

微小地震の自動検出方法について (第2報)

勝山ヨシ子・渡辺一郎

国立防災科学技術センター第3研究部

Automatic Detecting Method for Micro-earthquakes (II)

By

Y. Katsuyama and I. Watanabe

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

Abstract

The data recorded by the R950 and R922 analog data recorders at Iwatsuki Crustal Activity Observatory were processed, and some experiments were carried out in order to extract the earthquake waves from these data.

In the case of R950, some of very small earthquakes were not extracted, because 4-, 8-, and 16-Hz noises were due to R950 itself, and 4- to 6-Hz noises due to automobiles and factories.

In the case of R922, a number of noises were extracted, partly because 4- to 6-Hz noises from automobiles etc. were included in the recorded data, and partly because S/N ratio of R922 is worse than that of R950. But the earthquake waves were separated from the noise waves almost completely, by using the difference in the power spectrum shapes between the earthquake and the noise.

Next, for knowing the *P* time and *S* time, some attempts were performed, using the storage tube display device and the tablet type figure input device.

1. はしがき

われわれは先に、アナログ的に磁気テープに記録されている、ノイズに埋まっているような地震波をデジタルフィルタによって検出し、これをデジタル化して磁気テープに記録する方式を開発した。さらに、フィルタをアナログ回路にすることにより、まったく自動的に、しかも高速に地震波の検出、記録を行なうシステムの可能性をあきらかにした(菅原ほか, 1974)。

次に行なうべきことは、実際に記録されたデータを用いて、フィルタ特性、判定基準(すなわち、不完全積分後の値がいくつ以上になったら地震と判定するかを定める値)、*P*波、*S*波の判定方法、自動検測ハードウェアシステムなどを検討し決定することである。われわれは岩槻の地殻活動観測施設において観測された、実際のアナログ磁気テープを用いてこれら

表 1 R950 記録を用いた検出結果

FR	3.5		4.5		5.5	
	BOUR	5500	1. SEC	1. SEC	10. SEC	2000
300 20H 08						10.0 2082 27.5
300 20H 04						51.0 2415 16.3
300 20H 18	50.3	7451	8.1			
300 20H 11.9					28.4	2354 10.6
300 20H 25.5					13.6	2389 11.3
300 20H 34.5					112.7	11224 11.6
300 20H 42.9	17.0	98763	6.3	17.0	86760	83.7
300 20H 51.3					19.0	2565 13.1
300 21H 40					16.5	2396 12.3
300 21H 70					46.8	2465 12.9
300 21H 150					47.2	2566 10.6
300 21H 186					48.5	2786 15.4
300 21H 313					55.7	3330 17.9
300 21H 418					55.0	2730 10.7
300 21H 513					10.0	2181 47.8
300 22H 282					18.2	2630 13.3
300 22H 365					12.5	2512 16.3
300 22H 455					41.6	2424 10.8
300 23H 683					22.8	2947 40.2
300 23H 856					38.1	2655 11.7
300 23H 1118					47.3	2759 11.6
300 23H 1315					59.6	2770 19.8
300 23H 1515						
300 23H 1666						
300 23H 1866						
300 23H 2066						
300 23H 2266						
300 23H 2466						
300 23H 2666						
300 23H 2866						
300 23H 3066						
300 23H 3266						
300 23H 3466						
300 23H 3666						
300 23H 3866						
300 23H 4066						
300 23H 4266						
300 23H 4466						
300 23H 4666						
300 23H 4866						
300 23H 5066						
300 23H 5266						
300 23H 5466						
300 23H 5666						
300 23H 5866						
300 23H 6066						
300 23H 6266						
300 23H 6466						
300 23H 6666						
300 23H 6866						
300 23H 7066						
300 23H 7266						
300 23H 7466						
300 23H 7666						
300 23H 7866						
300 23H 8066						
300 23H 8266						
300 23H 8466						
300 23H 8666						
300 23H 8866						
300 23H 9066						
300 23H 9266						
300 23H 9466						
300 23H 9666						
300 23H 9866						
300 23H 10066						

表 2 表 1 におけるデジタルフィルタの特性

FR	2.5	3.5	4.5	5.5
TA	0.07	0.07	0.07	0.07
TB	1.0	1.0	1.0	1.0

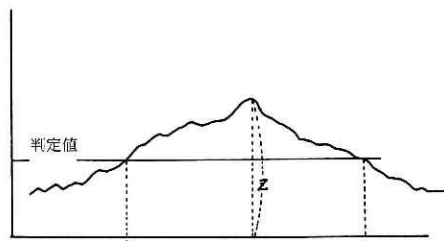


図 1 不完全積分後の値の変化

を決定するための種々の実験を行なったので、これらについて報告するとともに若干の考察を述べることにする。なお、地震計は、固有周期 1 秒の速度型である。

2. 新長時間記録による計測値の解析

岩槻の観測施設には、まず TEAC 社の開発になる新しい長時間記録計 (以下 R950 と称する) が、テストも兼ねて設置された。われわれはまず、この R950 による記録の解析を行なった。

再生のために TEAC 社製データレコーダ R410 を用いた。R950 の記録速度は 0.06 in/s、R410 の再生速度は 3 in/s とした。したがって 50 倍の速度比である。

2.1 各種のデジタルフィルタによる検出

まず、主通過周波数を 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 Hz (このような周波数を選んだ理由については後述する) と変化させて地震波の検出を行なってみた。結果の一部を表 1 に示す。この表の FR の行が主通過周波数である。フィルタの特性を前報告の記号を用いて書くと表 2 のようになる。

前報告において述べたように、コンピュータや磁気テープの速度の制約から、AD 変換のサンプリングタイムを 500 μ s より早くすることはできない。実時間換算ではこの 50 倍の 25 ms、すなわち 40 Hz である。不完全積分後の値と比較して地震であるとするための判定値としては、あらかじめ若干の試行をした後、明らかにノイズと思われるものが地震と判定されないように適当に定めた。表 1 の BOUND の行がこの判定値である。表 1 の最左端は、不完全積分後の値が判定値より大きくなった時刻 (図 1 の A 点)、各周波数の列の左端は A 点の時刻の秒値、中央は図 1 の AB 間での不完全積分値のピーク値、右端は AB 間の時間 (秒) を示している。なお、DURATION の行の秒数より AB 間の時間が短いものはノイズとみなしこの表に示していない。

表 3 は同じ岩槻の観測所のすず書き記録を用い、視察により求めた地震到着時刻を示す。右端には、表 1 のデータから対応するものを抽出し、その主通過周波数を求めて記してある。不完全積分後の値が判定値より大きくなる時刻は地震到着時刻より遅いので若干のズレがある。表 1 の \surd 印を付けたものが地震である。

表 3 すず書き記録から求めた地震の表 (1)

日	時	分	秒	$F-P$ (sec)	表 1 の FR	$P-P$ (mm) (10.3 μ kine/mm)	$S-P$ (sec)
5/30	20	02	25.5	—		2.	10.
	30	34	16.5	110	2.5, 3.5, 4.5, 5.5	*	14.6
	30	21	32.0	—		1.5	8.
	30	22	08	44.4	5.5	2.9	9.5
	30	22	18	56.1	2.5, 3.5, 4.5, 5.5	2.7	23.3
	30	23	58	18.7	2.5, 3.5, 4.5, 5.5	11.0	17.2
	31	01	00	15.3		1.5	5.9
	31	01	06	43.9	5.5	1.5	7.1
	31	01	32	24.0	3.5, 4.5, 5.5	2.8	8.
	31	02	30	06.1	2.5, 3.5, 4.5, 5.5	4.5	12.6
	31	02	44	39.0	5.5	2.	27.5
	31	02	52	20.2	2.5, 3.5, 4.5, 5.5	5.0	12.8

表 1, 表 3 から次のことが分かる.

(1) 表 1 のように判定値を定めると, 振幅が非常に小さい地震の若干個を検出することができない. 判定値を十分に小さくすると, 多量のノイズ的なデータを地震と判定してしまう.

(2) ノイズ的なデータが相当多く検出されるけれども, デジタル化後のデータ記録量は全体の約 50% になっている. 昭和 48 年 5 月 30 日から 31 日までのすべてのアナログ記録をデジタル化すると, 2,400 ft のデジタル磁気テープ 3 本となるが, 表 1, 表 2 の各パラメータを持つフィルタにより検出された部分だけをデジタル磁気テープに納めると約 1.5 本となった.

表 1 に示されているように, ノイズを多く検出しているのは 5.5 Hz のフィルタである. このフィルタは振幅の小さな地震を検出するために必要なのであるが, もしこのフィルタの判定値 (BOUND) を 3,000 とすると, デジタルデータの記録量は 20% に減少する.

2.2 昼夜のノイズ周波数の相異

表 1 の結果は期待していたほど良いものではない. すなわち, フィルタの検出力はあまり良くない. この原因を調べるため, まず, 各フィルタごと, 各時間帯ごとに, 図 1 の AB 間の時間の和を求めてみた. 結果は表 4 のようになる.

主通過周波数が 2.5 Hz の場合には, 夜中の 4 時, 5 時あたりの割合が他の時間帯にくらべて大きい. 他, 別のフィルタの場合には, 昼間帯の割合が相対的に大きい. (この計算においては, 判定値を上下すると時間の和が異なるので, 時間帯の相対的比較しか意味がない.) すなわち, 夜中は 2.5 Hz 付近のノイズが比較的卓越しており, 昼間はより高周波のノイズが比較的卓越しているわけである.

このようなノイズが何によるものであるかは未調査であるが, 2.5 Hz 付近はグラウンドの

表 4 デジタルフィルタによる検出の相異 (R950)

DAY HOUR	2.5 HZ	3.5 HZ	4.5 HZ	5.5 HZ
30 1	5.00	1.50	5.30	440.90
30 2	123.47	21.40	49.77	537.87
30 3	544.72	38.32	35.52	807.62
30 4	1064.95	129.33	62.27	833.15
30 5	1711.40	352.22	42.35	1019.52
30 6	1128.35	212.65	32.42	1022.07
30 7	589.67	142.35	60.00	1219.00
30 8	558.92	551.45	244.70	2355.75
30 9	957.65	1140.00	380.75	2499.57
30 10	904.35	1180.87	383.57	2721.77
30 11	942.95	1010.00	453.75	2365.92
30 12	845.95	594.80	283.52	1440.17
30 13	1046.07	1054.22	330.35	2181.00
30 14	486.45	684.57	347.77	2384.47
30 15	408.45	547.20	358.42	2481.90
30 16	372.80	528.07	291.87	2245.90
30 17	89.75	142.70	62.20	1868.77
30 18	52.12	38.42	26.87	1092.05
30 19	122.07	69.10	85.47	1140.95
30 20	114.82	97.27	83.82	738.10
30 21	25.00	4.67	0.	380.85
30 22	16.20	20.25	23.35	468.12
30 23	61.75	51.55	55.25	535.87
31 0	0.08	0.	0.	402.00
31 1	7.62	2.40	10.87	425.85
31 2	236.15	35.55	39.10	417.05
31 3	523.27	2.12	5.12	533.47
31 4	1708.97	40.07	25.70	764.02
31 5	2140.02	447.57	76.15	1268.47
31 6	1354.62	429.30	56.32	1278.37
31 7	341.82	238.42	85.35	1775.67
31 8	767.02	752.40	627.17	3280.65
31 9	1453.40	1784.20	1271.95	3404.65
31 10	1418.32	1766.30	1154.47	3434.32
31 11	1370.22	1893.10	1349.75	3431.12
31 12	923.22	724.60	321.15	3053.00
31 13	1389.22	1406.15	1111.52	3487.40
31 14	904.90	1324.47	1129.52	3470.52
31 15	714.50	1070.22	721.17	3298.32
31 16	537.02	568.17	539.72	3348.87
31 17	197.22	242.35	258.20	3050.10
31 18	87.35	52.00	35.92	2780.60
31 19	47.95	20.90	25.60	2722.72
31 20	22.70	13.05	34.07	1938.55
31 21	16.95	0.50	7.62	1530.60
31 22	35.20	36.42	34.12	1720.75
31 23	6.95	3.17	4.05	1265.27

28428.65 21538.42 12654.02 84886.45

基本的な振動, 5.5 Hz 付近は岩槻観測所近くの工場による振動, 国道を通る自動車によるもの(これを今後, 生活雑音と称する)などである疑いが強い. 2.5 Hz 付近がグラウンドの基本的な振動であるとするれば, 昼間でも混入しているはずであるが, 他の周波数が卓越しているため明りようにはみえないものと思われる.

2.3 パワースペクトルの分析

ノイズと地震波との関係をさらに明らかにするため, パワースペクトルの計算を行った. 典型的な地震, 振幅の小さな地震, 4~5 時ごろのノイズ, 昼間のノイズのパワースペクトルを図 2 (1)~(4) に示す. また, それぞれのペンレコーダによる出力カーブが図 3 (1)~(4) である. (時刻は図に付記してある.)

図 2 をみてわかるように, 4, 8, 16 Hz 付近に顕著な線スペクトルのピークがある. 実は, R950 による計測値の解析を始める前に試みに 1~2 か所のパワースペクトルを求めたとき, 4, 8, 16 Hz に同じようなピークがあったので, フィルタの主通過周波数を, 3, 4, 5 Hz などとすることを避けたのである.

このノイズの原因は未調査であるが, 下記のことから R950 に記録するとき混入したものである疑いが大きい.

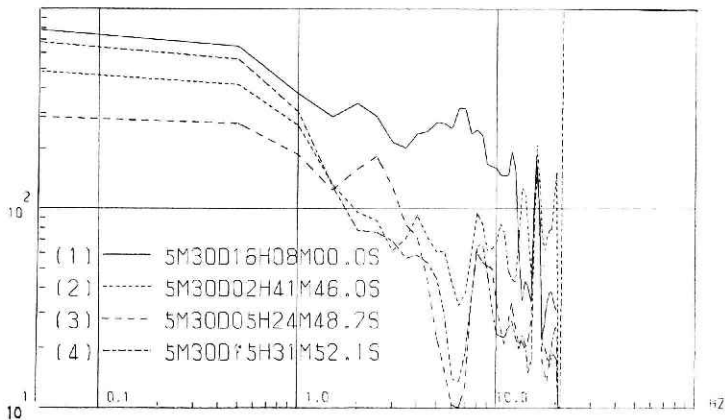


図 2 R950 記録のパワースペクトル (岩槻)

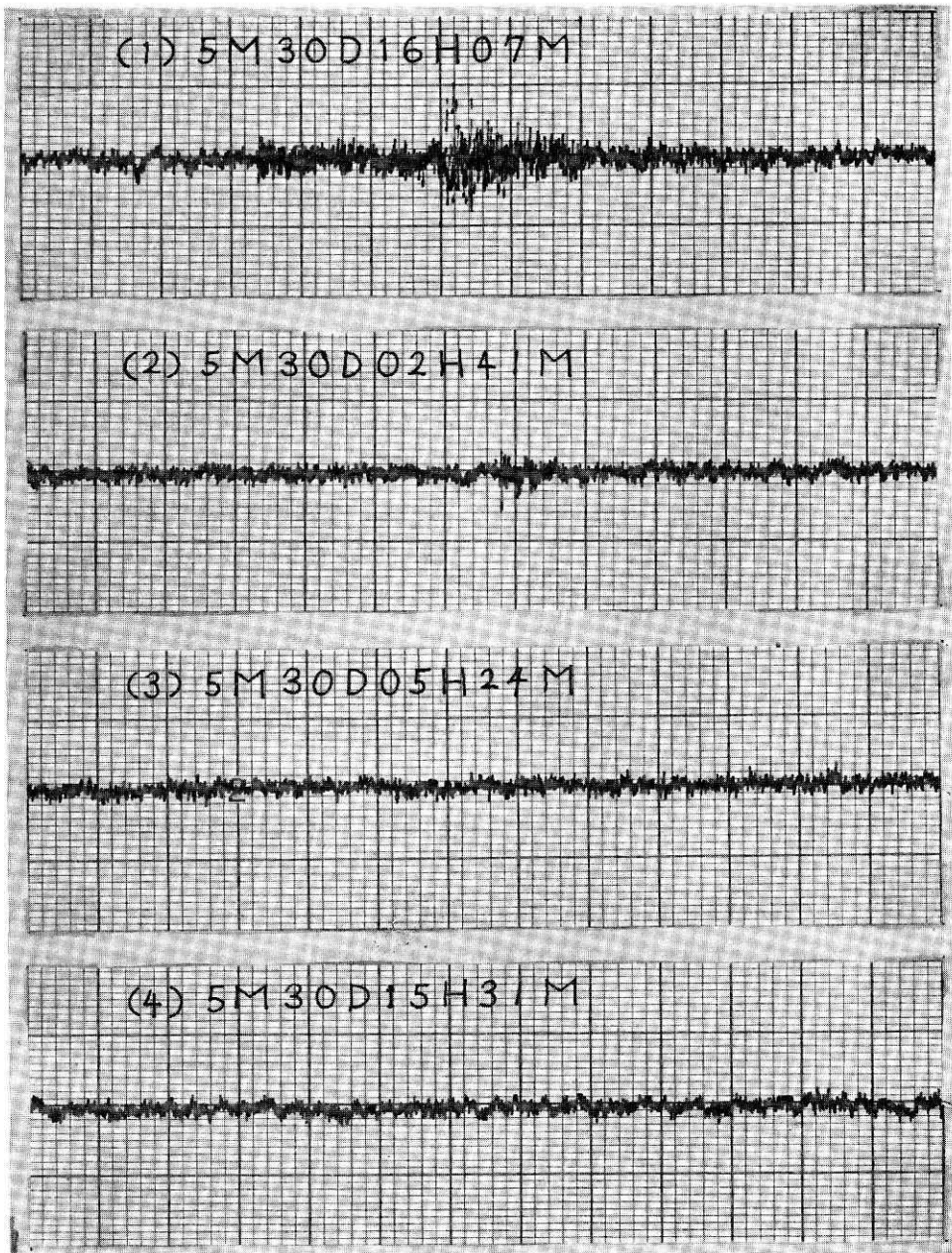


図3 R950 記録のペンレコーダによる表示

(1) R950 は嶺岡の観測所にも設置されている。この計測値についてのパワースペクトル(図4)をみても、4, 8, 16 Hz のピークは明りょうである。

(2) 岩槻の観測井には、地震の振幅の大きさをトリガにして記録する装置も設置されている。記録側のデータレコーダは TEAC 社製の R510 と同じものである。R510 を用いて再生しデジタル化してパワースペクトルを求めたものが図5である。4, 8, 16 Hz のピーク

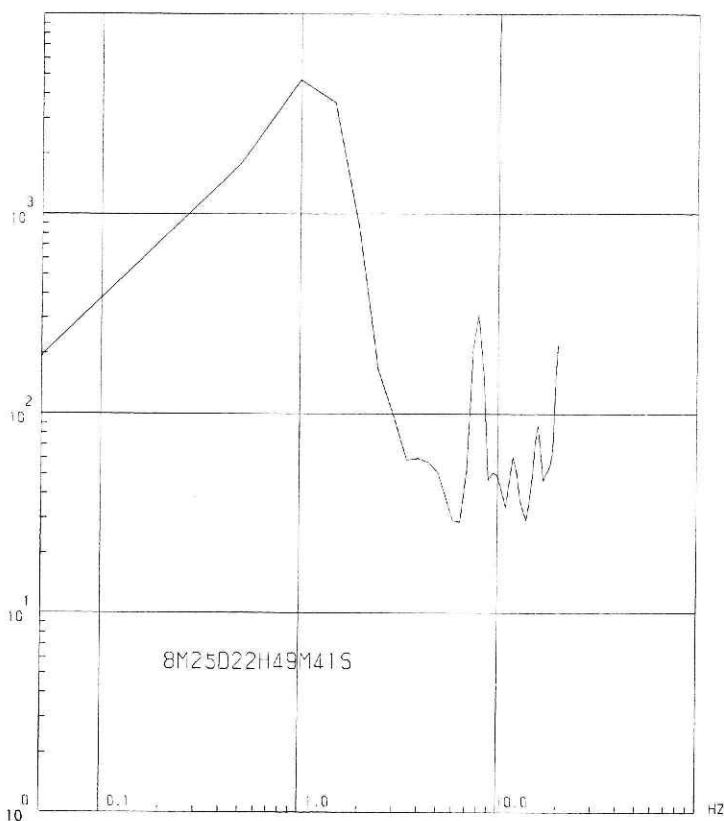


図4 R950 記録のパワースペクトル (嶺岡)

クは見られない。

(3) 後述するように、岩槻に R950 の後設置された長時間記録計 (R922) による計測値のパワースペクトルにも 4, 8, 16 Hz のピークはない。

2.4 ま と め

われわれの検出方法によれば、比較的大きな地震すなわち振幅の大きなものは不完全積分後の値が大きくなるので容易に検出できる。したがって問題は振幅の小さな地震である。

グラウンドの基本的振動だけの場合のパワースペクトルは図6 (イ) のようになると考えられる。これに対して、振幅が大きな、あるいは非常に小さい地震をのぞいた普通の地震のパワースペクトルは図6 (ロ) のように高周波分がすこし大きくなるものと思われる。しかし、実際は生活雑音や記録計からと思われる 4, 8, 16 Hz のノイズが混入しているので、図7 (イ), (ロ) のように両者のパワースペクトルの形が似てしまうので、検出が非常に困難になるのである。

また、現在のサンプリング間隔が 25 ms であるため、10 Hz 付近で1周期あたりのサンプル数が4個程度になってしまうことも検出を困難にする一つの原因である。

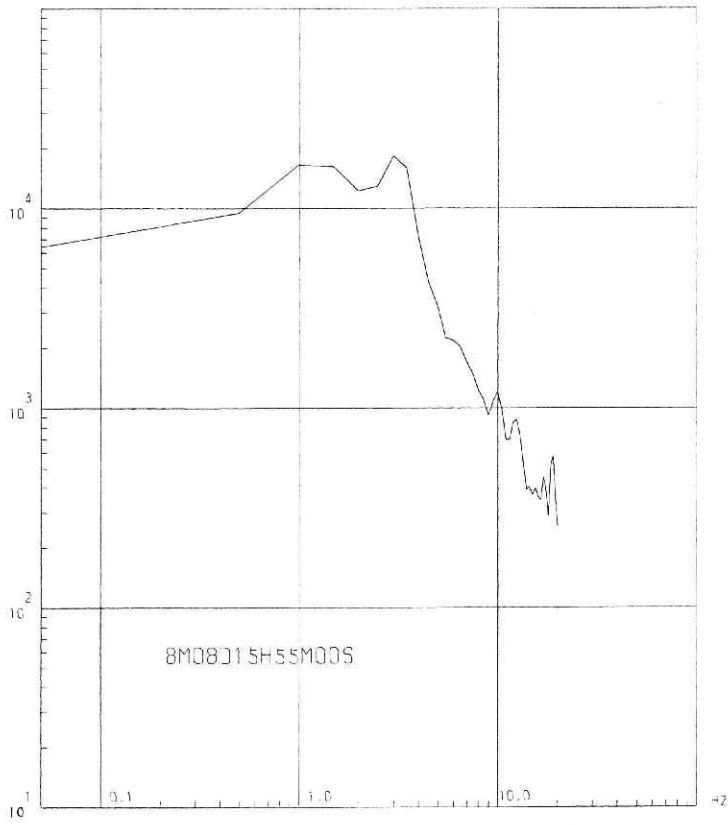


図 5 R510 記録のパワースペクトル (岩観)

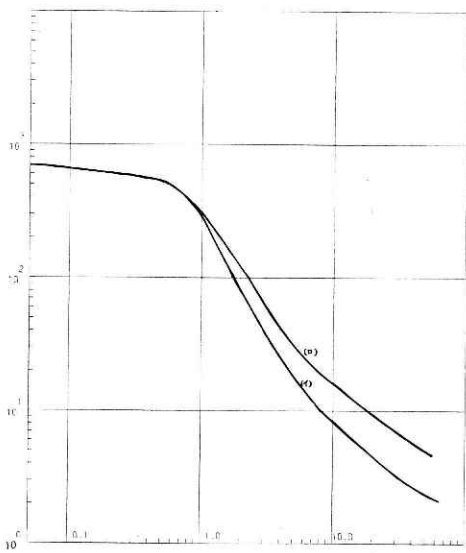


図 6 地震・ノイズのパワーの概念図 (1)

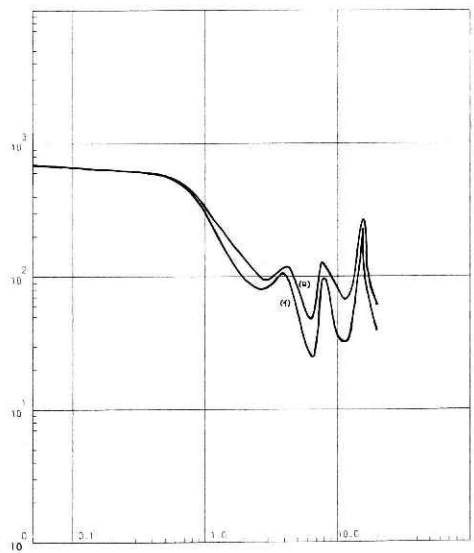


図 7 地震・ノイズのパワーの概念図 (2)

結局, さらに検出力を上げるには, 次のことを行なう必要があることになる.

- (1) 生活雑音を地下の地震計に伝えないようにする.
- (2) 記録計からと思われる, 4, 8, 16 Hz のノイズを除去する.
- (3) デジタル化の際のサンプリング間隔を縮める. あるいは記録速度を上げる.

もちろん, 現状のままでも, アナログフィルタ回路の改良や後述するパワースペクトルの形による判定などの工夫により, 検出力をより一層あげることは可能であろうが,

(i) 地下の地震計に生活雑音が伝わるのを少しでもすくなくするように, 観測井内にカゴ状のしゃ断物を置くことになった.

(ii) R950 は岩井の観測所に移され, 岩槻には従来型 (後述の R922) の長時間記録計が設置された.

このことから, R950 による観測データの解析を一時中止し, 従来型 (R922) の長時間記録計による観測データの解析を行なうことにした.

3. 従来型の長時間記録計による計測値の解析

R950 にかわって岩槻に設置された従来型の長時間記録計 (以下 R922 という) による計

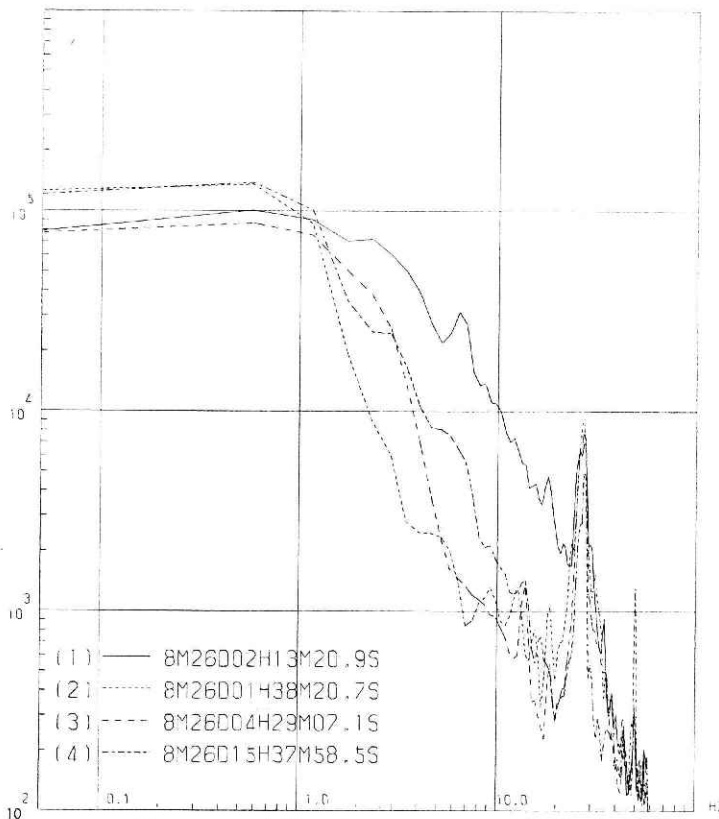


図 8 R922 記録のパワースペクトル (岩槻)

表 5 R922 記録を用いた検出結果 (日曜)

EPI DURATION	1.5 4000		6.5 18000		10.5 9000		2.5 2.5					
	5000	4.0	5.0	2.0	5.0	2.0	5.0	2.0				
260 14H 41M	*33.5	65379	17.7	0.75	*32.5	34274	21.4	0.75	6.0	10542	4.9	0.89
260 14H 41M	6.8	51504	5.4	0.93	-	-	-	-	*31.8	17633	21.7	0.74
260 14H 42M	-	-	-	-	-	-	-	-	*5.7	11891	13.0	0.88
260 14H 42M	*7.4	48805	5.7	0.75	*3.4	34385	20.8	0.79	32.5	5829	2.1	0.83
260 14H 57M	10.8	51549	4.1	0.83	-	-	-	-	*2.1	22392	21.1	0.75
260 14H 57M	51.5	48402	6.3	0.86	-	-	-	-	-	-	-	-
260 15H 0M	-	-	-	-	-	-	-	-	9.2	10687	4.4	0.83
260 15H 15M	51.3	48129	4.9	0.88	-	-	-	-	4.1	10223	3.1	0.84
260 15H 18M	*31.2	416209	82.1	0.61	*29.9	197930	87.2	0.62	*28.9	99587	83.0	0.60
260 15H 18M	-	-	-	-	-	-	-	-	54.7	10909	6.1	0.85
260 15H 37M	76.4	50713	8.3	0.89	34.4	20193	2.6	0.84	17.1	10223	2.5	0.95
260 15H 37M	*3.5	58506	14.6	0.84	*58.5	34186	22.0	0.82	*59.1	13171	15.2	0.81
260 15H 40M	20.5	42366	4.0	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-
260 15H 51M	2.8	56982	7.9	0.84	-	-	-	-	-	-	-	-
260 16H 7M	*55.0	51777	8.9	0.74	*46.2	46938	62.6	0.70	*44.5	28483	75.5	0.71
260 16H 48	*11.5	80813	40.0	0.81	-	-	-	-	1.5	11298	6.9	0.89
260 16H 5M	-	-	-	-	-	-	-	-	*7.0	37873	28.3	0.60
260 16H 11M	*13.0	10856	19.3	0.58	*13.1	75768	20.6	0.59	59.0	11267	4.4	0.84
260 16H 20M	95.1	44610	4.7	0.89	-	-	-	-	-	-	-	-
260 16H 27M	8.0	47960	4.4	0.91	-	-	-	-	*11.1	12873	47.1	0.04
260 16H 27M	13.8	46686	5.8	0.92	*11.4	219890	49.1	0.04	*2.5	11876	4.1	0.72
260 16H 35M	*15.4	120757	30.7	0.02	-	-	-	-	*29.5	37865	31.9	0.55
260 16H 37M	-	-	-	-	-	-	-	-	29.5	5853	2.2	0.87
260 16H 41M	2.0	52086	6.3	0.91	*59.4	38241	15.4	0.47	*54.2	10188	2.1	0.76
260 16H 43M	*59.3	54859	9.0	0.35	-	-	-	-	*30.0	9620	5.6	0.72
260 16H 44M	7.3	48708	4.9	0.82	*47.8	25703	10.9	0.80	*59.2	23004	25.9	0.43
260 16H 59M	*62.5	52056	5.3	0.72	-	-	-	-	-	-	-	-
260 17H 0M	6.7	44381	4.1	0.85	*0.0	31945	18.9	0.89	-	-	-	-
260 17H 1M	-	-	-	-	29.4	24346	7.0	0.89	15.0	10685	3.4	0.87
260 17H 2M	*5.7	57656	13.7	0.55	*15.0	22132	10.0	0.87	8.2	15689	9.7	0.75
260 17H 32M	-	-	-	-	-	-	-	-	30.2	9636	3.5	0.88
260 17H 34M	-	-	-	-	-	-	-	-	*13.1	81140	63.8	0.72
260 17H 43M	-	-	-	-	14.1	24745	6.4	0.82	*21.9	10782	3.9	0.74
260 17H 51M	*12.9	323949	72.7	0.72	-	-	-	-	*51.9	40305	38.9	0.79
260 17H 54M	-	-	-	-	*52.6	166670	87.5	0.79	25.2	10473	2.5	0.87
260 17H 58M	82.6	45671	4.0	0.88	-	-	-	-	36.6	9731	2.2	0.82
260 18H 15M	*21.6	46871	97.8	0.71	-	-	-	-	*21.5	9523	2.0	0.74
260 18H 47M	31.1	58827	9.2	0.86	-	-	-	-	*26.3	11258	4.1	0.86
260 18H 53M	-	-	-	-	*37.0	36906	23.8	0.68	*36.2	10653	6.0	0.78
260 18H 55M	*30.6	65086	15.5	0.67	-	-	-	-	*36.2	1868	30.0	0.72
260 19H 28M	-	-	-	-	-	-	-	-	*18.1	9989	3.5	0.79
260 19H 29M	*44.8	65988	15.9	0.74	*42.8	39753	22.2	0.74	29.6	9834	2.9	0.86
260 19H 29M	-	-	-	-	-	-	-	-	*40.7	16385	20.7	0.71

表 6 表 5 におけるデジタルフィルタの特性

FR	3.5	6.5	10.5
TA	0.07	0.07	0.06
TB	1.0	1.0	1.0

測値の解析の場合、再生には R510 を用い、再生速度を $1\frac{1}{8}$ in/s とした。記録時の速度が 0.218 in/s であるから約 8.6 倍の速度比である。また、デジタル化の際のサンプリング間隔はプログラムの便宜上、R950 と同じく $500\ \mu\text{s}$ とした。

実時間ではこの 8.6 倍の約 4.3 ms (約 250 Hz) ということになる。

3.1 パワースペクトルの分析

図 2 に対応するものが図 8 である。すなわち、(1) 典型的な地震、(2) 小さな地震、(3) 4~5 時ごろのノイズ、(4) 昼間のノイズである。2.5 Hz 付近のグラウンドの基本的振動と考えられるノイズ、5.5 Hz 付近の生活雑音は R950 の場合と同じように見ることができる。しかし、4, 8, 16 Hz のノイズは存在しない。かわりに 27.9 Hz および 50 Hz 付近のノイズが顕著である。これらのノイズが何によるものか未調査であるが、十分に高周波であり、われわれの検出方法にとって妨げとならないので今後問題にすることはしない。

後でくわしくふれるが、4~5 時ごろでは 2.5 Hz 付近、昼のノイズでは 5.5 Hz 付近が比較的優勢であり、振幅の大きな地震のパワースペクトルは、低周波から高周波部への落ち方の傾斜が他のものにくらべてゆるやかであること、などが図 8 をみてわかる。

3.2 各種のデジタルフィルタによる検出

R922 の場合のサンプリング間隔は 4.3 ms (実時間換算) であり、しかも優勢なノイズは 5.5 Hz や 27.9 Hz 付近であるので、デジタルフィルタの主通過周波数として 6.5 Hz 以上のものを選ぶことができる。主通過周波数として、3.5, 6.5, 10.5 Hz の三つを選び検出した結果の一部を表 5 に示す。フィルタの特性は表 6 に示されている。また、表 5 のレ印のものは地震である。

表 5 と対応する期間におけるすす書き記録から求めた地震の表 (表 7) から、次のことがわかる。

(1) ノイズ的データがまだ検出されている。しかし、R950 の場合 (表 1) にくらべて少ない。磁気テープのデジタル記録量は 5% で、5.5 Hz のフィルタの判定値を 3,000 としたときの R950 にくらべても約 4 分の 1 になっている。

(2) このテストのかぎりでは、すす書き記録から求めた地震をほとんどすべて検出している。しかも、不完全積分のピーク値、判定値より大きい時間 (図 1 の AB の長さ) も、ほとんどのものがノイズにくらべて大きい。

3.3 日曜日と他の曜日との比較

解析に用いた R922 の記録は、たまたま日曜日 (8 月 26 日) を含んでいた。そこで、2.2 項の昼夜の比較 (表 4) と同じように、日曜日と他の曜日との比較を行なってみた。結果が表 8 である。予想どおり、日曜日は 2.5 Hz が優勢である。自動車が少なく工場も休みのた

表 7 すす書き記録から求めた地震の表 (2)

日	時	分	秒	$F-P$ (sec)	表 5 の F R	$P-P$ (mm) (10.3 μ kine/mm)	$S-P$ (sec)
8/26	14	41	29.7	120	3.5, 6.5, 10.5	2.5	—
26	14	49	01.5	20	10.5	2.5	—
26	14	59	58.6	5	10.5	1.0	—
26	15	18	28.4	100	3.5, 6.5, 10.5	7.0	27.0
26	16	07	42.2	85	3.5, 6.5, 10.5	2.5	31.6
26	16	23	58.2	40	3.5, 6.5, 10.5	4.5	15.2
26	16	35	10.5	55	3.5, 6.5, 10.5	23.0	7.7
26	16	43	48.0	35	3.5, 6.5, 10.5	3.5	10.8
26	16	58	40.8	20	10.5	2.5	6.5
26	17	01	58.7	30	10.5	3.0	5.5
26	17	14	44.2	70		2.5	—
26	17	32	19.2	25	6.5	1.0	8.3
26	17	43	03.2	15	10.5	1.5	4.3
26	17	53	12.6	75	3.5, 6.5, 10.5	13.0	8.8
26	17	53	55.5	25		3.0	5.5
26	18	45	49.8	130	3.5, 6.5, 10.5	8.0	29.3
26	19	26	18.8	60	3.5, 6.5, 10.5	2.5	19.3
26	19	29	12.3	65	3.5, 6.5, 10.5	2.0	27.4

日	時	分	秒	$F-P$ (sec)	表 5 の F R	$P-P$ (mm) (10.3 μ kine/mm)	$S-P$ (sec)
8/27	18	01	27	37	3.5, 10.5	—	—
27	18	03	00	27	3.5, 6.5, 10.5	—	—
27	18	29	50	20	3.5, 6.5, 10.5	—	—
27	19	31	04	100	3.5, 6.5, 10.5	—	—
27	19	58	00	55	6.5, 10.5	—	—
27	20	54	24	110	3.5, 6.5, 10.5	—	—
27	21	06	17	10		—	—
27	21	08	55	5	6.5, 10.5	—	—
27	21	28	23	100	3.5, 6.5, 10.5	—	—
27	21	36	31	80	3.5, 6.5, 10.5	—	—

めであると考えられる。

さらに、図9は、主通過周波数を10.5 Hzとしたときの不完全積分後の値をペンレコーダに表示したものである。日曜日(1)とその他の曜日(2)との相異は著しい。

以上のことから、日曜日以外の日についての検出結果(表9)には表5の場合より相当多くのノイズがはいってしまっている。デジタル記録量は約50%である(表9に対応する期間の、すず書き記録から求めた地震の表は表7にある。)

3.4 パワースペクトルの形を用いた検出の試み

日曜日のデータによる検出結果(表7)においても若干のノイズが混入している。そこでさらに、パワースペクトルの形によって地震とノイズを分離することを試みた。地震、ノイズともに、そのパワースペクトルの形がいろいろと異なっているので分離は困難であったが、多くの試行錯誤の結果、次のような判定基準によって非常に良く分離できる見通しを得た。

- (i) まず、主通過周波数を3.5, 10.5(あるいはさらに6.5)として、検出回路を通過させる。このとき同時にAD変換を行なってしまう。
- (ii) 検出回路を通過したもののうち、図1のAB間の時間が10秒以上のものは地震とみなし、逆に2秒に満たないものはノイズとみなす。
- (iii) AB間の時間が2秒から10秒のものについては、AB間のデータを使ってパワースペクトルを求め、図6(ロ)のようにパワースペクトルの傾斜がゆるやかなものは地震、(イ)のように鋭いものはノイズとみなす。(この判定基準の詳細については付録において述べる。)

このような判定方法によって最終的に地震と判定されたものは、表5と表9の*印を付したものである。これと表7とを比較すると、(このデータの範囲内では)ほとんど完全に地震とノイズの分離ができたことがわかる。(表5, 表9において∨印を付したものが地震である。)

表8 デジタルフィルタによる検出の相異 (R922)

DAY	HOUE	2.5 HZ	3.5 HZ	6.5 HZ	10.5 HZ
25	19	162.84	123.56	187.93	86.41
25	20	117.63	132.44	353.93	267.20
25	21	90.54	52.57	124.01	5.85
25	22	23.82	36.08	75.33	63.29
25	23	167.17	71.47	1.61	13.78
26	0	276.00	315.94	274.75	262.39
26	1	8.64	8.15	18.58	32.06
26	2	220.81	194.73	178.86	207.73
26	3	284.57	1.27	3.01	3.93
26	4	526.26	50.89	41.52	51.60
26	5	750.16	192.67	83.53	70.58
26	6	416.18	143.95	32.10	27.86
26	7	293.15	41.00	2.45	12.73
26	8	350.79	116.19	18.81	37.75
26	9	497.23	485.81	89.63	85.40
26	10	409.23	464.51	150.80	182.41
26	11	127.80	586.34	90.04	116.62
26	12	305.34	132.69	94.58	105.37
26	13	138.70	235.36	128.35	111.41
26	14	211.22	317.90	174.00	207.84
26	15	137.94	186.49	116.72	114.55
26	16	139.19	200.36	162.75	213.61
26	17	78.71	105.70	103.74	117.93
26	18	96.17	117.69	90.08	99.29
26	19	33.40	81.73	86.92	109.43
26	20	194.45	200.23	187.31	178.56
26	21	32.46	63.08	80.24	134.12
26	22	31.55	36.40	67.60	98.86
26	23	100.88	119.52	160.52	138.63
27	0	20.17	24.17	28.98	104.15
27	1	81.79	10.66	14.34	19.91
27	2	723.58	181.87	154.63	153.79
27	3	1433.06	70.91	6.73	0.
27	4	2518.47	329.19	90.06	86.37
27	5	2862.34	1047.09	0.	5.85
27	6	2342.77	1155.22	5.93	7.48
27	7	1078.70	726.85	3.93	16.38
27	8	2265.30	2652.07	244.99	634.34
27	9	2937.27	3384.61	1019.50	1201.77
27	10	2501.56	3345.51	1033.23	1253.32
27	11	336.98	462.08	112.32	72.61
27	12	0.	0.	0.	0.
27	13	0.	0.	0.	0.
27	14	2322.04	2678.62	806.23	1112.97
27	15	962.43	1575.44	225.01	358.44
27	16	1424.10	1750.36	508.69	568.62
27	17	1156.78	1476.58	513.23	572.18
27	18	340.31	34.51	62.93	124.31
27	19	375.37	151.83	56.22	94.62
27	20	221.15	137.69	51.06	50.79
27	21	463.61	1234.78	221.92	222.57
27	22	89.43	2962.74	25.91	51.90
27	23	52.20	1835.36	3.81	13.63
28	0	35.30	27.05	9.42	32.57
28	1	89.96	5.31	7.74	23.61
		35284.30	31911.40	8395.73	9895.74

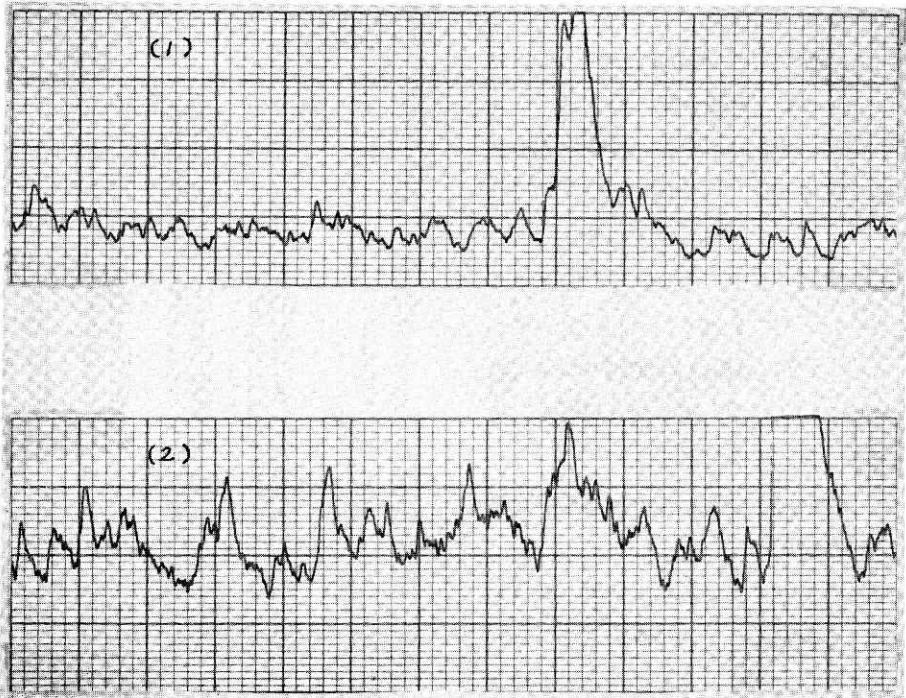


図 9 不完全積分後の値 (10.5 Hz) の曜日の比較

表 5 の 3.5 Hz の列で、26 日 16 時 7 分と 26 日 16 時 8 分の行に * 印が付いているが、後者は前者の続きとみなしてよい。また、いずれかのフィルタにより地震と判定されたものが、図 1 の AB 間の前後適当な時間を含めて一つの地震としてデジタル磁気テープに記録される。このように地震やノイズの記録の数をかぞえることにすると、表 5 の期間内でノイズであるのに地震と判定されたものは 7 個になる。(ただし、小さな地震をノイズと判定してしまう場合もある。(26 日 14 時 59 分 59 秒, 26 日 17 時 32 分 19 秒))

日曜日以外の場合 (表 9)、ノイズを地震と判定した数は 9 個である。すなわち、この新しい判定法を用いると、日曜日以外の場合も比較的良好な結果が得られることになる。

表 5、表 9 には、パワースペクトルの傾斜値も示してある (各周波数の列の右端) が、図 1 の AB 間の時間が 10 秒以上のもので傾斜値が 0.8 を超えるものは少ない。表 5 では 16 個中 3 個、表 9 では 12 個中 4 個であり、しかもこの 7 個はすべてノイズである。したがって、「AB 間の時間が 10 秒以上のものを地震とする」という判定法を削除し、「2 秒以上でしかもパワースペクトルの傾斜値が 0.8 以下のものを地震とする」という判定法を採用すると、地震と判定されてしまうノイズは、表 5 では 4 個、表 9 では 5 個に減少する。

もっと多くのサンプルについて調査する必要があるけれども、パワースペクトルの傾斜値による判定法は非常に良い方法であると考えられる。ただし、不完全積分後の値が大きくなった部分についてだけパワースペクトルを求め判定するという所が一つのキーポイントであ

って、不完全積分後の値が小さい部分のパワースペクトルを用いる、すなわち、パワースペクトルの傾斜だけを用いて地震とノイズを分離することは非常にむずかしいのである。いろいろと試みたが、現在までのところ成功したとはいえない。

なお、0.5 Hz~3 Hz のような比較的長周期の地震は判定値をこえる時間が 10 秒以上のものでも、パワースペクトルの傾斜値が大きい。したがって、判定値をこえる時間が 2 秒以上のものについてパワースペクトルの傾斜値を分離基準として採用すると、このような比較的長周期の地震をノイズとしてしまう。10 秒以上を地震とするという判定法を採用したのはこのためである。また、0.5 Hz, 1 Hz などという比較的長い周期の地震も存在するが、これらを検出するためには、主通過周波数 2.5, 1.5 Hz というようなフィルタが必要となるかもしれない。

3.5 ま と め

R922 の場合には、R950 の場合より自動検出についての見通しは明るいことがわかったのであるが、R922 の欠点もある。

(1) 記録、再生の速度比が約 8.6 倍であるので、検出のため R950 の場合にくらべ約 6 倍の時間を必要とする。

(2) 線スペクトル的ノイズは 50 Hz という高周波であり問題ないが、全体的にノイズレベルが R950 にくらべ大きい。

このうち、(1) の欠点は問題であり、できれば R950 を用いることにしたい。再生速度を $3\frac{1}{4}$, 7.5 in/s などとすれば、解析時間は $1\frac{1}{2}$ in/s の場合の $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ となり欠点が緩和されるが、実時間換算のサンプリング間隔が長くなるので再検討が必要である。今後の課題の一つである。

4. P, S 波の判定

検出回路あるいは検出デジタルフィルタによって検出され、磁気テープに記録されたものは地震波であるらしいということがわかっただけのものである。まず、本当に地震かどうかを判定し、次に地震であるならば P, S 波を判別し、それぞれの到着時刻を知らなければならぬ。

この問題についても若干の実験と考察を行なった。コンピュータのプログラムにより、まったく自動的にこれらの仕事を行なうのが理想であるが、非常に困難であるので、今回はペンレコーダや蓄積管型図形表示装置に表示して視察によって求める方法を試みた。

4.1 ペンレコーダによる表示

まず、R950 による記録をペンレコーダに出力した結果 (図 3) を用いてみた。大きな地震の場合には、P, S 波の識別は比較的容易である。時刻も、図 10 のように、一緒に記録されている時計コードとともに拡大してみると判読できる。図 10 の場合は 5 月 30 日 04 時

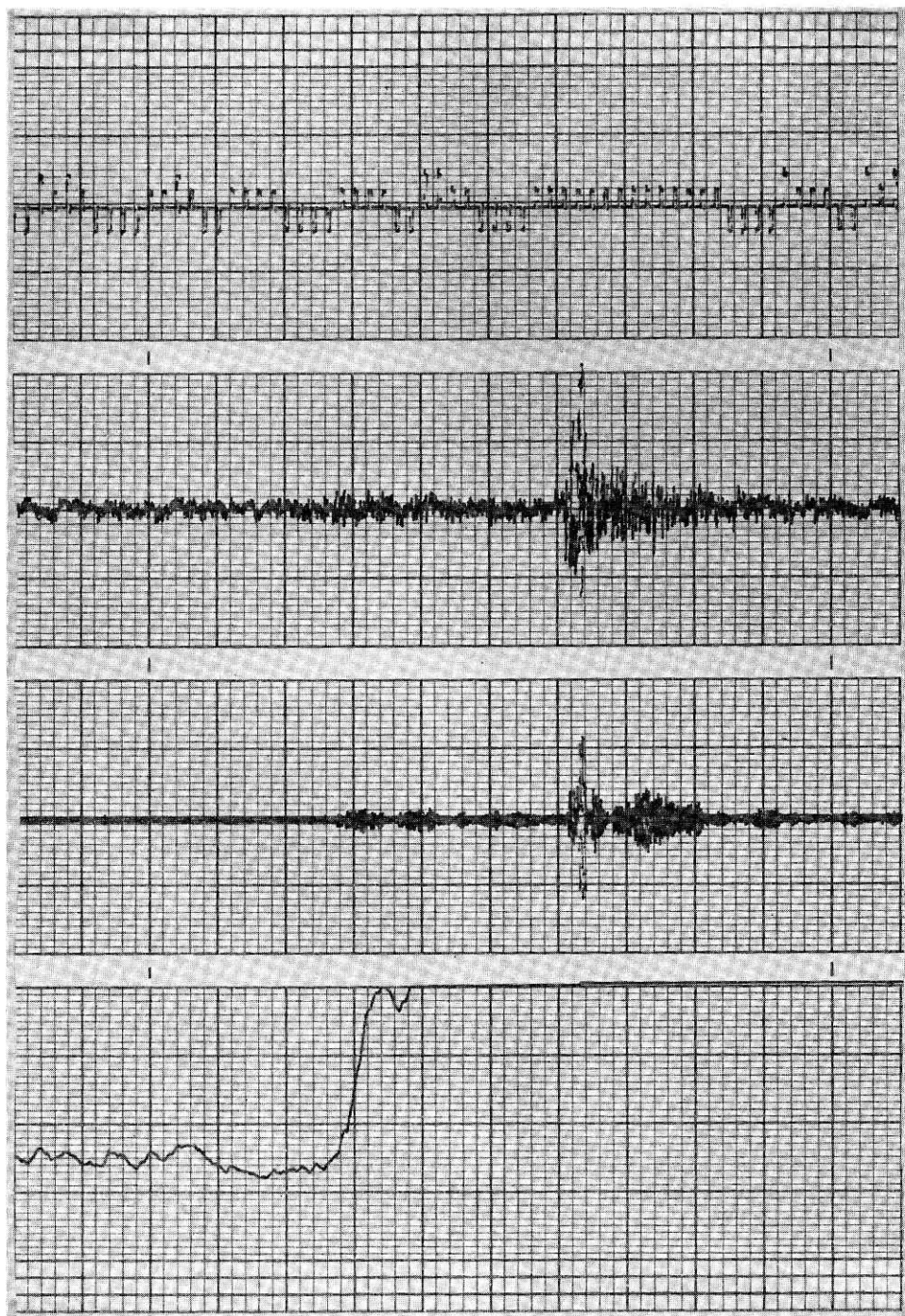


図 10 大きな地震のペンレコーダによる表示 (R950, 拡大)

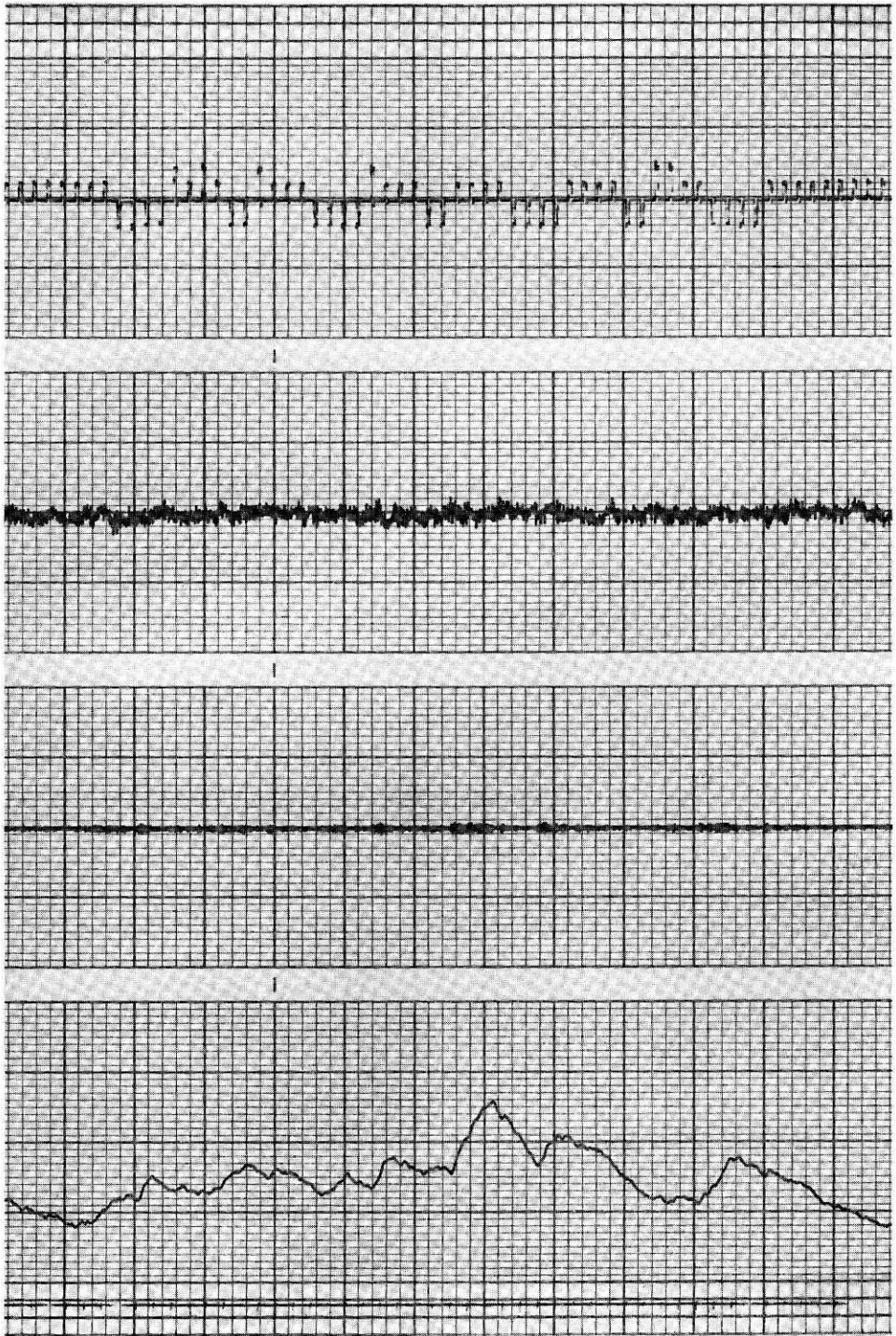


図 11 小さな地震のペンレコーダによる表示 (R950)

50 分 31 秒となり、すす書き記録からの読み取りである、5月30日04時50分30.5秒とほぼ一致する。

一方、小さな地震はノイズと区別しにくく、したがって *P*, *S* の判別もむづかしい (図 11)。図 10, 図 11 において、最上段が時計コード、次が原記録、次がフィルタ通過後、最下段が不完全積分後の値である。(後述の図 13, 図 14 についても同じ。)

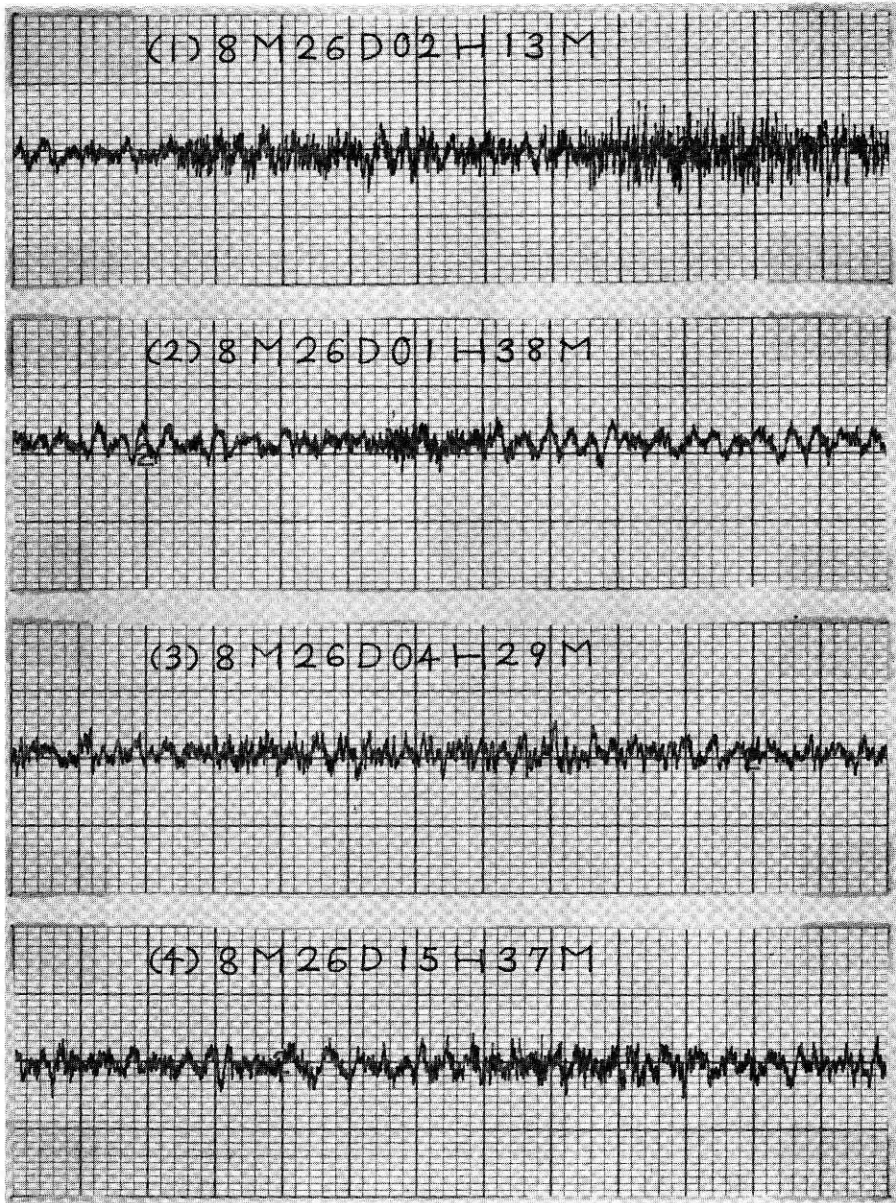


図 12 R922 記録のペンレコーダによる表示

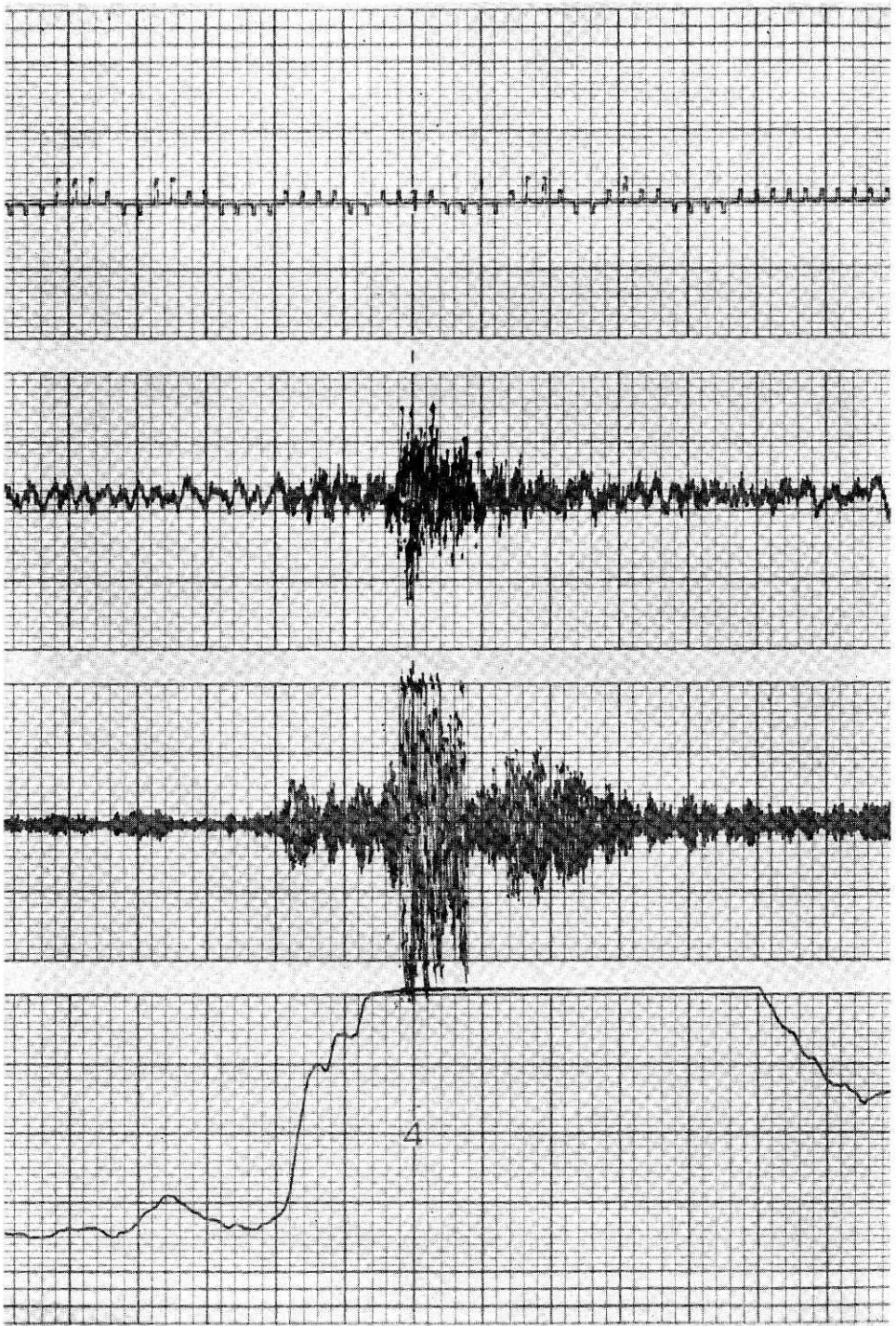


図 13 大きな地震のペンレコーダによる表示 (R922, 拡大)

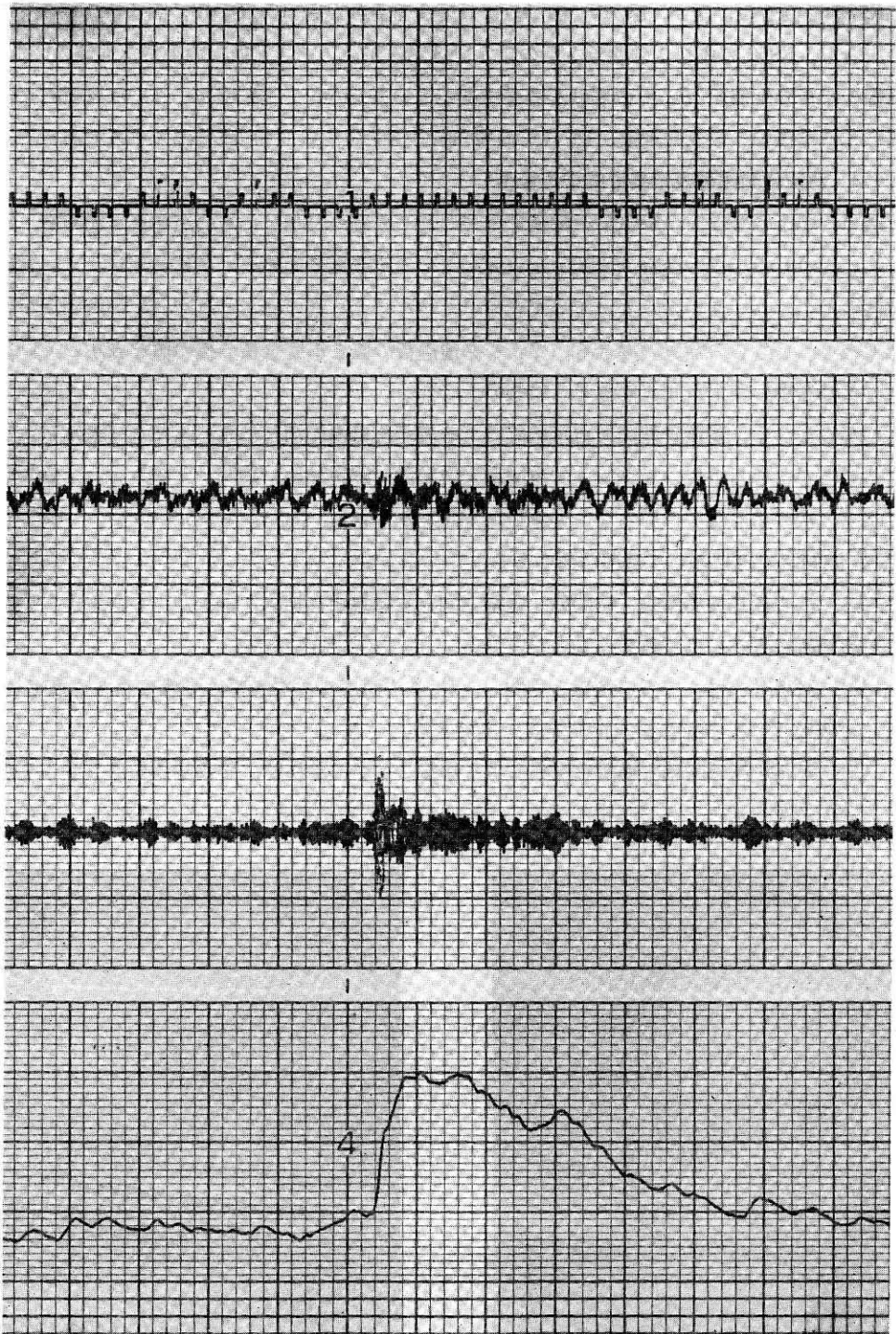


図 14 小さな地震のペンレコーダによる表示 (R922)

R922 の場合の、図 3、図 10、図 11 に対応するものが図 12、図 13、図 14 である。この場合も、R950 の場合より明りょうのようではあるが、ノイズと振幅の小さな地震の区別、振幅の小さな地震の P 、 S の判別が容易であるとは言えない。図 12 の (1) は典型的な地震、(2) は振幅の小さな地震、(3) は 4~5 時ごろのノイズ、(4) は昼のノイズである。

4.2 蓄積管型図形表示装置による表示

図 11 の小さな地震 (R950) を蓄積管型図形表示装置に表示したものが写真 1 である。同じく、図 14 の小さな地震 (R922) を表示したものが写真 2 である。蓄積管型ブラウン管の特性のため、ペン先が太くなってしまうので、ペンレコーダの場合よりも P 、 S の判定が困難である。どちらの写真の場合も、フィルタ通過後の値と不完全積分後の値を表示しているが、これを用いてもうまくゆきそうにない。

しかしながら、蓄積管型図形表示装置による表示を自由に消したり、ふたたび表示したりすることができるので、タブレット型図形入力装置 (渡辺ほか、1975) と組み合わせることにより、次のようないろいろなことを行なうことができる。したがって、ペンレコーダより P 、 S 波判定の道具として有用な面もある。

(1) 波の任意の場所を、時間軸、振幅方向ともに自由に拡大、縮小し、しかもそのいくつかを同時に表示して比較することができる。

(2) 必要ならば、すでに地震と判明し、 P 、 S の時点もわかっている波を並べて表示し、新しい波の P 、 S 判定に役立たせることもできる。

(3) P 、 S 波の開始の場所を視察により知ることができれば、その場所をタブレット型図形入力装置を通してペンで指示することにより、その時刻を知ることができる。この場

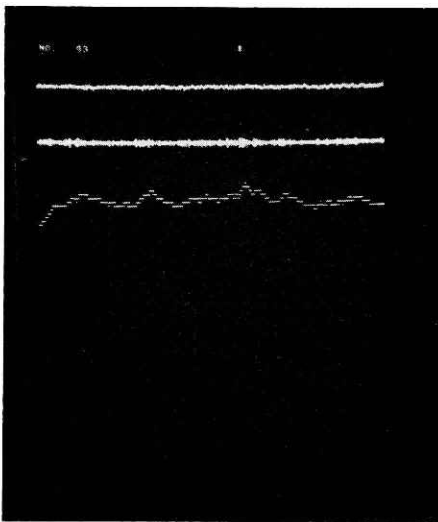


写真 1 小さな地震の図形表示装置による表示 (R950)

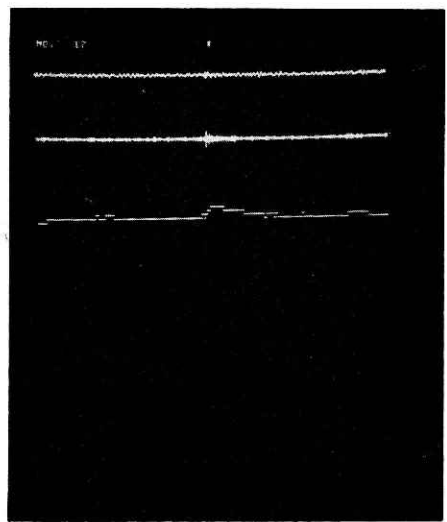


写真 2 小さな地震の図形表示装置による表示 (R922)

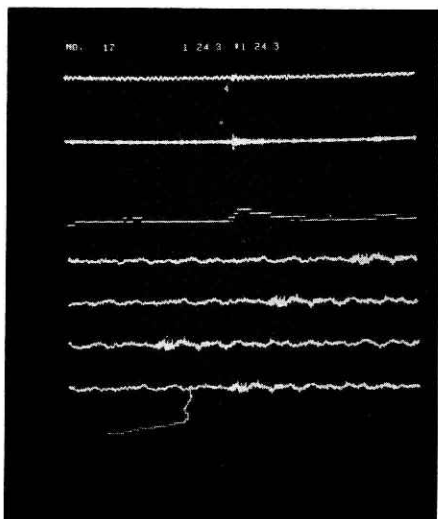


写真 3 拡大・縮小・開始場所の指示

表 10 P 波開始時間の判定値

蓄積管による P 波発現時の判定				すず書き よりの判 定 (秒)
月 日	時	分	秒	
8/26	00	09	03.0	01.7
26	00	17	50.1	52.4
26	00	37	16.4	17.6
26	00	49	05.6	07.5
26	00	53	40.7	38.5
26	00	54	56.7	56.8

合、コンピュータのプログラムを用いて自動的に時刻を知ることができるので、ペンレコーダの場合のように時計コードを視察により調べる必要がない。

そこで、われわれは次のような方法、手順を用いて P、S 波の始まりの時刻を知ること考え、開発している。

(1) 検出回路、検出フィルタによって抽出された波を、その不完全積分後の値とともに写真 1 や写真 2 のように表示する。

(2) この状態で P、S 波の開始の場所がわかれば、(4) の動作を行なう。

(3) P、S 波が判然としないときには、タブレット型図形入力装置を通してペンで範囲を指示し、拡大または縮小の率も指示して、表示する。必要ならば何本でも表示する (写真 3)。

(4) P、S 波の開始の場所がわかれば、図形入力装置を通して、ペンでその場所を指示する (写真 3)。そして、この指示された座標点から、プログラムの働きで時刻を知る。

この方法で若干の記録の P、S の始まりの時刻を判定した結果を表 10 に示す。この表にはすず書き記録から求めた到着時刻も併記しておいた。(ただし、すず書きによる時間を知っているという条件で蓄積管に表示された波を見ているので、表 10 の一致の良さは相当割り引いて考えなければならない。)

5. あとがき

以上のように実際の微小地震記録を用いた実験においても、自動検出の技術的な見通しはそれほど暗くないことがわかった。特に振幅の非常に小さな地震、特殊な地震が検出できないことがあることをゆるすとすれば、技術的には問題は少ないと思われる。

しかし、この仕事はまだ緒についたばかりであり、しかも実用に供するためにはまだ解明し、開発しなければならないことが多くある。

- (1) P, S 波の判定
- (2) 自動検出ハードウェアシステムの開発
- (3) アナログ記録計の改良
- (4) 生活雑音の除去
- (5) 実用化のための、人間の労力軽減、費用軽減

今後、歩一歩、着実にこれらの問題の解明に努めたいと考えている。

なお、(3)に関連して、R950への入力レベルを上げ、R950の固有ノイズと思われる、4, 8, 16 Hz 付近の影響を小さくすることも検討すべきであろう。

最後に多くのヒントをいただいた、国立防災科学技術センター菅原正巳所長、多くの資料と道具を提供していただいた、当センター第2研究部の諸氏に感謝の意をあらわしたい。

(注: フィルタを用いて地震波を自動検出しようとする試みは、米国においても行なわれている (Shlien *et al.*, 1973). しかし、振幅の比較的小さな地震を対象としていること、少ない費用のもとで実用化を図らなければならないこと、など、われわれの方がよりきびしく困難な問題を含んでいるといえる.)

付 録 (赤池, 1968 参照)

時系列 $X(n)$ が定常自己回帰過程

$$X(n) = \sum_{m=1}^M a_m X(n-m) + \varepsilon(n)$$

であるならば、この $X(n)$ のパワースペクトル密度関数 $P_{XX}(f)$ は

$$P_{XX}(f) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 - \sum_{m=1}^M a_m \exp(-i2\pi f m) \right|^2}$$

とあらわせる。ここで $\varepsilon(n)$ は白色ノイズ、すなわち $E\varepsilon(n) = 0$, $E\varepsilon(\gamma) \cdot \varepsilon(s) = \delta_{s,\gamma} \sigma^2$ ($\delta_{s,s} = 1$, $\delta_{s,\gamma} = 0$ ($s \neq \gamma$); $\sigma^2 > 0$) である。

さらに、 $\varepsilon(n)$ がたがいに独立な同一の分布にしたがい、しかも $\varepsilon(n)$ のモーメントは (4 次まで) 有限であるならば、 a_m, σ^2 の推定値 $\hat{a}_m, \hat{\sigma}^2$ を次の式から求めることができる。

$$\sum_{m=1}^M C_{XX}(l-m) \hat{a}_m = C_{XX}(l), \quad (l=1, 2, \dots, M),$$

$$\hat{\sigma}^2 = C_{XX}(0) - \sum_{m=1}^M \hat{a}_m C_{XX}(m).$$

ただし、

$$C_{XX}(l) = C_{XX}(-l) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-|l|} X(|l|+n) \cdot X(n).$$

特に, $M=1$ とすれば, 推定パワースペクトル密度関数 $\hat{P}_{XX}(f)$ は

$$\hat{P}_{XX}(f) = \frac{\hat{\sigma}^2}{|1 - \hat{a}_1 \exp(-i2\pi f)|^2}$$

となる. ただし

$$\hat{a}_1 = \frac{C_{XX}(1)}{C_{XX}(0)}, \quad \hat{\sigma}^2 = C_{XX}(0) - \frac{C_{XX}^2(1)}{C_{XX}(0)}.$$

したがって, \hat{a}_1 が大きければ推定パワースペクトル密度関数の傾斜は大きい. この \hat{a}_1 の値が表5や表9に示してあるパワースペクトルの傾斜値である. 良い推定を得るためには, M を適当な大きさにしなければならない. しかし, われわれの最終目的は良い推定値を得ることではなく, ノイズと地震の分離である. 本文でもふれたように, $M=1$ とすることによって十分満足できる結果を得ることができる.

われわれの対象としている記録が定常自己回帰過程であるとは厳密には言えないかもしれないが, 実用的な判定基準として簡単でしかも有用であるという考え方から, この値を採用することとした.

参 考 文 献

- 1) 赤池弘次 (1968): 時系列解析. 統計数理研究所資料, 36—39.
- 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, 1—9.
- 3) 渡辺一郎, 尾崎睿子, 勝山ヨシ子, 幾志新吉, 諸星敏一 (1975): 図形入力装置の使用例の開発——災害・防災情報入力への応用——. 国立防災科学技術センター研究速報, 第14号.
- 4) Shlien, S. and Toksöz, M. N. (1973): Automatic event detection and location capabilities of large aperture seismic arrays. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **63**, 1275—1288.

(1974年3月2日原稿受理)