

# 微小地震の自動検出方法について

菅原正巳・勝山ヨシ子・大村一夫・福井隆文

国立防災科学技術センター

## Automatic Detecting Method for Micro-earthquakes

By

M. Sugawara, Y. Katsuyama, K. Ohmura and T. Fukui

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

### Abstract

The authors are just recording the earthquake waves at three observation wells in the south of Boso Peninsula, for detection by hand of the micro-earthquake waves overlapped by the noise waves.

If all the parts of waves could be automatically digitized for analysis, it would be very expensive and cause some serious technical problems. And so, it was tried to detect automatically the micro-earthquakes by a series of analogue circuits. Usually, there exist some differences between the earthquake waves and the noise waves, and the amplitude of the former is greater than that of the latter. Accordingly, the analogue circuits with the following arrangements were considered to be suitable for detection: (1) band-pass filter for the waves in the neighborhood of earthquake waves, (2) commutation, and (3) integrating circuit.

First, the simulated circuit was successful by the computer's digital filtering. Then, the series of circuits was installed, and it was confirmed that the authors' idea is suitable, as illustrated in the present report, for detecting the seismic waves covered by noise waves. The authors can treat almost all the earthquake waves with various frequency characteristics, by varying the circuit parameters. And it must be noticed that the pulse-like noises with large amplitudes were removed by the integrating circuit at the final stage of the group performance.

## 1. 目的および結果の概要

### 1.1 計算機により微小地震を自動的に検出する方式の必要性

国立防災科学技術センターは南関東地域における地震予知計画の一環として、南房総に3か所の地震観測井を設け、観測を行なっている。現在、その記録は主としてペンレコーダにより記録紙にすず書きされているが、ノイズと同程度の微小地震をその中からひろいだすの

は大変な手間である。将来、かかる施設がさらに増強されたときは、データの読み取りが最大の難題になることは目に見えている。これを何かの方法で、自動化、機械化することは急務であると考えられる。

### 1.2 磁気テープによる記録の必要性

現在、国立防災科学技術センターでは、磁気テープに記録する方法も試験中で、それには TEAC の試作した長時間記録用のデータレコーダを用いている。これはテープ速度が 0.06 in/s で、再生は 60 倍の速度で行なわれる。地震波の数値化、数量化をコンピュータで行なうため、また記録のコピー作成のためには、磁気テープに記録する方がすぐれている。そこで、この磁気テープ記録を用いて、微小地震をコンピュータにより検出する方式を開発する試みを行なうことにした。

### 1.3 AD 変換の速度から来る難しさ

最初、磁気テープの記録をすべて AD 変換した上で、計算機の中で微小地震を検出すればよいと考えた。しかし、それには難点があることがわかってきた。

われわれが試験的に使用したデータレコーダは再生時には 60 倍の速さで動く。1 日の記録は 24 分で再生される訳で、前後の準備を含めて 1 日分に 30 分かかるとすれば、1 週間分の再生に 3.5 時間、約半日の仕事である。数地点の記録を再生するために、計算機の稼働時間の約半分が AD 変換に使われることになる。この点から見ると、再生を 60 倍程度で行なうことは必要であろう。

さて、60 倍の速度で再生し、地震波は 10 Hz まで測りたいとすれば、サンプリングは 20 Hz まで必要である。しかし、余分にサンプリングし、たとえば 80 Hz でサンプリングして、4 個ずつの平均を取れば、誤差は半分が減って、よいデータが得られる。そこで、かりに 80 Hz でサンプリングするとし、4 チャンネル（時間、上下、南北、東西）とすれば、それが 60 倍の速度で再生されるから、

$$80 \times 4 \times 60 = 19,200 (\text{Hz}),$$

すなわち約 20 kHz となる。サンプリング間隔約 50  $\mu\text{s}$  である。これは現在において、計算機の AD 変換の能力の限界に近いもので、われわれが用いている TOSBAC-3400 の能力をこえている。われわれが用いている計算機の AD 変換器は、コアメモリに入れるだけならば 20 kHz に近い能力を持つが、磁気テープへの転送を目指す、目下われわれが持っている機械では 5 kHz が限度である。

したがって、誤差が大きくなることを覚悟して 1 チャンネルあたりのサンプリングを 20 Hz に落とすか、データレコーダの再生速度を落とすか、計算機の能力を上げるか、ともかくなんらかの考慮が必要になる。

### 1.4 データ量から来る難しさ

速度に関する難点のほかに、データの量から来る難しさがある。かりに 1 チャンネルを 80

Hz でサンプリングすると、4 チャンネル、24 時間分のデータの個数は、

$$80 \times 4 \times 86,400 = 27,648,000$$

となる。TOSBAC-3400 は 1 語 24 bit であるから、1 語に 2 個ずつのデータを入れたとし、約  $14 \times 10^6$  語である。

一方、800 BPI, 7トラック (1 個はパリティだから、6 bit が有効)、2,400 ft の磁気テープは

$$800 \times 12 \times 2,400 \div 4 = 5,760,000 (\text{語})$$

である。バッファを十分大きくとり、レコードの長さを大きくしても、 $14 \times 10^6$  語のデータは 4 巻分となる。再生しながら、計算機の磁気テープの掛け替えを行なうのは好ましい作業ではない。

### 1.5 演算速度から来る難しさ

AD 変換の速さ、データの量から来る難しさのほかに、磁気記録をそのまま計算機に読み込む方式には難点がある。最初、われわれはデータを全部読み込んだ上で、計算機内で微小地震を探せばよいと考えていた。しかし、後述する数値フィルタで地震を検出するためには、データ 1 個当たりにかかなりの時間がかかる。1 日分を 60 倍の速度で再生して、約 30 分かかるが、それが AD 変換能力の限界に近い。地震の検出には、たとえば水平動 1 チャンネルだけで十分だとしても、微小地震の検出には読み込みより時間がかかると見なければならぬ。そうすると、データの読み込み、地震の検出、検出された地震の処理を考えると、1 日分のデータの処理にかかなりの時間がかかることになる。

そこで、データを全部読み込んだ上で、検出、処理をすることを止めて、検出と読み込みを同時に行ない、地震の部分だけを磁気テープに読み込めばよいという考えがでてくる。すなわち、バッファに地震データを読み込みながら、一方計算機で数値フィルタにより地震を検出し、地震を検出した時点で、バッファから磁気テープへの転送を開始する方式である。

しかし、これが無理なことは、ただちにわかる。数値フィルタの計算にかかなりの時間がかかる以上、高速再生に対しては間に合わないのである。再生を低速にし、そのかわりミニコンを用いるならば、あるいは可能であろうが、その場合はミニコンの値段と能力のバランスが問題となる。

### 1.6 アナログ機構による検出

上記の難点为了避免するために、アナログ回路で地震波を検出し、それによって計算機に割り込みをかけ、地震波だけを選別して AD 変換し、磁気テープに入れることを思いついた。

地震波に数値フィルタを掛け、地震波を検出しようとしたことを、アナログ回路で行なえばよいのである。ノイズの中に埋没している地震波 (図 1a) において、ノイズのパワーの大きいあたりの周波数帯域を消し、地震波の周波数のあたりで共鳴させ (波形が変形しても気にしない。図 1b)、それを検波し (負の部分捨てるか、あるいは絶対値をとる。図 1c)、

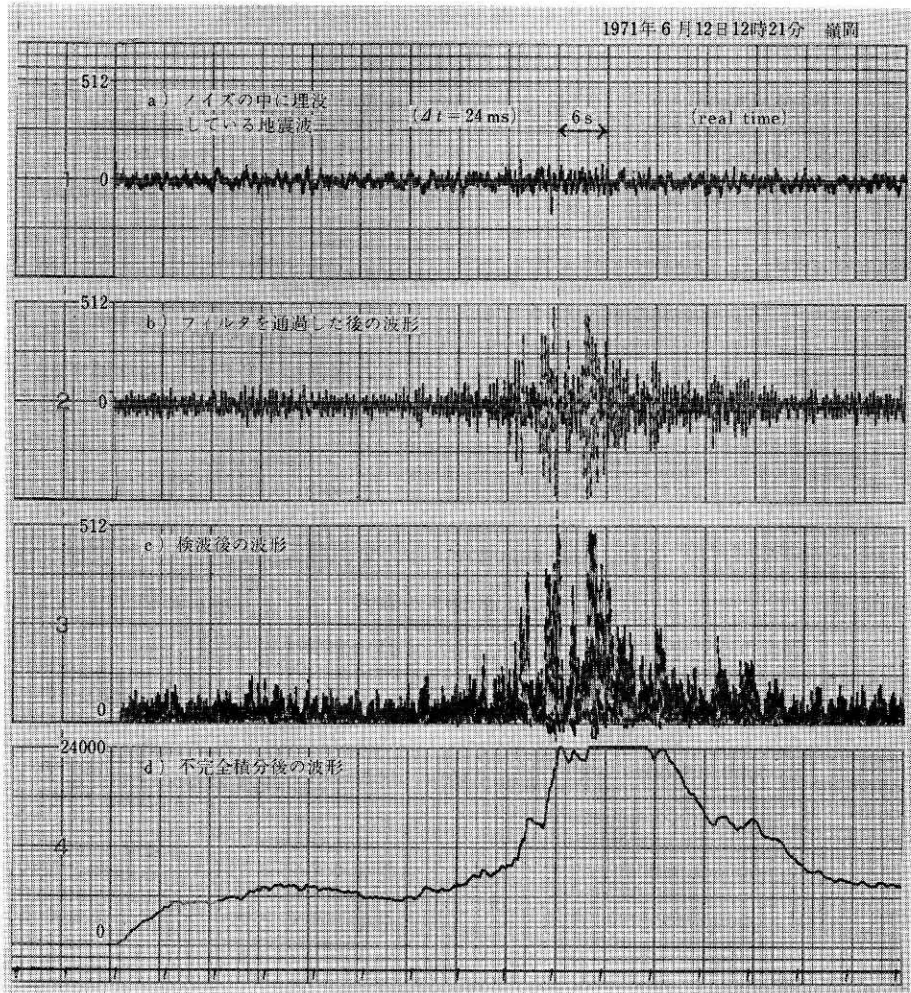


図 1

- |       |                 |       |           |
|-------|-----------------|-------|-----------|
| 図 1 a | ノイズの中に埋没している地震波 | 図 1 c | 検波後の波形    |
| 図 1 b | フィルタを通過した後の波形   | 図 1 d | 不完全積分後の波形 |

さらにそれを不完全積分すれば、地震波の所で積分値が大きくなる (図 1d)。これを適当なレベルで切れれば、地震を検出することができる。完全積分でなく、不完全積分をするのは、ノイズとして混入するパルスの影響を除くためでもある。

### 1.7 数値フィルタによる試算およびアナログ回答の試作

以上の思いつきを実行に移すために、まず数値フィルタにより、その可能性を確かめることにした。幸いにして、計算機による数値実験は成功した。図 1 は実は計算機による結果である。この場合、回路による実現を容易にするために、数値フィルタとして、一次遅れと二次遅れの組み合わせのみを用いた。

数値実験の成功に引き続き、アナログ計算機で同様のフィルタを組んで確かめ、その上で

アナログ回路を作成した。

### 1.8 地震波検出回路の使い方

われわれはデータレコーダによる地震記録を、計算機の所で再生させるとき、地震波の部分だけを選別して計算機の磁気テープに入れるための割込信号発生装置として、アナログ回路を作ろうと考えた。しかし、この回路をデータレコーダの付属装置として用い、アナログの磁気ドラムを仲介にして、地震波の部分だけをアナログ磁気テープに記録する装置を作ることでもある。

データレコーダには連続した全記録をとり、計算機の所で再生するとき地震波を検出、選別する場合でも、バッファメモリに何をを使うか（アナログ磁気ドラムを用いる方法もあり得る。）、計算機にはどんなものを用いるのがよいかなどは残された問題である。また、地震の大きさにより、倍率を自動的に変えることも必要であろう。

## 2. 数値フィルタによる実験

### 2.1 ノイズおよび地震波のパワースペクトル

解析に用いたのは房総半島の嶺岡における1971年6月13日～14日の資料である。図2はノイズの、図3は地震波のパワースペクトルを示す。ノイズは0.8Hzあたりに、地震波は2～3Hzあたりにパワーのピークを持っている。なおノイズのパワースペクトルで、2Hzあたりにある線スペクトルらしいものは、倍振動を伴っているが、地震計以外から混入したものではあるまいか。

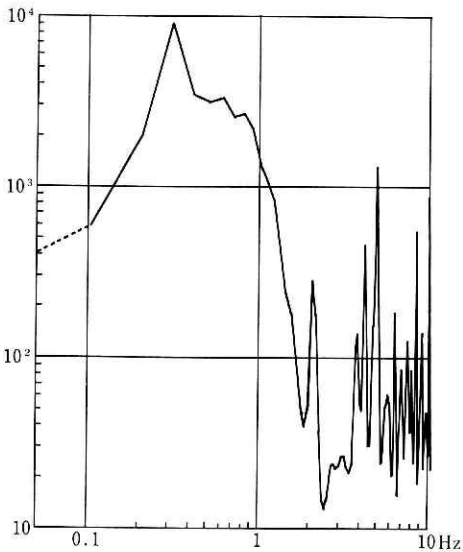


図2 ノイズのパワースペクトルの例

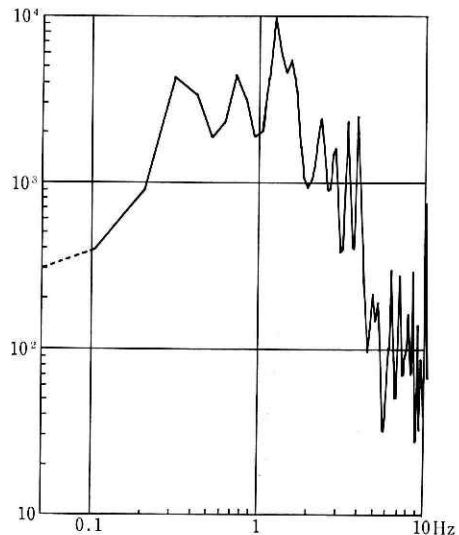


図3 地震波のパワースペクトルの例

## 2.2 数値フィルタの作り方

(1) 低周波ノイズの除去 低周波を切るためには、不完全微分  $\{s/(s+\alpha)\}^k$  を用いることにした。これを数値フィルタに置き換えるには、微分演算子  $s$  のかわりに

$$(x_n - x_{n-1})/\Delta t = (1 - h_{\Delta t}) \cdot x_n / \Delta t$$

を置けばよい。  $h_{\Delta t}$  は時間を  $\Delta t$  だけずらす演算子で、  $x_n$  を  $x_{n-1}$  に変えるのであって、  $h_{\Delta t} = \exp(-\Delta t \cdot s)$  と書ける。ただし  $\Delta t$  はサンプリング間隔である。

$$\left(\frac{s}{s+\alpha}\right)^k = \left(\frac{1-h_{\Delta t}}{1-h_{\Delta t}+\alpha \cdot \Delta t}\right)^k = \frac{(1-h_{\Delta t})^k}{\{(1+\alpha \cdot \Delta t)-h_{\Delta t}\}^k}$$

であるから、

$$\{(1+\alpha \cdot \Delta t)-h_{\Delta t}\}^k \cdot y_n = (1-h_{\Delta t})^k \cdot x_n .$$

ここで、  $1/(1+\alpha \cdot \Delta t) = r$  と置けば、

$$(1-r \cdot h_{\Delta t})^k \cdot y_n = r^k \cdot (1-h_{\Delta t})^k \cdot x_n ,$$

$$\sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \cdot r^i \cdot (-1)^i \cdot y_{n-i} = r^k \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} (-1)^i \cdot x_{n-i} .$$

したがって、数値計算では次の式によって計算すればよい。

$$y_n = r^k \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} (-1)^i \cdot x_{n-i} - \sum_{i=1}^k \binom{k}{i} r^i (-1)^i \cdot y_{n-i} .$$

なお、不完全微分が低周波を切ることになる理由は、次のとおりである。不完全微分を  $s/(s+\alpha) = 1 - \alpha/(s+\alpha)$  と書き換えてみれば、これは、もとの数列から、その不完全積分  $\alpha/(s+\alpha)$  を引いたものである。演算子  $\alpha/(s+\alpha)$  は  $\alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot t)$  をウェイトとして移動平均をするもので、高周波成分を切ることになる。それをもとの数列から引くのであるから、逆に低周波が切られることになるのである。

この不完全積分の時定数  $T$  は  $1/\alpha$  であるが、上記の数列による計算では、

$$\exp(-\alpha \cdot \Delta t) = r, \quad T = \frac{\Delta t}{-\log r} = \frac{\Delta t}{\log(1+\alpha \cdot \Delta t)}$$

で与えられる。図4は  $\alpha=1$  の場合の  $\{s/(s+1)\}^k$  の利得である。

(2) 共鳴 地震波の周波数のあたりを共鳴させるには二次遅れ系を用いる。二次遅れ系  $1/\{(s+\lambda)^2 + \beta^2\}$  を数列として計算するには次の変換を用いればよい。

$$z_n = a \cdot z_{n-1} + b \cdot z_{n-2} + y_n .$$

ただし、  $a = 2r \cdot \cos \theta$ 、  $b = r^2$ 、  $\theta = \beta \cdot \Delta t$ 、  $r = \exp(-\alpha \cdot \Delta t)$  である。図5は二次遅れ系  $1/\{(s+\lambda)^2 + 1\}$  の利得を示す。この図からわかるように、このとき高周波分も切られる。

(3) 検波 数値計算では、フィルタを通過した時系列  $\{z_n\}$  の絶対値をとればよい。

(4) 不完全積分 これは  $1/(s+\mu)$  とあらわされ、数値計算では

$$W_n = r \cdot W_{n-1} + z_n, \quad r = \exp(-\mu \cdot \Delta t)$$

とすればよい。

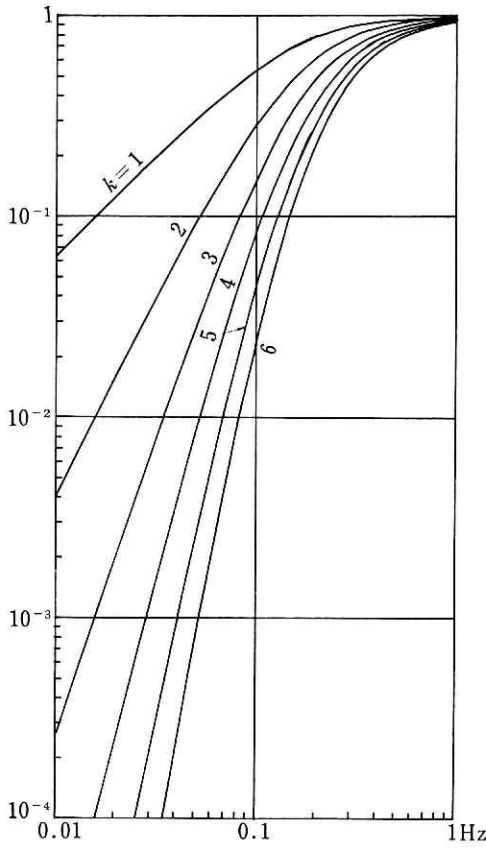


図4  $[s/(s+1)]^k$  の利得

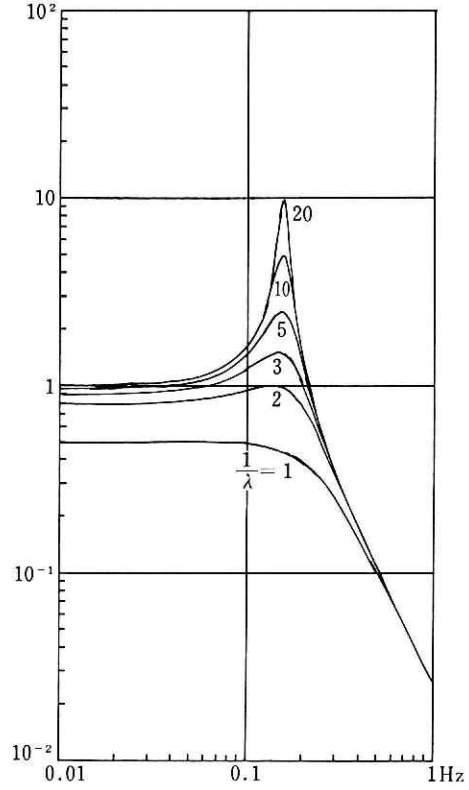


図5  $1/[(s+\lambda)^2+1]$  の利得

なお、図1の計算の際には、次の定数を使った。

$$\Delta t=0.024\text{s}, \quad 1/\alpha=0.07\text{s}, \quad k=2, \quad 1/\lambda=0.5\text{s}, \quad \beta=2.5\text{Hz}, \quad 1/\mu=4.8\text{s}.$$

### 3. アナログ回路の試作

以上の数値フィルタをアナログ的に見ると、検波の前までは地震の周波数のあたりだけを通す、帯域フィルタを使えばよいことがわかる。そこで実際のアナログ回路はさらに簡単にして、この部分を低域通過形フィルタと高域通過形フィルタの組み合わせとした(図6)。

検波はダイオード一つで行なえる。不完全積分も一種の低域通過形フィルタであり、図6の最後のブロックのようにすればよい。

これらの回路の定数をきめるには、次のようにすればよい。最初のブロックの低域通過形では、シャ断周波数を  $f_0$ 、利得を  $A_1$  とすれば、他の定数の間には、次のような関係がある。

$$R_{13}=1/(2\sqrt{2}\pi\cdot f_0\cdot C_{12}),$$

$$R_{12}=R_{13}/(A_1+1),$$

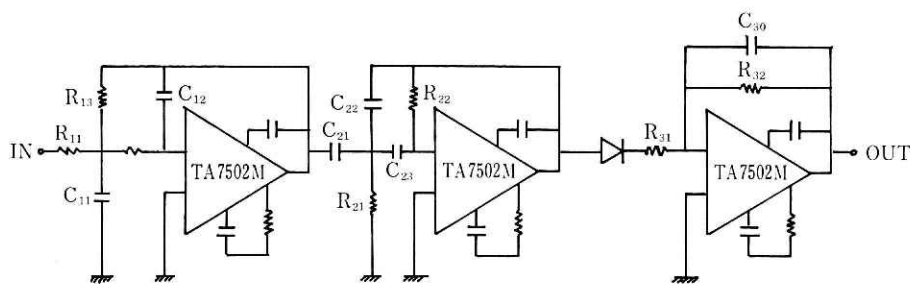


図6 アナログ回路

$$R_{11} = R_{13} / A_1 ,$$

$$C_{11} = 2(A_1 + 1) \cdot C_{12} .$$

したがって、たとえば  $C_{12}$  を適当に決め、上式によって得られる  $R_{13}$  などが入手しやすい部品の値になるようにする。

二つ目のブロックの高域通過形の場合も、同じように

$$C_{23} = C_{21} ,$$

$$C_{22} = C_{21} / A_2 ,$$

$$R_{21} = A_2 / \{ \sqrt{2} \pi \cdot f_{20} \cdot C_{21} (2A_2 + 1) \} ,$$

$$R_{22} = (2A_2 + 1) / (2\sqrt{2} f_{20} \cdot \pi \cdot C_{21})$$

という関係から各定数を定めればよい。 $f_{20}$  はしゃ断周波数、 $A_2$  は利得である。

最後のブロックでは、

$$A_3 = R_{32} / R_{31} ,$$

$$T = 1 / (C_{30} \cdot R_{32})$$

という関係がある。 $A_3$  は利得、 $T$  は時定数。

われわれは、 $C_{30}$  を変化させてみて、そのときの時定数をしらべ、所要の時定数となる  $C_{30}$  の値を定めた。

#### 4. あとがき

われわれの方法においては、地震波の周波数とノイズの周波数が異なるということが大前提となっている。(ただし、周波数が同じでも、振幅が大きく異なれば、最後の不完全積分により検出できる。) 非常にまれではあるが、ノイズと地震波の周波数がほぼ同じということがあるので注意しなければならない。

また、われわれの方法は、ある地点で観測される地震波の周波数がわかっており、しかも、その変動幅があまり大きくないことを前提としている。(ただし、いろいろな帯域フィルタ特性を持ったアナログ回路を並列に用いれば、異なった周波数の地震波も検出できる。)

そこで、新しい観測地点では、まず連続記録を行なって、その解析を行ない、地震波の特



性を知る必要がある。

このようなわずかな欠点があるにしても、われわれの方法は、ノイズに埋もれた地震波の検出に非常に有効であり、しかも、上記のことを除いて、どのような場所に対してもフィルタ回路を設計できるという、一般性を持っている。また、大きな振幅でも、持続性のない波を、最後の不完全積分で取り除くことができるという長所を持っている。

われわれは、現在、推進されている観測井の記録の解析をさらに続け、よいフィルタの設計を行なってゆきたい。また、1.8 項で述べた、現地で地震波だけをアナログテープに記録することも考えている。

(1973年2月16日 原稿受理)