

## 微小地震の自動検出方法について(第3報) - 自動検測の試み -

|     |                                                                                           |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 著者  | 渡辺 一郎, 菅原 正己, 福井 隆文, 勝山 ヨシ子                                                               |
| 雑誌名 | 国立防災科学技術センター 研究報告                                                                         |
| 巻   | 15                                                                                        |
| ページ | 33-47                                                                                     |
| 発行年 | 1976-01                                                                                   |
| URL | <a href="http://doi.org/10.24732/nied.00000726">http://doi.org/10.24732/nied.00000726</a> |

## 微小地震の自動検出方法について (第3報)

——自動検測の試み——

渡辺 一郎\*・菅原 正巳\*\*・福井 隆文\*\*\*・勝山 ヨシ子\*\*\*

国立防災科学技術センター

### Automatic Detecting Method for Micro-earthquakes (III)

By

I. Watanabe, M. Sugawara, T. Fukui and Y. Katsuyama

*National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo*

#### Abstract

The present report describes a method of automatic determination of arrival times of  $P$  and  $S$  waves, the maximum amplitude, and the duration time of the earthquake, by means of computer.

Assuming that the power spectra of the time series of background noises are stationary, when the non-stationary state continues for more than a preset time, the data is judged to contain an arriving seismic wave. Whether the time series are stationary or not, the judgement is based on the power spectra estimated by fitting an autoregressive model to the time series.

Since an envelope of the seismic record is approximately expressed by the incomplete integral of the absolute value of the seismic wave, a rapid change of the gradient of the incomplete integral indicates an arriving  $P$ -wave. To decide the specific point indicating  $P$  arrival, the pattern matching is carried out between this incomplete integral and the connected segment which consists of two or three segments. The turning-point between the  $P$  arrival and the maximum point of this incomplete integral is taken as the arrival point of  $S$ -wave. A pattern matching similar to that of  $P$  arrival was used to determine such a turning-point.

The present method was tested for the observation of micro-earthquakes at the deep borehole observatory, the Iwatsuki Crustal Activity Observatory near Tokyo. The difference between the calculated arrival time of  $P$ -wave and that by eye inspection on the record of the pen recorder is less than  $\pm 0.2$  sec for 15 among 25 earthquakes arbitrarily selected.

The present method is, however, not satisfactory at the present stage for the relatively small-amplitude seismic wave.

---

\* 第3研究部

\*\* 前国立防災科学技術センター所長

\*\*\* 第3研究部計測研究室

## 1. はし が き

この報告は当センターの岩槻地殻活動観測施設（地表下 3,500 m に設置された高感速度型地震計、固有周波数 1 Hz, 10 Hz で 100 万倍の記録をしている）で観測されるデータ（以下岩槻データと略称する）から、計算機を用いて地震波を自動検出しようとする仕事の一部であり、図 1 の点線で囲んだ部分についておもにのべる。菅原正巳ほか（1974）は、地震とノイズの周波数特性の違いを用いて検出するという全体の考え方、方向を示した。いろいろな帯域フィルタ特性を持ったアナログ回路をいくつか並列に並べ、地震を含むところを検出することにして数値実験を繰返し、問題点を摘出した。渡辺一郎ほか（1975-1）は菅原ほか（1974）の方法により地震らしいと判定された第 1 次抽出データについて地震ごとの周波数分布の違い、ある地震の継続時間中の周波数変化にもとづく第 2 次検出の考え方の方向を示した。

現在菅原ほか（1974）において述べたアナログ装置、すなわち図 1 の第 1 次検出をアナログ的に行う装置は試作中であるので、今回はこの部分に相当する所も計算機の中でディジタル計算によって実施した。この報告では、上記の第 1 次検出によって編集された、全体の量からみて 1/10 ぐらいになったディジタル磁気テープを用い、地震  $P$  波到達時刻、 $S$  波到達時刻、継続時間、最大振幅などの読み取りを行う自動検出について述べる（検出は地震の部分拾い出すこと、検出は地震動の到達時刻とか最大振幅などを測定することを指すものとする）。

$P$  波到達時刻の精度がまだ十分でないのが問題であるが、後述の表 1 で示すように、地震と思われるものはほとんど 100% 検出し、しかも、このうち観測者がペン記録紙から目測で読みとった 25 個の約 60% について、 $P$  波到達時刻を精度  $\pm 0.2$  秒以内そして約 80% を  $\pm 0.5$  秒以内の精度で求めることができた。今回のデータは 1974 年 3 月、4 月という古い記録からとったので、最大振幅の読みとり単位が不明でありこれ以上の評価はできない。なお一層の改良の必要があるが、取りあえず自動検出の試みとして報告するものである。

## 2. 方法の概略（図 2）

一続きのデータのなかで、データを 1 個ずつずらしながら小区間をとり (25 ms ずつずらし

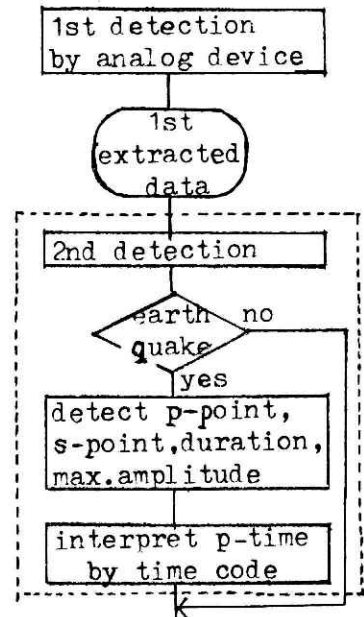


図 1 微小地震の自動検出の全体図  
 Fig. 1 Total block diagram for the automatic detection of micro-earthquakes

ながら 10 秒間,したがって標本数 400 個),データの周波数軸上での特性をみて行く.ノイズのときの周波数特性と違うパターンが出て来たらそれは地震らしいと判断する.

もともと周波数分布の形を細かく知るのが目的ではなく,地震か地震でないかを判断するのが目的であるから,周波数特性の表現の方法としては,周波数分布の形を表わす 1 個か 2 個の特性値を用いて区別することを考える.

なお,AD変換後のデータ(以下ソースデータと略称する)をそのまま使うと,大きな地震ではパワーがノイズより大きいので問題ないが,小さな地震では時間軸でみて 1 Hz 以下の低周波ノイズの上に乗っている様なものであるから,ノイズ部分のパワーが大きくて時間軸上,周波数軸上のどちらでも判別しにくい(図3,図4).そこで 1 Hz 以下の低周波ノイズを落し,(今回は 40 Hz でサンプリングしているので,20 Hz 以上の高周波はすべて無視することになっている),地震波の帯域では平らである様なデジタル・バンドパス・フィルタを通して,前処理しておくこととした.

周波数分布の形を表わす特性値の決め方としては次の様に考えた.バンドパス・フィルタを通した時系列データに自己回帰モデルを当てはめてみる.すなわち,

$$0 \text{ 次ならば } X(n)=\epsilon(n)$$

$$1 \text{ 次ならば } X(n)=AA \cdot X(n-1)+\epsilon(n)$$

$$2 \text{ 次ならば } X(n)=BA \cdot X(n-1)+BB \cdot X(n-2)+\epsilon(n)$$

とする.ただし  $\epsilon(n)$  はホワイトノイズである.

FPF 法(赤池,中川 1972 年)の考えにより,平均 2 乗誤差を最小にする方法で係数を決

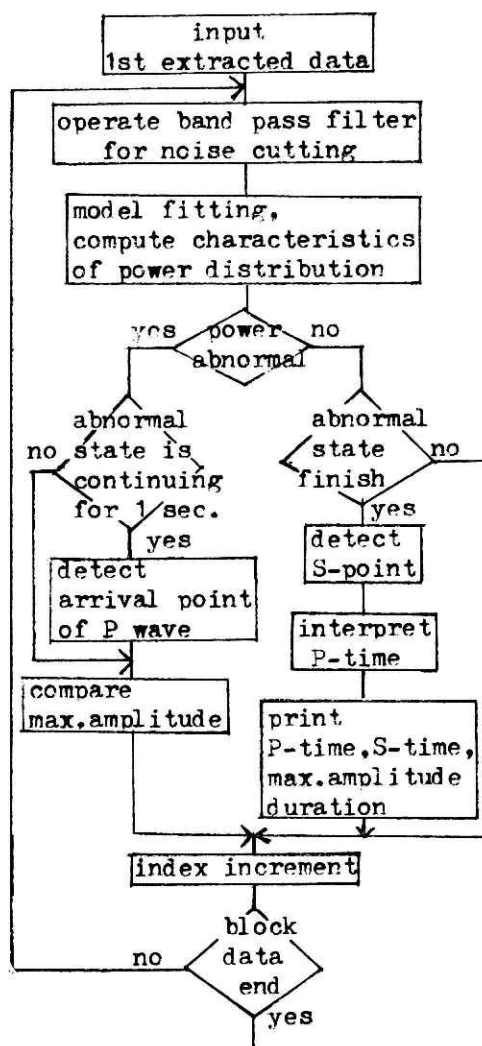


図2 微小地震のP波, S波到達時刻, S-P 時間, 震動継続時間, 最大振幅の自動検出のブロック図

Fig. 2 Block diagram for determination of the arrival times of P and S waves, S-P time and duration time of micro-earthquakes

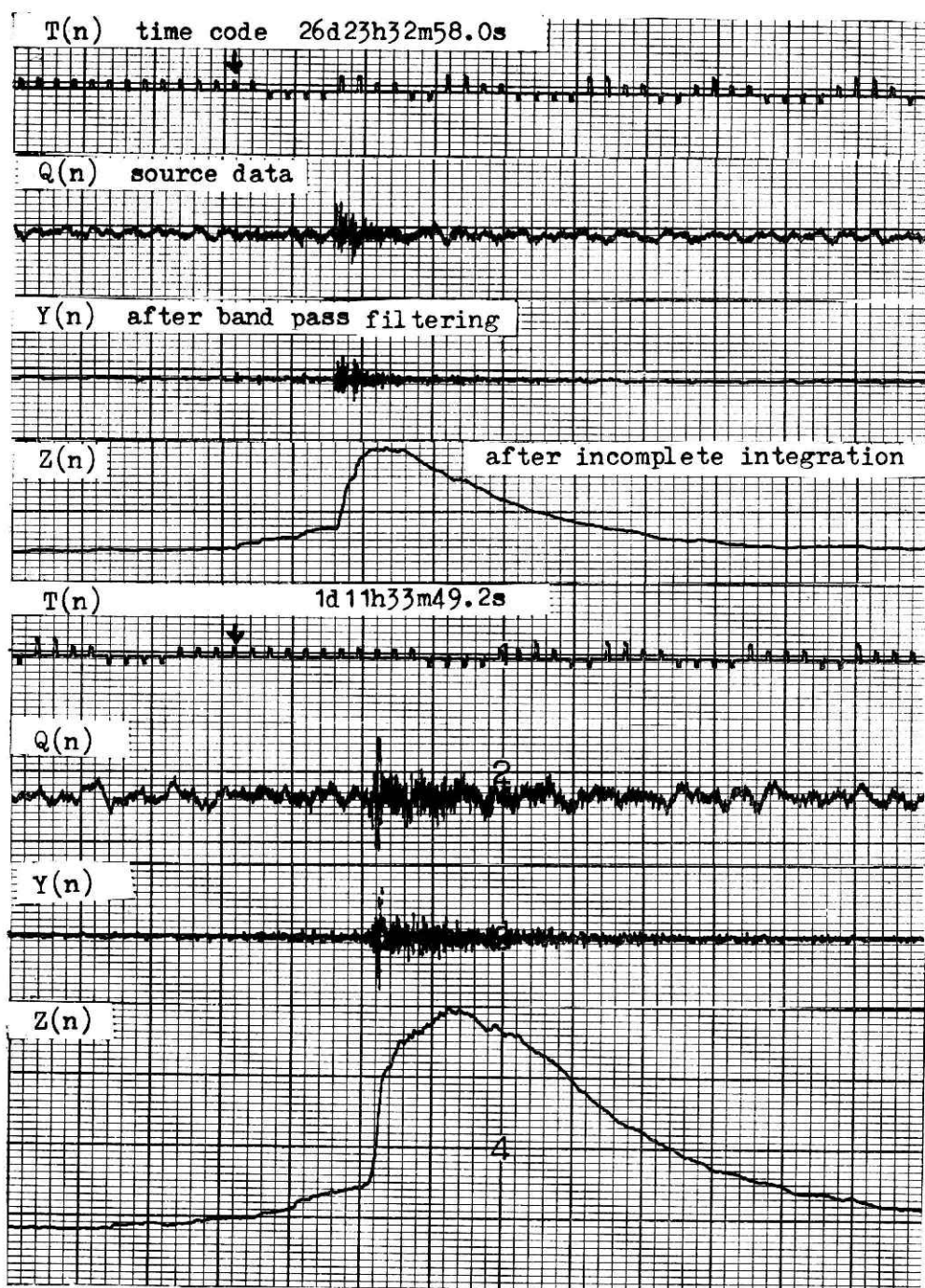


図 3 ソースデータと計算中間値の波形  
Fig. 3 Examples of source and intermediate data

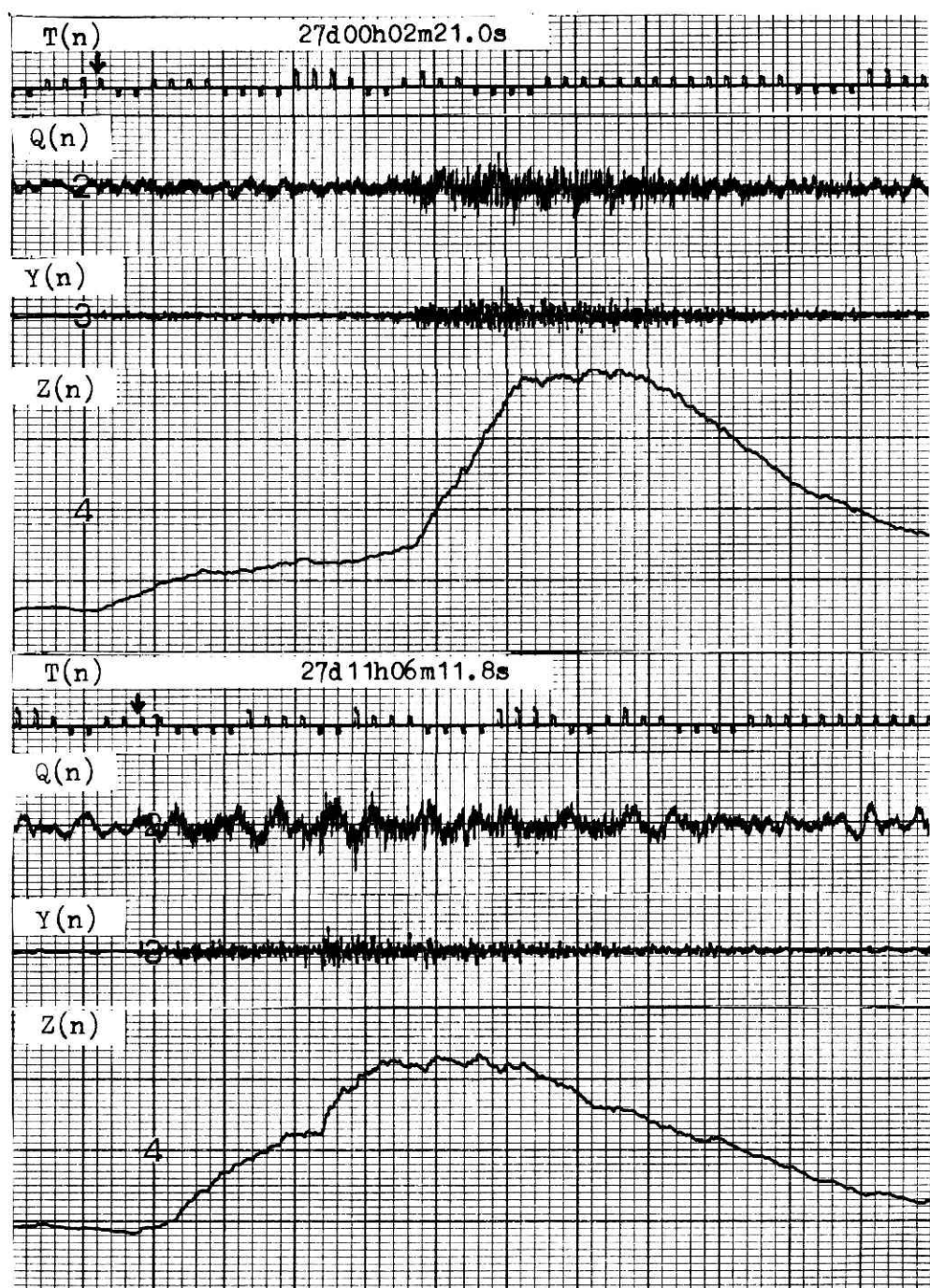


図 3 ソースデータと計算中間値の波形  
Fig. 3 Examples of source and intermediate data

め、同時に誤差の推定値が最小になる様な次数 ( $m=0, 1, 2$ ) を探す。  $m \leq 2$  としたのは地震の判別のためには経験的にこれで十分であるとわかったからである。この係数  $AA, BA, BB$  によりパワースペクトルの形が決まるから、この係数の値によって時系列が定常状態か定常でない状態かを判別する。そしてデータをずらして小区間をとりながら定常でない状態(異常状態)が1秒間続いた時、最後にとった小区間の中に地震波を含んでいると想定して、改めてこの区間の中で地震波到達点を探す。そのやり方は次のとおりである。

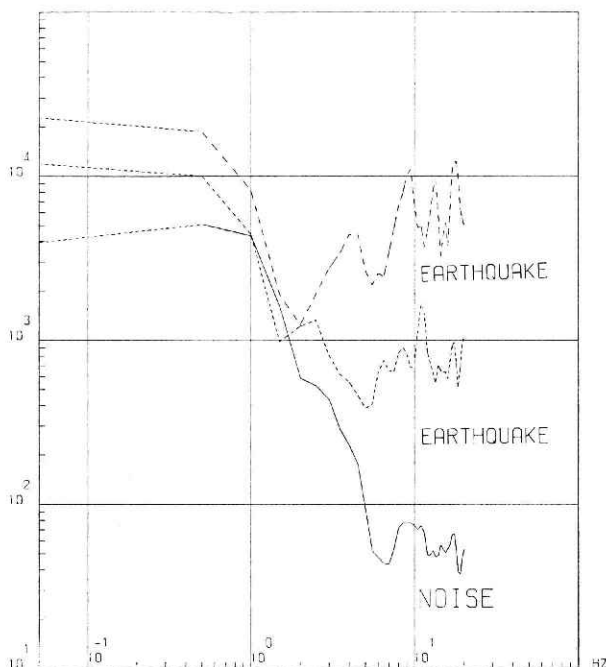


図 4 ソースデータのパワースペクトル  
 Fig. 4 Power spectra of source data

地震波の主帯域を通すバンドパス・フィルタをかけた結果 ( $Y(n)$ ) の絶対値を不完全積分し、その結果の値 ( $Z(n)$ ) を一種の包絡線と考えて、この包絡線の勾配が変化する所を、包絡線と折れ線とのパターン・マッチングを用いて探す。マッチングの度合がある割合より大きい時に、この折れ線の折れ点を地震  $P$  波到達点とする。マッチングの度合が低いときはさらに1秒間計算を続行して(すなわち時間軸上で時間の進む方向にずらして)同じ様に探すが、マッチングの度合がよくなならないうちに地震波が終ってしまったら(すなわち時系列が定常状態にもどったら)  $P$  波到達点不明という表示にする。

$P$  波到達点が決まった場合、次のようにして  $S$  波到達点を探す。  $P$  波到達点から包絡線  $Z(n)$  が最大値を取る点までの間で  $Z(n)$  の曲りかどの点を探す。これも2線分の交点を見つけるという簡単な方法を用いる。2線分がほとんど同じ勾配を持つ時は  $S$  波到達点不明とする。

時系列が異常状態から定常状態にもどった点を地震波の終りとみて、  $P$  波到達点からの継続時間を求める。  $P$  波到達点、  $S$  波到達点などの決まったものに対しては、時計コードを用いて時刻を読みとる。

### 3. データの前処理

図3に示す様にソースデータは1 Hz以下の低周波ノイズの影響が大きく、小さな地震は

この低周波にのっている高周波ノイズという形をしている。また図4に示すように地震、ノイズともに 1Hz 以下の帯域のパワーが大きい。ほとんどの地震波の主帯域は 3~6Hz であるが、小さな地震波では 3~6Hz あたりのパワーがノイズの 1Hz あたりのパワーより小さい。したがって、後の処理すなわち周波数特性を用いる判定のためには非常に不便である。そこでなんらかの前処理を行う必要がある。これには次の方法が考えられる。

- 1) 地震波の帯域を通すバンドパス・フィルタを通しておく方法
- 2) 地震でない部分をプリホワイトするようなデジタル・フィルタをかける方法

### 3.1. バンドパス・フィルタによる前処理

バンドパス・フィルタには次のものを用いた。

$$\{X(t)\} = \left( \frac{s}{s + (1/TA)} \right)^2 \{Q(t)\} \quad (1)$$

$$\{Y(t)\} = \frac{1}{(s + (1/TB))^2 + (2\pi \cdot FR)^2} \{X(t)\} \quad (2)$$

ここに  $Q(t)$  はソースデータ、 $Y(t)$  が処理済みデータで、 $s$  は微分演算子、(1) は低周波を除くための不完全微分 2 回、(2) は高周波を除くための 2 次遅れ系である。

これを時系列の計算方式によって表現すると

$$DLA = 2/(1 - DT/TA)$$

$$DLB = 1/(1 - DT/TA)^2$$

$$A = 2 \cdot \exp(-DT/TB) \cdot \cos(2\pi \cdot FR \cdot DT)$$

$$B = -(\exp(-DT/TB))^2$$

$$X(n) = X(n-1) \cdot DLA - X(n-2) \cdot DLB + (Q(n) - 2 \cdot Q(n-1) + Q(n-2)) \cdot DLB$$

$$Y(n) = Y(n-1) \cdot A + Y(n-2) \cdot B + X(n)$$

となる。常数として次の値を使った。  $TA = 0.1$  sec,  $TB = 0.01$  sec,  $FR = 10.5$  Hz,  $DT = 0.025$  sec, 図5はこのバンドパス・フィルタのゲインである。

このバンドパス・フィルタはいろいろの所で使われている。たとえば表示装置に出力して見る時、ソースデータのまま出力すると時間軸をかなり拡大しないと地震の識別が困難であるが、このバンドパス・フィルタを通しておけば  $S/N$  が改善され見やすくなる。さらに極低周波のものを除けば地震波の主帯域の所でゲインが平らであるから一般的にどこにも通用するフィルタである (渡辺ほか 1975-2)。

### 3.2. プリホワイトによる前処理

第1次抽出されたデータには、一続きのデータの最初の部分に、すなわち地震波が現われる前に、20~30秒ぐらいの定常状態の所が含まれている。そこで地震に入る前の最初の10秒間について、この部分を2次の自己回帰型ノイズとみなし、ソースデータにこの2次変換の逆を作用させれば、ソースデータは白色雑音と非定常部分(地震部分)との和になる。数

値計算は次の様に行った。地震以外の所で  
 のパワースペクトルには日中と深夜、週日  
 と日曜日という長周期変動があるけれど  
 も、短い時間たとえば深夜だけを見れば時  
 系列は定常状態であるとみてよい。この定  
 常状態を2次の自己回帰モデル

$$Q(n) = Q(n-1) \cdot PWA + Q(n-2) \times PWB + E(n)$$

で近似する。そして最小2乗法を用いて  
 $PWA$ ,  $PWB$  を求める。すなわち

$$PWA = (SQ(1) \cdot SQ(0) - SQ(1)^2) / (SQ(0)^2 - SQ(1)^2)$$

$$PWB = (SQ(2) \cdot SQ(0) - SQ(1) \times SQ(1)) / (SQ(0)^2 - SQ(1)^2)$$

ここで  $SQ(j)$  は  $\{Q(n)\}$  の自己共分散である。この  $\{Q(n)\}$  から  $\{E(n)\}$  を出せば、この  
 $\{E(n)\}$  がプリホワイトされた結果である。

日中と深夜、週日と日曜日という長周期変動以外は定常であると仮定すること、さらにこ  
 の定常状態を2次の自己回帰モデルと仮定することは、現在処理している岩槻のデータにつ  
 いては経験的に成り立っている。しかし、これを一般的に使用するためには定常性のテスト  
 とモデルの適合度のテストをしなければならない。現在はこれらのテストをしないで一続き  
 のデータの最初の10秒間だけを用いて  $PWA$ ,  $PWB$  を出し、一続きのデータをプリホワイト  
 している。若干の試行の結果では、一続きのデータごとに  $PWA$ ,  $PWB$  を変えないで  
 2日間同じ値を使っても、毎回  $PWA$ ,  $PWB$  を求めて使用しても同じ効果が得られる。す  
 なわちプリホワイトによる前処理も十分目的を達するのであるが、後の判別の所がまだうまく  
 行かないので、今回はバンドパス・フィルタによる前処理の方法を用いる。

#### 4. パワースペクトルによる分類

バンドパス・フィルタを通したデータ  $Y(n)$  を1個ずつずらしながら小区間(10秒間)  
 の周波数特性をみる。すなわち  $\{Y(n)\}$  に自己回帰モデルを当てはめてみる。

$$Y(n) = A(1) \cdot Y(n-1) + \dots + A(m) \cdot Y(n-m) + \epsilon(n)$$

この式による当てはめの誤差は、 $m=2$  まででほとんどなくなるので、実質的には  $m \leq 2$  と  
 してもパワースペクトルの形の大まかな姿は変わらない。FPE法により平均2乗誤差を最小  
 にする様な係数を決め、同時に誤差の推定値が最小になる様な  $m$  を求める(図6)。

1)  $m=0$  の場合 ホワイトノイズ的であるということである。まったくランダムである

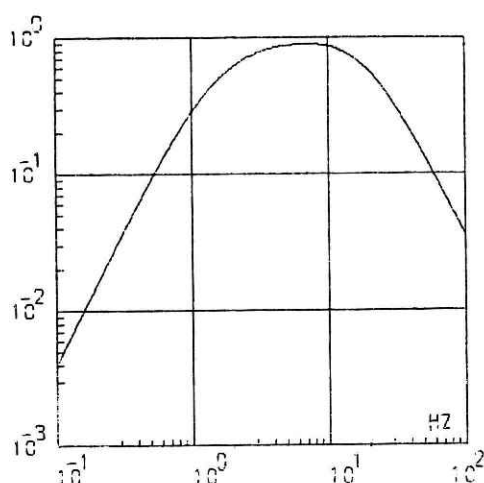


図5 バンドパス・フィルタのゲイン

Fig. 5 Gain of the band pass filter used in the present method

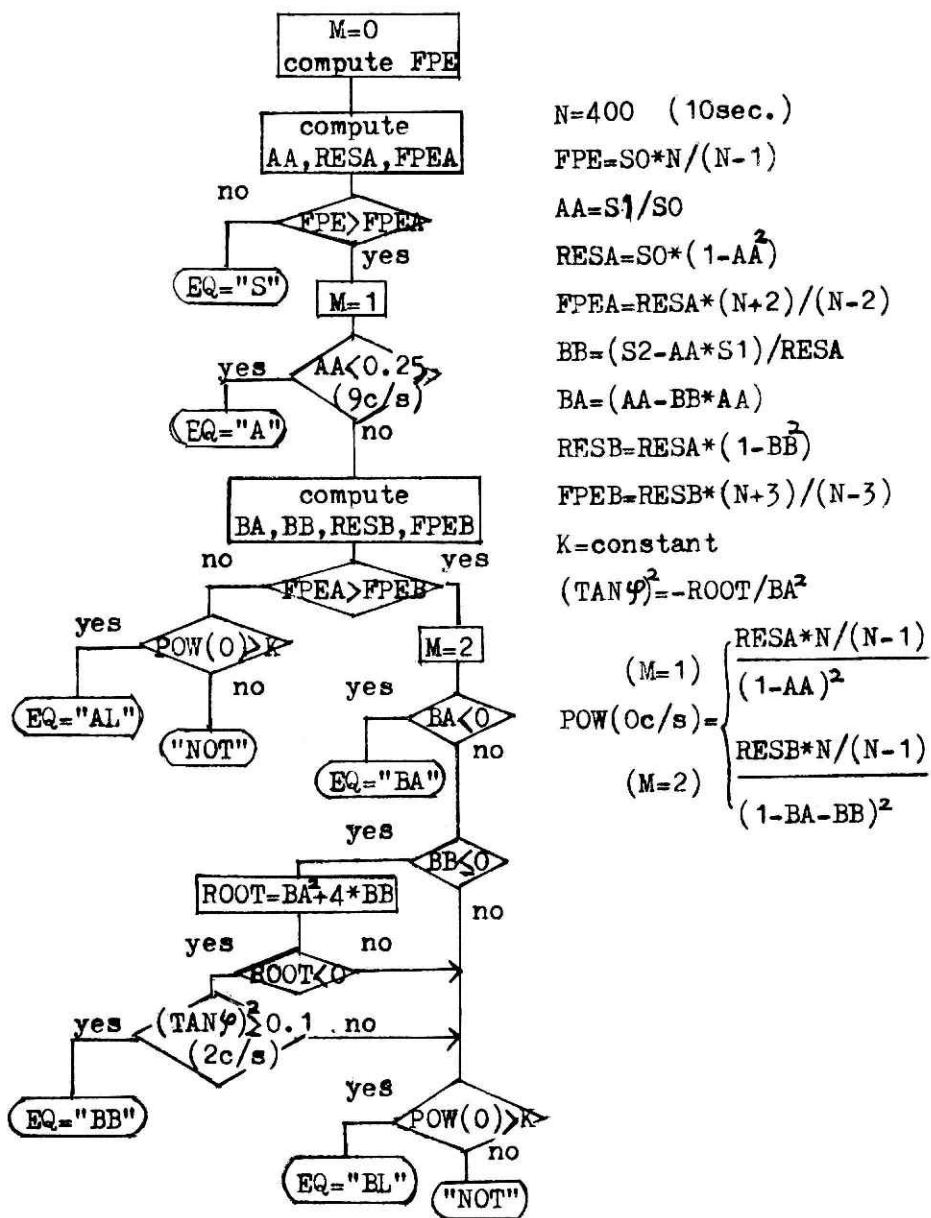


図 6 パワー分布による分類のフローチャート  
Fig. 6 Flowchart for classification of power distribution

とき、および定常的なノイズ状態から地震に入った所で突然振幅が大きくなり、小区間の中で相対的に地震波がパルスのになったときがこの場合である。

2)  $m=1$  の場合 0.1 Hz の所で 40 db 落ちるバンドパス・フィルタを通す前処理を行った後にもなお、グラウンドノイズの部分と、小さな地震の部分とはこの形になる。ただし両者では係数  $AA$  の値が異なる。これはパワースペクトルの折点周波数 ( $\omega=1/T$ ) に対応し、

たとえばつぎの様な見当である. すなわち  $DT=0.025$  秒であるからグラウンドノイズの場合  $AA=0.5$ ,  $f=4.42$  Hz, 小さな地震の場合は  $AA=0.2$ ,  $f=9.95$  Hz である.

$$f=(-\log AA)/DT/2\pi$$

として計算した.

低周波成分を多く含む地震は, 周波数特性がグラウンドノイズと同じ形をしているが, パワーの大きさが違うので計算の簡単な 0 Hz の所のパワーの大きさに判別し, パワーの大きいものを地震とする. 地震波の 0 Hz のパワーというのが, これは地震波が直流分 (移動) を含むということではない. 地震波を  $m=1$  の自己回帰型で近似したことによって, 低周波部分の平均として現れたものが 0 Hz におけるパワーである. この低周波部分の特性を判別に用いるのである. 全パワーを比較するならば  $\{Y(n)\}$  の分散  $SQ(0)$  を用いてもよい.

3)  $m=2$  の場合 グラウンドノイズとは異なる所にパワーの大きな部分があり, これにバンドパス・フィルタを通すと  $m=2$  の型になる. したがって,  $m=2$  となったらおおむね地震である. このときの係数  $BA$ ,  $BB$  を用いてパワースペクトルの型を分類する. 特性方程式  $s^2-BA\cdot s-BB=0$  の根の判別式の値  $ROOT=BA^2+4\cdot BB$  を用いて分類すると,

- a)  $ROOT<0$  ならば虚根である
- b)  $ROOT\geq 0$  ならば正と負の実根のときと
- c) 2つとも正の実根のときとある.

パワースペクトルの形からみて a) と b) は地震としてよい. c) の場合はノイズであることもあるが, 0 Hz の所のパワーが大きいものは地震とする. なお a) の場合も固有周波数が小さい (2 Hz 以下) ときは, ノイズと区別しにくいのであるが, 0 Hz の所のパワーが大きいものは地震とする. b) の負の実根が出てくるのは  $m=2$  までとしたことによる矛盾である.

## 5. 地震の認定

上述の計算値を, データをずらしながら見ていって, 時系列が定常でない状態が 1 秒以上続いた時に地震の有力候補とみなす. そして, 地震かどうかの判定を行なうために, ここで,  $Y(t)$  の絶対値の不完全積分  $Z(n)$  を求める. このときの時定数は 4.8 秒とする. 地震であれば, 最初の微動から定常にもどるまでの区間と少しでも重なりあう小区間はすべて異常状態を呈するので, 異常状態は少なくとも 1 秒以上は続く. 時系列が異常となっても地震の初期部分の振幅が小さいと絶対値の不完全積分値はなかなか大きくならない. 逆に相対的に大きいパルス的なノイズが 1 個現れた場合, これを含む小区間ではすべて時系列は異常の状態になるが, この様な単発のパルス的なノイズは, 時定数 5 秒ぐらいの不完全積分をとることによって消えてしまう. そこで最終的には, 時系列異常の期間が 1 秒以上続き, かつこの期間と重なり合って  $Z(n)$  が検出判定値を越える期間が 1 秒以上続いた時に地震とみなす.

不完全積分の検出判定値として最初は定数を使っていたが、昼と夜の相異を無視できないので次の様に変更した。バンドパス・フィルタを通した結果の絶対値に時定数 10 分の不完全積分を行う。これを  $W(n)$  とする。ただし地震の部分で  $W(n)$  が増大するのを防ぐため、時定数 4.8 秒の不完全積分  $Z(n)$  が地震で大きくなり、 $W(n)$  との差がある定数以上になった期間中は  $W(n)$  の値を保持する。この様にして  $W(n)$  はノイズレベルの長期的な平均値となる。この  $W(n)$  を用い、検出判定値  $TZ(n)$  を  $TZ(n)=W(n) \cdot 1.5$  とした。この検出判定値を時間の関数にする方法は現在試作中の第 1 次検出のアナログ装置でも使う。

## 6. P 波到達点の検出

一続きの時系列を、データをずらしながら 10 秒ずつの小区間の状態をみていって、異常の状態が始めて 1 秒間続いたならば地震の有力候補である。この問題の小区間 (10 秒のうち、最後の 1 秒間が異常であるとみられる) の中に地震波の到達点が入っていると考え、この小区間の中で次の様にして P 波到達点を探し始める。すなわち  $Y(n)$  の絶対値の不完全積分値  $Z(n)$  を地震波の一種の包絡線と考えて、包絡線の勾配が正の方向に急に变化する所を探すのである。

まず、問題の小区間の中の  $Z(n)$  の 1 秒間ずつの平均をとり、相接する 2 個の平均値の差がある定数より大きいものがあることを確める。ある定数より大きいとびがない時はこの小区間の中で P 波到達点を探すのをやめて時系列の状態をみる計算をさらに 1 秒間続ける。

1 秒間ずつの平均値にある定数以上のとびがあるかどうかを調べるのは、簡単な条件で予備的な判定を行うためである。とびがあったときは、この小区間 10 秒の中で、包絡線  $Z(n)$  に対し、図 7a) の折れ線または図 7b) の階段状折れ線をあてはめて、P 波の到達点 P を求める。それにパターンマッチングを用いるため、横軸 10 秒は 0.1 秒ごとに 100 等分し、縦軸  $Z(n)$  については最小値、最大値の間を 7 等分する。ただし  $Z(n)$  の最大値が検出判定値  $TZ(n)$  をこえるときは、最大値の代りに  $TZ(n)$  を用いる (この場合に図 7b) の階段状関数が当てはめられることになる)。最小値は 10 秒間の中の初めの 1 秒間の平均値とする。

図 7a), b) の折れ線は  $100 \times 7$  のメッシュ上のパターンで表わすと、斜線を施したメッシュで表現される。この斜線を施したメッシュの中に 10 秒間中の

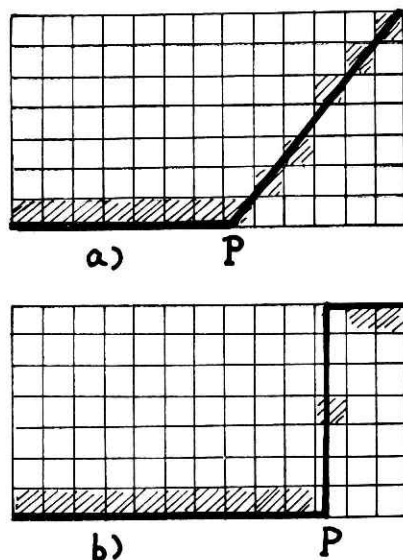


図 7 不完全積分  $Z(n)$  に当てはめるパターン

Fig. 7 Pattern to be matched with the incomplete integral of the absolute value of seismic waves

$Z(n)$  の点がいづつ含まれるかがマッチングの程度を表わす (図 8a), b)). 図 7 の  $P$  の点を動かし、マッチング最大のものを求める。サンプリング 40 Hz であるから、10 秒間中の  $Z(n)$  の個数は 400 で、そのうち 75% 以上 (300 点以上) がパターンのメッシュに含まれるとき、マッチングは良好と判定する。最大のマッチングが現れた  $P$  の値を  $PTX$  とし、 $P$  波到達点の第 1 近似とする。

実際には、 $Z(n)$  に折れ線をパターンマッチングで当てはめると図 9 のようなことが起り、 $PTX$  は  $P$  波到達点とかならずしも一致しない。 $PTX$  と 1 秒ごとの平均のとびが限度をこえる点をしめした 2 秒間  $[J]$  との相対位置関係により修正する。 $PTX$  が  $[J]$  の中にあるならば  $PTX$  をそのまま  $P$  波到達点  $PT$  とする。図 9a) の様に  $PTX$  の右に  $[J]$

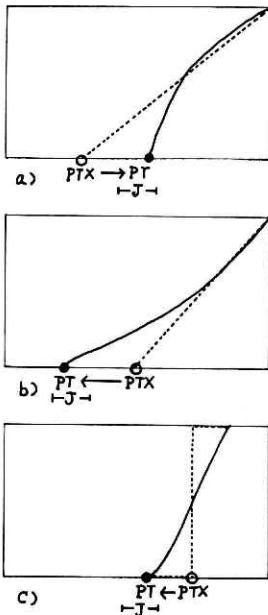


図 9 パターンの折れ線と  $Z(n)$  との関係による修正の方法

Fig. 9 According to the relation between matched pattern and the incomplete integral, the obtained point for  $P$ -time is corrected

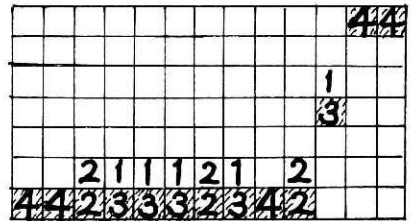
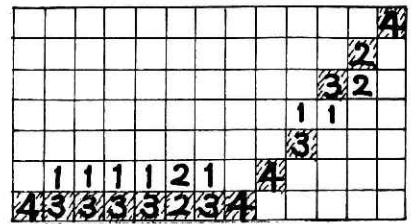


図 8 不完全積分  $Z(n)$  を図 7 のパターンにマッチングさせた様子

Fig. 8 State of matching the incomplete integral with the pattern in Fig. 7

があるならば  $P$  波到達点を  $PTX$  の右側に求める。グラウンドノイズの間は、 $Z(n)$  は縦軸を 7 等分した最小の区間中にはほとんど入るから、最下段のメッシュは 4 点を含む (0.1 秒間に  $Z(n)$  は 4 個ある)。  $PTX$  のメッシュから出発し最下段のメッシュが 4 点を含まない最初の所を  $PT$  とする。図 9b), c) では  $[J]$  が  $PTX$  の左にある。この場合には  $PTX$  から左にもどり最下段のメッシュに 4 個の点を含むものが現れた所を  $PT$  とする。

折れ線とのマッチングの程度が良好でないが (最良のマッチングも 75% にならないとき) 10 秒間中の  $Z(n)$  の最大値が  $Z(n)$  の検出判定値  $TZ(n)$  を越えているときは  $[J]$  の真中を  $PT$  とする。  $Z(n)$  の最大値が  $TZ(n)$  よりまだ小さいときは、この 10 秒間の中で  $P$  波到達点を探すのをやめてさらに計算を 1 秒間前進させ、異常の状態が続いていれば再度マッチングを試みる。異常の状態でなくなれば  $P$  波到達点を不明とする。

## 7. S 波到達点の検出

$P$  波到達点の検出までは計算を前進させながら行うことができるけれども、 $S$  波到達点はそのようにはいかない。すなわち

時系列の異常状態が終り、かつ  $Z(n)$  が検出判定値より小さくなった点を地震の終りとし、継続時間がある値より長いかどうかによって最終的に地震と判断する。その上、 $P$  波到達点が決まったものについてだけさかのぼって  $S$  波到達点を探すのである。まず、 $P$  波到達点  $PT$  から地震の終りまでの間において  $Z(n)$  が最大値をとる所を  $MT$  とし、 $PT$  から  $MT$  までの間で  $Z(n)$  が上方に折れ曲がる点を探す。すなわち  $Z(PT)$  と  $Z(MT)$  とを結ぶ線分を  $L(n)$  とし、

$$L(ST) - Z(ST) = \max \{L(n) - Z(n); n = PT, \dots, MT\}$$

であり、かつ

$$(L(ST) - Z(ST)) / (Z(MT) - Z(PT)) > k \text{ (定数)}$$

となる  $ST$  を  $S$  波到達点とする。決まらない時は不明とする。

縦波と横波の部分における主周期の違いを用いて検出したかったのであるが、主周期の違いがはっきりとしているのは非常に少ない。 $Z(n)$  を用いる検出を優先し、決まらない時だけ主周期の変化量を見て、これがある定数より大きいときには主周期の相違を使って  $S$  波到達点を見つけることにした。後述の表1において  $S-P$  欄に ( ) を付してあるのは主周期の相違を用いて求めたものである。

## 8. 時計コードの読み取り

データの1個のチャンネルに時計コードが入っている。時計コードは秒パルスで、秒パルスの高さによって日、時、分、秒が解読できる様になっている。 $P$  波到達点を含む1分間の時計コードから時刻を読み取る。データのサンプリング間隔は0.025秒であるが、0.1秒を単位として求めた時刻を印字する。

## 9. テストの結果

1974年3月26日22時から27日20時までと同年4月1日11時から2日0時までの岩槻データについて試算し、観測者がインク書き記録紙(紙送り5mm/sec)から読み取ったものと比較してみたのが表1である。3月27日(水曜)は1日中雪が降った日で、ノイズレベルが低く、第1次抽出により22時間で69個が地震候補として抽出された。4月1日(月曜)は日中のノイズレベルが高く、13時間で111個も地震候補として抽出された。今回の第2次抽出により、この69個と111個のうちそれぞれ33個ずつがあらためて地震であると判定された。前者の33個のうちの16個と、後者の33個のうちの9個はインク書き記録上である判断基準による人間の目測により地震と判定されている。インク書き記録により人間が地震と判定したものは、第2次抽出によってもれなく地震と判定された。 $33-16=17$ ,  $33-9=24$ のうち少数個は何かのノイズであるらしいが、大部分は小さい地震あるいは遠い地震であると思われる。ただし、他の記録との比較検討が容易でないから、いまの所確認が難しい。表

表 1  $P$  波到達時刻,  $S-P$  時間, 震動継続時間の計算値と目測による読取値との比較  
 Table 1 Comparison of the calculated arrival time of  $P$  wave,  $S-P$  time and duration time with those by eye inspection on the record

| 1974 3 |    |    |      |        |      | 1974 4 |   |    |    |      |        |      |     |
|--------|----|----|------|--------|------|--------|---|----|----|------|--------|------|-----|
| D      | H  | M  | S    | S-P    | AMAX | F-P    | D | H  | M  | S    | S-P    | AMAX | F-P |
| 26     | 22 | 02 | 27.4 | -      |      | 80.    | 1 | 11 | 28 | 47.4 | 5.1    |      | 33. |
|        |    |    | 27.4 | 4.8    | *    | 60.    |   |    |    | 47.4 | 5.1    | 26   | 20. |
| 26     | 22 | 29 | 09.8 | 13.4   |      | 97.    | 1 | 11 | 33 | 50.8 | 6.1    |      | 40. |
|        |    |    | 09.9 | 14.6   | 470  | 100.   |   |    |    | 49.2 | 7.6    | 75   | 16. |
| 26     | 23 | 32 | 57.7 | 6.5    |      | 45.    | 1 | 12 | 31 | 05.4 | 4.8    |      | 36. |
|        |    |    | 58.0 | 8.0    | 70   | 20.    |   |    |    | 04.7 | 5.4    | 66   | 25. |
| 27     | 00 | 02 | 21.0 | 17.4   |      | 70.    | 1 | 16 | 28 | 03.9 | (12.7) |      | 39. |
|        |    |    | 21.0 | 18.4   | 80   | 60.    |   |    |    | 03.6 | 12.5   | 115  | 24. |
| 27     | 05 | 08 | 55.3 | 6.9    |      | 71.    | 1 | 17 | 27 | 35.2 | 10.9   |      | 57. |
|        |    |    | 55.1 | 7.0    | 160  | 30.    |   |    |    | 34.4 | 11.6   | 83   | 50. |
| 27     | 07 | 16 | 19.2 | 10.4   |      | 80.    | 1 | 22 | 09 | 04.8 | -      |      | 73. |
|        |    |    | 18.8 | -      | 210  | 80.    |   |    |    | 04.6 | 15.1   | 110  | 60. |
| 27     | 09 | 03 | 12.6 | 13.7   |      | 51.    | 1 | 23 | 10 | 50.6 | 17.1   |      | 69. |
|        |    |    | 12.8 | 13.4   | 160  | 39.    |   |    |    | 50.5 | 17.1   | 234  | 60. |
| 27     | 10 | 44 | 04.9 | 11.3   |      | 46.    | 1 | 23 | 25 | 59.9 | 6.7    |      | 47. |
|        |    |    | 04.4 | 12.0   | 100  | 40.    |   |    |    | 59.0 | 7.4    | 110  | 25. |
| 27     | 11 | 06 | 13.0 | (11.1) |      | 53.    | 2 | 00 | 48 | 22.3 | 3.3    |      | 37. |
|        |    |    | 11.8 | 10.0   | 70   | 40.    |   |    |    | 22.3 | 3.1    | 176  | 18. |
| 27     | 11 | 54 | 36.4 | 4.2    |      | 25.    |   |    |    |      |        |      |     |
|        |    |    | 36.4 | 3.1    | 100  | 14.    |   |    |    |      |        |      |     |
| 27     | 12 | 04 | 16.9 | -      |      | 39.    |   |    |    |      |        |      |     |
|        |    |    | 16.8 | 7.5    | 160  | 24.    |   |    |    |      |        |      |     |
| 27     | 15 | 14 | 26.4 | 10.1   |      | 81.    |   |    |    |      |        |      |     |
|        |    |    | 26.3 | 10.2   | *    | 70.    |   |    |    |      |        |      |     |
| 27     | 15 | 22 | 27.3 | 3.1    |      | 29.    |   |    |    |      |        |      |     |
|        |    |    | 27.3 | 3.1    | -    | 15.    |   |    |    |      |        |      |     |
| 27     | 17 | 40 | 05.0 | -      |      | 122.   |   |    |    |      |        |      |     |
|        |    |    | 05.2 | -      | *    | 100.   |   |    |    |      |        |      |     |
| 27     | 18 | 04 | 53.8 | 6.9    |      | 61.    |   |    |    |      |        |      |     |
|        |    |    | 53.8 | 7.2    | -    | 50.    |   |    |    |      |        |      |     |
| 27     | 18 | 46 | 44.2 | -      |      | 94.    |   |    |    |      |        |      |     |
|        |    |    | 44.2 | -      | *    | 80.    |   |    |    |      |        |      |     |

1 はインク書き記録からの読み取りと, 今回の方法による読み取りの比較である. それぞれの 1 行目が今回の方法で検測した結果である. 最大振幅については今回アナログデータを読み取るときにゲインが不明であったため比較できないので省略した. ペン書き記録紙から読みとった  $P$  波到達時間は時計の補正をする前のものである.

## 10. あとがき

用いられた記録は岩槻の長時間記録のデータレコーダ TEAC R 950 に記録されたデータである.

試算には水平動の 1 つのチャネルを使った. 方向性がないことから上下動の方がよいであろうが, データレコーダの出力のうち水平動の方が大きくてやりやすかったこと, およびノイズの性質がパワースペクトルの分類という立場からみて扱いやすかったことから水平動を用いた.

デジタル計算で第 1 次抽出をしたときに  $Z(n)$  の検出判定値  $TZ(n)$  を定数としたので,

週日の日中などにはノイズをかなり拾っている。今試作中のアナログ装置では昼夜のノイズレベルにともなって変化する様に検出判定値を決めるのでノイズが第1次抽出の中に入る数は少くなると思う。

表1にみる様に  $P$  波到達時刻の精度はまだ十分とは言えない。地震の始まりの部分の振幅の小さいものについてはノイズレベルのとり方の粗さが  $P$  波到達時刻の推定に大きく影響するし、また低周波成分の多い地震では推定値がおくれがちになる。

## 謝 辞

第2研究部首都圏地震予知研究室長浜田和郎氏は原稿を精読して懇切丁寧な討論注意をして下さった。また、地震防災研究室研究員笠原敬司氏には大量の第1次検出データの検討をして戴いた。資料は地震防災研究室長高橋末雄氏、研究員山本英二氏より提供して戴きお世話になった。ここに記して心より感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 赤池弘次, 中川東一郎 (1972): ダイナミックシステムの統計的解析と制御. サイエンス社.
- 2) 菅原正巳, 勝山ヨシ子, 大村一夫, 福井隆文 (1974): 微小地震の自動検出方法について. 国立防災科学技術センター研究報告, 第9号.
- 3) 渡辺一郎, 勝山ヨシ子 (1975): 微小地震の自動検出方法について (第2報). 国立防災科学技術センター研究報告, 第12号.
- 4) 渡辺一郎, 福井隆文, 勝山ヨシ子 (1975): 地震波処理の一方式について. 国立防災科学技術センター研究速報, 第18号.

(1975年12月11日原稿受理)