

10 - 1 地中電磁界変動と地震・火山活動との関係 (2)

Subsurface Electric Field Anomalies Related with Earthquakes and Volcanic Eruption

防災科学技術研究所

産業総合技術研究所

Nat. Res. Inst. for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

Nat. Inst. of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1 . まえがき

地震発生，火山噴火活動に伴って生起する電磁界変動現象を究明し，これ等による災害を軽減するための予測手法の開発を行うため，我々グループは民間企業の協力も得て，1988 年から dc，ULF(0.01 ~ 0.7Hz)，ULF/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地中電場計測を行っている（第 1a 図，第 1b 図，第 1c 図）。観測点は，関東東海を中心として，12 個所である。そのうち一ヶ所は，1999 年からは伊豆大島と伊東市の間の海底電話用ケーブルを用いたものである。また，ELF/VLF 帯のパルス状信号について研究するため，静岡県内において電磁場 6 成分の記録を，1999 年から取得している。ここでは，前回報告¹⁾以後の観測データに基づいて，電磁界変動現象の特性に関する解析結果につきまとめた。

2 . ULF 帯変動

1998 年 8 月 7 日から始まった長野県と岐阜県境内近くで発生した群発地震の際に顕著な ULF 帯の変動が観測されたが，群発地震活動の収束後 1999 年月下旬には，電界変動強度は，活動開始前の平穩状態のレベルにもどった。また，1999 年 10 月より日光白根山の近くで群発地震，2000 年 6 月からは三宅島火山噴火が発生した。これらの新たな事象ならびに伊豆半島東方沖群発地震の際などの伊豆大島における電界変動データを解析して，DC 帯，ULF 帯における地殻活動電界変動の特性がかなり明確になったと考えている^{2) ~ 4)}。すなわち，

- 1) 群発地震，火山活動に関しては，これらの地殻活動と高い相関を有して電界変動が発生する（第 2a 図，第 2b 図参照）。
- 2) 地殻活動電磁界変動の周波数帯は，dc，ULF 帯が主で，活動が激しい際に ELF/VLF 帯の現象が発生する（第 2c 図，第 2d 図参照）。
- 3) 電界変動は，群発地震，火山活動等の数ヶ月前から発生し，これらの活動の顕著な低下の後も続く（第 3a 図，第 3b 図参照）。
- 4) dc，ULF 帯では検知範囲は，100 km を超えることはない。
- 5) ELF/VLF 帯でも，群発地震，火山活動の発生付近でのみ検知され，まれには 100km を超えて検知される。
- 6) 地質境界が，画然とした検知域境界となることがある。
- 7) ULF 帯現象は，パルス状の信号からなり，その波形はほぼ一定である（第 2a 図，第 4a 図）。
- 8) 発生場所などから地下間隙水の急速な変動による流動電位効果⁵⁾によるものと推定される²⁾（第 4b 図）。

- 9) ULF 帯の特徴的な信号で、パルス幅 10 秒程度のものの到達範囲は、通常 2~3 km で発生場所の概略、電界変動を発生させた間隙水圧変動などを推定できる(第 4c 図)。
- 10) ボアホールアンテナは、一種の超長電極(Ultra-Long-Electrode Measurement: ULEM)で、地下間隙水の変動を検出するセンサーとみなせる。

3. 火山活動に伴う変動

三宅島の神着において、傾斜計測用の 100m のボアホール、長さ 6m の水平ダイポールを用いた計測を行っていた⁶⁾。2000 年の火山活動の数ヶ月前から平常時とは異なる異常変動が検知されている(第 5 図)。データの解析の結果、

- 1) 火山活動に伴って、顕著な電界変動はある。
 - (1) 超長電極 ULEM、水辺ダイポールを使って、噴火活動の開始のほぼ一ヶ月前から発現したと思われる地下流動変化による低周波変動があった(第 6a 図上段に鉛直成分、下段に水平成分を示す)。
 - (2) 2000 年 6 月 26 日の噴火のほぼ一日前には、より高周波成分(0.01Hz~0.7Hz)の異常変動の発現があった(第 6b 図上段に 25 日、第 6b 図下段に 26 日を示す)。この変動は、接近してきたマグマの周辺にできるマグマ・熱水境界層で発生したものと考えられる。
 - (3) 2000 年 8 月 18 日の大噴火の半日頃前に、鉛直・水平両成分において DC から VLF 帯の顕著な変動があり(第 6c-1 図、第 6c-2 図)、17 時 5 分からの噴火のあった時間帯には、最も激しい変動が記録された。
- 2) 発生のメカニズムは、マグマ活動によって誘起される熱水循環の変動に伴う流動電位効果によるものである可能性が高い。
- 3) 信号強度は、計測の手法、火山活動の段階で変わるが、マグマの上昇に伴い地表計測による強度が大きくなる(第 5 図、第 6c-1 図、6c-2 図)。
- 4) 発生する変動の主要帯域は dc~VLF 帯にあり、VLF 帯では活動の激しい時に限られる。又その振幅は小さく、数 10 km 離れると検知するのは難しい。
- 5) 電界変動データからすると、このマグマ熱水帯は変動に富み、時間スケール数時間の揺らぎを有していることが推測される。
- 6) 電界電動観測は、傾斜変動・地震などの観測とは独立な観測の窓であることが実証された(第 5 図)。例えば、水辺成分電界変動に、顕著なステップ状の変動がある(第 5 図最下段 8 月 16 日周辺、第 6c-2 図)が、これは、傾斜ステップ⁷⁾とは殆どの場合同期しない。

4. 海底ケーブルを用いた海底電場観測

1999 年 10 月から、伊豆大島の元町と静岡県伊東市間の NTT の電話回線用海底ケーブルを用いた電界変動観測を行っている。元町局を給電点と見立てた、長さ約 33 km のアンテナによる計測で、記録は 3 つの帯域(dc, ULF, VLF)である⁸⁾。

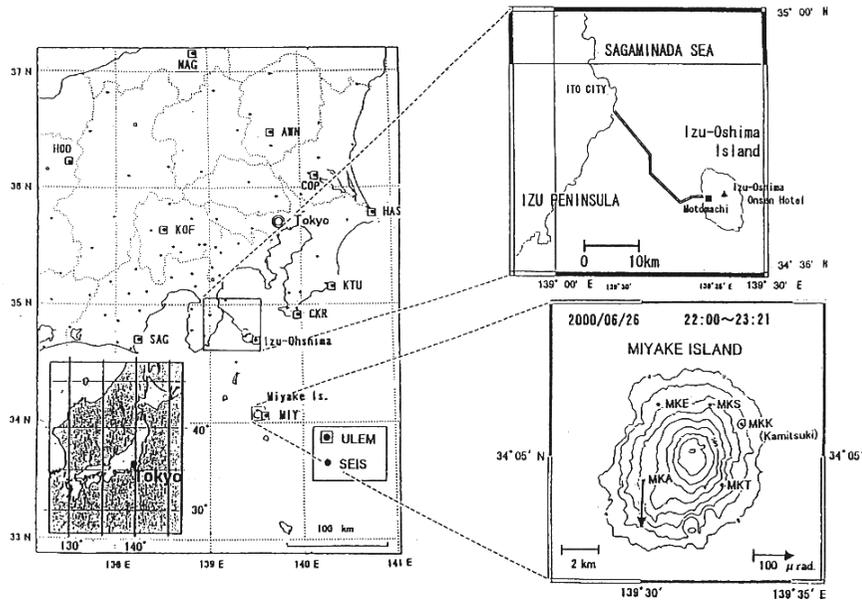
- 1) 平穏な状態では、船舶航行、電車などの通過に伴う人工ノイズは見られず、データの質が高い。
- 2) 2000 年 6 月下旬から ULF 帯の電界変動の振幅が増加し始め、7 月 15 日、16 日に最大の変動が記録されなど、2000 年三宅島火山活動に伴った強度の推移があった(第 7a 図)。

- 3) この異常は、伊豆大島西から伊東市にかけて存在する単成火山群周辺マグマの活動があったためと推測される。
- 4) マグマの活動によって、熱水循環に非正常変動が発生し、流動電位効果によって、電磁界変動が誘起されたものと理解している。
- 5) 伊豆大島温泉ホテル構内での電界計測記録において顕著な異常変動(第7b図)、三宅島における電界変動の推移(第5図)、および火山活動の全般的な推移と相関がよく、三宅島火山噴火などを引き起こしたマグマの活動は、伊豆諸島下の広域のものであると考えている。
- 6) 電話回線用の海底ケーブルを用いた電磁界計測による地下流体運動検出の方法は、海底火山、海底地震の活動のモニターに使用される可能性をもっている。

(藤縄 幸雄・松本 拓己・高橋 耕三・飯高 弘)

参 考 文 献

- 1) 藤縄 幸雄・松本 拓己: 地震前兆現象として電磁気現象の評価」地震予知連絡会会報, 第62巻, 546-573, 1999.
- 2) Y. Fujinawa, T. Matsumoto and K. Takahashi, "Some features of ULF band electromagnetic field changes related with earthquakes" *J. Applied Geophysics* (accepted), 2000.
- 3) Y. Fujinawa, K. Takahashi, T. Matsumoto, H. Iitaka, S. Yamane, T. Nakayama, H. Sakai, T. Sawada, "Characteristics of Electromagnetic Field Changes Related with Earthquakes Swarms" *J. Applied Geophysics* (submitted) 2001.
- 4) K. Takahashi, Y. Fujinawa, T. Matsumoto, T. Nakayama, T. Sawada, H. Sakai, and H. Iitaka "An anomalous electric field variation with the seismic swarm (1)- Underground electric field observation at Hodaka station (1995-1999)" *Tec. Note Nat. Res. Instit. Earth Science and Disaster Prevention*, No. 204, 1-224, 2000.
- 5) Mizutani, H., Ishido, T., Yokokura, T. and Ohnishi, S., "Electrokinetic phenomena associated with earthquakes", *Geophys. Res. Lett.*, 3, 365-368, 1976.
- 6) Y. Fujinawa, T. Matsumoto, M. Ukawa, H. Iitaka, K. Takahashi, H. Nakano, T. Doi, T. Saito, N. Kasai, and S. Sato, "Earlier detection of the magma movements by measuring transient streaming potential" *Nature* (submitted), 2001.
- 7) Ukawa, M., Fujita, E., Yamamoto, E., Okada, Y., Kikuchi, M., "The 2000 Miyakejima eruption : Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakejima observation network" *Earth Planets Space*, 52, 19-26, 2000.
- 8) 藤縄 幸雄, 松本 拓己, 飯高 弘, 葛西 直子, 中野 洋, 佐藤 宗純, 斉藤 俊幸, 土井卓也, 高橋 耕三, 青柳 勝, 佐々木 清志, 資宗 克行, CA 研究会 2001 年論文集(印刷中), 2001「伊豆大島 伊東間海底ケーブルによる地下流動観測 2000 年三宅島火山噴火活動関連の異常変動」



第 1a 図 関東・東海地方における電磁界変動観測点(ULEM:Ultra Long Electrode Measurement)。伊豆大島元町と伊東市間の海底電話ケーブルを用いた海底電界も計測している。3つの周波数帯(d c , ULF , ELF/VLF)で行われている。”SEIS”は、関東東海地殻活動観測点。

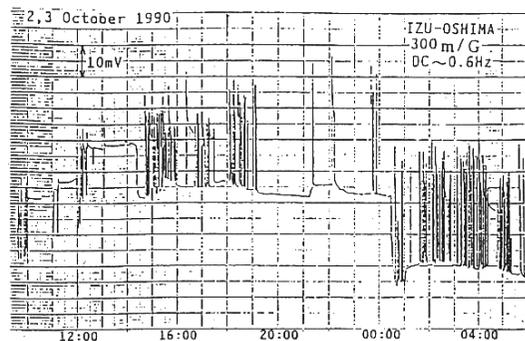
Fig.1a Locations of the electro-magnetic field observation sites in the central part of Japan. The network has been constructed since 1988. The electric field observations are conducted to supplement ordinary crustal observations.

第 1b 図 伊豆大島元町と伊東市間のNTT電話回線用海底ケーブルを用いた海底電界観測を行っている。ケーブルの耐圧銅パイプをアンテナ線とし、アースとしてNTT元町局の局舎アースを使う。

Fig.1b Locations of the ocean-bottom electric field observation antennas in the Izu-Peninsula and the Izu-Oshima Island. The observation is conducted by using ocean-bottom telephone line of NTT with a length of some 33 km.

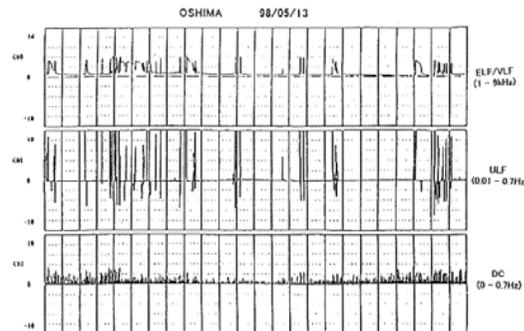
第 1c 図 三宅島では、2000年6月26日夕刻より、顕著な傾斜変動が観測され、噴火活動が“顕在化”した。三宅島火山活動施設のうち神着(MKK)において、1999年9月から電界変動観測が行われており、ほぼ連続的にデータの取得がなされていた。

Fig. 1 c Location of the electric field observation site Kamitsuki (MKK), one of stations monitoring volcanic activities in the Miyake Island, the island in the central part of Japan. The use is made of the borehole antenna being 100 m long as a main sensor for the measurement of the vertical component of the electric field. A short dipole of 6 m long for the horizontal electric field was also installed. The similar electric observations have been conducted in the central part of Japan at 11 sites including a nearby site, the Izu-Oshima Island belonging to the same volcanic chain.



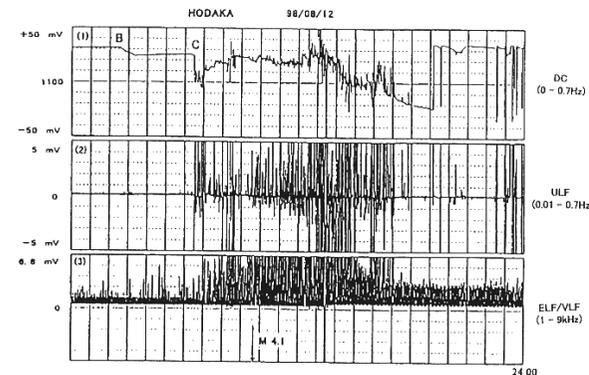
第 2a 図 伊豆大島における 1990 年 10 月の微少噴火活動時期の ULF 帯の変動。平穏な状態では d c , ULF 帯では殆ど直線状(以下 2b , 2c , 2d でも同様)。

Fig.2a Examples of the ULF band anomalous signals observed by a borehole antenna at the time of seismic swarm activity at the Izu-Oshima Island in case of a small volcanic eruption.



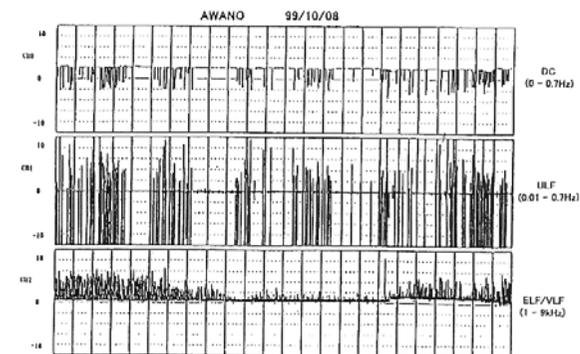
第 2b 図 伊豆半島東方沖群発地震の際の伊豆大島温泉ホテル構内におけるボアホールアンテナによって観測された d c , ULF 帯のアノマリー。

Fig. 2b The ULF band anomalous signals at the Izu-Oshima Island in association with the swarm off the east coast of the Izu peninsula,



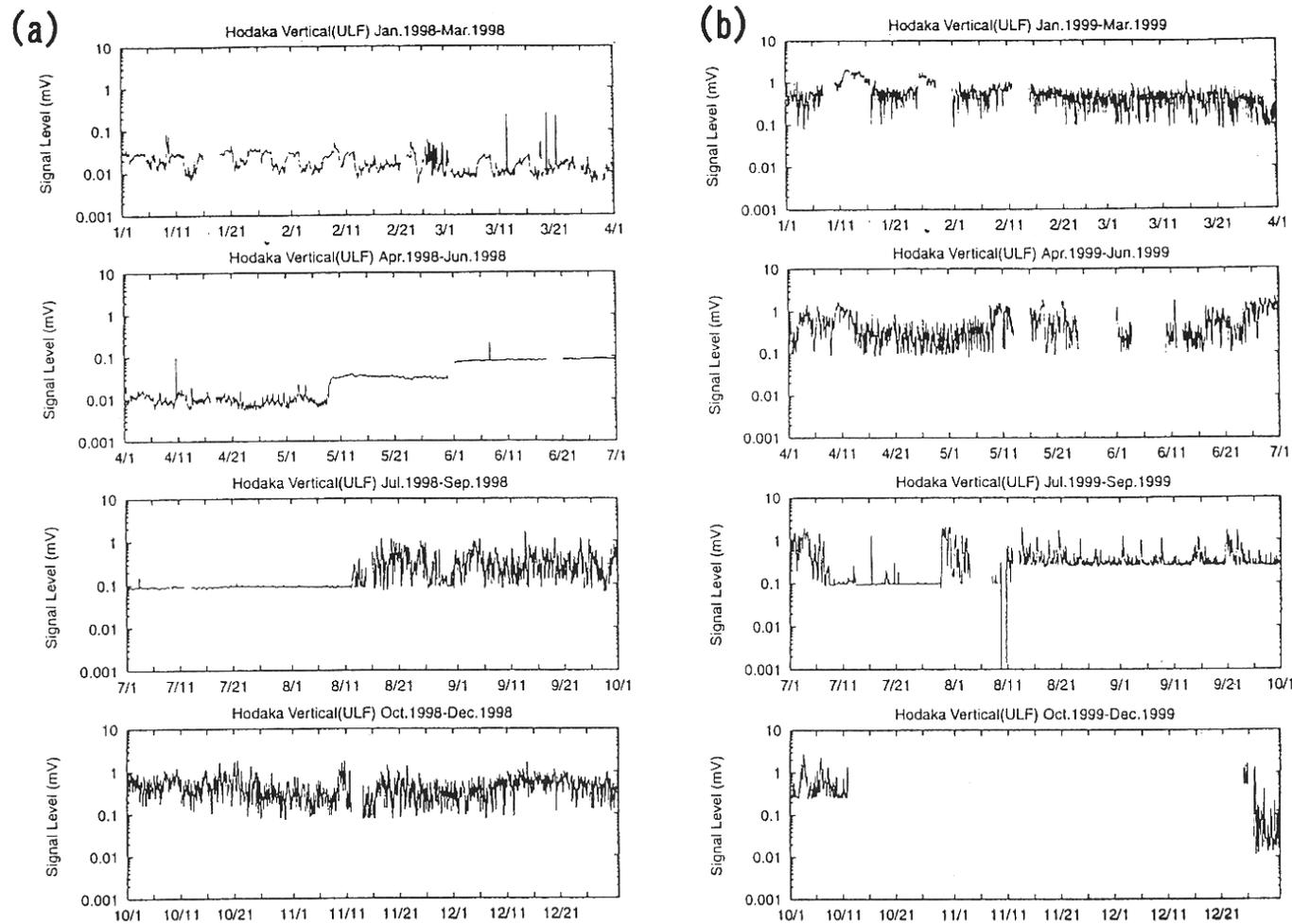
第 2c 図 1998 年岐阜・長野県境群発地震の際の“異常”電界変動。地震活動が最も激しいときであり , d c , ULF 帯と共に ELF/VLF 帯にも顕著な変動があった。

Fig.2c The ULF band anomalous signals at Hodaka in association with the seismic swam at the border of Gifu-Nagano Prefectures in August 1998.



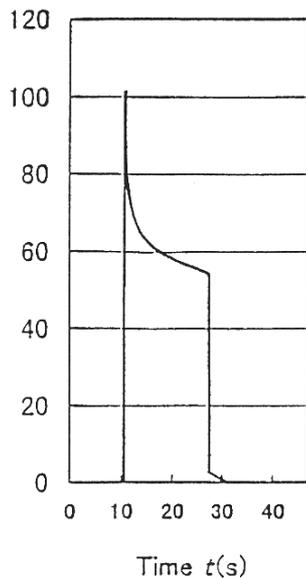
第 2d 図 1999 年日光白根山付近の群発地震に伴って検出された栃木県栗野町における電界変動。

Fig.2d The ULF band anomalous signals at Awano in association with the seismic swarm near Nikko in October 1999.

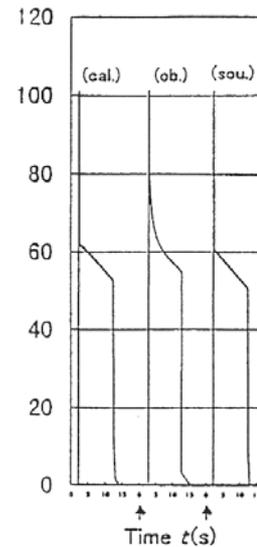


第 3 図 観測点穂高における ULF 帯変動のレベルの変動 (a : 1998 年 , b : 1999 年) 群発地震が 1998 年 8 月 7 日に始まり (第 1 フェーズ) , 8 月 12 日からやや北に活動が移る第 2 フェーズとなり , それ等の活動の前後にアノマリーが認められる。又 ULF 帯信号のレベルは , 3 ヶ月程前の 1998 年 5 月初旬 , 2 ヶ月前の 5 月末にステップ状に増大し , 群発活動が殆ど収束した 1999 年 12 月中旬 (b) には平常時のレベルに戻った。

Fig.3 Compressed monitoring record for the ULF band with the amplification gain being corrected on the basis of the parameters of ULF band. The anomaly appeared from August 1998 is shown to be large amounting about 1 mV compared with the background noise level of less than 0.1 mV. The anomaly has almost disappeared at about December 1999 with the ordinary level of less than 0.1 mV.



第 4a 図 群発地震・火山噴火に伴って最も一般に検出される ULF 帯電界変動の波形の特徴。パルス幅は、数秒～数分、振幅は数 mV ～ 数 100mV。
Fig.4a A typical waveform of a higher frequency anomalous electric signal at the time of a seismic swarm and volcanic eruption. Pulse length is from several seconds to several minutes, and strength is from several to several hundreds mV.



第 4c 図 間隙水の水圧変動 (sou.) を、フォワード法で観測波形 (ob.) に合うように求めた理論波形 (cal.)。クラックの形成に伴って急激な水圧変動 (数 10 気圧) があつたと解釈される。
Fig.4c A comparison of the synthetic waveform (cal.) on the basis of the formulation for transient electromagnetic field changes due to the electro-kinetic effect, for the source function (sou.) and the observed waveform (ob.)

$$\begin{pmatrix} I_e \\ J_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\nabla \phi \\ -\nabla P \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (2a)$$

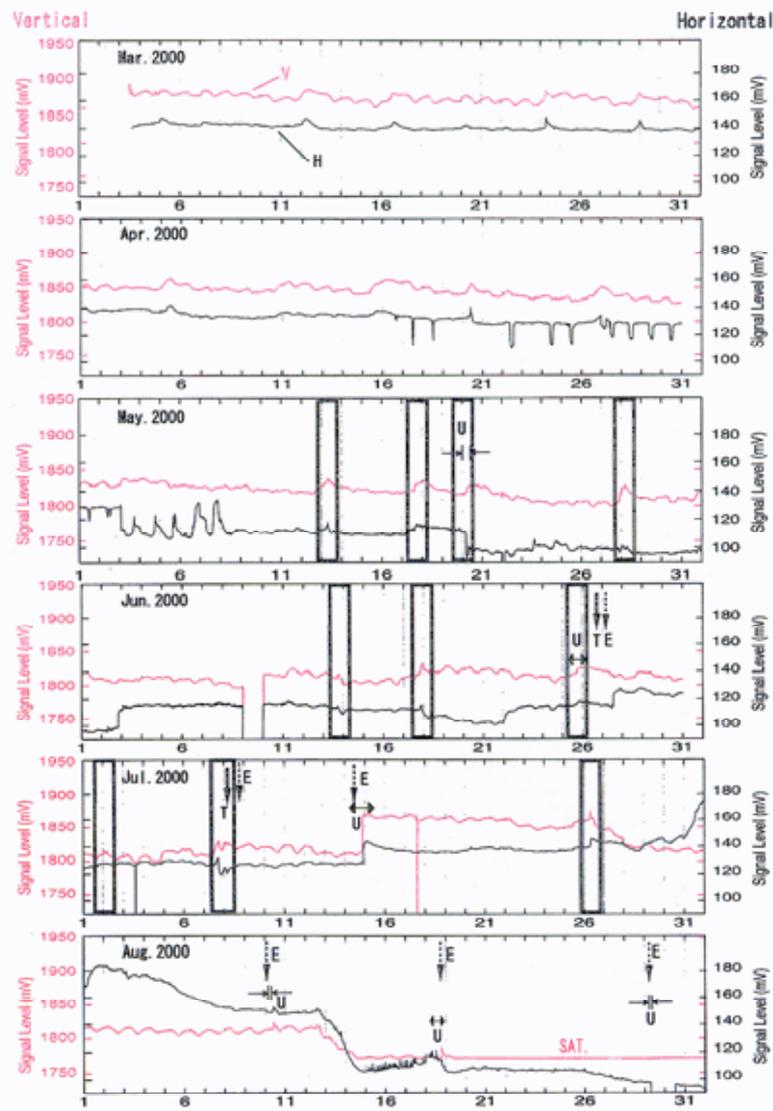
$$\nabla \times H = I^{(t)} \quad (2b)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2c)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2d)$$

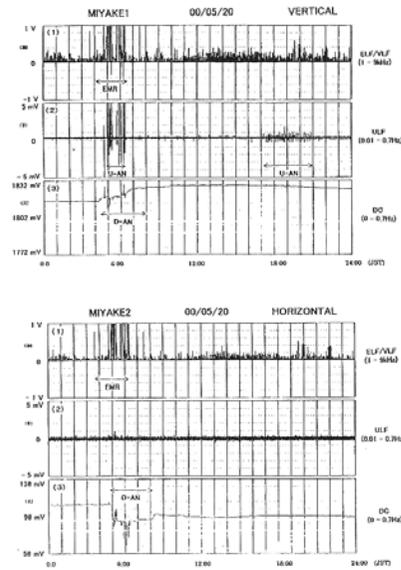
$$I^{(t)} = J_o + I^{(e)} \quad (3)$$

第 4b 図 流動電位効果⁵⁾モデルによる電磁界変動発生メカニズム。ここでは、非定常の場合に拡張²⁾。
Fig.4b Formulation of transient electromagnetic field changes due to the electric-kinetic effect²⁾, extending the static treatment⁵⁾.



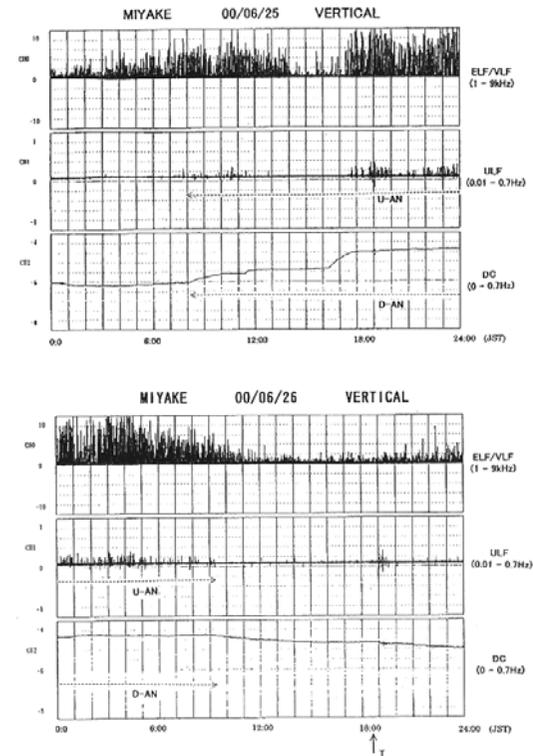
第5図 鉛直・水平成分電界変動記録（2000年3月～8月）。大噴火の際以外にも、小規模な噴火活動の前に、日周変動により短周期な容易に識別できる変動が現れる。その最初は、4月20日であり、その後5月20、28日、6月10日、11日、13日、14日、7月7日に発生し、幾つかのケースは8月18日の時と同様、ULF帯の変動を伴っているものもある（図中の“U”）。顕著な“短周期”変動のある時期を枠で囲んである。これらは、例外なく火山の活動の半日、あるいは一日前に発生し、マグマの移動に伴う強い地下間隙水の変動の存在を示唆している。8月の大規模噴火活動のあった時期には、変動も大きい。

Fig.5 Long-term monitoring records are shown for the vertical and horizontal components in the dc band from early March 2000 to the end of August. “Higher” frequency fluctuations with a period much shorter than the dominated diurnal variations in the vertical component appeared more frequently as the volcanic activity approached (“E” in Figure) such as fluctuations as on 20 May, 13, 17, 25 June, and 2, 5, 7 July. They were sometimes superimposed by the ULF band fluctuations (“U” in Figure). The disappearance of the diurnal variations in May might be due to the generation of fluctuation field changes as the magma approached the Miyake Island supported by the appearance of large variations in the horizontal component. The trend-like changes are generally similar in the both components before the strong volcanic events, though there are time periods when there are large differences suggesting that the source depth is different.



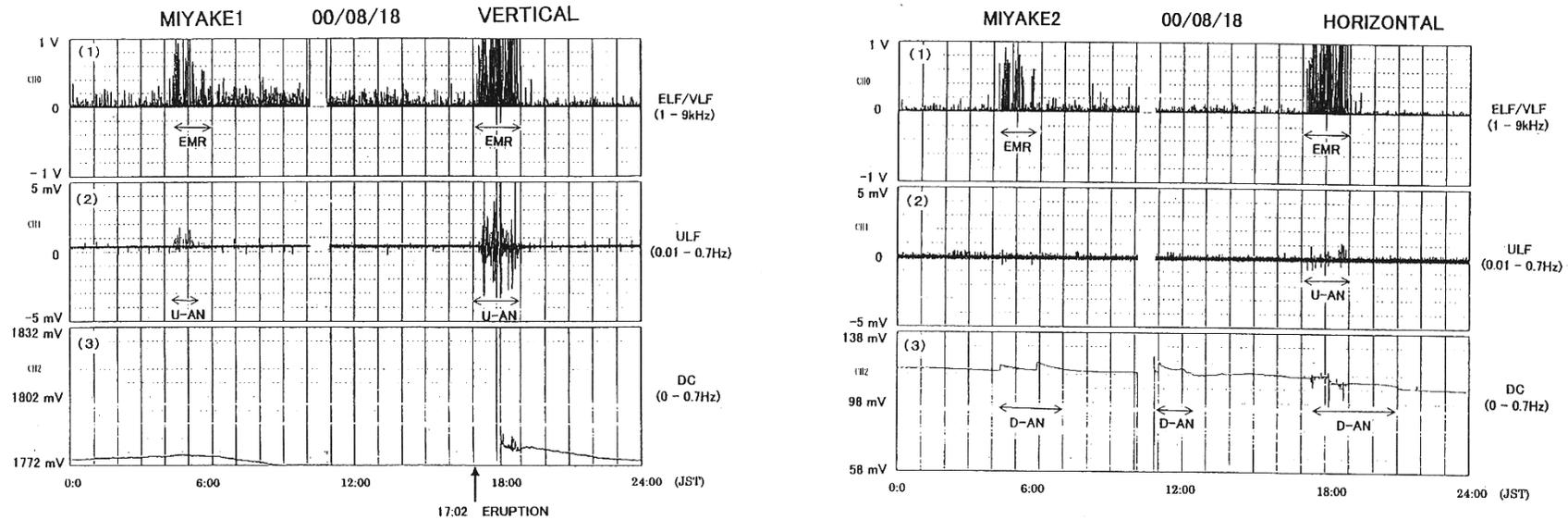
第 6a 図 2000 年三宅島噴火の開始の約一ヶ月まえの 5 月 20 日に、神着における電界変動の記録異常を示した（上段が鉛直成分，下段が水平成分）。地震，傾斜などの地殻活動は，特に検出されていない。マグマの接近に伴う火山体周辺の熱水循環の急激な変動によって発生したものと考えられる。

Fig.6a Prominent anomalous electric field changes were detected on 20 May 2000 at the Miyake Island, about one month before the eruption activity (upper: vertical component, lower: horizontal component). Anomalies appeared in all three frequencies bands: in the ELF/VLF band (“EMR”), the ULF band (“U-AN”), and the dc band (“D-AN”), 6a-1) for the vertical component, and 6a-2) for the horizontal component. It is suggested that the anomalies were induced by the rapid change of hydrothermal circulation near the front of approached magma without appreciable deformation on the surface.



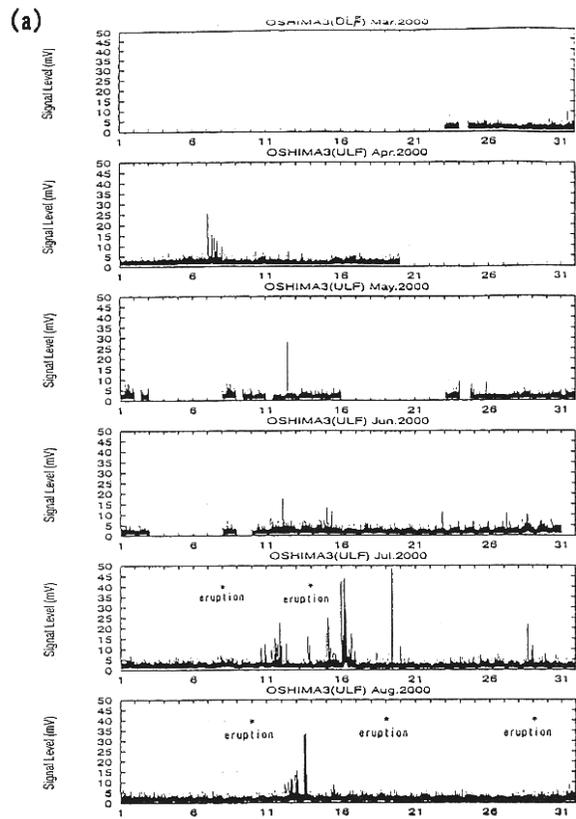
第 6b 図 2000 年三宅島噴火の開始の前日（図上段、6 月 25 日）と当日（図下段、6 月 26 日）における神着における電界変動の記録。傾斜などの地殻変動の検出（図中“T”）される前から異常変動が見られる。

Fig.6b Anomalous transient electric field changes were recorded on 25 (upper sheet), 26 (lower sheet) June 2000 at the Miyake Island, before the volcanic activity. Here “T” denotes first appearance of ground tilt anomalies.



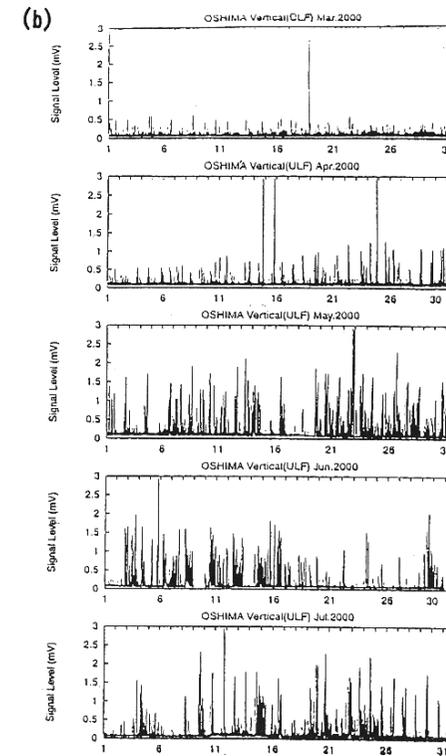
第 6c 図 2000 年 8 月 18 日三宅島噴火発生日の電界変動記録。鉛直成分（第 6c - 1 図），および水平成分（第 6c - 2 図）。噴火と同時に異常変動は 3 つの帯域で検出され（“EMR”，“U-AN”，“D-AN”），噴火活動の低下と共に収束した。また，噴火開始の約半日まえから鉛直成分では ELF/VLF 帯，ULF 帯で，また，水平成分では ELF/VLF 帯，d c 帯で電界変動の記録異常を示した。なお，水平成分では ULF 帯のアンプが故障していたため，信号は見えない。また，10 時 5 分頃に大きな信号が入り，ほぼ一時間にわたって，記録は取れなかった。

Fig.6c Monitoring records of the vertical electric field observed on 18 August 2000 when the largest eruption occurred at the Miyake Island. Fig. 6c-1 is for the vertical component, and Fig. 6c-2 from the horizontal dipole. The roughly constant level signals of some tenth evident in the ELF/VLF channel (Fig. 6c-1(1) and Fig. 6c-2(1)) and in the ULF channel (Fig. 6c-1 (2)) are natural background noises. Anomalous transient electric field changes were recorded on all three frequencies bands: in the ELF/VLF band (“EMR” in Fig. 6c-1(1) and Fig. 6c-2(1)), the ULF band (“U-AN” in Fig. 6c-1(2) and Fig. 6c-2(2)), and the dc band (“D-AN” in Fig. 6c-1(3) and Fig. 6c-2(3)). The magnitudes of signals are well above the background noise level in both cases (S/N of ULF is larger than 50), and almost returned to the original level in the all bands except for the dc band showing offset in case of the eruption. The ULF band in the horizontal component does not work normally, but we can suspect there are large anomalies also on this band from the dc channel record. Similar conspicuous electric field changes are also seen about 13 hours before the eruption in the ELF/VLF band (“EMR” around 4:00 in Fig. 6c-1(1) and Fig. 6c-2(1)) and, in the ULF band (“U-AN” in Fig. 2a(2)). The horizontal component also contains the variations of the ULF band superposed on the dc like changes (Fig. 6c-2(3)).



第 7a 図 伊豆大島元町 伊東市間の海底ケーブルを用いた海洋電界変動の記録 (ULF 帯, 2000 年 3 月~8 月)。3 月下旬が非常時の記録で, 顕著な噴火 (*eruption 印) のあった時期に信号強度が大きい。

Fig.7a Monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band from March through August. There are large anomalous variations on 7 April, 11 ~ 16 July and 12 ~ 13 August 2000. It is suspected that those are due to ocean-bottom electric field changes induced by magma intrusion to monogenetic volcanoes around the cable.



第 7b 図 伊豆大島温泉ホテル(OOH)におけるボアホールアンテナによる電界変動記録 (2000 年 3 月~2000 年 7 月)。平常時はほぼ 3 月の記録にある電界強度のレベルである。平常時と比較して異常に大きい電界変動が, 三宅島における噴火活動に関連して増大したことがわかる。

Fig.7b Electric field strength evolution of the ULF band at the Isu-Oshima Onsen-Hotel. Anomalies increased from early April, possibly corresponding to the volcanic eruption activities at the Miyake Island. It is inferred that the electric field variation was induced by the change of hydrothermal circulation owing to the magma intrusion.