み取り値からも得られる。ここでは、処理量の節約のためタイマー線の読みから補正值を得ている。低周波成分のとり出しは、ここでは時間の低次式による回帰により行なっている。

## 2.8 計器特性補正

強震計の記録値から入力加速度への変換である。SMAC 強震計の場合はすべて単振子であるから、フィルター

$$A(f) = 1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 2ih\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (4)$$

により変換される。ここで固有振動数  $f_0$  および減衰定数  $h$  はSMAC の各型毎に決った値を持っている。

## 2.9 フィルタリング

フィルタリングは次節で述べる読み取り値に含まれる種々の誤差による低周波および高周波成分を取り除くために行なう。しかし、現時点ではフィルターの具体的な形については十分検討していないので、便宜的に各記録ごとに原記録と見比べて適当なフィルターをかけている。フィルターについては、4. で述べる速度・変位の推定とも関連して今後さらに検討する予定である。

### 3. 数値化の精度

数値化された値に含まれる誤差は大きく次の4つに分けられる。

- i) 記録計自体による誤差 (周波数特性, 紙送り誤差等)。
- ii) 記録の処理過程で現われる誤差 (コピー, 引き伸ばし時のレンズ系の収差など)。
- iii) 走査系の機械的誤差。
- iv) 計算機処理過程の誤差。

ここでは我々の数値システムの精度を評価するために, iii) と iv) について検討する。検討にあたって直線および実際の強震記録を同一の画像につきそれぞれ数回数値化した。読み取りはいずれも 205 mm の長さを 0.1 mm ピッチで走査し, 記録感度を 10 gal/mm, 0.1 秒/mm として数値化した。

直線の数値化は, 2本の直線 (定規で引いたもの) をドラムの先端付近 (a) と後端付近 (b) において行なった。数回の試行でいずれも同様の結果を得たのでそのうちの一つについて数値の時間領域および周波数領域でのプロットを図7, および図8に示す。時間領域でみると a では最大誤差 0.7 gal (画像上で 0.07 mm), 標準偏差 0.16 gal (同 0.016 mm), b ではそれぞれ 1.3 gal (0.13 mm), 0.3 gal (0.03 mm) であった。周波数領域で見ると, a, b ともに i) 約 0.2 Hz (画像上で波長 50 mm), ii) 2 Hz (同 5 mm) にピークが見られる。i) には読み取り直線そのものの誤差がかなり含まれていると考えられる。ii) はスキャナーの特性によるものである。他の成分についてはほぼ一様に分布している。

一方実際の強震記録の数値化は, 同一の画像をドラム面への装着からやり直して  $N$  回 (ここで

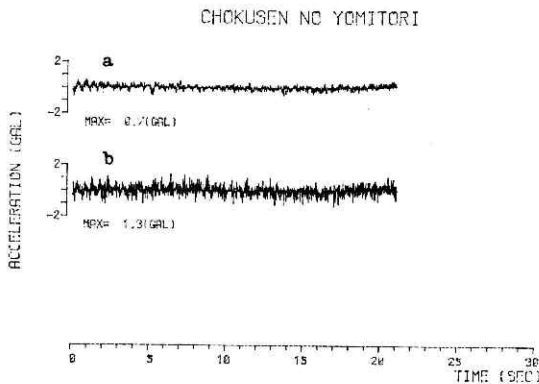


図7 直線の読み取り例  
Fig. 7 Digitization of a straight line.

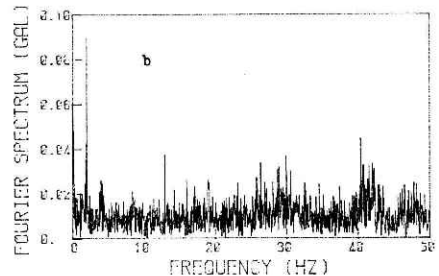
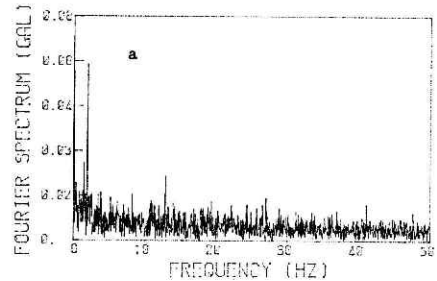


図8 図7の Fourier スペクトル  
Fig. 8 Fourier spectrum of what is shown in Fig. 7.

は5回)行なった。各試行による数値を  $x_k(t)$  ( $k=1, N$ ) とし、各  $x_k(t)$  は 0 Hz 成分を除いた後時間領域で差の2乗積分=最小の条件で位相を合わせた。図9に各  $x_k(t)$  の一部を、また図10に平均波形  $\bar{x}(t) = \left( \sum_{k=1}^N x_k(t) \right) / N$  を示す。誤差の大きさを評価するためには誤差のパワースペクトル度を推定するのがよい。なぜならばその積分(グラフの面積)が周波数区間上の誤差の大きさを与えるからである。 $x_k(t)$  および  $\bar{x}(t)$  の Fourier 変換  $F_k(f)$ ,  $\bar{F}(f)$  から誤差の Fourier スペクトルを

$$V(f) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |F_k(f) - \bar{F}(f)| \quad (5)$$

で定都し、パワースペクトル密度は Fourier スペクトルの2乗の適当な平滑化によって求めた(ここでは、幅 1 Hz の重みつき移動平均をとった)。すなわち、

$$Q(f) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} |F(f')|^2 D(f-f') df' \quad (6)$$

$$D(f) = \frac{1}{\lambda\sqrt{\pi}} e^{-(f/\lambda)^2}, \quad 2\lambda = 1 \text{ Hz} \quad (7)$$

図 11 に平均波形および誤差のパワースペクトル密度を示す。図から 2 Hz の成分が約  $0.01 \text{ gal}^2 = (0.1 \text{ gal})^2$  (画像上での標準偏差 0.01 mm), 10 Hz 以上の成分が約  $0.022 \text{ gal}^2 = (0.15 \text{ gal})^2$  (同 0.015 mm), 全周波数上では約  $0.05 \text{ gal}^2 = (0.22 \text{ gal})^2$  (同 0.02mm) が読みとれる。

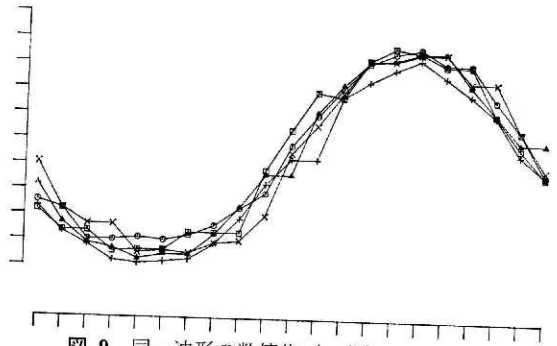


図 9 同一波形の数値化(一部)  
Fig. 9 Trial digitizations of an image (a part).

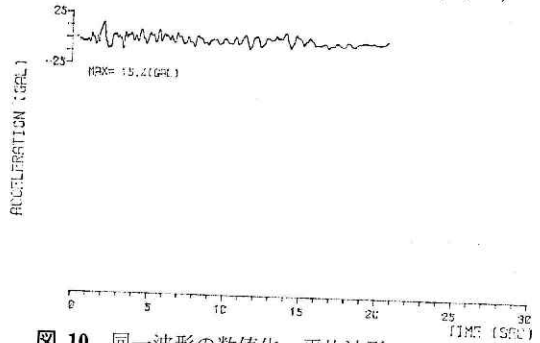


図 10 同一波形の数値化—平均波形  
Fig. 10 Average values of the trial digitizations of an image.

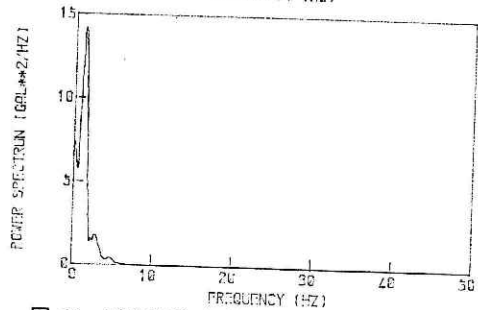
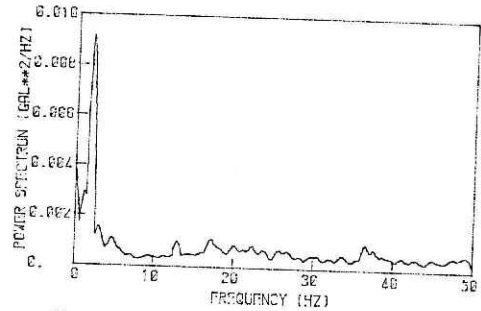


図 11 平均波形(下)および誤差(上)のパワースペクトル  
Fig. 11 Power spectra of the average values (lower) and the error (upper).



#### 4. おわりに

当センターでは、今後強震記録が得られ次第、これを本方式により適宜数値化して刊行していく予定である。すでに「1978年1月伊豆大島近海の強震」および「1978年6月宮城県沖地震」の強震記録の数値は「強震記録数値集(第1集)」(防災科学技術資料第40号, 国立防災科学技術センター, 1979)として発行されている。「数値集」には、数値化された加速度値のほかに、加速度を用いて計算したいくつかの基本的な解析の結果のグラフを付する予定である。すでに発行した「第1集」には、Fourier スペクトル, 3種の応答スペクトル, およびランニングスペクトルを載せてある。「第2集」以後には、これらの他に速度および変位の推定波形を載せることを予定している。なおこれらの解析の定義・計算方法は十分確定していないので、それぞれの「数値集」にその都度記述する予定である。

今回は、主に計算機処理の高速化と数値の高精度化に重点をおいてシステムの改良を行なった。そして両方の面で、現在のハードウェアシステム下での原理的な限界近くまで達したと思われる。今後の問題としては、処理時間の面では、現在単なるデータ転送用の端末として用いられている RTP に演算処理の一部を担わせることにより、汎用計算機の負担を少なくすること、また精度の面では、スキャナーを現在の回転同期サンプリング方式から非同期方式に改造することにより、さらに精度の向上をはかること、などが残っている。これらの問題は、近く順次取り組まれる予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 井合 進・倉田栄一・土田 肇 (1978): 強震記録の数値化と補正. 港湾技研資料 No 286.
- 2) 国立防災科学技術センター (1979): 強震記録数値集(第1集)——1978年1月伊豆大島近海の地震——, 1978年6月宮城県沖地震——, 防災科学技術研究資料第40号.
- 3) 勝山ヨシ子・御子柴正・矢崎 忍・諸星敏一 (1979): 災害・防災情報の自動計測のための基本ソフトウェアシステムの開発. 国立防災科学技術センター研究報告, 第22号.
- 4) 諸星敏一 (1976): 電子計算機による強震記録の読み取り, 国立防災科学技術センター研究報告, 第16号, 29-45.
- 5) 渡辺一郎・勝山ヨシ子・尾崎睿子・福井隆文: 電子計算機による強震記録の読み取り, 国立防災科学技術センター研究報告, 第9号, 11-31.

(1979年6月19日 原稿受理)