

N T T 通信用アースを用いた地電位差同時連続観測について

— 弟子屈の地電位差異常変化と釧路沖の地震との対応 —

上嶋 誠¹、木下 正高¹、飯野 英明²、上田 誠也¹
東大地震研¹、琉球大理²

ギリシャにおける地電位差の短期的（数分～数時間）変化を利用した地震予知法（VAN法）を検証すべく、1987年よりN T Tとの共同研究により、日本全国で同社の通信用アースを用いた地電位差同時連続モニターを行っている。得られたデータを検討した結果、弟子屈ネットワークの2チャンネル（弟子屈～虹別）に現れる地電位差異常変化と釧路沖で起こる地震との間にある種の対応関係が成り立っている可能性が認められた。

1. 観測の概略

簡単に観測の概略を紹介する。図1に1989年1月現在の地電位差観測点分布を示す。各観測点は、各地の中心的電話局とその周辺局とからなり、各周辺局の通信用アースを電話回線によって中心局と結び、周辺局間、あるいは周辺局と中心局間の電位差を測定している。測定データは、10秒のローパスフィルターをかけ、12bitにA/D変換して20秒毎にサンプリングする。各中心局には電位差測定・およびデータ転送装置が設置され、一日に一回、各中心局に電話をかけることによって一日分のデータを地震研究所に転送している。図2に各観測点のデータ取得、転送システムの模式図と弟子屈における観測ネットワークの例を示す。

2. VAN法のレビュー

VAN法とは、ギリシャ各地で自然電位の同時連続観測を行い、地球磁場変化による誘導電場は各観測点で同時に観測されるとして除去し、そうではないある特定の観測点（一つだけのときもあれば複数のときもある）にのみ出現する異常変化を抽出してやると、それと地震の発生との間に対応関係があるというものである（Varotsos et al., 1984 a, b）。

VAN法の経験則を列記すると、次のようになる。

- 1) 地震先行シグナル（SES）の形、継続時間は様々である。継続時間は数分から数時間に及ぶ。
- 2) SESの先行時間には7時間と45-57時間などに頻度のピークはあるが、数時間から二十日程度までのヴァリエーションがある。
- 3) SESの出現パターンと、後に起こる地震の震源域との間には著しい対応関係があり（selectivity）、同じ震源域で起こる地震に対するSESは常に同じ観測点に出現する。しかし、そのようなsensitiveな観測点は必ずしも震源域に近い

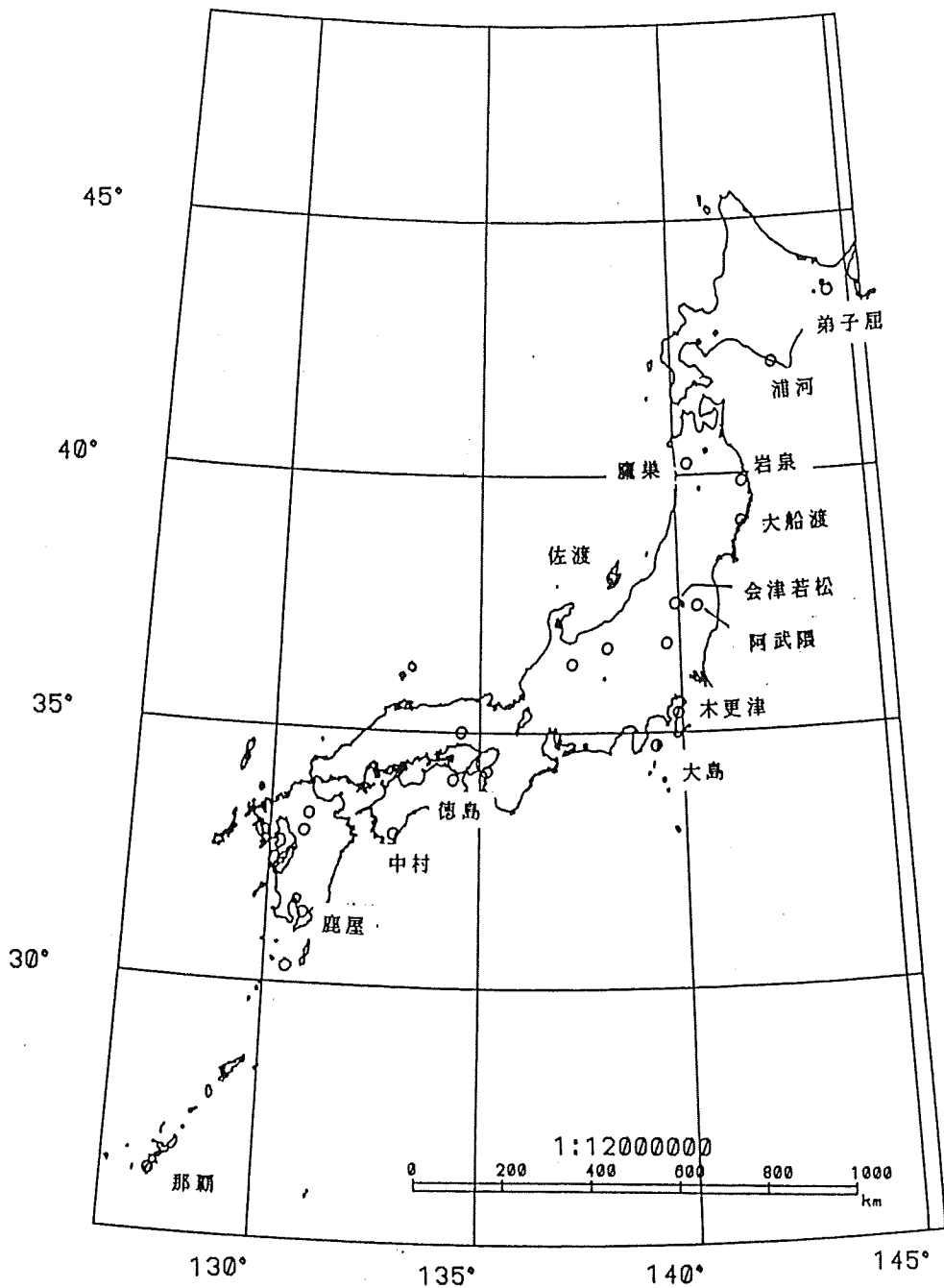
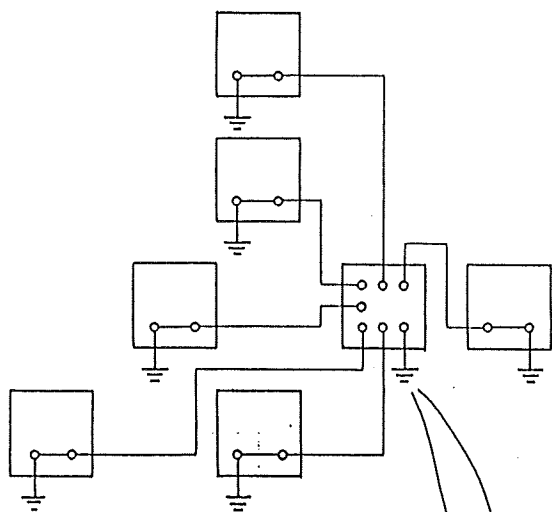


Figure 1. Distribution of the telluric potential monitoring stations in Japan, using NTT electrodes.



各無人中継局と中心局との接続状況

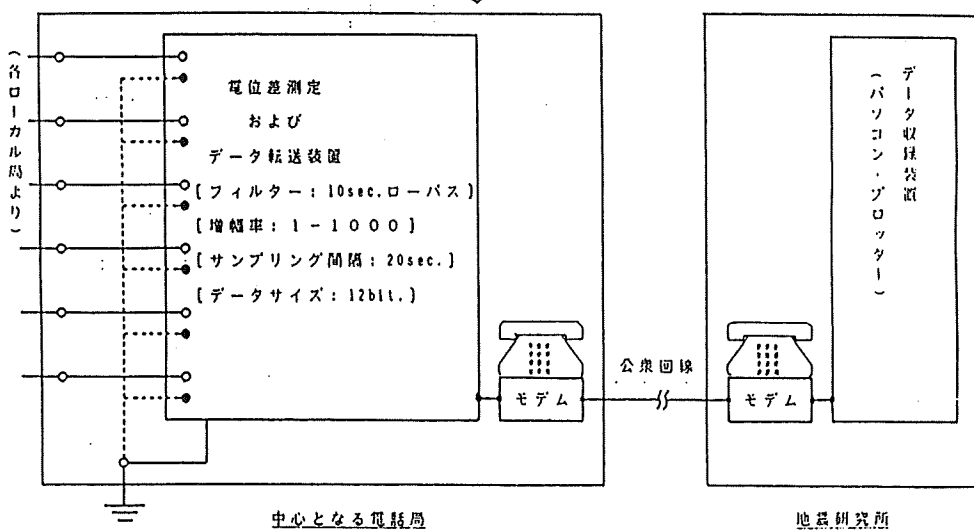
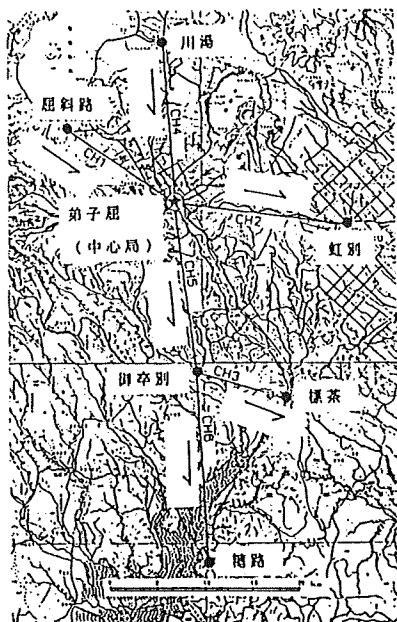


Figure 2. Schematic diagram of our measuring system, including the distribution of NTT electrodes at telephone stations and the measuring channels at Teshikaga.

とは限らない。このselectivityに関してはVANグループおよび最近ではフランスで地学的解釈が試みられているがまだ不明な点が多い。

4) SESの振幅V(単位基線長当りの電位差変化)と、対応する地震の震央距離R、マグニチュードMとの間には、

$$\log(V * R) = a * M + b \quad (1)$$

という式で表される明確な相関がある(図3、以下これをVANダイアグラムと呼ぶ)。aは、観測点によらぬ定数でほぼ0.3という値をとり、bは、各観測点に固有な定数である。

3. 弟子屈2チャンネル(弟子屈-虹別)と釧路地域の地震との対応関係

さて、以上の経験則をもとに、我々のデータの中からVAN法の要請を満たす可能性のある異常変化を抽出するわけであるが、実際に観測を始めてみると、ギリシャに比べてノイズレベルの高いところが多く(これは主として直流電車や工場からの洩れ電流による)、SES的な短期的変化も多数検知される。サイズミシティもギリシャに比べて高く、M3クラス以上の地震は各地で多数発生している。従って、1)や2)の漠然としたクライテリオンでは、なかなか適当なシグナル、震源域の対応関係を見いだすことができない。

そこで、まず日本およびその周辺地域でのM5以上の地震について、その発生前20日間のすべての地電位差データをつぶさに調べ、ある特定の観測点、測線にのみ現れる異常変化をすべてピックアップした。M5以上の地震なら発生個数も少なく、4)から期待されるように、シグナルも大きくSESを発見する可能性も高いはずである。こうして、例えば、釧路沖(41°N-43°N 143°E-145°E)で起こったいくつものM5以上の地震に先行して必ず異常変化が出現している測線を全国から選び出した。同様に、M5以上の地震が観測期間内に複数個起こっている震源域は、関東周辺、鳥島近海等であり、各々について同様の選出を行っているが、ここでは、さらに進んで解析を行った釧路沖についてのみ述べることにする。

こうして選ばれた異常変化のうち、ほとんど毎日のように、明らかにサイズミシティに比べて数多く出現している異常変化はなんらかの人工ノイズであろうと考えて除去したところ(例えば、図4で阿武隈のチャンネル2の下向きの異常変化などはほとんど毎日のように現れている)、釧路沖の地震と対応する可能性のあるものとして、弟子屈のチャンネル2(弟子屈-虹別;図2)に出現する比較的継続時間の長い(5分以上)異常変化のみが残った。図4(a-e)に同チャンネルの異常変化の例を示す。

次に、同チャンネルに出現するすべてのこの型の異常変化と釧路沖のM5以下も含めた地震との対応関係をみるため、予知シグナルの先行時間を20日以内と仮定し、地震とシグナルの1対1対応の良さを調べた。弟子屈で観測が始まったのは1988/5/12であり、それから1988/12/31までの期間に起こった問題の異常変化の総数は47個であり(表1)、気象庁速報震源データによれば釧路沖で起こった地震の総数は1989/1/15(最後のシグナルが出現して20日後)までで126個であった(表2)。表2をみればわかるが、半数以上の地震についてはマグニチュードが求

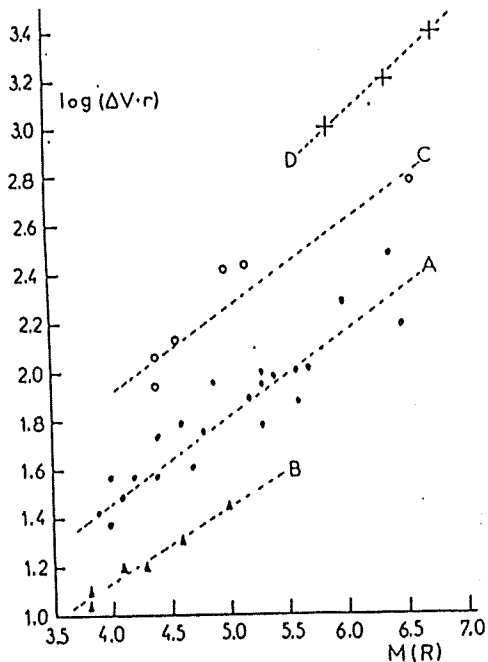
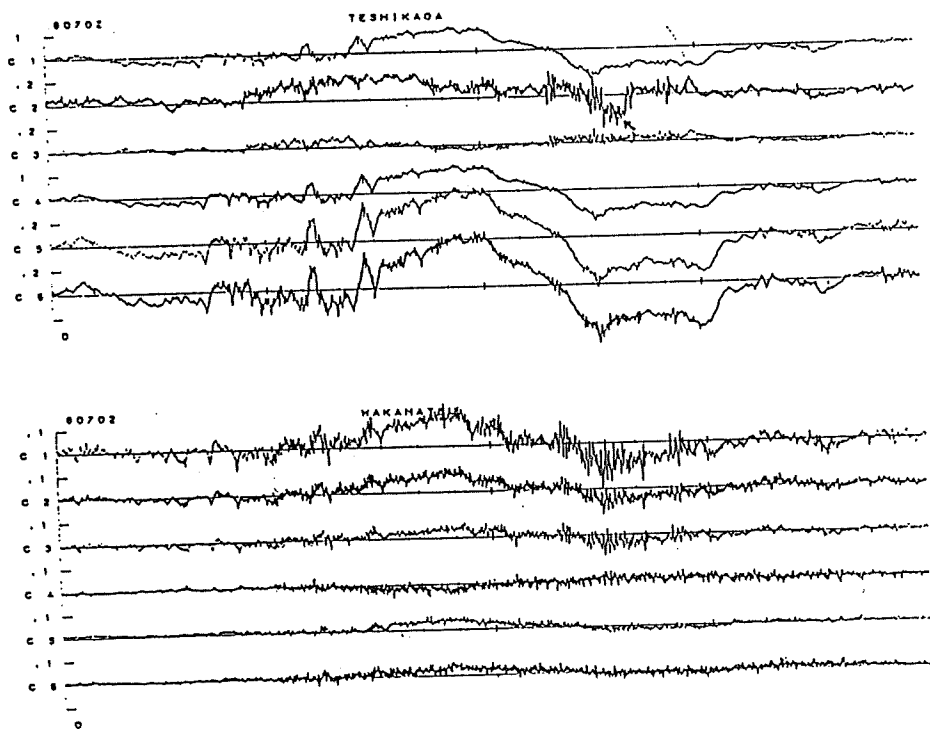
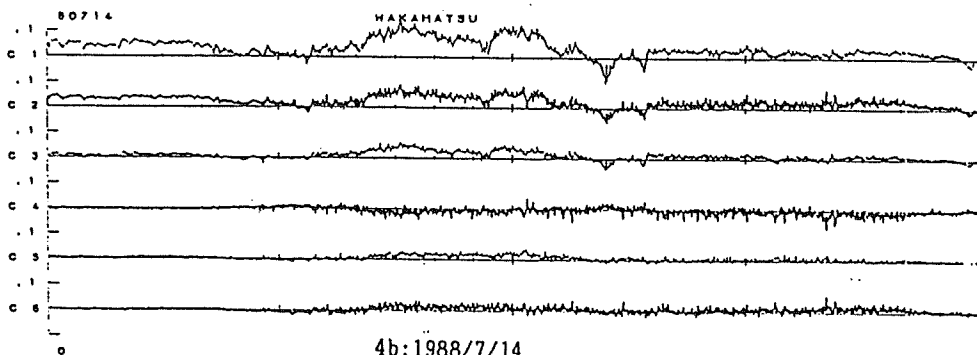
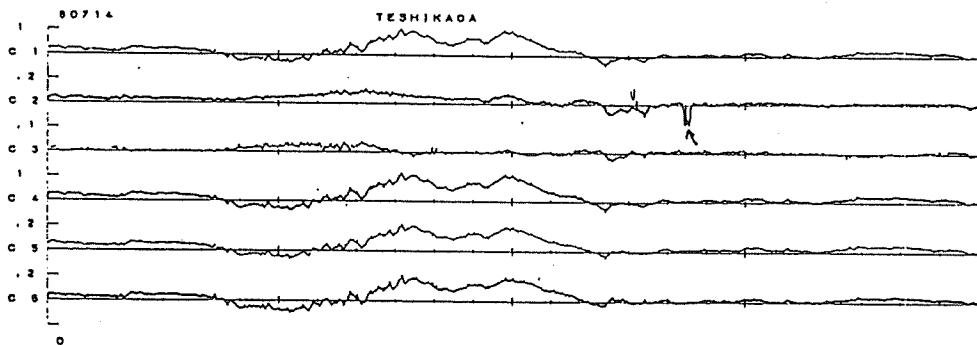


Figure 3. VAN diagram showing VAN's empirical law on the correlation between the amplitude of SES (ΔV) and the magnitude (M) and the epicentral distance (r) of corresponding earthquake (from Varotsos et al., 1984a).

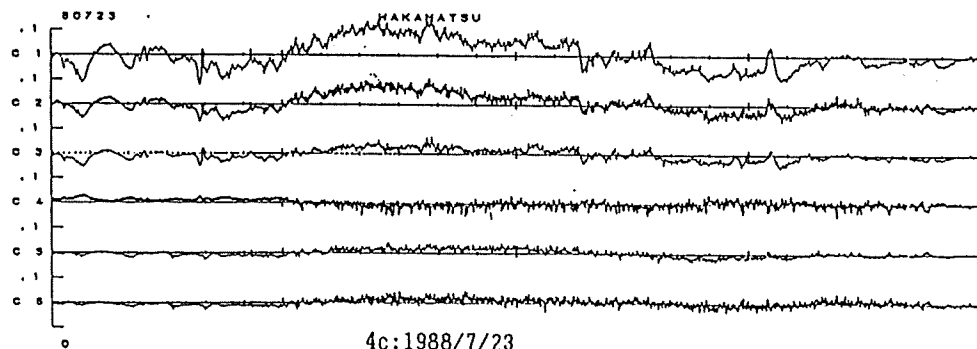
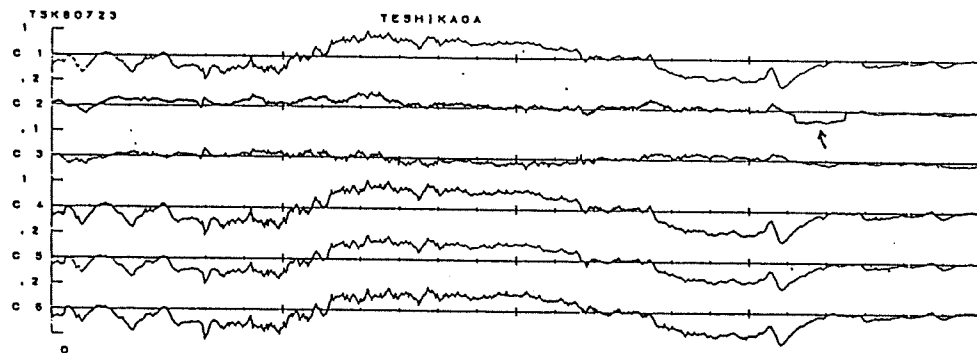
Figure 4. Examples of anomalous disturbances detected on Teshikaga channel 2 (indicated by small arrow). For the sake of comparison, the records of Aizu-Wakamatsu or Abukuma are also shown. Leftmost number is full scale of each channel in volts. These are one-day data (in Japanese local time) and each interval between small ticks is 1 hour.



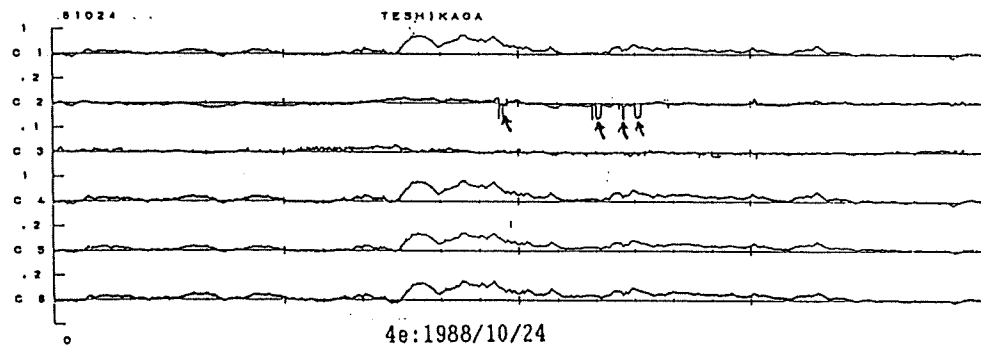
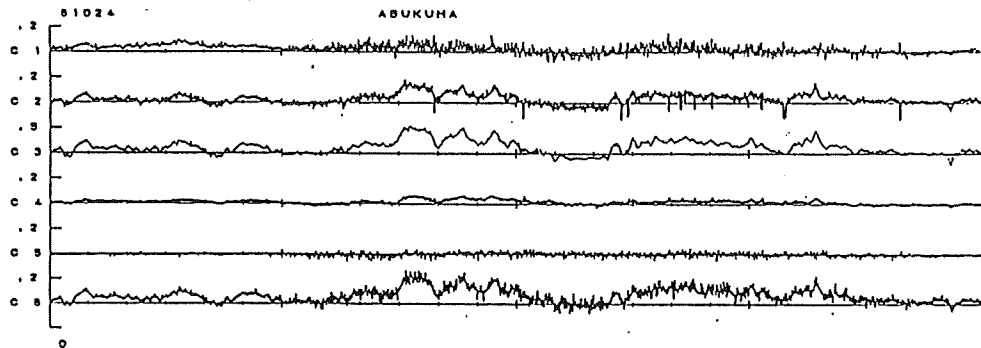
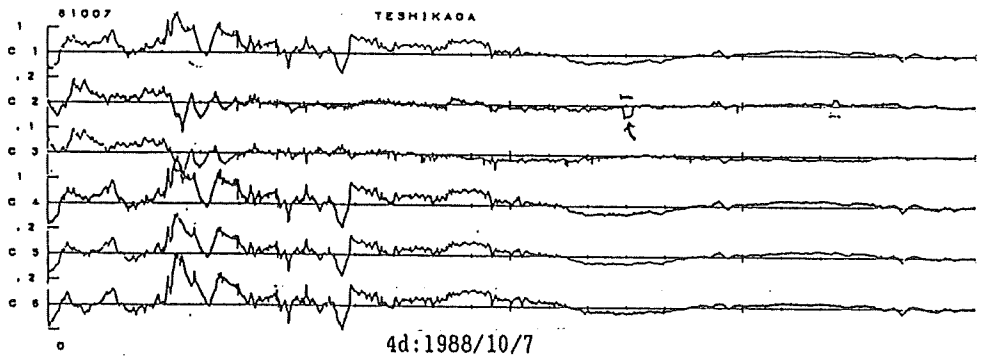
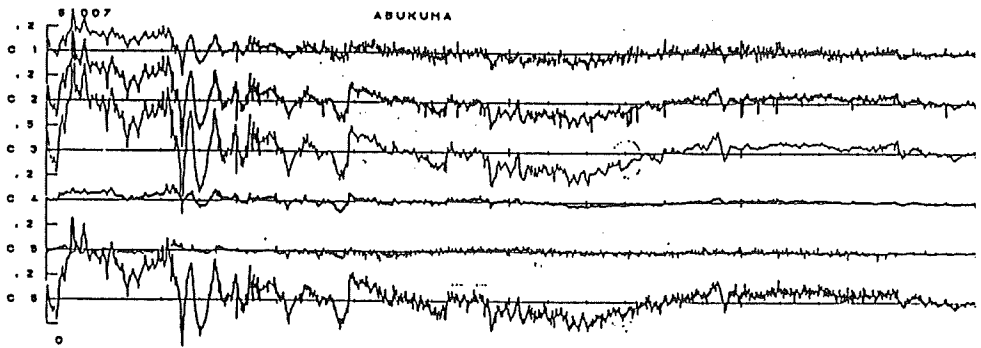
4a:1988/7/2



4b:1988/7/14



4c:1988/7/23



YR	MN	DY	HR	AMPLITUDE(mV)
1988/	5/21	10h	:	144.00
1988/	5/25	16h	:	128.00
1988/	6/ 1	17h	:	48.00
1988/	6/ 4	9h	:	48.00
1988/	6/21	16h	:	48.00
1988/	6/21	16h	:	144.00
1988/	6/21	23h	:	64.00
1988/	6/28	23h	:	16.00
1988/	6/28	23h	:	16.00
1988/	6/30	10h	:	160.00
1988/	7/ 2	15h	:	192.00
1988/	7/ 3	1h	:	32.00
1988/	7/ 5	22h	:	32.00
1988/	7/ 9	22h	:	32.00
1988/	7/14	16h	:	160.00
1988/	7/23	19h	:	64.00
1988/	8/ 5	15h	:	16.00
1988/	8/ 5	19h	:	64.00
1988/	8/ 8	18h	:	48.00
1988/	9/ 6	12h	:	16.00
1988/	9/ 8	15h	:	64.00
1988/	9/ 8	16h	:	48.00
1988/	9/ 9	8h	:	48.00
1988/	9/ 9	9h	:	64.00
1988/	9/ 9	11h	:	32.00
1988/	9/29	19h	:	64.00
1988/	10/ 7	15h	:	64.00
1988/	10/18	7h	:	48.00
1988/	10/24	11h	:	32.00
1988/	10/24	14h	:	96.00
1988/	10/24	14h	:	112.00
1988/	10/24	15h	:	112.00
1988/	10/25	13h	:	96.00
1988/	10/26	12h	:	96.00
1988/	10/26	13h	:	96.00
1988/	11/ 1	13h	:	48.00
1988/	11/ 3	18h	:	64.00
1988/	11/ 4	11h	:	64.00
1988/	11/17	19h	:	32.00
1988/	12/ 2	3h	:	16.00
1988/	12/14	11h	:	64.00
1988/	12/14	12h	:	80.00
1988/	12/17	0h	:	64.00
1988/	12/21	16h	:	32.00
1988/	12/22	3h	:	48.00
1988/	12/22	8h	:	48.00
1988/	12/26	20h	:	64.00

Table 1. List of all the anomalous signals detected on channel 2 of Teshikaga station from 1988/5/12 to 1988/12/31.

YR	MN	DY	HR	LAT	LON	MAGNITUDE	DEPTH(km)
1988/	5/12	9h		42.57°N	143.98°E	M	D 40.1
1988/	5/12	23h		41.14°N	143.14°E	M	D 73.0
1988/	5/15	12h		42.54°N	144.17°E	M 2.7	D 53.1
1988/	5/17	20h		42.92°N	143.46°E	M	D 92.0
1988/	5/25	9h		42.89°N	144.30°E	M 2.7	D 45.9
1988/	5/29	14h		42.50°N	144.33°E	M 3.3	D 39.8
1988/	6/ 1	11h		42.70°N	143.62°E	M	D 104.9
1988/	6/ 3	8h		42.49°N	143.83°E	M 3.7	D 56.5
1988/	6/ 3	8h		42.50°N	143.85°E	M 3.1	D 45.5
1988/	6/ 7	23h		42.53°N	144.82°E	M 2.9	D 29.6
1988/	6/10	7h		42.48°N	144.68°E	M 3.0	D 31.0
1988/	6/11	16h		42.53°N	143.04°E	M	D 107.2
1988/	6/12	14h		42.73°N	143.62°E	M	D 116.5
1988/	6/14	7h		41.83°N	143.74°E	M	D 64.0
1988/	6/25	11h		41.66°N	143.29°E	M	D 62.0
1988/	6/26	4h		42.71°N	144.71°E	M 3.5	D 50.7
1988/	6/26	16h		42.34°N	144.73°E	M 3.0	D 24.0
1988/	7/ 1	4h		41.20°N	144.96°E	M	D 44.0
1988/	7/ 2	9h		42.79°N	144.84°E	M 3.2	D 41.6
1988/	7/ 2	16h		42.71°N	143.41°E	M	D 113.5
1988/	7/ 7	0h		41.68°N	144.48°E	M 6.2	D 48.5
1988/	7/ 7	1h		41.66°N	144.45°E	M 5.2	D 73.0
1988/	7/ 7	1h		41.49°N	144.22°E	M 4.2	D 21.0
1988/	7/ 7	1h		41.63°N	144.44°E	M 5.7	D 68.0
1988/	7/ 7	3h		41.44°N	144.19°E	M	D 85.0
1988/	7/ 7	5h		41.68°N	144.34°E	M	D 18.0
1988/	7/ 7	6h		41.56°N	144.31°E	M	D 79.0
1988/	7/ 7	12h		41.51°N	144.38°E	M	D 70.0
1988/	7/ 7	13h		41.59°N	144.62°E	M 3.9	D 41.0
1988/	7/ 7	18h		41.51°N	144.40°E	M	D 80.0
1988/	7/ 9	19h		41.90°N	144.56°E	M 3.3	D 0.0
1988/	7/10	15h		42.49°N	143.71°E	M 3.2	D 49.7
1988/	7/11	0h		41.62°N	143.19°E	M	D 62.0
1988/	7/11	2h		41.64°N	144.56°E	M 3.7	D 56.0
1988/	7/13	4h		41.80°N	144.61°E	M	D 65.0
1988/	7/15	17h		42.80°N	144.90°E	M 3.5	D 44.8
1988/	7/16	4h		42.34°N	143.24°E	M	D 69.0
1988/	7/17	6h		42.32°N	144.08°E	M	D 33.4
1988/	7/18	10h		41.67°N	144.46°E	M	D 71.0
1988/	7/19	21h		42.51°N	143.95°E	M 3.0	D 33.0
1988/	7/20	22h		41.70°N	144.47°E	M	D 64.0
1988/	7/21	0h		42.65°N	144.53°E	M	D 38.0
1988/	7/21	4h		42.76°N	143.50°E	M	D 107.0
1988/	7/26	12h		42.07°N	144.14°E	M	D 38.0
1988/	7/30	9h		42.80°N	143.38°E	M	D 95.7
1988/	8/ 1	21h		42.97°N	144.42°E	M	D 110.6
1988/	8/ 3	20h		41.77°N	143.46°E	M	D 71.0
1988/	8/ 6	4h		42.70°N	144.86°E	M 3.3	D 40.7
1988/	8/ 8	9h		42.97°N	143.26°E	M	D 105.6
1988/	8/10	14h		42.29°N	143.83°E	M 3.7	D 55.6
1988/	8/11	20h		42.41°N	143.75°E	M 3.5	D 52.7
1988/	8/13	5h		42.36°N	144.11°E	M 3.0	D 36.0
1988/	8/14	17h		41.77°N	144.15°E	M	D 29.3
1988/	8/15	8h		42.88°N	143.85°E	M	D 69.2
1988/	8/16	18h		41.99°N	144.23°E	M	D 51.0
1988/	8/16	20h		42.89°N	144.31°E	M	D 108.3
1988/	8/17	11h		41.61°N	143.59°E	M 3.8	D 33.7
1988/	8/18	7h		42.65°N	144.01°E	M 4.1	D 113.6
1988/	8/18	23h		42.66°N	143.01°E	M	D 114.3

Table 2. List of all the earthquakes which occurred off Kushiro region (41°N-43°N 143°E-145°E) from 1988/5/12 to 1989/1/15 after JMA's Preliminary Earthquake Origin.

YR	MN	DY	HR	LAT	LON	MAGNITUDE	DEPTH(km)
1988/	8/	19	4h	42.73°N	143.48°E	M	D 110.0
1988/	8/	23	20h	42.36°N	143.86°E	M	D 36.0
1988/	8/	24	0h	41.68°N	143.66°E	M	D 0.0
1988/	8/	24	5h	41.53°N	143.93°E	M 4.0	D 24.0
1988/	8/	29	4h	42.79°N	143.09°E	M	D 141.0
1988/	8/	29	9h	42.70°N	143.70°E	M	D 62.0
1988/	9/	5	9h	42.73°N	144.34°E	M	D 77.0
1988/	9/	7	8h	42.77°N	144.62°E	M 2.9	D 52.7
1988/	9/	7	20h	42.25°N	143.17°E	M	D 65.9
1988/	9/	10	17h	42.54°N	143.05°E	M	D 121.0
1988/	9/	10	20h	42.54°N	144.23°E	M 2.8	D 58.7
1988/	9/	15	5h	42.23°N	143.08°E	M 4.9	D 66.3
1988/	9/	15	5h	42.22°N	143.10°E	M	D 68.5
1988/	9/	18	4h	42.85°N	144.77°E	M	D 52.4
1988/	9/	21	7h	42.25°N	144.95°E	M 5.0	D 47.0
1988/	9/	21	7h	42.42°N	144.89°E	M 4.0	D 32.0
1988/	9/	21	12h	42.34°N	144.93°E	M 3.1	D 6.3
1988/	9/	27	5h	42.55°N	143.12°E	M	D 43.0
1988/	9/	27	10h	42.47°N	144.15°E	M	D 62.9
1988/	9/	27	19h	41.54°N	144.79°E	M 3.3	D 7.0
1988/10/	1	11h	11h	42.34°N	143.01°E	M	D 69.0
1988/10/	1	15h	15h	42.73°N	143.34°E	M 4.2	D 75.0
1988/10/	1	18h	18h	42.85°N	144.83°E	M	D 65.4
1988/10/	4	6h	6h	41.51°N	143.92°E	M 4.0	D 57.0
1988/10/	4	21h	21h	41.14°N	143.19°E	M	D 66.0
1988/10/	6	3h	3h	42.80°N	143.35°E	M	D 116.0
1988/10/	7	11h	11h	42.86°N	144.42°E	M	D 54.6
1988/10/	7	13h	13h	42.73°N	143.62°E	M	D 99.0
1988/10/	8	8h	8h	42.07°N	143.25°E	M 2.4	D 57.0
1988/10/10	14h	14h	14h	42.51°N	144.58°E	M 6.0	D 78.1
1988/10/10	15h	15h	15h	42.47°N	144.59°E	M 3.0	D 32.0
1988/10/10	18h	18h	18h	42.64°N	144.50°E	M	D 64.0
1988/10/11	6h	6h	6h	42.96°N	143.58°E	M	D 132.6
1988/10/19	21h	21h	21h	41.99°N	143.11°E	M 2.8	D 47.0
1988/10/19	23h	23h	23h	42.85°N	143.35°E	M	D 9.0
1988/10/23	19h	19h	19h	42.73°N	143.34°E	M	D 68.3
1988/10/26	1h	1h	1h	42.62°N	143.27°E	M	D 113.1
1988/11/	5	5h	5h	43.00°N	144.83°E	M 2.1	D 55.8
1988/11/11	19h	19h	19h	41.75°N	144.55°E	M	D 7.0
1988/11/13	19h	19h	19h	42.68°N	143.51°E	M 3.9	D 101.4
1988/11/14	17h	17h	17h	42.33°N	144.15°E	M 3.3	D 18.0
1988/11/17	1h	1h	1h	41.71°N	143.99°E	M	D 12.0
1988/11/18	11h	11h	11h	43.00°N	143.12°E	M	D 131.0
1988/11/24	1h	1h	1h	41.98°N	144.38°E	M 3.6	D 52.0
1988/11/25	14h	14h	14h	41.92°N	144.95°E	M	D 0.0
1988/11/27	3h	3h	3h	42.80°N	144.07°E	M	D 107.1
1988/11/30	18h	18h	18h	42.64°N	144.30°E	M 3.7	D 52.6
1988/12/	6	13h	13h	42.35°N	143.30°E	M	D 188.0
1988/12/13	22h	22h	22h	42.34°N	143.00°E	M	D 75.3
1988/12/18	11h	11h	11h	42.91°N	144.49°E	M	D 115.3
1988/12/18	13h	13h	13h	42.27°N	143.08°E	M	D 63.3
1988/12/20	9h	9h	9h	42.53°N	144.96°E	M 4.2	D 36.3
1988/12/22	16h	16h	16h	41.72°N	143.23°E	M 3.6	D 37.9
1988/12/23	11h	11h	11h	42.24°N	143.18°E	M	D 65.6
1988/12/23	20h	20h	20h	42.38°N	143.13°E	M	D 62.6
1988/12/25	0h	0h	0h	42.40°N	144.69°E	M 4.3	D 40.9
1988/12/25	0h	0h	0h	42.44°N	144.68°E	M 3.2	D 30.0
1988/12/26	21h	21h	21h	41.76°N	143.76°E	M	D 68.1
1988/12/28	7h	7h	7h	42.54°N	144.23°E	M 3.3	D 59.2
1988/12/31	0h	0h	0h	41.73°N	144.77°E	M	D 2.0

Table 2. continued.

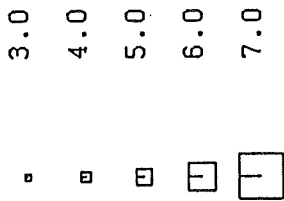
YR	MN	DY	HR	LAT	LON	MAGNITUDE	DEPTH(km)
1988/12/31	4h	41.77°N	144.53°E	M 3.8	D 44.0		
1989/ 1/ 2	23h	42.52°N	144.74°E	M 3.0	D 24.0		
1989/ 1/ 4	5h	42.65°N	143.57°E	M	D 69.5		
1989/ 1/ 5	3h	42.59°N	144.45°E	M	D 65.9		
1989/ 1/10	0h	42.53°N	144.41°E	M	D 77.1		
1989/ 1/10	3h	42.49°N	143.26°E	M	D 72.0		
1989/ 1/12	23h	42.73°N	143.43°E	M	D 93.5		

Table 2. continued.

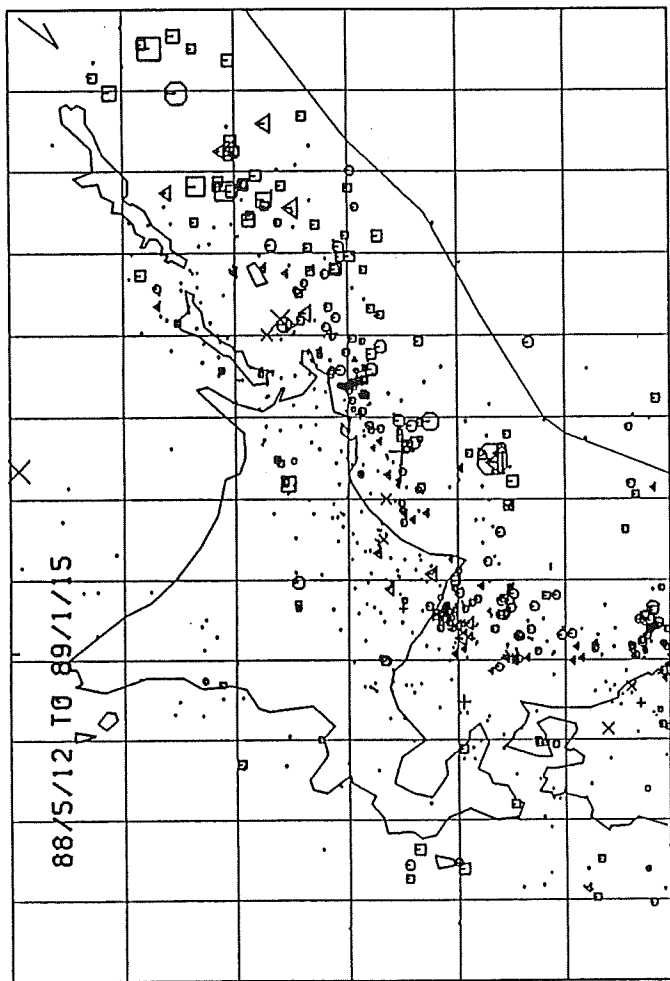
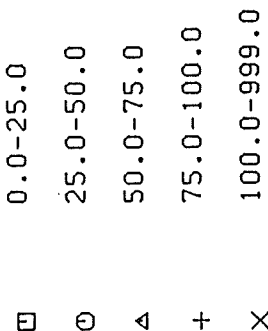
められていない。北海道地域の同期間の震源分布を図5に示す。図6は、すべてのシグナルと地震とを大きさとマグニチュードで時間軸上にプロットしたものである。マグニチュードが求められていない地震は一律に $M=0.5$ として表してある。全体として、とても対応があるようには見えないが、少なくとも、 $M5$ 程度以上の地震の20日前にはシグナルが出現している傾向はよみとれよう。そこでシグナルと地震との時間的対応関係の良さを評価するのに、地震からみだ的中率 SRE （＝シグナルと1対1対応のつくべき地震数/地震総数）に、シグナルからみだ的中率 SRS （＝地震と1対1対応のつくべきシグナル数/シグナル総数）をかけたもの（以下簡単のために的中率（ SR ）と呼ぶ）を用いた。その際、あまり小さい地震は震源データも不正確であるし、有意な SES を示すとは思えないので $M3$ 以上のもののみについて考えることにした。また、 VAN によれば震源の深い地震は SES を示さないとのことであるが、我々の場合にどの深さまでをとるべきかは全く不明である。そこで、考慮に入れるべき地震の最大深さとの中率との関係を調べた。図7、8にその結果を示す。図7は、深さの下限を変えていったときのシグナル、地震、可能なシグナル-地震間の可能な1対1対応のそれぞれの総数をプロットしたものである。シグナルの総数は深さとともに変化するわけではないので、常に47個であることを示す直線になっている。実線が、釧路沖地域（ $41^{\circ}N-43^{\circ}N$ $143^{\circ}E-145^{\circ}E$ ）で起こった地震に対するものである。深さの下限を大きくしていくにつれ地震の総数（line 1）、対応総数（line 4）共に増加していくが、 $50km$ を過ぎたあたりから深さの下限を増して地震の総数が増加してもシグナルと対応のつくべき地震数はあまり増えていかないのがわかる。それを反映して的中率（ SR ）は図8のline 1のように $60-80km$ あたりでピークを形成し、 $67.5km$ で最大値をとった。図8のline 1は、line 4（ SRS ）、line 7（ SRE ）の各深さにおける値をかけあわせたものである。そこで、今回は的中率が最大になる $67.5km$ 以浅の地震を対象とすることにした。なお、マグニチュードについては、 $M3.2$ 以上、 $M3.4$ 以上などの条件を課して SR を計算したところ、かえって最大的中率が下がったので以下では $M3$ 以上をもって採用基準とした。

次に、こうして選ばれた $M3$ 以上、深さ $67.5km$ 以浅の地震とシグナルとの間に、

MAGNITUDE



DEPTH RANGE (KM)



40° N
150° E X

Figure 5. Seismicity in Hokkaido region for 1988/5/12 - 1989/1/15 (after JMA's Preliminary Earthquake Origin).

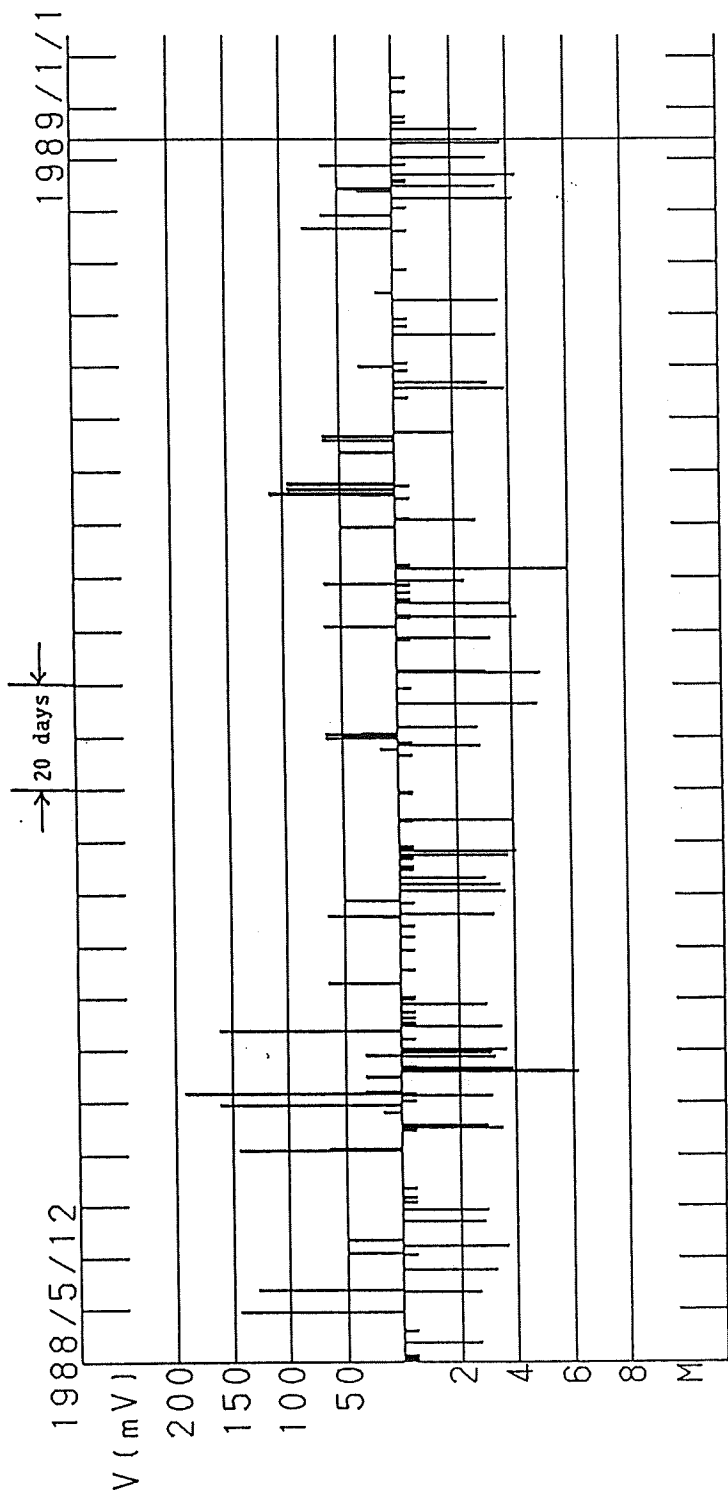


Figure 6. Occurrence of anomalous electric signals on ch. 2 of Teshikaga station (upper diagram) and earthquakes (lower diagram) in off-Kushiro region for 1988/5/12 - 1989/1/15.

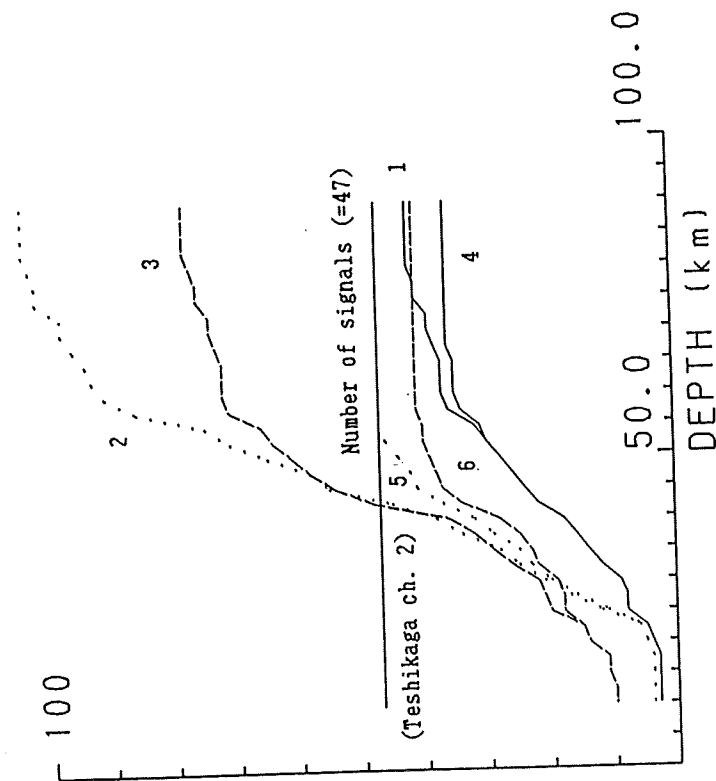


Figure 7. Number of $N > 3$ earthquakes (cumulative) vs. assumed threshold focal depth.

line 1 : off-Kushiro region
 line 2 : off-Kushiro + off-Urakawa region
 line 3 : off-Kushiro + off-Memuro + Teshikaga region
 line 4 : off-Kushiro region
 line 5 : off-Kushiro + off-Urakawa region
 line 6 : off-Kushiro + off-Memuro + Teshikaga region

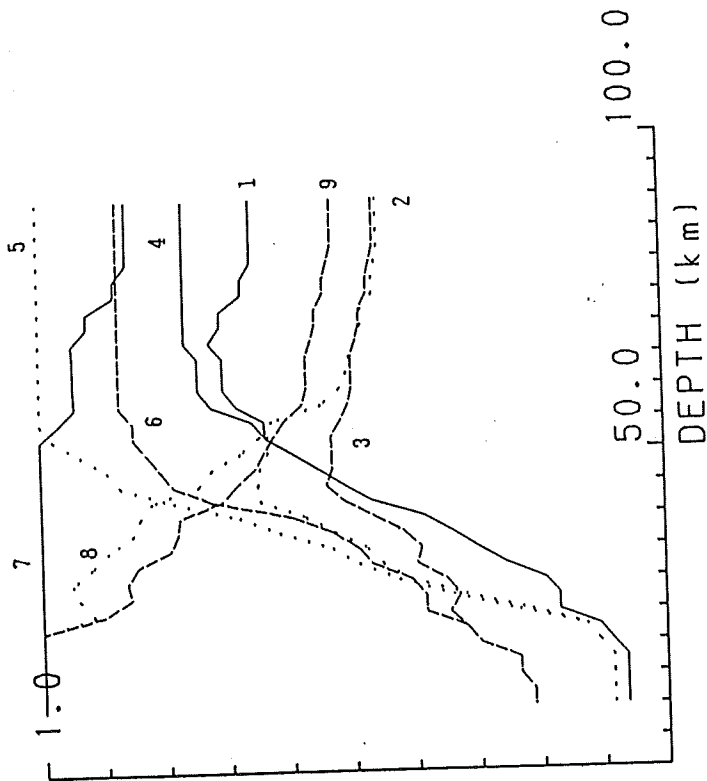


Figure 8. Success rates vs. assumed threshold focal depth.

Success rates, $SR = SRS / SRE$

line 1 : off-Kushiro region
 line 2 : off-Kushiro + off-Urakawa region
 line 3 : off-Kushiro + off-Memuro + Teshikaga region
 line 4 : off-Kushiro region
 line 5 : off-Kushiro + off-Urakawa region
 line 6 : off-Kushiro + off-Memuro + Teshikaga region

Success rates of signals, SRS
 (SRS = number of signals correlatable to earthquakes / number of signals)

Success rates of earthquakes, SRE
 (SRE = number of earthquakes correlatable to signals / number of earthquakes)

line 7 : off-Kushiro region
 line 8 : off-Kushiro + off-Urakawa region
 line 9 : off-Kushiro + off-Memuro + Teshikaga region

4) で指摘されているような関係が存在しうるかの検討を行った。表3に、弟子屈チャンネル2のすべての異常変化と、それに対応しうる(シグナル発生後20日以内に起こった)この段階で選ばれたすべての地震とそれぞれの対応関係における $\log(V \cdot R)$ の値を示す。図7から容易に読み取れるように、可能な1対1対応の数は地震、シグナル両方の数より少なく、地震、シグナル両方に対応のつかないものが存在する。この対応関係を図3の様なグラフ上にプロットすると、図9(a、b)のようになる。図9において、同じ地震は同じマークで示され、一つのシグナルに対応する可能性のある(即ちシグナル発生後20日以内に起こった)地震は同じ線で結ばれている。これから、1対1の対応づけを行うのであるが、まず、シグナルの出現順とそれに対応している地震の発生順とが同じであるとして対応づけを行ったところ、図10が得られた。次に、シグナルと地震の発生順序は考慮にいれず、可能なかぎり(即ち先行時間が20日以内であるということ)マグニチュードが大きい地震ほど $\log(V \cdot R)$ の値が大きいシグナルと対応しているという束縛条件のもとで対応づけを行ったところ、図11のようになった。これらの図で、対応のつかなかったシグナルや地震は点線で表してある。いずれの関係をとるにせよ、10月頃にかなりまとまって地震と対応しないシグナル存在している。図10や図11の対応関係をVANダイアグラム上にプロットすると、それぞれ図12、13が得られる。図13で必ずしも上述の大小の束縛条件が完全に満たされていないのは、シグナルの先行時間を20日にしていることによる。図10、12や図11、13で得られた対応関係は、先ほどの表3に*や+のマークで示されている。

以上のようにして、シグナルと地震との1対1対応の候補を得たわけであるが、対応付けの際に考慮すべき2つの要素、発生順序と大きさの順序、に関して図10、12と図11、13は、両極端となっていて、ほぼ一意的に両者を得ることができる。図10、12においては、大小関係に関しては殆ど相関が見られず、図11、13の時間順序に関しては、例えば余震のシークエンスで、余震に対応するシグナルが本震に対応するものに先行する場合もある。(VANは、こういう場合もあると言っているが、余震のおこりかたが、本震のおこる前に決まっているというのは不思議なことではある。)図13を得るにあたって、(1)式のaの値は何ら束縛条件として与えていないが、得られた結果は、 $a = 0.3$ とそう矛盾するものではない。

4. 考 察

弟子屈においてチャンネル2のみが異常変化したということは、虹別の電位差のみが他に比べて異常に変化したことである(図2)。道東地域においてCA集観測が実施された時にも、虹別において異常な地電位差変化が観測されたようである。従って、その際にノイズとされていた異常変化が実は地震の先行シグナルであったのかもしれないし、また、今回の異常変化はやはりノイズであるのかもしれない。しかし、全くランダムなノイズであれば、いくら作對的に対応関

YR	MN	DY	HR	AMP(mV)		MN	DY	HR	MAG	LOG(V*R)
1988/	5/	21/	10	144.00	-----					
	5/29/14*	M3.3	+4.229		6/ 3/ 8	M3.7	4.307	6/ 3/ 8	M3.1	4.287
	6/10/ 7	M3.0	4.214							
1988/	5/25/16	128.00	-----							
	5/29/14	M3.3	4.178	6/ 3/ 8*	M3.7	+4.256		6/ 3/ 8	M3.1	4.235
	6/10/ 7	M3.0	4.162							
1988/	6/ 1/17	48.00	-----							
	6/ 3/ 8	M3.7	3.830	6/ 3/ 8*	M3.1	+3.809		6/10/ 7	M3.0	3.737
1988/	6/ 4/ 9	48.00	-----							
	6/10/ 7*	M3.0	+3.737							
1988/	6/21/16	48.00	-----							
	6/26/ 4*	M3.5	3.671	6/26/16	M3.0	+3.785		7/ 2/ 9	M3.2	3.620
	7/ 7/ 0	M6.2	3.993					7/ 7/ 0	M6.2	3.993
	7/ 7/ 1	M4.2	4.031	7/ 7/13	M3.9	4.008		7/ 9/19	M3.3	3.924
	7/10/15	M3.2	3.836							
	7/11/ 2	M3.7	4.004							
1988/	6/21/16	144.00	-----							
	6/26/ 4	M3.5	4.148	6/26/16*	M3.0	4.262		7/ 2/ 9	M3.2	4.097
	7/ 7/ 1	M4.2	4.508	7/ 7/13	M3.9	+4.485		7/ 9/19	M3.3	4.401
	7/10/15	M3.2	4.313							
	7/11/ 2	M3.7	4.481							
1988/	6/21/23	64.00	-----							
	6/26/ 4	M3.5	+3.796	6/26/16	M3.0	3.910		7/ 2/ 9*	M3.2	3.745
	7/ 7/ 1	M4.2	4.156	7/ 7/13	M3.9	4.133		7/ 9/19	M3.3	4.049
	7/10/15	M3.2	3.961							
	7/11/ 2	M3.7	4.129							
1988/	6/28/23	16.00	-----							
	7/ 2/ 9	M3.2	+3.143	7/ 7/ 0*	M6.2	3.516		7/ 7/ 1	M4.2	3.554
	7/ 7/13	M3.9	3.531					7/ 7/13	M3.9	3.531
	7/ 9/19	M3.3	3.447	7/10/15	M3.2	3.359		7/11/ 2	M3.7	3.527
	7/15/17	M3.5	3.147							
1988/	6/28/23	16.00	-----							
	7/ 2/ 9	M3.2	3.143	7/ 7/ 0	M6.2	3.516		7/ 7/ 1*	M4.2	3.554
	7/ 7/13	M3.9	3.531					7/ 7/13	M3.9	3.531
	7/ 9/19	M3.3	3.447	7/10/15	M3.2	+3.359		7/11/ 2	M3.7	3.527
	7/15/17	M3.5	3.147							
1988/	6/30/10	160.00	-----							
	7/ 2/ 9	M3.2	4.143	7/ 7/ 0	M6.2	4.516		7/ 7/ 1	M4.2	+4.554
	7/ 7/13	M3.9	4.531					7/ 7/13*	M3.9	4.531
	7/ 9/19	M3.3	4.447	7/10/15	M3.2	4.359		7/11/ 2	M3.7	4.527
	7/15/17	M3.5	4.147							
	7/19/21	M3.0	4.304							
1988/	7/ 2/15	192.00	-----							
	7/ 7/ 0	M6.2	+4.595	7/ 7/ 1	M4.2	4.633		7/ 7/13	M3.9	4.610
	7/ 9/19	M3.2	4.438	7/11/ 2	M3.7	4.606		7/15/17	M3.5	4.226
	7/19/21	M3.0	4.384							
1988/	7/ 3/ 1	32.00	-----							
	7/ 7/ 0	M6.2	3.817	7/ 7/ 1	M4.2	3.855		7/ 7/13	M3.9	3.832
	7/ 9/19	M3.3	3.748					7/ 9/19	M3.3	3.748
	7/10/15	M3.2	3.660	7/11/ 2	M3.7	+3.828		7/15/17	M3.5	3.448
	7/19/21	M3.0	3.605							
1988/	7/ 5/22	32.00	-----							
	7/ 7/ 0	M6.2	3.817	7/ 7/ 1	M4.2	3.855		7/ 7/13	M3.9	3.832
	7/ 9/19	M3.3	+3.748					7/ 9/19	M3.3	+3.748
	7/10/15	M3.2	3.660	7/11/ 2*	M3.7	3.828		7/15/17	M3.5	3.448
	7/19/21	M3.0	3.605							
1988/	7/ 9/22	32.00	-----							
	7/10/15	M3.2	3.660	7/11/ 2	M3.7	3.828		7/15/17*	M3.5	3.448
	7/19/21	M3.0	+3.605							
1988/	7/14/16	160.00	-----							
	7/15/17	M3.5	+4.147	7/19/21*	M3.0	4.304				
1988/	7/23/19	64.00	-----							
	8/ 6/ 4	M3.3	3.785	8/10/14*	M3.7	+4.005		8/11/20	M3.5	3.979
1988/	8/ 5/15	16.00	-----							
	8/ 6/ 4	M3.3	3.183	8/10/14	M3.7	3.403		8/11/20*	M3.5	+3.377
	8/13/ 5	M3.0	3.338							
	8/17/11	M3.8	3.560	8/24/ 5	M4.0	3.557				
1988/	8/ 5/19	64.00	-----							
	8/ 6/ 4	M3.3	3.785	8/10/14	M3.7	4.005		8/11/20	M3.5	3.979
	8/13/ 5	M3.0	3.940							
	8/17/11*	M3.8	4.162	8/24/ 5	M4.0	+4.159				
1988/	8/ 8/18	48.00	-----							
	8/10/14	M3.7	3.880	8/11/20	M3.5	3.854		8/13/ 5	M3.0	3.815
	8/17/11	M3.8	+4.038							
	8/24/ 5*	M4.0	4.034							

Table 3. List of all the anomalous electric signals on ch. 2 of, Teshikaga Station during 1988/5/12 - 1988/12/31, with candidate earthquakes which followed within 20 days.

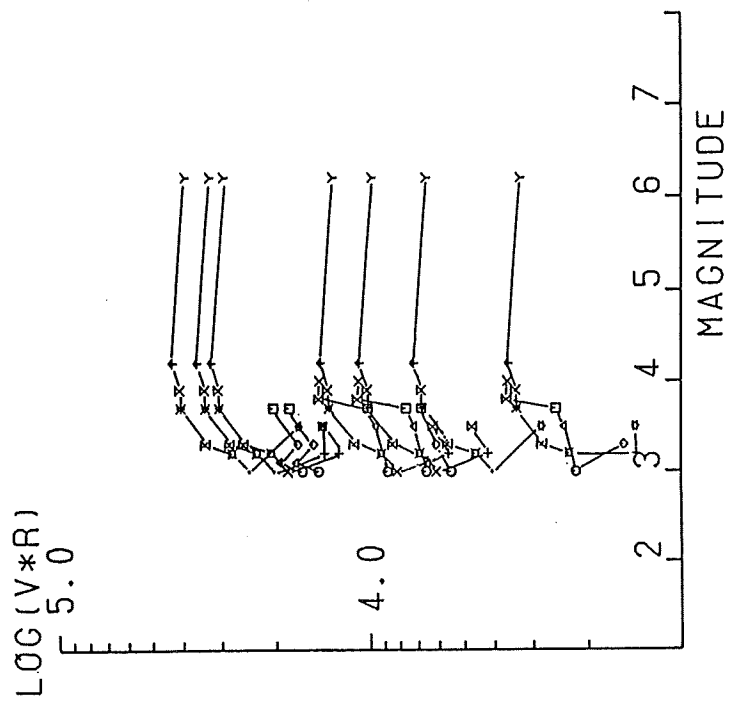
* : earthquakes used for correlation shown in Figure 10,12.

+ : earthquakes used for correlation shown in Figure 11,13.

YR	MN	DY	HR	AMP(mV)		MN	DY	HR	MAG	LOG(V*R)
1988/	9/	6/	12	16.00	-----					
9/15/	5*	M4.9		3.506	9/21/ 7 M5.0	3.364	9/21/ 7	M4.0	3.290	9/21/12 M3.1+3.308
1988/	9/	8/	15	64.00	-----					
9/15/	5	M4.9+4.108			9/21/ 7*M5.0	3.966	9/21/ 7	M4.0	3.892	9/21/12 M3.1 3.910
9/27/19	M3.3			4.137						
1988/	9/	8/	16	48.00	-----					
9/15/	5	M4.9		3.983	9/21/ 7 M5.0	3.842	9/21/ 7	*M4.0+3.767		9/21/12 M3.1 3.785
9/27/19	M3.3			4.012						
1988/	9/	9/	8	48.00	-----					
9/15/	5	M4.9		3.983	9/21/ 7 M5.0	3.842	9/21/ 7	M4.0	3.767	9/21/12*M3.1 3.785
9/27/19	M3.3			4.012						
1988/	9/	9/	9	64.00	-----					
9/15/	5	M4.9		4.108	9/21/ 7 M5.0+3.966		9/21/ 7	M4.0	3.892	9/21/12 M3.1 3.910
9/27/19	M3.3			4.137						
1988/	9/	9/	11	32.00	-----					
9/15/	5	M4.9		3.807	9/21/ 7 M5.0	3.665	9/21/ 7	M4.0	3.591	9/21/12 M3.1 3.609
9/27/19	*M3.3+3.836									
1988/	9/29/19			64.00	-----					
10/ 4/	6*	M4.0+4.174			10/10/15 M3.0	3.869				
1988/10/	7/	15		64.00	-----					
10/10/15	*M3.0+3.869									
1988/10/18/	7			48.00	-----					
1988/10/24/	11			32.00	-----					
1988/10/24/	14			96.00	-----					
1988/10/24/	14			112.00	-----					
1988/10/24/	15			112.00	-----					
1988/10/25/	13			96.00	-----					
1988/10/26/	12			96.00	-----					
11/14/17	M3.3			4.113						
1988/10/26/	13			96.00	-----					
11/14/17	M3.3			4.113						
1988/11/	1/	13		48.00	-----					
11/14/17	*M3.3+3.812									
1988/11/	3/	18		64.00	-----					
11/14/17	M3.3			3.937						
1988/11/	4/	11		64.00	-----					
11/14/17	M3.3			3.937	11/24/ 1*M3.6+4.049					
1988/11/17/	19			32.00	-----					
11/24/	1	M3.6		3.748	11/30/18*M3.7+3.549					
1988/12/	2/	3		16.00	-----					
12/20/	9	M4.2		3.253						
1988/12/14/	11			64.00	-----					
12/20/	9*	M4.2+3.855			12/22/16 M3.6	4.168	12/25/ 0	M4.3	3.905	12/25/ 0 M3.2 3.878
12/28/	7	M3.3		3.900	12/31/ 4 M3.8	4.094	1/ 2/23	M3.0	3.838	
1988/12/14/	12			80.00	-----					
12/20/	9	M4.2		3.952	12/22/16*M3.6	4.265	12/25/ 0	M4.3+4.002		12/25/ 0 M3.2 3.975
12/28/	7	M3.3		3.997	12/31/ 4 M3.8	4.190	1/ 2/23	M3.0	3.934	
1988/12/17/	0			64.00	-----					
12/20/	9	M4.2		3.855	12/22/16 M3.6	4.168	12/25/ 0	*M4.3	3.905	12/25/ 0 M3.2 3.878
12/28/	7	M3.3+3.900			12/31/ 4 M3.8	4.094	1/ 2/23	M3.0	3.838	
1988/12/21/	16			32.00	-----					
12/22/16	M3.6			3.867	12/25/ 0 M4.3	3.604	12/25/ 0	*M3.2	3.577	12/28/ 7 M3.3 3.599
12/31/	4	M3.8		3.793	1/ 2/23 M3.0+3.537					
1988/12/22/	3			48.00	-----					
12/22/16	M3.6+4.043				12/25/ 0 M4.3	3.780	12/25/ 0	M3.2	3.753	12/28/ 7*M3.3 3.776
12/31/	4	M3.8		3.969	1/ 2/23 M3.0	3.713				
1988/12/22/	8			48.00	-----					
12/22/16	M3.6			4.043	12/25/ 0 M4.3	3.780	12/25/ 0	M3.2+3.753		12/28/ 7 M3.3 3.776
12/31/	4	*M3.8		3.969	1/ 2/23 M3.0	3.713				
1988/12/26/	20			64.00	-----					
12/28/	7	M3.3		3.900	12/31/ 4 M3.8+4.094		1/ 2/23	*M3.0	3.838	

Table 3. continued.

(a) For 1988/5/12 - 1988/10/7



(b) For 1988/10/8 - 1988/12/31

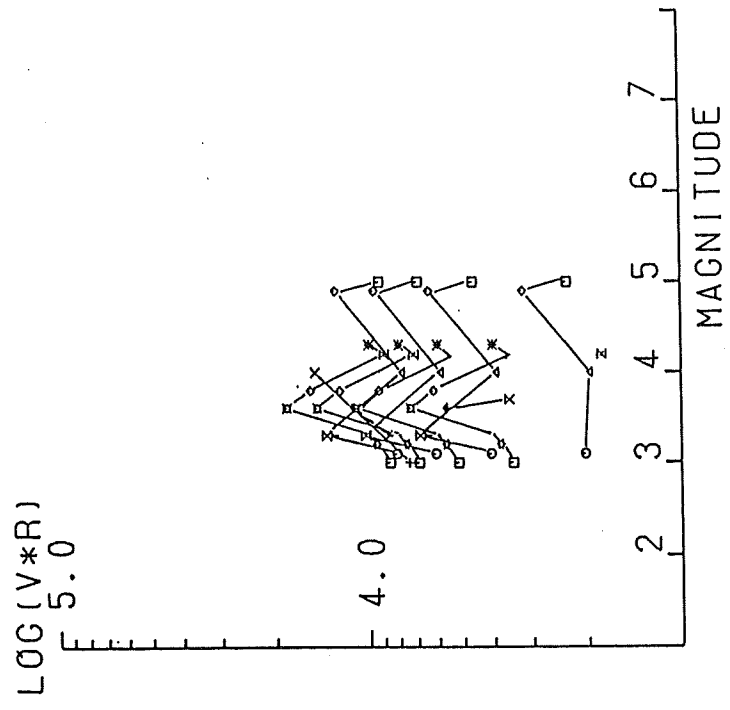


Figure 9. Graphical representation of possible correlation between electric signals and earthquakes listed in Table 3. Candidate earthquakes for the same signals are linked by a line.

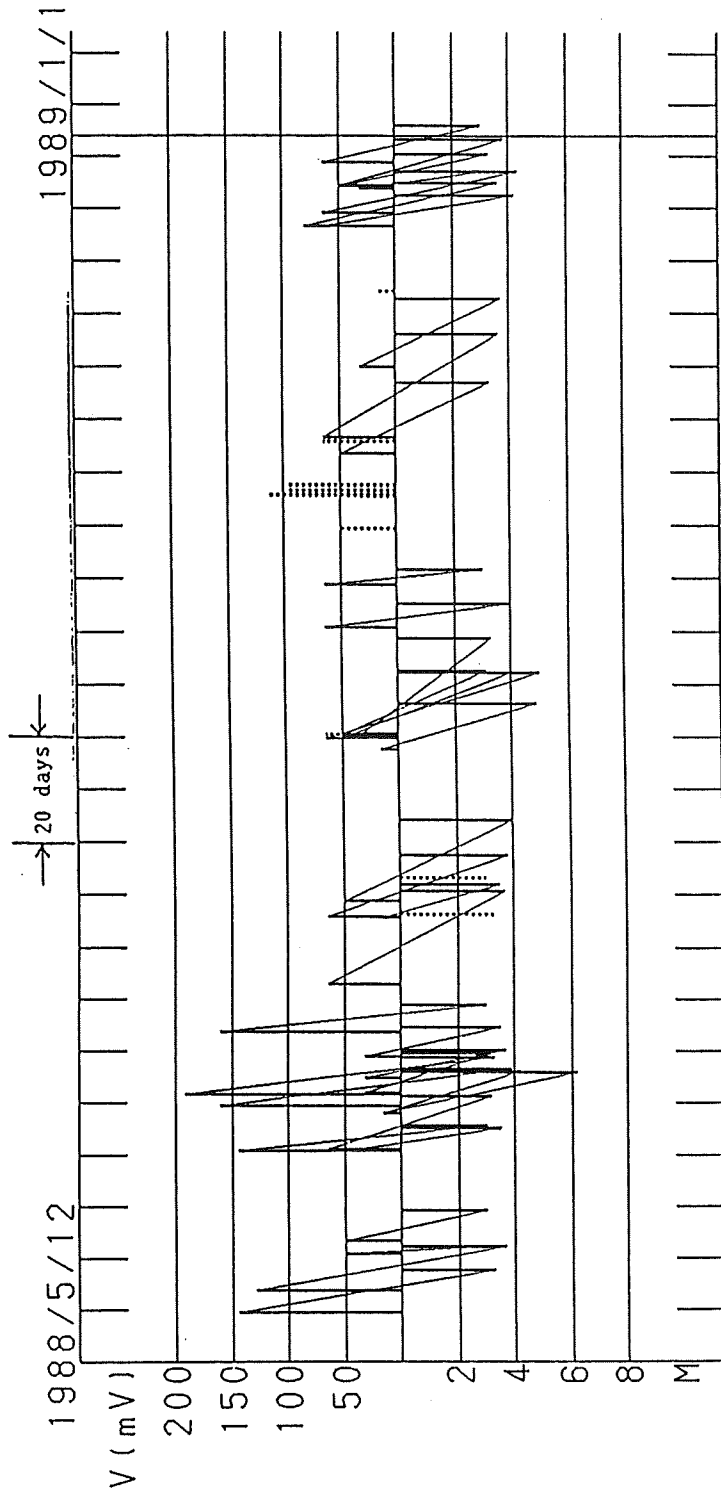


Figure 10. One possible set of correspondence between electric signals and earthquakes. Correspondence was assigned with the rule that the order of events should not be reversed. Dotted bars represent uncorrelated events.

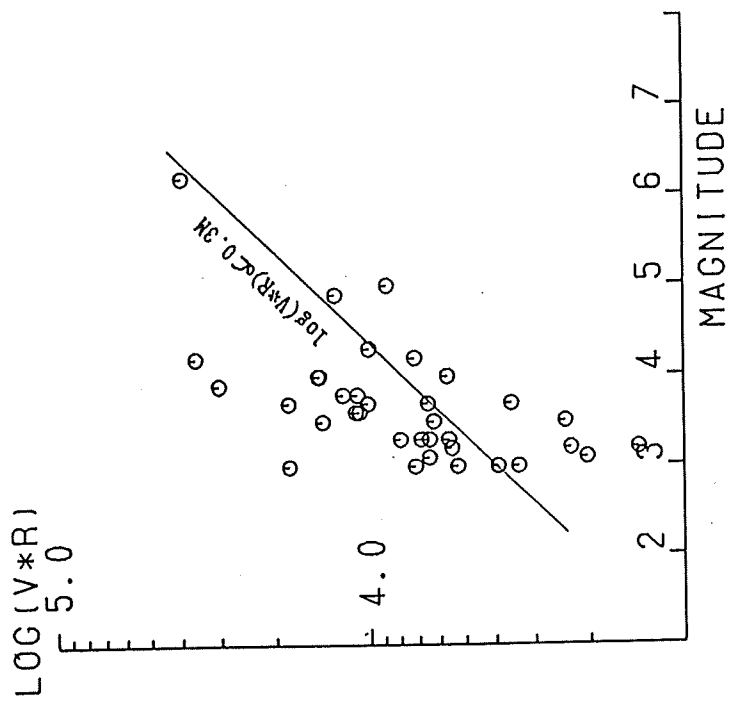


Figure 12. VAN-diagram for the set of correspondences shown in Figure 10.

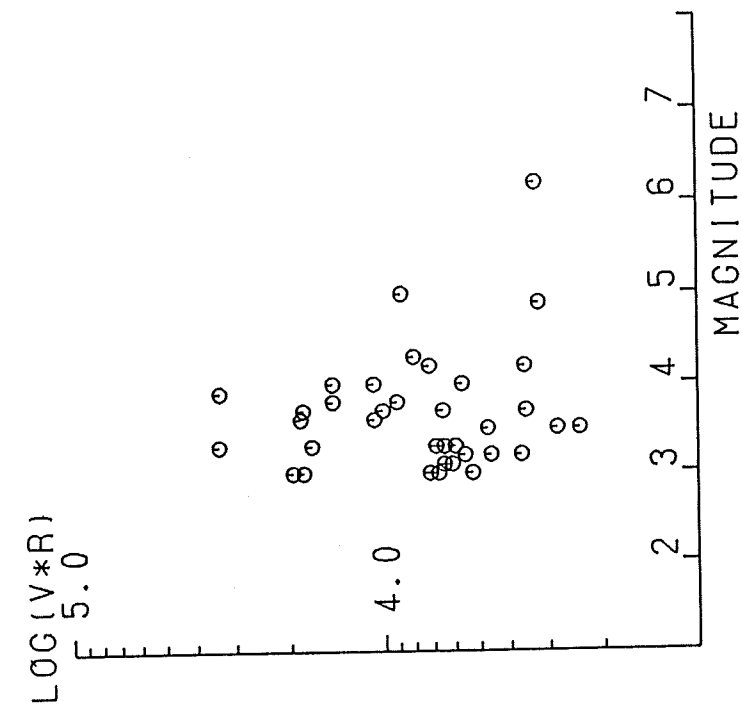


Figure 13. VAN-diagram for the set of correspondences shown in Figure 11.

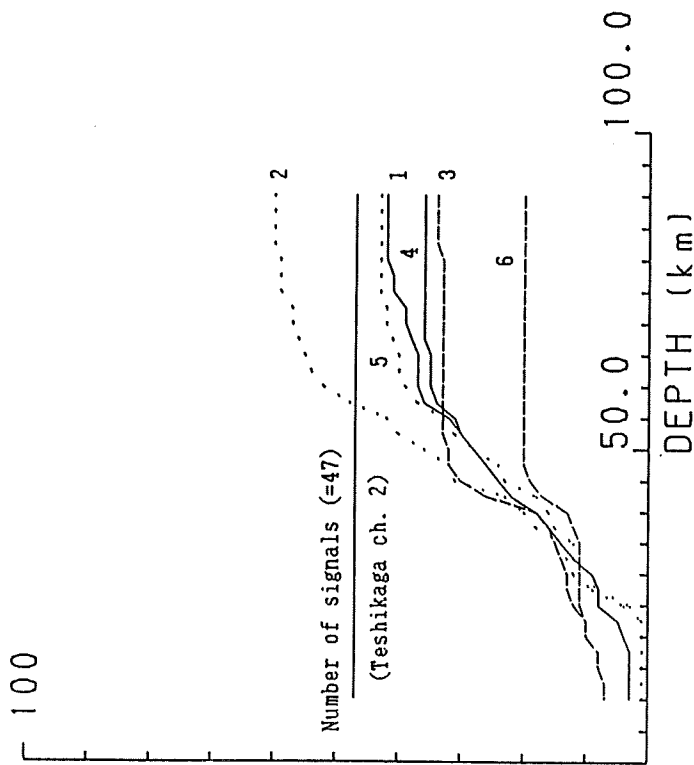


Figure 14. Number of M_3 earthquakes (cumulative) vs. assumed threshold focal depth.

- line 1 : off-Kushiro region
 - line 2 : off-Urakawa region
 - line 3 : off-Nemuro + Teshikaga region
- Number of M_3 earthquakes correlated with signals vs. assumed threshold focal depth
- line 4 : off-Kushiro region
 - line 5 : off-Urakawa region
 - line 6 : off-Nemuro + Teshikaga region

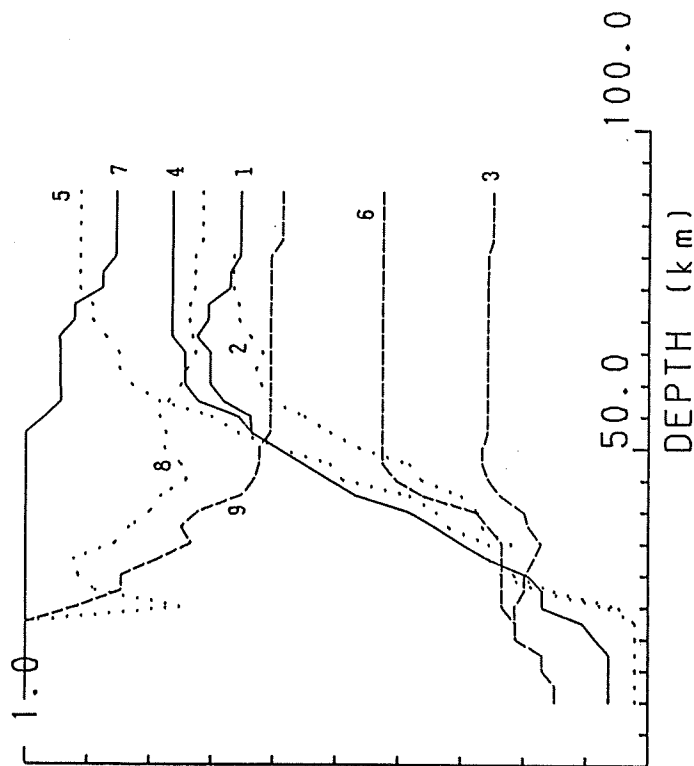


Figure 15. Success rates vs. assumed threshold focal depth.

- Success rates, SR = SRS * SRE
- line 1 : off-Kushiro region
 - line 2 : off-Urakawa region
 - line 3 : off-Nemuro + Teshikaga region
- Success rates of signals, SRS
- line 4 : off-Kushiro region
 - line 5 : off-Urakawa region
 - line 6 : off-Nemuro + Teshikaga region
- Success rates of earthquakes, SRE
- (SRE = number of earthquakes correlatable to signals / number of earthquakes)
 - line 7 : off-Kushiro region
 - line 8 : off-Urakawa region
 - line 9 : off-Nemuro + Teshikaga region

係をつけようとしても時間的な制約がある以上、図13の様な関係は得られないのではないだろうか。即ち、対象とした地震の中にM5クラス以上の地震が3つ起こっているが、少なくともその発生前20日の間には必ずある程度大きなシグナルが検知されていることを図13は示すからである。

対応づけられた弟子屈のチャンネル2の異常変化が本物の先行シグナルであるとする、地震と対応のつかなかったいくつかのシグナルはどうなるのであろうか。それらの対応を説明するために、震源域を広げて3章で述べた方法で時間的対応の良さを調べてみた。その結果は、図7、8に示されている。それぞれ、点線は釧路沖地域に浦河沖の地震を加えたもの(41°N-43°N 141°E-145°E)、破線は釧路沖地域に弟子屈、根室半島沖両地域を加えたもの(41°N-44°N 143°E-136°E)の結果を示している。当然の事ながら、両者共シグナルと地震の1対1対応の総数(図7のline 5、line 6)は釧路沖の結果(line 4)に比べて多くなっているが、同時に対応のつかない地震の数(line 2とline 5との差や、line 3とline 6との差)も多くなっていくために的中率の最大値はかえって小さくなっている(図8のline 2、line 3)。このことは、後で加えた地域における地震が、必ずしも都合良く釧路沖の地震と対応がつかなかったシグナルの発生前20日間にのみ発生していたわけではなかったことを意味する。このようになかなか都合の良い震源域が見つからないとすると、対応のつかないシグナルはあるいはなんらかの局所的ノイズであるのかもしれない。そういった意味で、対応づけできないシグナルに共通した性質がないかを調べたが、例えば、図4(e)のようにスパイク状の異常変化を伴って1日にいくつも発生するという性質でそれらを特徴づけるとしても、これまで対応がついていたと思われるシグナル中にもそのような性質を持つものが少数ながら存在していた。現在の段階では、このことについてこれ以上考察を進めても意味があるとは思えないが、例えば、道東地域でもっと密度の濃い観測を行い、弟子屈のチャンネル2から離れた測線において、ある異常変化に対してはそれらの離れた測線で同時に観測され、ある異常変化は弟子屈のチャンネル2にしか出現しないということで、シグナルであるか否かの区別がつくかもしれない。また、虹別付近で100m程度の短基線の地電位差観測を網目状に行い、異常変化の出現範囲、あるいはもしノイズであるならその発生源を探ることも必要であろう。

また、別の可能性を探ると同時に釧路沖の地震と弟子屈のチャンネル2との対応の良さを評価するために、先ほど追加した震源域で起こった地震と問題のシグナルとの時間的対応の良さも調べてみた。図14、15はその結果得られたものである。図7、8と同様、釧路沖のものは実線で表し、点線は浦河沖地域(41°N-43°N 141°E-143°E)で起こった地震に対する結果、破線は弟子屈、根室半島沖両地域(43°N-44°N 143°E-145°Eと41°N-44°N 145°E-146°E)で起こった地震に対する結果をプロットしたものである。後者については、明らかに釧路沖に比べて対応関係は良くないが(例えば図15のline 3)、前者については釧路沖で得られた結果に比べてそう対応が悪いとはいえない(図14のline 5、図15のline 2)。しかし、シグナルと対応のつかない地震の数は増えるようである。また、図5

の震源分布図に見られるように問題にしている期間中には浦河沖ではM5クラス以上の地震は起こっておらず、シグナルの大きさにかかなりのヴァリエティがあることから推していくら良い対応を見つけようとしてもVANダイアグラムは図13のようにはならず、(1)式の $a=0.3$ を満たす対応関係を見いだすことはできないであろう。しかし、この浦河沖地域の地震と弟子屈チャンネル2のシグナルとの対応関係の問題は同地域で大地震が起こってみないと明確なことは言えず、今後検討していくべき課題である。

もし今回の様な対応づけが本物であるとすれば、一対一の対応づけされた地震の震源深さの下限が70km程度になるということは、面白い話題を提供する。SESが、VANの指摘通り、地殻物質中の不純物・格子欠陥による双極子の一斉分極によるもので、しかもそのバックグラウンド電場を与えるものが石英などの圧電鉱物の応力分極によるものだとすると、釧路沖においてはそのようなSESを発生させる能力のある鉱物が70km程度の深さで浅に限定されていることになる。地殻構造との関連で興味深いことではある。もちろん、震源域には有限の大きさがあるから、この深さがそのまま圧電鉱物存否の境界を意味するものではないだろう。

しかし、一方で、釧路沖は海洋プレートが北海道島弧地殻の下に潜り込んでいる地域であり、そういった、物質の深さ方向の分布は場所により均一であるはずがなく、釧路沖地域で一様な深さで地震を選別したというところに問題があるかもしれない。また、マグニチュードの大きさによって震源域の広がり異なってくるため、すべてのマグニチュードの地震に対して同様に深さのみで地震の選別を行ったところにも問題がある。対応づけできない地震やシグナルが存在することは、このことにも起因している可能性がある。図10、12や図11、13は、それぞれ、シグナル-地震時間順序、および $\log(V \cdot R)$ とMについての大小関係をviolateしないという条件によってほぼ一意的に得られたものだが、前述のように現実には両者の中間にある可能性が高い。その場合には対応関係には任意性があり、図13の一次関係をもっと見掛け上良くすることはもちろん可能である。

次に、シグナルの先行時間についてであるが、全体として先行時間が最も短くなるであろう図10、12においても、ギリシャの経験的に得られた先行時間の頻度のピーク(7時間と45-57時間)に比べて明らかに長いようである。これは、地震発生前の応力蓄積過程がギリシャとは異なることに起因しているのかもしれないし、やはり本物の対応関係を現在の段階でつかんでいないことを示しているのかもしれない。

完全なシグナルと地震との間の対応関係を実証するためには、観測を継続、徹底すると同時に(電位差の情報のみならず震源、特に深さやマグニチュードに関する正確な情報も必要であろう)、SES発生、伝播に関する理論的裏付けが不可欠であると思われる。また、我々の得た経験をもとに、再度、ギリシャのデータを検討してみたいところである。

最後に、本研究において絶大なるご支援を頂いている日本電信電話株式会社に
厚く感謝致します。

References

P. Varotsos and K. Alxopoulos (1984a,b), Physical properties of the
variations of the electric field of the earth preceding earthquakes,
1,2, Tectonophys. 110, 73,99.