

10 - 7 地震前兆現象としての電磁気現象の評価

Some Characteristics of Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquake and Volcanic Eruption

防災科学技術研究所

電子技術総合研究所

通信総合研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Electrotechnical Laboratory

Communications Research Laboratory

1 . まえがき

地震発生に伴って生起する現象と地震との関係を定量的に調べるため、我々グループは、1988年から dc, ULF(0.01-0.7Hz), ELF/VLF (1 ~ 10kHz) 帯の現象に注目し、主としてポアホールアンテナを用いた電場計測を行っている (第 1 図)。観測点は、関東東海を中心として、10 観測点で、その内 5 観測点では ELF/VLF (1 ~ 10kHz) 帯の波形を電磁場 6 成分で記録している (第 2 図)。ここでは、これまでの観測データの解析結果をまとめた。

2 . ELF/VLF 帯パルス状変動

ELF/VLF 帯のパルス状電波 (VPS) は、単位時間のパルス数をその特性量として選ぶことにより、地震と少なくとも時間的には密接な関係を有することが明らかになっている (例えば、Oike and Yamada, 1994; Fujinawa and Takahashi, 1990, 1996, 1998)。しかるに、この電波が落雷時にも増大することが多く、地震との本質的な関係については明確でない点がある。その関係をより明確にするためと VPS の発生メカニズムを推測するために、VPS の発生場所を評定する観測網により観測を行っている (Fujinawa et al., 1997)。

1995 年 10 月から約 2 年間にわたるほぼ一様な観測データを解析した結果から、以下の通り推論できる。今回の解析は、地震の前の「異常」な現象の特徴を調べるという観点から行った。対象とする 17 個の地震 (第 2 図に震央を示す) は、観測網の近辺で起きた M5.0 以上 (第 1 表の 印) 及び観測網のなかで発生したそれよりやや小さいもの (第 1 表の 印) である。代表的な VPS の波形の例を第 3 図に示すが、継続時間が 1 m s ぐらいで、S/N は電磁場 6 成分いずれも似ているが、若干鉛直電電界の方が優れている。「初動」到達時間の読みとりが十分の精度で可能であり、震源決定と同様な方法で波源を決めることが出来る。

(1) 地震発生の数日前から VPS が増大するという経験則 (Oike and Yamada, 1994) に沿い、大部分の浅発かつマグニチュード M 約 5 以上の地震で、その増大が検出される。第 4 図には、例として 1996 年 3 月 6 日に山梨県東部で発生した地震の際の VPS の各観測点での時間的变化を示した。第 5 図には、観測点波崎における対象とした 17 個の地震の場合につき、地震発生時間を揃えて示すとともに、それらの平均と標準偏差を右下に示した。表 2 の " Global " の欄の 印 は、第 4 図に例示したような殆どの観測点で VPS が増大したことを意味する。

- (2) 地震前に顕著に増大する VPS は、落雷時にも常に増大する。然し、落雷のないときにも観測され、地震活動に伴う VPS の存在が示唆される。
- (3) VPS は、必ずしも震央から出ているのではなく（第 6 図に 1996 年 9 月 11 日に千葉県東方沖に発生した地震の際の VPS の波源を、一日ごとに示す）、1996 年 10 月 16 日を中心とする期間に発生した伊豆半島東方沖の群発地震の場合（第 7 図）を除いて、殆ど全ての場合に震央とはかなり離れた位置に決まり（第 2 表の "cluster to epicenter" の欄で、印が震央のごく付近、印がその可能性があるも不明確、×印は震央とは明らかに離れた位置であること等を示す）、経度方向に数 100km の幅で緯度方向には少し狭い幅で分布している。
- (4) 地震に伴う電磁界変動の発生のメカニズムについては、幾つかの説が提案されている。大別すると、震源域から直接的に放射されるというもの、誘起された大気中の電磁場の変動によって何らかのトリガー効果が働き顕著な放射があるというものである。今回の解析の結果、後者のトリガー効果を介したメカニズムが有力であることが示唆される。ちなみに最近、Molchanov ら（私信）が、その可能性を示す理論モデルを提唱している。
- (5) 1998 年 2 月 21 日に観測点長岡のごく近辺に発生した M5.0 の地震の際に、長岡において VPS が異常に増大した（第 8 図に各観測点における VPS の時間変化を示す、長岡は "NAGAOKA" で記す）。これは、震源域から直接に放射したものと考えられる。そのような例は、第 2 表の P n の欄において "singular" として、その有り無しが示されている。然し、現時点においては、我々はそのような VPS の波源の三次元評価には成功していない。

3 . ULF 帯変動

1998 年 8 月 7 日より長野県と岐阜県境近くの上高地、槍ヶ岳付近に発生した群発地震（第 9 図）の際の観測点穂高におけるデータ、伊豆半島東方沖群発地震及び 1990 年伊豆大島小規模噴火の際の伊豆大島におけるデータ等を解析して得た結果は、以下の通りである。

- 1) 電界変動は、地震活動特に群発的地震活動との相関が高い（第 10 図に穂高における平常時の記録の例、第 11 図は群発地震の開始の数時間前に異常電場が記録されていることを示唆、第 12 図は群発地震の中で 2 番目に大きい M4.9 の地震の前後の変動、第 13 図は、8 月 16 日の群発地震の中で最大の M5.2 の地震の前後の非常に大きな変動を、それぞれ示す）。第 14 図には、1990 年の伊豆大島三原山の微少な噴火活動時における同島における観測点での波形を示すが、観測方法を選ぶことにより、電界変動観測は地震、火山活動の予測に有効であろうと考えている。

長時間にわたる変動の様子を示すため、第 15 図に 1998 年 7 月・8 月の dc 成分を、第 16 図に ULF 成分を、第 17 図に ELF/VLF 帯を示し、さらに比較のため第 18 図に、1997 年 8 月における dc 成分と ULF 成分を示す。

- 2) 地震活動に伴う電界変動は、dc 成分(dc ~ 0.7Hz)、ULF 成分(0.01 ~ 0.7Hz)、VLF 成分(1 ~ 9kHz) のすべての測定帯域に今回表われたが、dc 成分、ULF 成分が遙かに顕著である（第 15 図 ~ 第 17 図を参照）。ELF/VLF 帯の信号は、「広域」観測網で検知されず（第 19 図）、この信号は先に述べたような小さい振幅であるため震源域の近傍でのみ記録され、地表から直接的に放射されたものであると推測される。

- 3) 鉛直電場成分が、水平成分に比べ大きく、ボアホールによる計測では深部で発生した電場変動が検知されたものと考えている。
- 4) 今回観測された dc 成分、ULF 成分の波形は、伊豆半島東方沖群発地震活動および伊豆大島における小規模噴火活動に伴って観測点伊豆大島で記録されたそれら（第 14 図に dc 成分の例を示す）と、大きな類似性があり、これらの電磁場変動発生のメカニズムとしては、マグマ活動を起源とした地下水の流動による流動電位効果に関係したものであると推測している。

4. 断層運動に伴う電磁場放射

1994 年北海道東方沖で、M8.1 の巨大地震が発生した（第 20 図）が、その際に、地震の前にも、先述した顕著の VPS の数の増大があった（第 21 図、第 22 図）。この際に、地震波動の到来とともに各測点で地震動と特に速度波形と相関の高い電場変動が観測された（第 23 図に観測点波崎、勝浦の波形を示すが、それらの図の上段の 2 つの矢印で示した変動の主要部以降の波形）。

また、このほか、破壊の開始に近い時刻（第 23 図の T 0）に、ELF/VLF 帯に顕著な信号が観測された。その信号の各観測点への到達時間は、時刻計測の精度の範囲で、T 0 に等しく、断層面の運動に伴って電磁波が放射されたことが示唆される。しかし、1995 年の兵庫県南部地震の際を含め顕著な同種の信号（co-rupture radiation）は、このほかでは見いだせていない。それは、一つには信号レベルが小さすぎるためではないかと考えている。

（藤縄 幸雄）

参 考 文 献

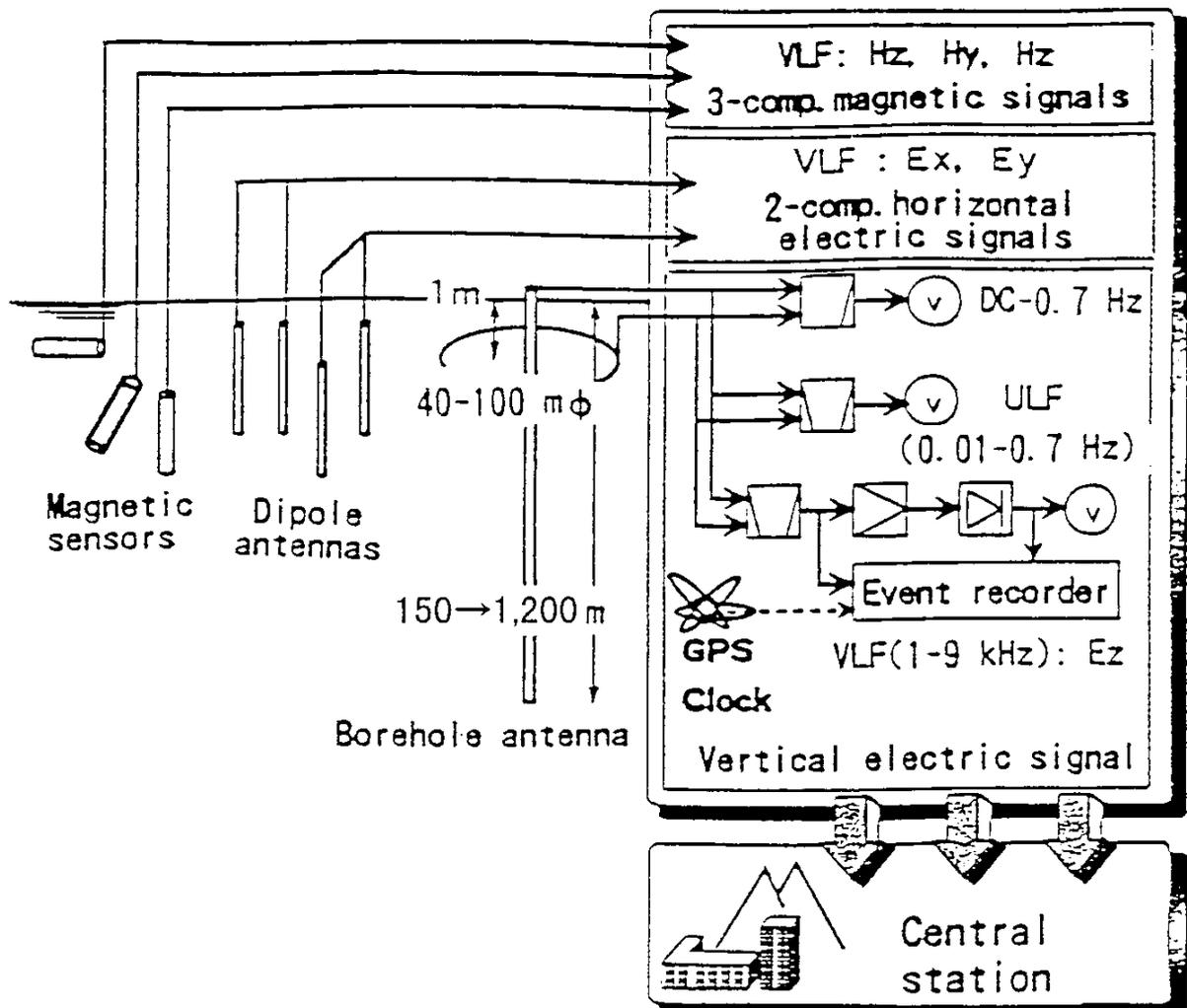
Fujinawa, Y., and Takahashi, K., 1990, Emission of electromagnetic radiation preceding the Ito seismic swarm of 1989, *Nature*, 347: 376 - 378.

Fujinawa, Y., and Takahashi, K., 1996, Anomalous VLF subsurface electric field charges preceding earthquakes in *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, Terra Scientific Pub. Tokyo (eds. Hayakawa, M. and Fujinawa, Y.), 131 - 147.

Fujinawa, Y., Takahashi, K., Matsumoto, T., and Kawakami, N., 1997, Experiments to Locate Sources of Earthquake-related VLF Electromagnetic Signals, *Proc. Japan Acad.*, 73, Ser. B 33 - 38.

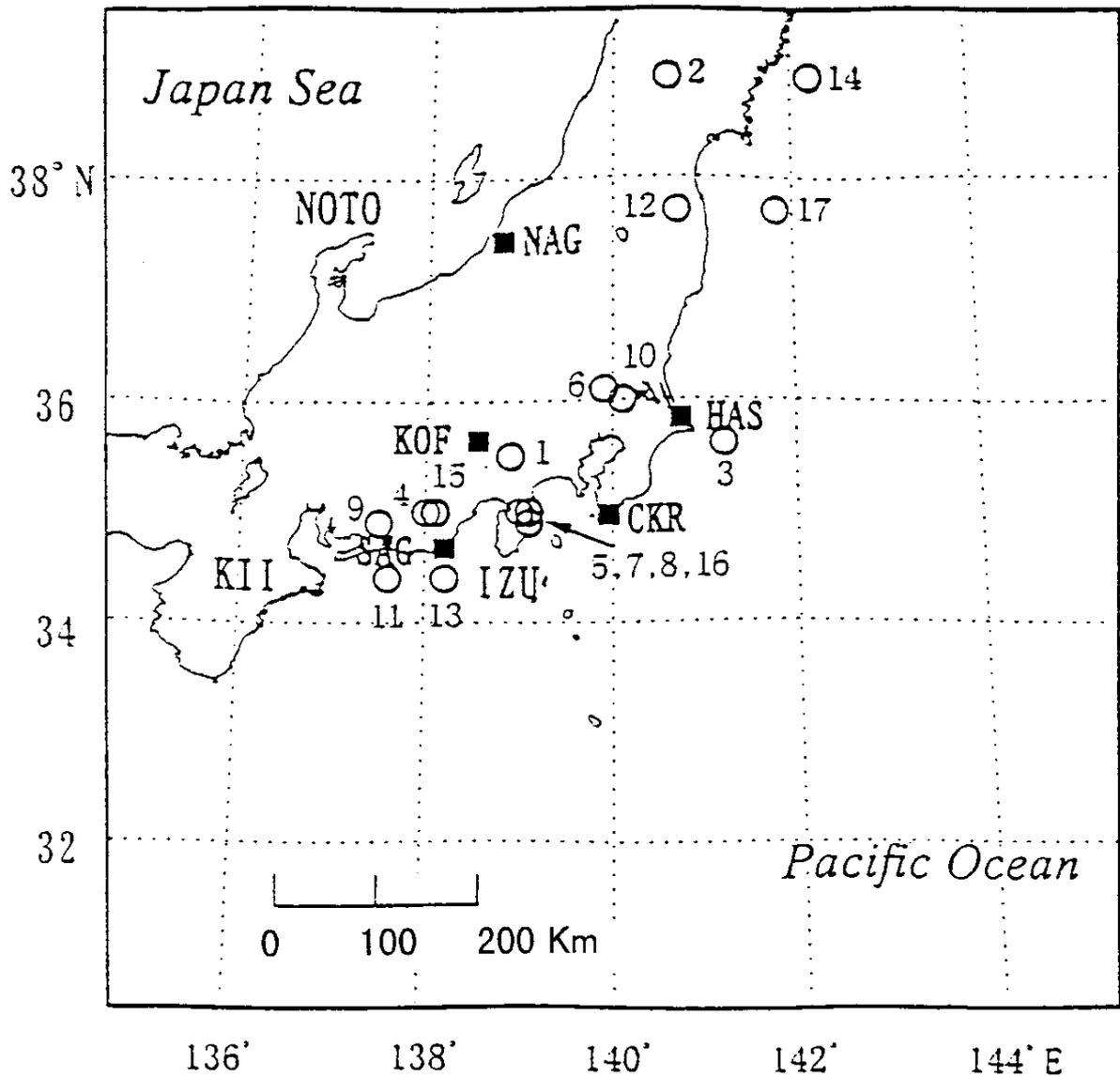
Fujinawa, Y., and Takahashi, K., 1998, Electromagnetic radiations associated with major earthquakes : *Phys. Earth Planetary Inter.* 105, 249 - 259.

Oike, K., and Yamada, T., 1994, Relationship between shallow earthquakes and electromagnetic noises, in the LF and VLF ranges, *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, Terra Scientific Pub. Tokyo (eds. Hayakawa, M. and Fujinawa, Y.), 115 - 130.



第 1 図 電磁界計測装置の概要

Fig.1 Schematic diagram of multiple component electromagnetic field observations including facility to locate the source point of VLF band pulse-like signal (VPS).



第2図 電磁界変動観測点()及びVPSの特性を調べた17個の地震(表1)の震央。

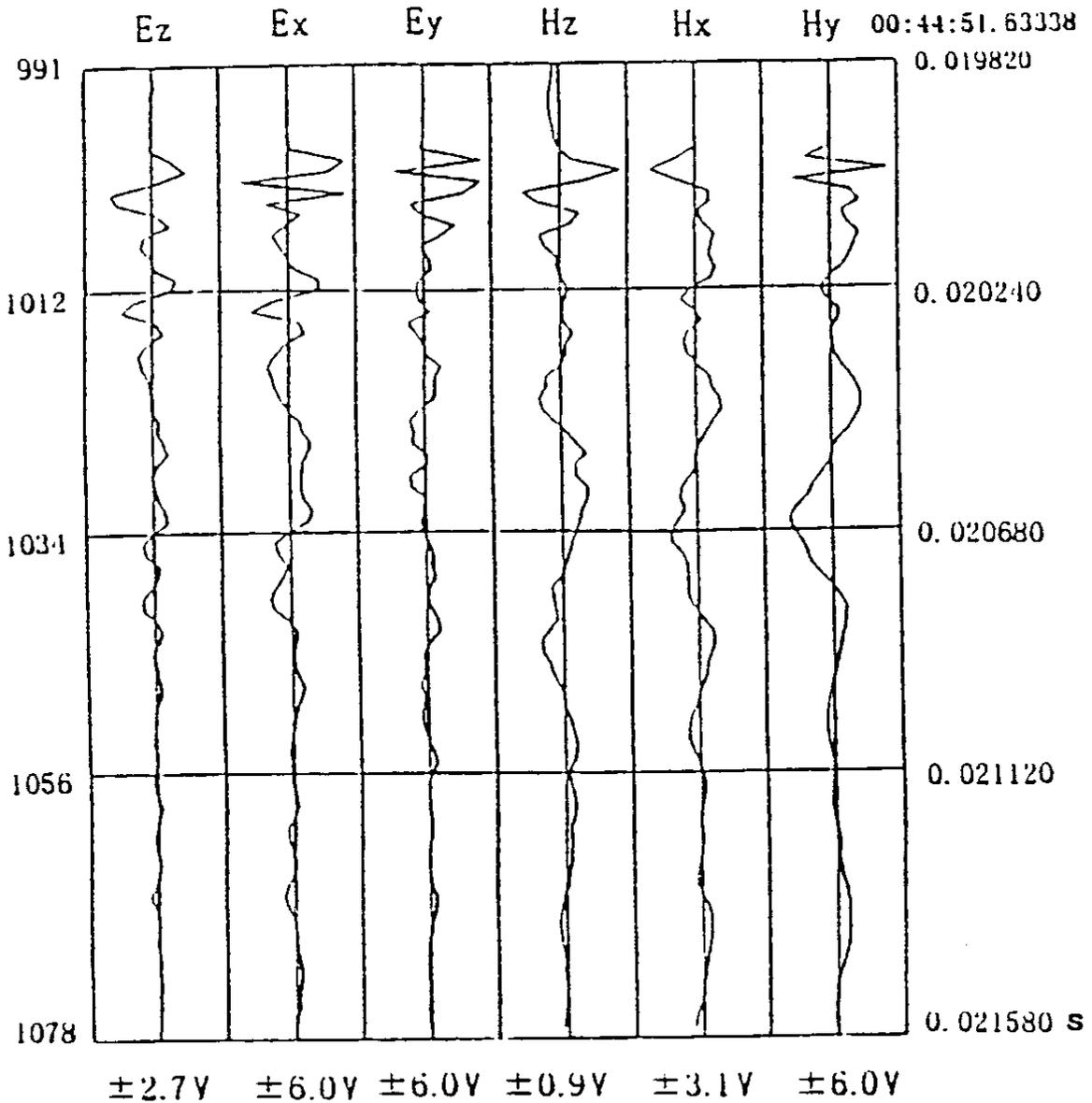
Fig.2 Locations of multiple electromagnetic field observation sites() in the central area of Japan with hypocenter of earthquakes dealt for the present experiment to see the source location of VPS with respect to earthquakes.

第1表 VPS と地震との関係調べるのに用いた地震の諸元

Table 1 Earthquake focal parameters occurred in around the observation network with focal depth smaller than 100km, and magnitude larger than 5.0 (○) as well as less than 5.0 (△).

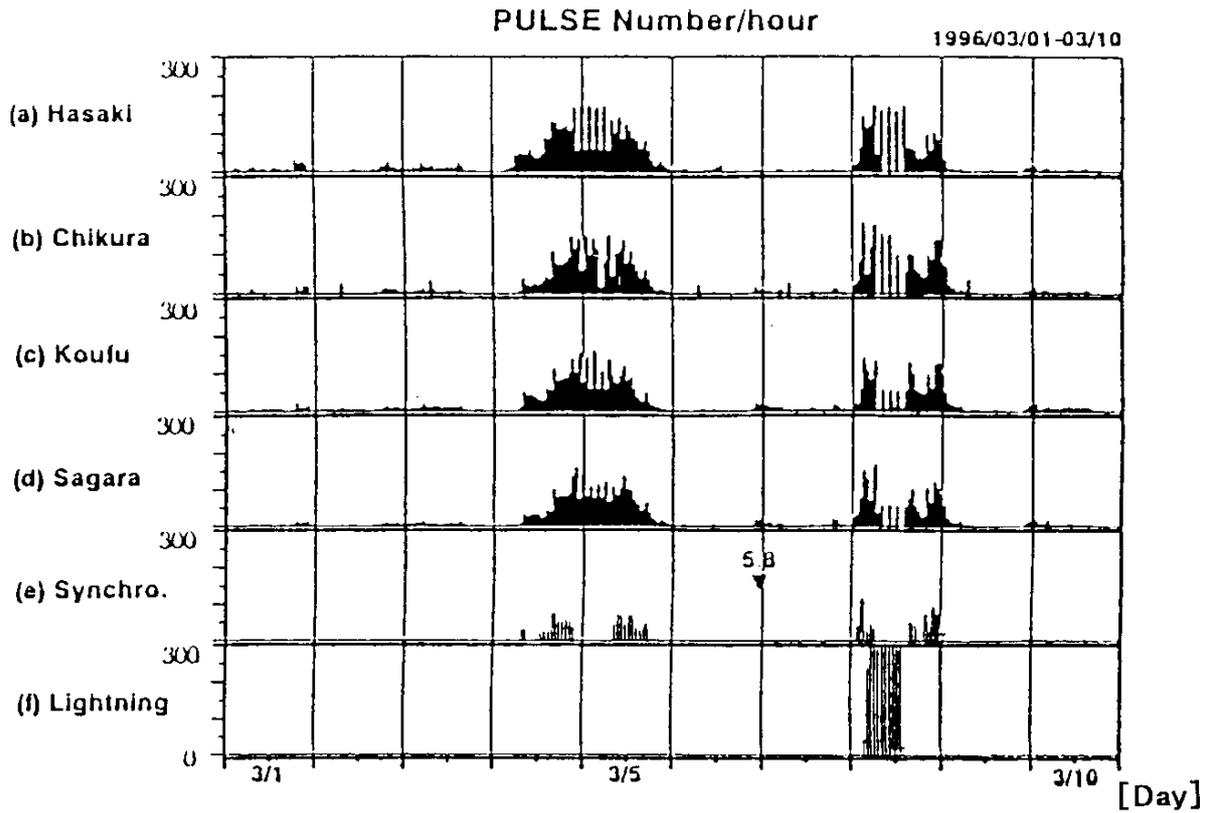
No.	TIME	PLACE	LAT.	LON.	DEP.	MAG.	COM.
	Oct. 1995 - Dec. 1997						
1	6 Mar 1996, 23:35	Yamanashi-ken-tobu	35°28'	138°57'	20km	5.8	○
2	11 Aug 1996, 03:12	Akita-ken-nairikunanbu	38°55'	140°38'	7	5.9	○
3	11 Sep 1996, 11:37	Chiba-ken-tohooki	35°38'	141°12'	53	6.2	○
4	5 Oct 1996, 09:51	Shizuoka-ken-seibu	35°03'	138°02'	26	4.4	△
5	16 Oct 1996, 22:58	Izu-hanto-tohooki	34°59'	139°07'	5	4.1	△
6	21 Dec 1996, 10:28	Ibaraki-ken-nanbu	36°06'	139°52'	53	5.4	○
7	3 Mar 1997, 23:09	Izu-hanto-tohooki	34°58'	139°10'	3	5.0	○
8	4 Mar 1997, 12:51	Izu-hanto-tohooki	34°57'	139°10'	2	5.7	○
9	16 Mar 1997, 14:51	Aichi-ken-nanbu	34°56'	137°32'	39	5.8	○
10	23 Mar 1997, 14:58	Ibaraki-ken-nanbu	35°58'	140°06'	72	5.0	○
11	24 May 1997, 2:50	Ensyunada	34°30'	137°30'	23	5.9	○
12	29 Sep 1997, 23:46	Choshi	37°42'	140°42'	60	4.5	△
13	11 Oct 1997, 14:41	Ensyunada	34°40'	138°02'	30	5.0	○
14	11 Oct 1997, 18:45	Miyagi-ken-oki	38°54'	142°12'	50	5.3	○
15	21 Oct 1997, 19:55	Shizuoka-ken-seibu	35°01'	138°02'	30	4.4	△
16	1 Nov 1997, 20:37	Kanagawa-ken-seibu	35°02'	139°01'	10	4.0	△
17	7 Dec 1997, 13:30	Fukushima-ken-oki	37°07'	140°08'	80	5.7	○

17 Dec., 1995



第3図 ELF/VLF帯のパルス状電波(VPS)の波形例

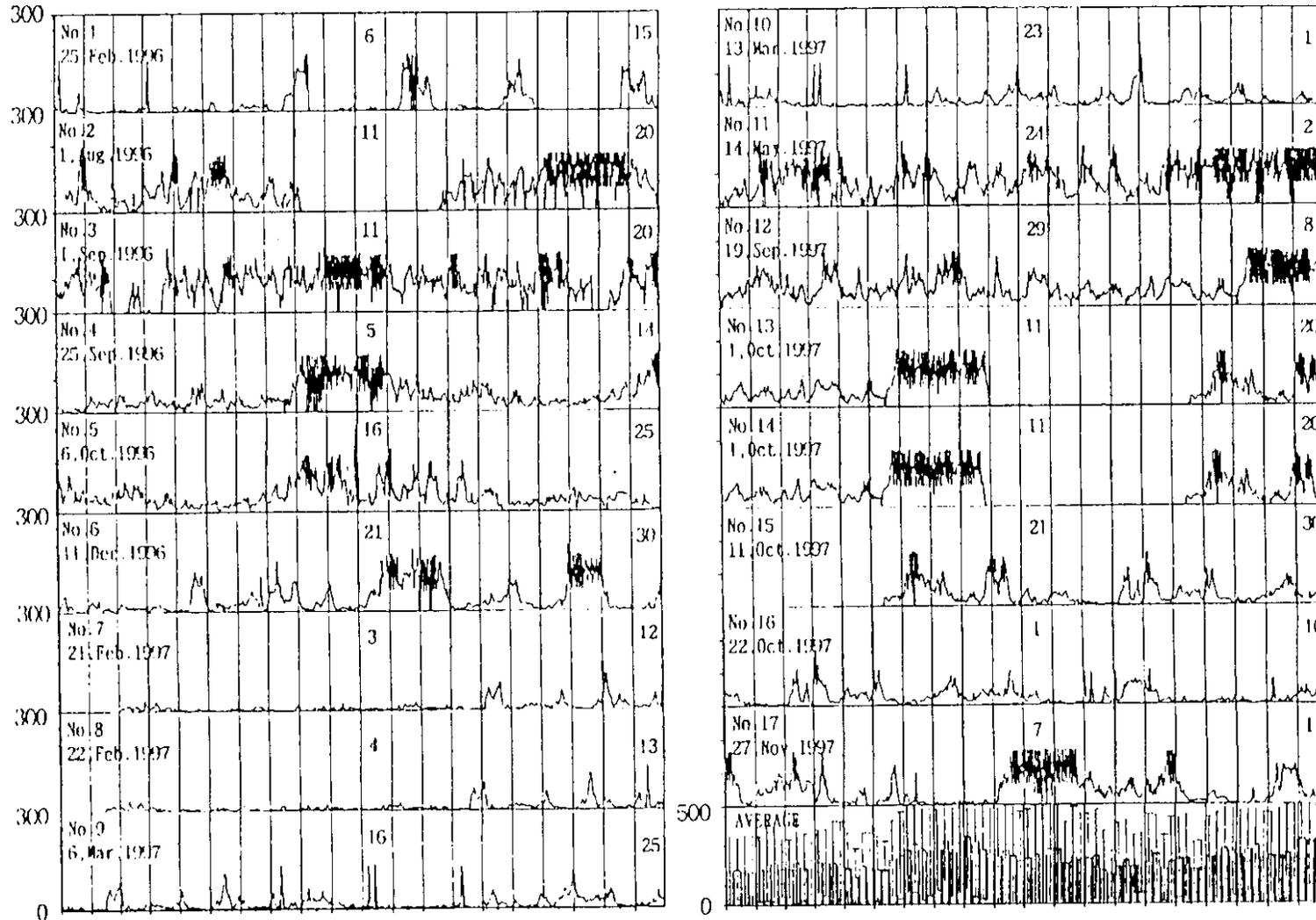
Fig.3 An example of VPS waveform seen in the three electric and three magnetic components. There is no essential difference among six components at least to read first arrival times of VPS events.



第4図 山梨県東部地震（1996年3月6日）の際のVPSの時間的变化

Fig.4 Number of VLF pulses per hour at around the time of a major shallow earthquake of magnitude $M=5.8$ in the network at four sites. SYNCHRO means the event numbers identified to be the same signal through the time window criterion.

HASAKI Number/hour(Average number/6hours)



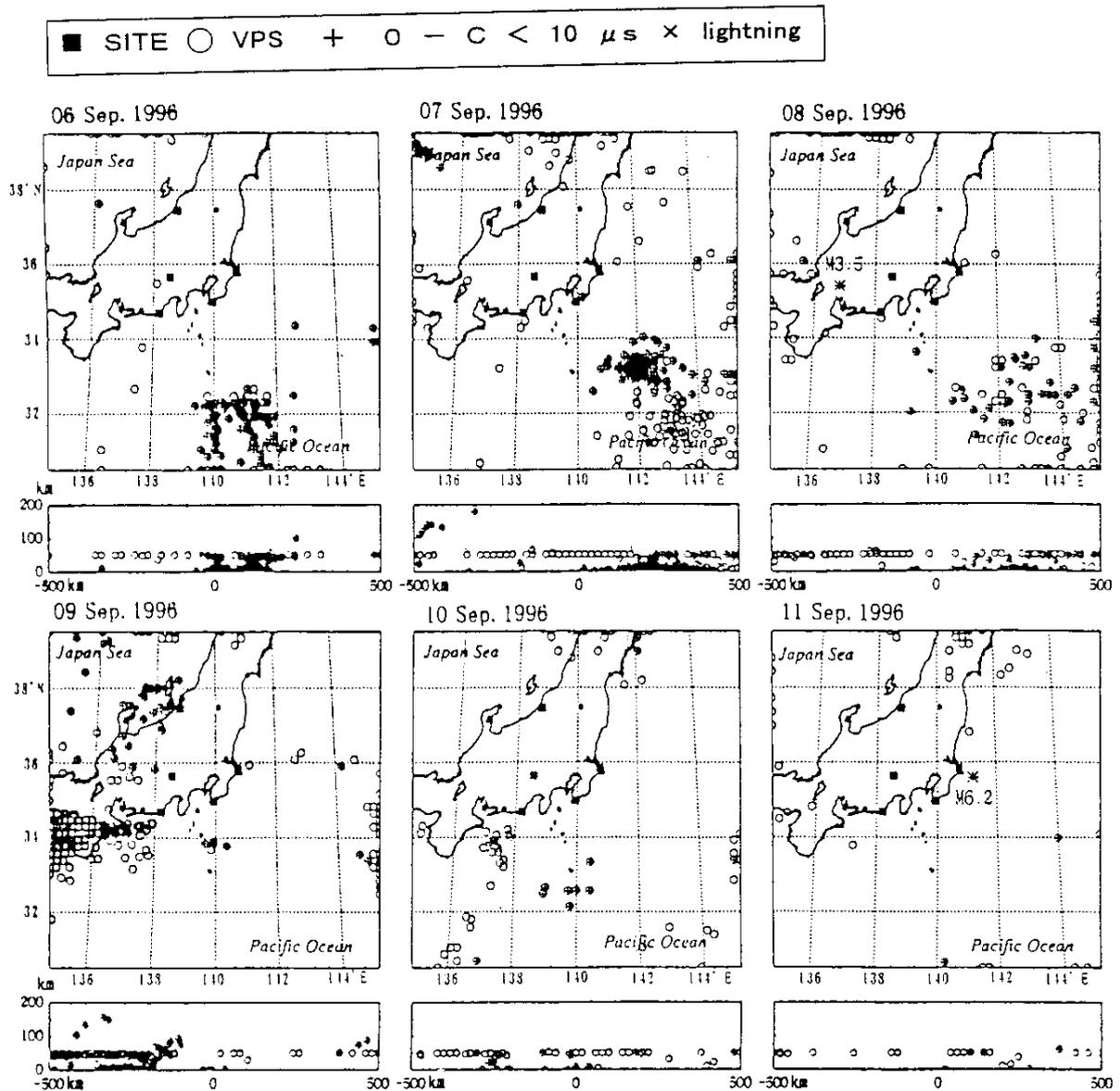
第5図 波崎における各17個の地震時のVPSの時間変化，及び平均値と標準偏差

Fig.5 Time evolution of the number of VPS at Hasaki for the 17 cases of moderate earthquakes for two years with average and standard deviation on the right bottom.

第 2 表 VPS と地震との関係を調べた結果。“ Pn ” は VPS の数に関する事項，“ S ” は、VPS の波源に関する事項

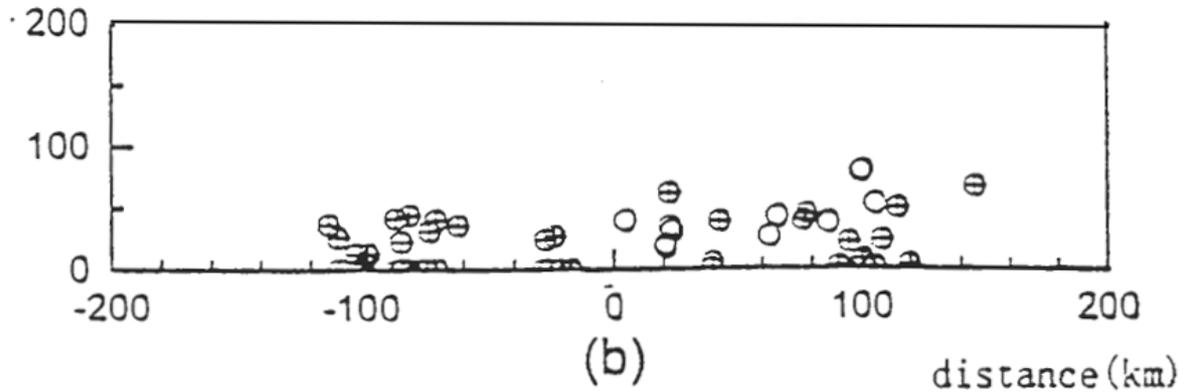
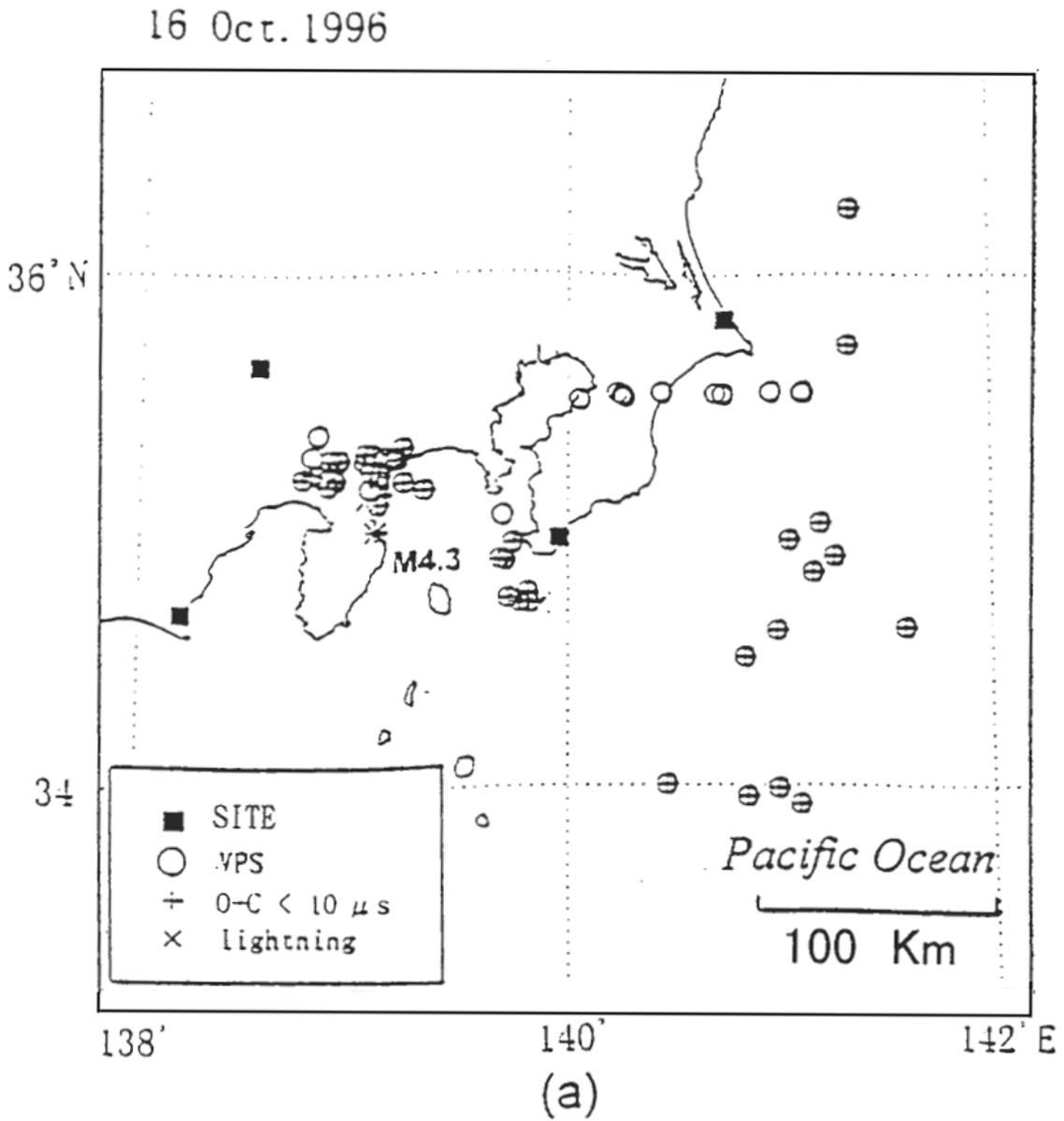
Table 2 Results of data analysis to test the hypotheses of apparent increase of VPS number before the earthquake occurrence in the left large column: P.n.) and source location of VPS at around the epicentral region (in the right large column: S) with the symbol ○ denoting for the hypothesis, × against the hypothesis, and unclear case. In the column Pn "global", "L", and "singular" denote apparent increase of VPS number continuing a few days above the normal state for all sites, lightning activity, and a singular increase at the nearest site to the epicenter, respectively. In the column S(ource) "clustering", and "isolated" denote large number of dropping of the VPS sources at around the epicenter within several tens km, and of several number of sources.

No.	Pn (triggered SRS)			$\Sigma Kp(\max)$	S (source)	
	global	L	singular	maximum sum of eight Kp values	cluster to epicenter	isolated near epicenter
1	○	○	×	18-	×	×
2	-	-	-	14	-	-
3	○	×	○	32+	×	○
4	○	○	×	24-	×	○
5	○	○	△	25-	○	×
6	○	×	○	22	△	△
7	×	×	×	34	×	×
8	×	×	×	34	×	×
9	○	×	○	22-	×	○
10	○		○	16+	×	×
11	○	○	○	17-	×	○
12	○	○	×	22-	△	○
13	○	×	○	30+	×	△
14	○	×	△	30+	△	×
15	○	○	○	12	×	○
16	○	○	×	25+	×	×
17	○	○	△	16+	△	△



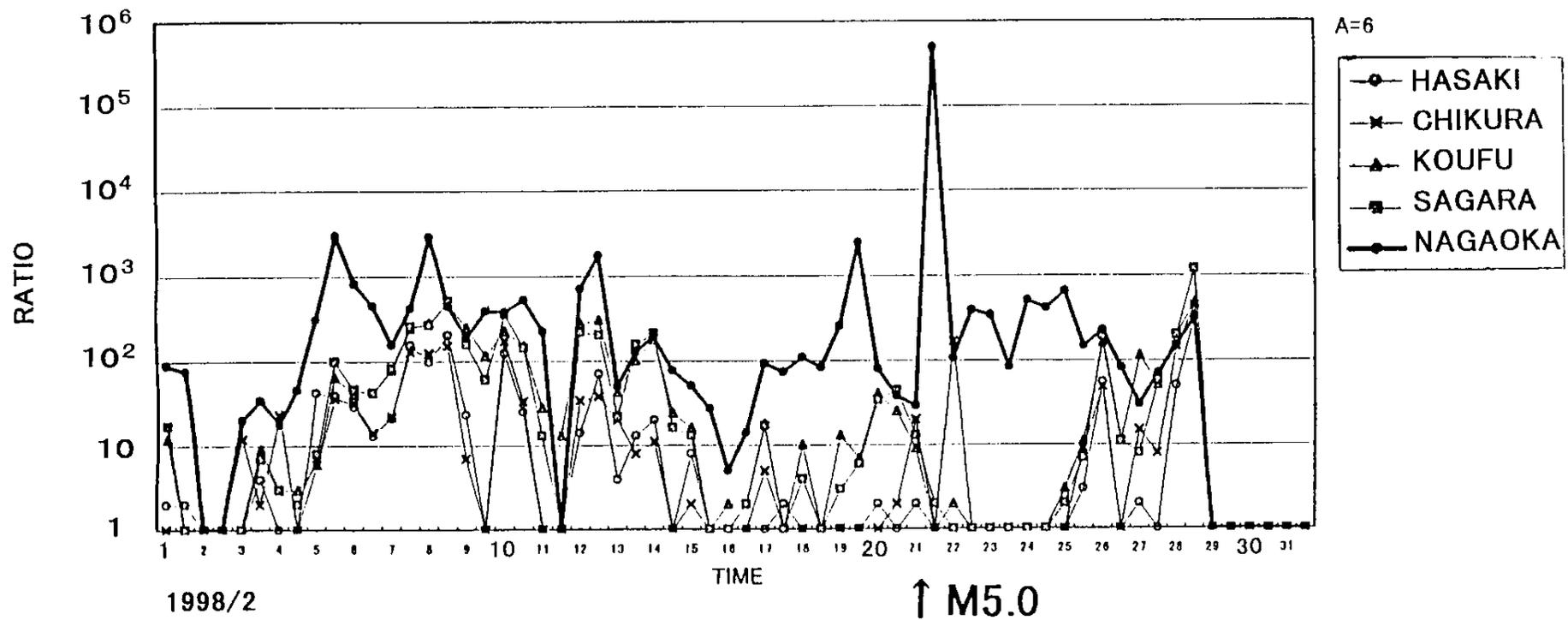
第 6 図 千葉県東方沖に発生した地震 (1996 年 9 月 11 日) の際の VPS の波源

Fig. 6 Source point projections in the horizontal (upper part of each figure) and in the east-west vertical plane (lower part) of the VLF wave from 6 through 11 September, 1996 including the day of earthquake occurrence near the site HASAKI.



第7図 伊豆半島東方沖の群発地震(1996年10月16日前後)の際のVPSの波源

Fig. 7 VLF pulse-like source point on 16 October 1996 at the time of the seismic swarm(*) off the east coast of the Izu peninsula.

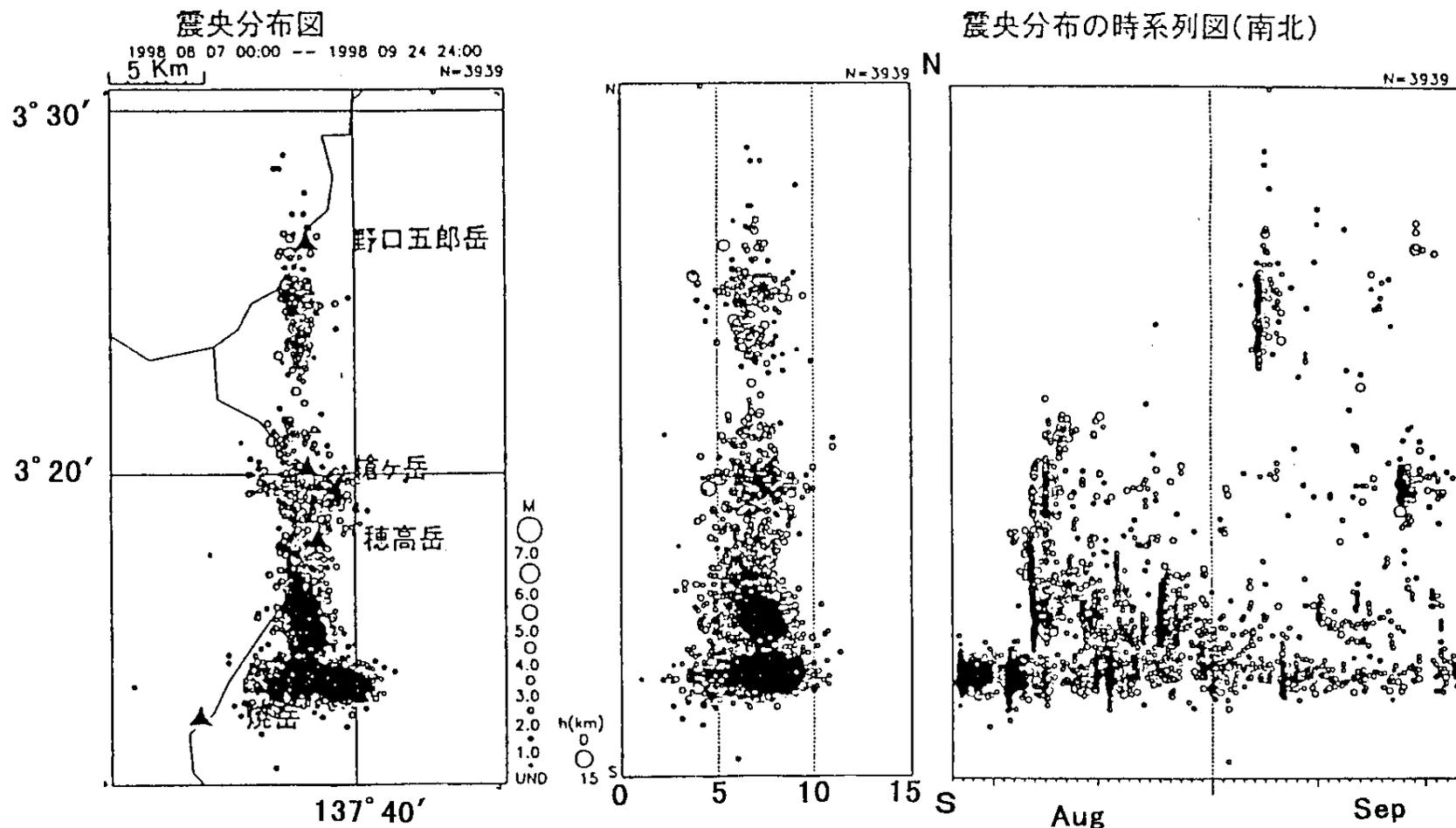


第 8 図 観測点長岡の周辺に発生したM5.0の地震(1998年2月21日)時のVPSの変化

Fig. 8 Number of VLF pulses per hour at around the time of a major shallow earthquake of magnitude M=5.0 just near one of the site Nagaoka in the network.

長野・岐阜県境(上高地～野口五郎岳付近)の地震活動

1998年8月7日0時～9月24日24時0分



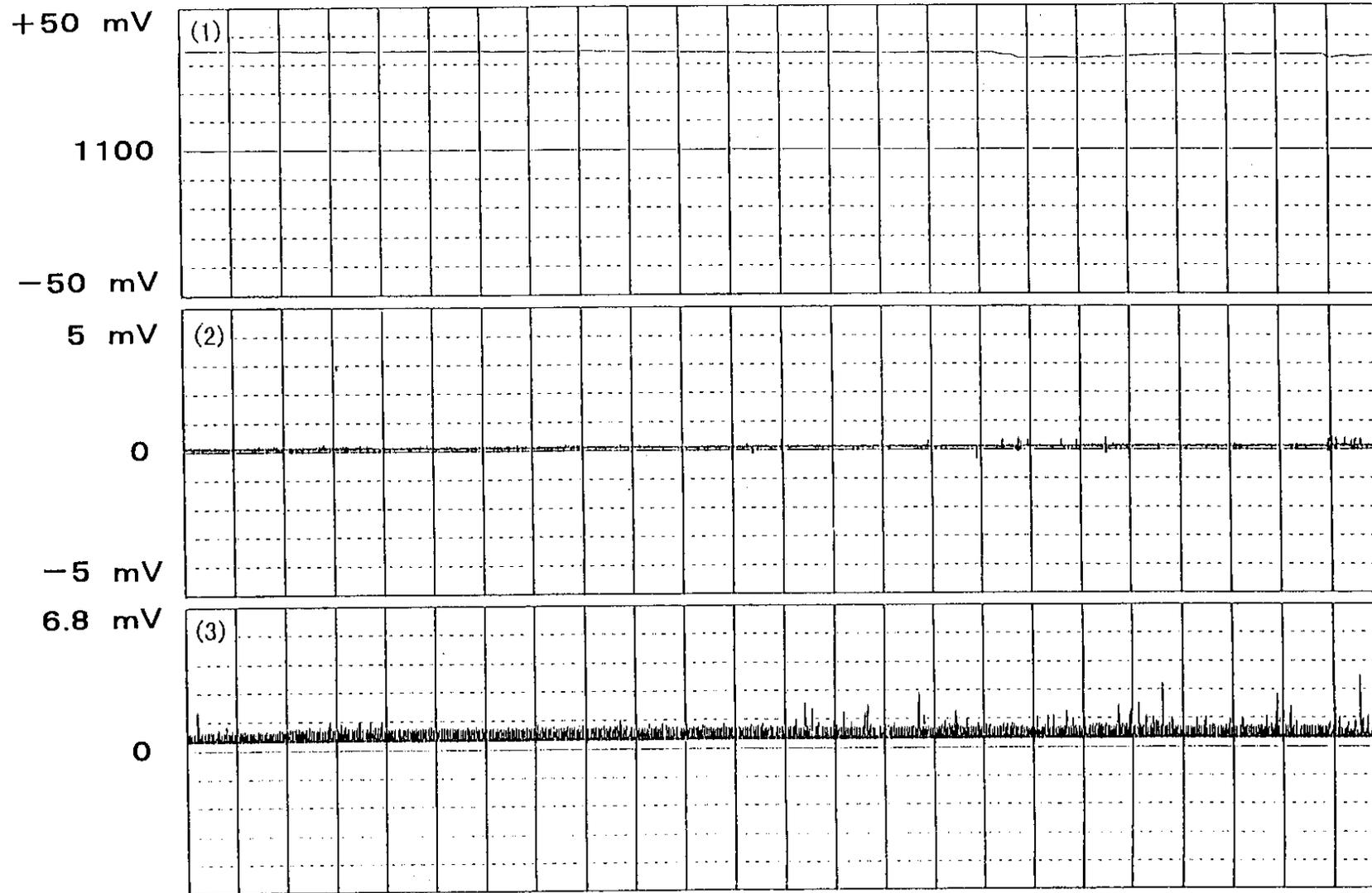
第9図 観測点 Hodaka と長野・岐阜県境の地震の震央分布 (気象庁)

Fig. 9 A seismic swarm occurred since August 7, 1998 just west of the observation site Hodaka.

The activity was the first one since the start of the observation here in 1993.

HODAKA

98/08/06



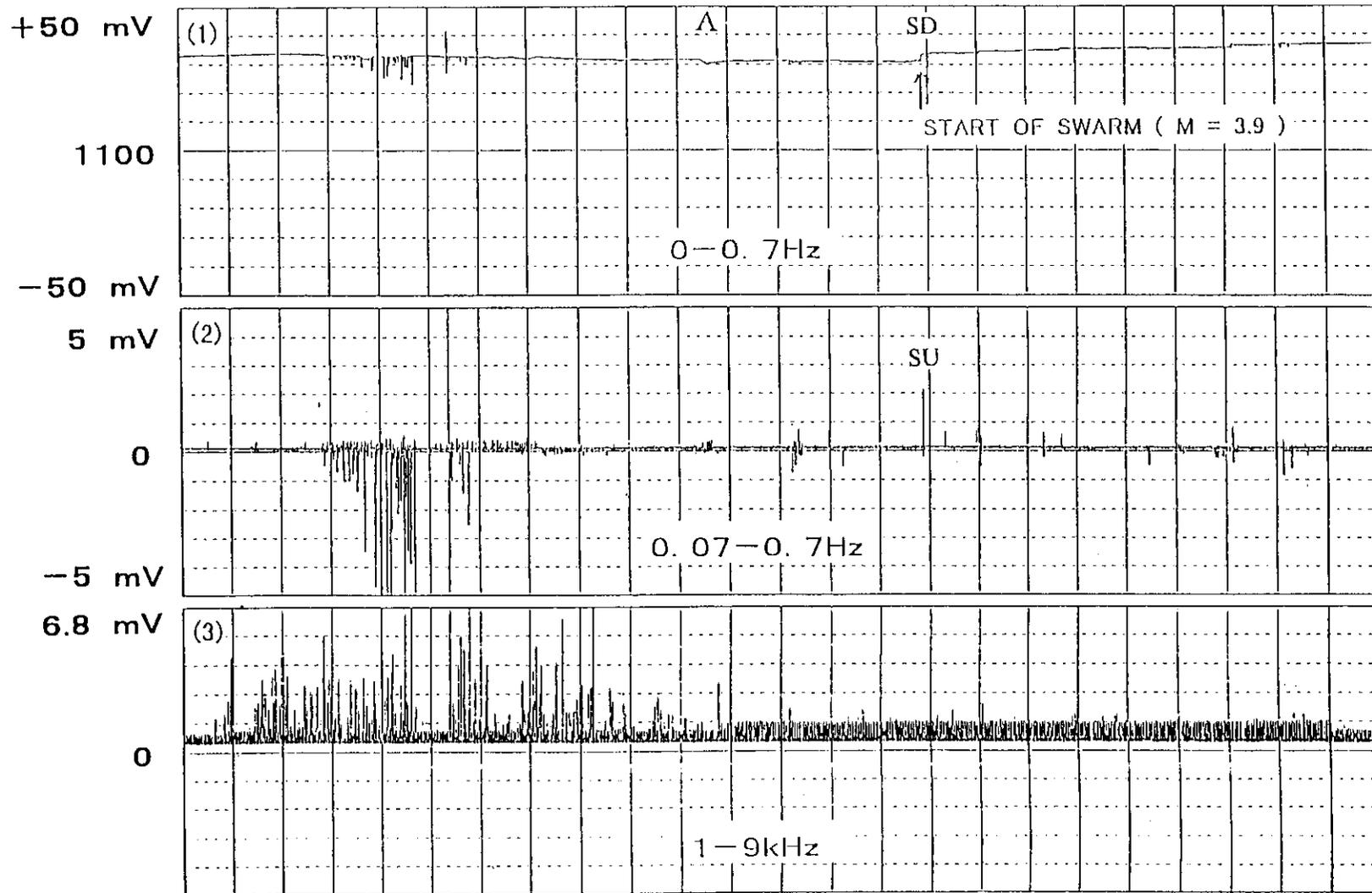
24:00

第 10 図 平常時の電界変動記録の例 (上から, dc, ULF 帯, ELF/VLF 帯)

Fig. 10 An example of normal state monitoring records of the vertical electric field observation on 6 August 1998 at Hodaka.

HODAKA

98/08/07



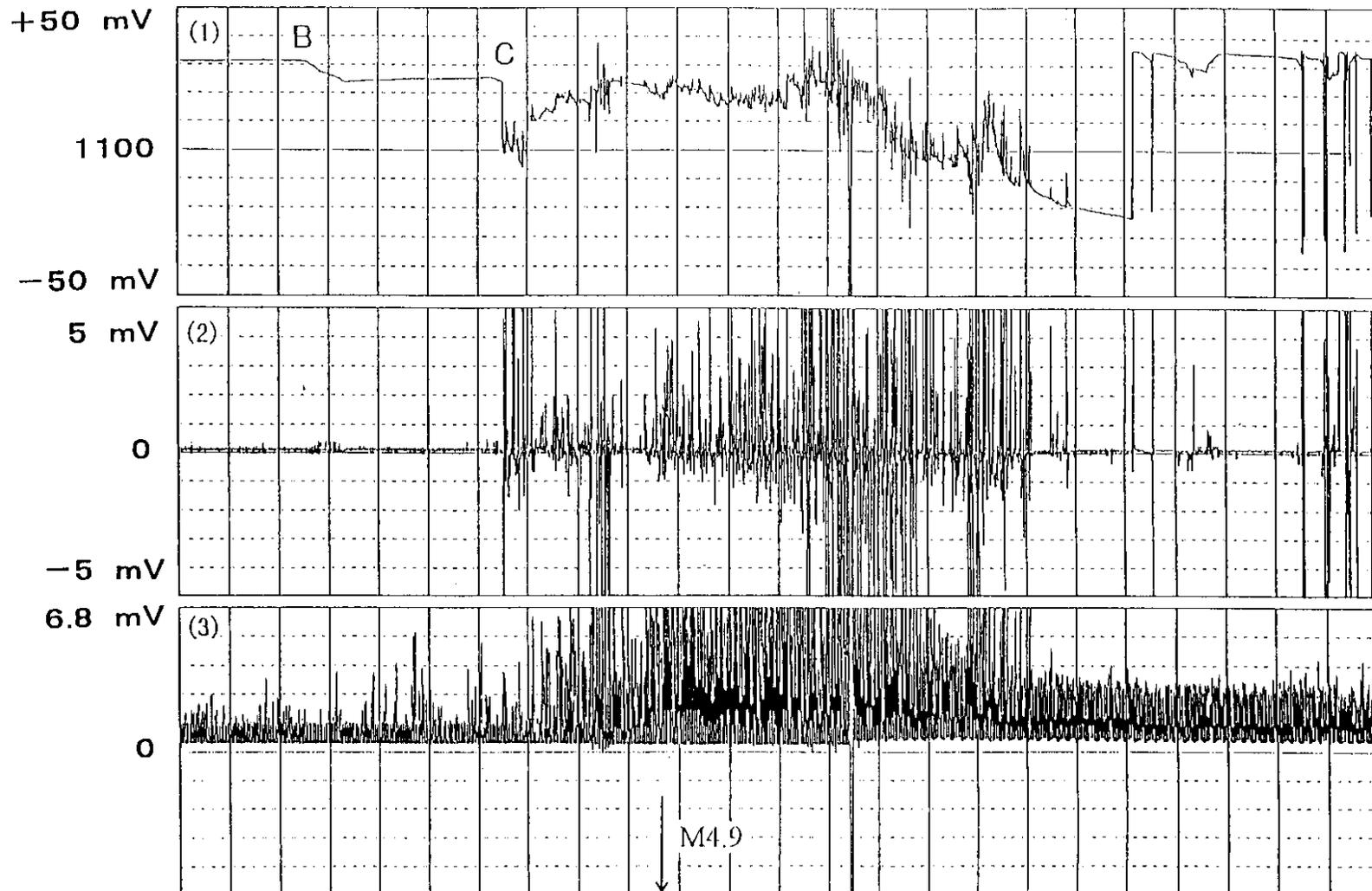
24:00

第 11 図 群発地震開始の数時間前に異常電場変動が記録されている

Fig. 11 Monitoring record on the day of the swarm activity start from about 15:00, 7 August, 1998.

HODAKA

98/08/12



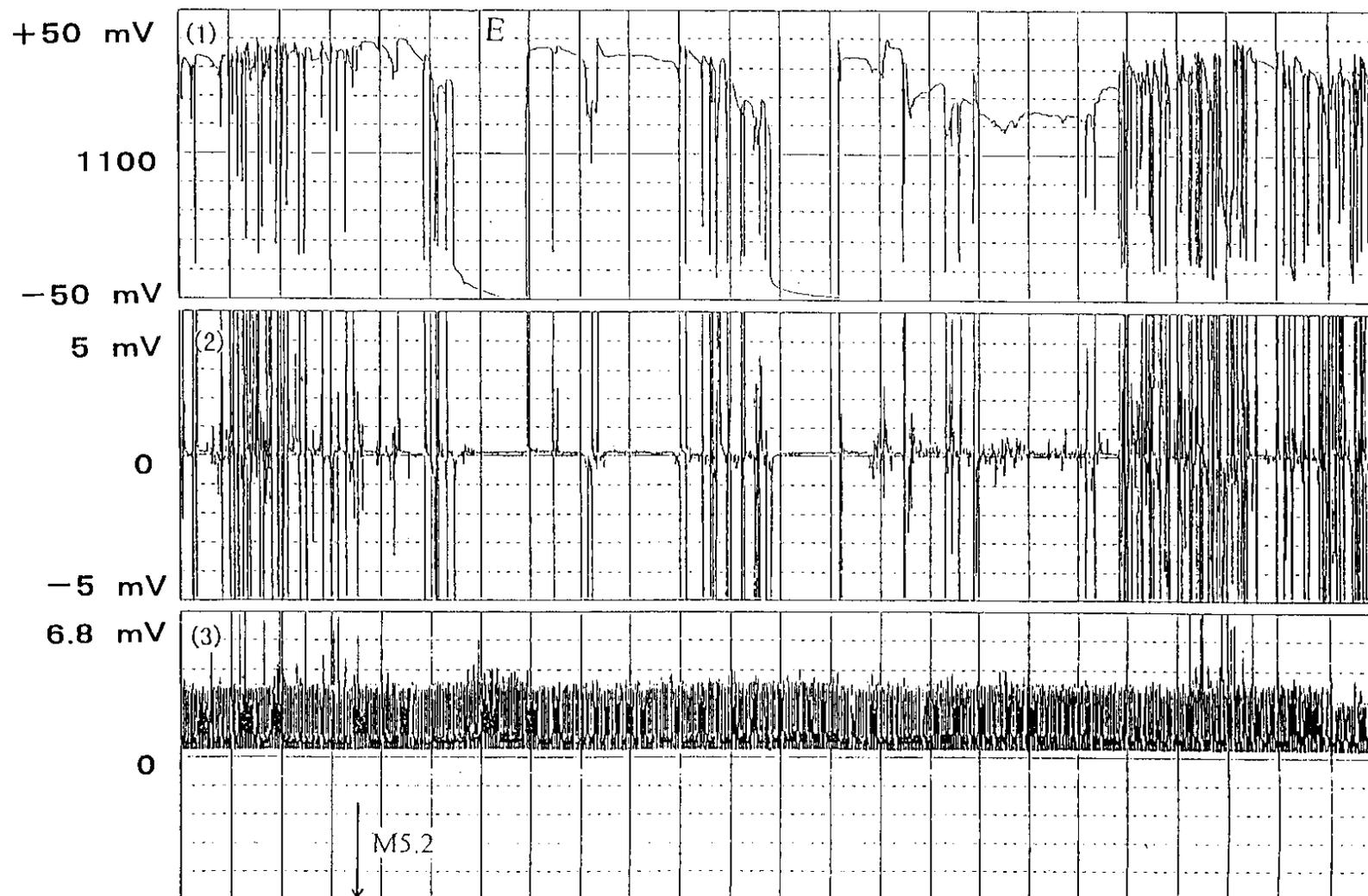
24:00

第 12 図 群発地震の中で大きい方の M 4 . 9 の地震発生前後の電界変動記録

Fig. 12 A very clear anomalous transient electric field changes (SP: self-potential) were recorded about seven hours before the occurrence of the second largest earthquake of magnitude 4.9 in the earthquake swarm.

HODAKA

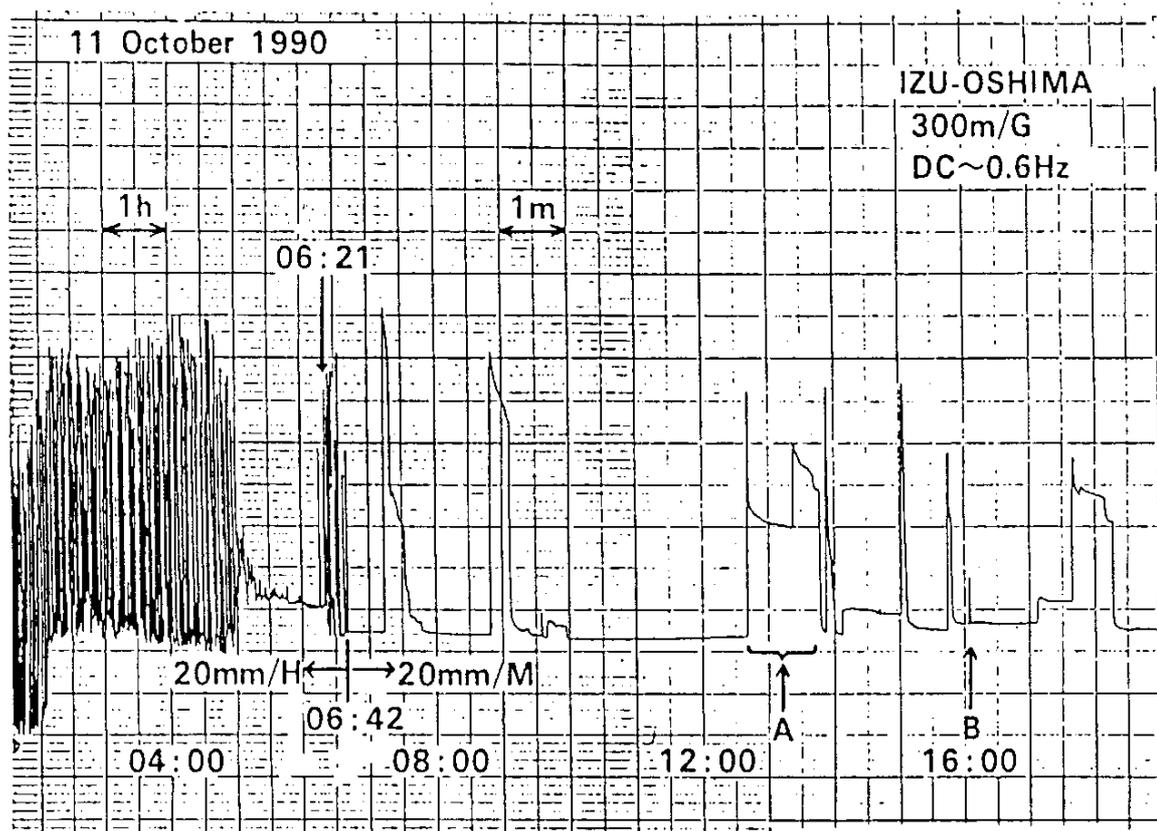
98/08/16



24:00

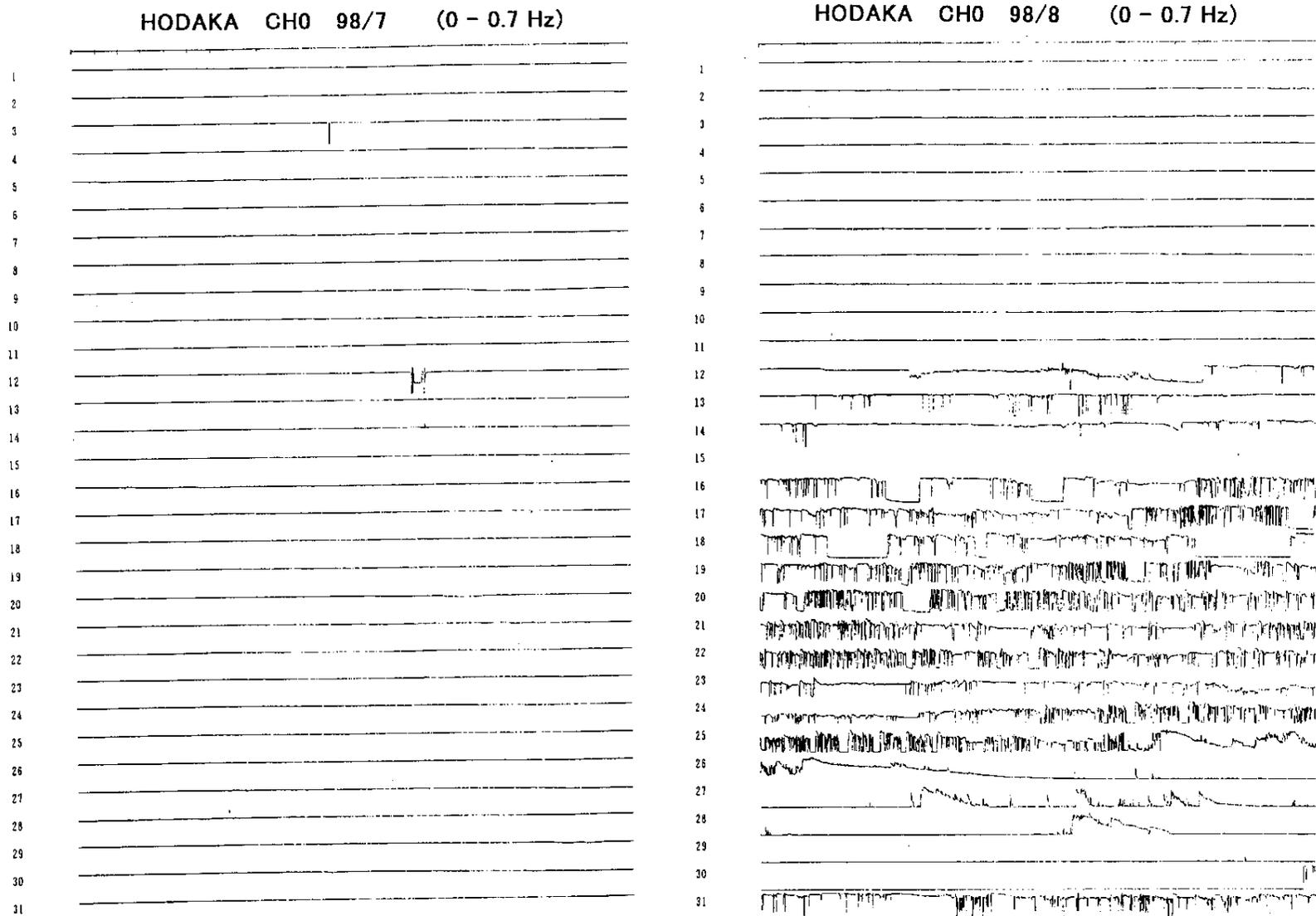
第 13 図 非常に大きな電界変動の例 (8 月 2 5 日)

Fig. 13 The monitoring record on the day of severe fluctuation of the anomalous electric field on 25 August, 1998



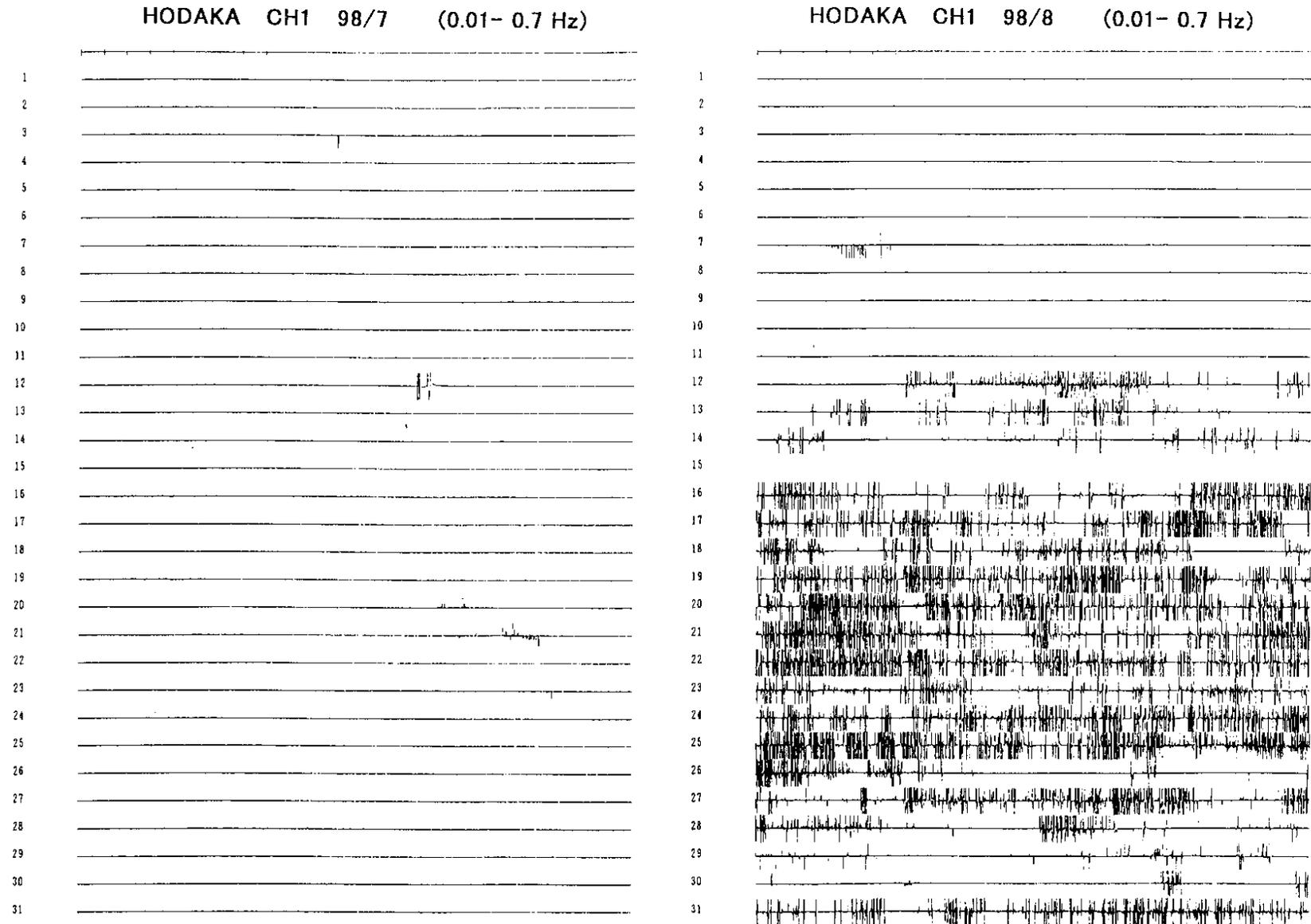
第 14 図 1990 年伊豆大島における微少噴火の際の伊豆大島における電界変動記録

Fig. 14 An example of anomalous electric changes at the time of a small scale eruption of the Izu-Oshima accompanying similar waveforms as the case of swarm at the border of the Nagano and Gifu prefectures in August, 1998.



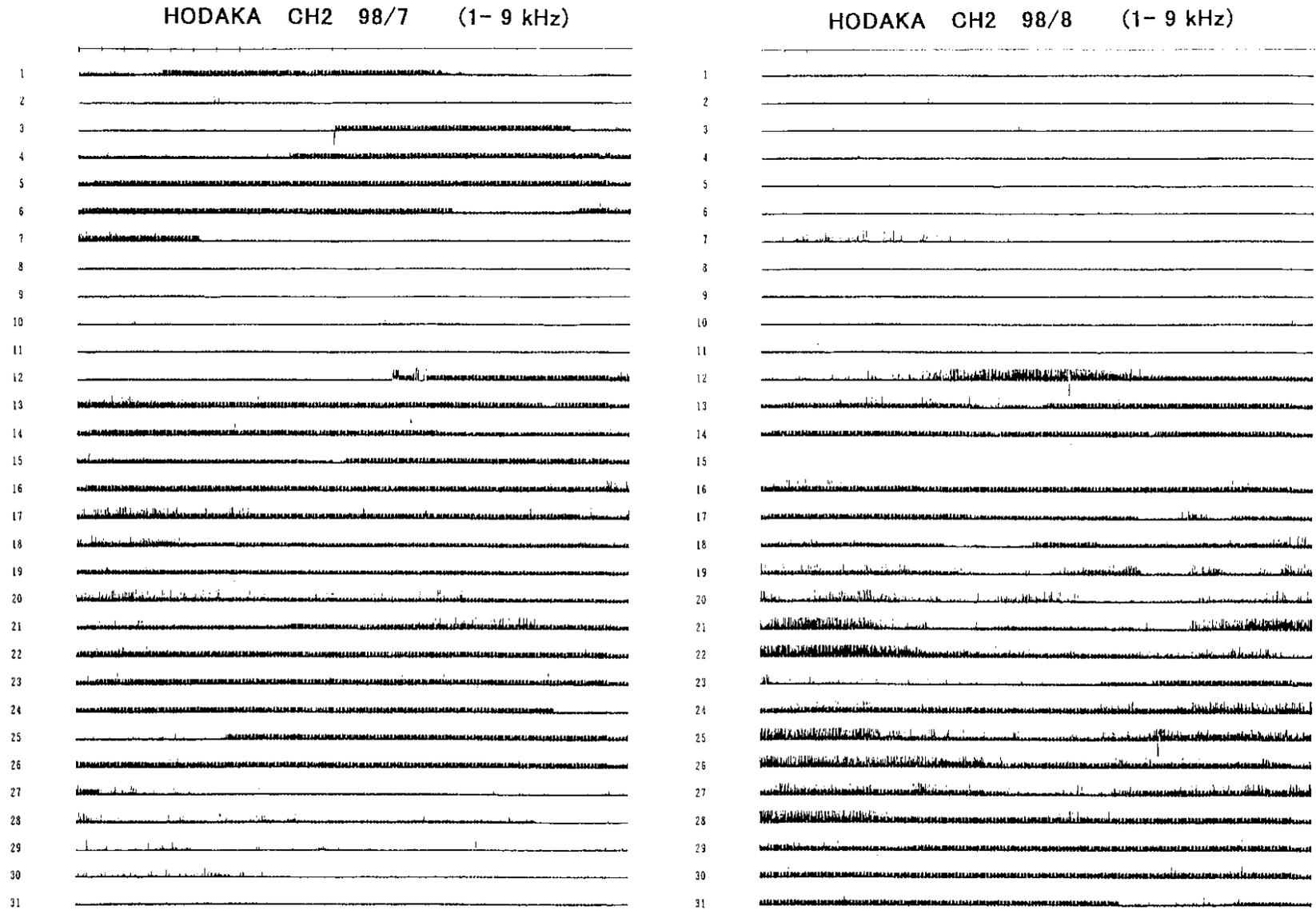
第 15 図 1998 年 7 月及び 8 月の長時間変化 (dc 成分)

Fig. 15 A part of almost continuous records for dc channel of electric field changes is shown for whole August (right) and the previous month (left) of July, 1998.



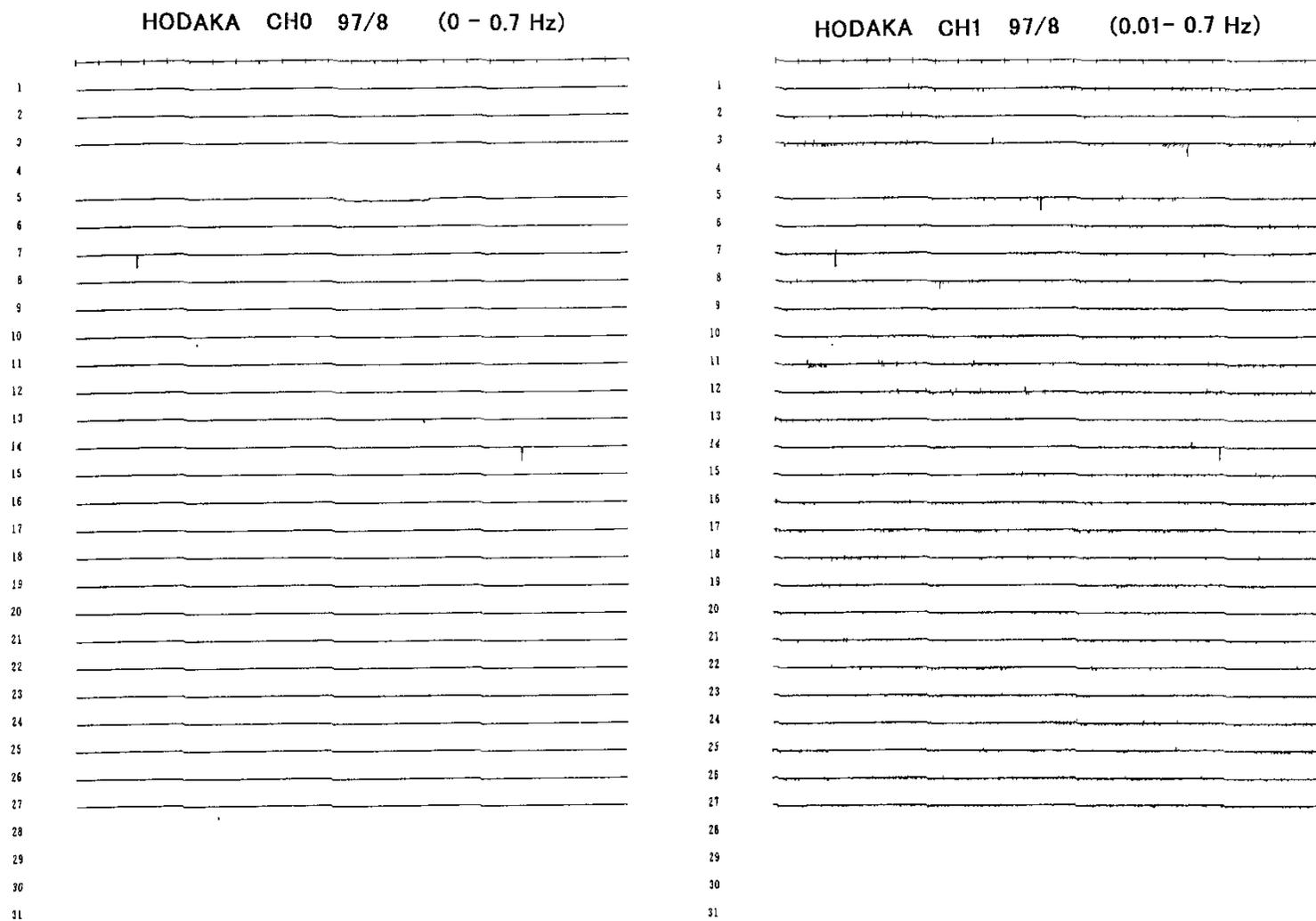
第 16 図 1998 年 7 月及び 8 月の長時間変化 (ULF 成分)

Fig. 16 Same as Fig. 15 except for the ULF channels.



第 17 図 1998 年 7 月及び 8 月の長時間変化 (ELF/VLF 帯)

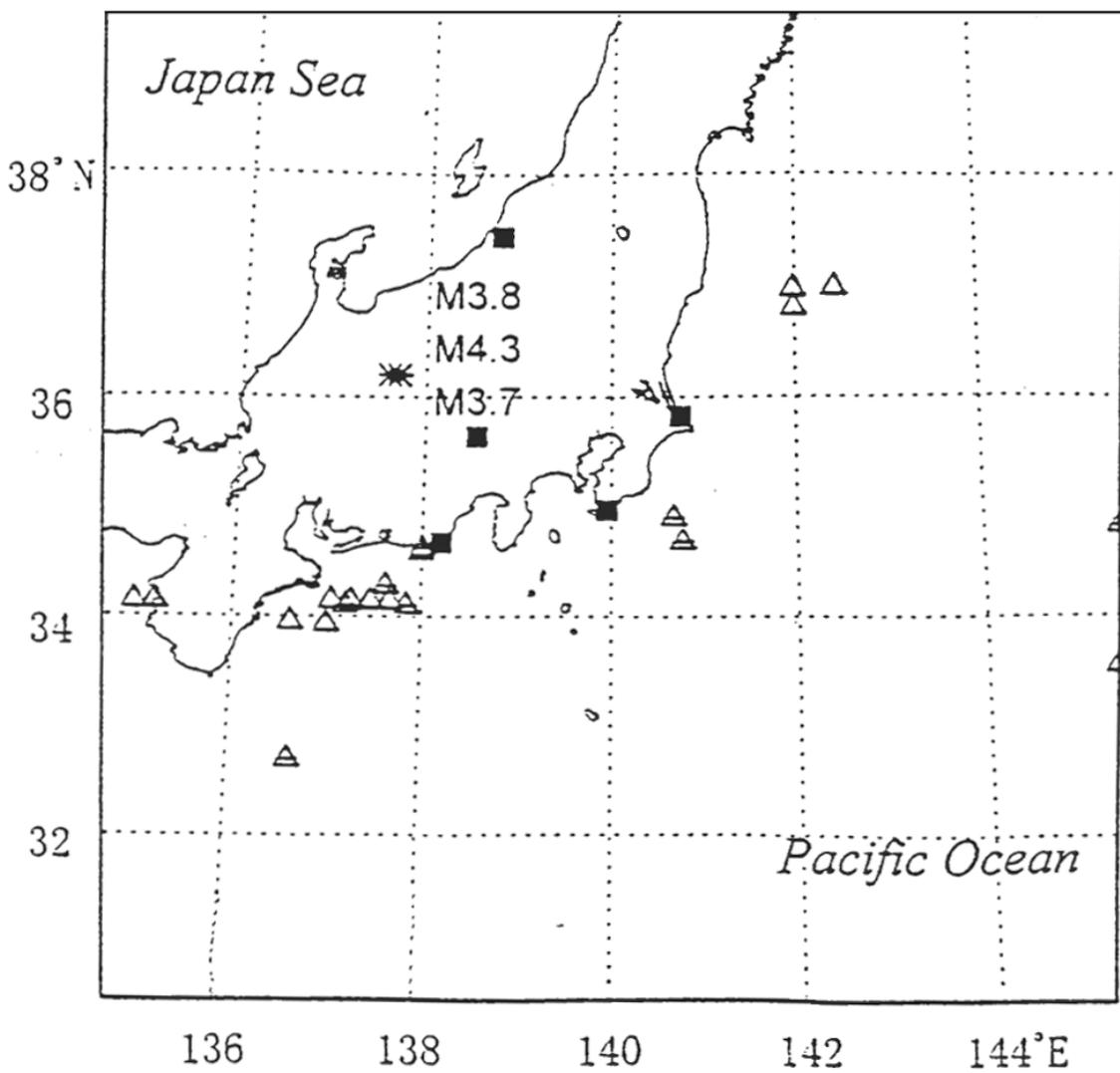
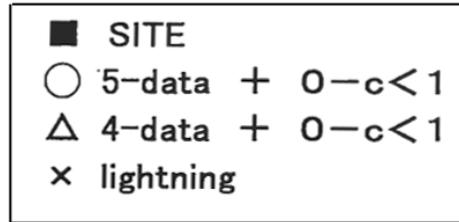
Fig. 17 Same as Fig. 15 except for the VLF channels.



第 18 図 1997 年 8 月におけるの dc 成分と ULF 成分の変化

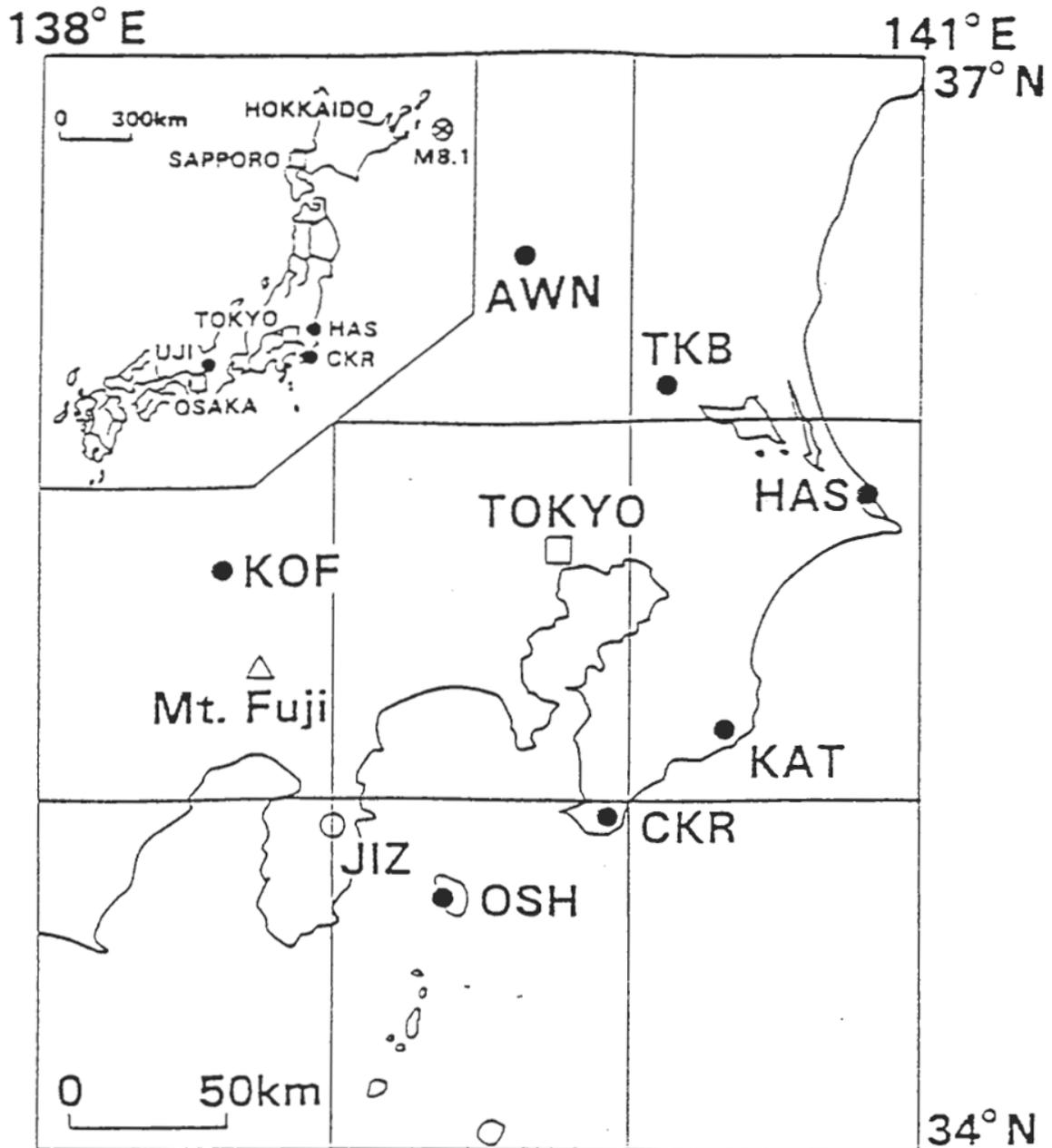
Fig.18 Continuous records for the dc and ULF channels of electric field changes are shown for whole another August in 1997 for comparison sake.

Aug. 22, 1998



第 19 図 長野・岐阜県境群発地震に伴った VPS の波源 (1998 年 8 月 2 日の例) は、「広域」観測網で検知されなかった

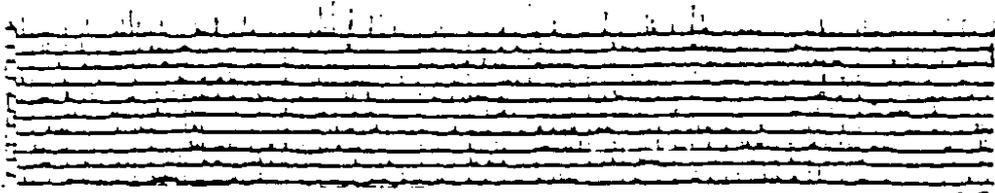
Fig.19 VLF pulse-like source point projections on 22 August 1998 when there occurred moderate earthquakes (*) in the seismic swarm activity in the central Japan.



第20図 1994年10月4日に北海道東方沖で巨大地震が発生した

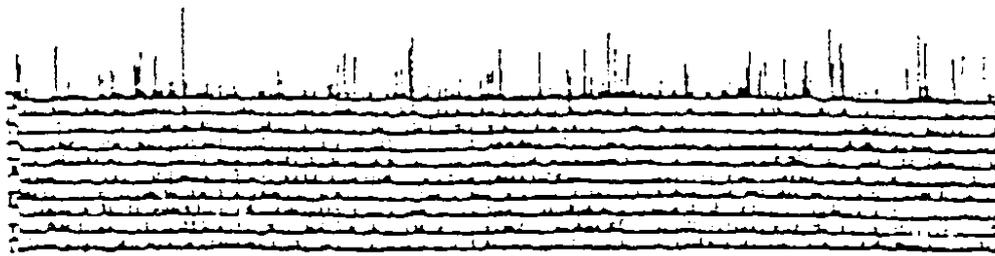
Fig. 20 The great 1994 Hokkaido-Toho-Oki earthquake occurred east of Hokkaido, Japan on October 4, 1994. Electric field changes were observed at Tsukuba, Hasaki, Chikura, Katsuura, Awano, Kofu and Izu-Oshima by means of bore-hole antennas. A broadband seismometer was installed at JIZ.

19 : 01, OCT. 3



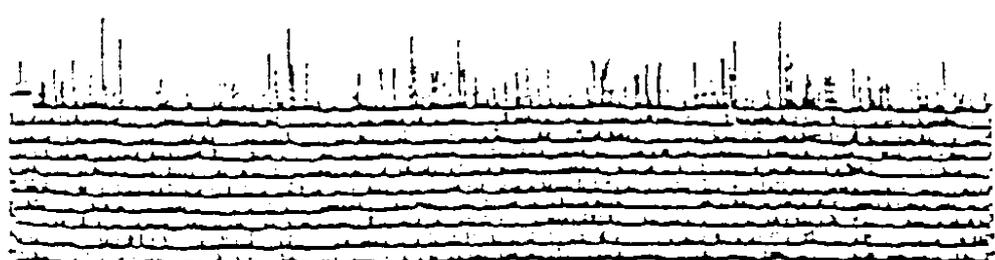
19 : 20

19 : 01, OCT. 4



19 : 20

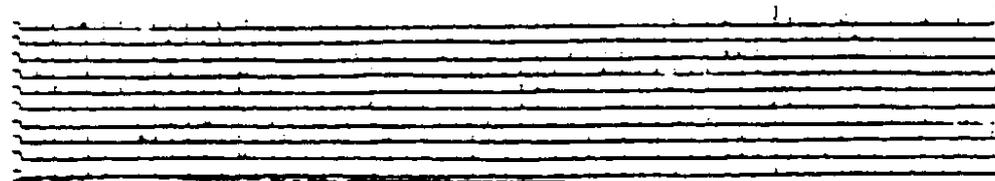
22 : 01, OCT. 4



22 : 20

— (M8.1) 22 : 23

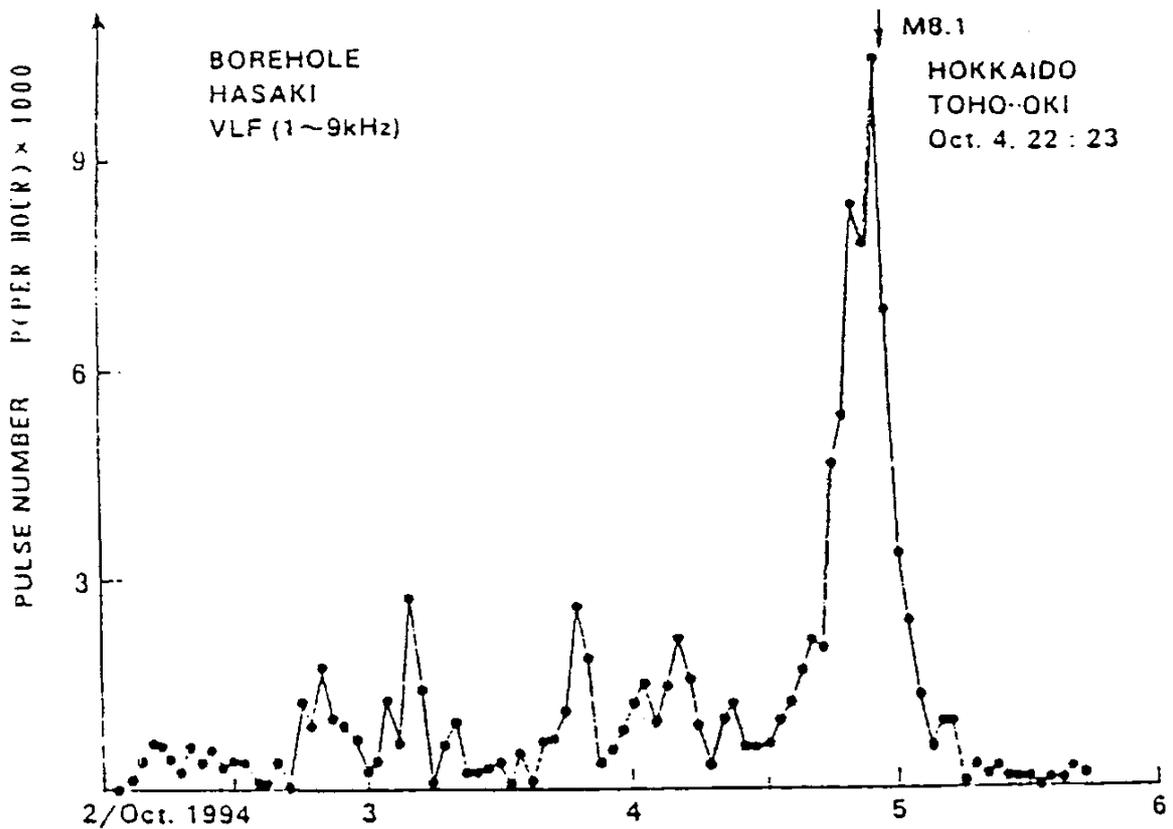
06 : 01, OCT. 5



06 : 20

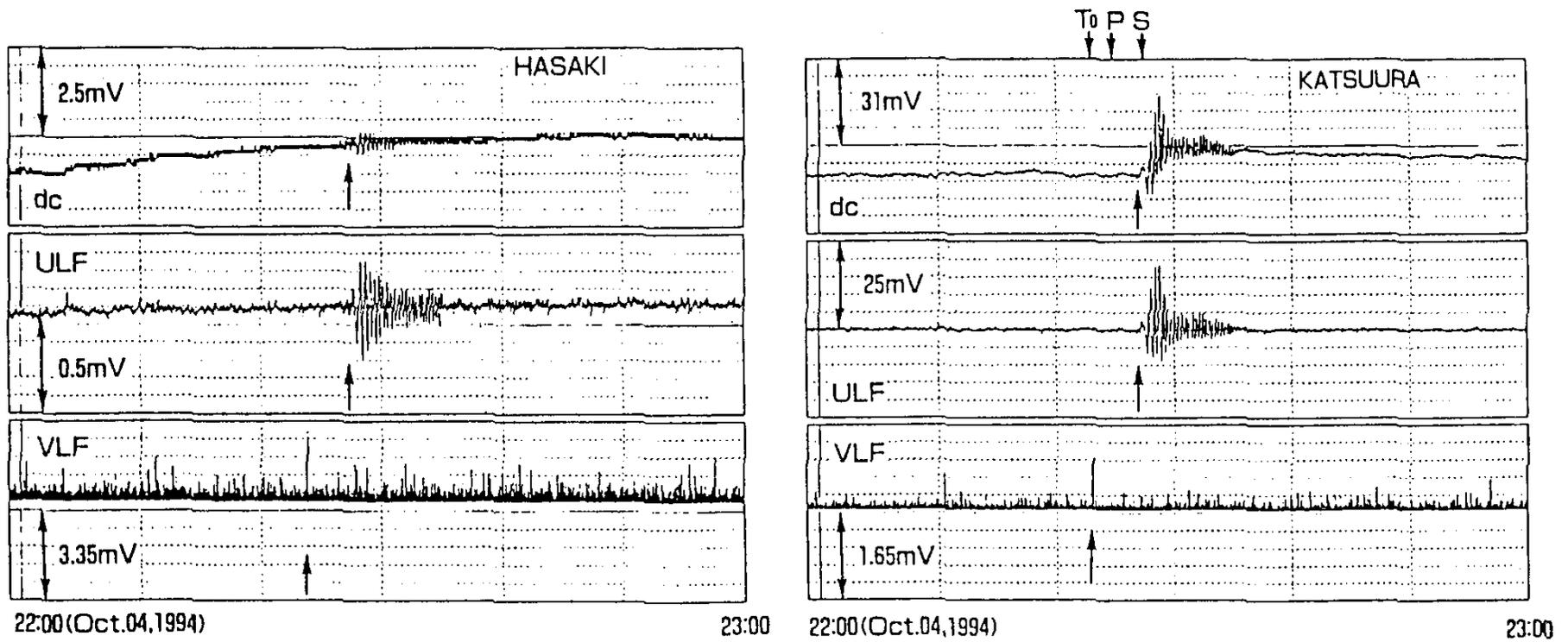
第 21 図 北海道東方沖で巨大地震に伴い顕著な VPS が観測された

Fig. 21 Part of the fast - speed strip chart recorded at Hasaki from 19:01 to 19:20 over four days being selected at every odd minutes. An increase in the number of large pulses can be seen as the time approached October 4, 22:23, when the earthquake occurred. The pulses quickly decreased to a background level several hours after the earthquake at around 6:00 on October 5.



第 22 図 北海道東方沖地震に伴った VPS の時間変化 (雷活動もあったが、そのみでは説明が付かない)

Fig. 22 The number of pulses with an amplitude larger than 0.134 mV were counted for one minute every hour from 58 m to 59 m at Hasaki using fast-speed strip chart recording. It is obvious that the evolving change in the number of pulses is closely related to the imminent occurrences of the great Hokkaido-Toho-Oki earthquake.



第 23 図 断層運動にともなって発生したと思われる ELF/VLF 帯電波信号 (図中最下段の矢印で示した T_0 近辺のパルス状の信号)
 Fig. 23 Slow-speed strip chart recording shows that a big VLF pulse occurred at around the origin time (T_0) of the 1994 Hokkaido-Toho-Oki earthquake. The co-seismic VLF signal was followed by ULF undulation starting at around the time of the seismic shear (S) or surface wave arrival.