

伊豆大島－伊東間海底ケーブルによる電界変動観測

— 2000 年三宅島火山噴火活動関連の異常変動 —

藤縄幸雄*¹・青柳 勝*³・高橋耕三*⁴・松本拓己*²
飯高 弘*⁵・土井卓也*⁵・葛西直子*⁵・中野 洋*⁵
佐藤宗純*⁵・斉藤俊幸*⁵・佐々木清志*³・資宗克行*⁶

Observation of Electric Field Changes on Ocean Bottom Using Telecommunication Marine Cable

— Anomalous Electric Field Variation in Association with the Miyake-jima Eruption —

Yukio FUJINAWA *¹, Masaru AOYAGI *³, Kozo TAKAHASHI *⁴, Takumi MATSUMOTO *²,
Hiroshi IITAKA *⁵, Takuya DOI *⁵, Naoko KASAI *⁵, Hiroshi NAKANO *⁵,
Sohjun SATO *⁵, Toshiyuki SAITO *⁵, Kiyoshi SASAKI *³, and Katsuyuki SUKEMUNE *⁶

*¹Advanced Technology Research Group,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

*²Solid Earth Research Group,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

*³NEC Ocean Engineering, Ltd., Japan

*⁴Communication Research Laboratory, Japan

*⁵National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan

*⁶Nippon Telegraph and Telephone Corporation, Japan

Abstract

Electric field changes have been recorded on the ocean bottom off the west of the Izu-Oshima Island to try to detect any electric field anomalies induced by crustal activity. An antenna being some 33km long is constructed using telephone marine cable. The calm state continued from October 1999, the beginning of the observation until 7 April 2000. There appeared clear anomalies on the ULF band at the end of June 2000 in association with volcanic activity at Miyake-Jima Island about 70km south of Izu-Oshima Island. The most prominent anomaly occurred on 16 July, when even the DC component also showed clear anomalies, leading inference that there was a strong magma activity extending from the main active area around Miyake-Jima Island to the west of Izu-Oshima Island.

Key words : Electric field, Ocean-bottom, Magma, Ground water, Forecast

*¹ 独立行政法人 防災科学技術研究所 防災基盤科学技術研究部門

*² 独立行政法人 防災科学技術研究所 固体地球研究部門

*³ 日本電気海洋エンジニアリング株式会社

*⁴ 通信総合研究所

*⁵ 産業技術総合研究所

*⁶ 東日本電信電話株式会社

1. はじめに

地震活動や火山活動における地下流動体の役割について近年注目されることが多くなってきた。地震の発生が隣り合う地塊のすべり（スティックスリップ）として説明されるが、すべり面周辺に地下水がある時とない時とで摩擦係数が異なるであろうから、間隙水の重要性が考慮されて、かなりの研究も行われてきた（例えば、Wakita *et al.*, 1987; Scholz, 1990; Hickman *et al.*, 1995）。そのような地下流動が直接的に計測する手段はこれまで皆無であったために、地震や火山噴火活動をモニターする良い指標と考えられる地下流動が、実際に検討されることがなかった。ところが我々グループによる 1988 年以来的地震・火山噴火の予測に関する研究の結果、電磁界変動の計測によってそれが可能であるとの結論に達した（藤縄ほか, 2000; Fujinawa *et al.*, 2002a, b）。それによると地下深く掘削したボアホールを用いることで微小な流動（ 10^{-3}cm/s より小さい）も大きな信号として捉えられることが分かったのである。

さて我が国は四周を海に囲まれ、プレートの沈みに伴う海溝型の地震によって殆ど周期的に大きな被害を受けてきており、今後とも受けるであろうことは必然である。南海道地震、東南海地震が今後数 10 年以内に起きる確率は 80% ~ 90% と言われ、それがそう遠くない時期に差し掛かっており、東海地震も含めて、海域にかかる地震に対する備えを強化すべき時である。

又、2000 年三宅島の火山噴火、2001 年硫黄島の噴火の例を挙げるまでもなく、火山活動は往々にして海底に拡がり、又領海、経済水域の関連からも海底火山の監視が重要な課題である。地殻活動観測の方法は、かなり充実してきたが、海底における観測の方法については、幾つかの研究開発が行われてはいるが、海底地震計測はいまだ開発の初期段階と言える。

電磁界変動の観測においては、人工、自然ノイズとの弁別が最大の問題であるが、ボアホール計測（TAF 法）では、大きな S/N が実証されてきた。ここでは、電磁界変動の観測を海域に応用する試みの研究について報告する。海底における電場計測としては、気象庁の海底地震常時観測システムの同軸海底ケーブルを用い、地震前兆現象を抽出する試み（Mori, 1987）があり、TPC-1 ケーブルを用いた地震位差データにより MT 伝達関数を介して上部マントルの電気位変度構造を求めたり、NTT の海底通信回線を利用しての電位差観測が九州本島と離島の間で行われている（Shimoizumi *et al.*, 1997）。又、既に使用の停止した海底ケーブルを電源供給・データ伝達に利用しての電磁場計測も試みられている（中塚ほか, 1999）。

臨時観測としての電磁場計測は 1970 年代から行われ、我が国では 1980 年代から海底磁力計（瀬川ほか, 1981）、海底電位差計（浜野ほか, 1984）によって、主として海底 MT 観測を目的として行われてきた。ここでは通信ケーブルを用いた長大アンテナ（Long Ocean Bottom Antenna）を初めて用いた計測の試みである。

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。海底地震や海底火山活動のモニターに使用できるかを調べるための試験観測である。特に伊東沖では、1979 年から殆ど定期的に群発地震が発生しているが、その近くをケーブルが走っており、地殻活動などがあれば、その異常を地下流動現象という、これまで重視されてこなかった窓から見ようというものである。

本報告では、2000 年 6 ~ 7 月に三宅島で火山噴火が発生し、引き続き神津島、新島、式根島周辺で、震度 6 程度の地震が多発した際に、本観測データに顕著な異常変動が検出されたので、それを中心として記述するが、海底ケーブルを海底長大アンテナとして使い、海底地震活動、火山活動のモニターに利用出来る可能性が大きいことを示すとともに、2000 年三宅島火山噴火に伴って、伊豆大島西方の海底まで、マグマの活動の影響があったことが示唆されるデータを提示する。

2. 観測の方法

伊豆大島元町と伊東市間に、NTT の電話回線用の海底ケーブルが付設されている（図 1a）。直線距離は約 30km、ケーブルの海底部分の延長は約 33km である。1979 年から殆ど定期的に発生していた伊豆半島東方沖群発地震の活動域は、伊東市沖合いで、当該ケーブルルートからするとやや北側となっている。しかし、群発活動域の近くであり、かつこの海域には単成火山群があるため（図 1b）、地下のマグマなどの活動に関係する熱水系に変動があれば、電界変動として検出するのに格好の場所と言える。

海底電話回線の耐圧銅パイプをアンテナのモノポールと見たてて、海底電界変動計測センサーとしている（図 2）。アンテナのアースは、元町海岸にある陸揚げマンホール内のアースを使い、耐圧銅パイプ先端の伊東側はオープンとなっている。従来の電位差計測では、両端の電位差計測が行われている（Shimoizumi *et al.*, 1997）がここでは、伊東市側をオープンとしているために、市街化ノイズは大きくないと考えている。

信号検出回路は、防災科学技術研究所などがこれまで使用してきたボアホール式中電界計測に使っているもの（Fujinawa and Takahashi, 1990）と同じものである（図 3）。注目する周波数帯域は、DC（0 ~ 0.7Hz）、ULF（0.01 ~ 0.7Hz）、ELF/VLF（1 ~ 9kHz）である。この検出装置からのデータは 1 日 1 回の頻度でつくばの研究所に送られる。

計測機器のパラメータは、従来通りほぼ 1 か月の試験観測の後に決められた。これまで最も長いアンテナ用のケーシングパイプは、1,200m であったのに対して、今回はその約 30 倍ある。そのためか、従来の避雷装置では十分でなく、落雷に伴うサージ電圧のため、高い頻度でデータ収録装置の不具合が発生した。そのため、2000 年 6 月に耐雷保護回路に改善を施し、以後かなり安定した観測が行われている。

3. 観測の状況

観測の開始から、記録上特異な信号は現れず、ずっと平穏な状態が続いていた。図4にその例(図4a: 1999年10月29日, 図4b: 1999年11月7日)を示す。DC帯は、他の陸上の観測と比べて、大きな相違があり、日周変動が大きい。これは海流の変動に関係した誘導電界変動によるものと考えられる。これ自体も海洋物理学に大きな興味を引くところであり、海洋物理学の分野では興味の対象となっているが、ここでは、議論の対象にしない。

ULF帯にはそれに反し、1日—半日などの長周期変動は殆どなく定常過程的な状態を示している。又、陸上観測との対比で最も注目を引くのは、同海域では船舶の通行が多いにも拘わらず、それに伴うと思われる人工ノイズが記録には現れない。我々の当初の期待通り、電車などの通過に伴う人工ノイズ、海底における環境ノイズが非常に低いことが示された。海底における地殻活動に伴う電磁場の計測の有望性を示すものである。これが今回

の試みの大きな収穫の一つである。このことは、VLF帯についても言える。なおVLF帯については、陸上に比べ周辺ノイズが低いため、2000年1月に入ってから増幅器の倍率を5倍にした。

図5aに、観測開始後しばらくして一見異常なシグナルがとれた日のデータを示す。これが果たして自然なものかどうかに興味あるところである。同日の20時頃(JST)に伊豆大島温泉ホテル構内におけるボアホール(Fujinawa *et al.*, 1997)を用いた電界変動データを図5b(鉛直成分), 図5c(水平成分)に示したが、三つの記録に似たような現象が検知されている。その波型の特徴から、雷活動によるもの(Takahashi *et al.*, 2000)と考えられる。静岡県内の5か所でのVLF帯電波観測点における落雷データ(図6)から判断しても、この図5aに示した異常信号は、落雷活動によるものであることは確かである。この期間の地震活動は伊豆大島周辺ではなく、海底電界変動データの平坦さと良く対応していると言える。

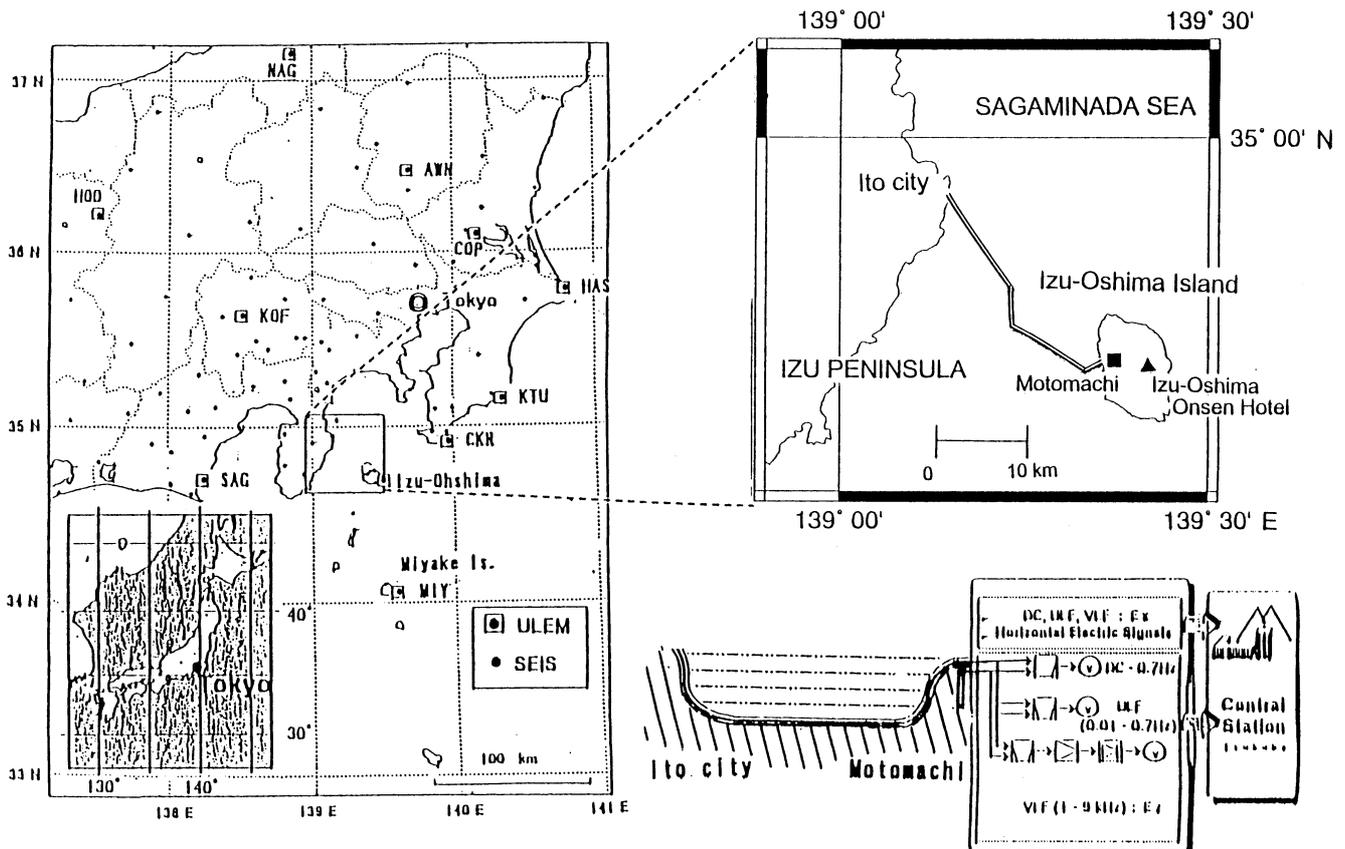


図1a 伊豆大島—伊東間のNTT海底電話ケーブルを用いた電界変動観測用アンテナ配置図。延長距離は、約33kmある。

Fig. 1a Locations of the ocean-bottom electric field observation antennas in Izu-peninsula and Izu-Oshima Island. The electric field observation is conducted by wing ocean-bottom telephone line of NTT with a length of some 33km. At other sites (□) electric field monitoring has been conducted in central Japan using borehole antennas with a length of 100~1200m.

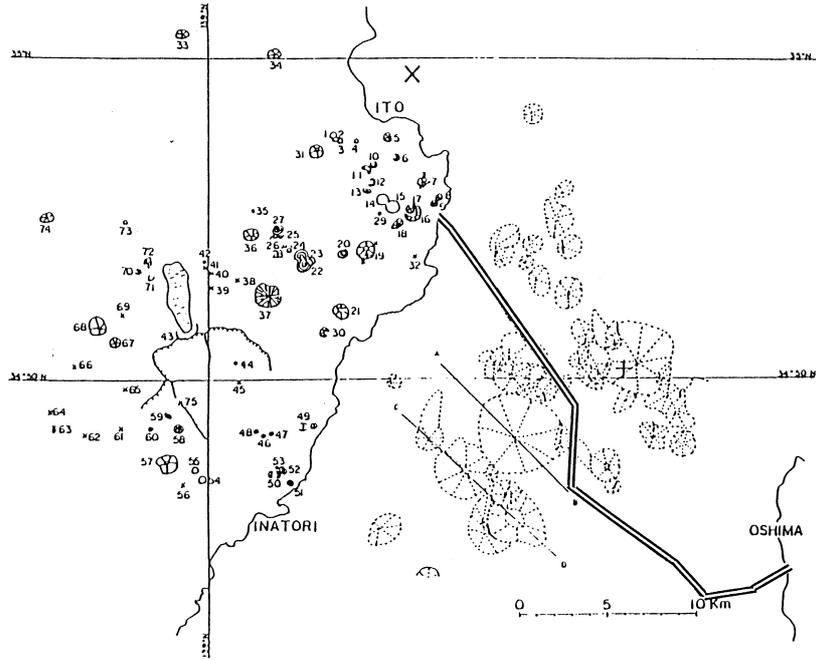


図 1b ケーブルの敷設海域には、多くの単性火山があることが知られており、また、伊豆半島東方沖の群発地震が、近年ほぼ周期的に発生している。

Fig. 1b An ocean cable antenna runs over the strait between the Izu-peninsula and Izu-Oshima Island. Monogenetic volcanoes are identified in the strait as well as on the near land. There has been almost periodical seismic swarms off Ito since 1976, and was a small submarine volcanic eruption in 1989.

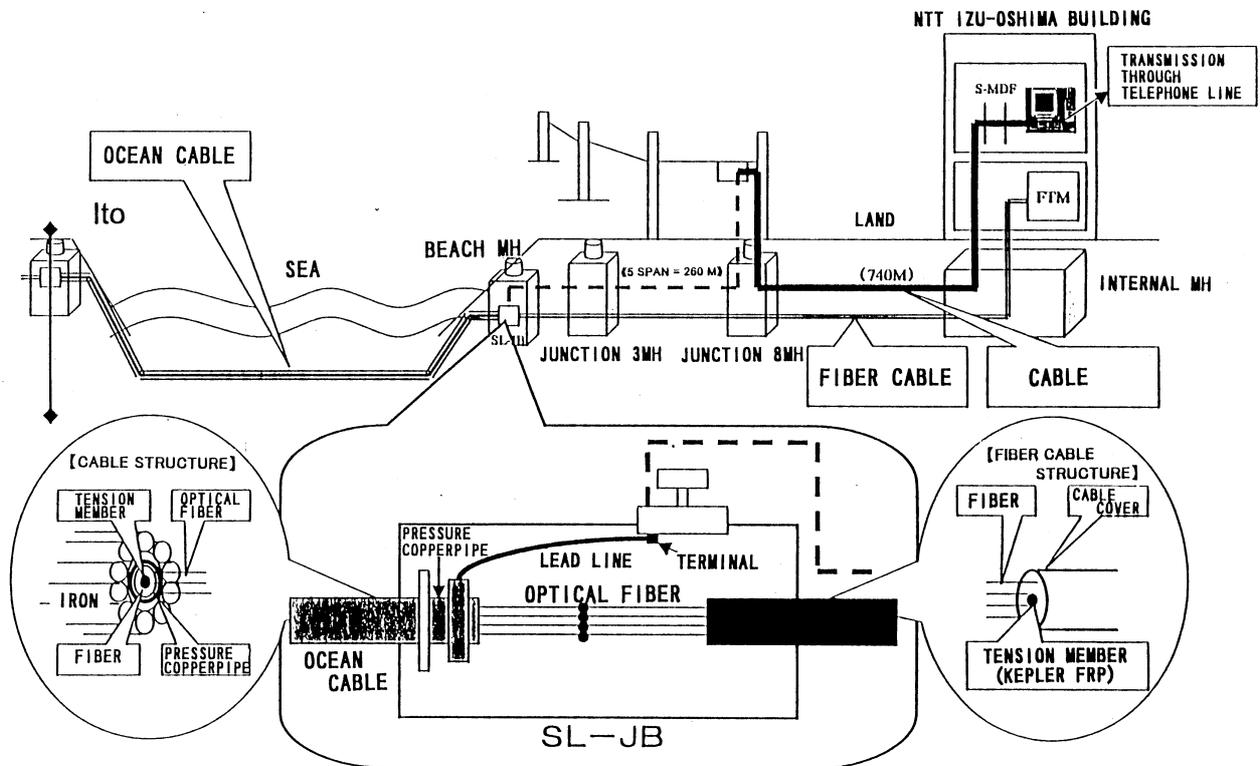


図 2 海底電話線用ケーブルの耐圧銅パイプによるアンテナの構造。NTT 伊豆大島局舎アースと、海底電話線アンテナとの間の電圧を給電電圧としている。

Fig. 2 Schematic Diagram of Ocean Bottom Antenna. A pressure copper pipe outside the optical fiber is used as an antenna pole with the end at Ito being open.

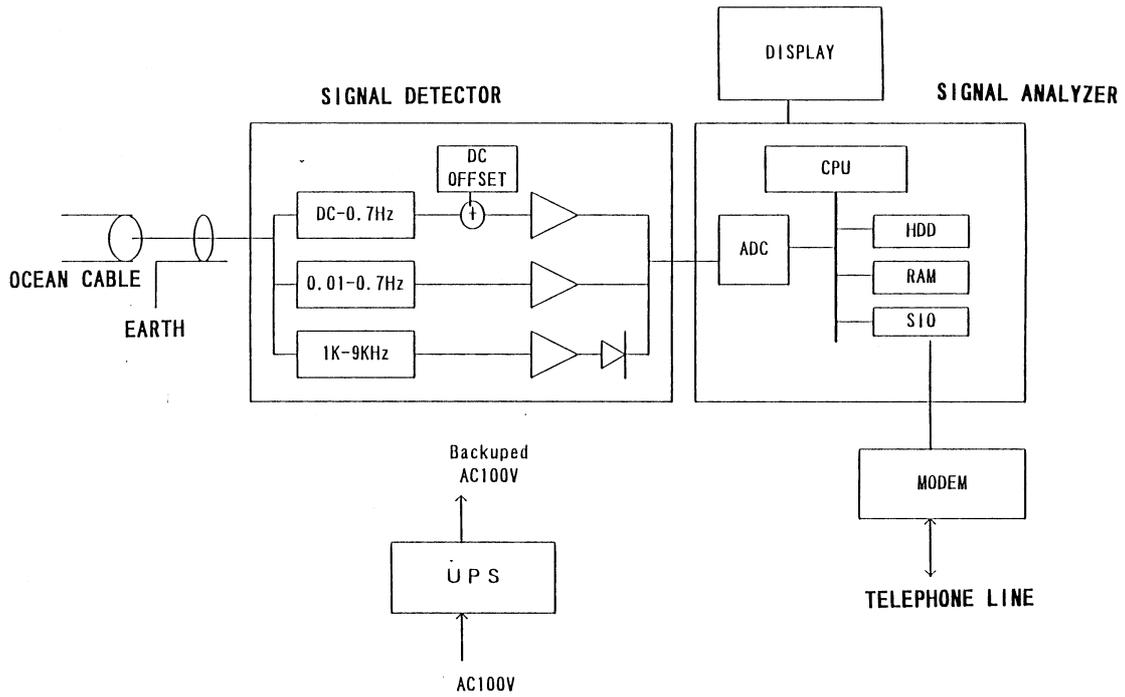


図3 海底電界変動計測装置の観測局装置ブロックダイアグラム。関東・東海地域の他の観測点と同様に、3つの周波数成分を記録している。データは、つくばのセンター局へ毎日深夜に送信され、保存される。

Fig. 3 Schematic diagram of electric field change measurement instrument. Three frequency bands (DC, ULF, ELF/VLF) are picked up and transmitted to the central station.

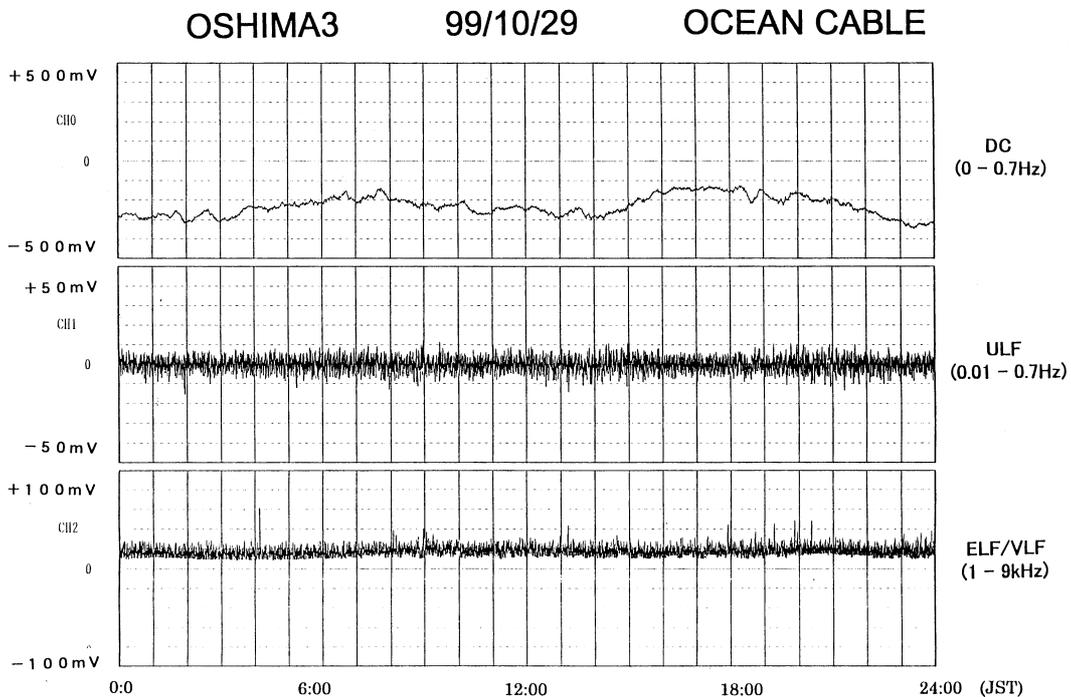


図4a 平常時の記録の例。DC帯では、陸上での測定と違って大きく変動するが、これは海流変動の影響と考えられる。ULF帯の背景ノイズが定常的なのは、この周波数帯が、海洋乱流に起因するものであろう。

Fig. 4a An example of ocean-bottom electric field measurement records in a normal state. The DC components fluctuate mostly owing to the ocean current fluctuations. The noises in the ULF band are highly stationary possibly because of isotropic property of ocean turbulence.

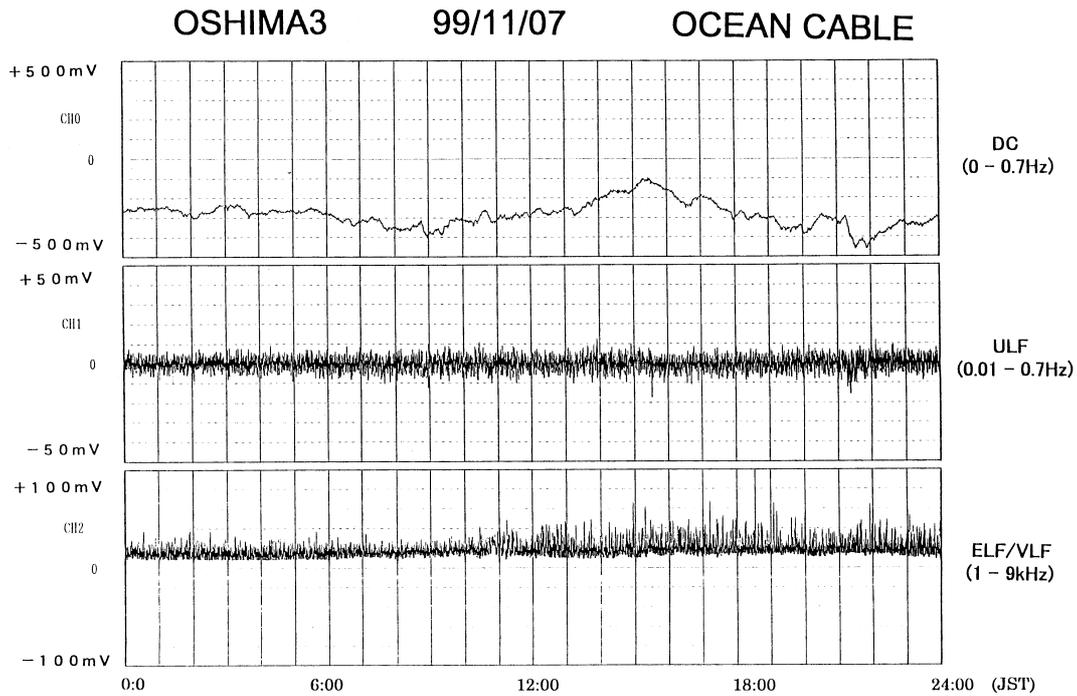


図 4b 図 4a と同じく平常時の記録で、1999 年 11 月 7 日のもの。ULF 帯時間によらずほぼ定常的であることは、ランダムに選んだ図 4a との比較で明らかである。

Fig. 4b Same as for Fig. 4a except the day, November 7 1999. The stationarity in the ULF band fluctuation is noted by comparing to the records of Fig. 4a randomly chosen in normal state.

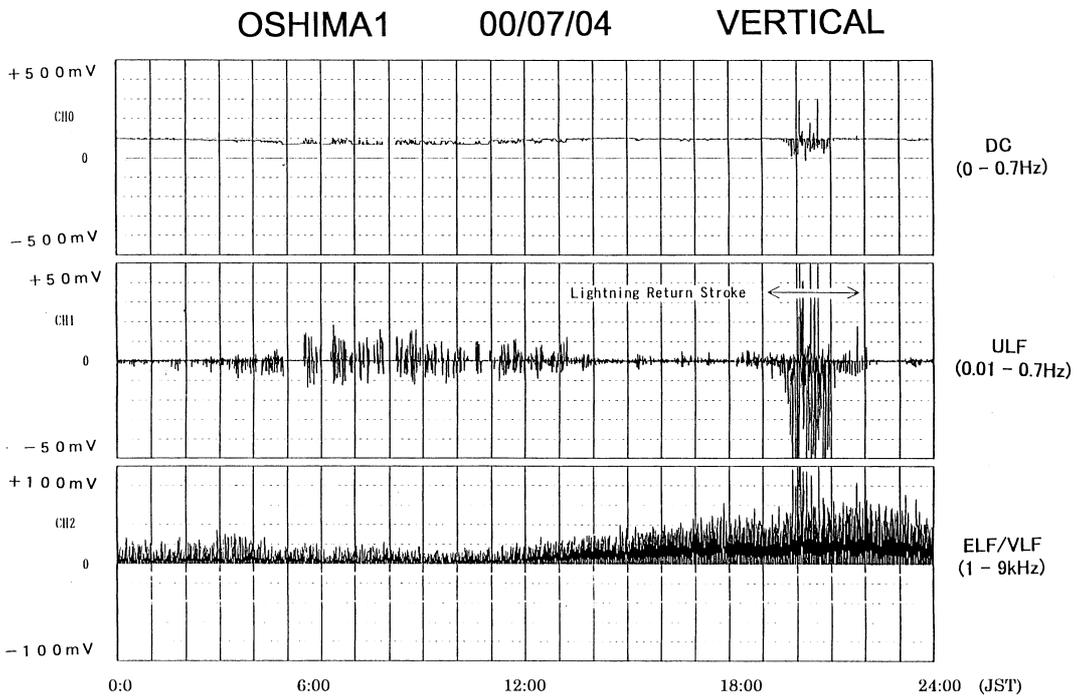


図 5a 雷活動のある時の陸上電界変動観測記録の例。計測点は元町から約 3.5km 離れた大島温泉ホテル (OOH) 構内で、ボアホールアンテナを用いたもの。19 時 (JST) 頃から DC, ULF 帯に大きな変動が見え始める。又、ULF 帯は雷雲の接近に伴って 12 時頃から次第に振幅が大きくなり、20 時頃に最も大きい。午前中の記録に見える DC, ULF 帯の変動は、ノイズではなく、三宅島の火山活動に連動して発現したと考えられる異常変動である。

Fig. 5a An example of ocean-bottom records of electric field variation on the day when there was large fluctuation at around 20:00 (JST) on the whole bands owing to an atmospheric return stroke in the evening.

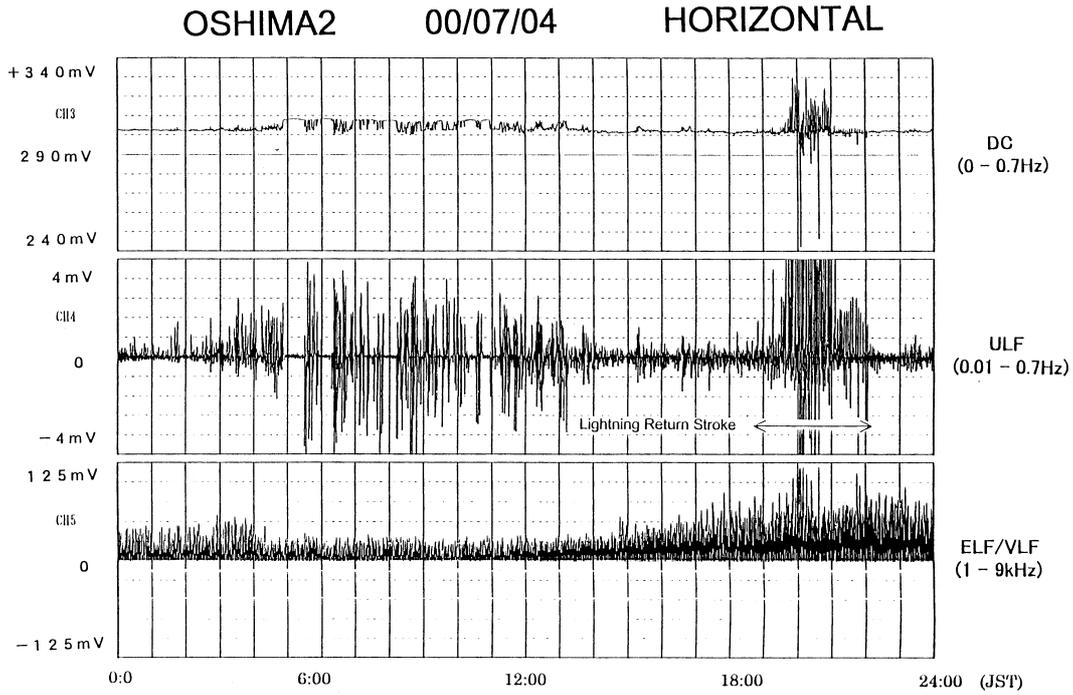


図 5b 図 5a と同じ日の伊豆大島温泉ホテル構内での陸上水平電界成分の記録。鉛直成分とよく似た変動を示している。

Fig. 5b Same as for Fig. 5a except the records obtained by the vertical electric field measurement using a vertical pipe being some 100m long at Izu-Oshima Onsen Hotel.

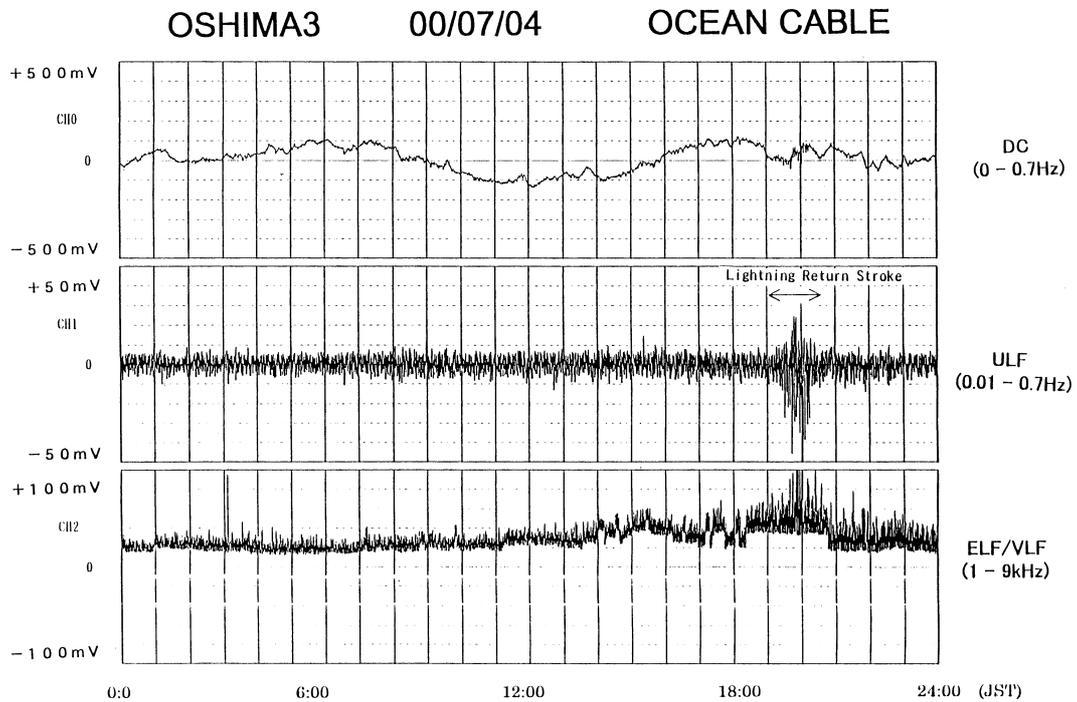


図 5c 図 5a, 5b と同じ日の海底ケーブルによる観測の記録。雷活動に伴う変動は、陸上での記録と同様に検出されている。陸上記録と比較することにより、大きな変動は雷活動に起因するものか否かの判別が可能である。雷活動による異常は通常数時間しか継続しないという特徴 (Takahashi *et al.*, 2000) から判断できる。

Fig. 5c Same as for Fig. 5a except the records obtained by the horizontal electric field measurement by an electrode being approximately 280m long at Izu-Oshima Onsen Hotel.

17 June ~ 16 July 2000

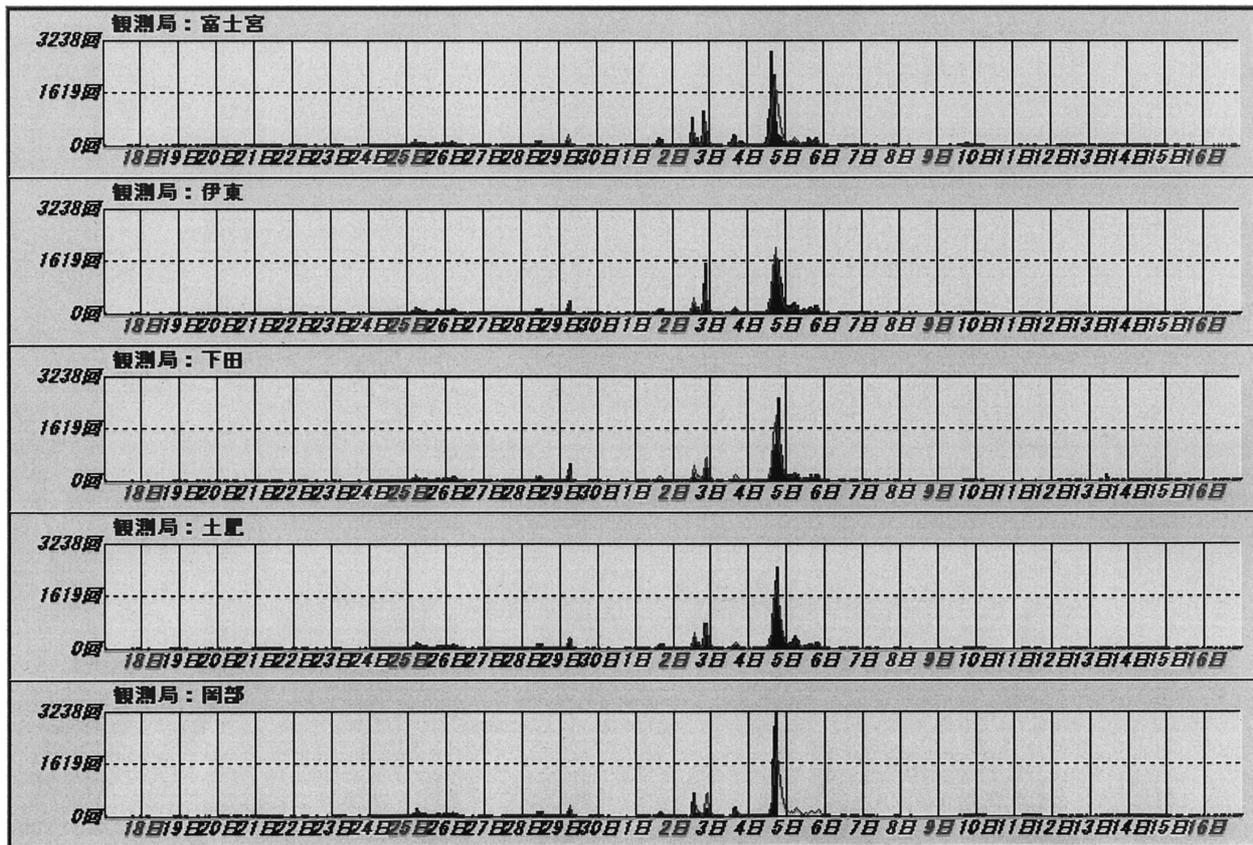


図 6 共同研究による静岡県内集中観測網によって記録された単位時間当たりの落雷数の時間変化. 2000 年 7 月 4 日に, 特に大きな雷活動が東海地方にあったことがわかる.

Fig. 6 The number of lightning discharges per an hour observed at five sites in Shizuoka Prefecture. Discharge activities are very large on 4 July 2000 showing that the large electric field variation shown in Fig. 5 is due to the lightning discharge.

4. 伊豆諸島における活動と連動した変動

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. 2000 年の火山活動の数か月前から平常時とは異なる異常変動が検知されている (図 7, 藤縄ほか, 2000). データの解析の結果, 1) 火山活動に伴って, 顕著な電界変動があること, 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, 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 10km 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

立した観測の窓であることが実証された.

全体的な動向を示すため ULF 帯変動 $u(t)$ の強度 $U(t)$ を定義する,

$$U(t) = \int_t^{t+T} |U(t)| dt \quad (1)$$

ここでは, 便宜的に $T=1h$ とした. 伊豆大島における伊豆大島温泉ホテルでのボアホールによる 2000 年 3 月から 7 月までの記録を図 8 に示す. 三宅島の火山活動が活発になる時期に強度が大きくなっている. 陸上計測に見える顕著な異常変動は, 3 月末頃から殆ど毎日恒常的に現れて, 火山活動の推移と大局的に相関をもって変動した.

2000 年 2 月以降の海底ケーブルによる ULF 成分の記録を図 9a - 図 9f に示す. 図 10 は, 海底ケーブルによる ULF 成分の全体的な傾向を分りやすく示す為のもので, $U(t)$ を示す. 時々落雷のためのデータ欠落がある外は, 6 月 27 日までは先に示した平穏時の記録と言える.

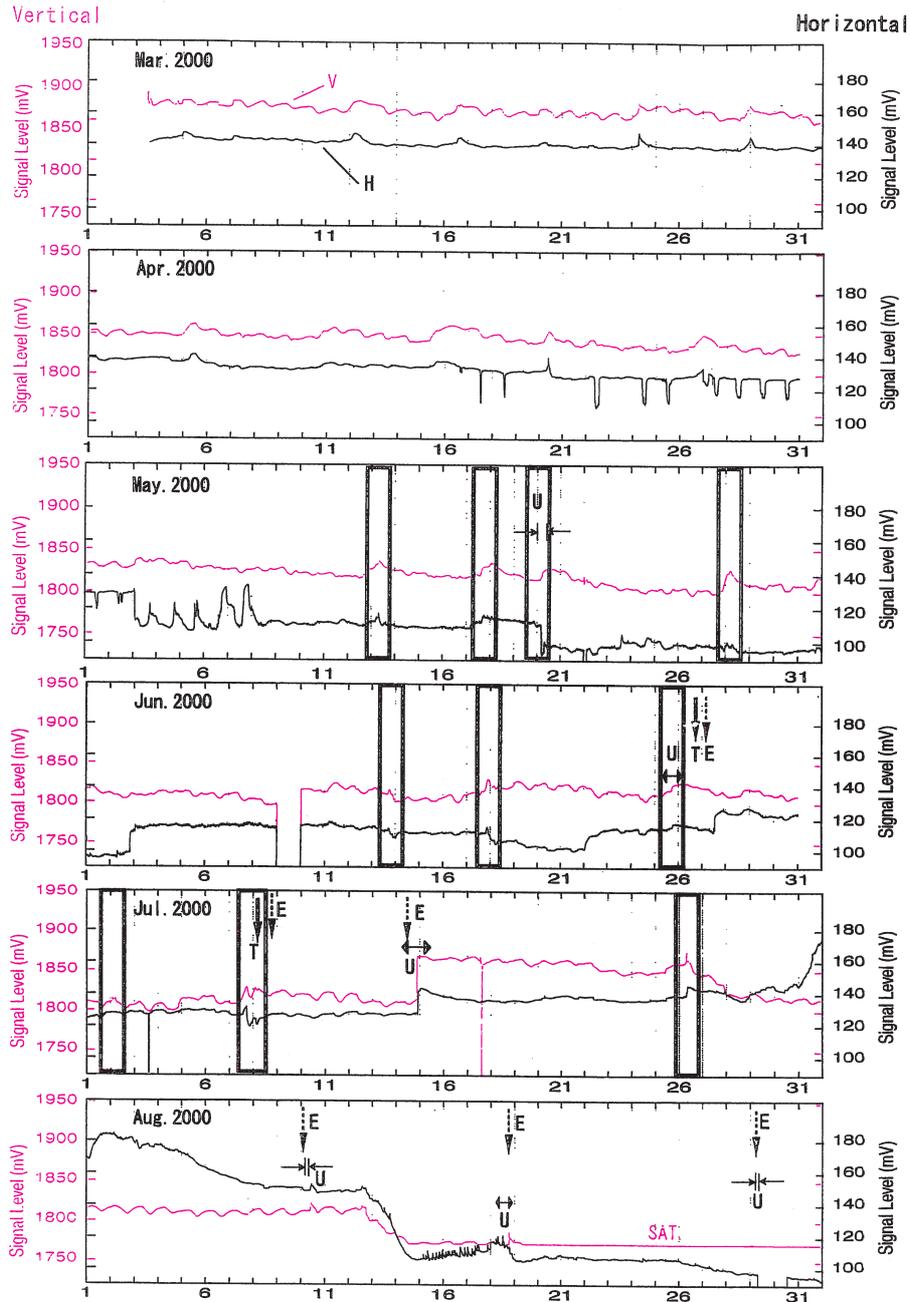


図7 三宅島における鉛直・水平成分電界変動記録(2000年3月~8月)。大噴火の際以外にも、小規模な噴火活動の前に、日周変動により短周期な容易に識別できる変動が現れる。その最初は、4月20日であり、その後5月20日、28日、6月10日、11日、13日、14日、7月7日に発生し、幾つかのケースは8月18日の時と同様、ULF帯の変動を伴っているものもある(図中の“U”)。顕著な“短周期”変動のある時期を枠で囲んである。これらは、例外なく火山の活動の半日、あるいは一日前に発生し、マグマの移動に伴う強い地下間隙水の変動の存在を示唆している。8月の大規模噴火活動のあった時期には、変動も大きい。

Fig. 7 Long-term electric field monitoring records of the vertical component in the DC band from early March 2000 by the end of August at Miyake-Jima Island. Higher frequency fluctuations with a period much shorter than the dominated diurnal variation appeared more frequently as the volcanic activity approached (“E” in Fig. 3) 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 Fig. 3) that appeared at the time of the largest eruption. The disappearance of the diurnal variation in May might be due to the generation of fluctuation field changes as the magma approached Miyake-Jima Island. There are steady trend-like changes by the end of May, followed by an abrupt increase on 17 July, and rapid decrease at the end of July in correlation with the volcanic events.

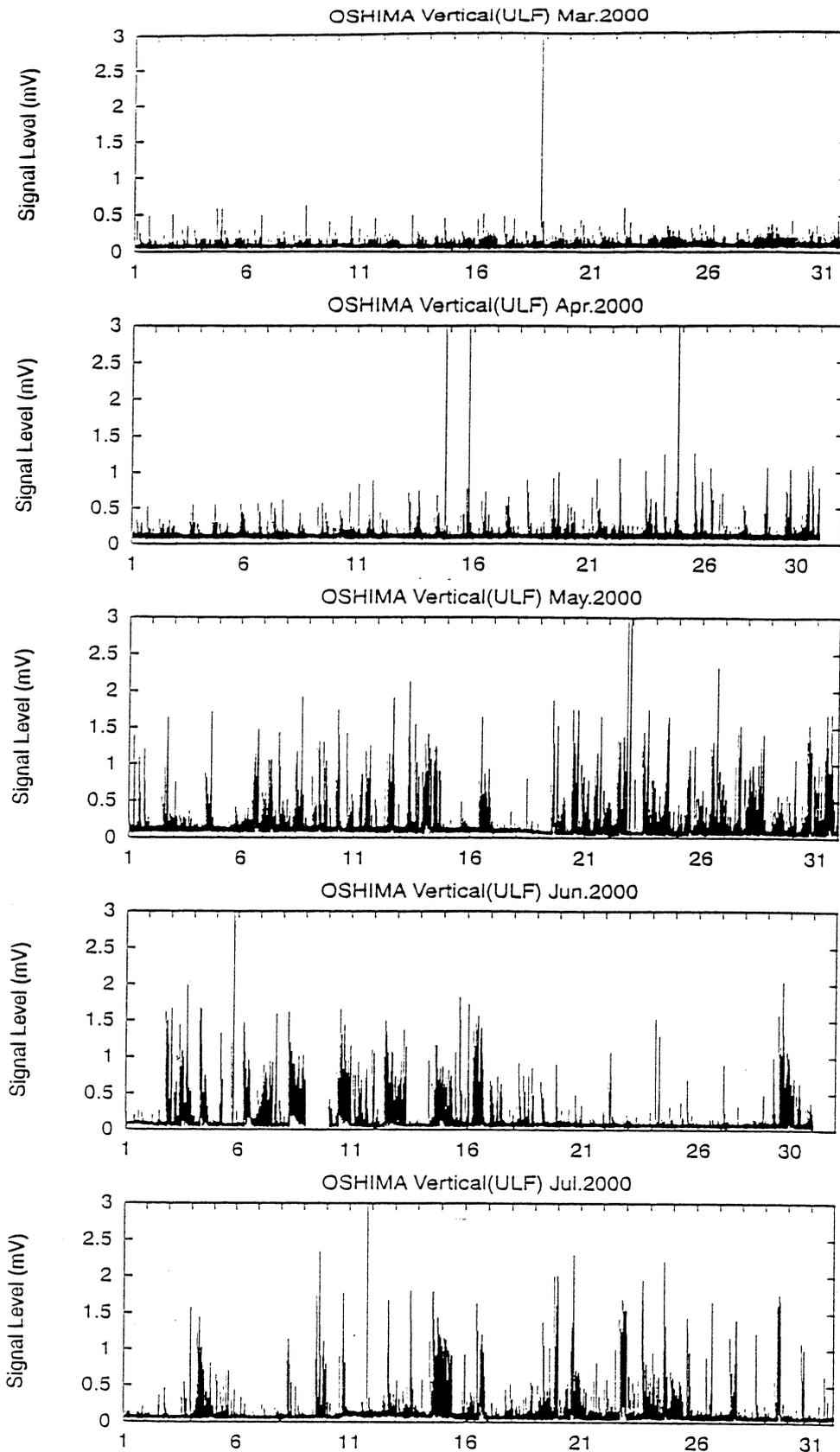


図 8 伊豆大島温泉ホテルにおける鉛直 ULF 帯の信号強度 $U(t)$ (2000 年 3 月～2000 年 7 月). 三宅島の火山活動が近づくにつれて強度が大きくなっている.

Fig. 8 Electric field strength $U(t)$ of the ULF band from February through July 2000 at Izu-Oshima Onsen-Hotel in Izu-Oshima Island. It suggests that the increase of the signal strength is related to the volcanic eruption activity at Miyake-Jima Island.

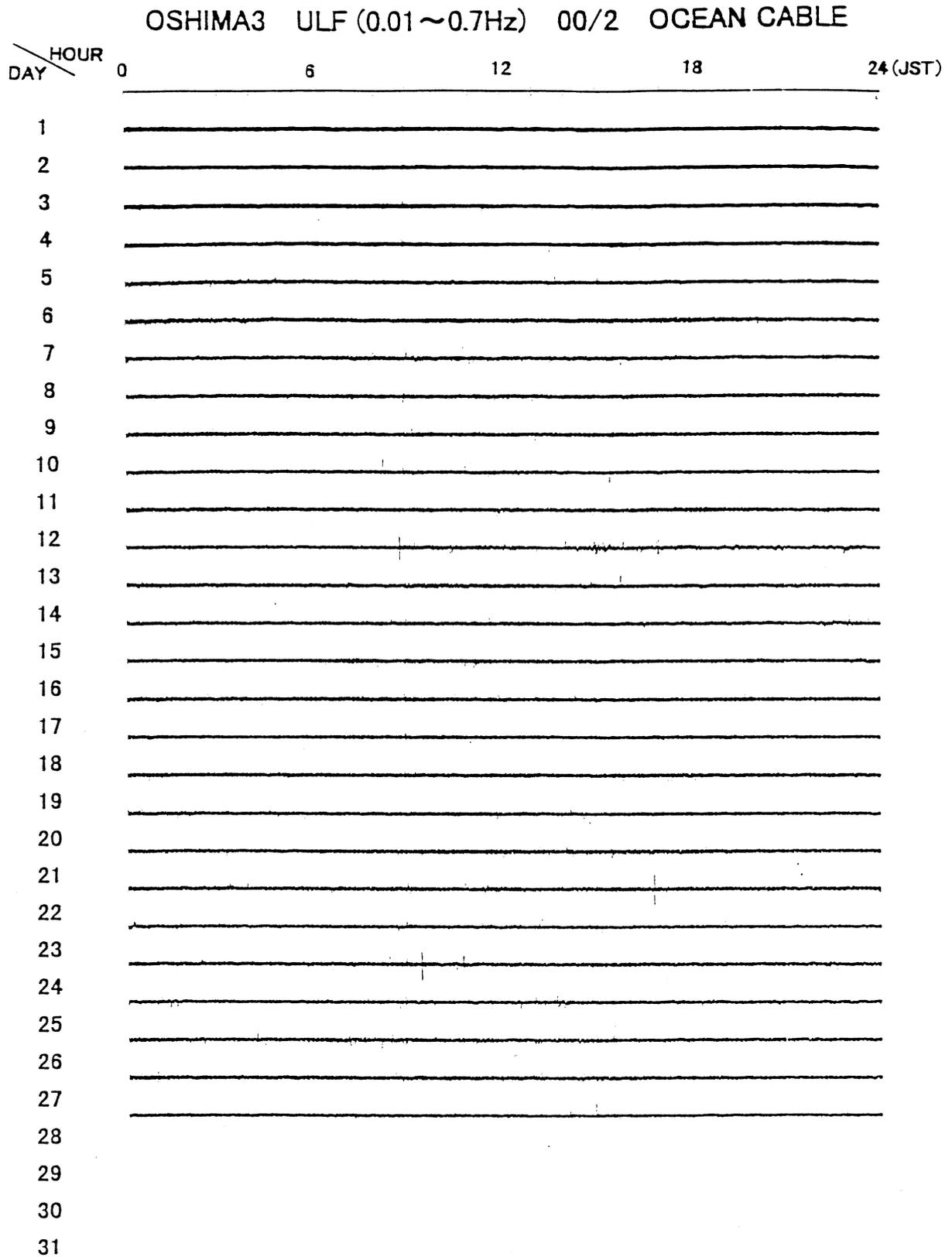


図 9a 海底ケーブルを用いたアンテナによる一か月の電場観測記録 (2000 年 2 月).

Fig. 9a Monthly monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band in February 2000.

OSHIMA3 ULF (0.01~0.7Hz) 00/3 OCEAN CABLE

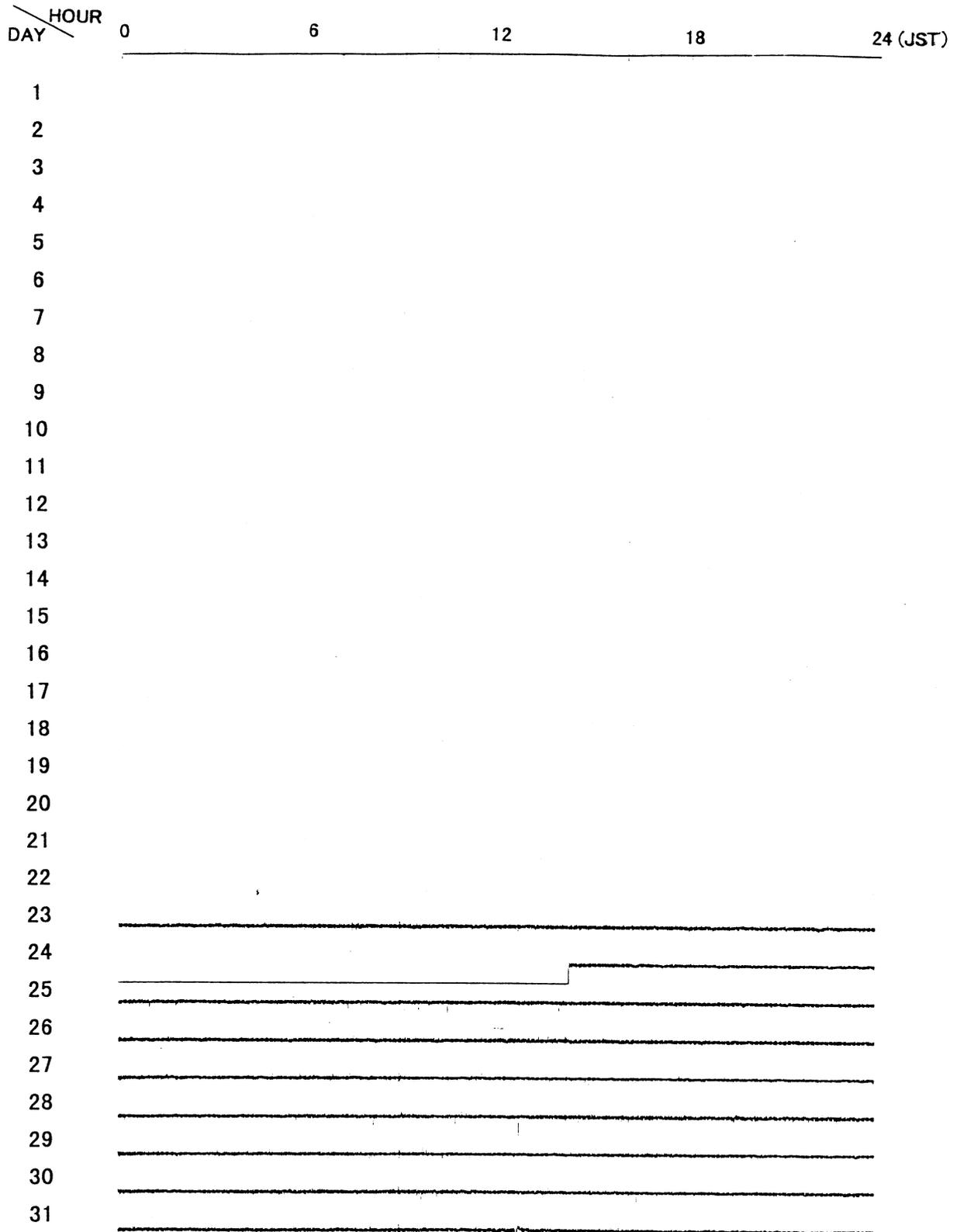


図 9b 海底ケーブルを用いたアンテナによる一か月の電場観測記録 (2000 年 3 月). 22 日までは, 欠測.

Fig. 9b Monthly monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band in March 2000. There are data loss till 22nd.

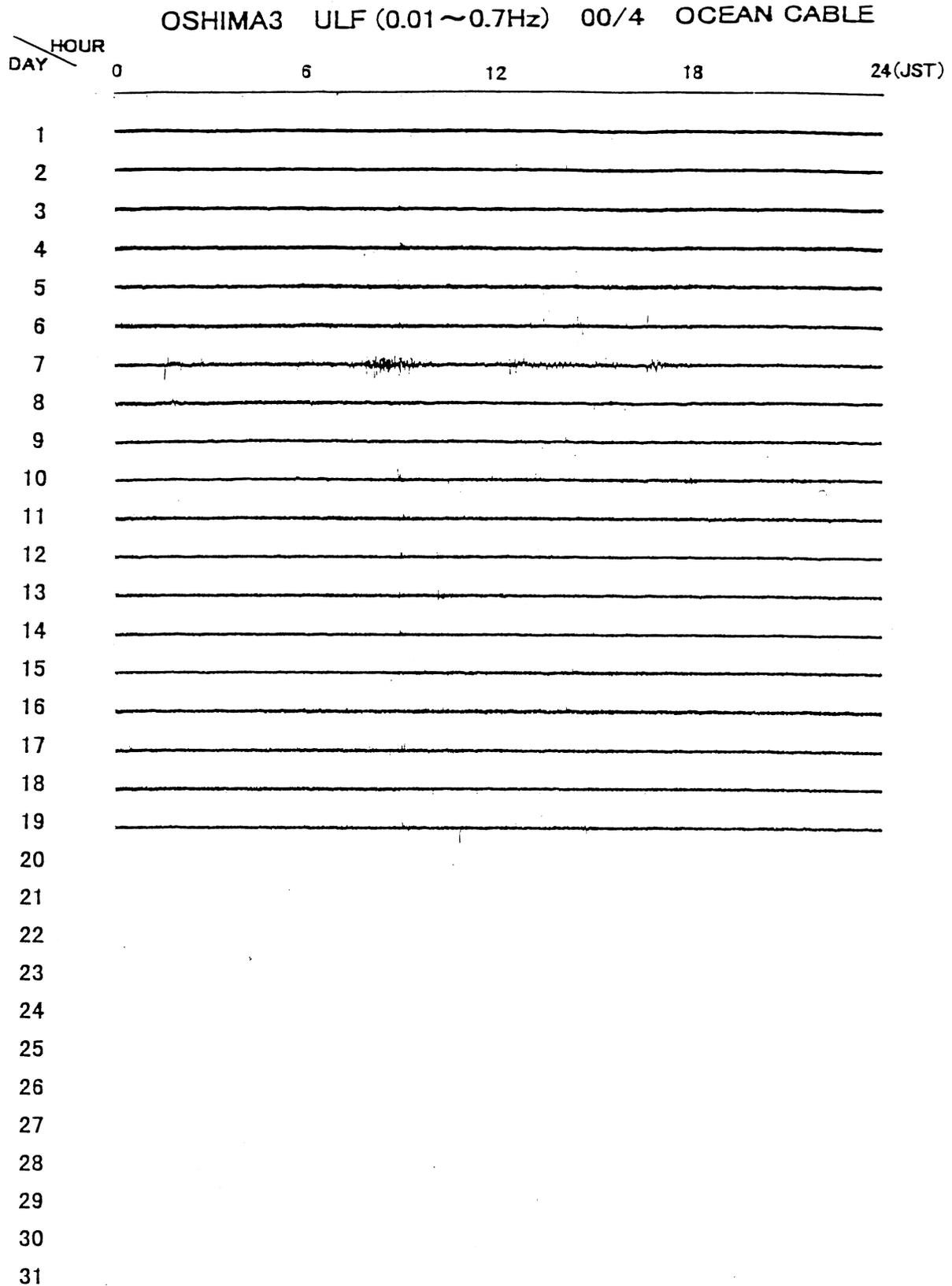


図 9c 海底ケーブルを用いたアンテナによる一か月の電場観測記録 (2000 年 4 月). 4 月 7 日にやや大きな変動が現れている. 4 月 22 日からは, 欠測.

Fig. 9c Monthly monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band in April 2000. There are large anomalous variations on 7 April. There are data loss from 22nd.

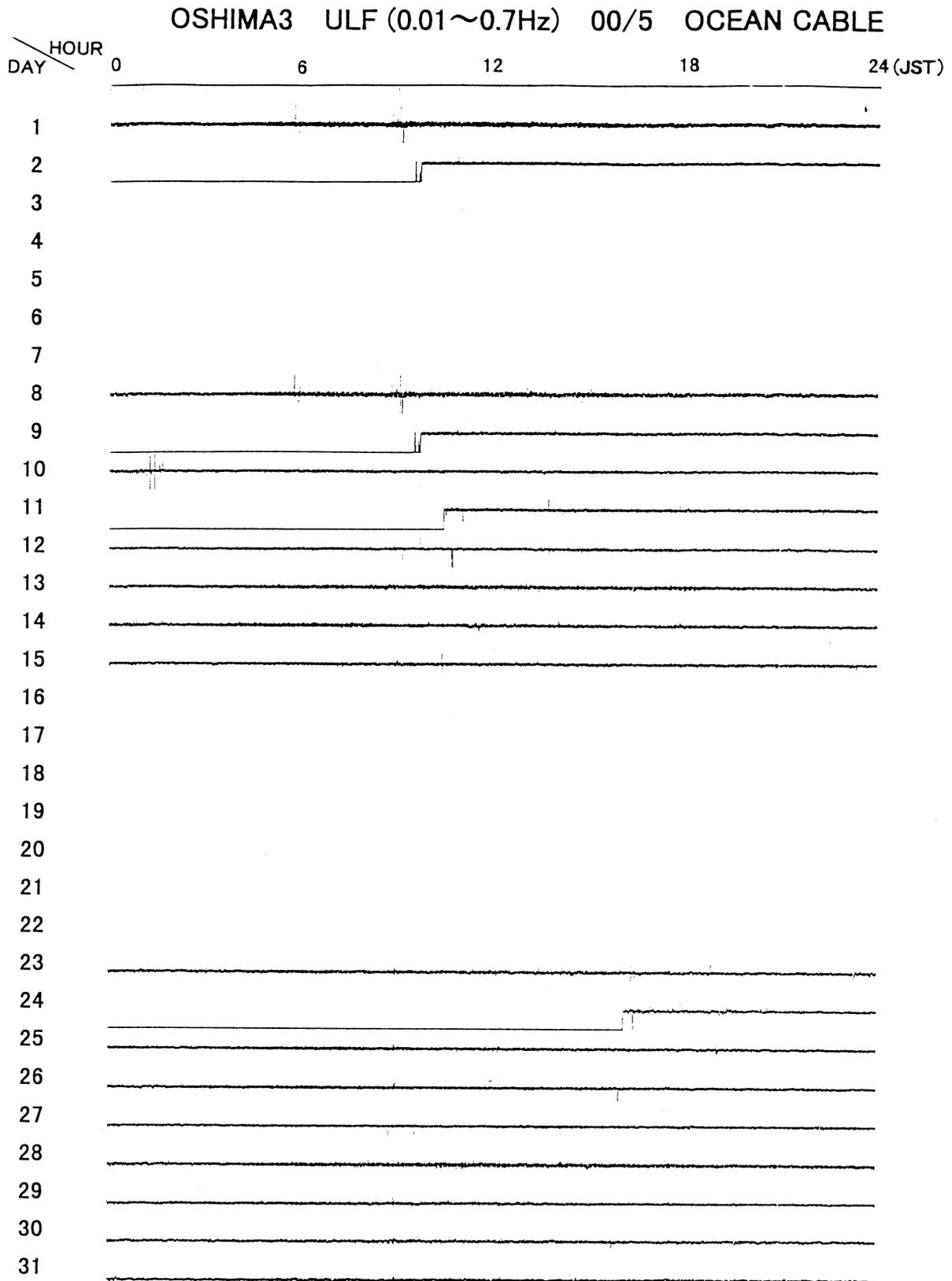


図 9d 海底ケーブルを用いたアンテナによる一か月の電場観測記録 (2000 年 5 月). 5 月 2 日などのマイナス側のフルスケールは, 記録部分の不具合と思われる. 5 月 16 日から 22 日は, 欠測.

Fig. 9d Monthly monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band in May 2000. Records of over-scaling are possibly due to malfunction of recording part. There is data loss from 16 through 22.

OSHIMA3 ULF(0.01~0.7Hz) 00/06 OCEAN CABLE

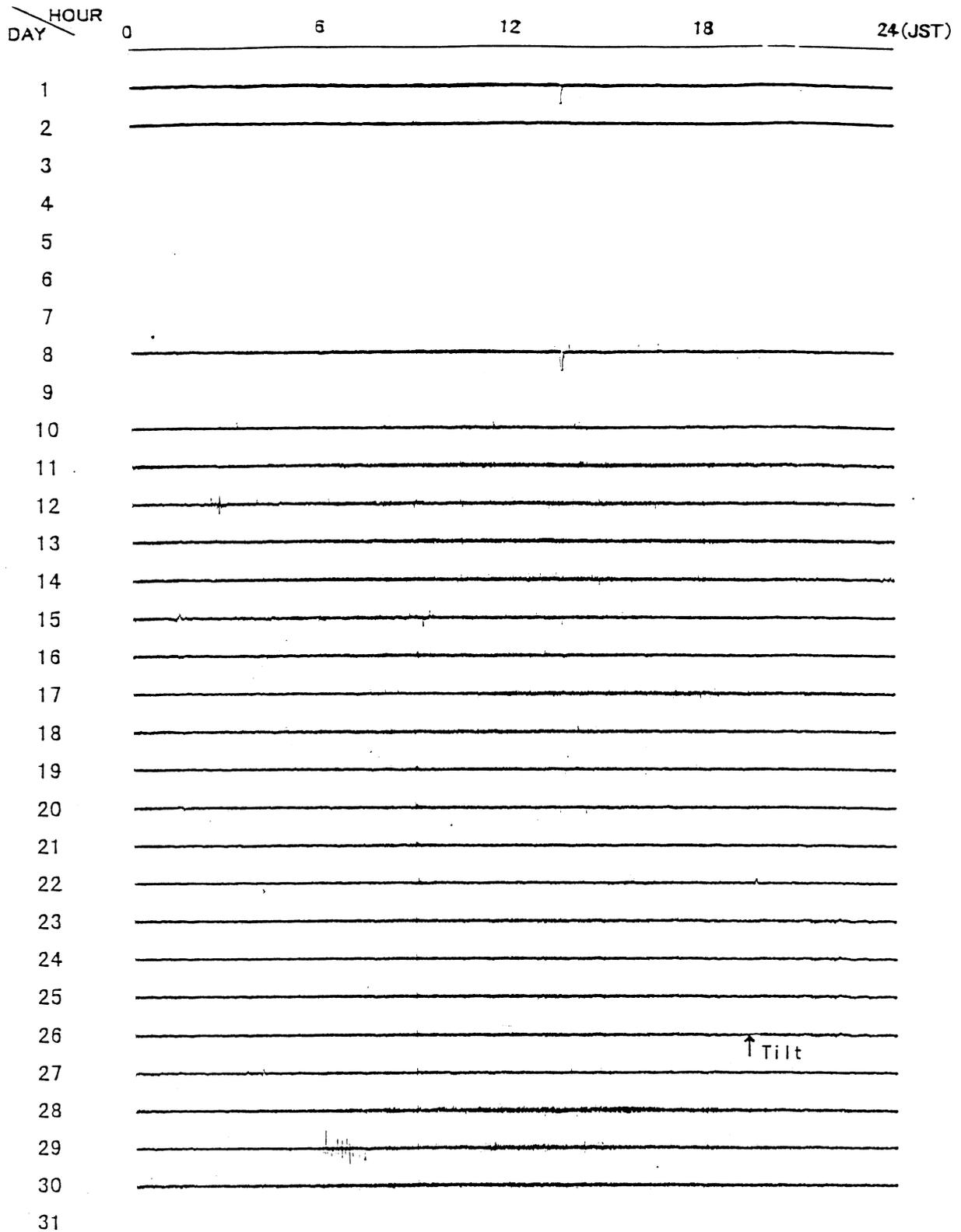


図 9e 海底ケーブルを用いたアンテナによる一か月の電場観測記録 (2000 年 6 月). 6 月 26 日夕方に三宅島で火山活動に伴う大きな傾斜変動が検知された (図 7 参照). 6 月 28 日頃から, 変動が大きくなる傾向が見られる.

Fig. 9e Monthly monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band in June 2000. Large crustal tilt changes were observed on 26 at Miyake-Jima Island (cf. Fig. 7). Fluctuations tended to increase from 28 June.

OSHIMA3 ULF(0.01~0.7Hz) 00/07 OCEAN CABLE

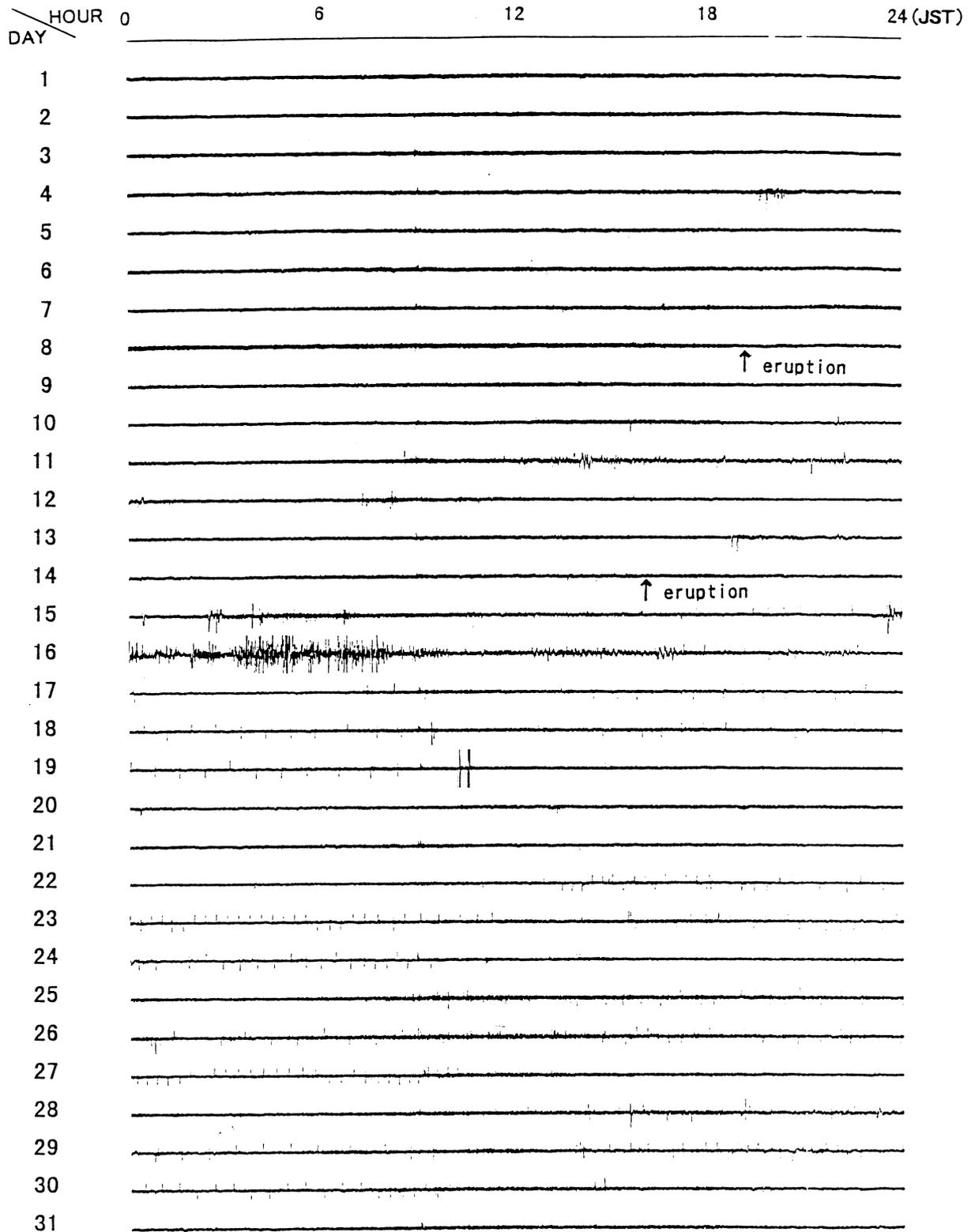


図 9f 海底ケーブルを用いたアンテナによる一か月の電場観測記録 (2000 年 7 月). 7 月 14 日に三宅島で顕著な火山活動があった (図中の “eruption”) が, その時期に, 大きな電界変動が検知されている. さらに, 17 日頃から, パルス状の高周波成分の変動が現れた.

Fig. 9f Monthly monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band in July 2000. A conspicuous volcanic eruption on 14 July at Miyake-Jima Island (“eruption” in Figure) accompanied large variations. There appeared pulse-like variations from 17 July.

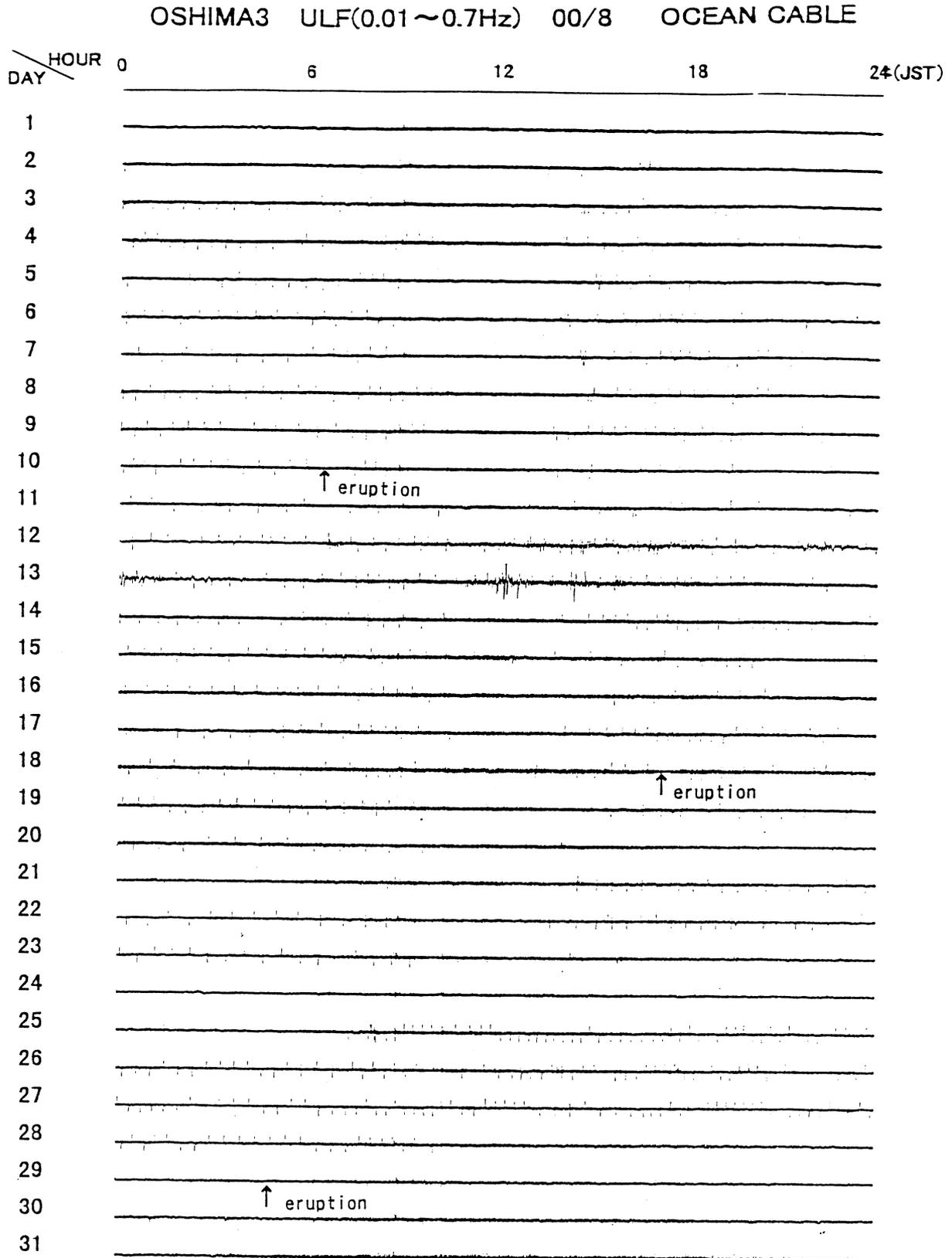


図 9g 海底ケーブルを用いたアンテナによる一か月の電場観測記録 (2000 年 8 月). 三宅島で火山活動が最も活発な時期の記録である (図中の “eruption”). 8 月 29 日の大規模な噴火を境に, それまで発生していたパルス状の高周波成分の変動が大きく減少した.

Fig. 9g Monthly monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band in August, 2000, when the volcanic eruption at Miyake-Jima Island was the most severe. The pulse-like variations decreased conspicuously after the large-scale eruption on 29 August.

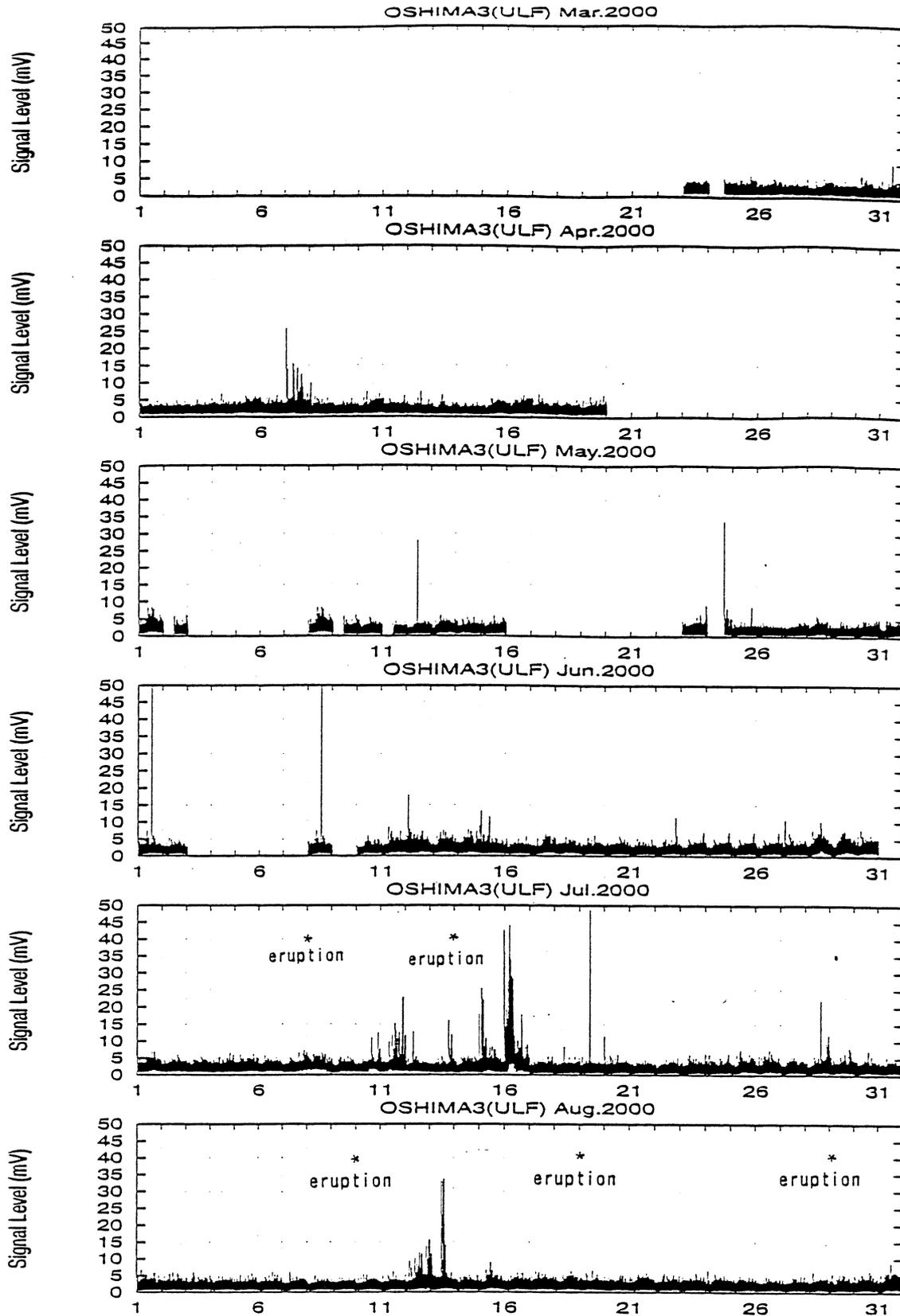


図 10 海底ケーブルを用いたアンテナによる電場観測記録における鉛直 ULF 帯の信号強度 $U(t)$ (2000 年 3 月～2000 年 7 月). 三宅島の火山活動が近づくにつれて強度が大きくなっている.

Fig. 10 Electric field strength $U(t)$ of the ULF band from February through July 2000 of the ocean-bottom electric field measurement. It suggests that the increase of the signal strength is related to the volcanic eruption activity at Miyake-Jima Island.

例外は、4月7日の数時間続く大きな変動である。この日一日の記録を図11に示す、8時頃から1時間あまり異常変動が続いた、伊豆大島における他の2つの計測にも同じように現れている。ELF/VLF帯の記録には現れていなく、落雷時の記録(図5a, b, c)と比較して雷活動起源ではないと判定できる。

海底ケーブルデータでは、6月末まで4月7日に顕著な異常が検出された以外は殆ど平穏状態であった。三宅島の活動が26日、27日の一応のピークを終えた時期から振幅がやや大きくなり、7月15日、16日にこれまでで最大の変動が記録されている(図12a)。海底ケーブルに現れた午前6時前後の変動は、水平成分にも現れている(図12b)が、水平成分が大きい変動を示す午後の時間帯には、対応する変動は海底ケーブルの方に顕著には見えない。ここまでは、主として、ULF帯の変動につき記述してきたが、DC帯の変動も7月16日前後では、平穏時とは比べ物にならない大きさとなる(図13)。

電界の変動の強度分布が地域的に大きな非一様性を有する原因については、既にある程度その原因の見通しが得られ(Fujinawa *et al.*, 2002a)、測定点と発生源周辺の比抵抗分布および発生源の分布の非一様性に原因を求めることができる。このような知見及び4月7日の例から

類推すると伊豆大島温泉ホテル側のセンサーは、二つ以上のソースからの変動を検出し、一つは海底ケーブル付設領域と連結しており、一つは連結していないものと推測される。

マグマ活動の推移から言えば、この7月16日の異常の存在は、マグマの活動が、6月28日以後伊豆大島北部に達し、7月15日、16日にかなり大がかりなマグマ活動が伊豆大島西から伊東市にかけてあったと推測される。陸揚げ地点でのアース電位の変動の影響とも考えられるが、島内のネットワークMT観測ネットの記録(長尾, 私信)との比較からその影響は大きくなかったと推測される。それ以後、このような大きな変動は現れなく、この海域下でのマグマに関連した熱水循環は活発なものではなかったと推測される。ただし、図9fの7月8日以降に現れているように、ULF帯では、パルス状の変動が頻発しており、平穏時とは明らかに様子が異なっており、小規模ながら熱水活動が存在している兆候(Fujinawa *et al.*, 2002a, 2002b)がある。図14aには、8月7日のモニター記録の一部を載せる。ULF帯の変動が、顕著に見られる。これに対して、図14bには、温泉ホテルでの記録を載せるが、ほとんど同じようなULF帯の変動は観測されず、本変動が、海底で発生したことがわかる。

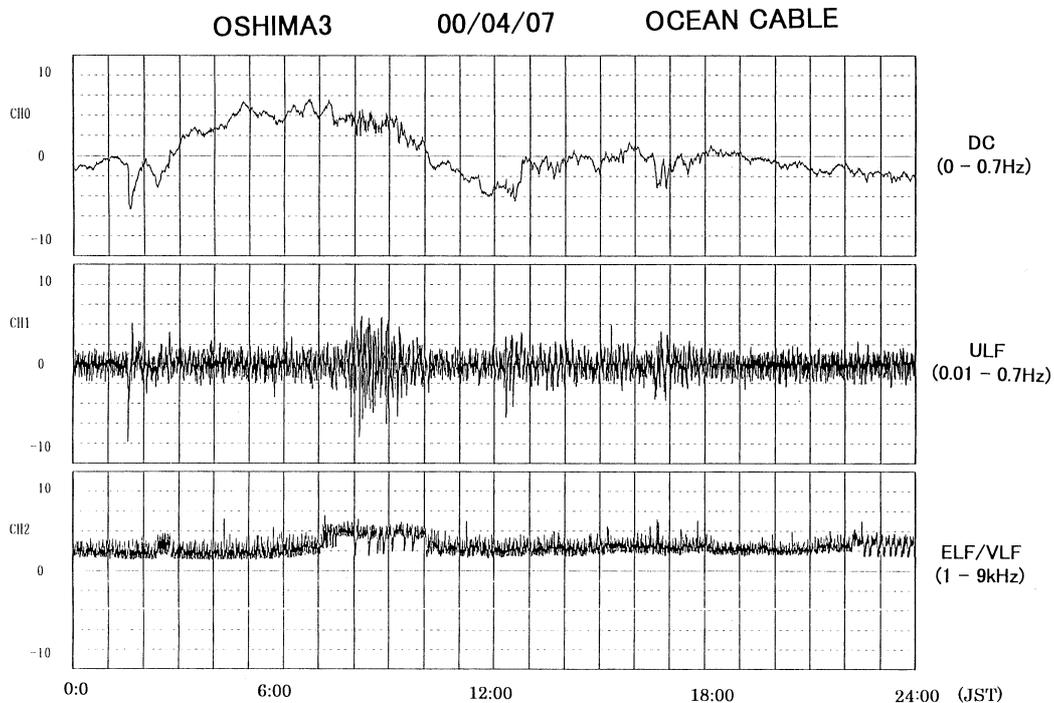


図11 4月7日午前8時ごろ、やや大きなDC、ULF帯の異常信号が検出された。このような変動が検出されたのは、観測以来初めてである。

Fig. 11 Monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the DC and the ULF bands showing that conspicuous variation appeared on 7 April 2000 (JST).

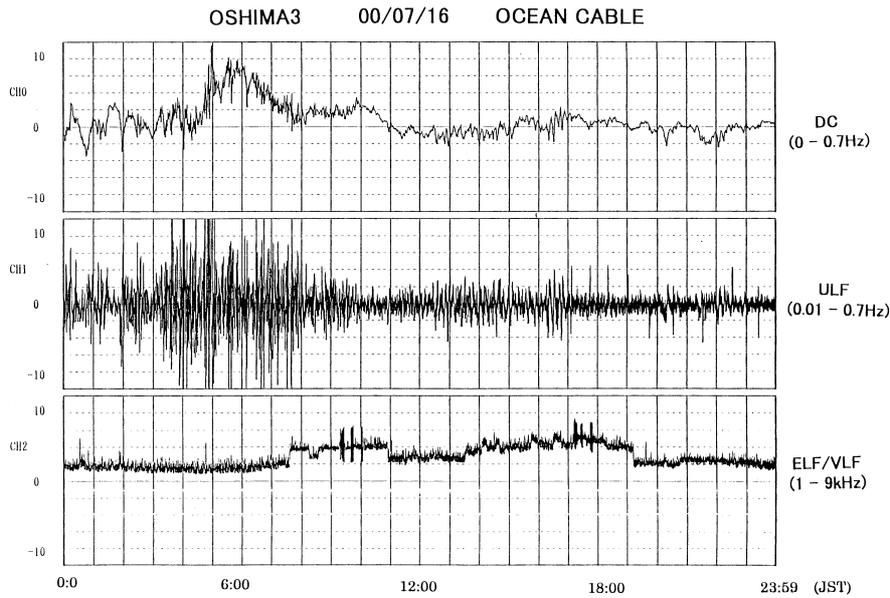


図 12a 7月16日午前には、非常に大きなDC、ULF帯の異常信号が検出された。これは、伊豆大島近辺でもマグマが、特に単成火山群の下で活発化したことによると思われる。

Fig. 12a Monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the DC and ULF bands showing that extraordinary large variation appeared on 16 June 2000 (JST). It is inferred that magma intruded to one of conduits corresponding to monogenetic volcanoes in the strait west of Izu-Oshima Island.

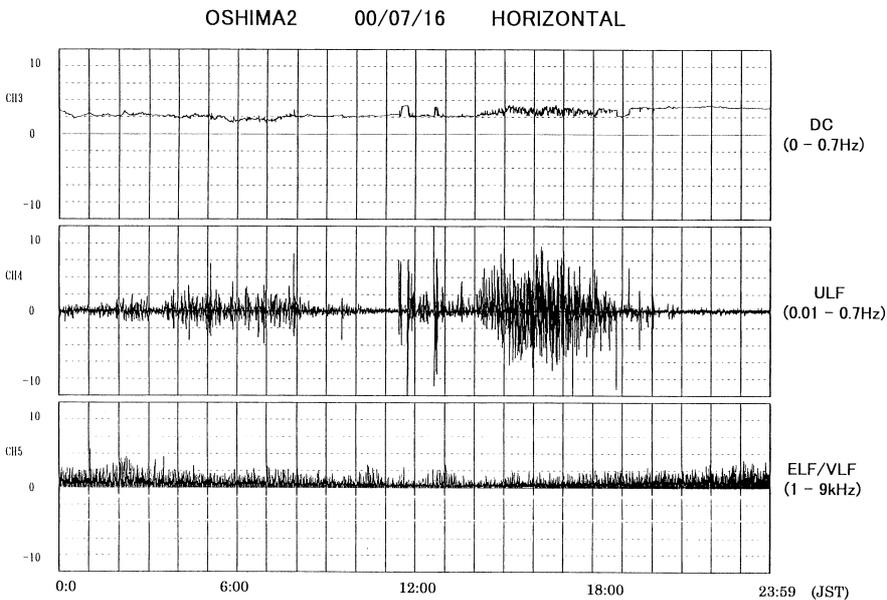


図 12b 同じ日の伊豆大島温泉ホテル構内での水平成分変動記録。午前中の変動は海底での記録と良い相関があるが、午後に見える異常変動は、三宅島の火山活動に連動して発生していると考えているものであり、両者の発生源は異なるものと考えられる。前者は単成火山群の周辺、後者は三原山周辺と推測される。この日には、伊豆大島島内(OOH)では、顕著な変動が検出され、これは三宅島活動に連動している。しかし、海底観測データには現れていない。

Fig. 12b Monitoring records of the horizontal component at Izu-Oshima Onsen Hotel showing large variation appeared on 16 June 2000 (JST) at a different time in comparison with those appearing on the ocean-bottom antenna. We infer that the latter anomaly is induced by the magma intrusion to a monogenetic volcano west of island. A smaller variation in the morning well correlated with the latter variations indicates that the volcanic conduit under the monogenetic volcano is partially connected.

OSHIMA3 dc (0~0.7Hz) 00/07 OCEAN CABLE

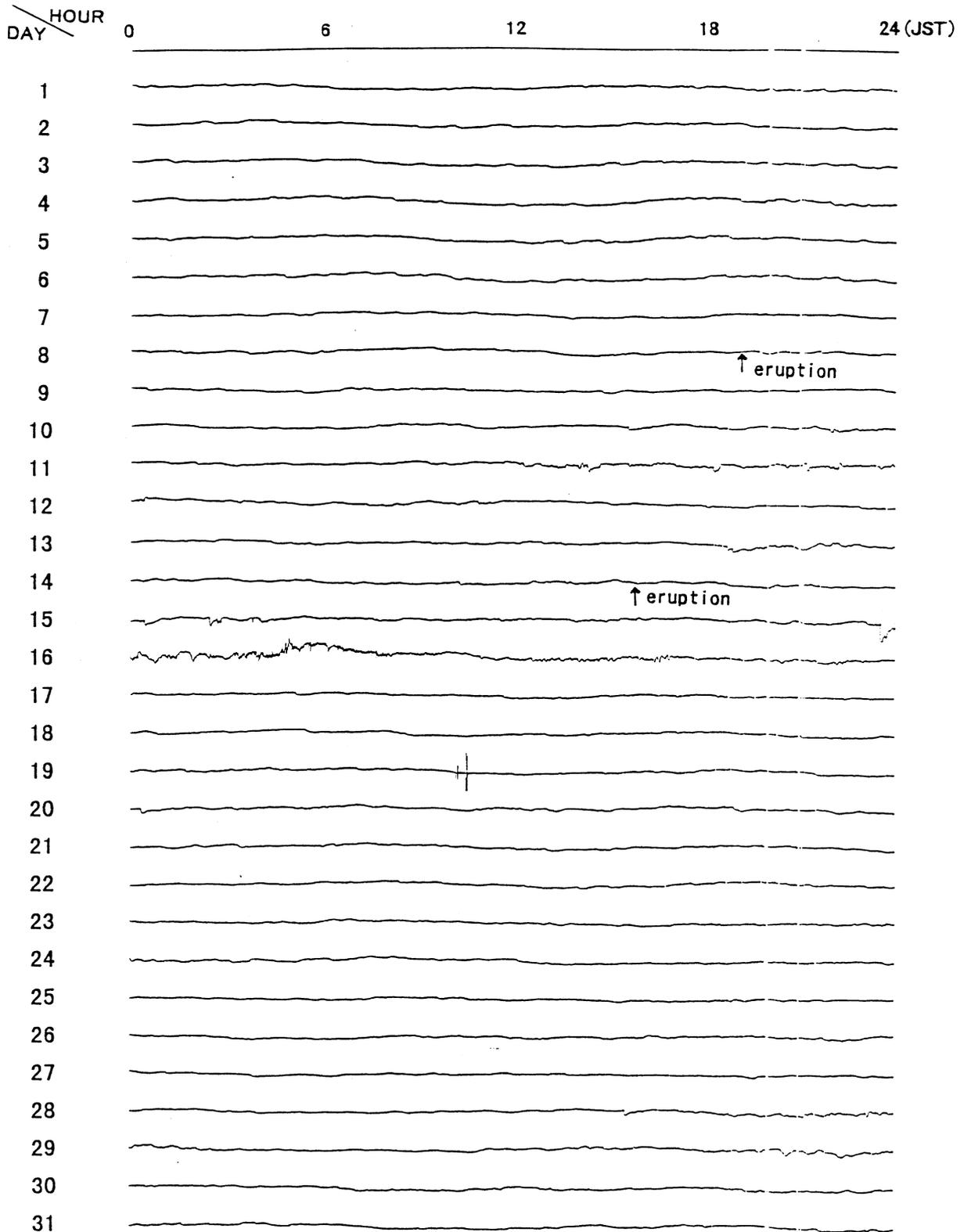


図 13 海底ケーブルを用いたアンテナによる DC 帯の一か月の電場観測記録 (2000 年 7 月). ULF 帯で 7 月 14 日に大きな変動があったが (図 9f) DC 帯域でも, 大きな電界変動が検知されている.

Fig. 13 Monthly monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the DC band in July 2000. A conspicuous variation of low frequencies appeared at the time of severe ULF band fluctuation.

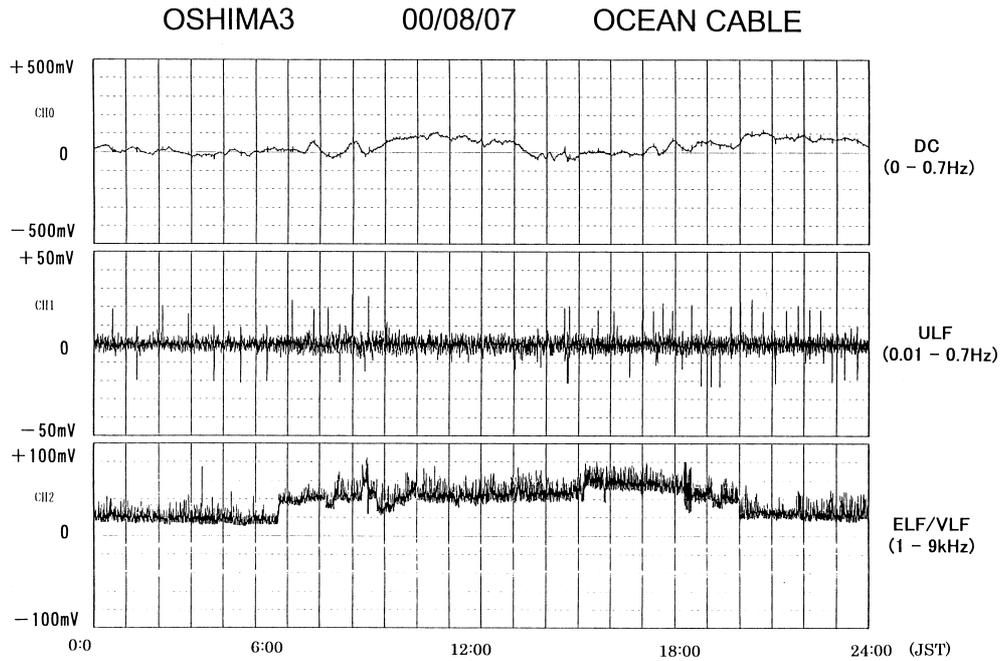


図 14a 海底電場記録で 8 月 7 日のもの。ULF 帯に顕著なパルス状変動があり、又 DC 帯にも対応する変動が見られる。この種の変動は、三宅島火山活動のピークの時にのみ見られ、熱水の状態がマグマの接近によって変動したことによると考えている。

Fig. 14a Monitoring records of the ocean-bottom electric field measurement in the ULF band showing that large ULF band pulse-like variation appeared) on 7 August 2000 (JST). It is inferred that there is severe interaction between magma intruded and surrounding hydro-thermal circulation under the cable.

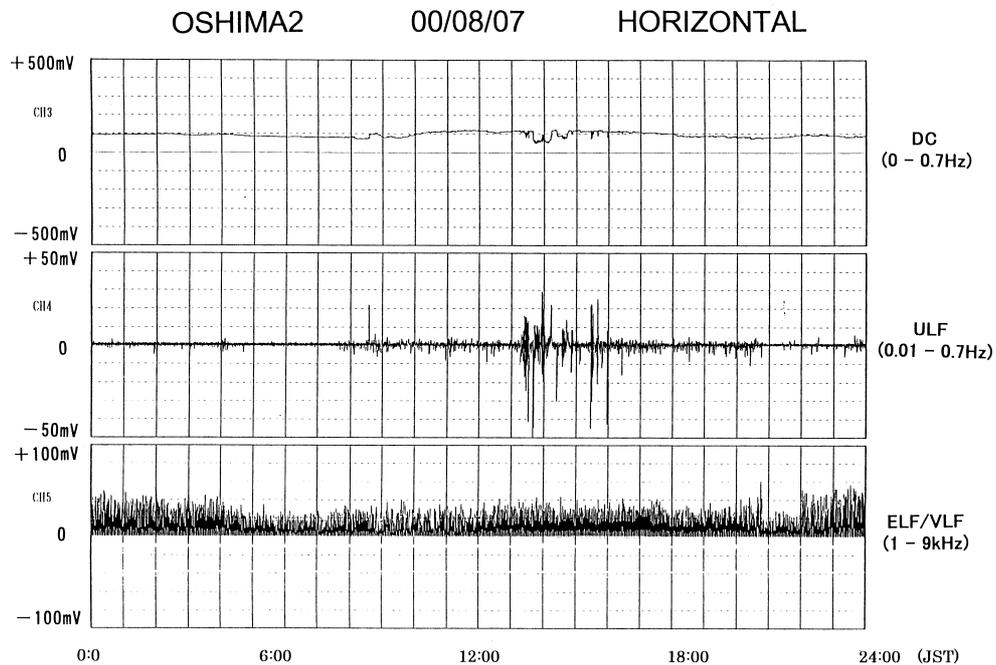


図 14b 海底ケーブルアンテナによる異常時の際の伊豆大島温泉ホテル構内での水平成分変動記録 (2000 年 8 月 7 日)。ULF 帯に顕著なパルス状変動は、観測されていない。

Fig. 14b Monitoring records of the vertical component on 15 August 2000 (JST) at Izu-Oshima Onsen Hotel showing large there are no similar variation as on the ocean bottom. We infer that the latter anomaly is induced by the magma intrusion to a monogenetic volcano west of island. A smaller variation in the morning well correlated with the latter variations indicates that the volcanic conduit under the monogenetic volcano is partially connected.

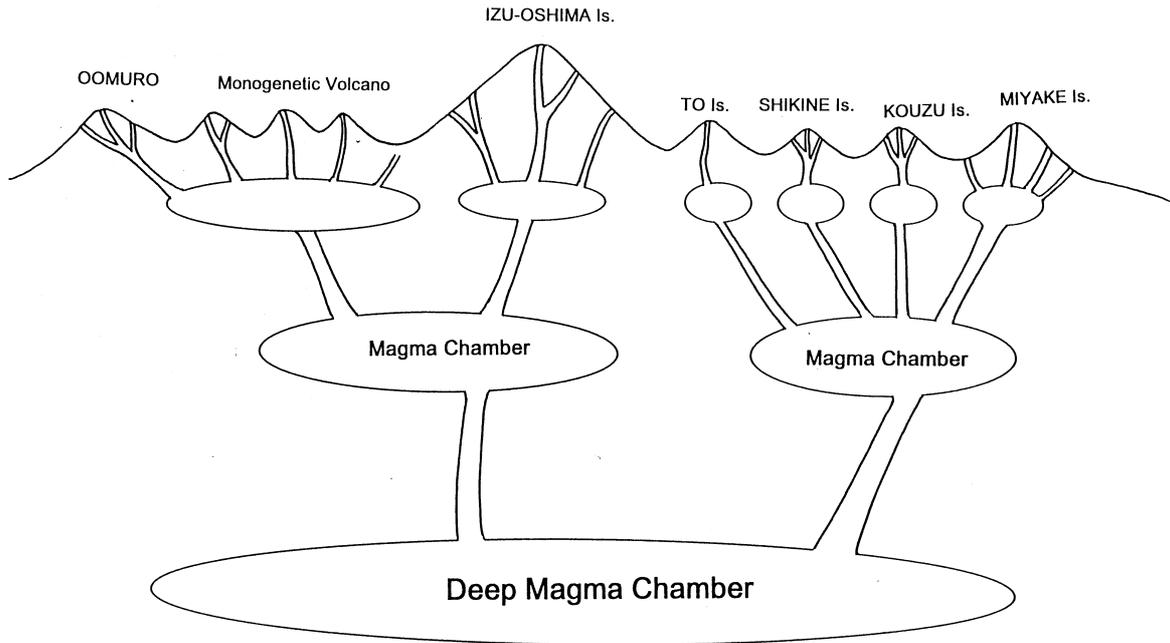


図 15 2000 年三宅島の火山活動を引き起こしたマグマ活動の模式図。深部マグマの活動があり、伊豆大島、伊豆半島東方沖下までその影響があったと推測している。

Fig. 15 A schematic model of magma activities inducing the 2000 Miyake-Jima Island eruption inferred from the electric field variation data.

5. 議論

現システムでは、アンテナのどの部分で電界強度の異常があったかを知る手だてではない。アンテナは海底部分が 33km、陸上部分が 260m あるので、本アンテナに現れた 7 月 16 日の異常電界変動が、海底部におけるものかどうかにについて検討してみる。検討の対象を周波数帯 0.01Hz ~ 0.7Hz の成分とし、その中間の周波数として、代表的に 0.1Hz とする。アンテナは、長さが波長に比べてはるかに小さく、微小ダイポールと考えられるので、実効長 l_e は、

$$l_e = l/2 \quad (2)$$

となる。海底の電氣的性質として、比誘電率 $\epsilon_r = 10$ 、電気伝導度 $\sigma = 10^{-3} \text{ s/m}$ 、とすれば、海底部における 0.1Hz の周波数の変動電磁界の浸透深度 δ_{ac} は、

$$\delta_{ac} \doteq 50 \text{ km} \quad (3)$$

となり、海底下地殻で発生する電界は、アンテナ全長で検知されるとする。一方、屋外線が敷設されている陸上マンホールでの電界 E_s を、簡単のため、地表での値 E_e

$$E_s \doteq E_e \text{ (地表)} \quad (4)$$

と近似する。

伊豆大島における Network MT 観測ネット（上嶋・長尾、私信）では、2000 年 7 月 16 日に、元町・波浮間のダイポールで 340mV という大きな変動が現れている。このことから、伊豆大島周辺には、この日にこれまでとは異なった電場変動があったことは確かである。一方、

元町から約 3.5km 東の伊豆大島温泉ホテル（以下、OOH）では、非常に小さな変動しか検出されていないので、この 340mV という大きな変動が、3.5km の長さの領域で発生したと仮定すれば、元町周辺の地表での値 E_e 電界強度として、

$$E_e \doteq 0.1 \text{ mV/m} \quad (5)$$

とすることが出来よう。これより海底アンテナの陸上部分に対する供給電圧の大きさは、 $E_e \cdot l_e \doteq 13 \text{ mV}$ であって、海底アンテナで計測された大きさ約 400mV の 1/30 にすぎない。すなわち図 5 にみる変動は、海底部で大部分が検出されたとして良い。

しかし、信号の伝達を 50km とした点が、観測事実と整合しない点がある。一つは伊東市周辺が電氣的なノイズが多く、アンテナが伊東市内に延びているにもかかわらず、それが殆ど海底アンテナにのらないことである。これは、市街化ノイズが海底にどの程度伝達するかを知らなければある程度検証ができる。平塚沖における試験的な海底電位観測でも、東海道線の通過時間と相関のある変動は、見出されなかった。その理由は、市街化ノイズは ULF 帯では、海洋乱流の成分に比べはるかに小さいためであると思われる。

今一つの不思議な点は、伊豆大島の OOH での ULF 帯の異常な信号が、海底アンテナに検知されないことである。両測定点の距離が 3.5km にすぎないので、これが正しいとすれば $\sigma \doteq 0.1 \text{ S} \cdot \text{m}$ としなければならない。すなわち発生源の近くは電気伝導度の高い層があることになる。又、その場合には、 $\delta_{ac} = 5 \text{ km}$ となり、海底アンテナ

ナで検出された変動のソースは、元町の近くの西側海底ということになる。

一方で、伊豆大島におけるより周波の低い変動成分も、8km 程度の範囲でしか検知されていないケースが報告されている。しかもそれ等は多点で同位相であることから、その領域では同時に変動したものであったと考えられる。この 8km という検知範囲は、単純な構造を仮定した電磁界の伝播では説明ができないのかもしれない。

むしろ地下水の運動を介した信号伝播ではなかろうか。そうなれば、海底アンテナで検出されたものの発生源が、単成火山群の上からということが考えられる。ただ、地下水変動にしては、OOH での陸上ダイポールによる変動との波形の相関度が大き過ぎるきらいがある。そうなると、海底であるが、元町近辺の海底がソースであった可能性がさらに大きくなる。

三宅島火山噴火などを引き起こしたマグマの活動の影響が、伊豆大島、伊豆単成火山群にまで及んでいたと考えられる。三宅島 2000 年火山活動に伴うマグマ活動の概念図を図 15 に示す。富士山の低周波地震の増大は、このマグマ活動の北方への延長とも考えられよう。

6. 結論

電話回線用の海底ケーブルを用いた電界変動計測によって、地殻活動に伴う海底電界変動を検出した可能性が高いと考えられる。この変動は、マグマ活動に触発された地下熱水循環の激しい変動によるものと推測される。特にパルス状の変動は、火山活動の激しい時にしか発生せず、マグマの接近に伴う火山体の水循環変動に起因する可能性が高い。三宅島での観測の例から（藤縄ほか、2001a；Fujinawa *et al.*, 2001b）地下流体運動検出のこの方法は、海底火山、海底地震の活動のモニターに係わる可能性を秘めていることを示している。本方法の特徴は、一つのセンサーで広域の活動をカバーできることであり、自然電位の変動成分が地表でも計測できることから、陸上における安価な計測方法ともなるであろう。

謝辞

海底ケーブルの付設を許可し、観測にあたって多大な御協力をいただいた NTT に深く感謝申し上げます。又、観測にあたり、テックス(株)の協力をいただきましたことを感謝いたします。

参考文献

- 1) Fujinawa, Y. and Takahashi, K. (1990): Emission of electromagnetic radiation preceding the Ito seismic swarm of 1989. *Nature*, **347**, 376-378.
- 2) Fujinawa, Y., Takahashi, K., Matsumoto, T., and Ka-

- wakami, N. (1997): Experiments to locate sources of earthquake-related VLF electromagnetic signals, *Proc. Japan Acad.*, 1997, **73**, B, 33-38.
- 3) 藤縄幸雄・松本拓己・高橋耕三・飯高 弘 (2000): 地中電磁界変動と地震・火山活動との関係 (2), 地震予知連絡会会報, No. **66**, 537-546.
- 4) Fujinawa, Y., Matsumoto, T., and Takahashi, K. (2002a): Modeling confined pressure changes inducing anomalous electromagnetic fields related with earthquakes, *J. of Applied Geophysics*, (to be printed).
- 5) Fujinawa, Y., Takahashi, K., Matsumoto, T., Iitaka, H., Nakayama, T., Sawada, T., and Sakai, H. (2002b): Electric Field Variations Related to Seismic Swarms, *Bull. Earthquake Research Inst.* 2001, (to be printed).
- 6) 浜野洋三・行武 毅・瀬川爾郎・浅岡達史・歌田久司・中川一郎・笹井洋一 (1984): 電位差による海底観測, *CA 論文集*, 259-265.
- 7) Hickman, S., Sibson, R., and Bruhn, R. (1995): Introduction to special section: Mechanical involvement of fluids in faulting. *J. of Geophys. Res.* **100**, 12831-12840.
- 8) Mori, T. (1987): Variations in the geoelectric field with relation to crustal conditions of the earth. *Geophysical Magazine of the Japan Meteorological Agency*, **42**, 41-104.
- 9) 中塚 正・宮崎光旗・西村清和・村上 裕・小川康雄 (1999): Venus 計画における深海底地磁気電場観測システム, *CA 論文集*, 229-235.
- 10) Scholz, C.H. (1990): *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (Cambridge University Press).
- 11) 瀬川爾郎・春日 隆・行武 毅・歌田久司・浜野洋三 (1981): 海底磁力計 OBM-C & S 型 (概報), *Proceedings of the joint symposium on MAGSAT result and high-sensitive magnetometers*, 99-104.
- 12) Shimoizumi, M., Mogi, T., Nakada, M., Yukutake, T., Handa, S., Tanaka, Y., and Utada, H. (1997): Electrical conductivity anomalies beneath the western sea of Kyushu, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1551-1554.
- 13) Takahashi, H., Fujinawa, Y., Matsumoto, T., Nakayama, T., Sawada, T., Sakai, H., and Iitaka, H. (2000): Underground electric field observation at Hodaka Station (1993-1999). *Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **208**, 1-224.
- 14) Wakita, H., Sano, Y., and Mizoue, M. (1987): High ³He emanation and seismic swarms observed in a non-volcanic, forearc region. *J. Geophys. Res.*, **92**, 12539-12546.

(原稿受理: 2001 年 11 月 15 日)

要 旨

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。ここでは、2000年6～7月に三宅島で火山噴火活動に関連して観測された異常変動を中心として、観測データの解析を行った。その結果、電話回線用の海底ケーブルを用いた電界変動計測によって、地殻活動に伴う海底電界変動を検出した可能性が高いと言え、この変動は、マグマ活動に触発された地下熱水循環の激しい変動によるものと推測される。地下流体運動検出のこの方法は、海底火山、海底地震の活動のモニターに有効であることを示唆している。

キーワード：電磁場，海底，マグマ，地下水，予知