

火山噴火活動に伴う電界変動

藤縄幸雄*¹・松本拓己*²・飯高 弘*³・葛西直子*³・中野 洋*³
佐藤宗純*³・斉藤俊幸*³・土井卓也*³・高橋耕三*⁴

Electric Field Changes Associated with Volcanic Activities

Yukio FUJINAWA *¹, Takumi MATSUMOTO *², Hiroshi IITAKA *³,
Naoko KASAI *³, Hiroshi NAKANO *³, Sohjun SATO *³,
Toshiyuki SAITO *³, Takuya DOI *³, and Kozo TAKAHASHI *⁴

*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

*³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan

*⁴Communication Research Laboratory, Japan

Abstract

Volcanic eruptions are generally preceded by magma intrusion. A volcanic activity forecasting is sure to make considerable progress if we have a practical means to detect magma movements. Electric potential variations have been observed since April 1999 on Miyake Island, a volcanic island in Japan. The variations were measured by means of a special long vertical antenna and a short dipole. Some half a day before the largest eruption and then during the eruption, conspicuous electric field variations were observed on DC, ULF and ELF/VLF frequency bands. Longer signals were generally superimposed on the ULF signals, suggesting that there are strong confined water pressure fluctuations in the interaction between intruded magma and hydrothermal circulation through the electro-kinetic effect. Trend-like changes are attributed to quasi-stationary changes of hydrothermal circulation and streaming potential coefficient distribution. Subsurface transient self-potential measurement has thus proven to be an efficient method for looking into complex volcanic activity.

Key words : Volcanic eruption, Precursor, Magma, Electric field, Forecast, Ground water

1. はじめに

火山噴火では、地下深部からマグマが上昇し火山体から噴出する。噴火の前にマグマの移動を知ることが早ければ早いほど、噴火に備える時間が多くなる。従って、その方法の研究・開発は、火山噴火予知など火山防災研究の中で最も重要なものの一つと考えられる (e.g. Rymer and Williams-Jones, 2000)。噴火過程ではマグマ中の揮

発物質特に水の果たす役割が大きいと言われている。例えば、マグマと地下水との相互作用は、水蒸気爆発を引き起こすなどその関与は大きい。高温のマグマが直接観測できなくても、マグマのヴェールともいべきその周辺に形成される熱水層の観測によってマグマの動きを把握できるはずである。しかし、それを検出する実用的な計測方法がなく、噴火前駆過程としてのマグマの移動現

*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 独立行政法人 産業技術総合研究所

*⁴ (元) 通信総合研究所

象の観測研究上のあい路となっている。一方、我々グループによる 1988 年以來の地震・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地下流動が検出可能であることを示唆する多くの結果を得ている (Fujinawa *et al.*, 2000 ; Fujinawa *et al.*, 2001c, 2002). それらによると、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) でもノイズに比べて十分大きな信号として捉えられることが分かっている。ここでは、新しい計測方法による従来の地震・地殻変動計測とは独立に、マグマの移動をより早期に検出できる可能性を、2000 年 6 月に噴火した三宅島火山での観測を例にあげて示す。

2. 観測の方法

2000 年 6 月に、東京のほぼ南 170km の三宅島で火山噴火が発生した。三宅島では過去数回、20 年程度の間隔で噴火していたため、長期的にその噴火が予測され、地震、傾斜計などによる観測網が強化されていた (Ukawa *et al.*, 2000). その一環として、水平・鉛直の電場計測観測を、1999 年 4 月より行っている (図 1). この観測は、関東・東海地域におけるボアホールを使った電界変動観測 (図 1a 中の“ULEM”)の一部をなすもので、地震・傾斜などの地殻変動観測 (図 1a 中“SEIS”)を参照しながら、地殻活動をより詳細に調べる方法の探究を目的としている。なお、ULEM とは、ボアホール内のケーシングパイプなどを超長電極として用いる電位計測 (Ultra

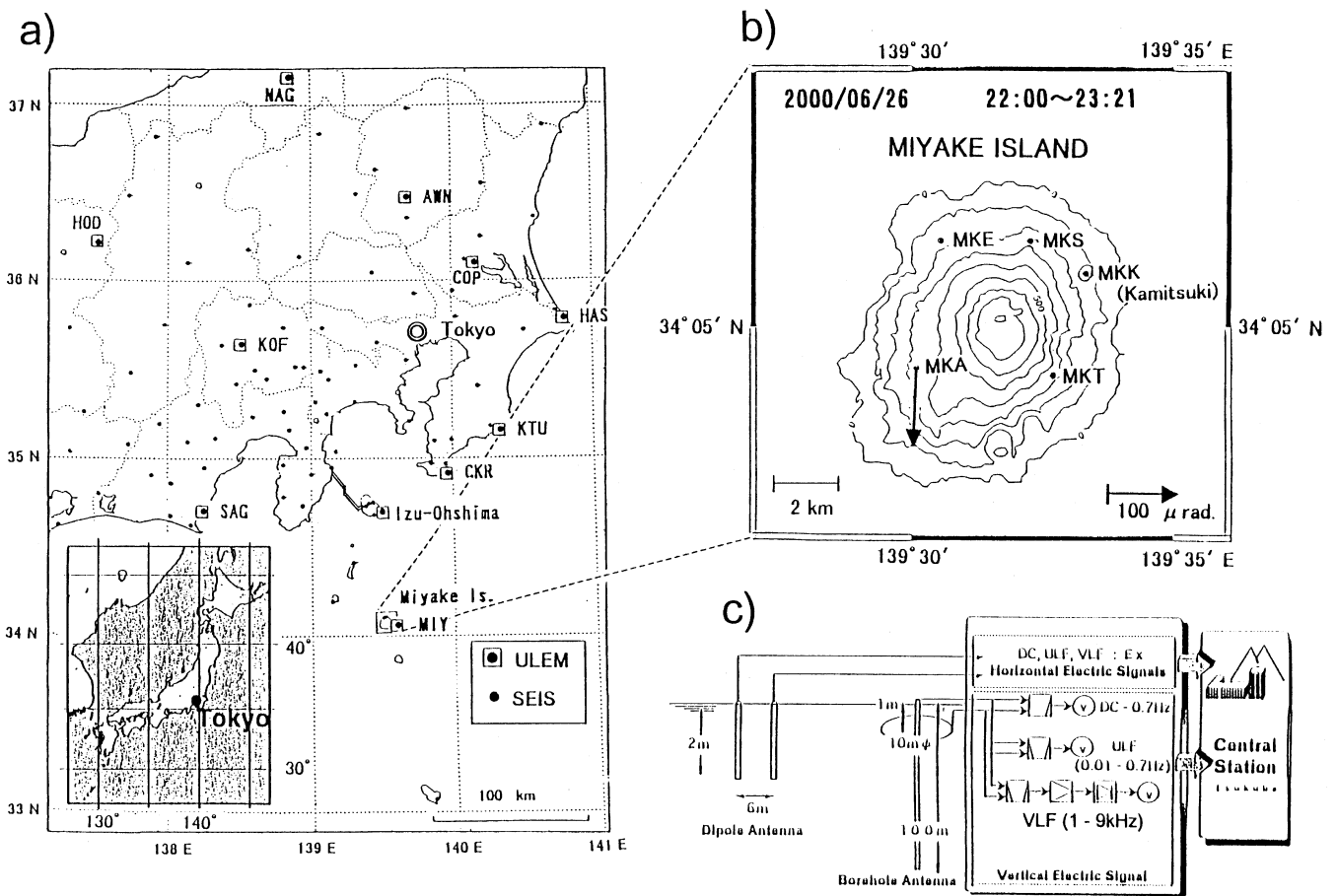


図 1 三宅島における電界変動観測の状況。a) 長いボアホールを用いた電界変動計測 (ULEM) が、関東・東海を中心として 13 か所で行われている。b) 三宅島では神着において、ULEM が行われている。c) センサーとしては、ULEM 以外に単基線 (6m) による水平 1 成分の電位の計測も併せて行っている。

Fig. 1 Location of the electric field observation site Kamitsuki (MKK), one of the stations monitoring volcanic activity on Miyake Island in central Japan. The electric field observations are conducted to supplement ordinary crustal observations, seismic observations, ground tilt, and magnetism (Ukawa *et al.*, 2000). A borehole antenna with a length of 100m is used as a main sensor for measuring the vertical component of the electric field. A short dipole with length of 6m is used to measure the horizontal electric field. Similar electric observations have been conducted in central Japan at 11 sites (Fujinawa *et al.*, 2000) including a nearby site, Izu-Oshima Island, which belongs to the same volcanic chain. A large ground tilt change of 100μ rad. was detected on the night of 26 June 2000 at one of the sites (Ukawa *et al.*, 2000).

Long Electrode Measurement) の略である。

三宅島では山頂を囲んで5点からなる地殻活動観測網が整備されているが、その東側の一点神着 (MKK) で電界変動の観測を行っている (図 1b)。その観測データは、火山活動の推移に対応した地下間隙水変動について知る手がかりとなると考えられる。

MKK における鉛直電界成分の計測には、アンテナのモノポールとして長さ 100m の傾斜・地震埋設のためのボアホール内スチール製のケーシングパイプを超長電極として使っている (Takahashi *et al.*, 2000)。この電極とケーシングパイプの周辺の地表付近に埋設したアースとの電位変動を計測する。水平電界成分は、長さ 3m のスチールパイプ2本を、距離 6m で地下に埋設して形成したダイポールで計測している (図 1c)。

信号検出回路は、これまで使用してきたボアホール式地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。計測対象周波数帯域は、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、ほぼ一か月の試験観測の後に決められた。三宅島では、伊豆大島における落雷による故障経験を生かして回路に耐電対策をとった。雄山の頂上の標高が、三原山に比べ低く、落雷の頻度が小さい等のため、かなり安定した観測を続けることが出来た。

3. 観測結果

三宅島では、2000年6月26日から、有感地震、火山性微動が多く発生し、さらに島内の傾斜計に $100\mu\text{rad}$ を越える大きな変動が現れた (Ukawa *et al.*, 2000)。加えて、国土地理院による GPS 観測によって大きな地殻変動も検出 (Kaidzu *et al.*, 2000) されたため、緊急火山情報が気象庁から発せられた。同日深夜には南西海域で海底噴火があったと推定された後、28日には GPS データなどによって地殻変動が沈静化したと判断され、事実上の「安全宣言」が出されるに至った。しかし、7月8日、14日に小噴火をした後、8月10日には噴煙の高さ約 8,000メートルの噴火が有り、続いて8月18日には、噴煙の高さ約 1万数千 m、直径 1m 程度の噴石を交えた大噴火があった。住民の不安が大きくなり、8月25日には、児童の避難が開始された。更に8月29日には、再び噴煙の高さ約 8,000m の噴火となった。改めて、火山噴火予測の難しさと、そのための開発研究における多面的推進の必要性が認識された。

3.1 噴火時および直前の電界変動

8月18日における大噴火の際の鉛直・水平成分電場観測記録を、図 2a, b に示す。噴火開始の 17時2分頃から、測定している3つの帯域 (DC, ULF 帯, VLF 帯) に、バックグラウンドレベルより遙かに大きい変動が現れ、噴火活動のあった 19時頃まで続き、噴火の終了と共に通常のレベルに戻った。水平成分 (図 2a)・鉛直成分 (図 2b) とともにほぼ同様な傾向を有する異常電位変動が現

れている。噴火開始の約1時間後に DC 帯に 100mV を越える大きな自然電位変化が現れている。長さ約 2.5km の山頂から南に延びる長基線電場記録にもほぼ同じ時刻に現れている電界変動 (笹井ほか, 2001) は、このイベントに対応していると考えられる。

この日8月18日には雷活動はなく (フランクリンジャンパン (株), 私信), 地磁気指数 K_p は小さく (柿岡地磁気観測所), 地磁気活動が静穏であったことから、これらの異常な電場変動は、人工及び自然ノイズではなく、噴火活動に関連したことは間違いない。なお、ボアホールアンテナを用いた計測では人工・環境ノイズの影響が、非常に小さいことは、既に報告されている (Takahashi *et al.*, 2000; Fujinawa *et al.*, 2000, 2001c)。

VLF 帯の大きな変動には、噴煙内に火山雷が目撃されているため、大気放電も含まれていると思われる。VLF 帯の変動はバックグラウンドレベルよりはるかに大きい。約 70km 離れた伊豆大島 (図 1) でも同様の観測を行っているが、バックグラウンドレベルを越えるような変動は見られず (図 2c), その放射強度は、落雷に比べてはるかに小さいと考えられる。唯一の例外は、18時10分頃の伊豆大島における ELF/VLF 帯の孤立パルスである。パソコン内蔵の時刻を用いているため時刻が数分違って見えるように見えるが、18時10分過ぎに現れた自然電位の大きな変動に起因するものと思われる。水平・鉛直両成分に等しく現れていること、時間的な推移が ULF 帯と似ていることから、多くの部分は大気放電というより地下起源と考えられる。三宅島における比抵抗値を $1,000\ \Omega \cdot \text{m}$ (Utada *et al.*, 1984) とすると、VLF 帯電波の浸透深度は 200m 程度となる。よって、VLF 帯の変動の波源も、ULF 帯同様に浅部地下と思われる。

8月18日17時から19時頃までの ULF 帯の変動は、鉛直成分の記録では大きく、DC 帯に高周波成分が含まれていることに対応している。一方、ULF 帯では鉛直成分が水平成分に比べて一桁程度大きいように見える。これは、しかし、水平成分における増幅器の不具合のためである。実際、水平成分の DC 帯に見える 17:50 頃の 8mV 程度の変動が、ULF 帯の記録では 1mV 以下でしかなく、又、18時10分頃の最大の変動も現れていない。ただし DC 帯の記録から水平成分にも ULF 帯の変動があったことが推測される。ULF 帯の変動は、今回の噴火が水蒸気爆発であった (Miyagi *et al.*, 2000) ことから、マグマと地下水との相互作用の結果生じたものと考えられる。その理由は以下の通りである。

火山諸現象には地下水が関与しており、水蒸気爆発のみでなく、火山性微動や重力の変化も地下水が必要な役割を果たしている (Sigurdsson and Sparks, 1978)。又、火山体の浅部には帯水層が存在することが多い (Utada *et al.*, 1984)。三宅島でも 18日の噴火の後、火口底に地下水が貯まっていることが確認されている (Nakada *et al.*, 2000)。マグマがマグマだまりから上昇して帯水層に接近すると、地下水系の物理的・化学的状態の変化が生じる (Gaeta *et al.*, 1998)。その変化の一つに比抵抗の変

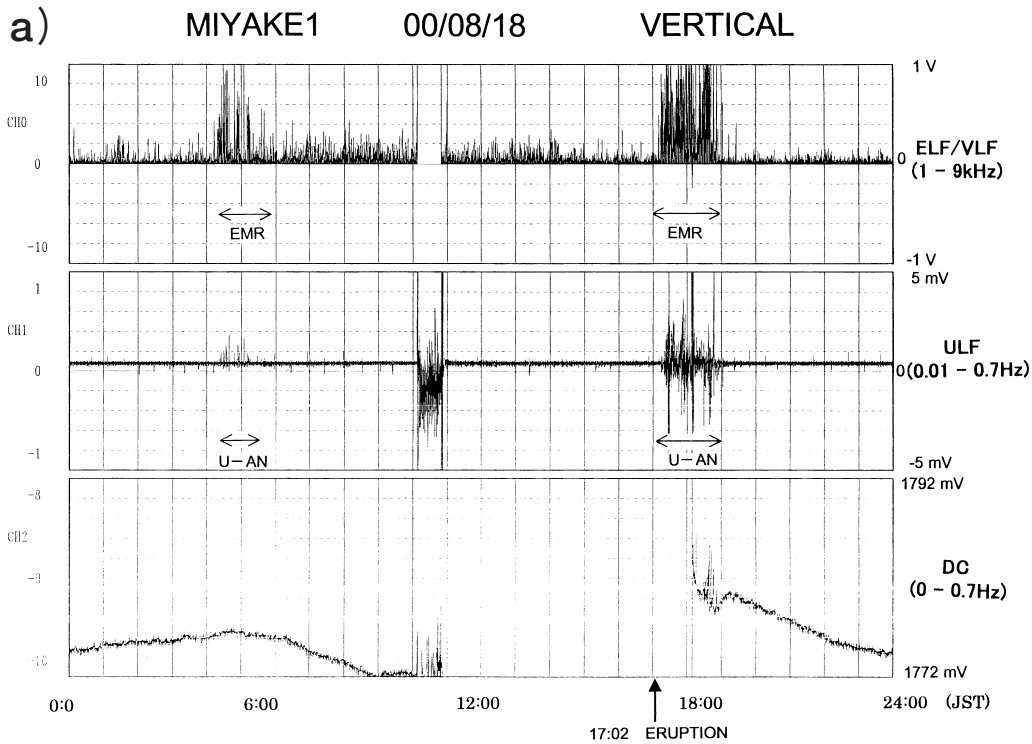


図 2 最大の噴火活動のあった 2000 年 8 月 18 日の三宅島における電界変動記録。a) 鉛直成分の 3 つの周波数帯, b) 水平成分の 3 つの周波数帯。17:02 分から始まった噴火時と共に、その半日前に VLF 帯, ULF 帯の異常電界変動現象が発生した。c) 図 2 と同じ日の伊豆大島における電界変動鉛直成分の記録。三宅島において見られる ELF/VLF 帯の噴火時、噴火前の放射は、バックグラウンドより大きく検出されるレベルではない。DC, ULF 帯に見られる変動は、大局的には三宅島における 2000 年 6 月から始まった火山噴火活動に同期している(藤縄ほか, 2001a)。しかし、個々の変動が同期しているわけではない。

Fig. 2 Monitoring records of the vertical electric field observed on 18 August 2000 when the largest eruption occurred on Miyake Island. **Figure 2a** is the vertical component, and **Fig. 2b**, the horizontal dipole. The roughly constant signals at 1/10 full display in the ELF/VLF channel (**Fig. 2a** (1) and **Fig. 2b**(1)) and in the ULF channel (**Fig. 2a** (2)) represent natural background noises. Anomalous transient electric field changes were recorded in all three frequency bands: in the ELF/VLF band (“EMR” in **Fig. 2a**(1) and **Fig. 2b**(1)), the ULF band (“U-AN” in **Fig. 2a**(2) and **Fig. 2b**(2)), and the DC band (“D- AN” in **Fig. 2a** (3) and **Fig. 2b**(3)). The magnitudes of signals are well above the background noise level in both cases (S/N of ULF exceeds 50), and almost all signals returned to the original level in all bands except for the DC band, which indicated an offset in case of the eruption. The ULF band horizontal component (**Fig. 2b** (s)) is abnormal, but we suspect there are also large anomalies in this band from the DC channel record. Similar conspicuous electric field changes are seen about 13 hours before the eruption in the ELF/VLF band (“EMR” around 04:00 in **Fig. 2a**(1) and **Fig. 2b**(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. 2b**(3)). Deformed data during an hour starting at 10:00 (JST) are probably due to the non-linear response of electric circuit induced by extremely large signals occurring in this time interval. c) Monitoring records of vertical electric field change at Izu-Oshima Island on the same day as in **Figs. 2a** and **2b**. There is no anomalous ELF/VLF radiation during and preceding the huge eruption at Miyake-Jima on 18 August 2000. The radiated signals were several orders of magnitude smaller than those induced by lightning discharge. Uncorrelated variations appearing in this record are suggested to be induced by a regional magma activities around Miyake-Jima (Fujinawa *et al.*, 2001a).

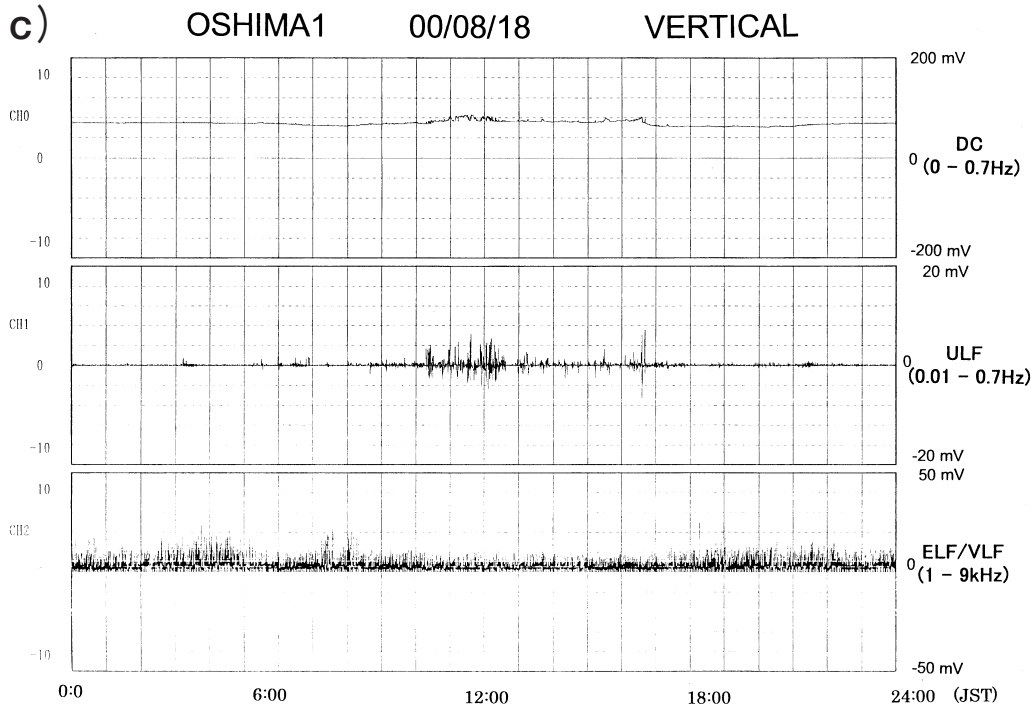
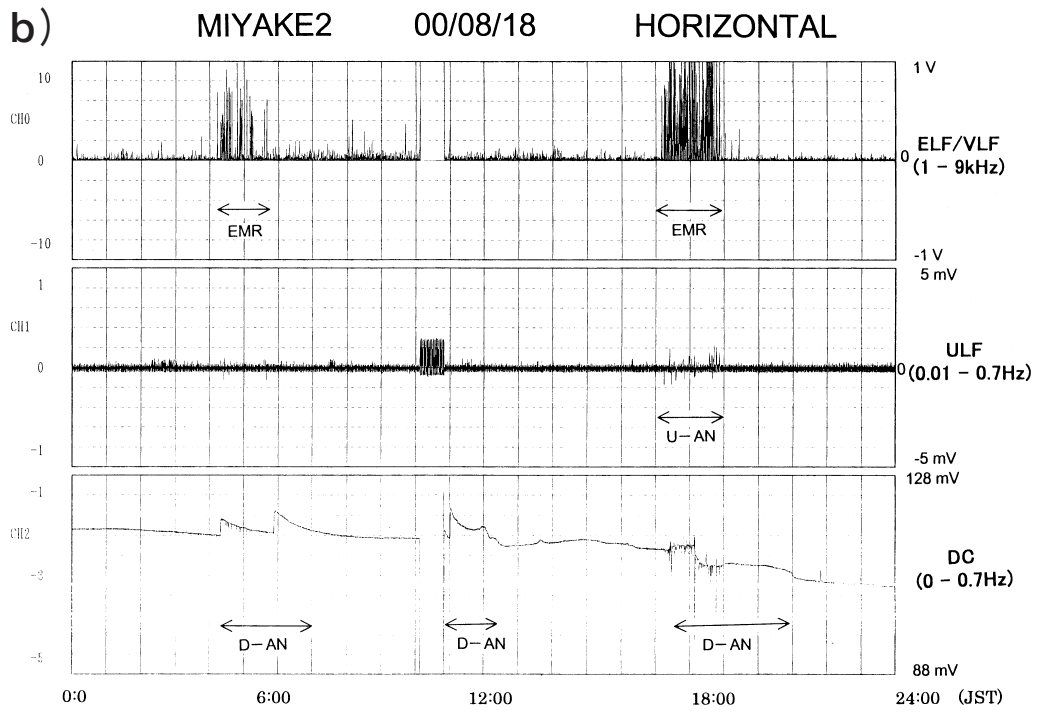


図 2 (つづき)

Fig. 2 (continued)

化があり、電磁探査によって検出された例もある (Yukutake *et al.*, 1990). マグマと地下水の接触領域 (相互作用域) では、マグマ活動によって地下水の温度の上昇、流動の発生などの流体熱力学的な現象が誘起される筈である。又、地殻内の間隙水には、通常各種のイオンが含まれているため、地下水が多孔質岩石中を流れるとき、水圧の変動があれば、流動電位によって電磁場が生成される (Nourbehecht, 1963; Mizutani *et al.*, 1976; Corwin and Hoover, 1979; Ishido and Mizutani, 1981; Dobrovolsky *et al.*, 1989; Fenoglio *et al.*, 1995). これとは別に温度上昇に伴う熱効果によっても電磁場が形成される (Nourbehecht, 1963). 但し、場に関係するパラメータの大きさを使った比較によると、熱効果は、流動電位効果に比べ 1 桁以上小さいと考えられる。

火山活動や地震発生に関連しての電界変動については、幾つかの報告がある (Fenoglio *et al.*, 1995; Zlotnicki and Mouel, 1990; Fujinawa *et al.*, 2000, 2001c; Perier *et al.*, 1998; Jouniaux and Pozzi, 1995). これ等の変動の多くは、今回検出したのと同様のものと考えている。

鉛直成分の DC 帯は、8 月 14 日にマイナス側にほとんど飽和したために、噴火の初期にいかなる変化をしたか不明である。噴火の半ばの 18 時 (JST) 頃にステップ状の変動の後増加している。この噴火時のステップ状変動は、水平成分には大きく現れず、噴火に伴う鉛直方向の山体の陥没などに対応しているのかもしれない。

3.2 噴火直前の電界変動

8 月 18 日

噴火の予測という観点から興味深いのは、噴火の約半日前の 2000 年 8 月 8 日午前 4 時頃から約一時間にわたって顕著な前兆的な変動が発生していることである (図 2)。鉛直成分の ULF 帯、VLF 帯で顕著である (図 2a)。DC 帯では、ほとんど見えない。又、水平成分の VLF 帯でも、明白である (図 2b)。なお、傾斜計などの地殻変動記録には、この時間帯では、検出範囲では明白な変動は現れていない。8 月 18 日 5 時 45 分過ぎから数 μrad という地球潮汐による変動の数倍という小さな変動が見られたのみである。噴火の半日前のこの異常電界変動は、噴火の前駆としてのマグマの上昇によって帯水層内の水圧変動によってもたらされたものと推測される。

また、10 時 5 分頃から 50 分頃まで、ELF/VLF 帯では非常に強い放射があったことがうかがわれる。DC 成分にも高周波数成分 (ULF 帯成分) が見える。ただし、ULF 帯に見えるオフセットを有する変動は、入力信号が大きすぎたため、プリアンプの非線形効果の影響を受けていると考えられる。いずれにしてもこの時間帯に非常に大きな電界変動が発生し、検出器に何らかの異常をもたらされたのであろう。10 時 50 分過ぎには、記録は平常に戻っていること、水平成分の記録も同時に類似の記録になっていることなどから、検出器そのものの不具合のためであったことは考えられない。更に、MKK における傾斜計の記録からは電源異常などの観測環境の異変をうかがわせるものがないことも、このような推定を支

持する根拠となる。

ULF 帯、VLF 帯における異常変動の同時発現は、群発地震が活発な期間に観測されており (Fujinawa *et al.*, 2000, 2001c), 地下間隙水の大きな水圧変化を伴う流動のためと推測している。ただ、これまでの経験では、ULF 帯の電位変動は数 100mV にも達し、通常の記録レンジでは、スケールオーバーするほどであった (Fujinawa *et al.*, 2002) のに対して、今回の変動の強度は小さく、バックグラウンドレベルの数倍にすぎない。そのような先入観のため、この異変が火山噴火に関係するとは考えず、事前に周囲に注意を喚起することはなかった。三宅島での電位信号が他の場合に比べ小さい原因としては、三宅島神着におけるケーシングパイプが、地殻活動計測用であり、敏感な反応を示した他の側点でのように、地下水脈に当たっていないためと考えている。このような場合には、流動電位を誘起する間隙水の圧力変動源と超長電極ともいべき導電性パイプとの距離が大きく、発生源からの信号が大きく減衰したためと思われる。

水平電界成分には、噴火の 3 日前からステップ状の変動が数時間ごとに現れることが続き (図 2b), その後 18 日の大噴火となった。この段階状の変動は、8 月 18 日の大噴火直前になって初めて現出したもので、以前の小規模の噴火や、その前の前兆的な変動の発生時には、現れていない。又、鉛直成分の記録には現れないこのステップ状変動については別項で詳述する。

8 月 29 日

8 月 18 日の次の大きな噴火は、8 月 29 日 04:35 (JST) であった (気象庁)。当日と前日の電界変動の記録を図 3 に示す、(a) が鉛直成分で、(b) が水平成分である。噴火開始とほぼ同時に VLF 帯の大きな変動が出始め、又、ULF 帯でも有意な変動が見られる。8 月 28 日 6 時 10 分頃にはオーバースケールしてしまう位の強いものであった。このようなオーバースケールは、8 月 18 日の 10 時にあった。しかし、それでも最も近くの伊豆大島では、バックグラウンドノイズレベルに隠れる程度であり、落雷に比べると 10^3 程度小さい強度であったと推定される。ULF 帯もこの時から非常に大きくバイアスがかかった状態として記録され、8 月 18 日の場合と同様、入力が増幅器の非線形領域に入ったものと考えられる。8 月 28 日、29 日の水平成分 (図 3b) では、VLF 帯がオーバースケールした 6 時 10 分頃の DC 帯ではレベルが急速に下っており、大規模な陥没などが起きて、周囲の電場が大きな構造的変化を受けたことが推定される。これ等の観測結果は、電場計測によって、測定点から一定の距離離れた場所で噴火活動のプロセスを把握できることを示唆するものである。

噴火の約 14 時間前の 8 月 28 日 14 時頃から数時間 VLF 帯の放射強度が両成分で増大し、噴火の数時間前に一端平常レベルに戻っている。又、鉛直成分と水平成分の強度の比は、8 月 18 日と同様に、噴火時にはほぼ 1 であるのに、噴火前には、その比は 0.5 と約 2 倍の違いがある。噴火前の発生源深度は、比抵抗値を $1,000 \Omega \cdot \text{m}$ として、

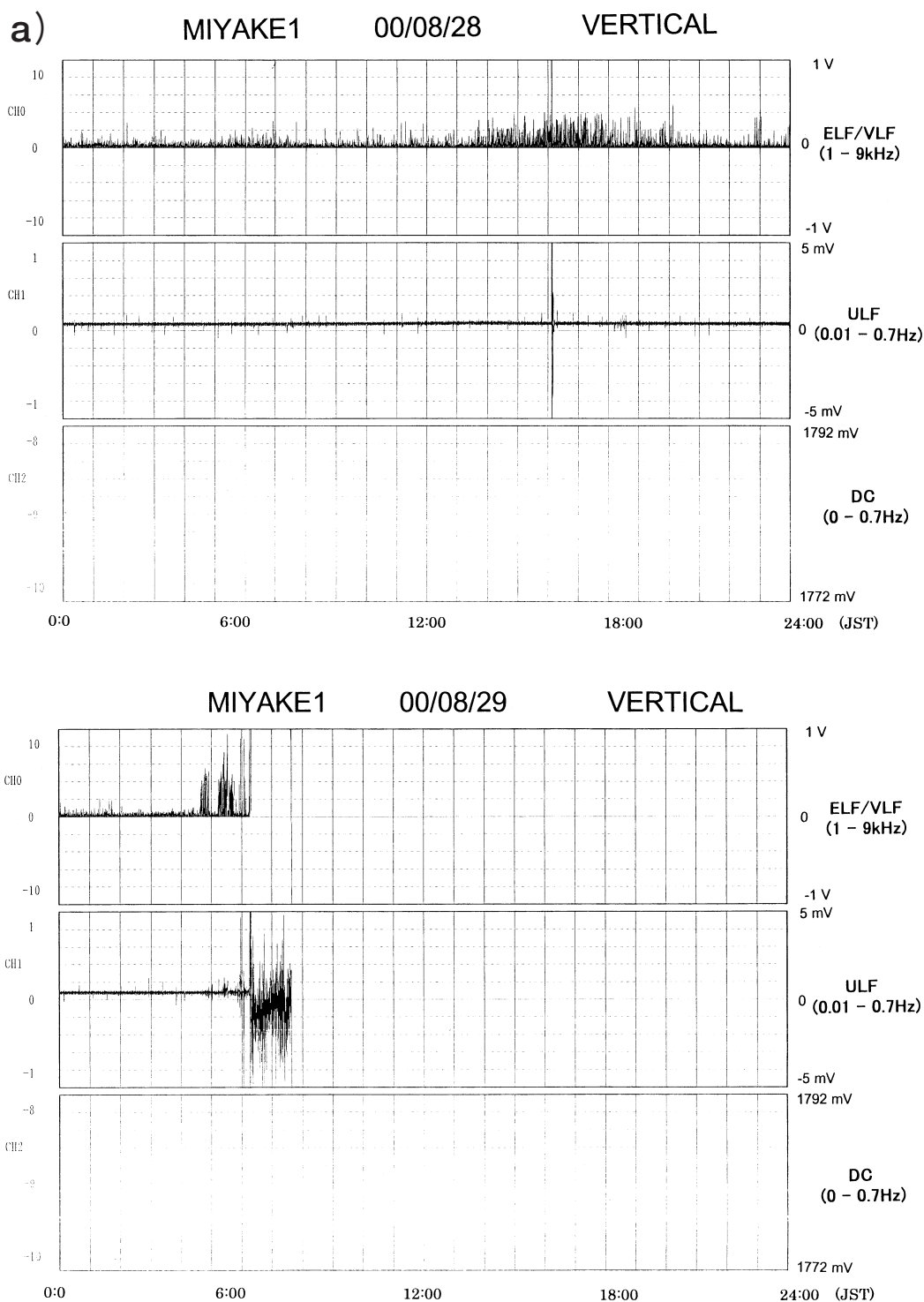


図3 三宅島における8月29日の大規模な噴火(04:35より開始, 気象庁)のあった日とその前日の鉛直成分(a)と水平成分・電界変動記録噴火の開始から1時間半くらい後の6時15分頃から非常に大きい変動が発生し, 激しい水蒸気爆発のあったことが推測される。

Fig. 3 Monitoring records of vertical (a) and horizontal electric field components during another major volcanic eruption in Miyake-Jima on 29 August 2000. Conspicuous ELF/VLF band radiations were recorded from the start of the eruption, and there was much larger radiation starting at about 07:10, 29 August 2000 causing the demeter to go off scale. Variations were seen also in ULF band (b). About 16 hours before the eruption there were anomalous variation in the ELF/VLF bands and in the ULF band. We suggest that those electric field variations were induced by a perturbation of the hydrothermal circulation in association with the magma approach. Comparison of the ELF/VLF radiation signal strengths of vertical and horizontal components indicate that the source depth of the earlier radiation is about 140m deeper than that of later radiation.

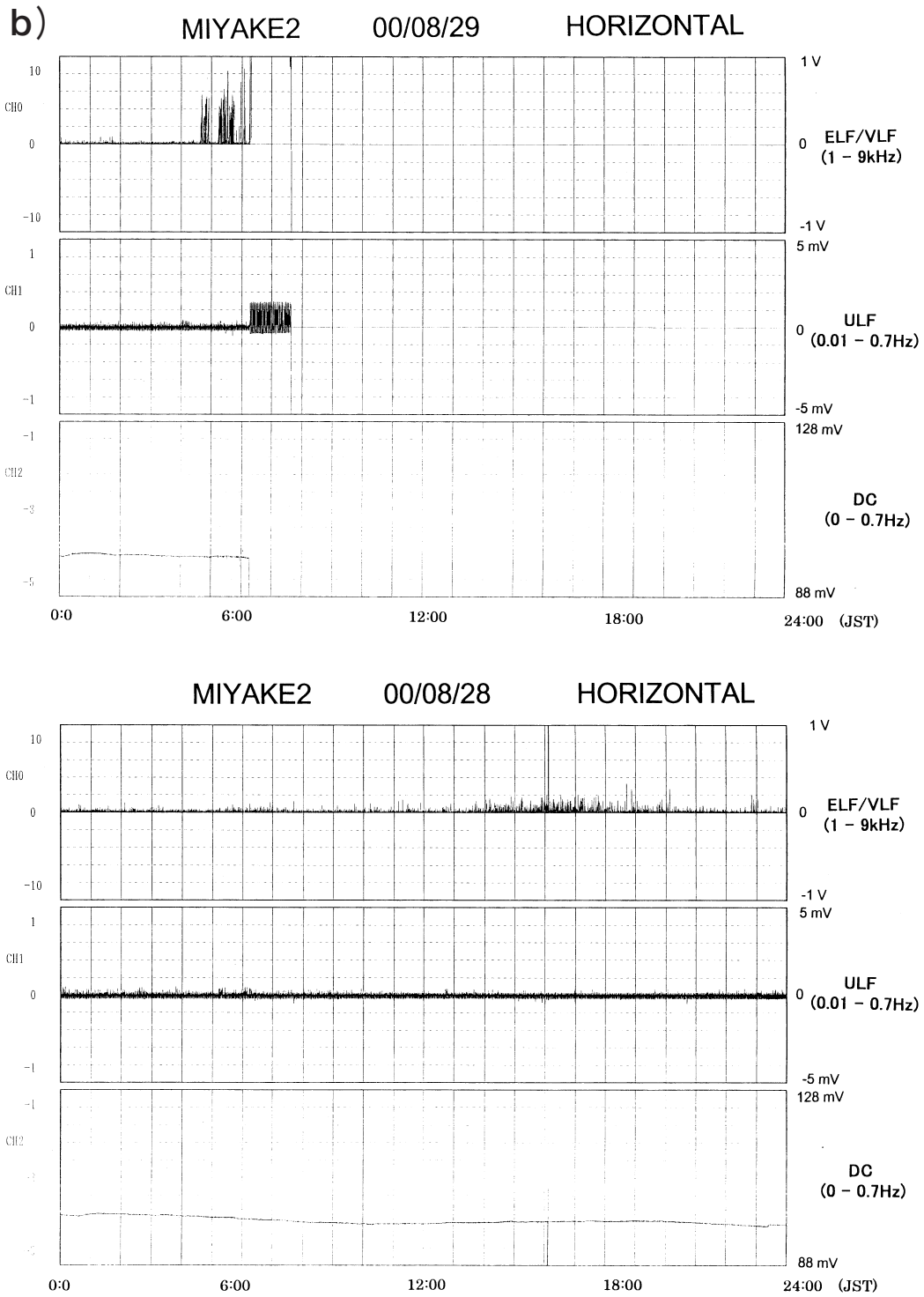


図 3 (つづき)
Fig. 3 (continued)

周波数を 5kHz と仮定し、深度／減衰の関係から噴火時の電位変動の発生源の深さより、約 140m 深いところにあったことになる。マグマが直線的に鉛直方向に上昇したとすると、その移動速度は、10m/時ということになる。噴火直前の火山マグマの位置を決めることが、ELF/VLF 帯変動測定により可能であることが示唆され、噴火の時期の直前の予測に使える可能性がある。

ULF 帯では 8 月 28 日 18 時頃に短時間大きな変動があった。丁度この時には、VLF 帯でも顕著な変動がある。噴火の前にマグマを上部から覆う地殻の破壊、それに伴うより激しい流動体の移動があったことが示唆される。

3.3 噴火に伴う様々な電界変動

この大噴火の際以外にも、小規模な噴火活動の前などに、日周変動より短周期な容易に識別できる変動が現れた(図 4)。この図では鉛直成分(赤; V)と水平成分(黒; H)の DC 帯の変動を、2000 年 3 月から 8 月まで示している。両成分とも 3 月以降時間と共に顕著な変動が現れ、噴火活動(図中“E”)の前後では、幾つかのタイプの顕著な変動が見られる。

最もはっきりした変化を示しているのは、ドリフト成分である。鉛直成分で見ると、4 月頃から減少傾向となり、6 月頃には、その勢いが鈍ったものの、単調減少傾向が続いた。7 月 14 日の噴火の後、急速に増大し、殆ど 3 月の平常レベルを回復した。これは、マグマが三宅島から離れたことを示唆し、三宅島付近の地震活動の低下、M6 クラスの地震を含む地震活動が三宅島西北約 30km の神津島付近で起きたことに符合する。その後数日して 7 月 14 日の噴火前のレベルに再び減少し、7 月 26 日から 28 日にかけては、短周期の変動を伴いながら減少し、8 月 12 日から 14 日にかけて、ついに、マイナス側にオーバースケール(図中“SAT”)してしまった。

このドリフト成分の長期的な推移の傾向は、かなりの相違を含みつつ、鉛直・水平両成分に現れており、電極の不安定とは思われない。このような長期変動は、マグマのゆっくりとした接近による地下水系の分布の変化による準定常的なもので、雲仙普賢岳の溶岩ドームの出現の際に見られた自然電位異常(Hashimoto and Tanaka, 1995)、La Fournaise 火山の活動に連動して検出されたもの(Michel and Zlotnicki, 1998)、貯水湖の推移変動と共に変化する電場変動(Trique *et al.*, 1999)などと同一の起源を有するものと考えられる。比抵抗探査(Utada *et al.*, 1984; Yukitake *et al.*, 1990)で求められた噴火前の比抵抗値の異常と同様な原因によるものであろう。火山体などでは自然電位が数 V 程度に達することがあるが、それは火山体の熱水循環に伴う流動電位効果、流動電位計数の空間分布によって説明されている(Ishido and Mizutani, 1981; Fitterman 1982; Zlotnicki and Mouel, 1990; Bernard, 1992)。

日周変化

噴火活動の観点から平穏時に対応すると思われる 2000 年 3 月には、鉛直成分に日周変動が見られる。この

日周成分は、火山体の地下水の地球潮汐運動による間隙率の変化に起因するものと推定される。一方、水平成分には、日周成分はそれ程顕著でなく、鉛直成分で日周よりやや長い周期の成分が現れるときにのみ変動が現れる。

4 月には、鉛直成分で日周成分があまり目立たない。これは、日周成分を打ち消す方向の位相を有する変動が発生し始めたためと考えられ、この頃から火山活動の前触れとしてのマグマの移動があったことが推測される。4 月 16 日頃からは、水平成分に日中に最大となる継続時間数時間の幅広いパルス状変動が現れ、5 月初旬に最も顕著になった。興味深いのは、この変動が鉛直成分に殆ど現れないことである。水平方向の電位勾配が卓越しているため、その発生源の位置は、直近の地下というより、遠方の浅部ということが考えられる。一点の測定からでは詳細は不明であるが、マグマの進入によって形成された空隙へ火山体内の地下間隙水が地球潮汐によって出入しているのではないであろうか。

日周変動としては、水平成分にのみ現れる型のものもある。その最も顕著なものは、4 月中旬から現れたもので、当初は、何らかの人工的なノイズと考えられていたものであるが、噴火活動・電界変動の発生の推移からすると、地下水の変動によるものである可能性が大きい。この種の変動は日中に大きい日周変化をしているが、その特徴は、伊豆大島における陸上・海底での電位変動(藤縄ほか, 2001a)の場合と同じである。更に最近の台湾における集々地震の際には、断層近くの全磁力計測データに数 100nT という殆ど信じられない位の大きな異常磁気変動が記録されている(Liu *et al.*, 2000)が、その変動も日中に最大となる日周変動が主要なものとなっている。

地球潮汐による地殻の微小変動によって、地下水の変動があることによるものと考えられるが、平常時と異なっているのは、マグマの進入による空隙率の変化と、それに伴う地下水流動の変動を原因とするところであろう。群発地震に伴う地下水位の変化と地殻変動との関係を調べた研究(Koizumi *et al.*, 1999)によると、水位変化と GPS による全体積量変化は線型関係で結ばれており、しかもその係数は、0.15cm/10-8strain で、平常時の地球潮汐による応答とほぼ同じである。これらのことから類推すると、ある点における電位異常は、発生源での電流ダイポールとグリーン関数の積の空間積分になっているので、強度の増大は、電流ダイポールの強さの増大と発生領域の拡がりの両方に帰することができる。多点計測を行えば、火山噴火の前の地殻空隙およびその現象が発生している拡がりの増大が推測されるのである。

短周期変化

日周変動より短周期な変動のうち顕著なものの発生の最初は、3 月 24 日である。以後 3 月 29 日、4 月 20 日、5 月 20、28 日、6 月 10 日、11 日、13 日、14 日、7 月 7 日に発生した幾つかの場合では、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 4 の“U”)。

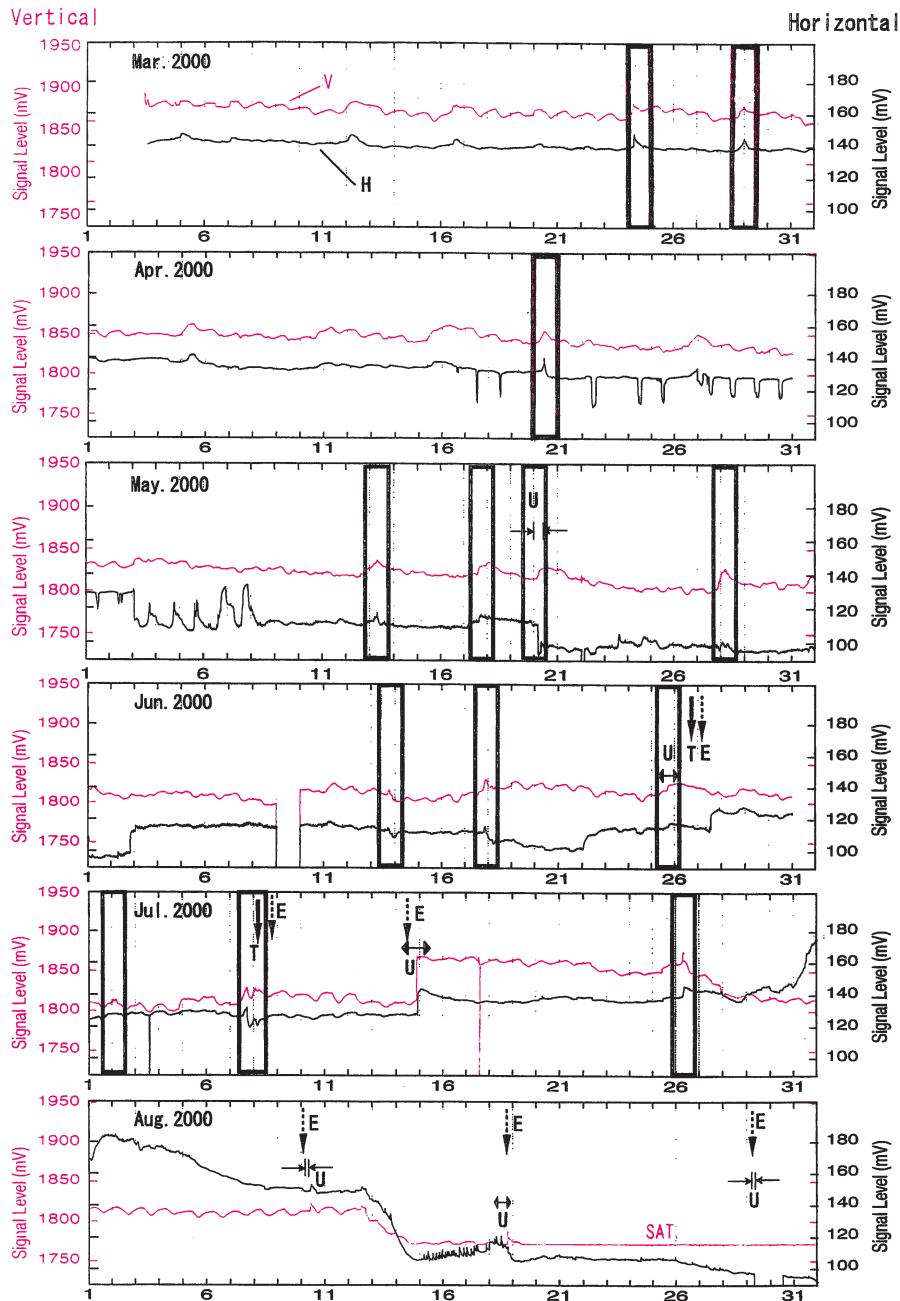


図 4 三宅島における鉛直・水平成分電界変動記録（2000 年 3 月～8 月）. 大噴火の際以外にも、小規模な噴火活動の前に、日周変動により短周期な容易に識別できる変動が現れる．その最初は、4 月 20 日であり、その後 5 月 20 日、28 日、6 月 10 日、11 日、13 日、14 日、7 月 7 日に発生し、幾つかのケースは 8 月 18 日の時と同様、ULF 帯の変動を伴っているものもある（図中の“U”）．顕著な“短周期”変動のある時期を枠で囲んである．これらは、例外なく火山の活動の半日、あるいは一日前に発生し、マグマの移動に伴う強い地下間隙水の変動の存在を示唆している．8 月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

Fig. 4 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. The observation started from April 1999, but there were interruptions of some months until March 2000 due to repairs necessitated by a counter-surge. Data on June 9 were not recovered due to a problem in data transmission. “Higher” frequency fluctuations with a period much shorter than the dominante diurnal variations in the vertical component appeared more frequently as the volcanic activity approached (“E” in Fig. 4) such as fluctuations as on 20 May ; 13, 17, 25 June ; and 2, 5, 7 July (parts enclosed by “□”). They were sometimes superimposed on the ULF band fluctuations (“U” in Fig. 4) that appeared when the largest eruption was seen in Fig. 2. 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, as supported by the appearance of large variations in the horizontal component. The trend-like changes are generally similar in the both components before strong volcanic events, though there are time periods when there are large differences suggesting that the source depth is different. Clear intermittent variations appeared only in the horizontal components before the largest eruption on 18 August.

これらは、5月20日の場合を除いて火山の活動の半日、あるいは一日前に発生している。前述したように、マグマの移動に伴う地下間隙水の変動の存在を示唆している。

5月20日の変動は、格別大きい(図5)。DC帯では、日周変動に比べ遙かに周期の短い(約4時間)大きな変動が現れている(図5の“D-AN”)。又、3月以来この日に初めて、バックグランドレベル以上のULF帯の変動も現れた(図5の“U-AN”)。さらにこのULF帯変動の強度は、8月18日の大噴火の時よりも大きい。比抵抗値 $1,000 \Omega \cdot \text{m}$ の様構造を仮定すると、このような“高周波”変動の発生源の位置は、数km以内のところにある(Fujinawa *et al.*, 2002)と推定される。すなわちマグマはともかく、少なくともマグマ活動に伴う地下間隙水変動が観測点から数km以内の近傍にあったことが推測される。この日、三宅島に展開されている防災科学技術研究所の地震観測網では、地震の発生は見られず、分解能 $1 \mu\text{rad}$ の高感度傾斜計にも地殻変動の変化はなかった。マグマが火口の近くまで火道を上昇した際に、有効に働く傾斜計などには、現れなかったであろう。例外は、三宅島周辺で5月10、11日に発生した群発地震(Fujita and Ukawa, 2000)である。この活動は、これまでの議論の枠内では、マグマ活動に関連したものであると、解釈される。検出された電場の変動は、地下深部でのマグマ・熱水相互作用の影響によるものと推測される。火山体浅部におけるマグマの移動のモニターは、火山噴火予測において重要であり(Klein, 1984; Rymer and Williams-Jones, 2000; Kamo and Ishihara, 1988)、電場変動計測の有用性を示唆するものとして意味が大きいと考える。

さらに、この日にはVLF帯の変動もあった、しかも、8月18日の大噴火の際と似た強度である。この際も、伊豆大島の記録にはバックグランドレベル以上には測定されず、落雷などの自然ノイズでない強度の小さい放射であったと推定される。1998年の岐阜県・長野県境における群発地震の際にも、地震活動が強い場合に限って、この周波数帯の変動が現れたこと(Takahashi *et al.*, 2000)から類推すると、マグマの接近に伴って地下間隙水に顕著な流動変動をもたらす相互作用が有り、しかもそれが、センサーから比較的近い場所(数km以内)であったと推定される。この日以後、周期数時間の短周期変動を含む異常変動は、時間と共に高頻度に発生するようになった(図4)。いずれにしても、この日を境に、マグマの活動は第2期を迎えたものと思われ、三宅島の防災という観点からは、注目すべきであったろう。6月26日夜半には第一回の噴火があったが、その前の25日にも、顕著な地下流動の変動が発生している(図3)。

第1回噴火活動前

2000年6月25日、26日両日の鉛直成分の記録を図6に示す。大きな傾斜変動があった6月26日の18:30頃(図6bの“T”)のほぼ1日半前から、DC成分の大きな変動が現れ、ほぼ時を同じくしてULF帯の変動(図6の“U-

AN”)も現れて、26日9時頃に収束し、その約9時間後に顕著な地殻傾斜の変動の発現となった(Ukawa *et al.*, 2000)。VLF帯の振幅の推移もほぼ似た経過を辿っている。一般にVLF帯変動は、雷放電によることが圧倒的で(Fujinawa *et al.*, 2000)あるが、この両日には落雷はなかった(フランクリンジャパン、私信)。

ELF/VLF帯の強度もULF、DC帯の変動が現れた頃、目立って大きく見える。そのことを詳しく調べるために6月1ヶ月のELF/VLF帯の信号強度(Matsumoto *et al.*, 1996)を求め、それを図7に示す。三宅島におけるボアホールによる計測の結果をa)に、伊豆大島における同じくボアホールによる計測の結果を、b)に示す。三宅島における6月25、26日の強度の大きさは、6月中旬の平穏時に比べ、最大で10倍に達しており、6月26日の噴火活動の前に明らかに放射が強まったことがわかる。この周波数帯は、雷活動の起源のものが圧倒的(Enomoto *et al.*, 1998; Fujinawa *et al.*, 2001b)である。実際、三宅島や伊豆大島に近接雷があった場合には、両島をはじめ、全ての観測点で殆ど同じように検知される。図7に示した期間では顕著な落雷が6月28日6時からほぼ2時間続いたが、それは強度のピークとして両者に見える(図7a, b)の“L”。このような比較によって、ELF/VLFの異常が大気活動によるものか否かが判定できる。より詳細には、更には個々の落雷の位置などの落雷情報を使うこともできる。伊豆大島におけるELF/VLFの強度に日周変化が見える(図7b)。これは地下水のかなり激しい変動があったことが示唆される(Fujinawa *et al.*, 2000, 2002a)。

さて、6月26夕方の噴火(図7の“E”)の前に伊豆大島でも明らかにELF/VLF帯強度が増大した。ただその強度の増大は、三宅島での場合の半分程度である。このことは、噴火の約1日半前の6月25日午前からELF/VLF帯の放射がULF、DC帯の異常と連動して起こっていたことを示す。この場合は、約70km離れた伊豆大島においても検知できる程度の強さであったが、先の噴火時には、これ程の強度ではなかった。火山活動起源といっても放射強度が一定でないことがわかる。

ステップ状変動

先に8月18日の大噴火の前に水平成分の電位変動にステップ状の変動があることを述べた。その存在は、時間軸を圧縮した形で図4からも見て取ることができる(最も顕著な時期:8月15-18日)。水平成分のステップ状変動の発生の状況の例を図8に示す。2000年8月12日頃から現れはじめ、8月15日にイベントの数は最も多く、8月18日の大噴火の後数日は、発生していない。そして9月1日頃から同様な変動が再び見られるようになり、9月3日頃まで続いたので、以前のステップ状イベントの発生と火山噴火発生との時間関係を基に、9月6日頃に大規模な噴火が起こると予測した。実際には、9月6日の16:43分に噴火はあった(気象庁)が、前回の8月18日のような大きなものではなかった。このことと関係すると思われるのは、そのステップ状の変動が、9

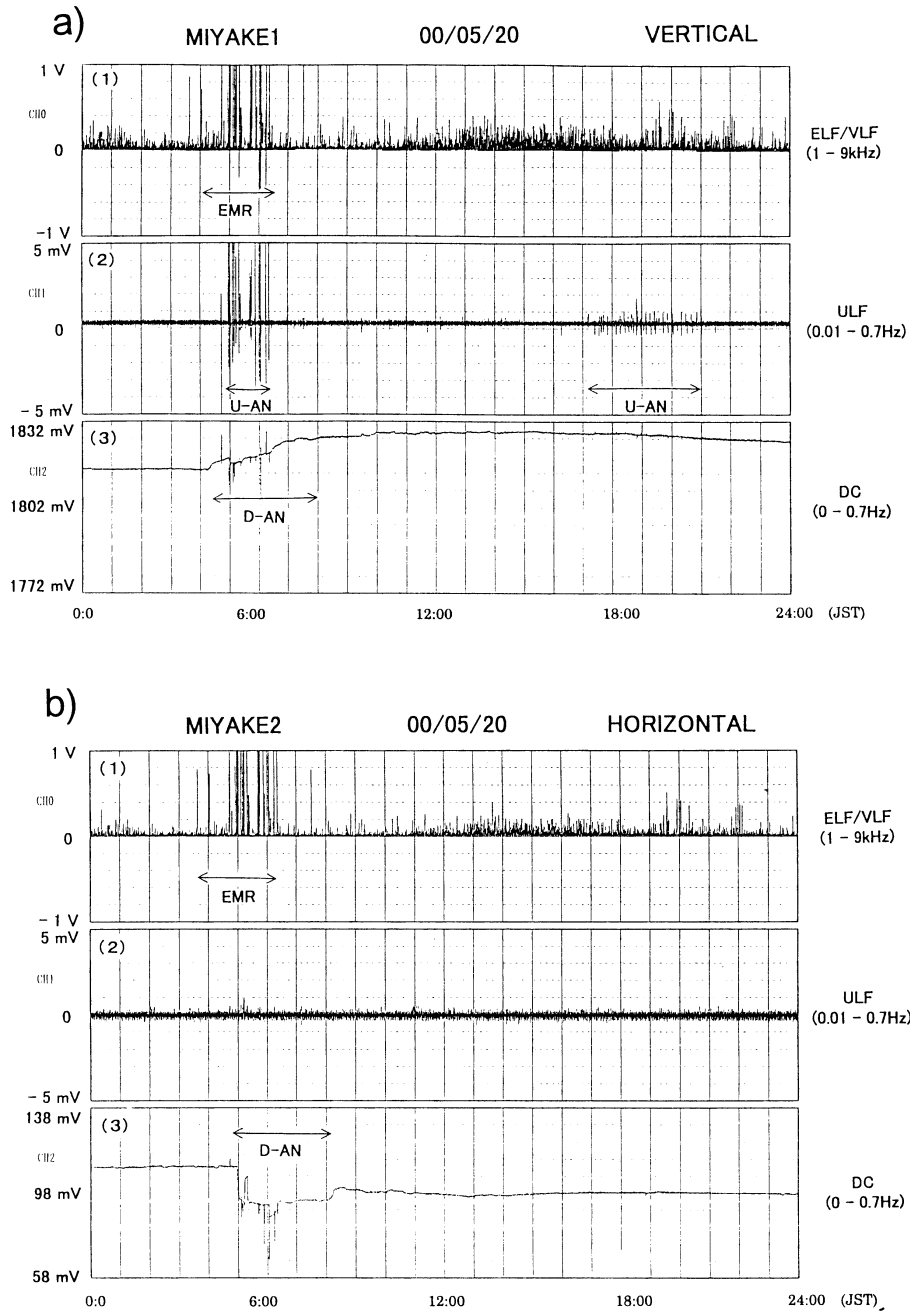


図 5 噴火活動の約一か月前に現れた電界変動の鉛直・水平成分の大きな異常変動（図中の“EMR”，“U-AN”，“D-AN”）。

Fig. 5 Transient self-potential monitoring records of the vertical (Fig. 5a), and the horizontal (Fig. 5b) components on 20 May 2000 when large variations appeared. A rapid trend-like change in the vertical component (“D-AN” in Fig. 5a(3)) and bay-like changes in the horizontal component (“D-AN” in Fig. 5b(3)) with a time constant of some three hours are superimposed with pulse-like fluctuations (“U-AN” in Fig. 5a(2)) from 04:00 to 07:00 in the morning). There is no indication that the anomalies are extra noises, 1) The geomagnetic disturbance is small (K_p index is less than 1 on that day) on the basis of the Geomagnetic Activity Chart (Hiraiso Solar Terrestrial Research Center, <http://hirweb.crl.go.jp/index.html>). 2) The atmospheric condition is found normal because there is no particular level increase on the ELF/VLF records in other sites of the electric network and no extensive atmospheric discharges (Franklin Japan, Co., Ltd.). 3) The anomalies are quite large compared with the background noise level. The pattern of the DC trend in the vertical measurement was generally similar to that of the horizontal dipole but there were some differences. Those variations are not due to the problems of instruments, such as the instability of electrodes based on our experiences acquired through long observations (Fujinawa *et al.*, 2000).

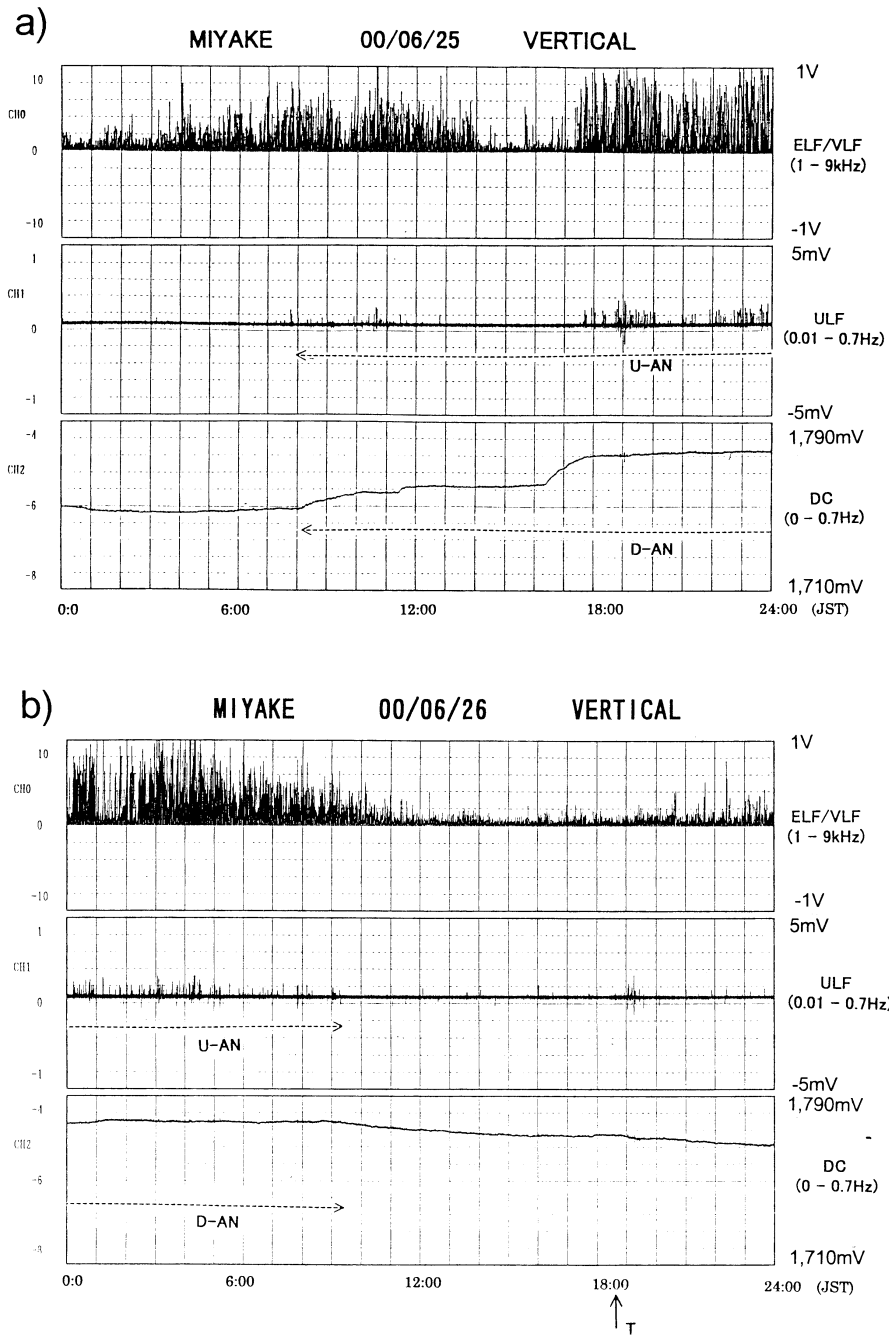


図6 三宅島で初めて異常傾斜が検出された6月26日18時半(図5bの“T”)の1日半前から普段と異なる電界変動が発生した。それは、ULF帯(U-AN)、DC帯(D-AN)に現れたばかりでなく、VLF帯にも現れた。

Fig. 6 Conspicuous electric field variations appeared some one-and-a-half days before the first large crustal tilt changes starting on 26 June 2000 at 18:30 (JST). Variations exceeding the background noise level occurred in frequency bands DC, ULF, and ELF/VLF. We suspect from previous finding (Fuginawa *et al.*, 2000, 2002) that simultaneous appearance of the pulse-like changes of ULF, and ELF/VLF bands mean that there were severe confined water changes induced by the magma intrusion.

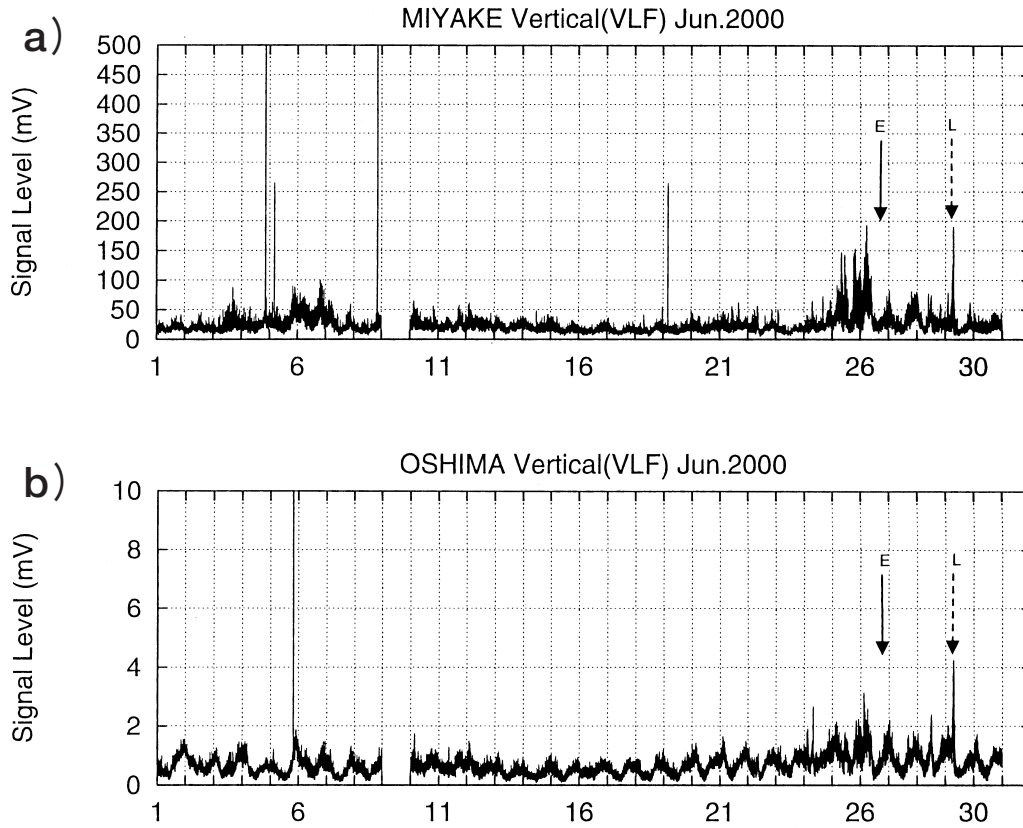


図 7 三宅島における最初の噴火活動のあった 2000 年 6 月 26 日（図 4 “E”）前後の ELF/VLF 帯の変動強度. **a)** 三宅島, **b)** 伊豆大島. 図中 “L” は, 伊豆大島における近接雷によるもの. 噴火の前約一日半から ELF/VLF 帯の放射があったことがわかる.

Fig. 7 Signal strength of the ELF/VLF band, **a)** on Miyake-Jima, and **b)** on Izu-Oshima departed about 70km during June 2000, including the first eruption on 26 June 2000. It is seen that anomalous radiation occurred from the morning of 25 to the morning of 26 June, nearly simultaneously with two other components (ULF and DC ; **Fig. 6**). The greatest lightning activity around Izu-Oshima Island on 20 June induced a simultaneous sharp peak of strength at both islands. The anomalous radiation before the eruption can be suspected from **Fig. 6-1b**), though not so clearly because of superposition of diurnal fluctuation at Izu-Oshima site. The diurnal change is in accord with the ULF and, DC band anomalies that appeared during the volcanic activities on Miyake-Jima (Fujinawa *et al.*, 2002).

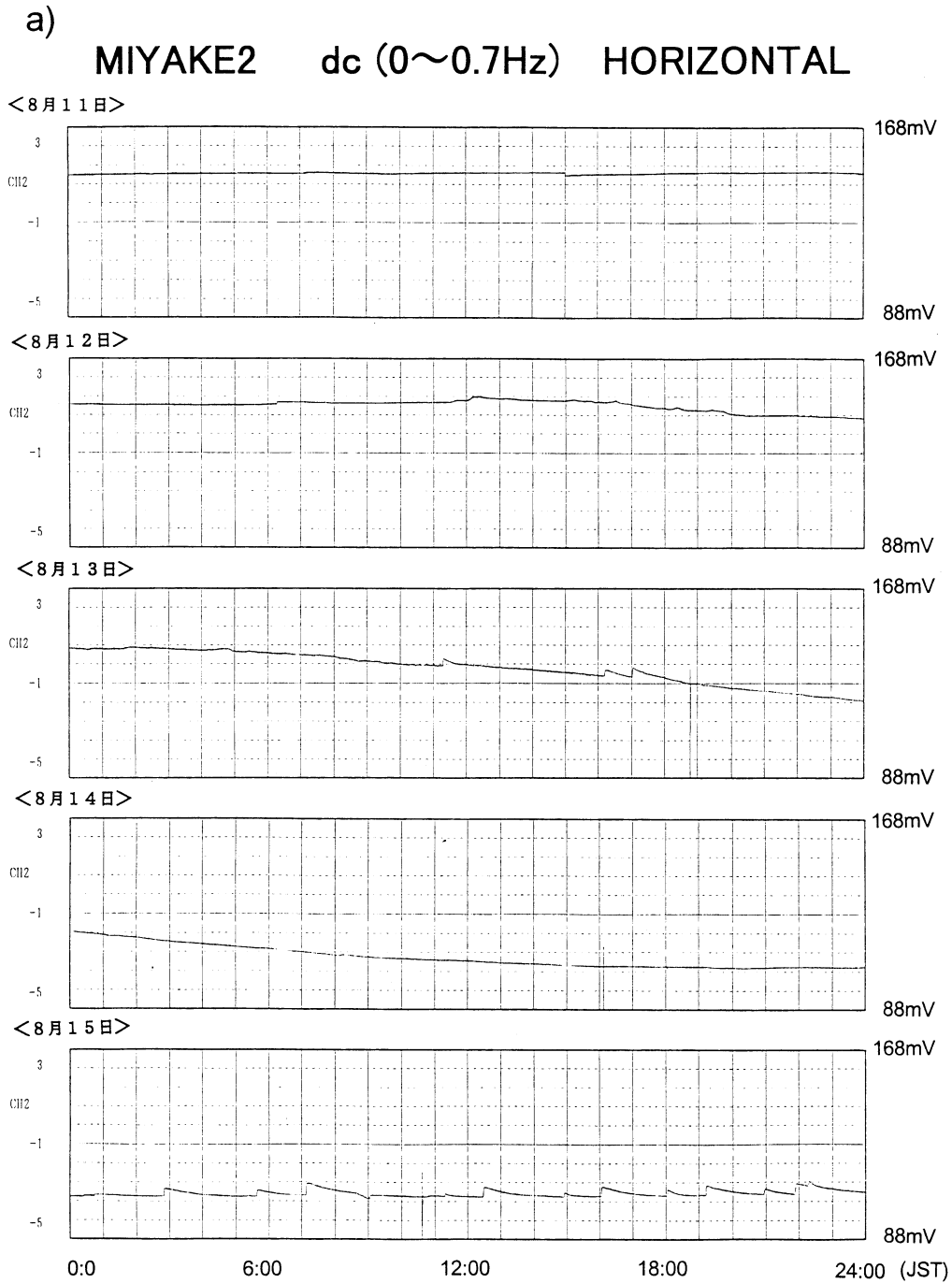


図8 水平成分電界変動の内DC帯の記録(2000年8月11日~8月20日)。8月18日の最大規模の噴火の前に、ステップ状の電界変動が多く見られ、噴火と共に殆ど見えなくなっている。

Fig. 8 Records of the DC component of the horizontal electric field variation from 11 August to 20 August 2000 during which period the largest eruption occurred. Step-like electric field changes appeared in association with the eruption process. These step-like changes differed from similar electric field variation observed by a distant dipole (Sasai *et al.*, 2001). The step-like electric changes are concordant with the step-like ground-tilt change (Ukawa *et al.*, 2000), which suggests abrupt depression of Mt. Oyama. A comparison of this evidence suggests that there are many step-like magma intrusions inducing a strong interaction with ground water circulation.

b)
MIYAKE2 dc (0~0.7Hz) HORIZONTAL

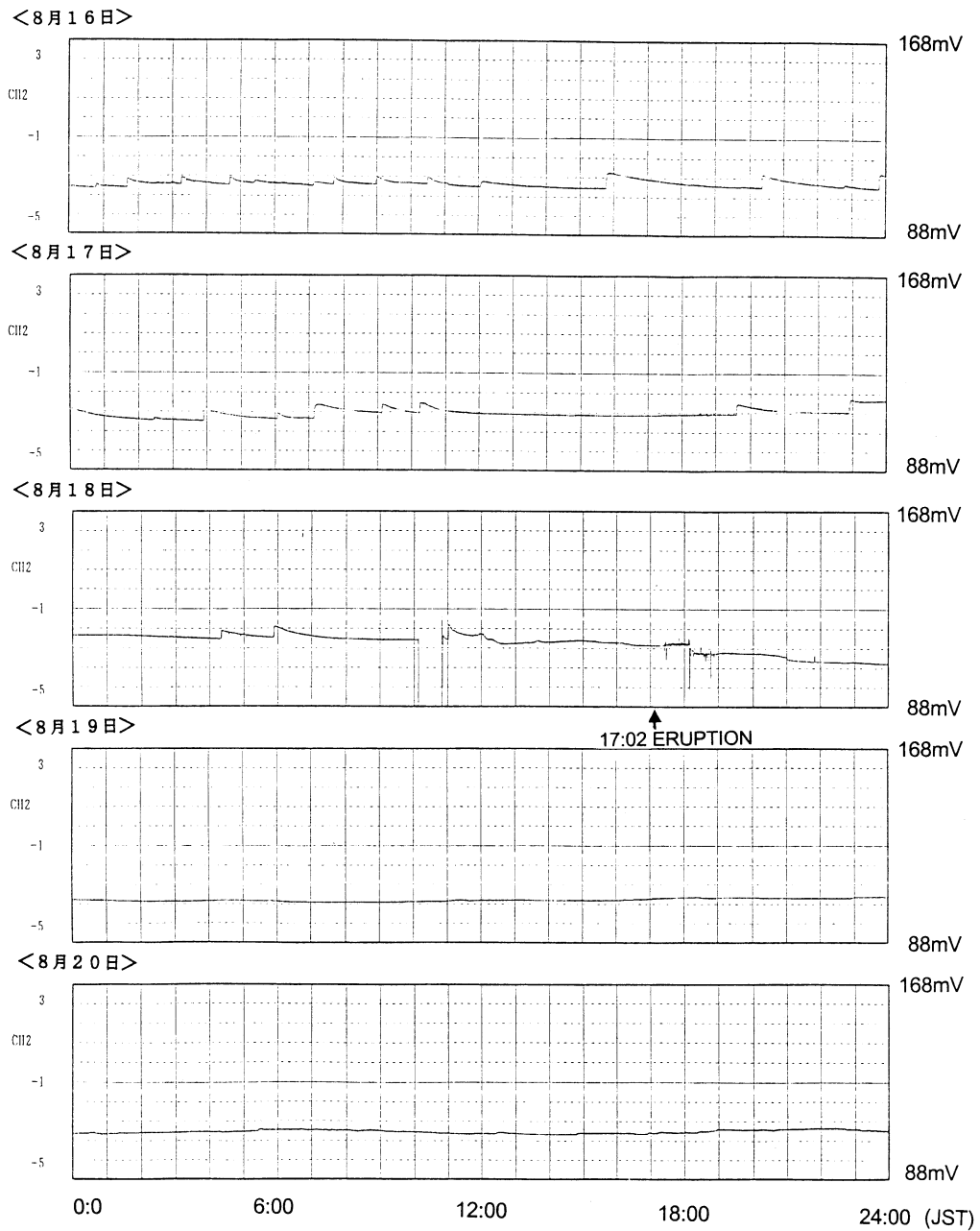


図 8 (つづき)

Fig. 8 (continued)

月3日の6時頃を境に数が少なくなり、又ステップの極性も変化し前回の推移とは同じでなくなったことである。いずれにしても、このようなステップ状の電界変動が、噴火活動の一定の指標となる可能性があることが示唆される。

一方で、7月8日の山頂陥没の後、日に1~2回の頻度で島内の5観点の傾斜計に、山頂が急激に隆起するセンスのステップ状の傾斜変動があることが見出された(Ukawa *et al.*, 2000)。それは中央山の雄山が沈降・上昇を間欠的に繰り返して、遂に数百メートルの山頂沈降となっている(Ukawa *et al.*, 2000)が、その変動とは周期、発生時間いずれも符合していない。ステップ状電場変動は、このような地殻の変動とは独立な現象であるようである。傾斜変動の特徴は、継続時間が約50秒とかなり一定である。この傾斜ステップに殆ど同期して(広帯域地震計の速度波形に対し約10秒遅れて)、長さ2kmから6kmの長基線電位計測に変化が記録された(笹井ほか, 2001)。興味深いのは、同種のステップ状の変動でありながら、両者は多くの点で違いがあることである。我々の測定で検知された電場変動は、

- 1) 傾斜ステップと同期していない、
 - 2) ステップ状電位変動の発生間隔は短いものは、約1時間である、
 - 3) 立ち上がりの継続時間は、10秒程度であり(図9)、約1時間程度でゆっくり戻る、
 - 4) 変動の大きさは、5mV/6mと長基線による大きさ2mV/(2~6)kmに比べ3桁程度も大きい、
- という特徴をもつ。即ち、MKKで検出された自然電位変動は、傾斜変動に現れた地殻変動そのものを原因としているのではない。又、長基線電位計測(MIK-TAR; 笹

井ほか, 2001)での北側端点MIKは、神着(MKK)と火口からほぼ同じ距離であることから、MIK, MKKの間には極性の異なる電流ダイポールが多数存在して、打ち消し合い3桁程度もの強度を生じたと推測される。神着(MKK)ではステップ状電位変動と同期するステップ状傾斜変動がないので、電位変動は、噴火を引き起こしたマグマの進行による地下水流動変動によるものと考えられる。長基線に表れ、傾斜ステップ状変動と同期する山頂陥没(笹井ほか, 2001)によるものではないであろう。さらに、その流動は、鉛直成分の電位記録に現れないこと、又、ELF/VLF帯に出ないところから、先述した噴火時や噴火準備過程のものとは発生メカニズムは異なるであろう。測定点が1点であるため、その発生源の位置については推定する方法はないが、水平成分のみ大きく現れるので、ごく浅い場所と考えられる。

4. 議論

本稿では、三宅島火山活動に伴う電界異常変動を、最近の研究の成果に基づき(Fujinawa *et al.*, 2000, 2001c)地下間隙水の変動とによるものと推測した。間隙地下水の微小変動を計測する手法としては、現在本方法のみであり、傍証を得ることも困難であるが、定性的、定量的な検討の結果からすると、この推論は大きくはずれていないであろう。ステップ状変動については、笹井ほか(2001)が、水平ダイポールによる計測によって議論している。

今回の活動に伴って伊豆大島周辺でも電界変動が検出されている(藤縄ほか2001a, Fujinawa *et al.*, 2001c)。それによると、三宅島・伊豆大島を含むかなりの広域でマグマの活動が活発化したことが示唆されている。現在

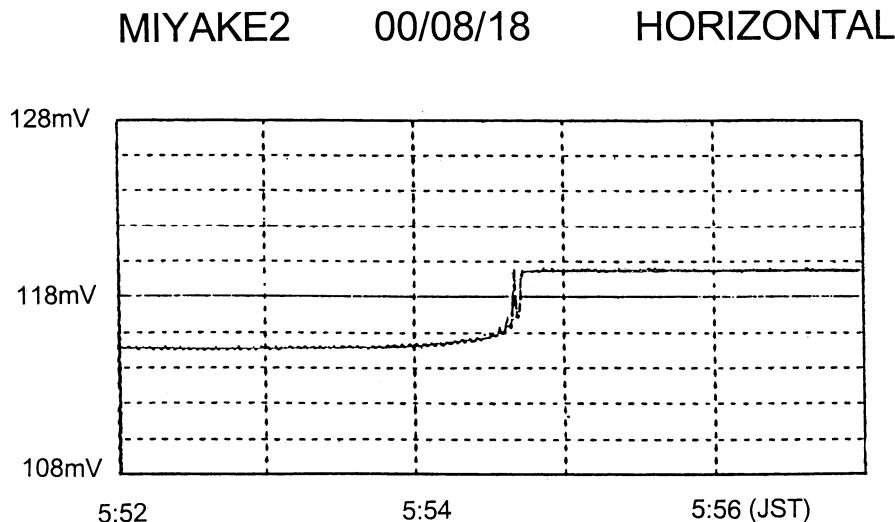


図9 ステップ状の水平成分短基線電界変動の立ち上がり部分の状況、10秒位で急激に立ち上がり、1時間程度でゆっくり(図7)元の水準に戻る。周期20~30秒の周期成分は、人工的なノイズである。

Fig. 9 The step-like electric field change of the horizontal component rises rapidly with a period of about 10 seconds, and decrease gradually in about an hour. Fluctuations of a few tens of seconds are due to man-made noises.

のところ、地殻活動等のデータではこのようなデータは得られていないので、2000 年のマグマ活動が三宅島、神津島周辺と思われる。しかし、電界変動データでは噴火まではいかなくとも、広域のマグマ活動であったことが示唆される。さらには、富士山の低周波地震（鶴川ほか、2001）の増大もこの活動と連動していると推測もされよう。

マグマの移動を把握することは、噴火予測手法の確立で、重要な位置を占めていることは、多くの研究者の同意するところである。従来も地震活動、傾斜変動などにに基づき推定されているが、ここで証左したように、より感度よくマグマの先端部の位置、あるいは、その運動を把握する方法が、火山体の地下水の変動を介して自然電位変動成分（Transient SP）を計測することで可能であることを示した。マグマ活動の位置の正確な把握には、より多点での計測などによって、発生源を同定することが必要である。三宅島における 2000 年の噴火の前の異常な電磁場変動は、長基線・電位計測、全磁力計測には、地磁気全磁力の年オーダーの変動以外は、報告されていない（笹井ほか、2001）。計測サンプリング間隔、基線長、設置場所などが同一でないが、その原因はよくわからない。

5. 結論

2000 年三宅島の噴火活動に伴う電界変動観測データを解析して、以下の結論を得た。

- 1) マグマと地下水の接触領域では熱水循環領域が形成され、マグマの上昇・移動に伴ってそれは空間的に移動して行く、
- 2) この熱水循環の変動は、流動電位効果により電磁場変動をもたらす、
- 3) その変動を、火山体に設置した鉛直方向超長電極・短基線水平電極を用いた観測によって、マグマの接近を地殻傾斜などの地殻活動計測手法によるより、早く検出できることを示した、
- 4) 三宅島の場合には、噴火中、噴火の一日程度前、数日程度、数ヶ月程度と、概略 4 種類の変動が検出された。それぞれの変動がマグマと地下水の相互作用の異なる様式に対応している、
- 5) このような結果に基づき、早期にマグマの移動を予測して、噴火の短期的・直前予測の技術を向上させ、噴火防災対策に活用する技術の開発が期待される。

又、電磁場計測がマグマの運動、マグマと地下水の相互作用をより詳細に調べ、噴火機構の研究・火山体内部の状態の推移を予測する研究にも、新たな展開をもたらすものと期待される。センサーの形状・配置を工夫すれば、多孔質岩石中における地下水の圧力変動の所在とその大きさを、逆問題を解いて推定することも可能である。静穏期の後に噴火する火山でマグマ蓄積過程を捉えることは、噴火活動中期・短期予測の要である。電場の計測でも水平・鉛直成分の選択、長基線・短基線の選択

があるが、ULEM・短基線計測によったマグマの周辺領域での熱水循環の異常帯の観測が、可能であることを示した。

謝辞

この研究を進める上で、大変お世話になった産業技術総合研究所の山根茂博士、防災科学技術研究所・固体地球研究部門の鶴川元雄博士に感謝いたします。草稿の段階で貴重なコメントを防災科学技術研究所・固体地球研究部門の藤田英輔博士にいただきました。㈱サンコーシヤからは落雷情報のデータの提供を受けました。又、原稿の作成、データ処理に当たっては、山内さんに協力いただきました。これ等の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Bernard, P. (1992): Plausibility of long distance electro-telluric precursors to earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **97**, 17531-17546.
- 2) Corwin, R.F. and Hoover, D.B. (1979): The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics*, **44**, 226-245.
- 3) Dobrovolsky, I.P., Gershenzon, N.I., and Gokhberg, M.B. (1989): Theory of electrokinetic effects occurring at the final stage in the preparation of a tectonic earthquake. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **57**, 144-156.
- 4) Enomoto, Y., Tsutsumi, A., Fujinawa, Y., Kasahara, M., and Hashimoto, H. (1997): Candidate precursors: pulse-like geoelectric signals possibly related to recent seismic activity in Japan. *Geophys. J. Internat.*, **131**, 485-494.
- 5) Fenoglio, M.A., Johnston, M.J.S., and Byerlee, J.D. (1995): Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones: Application to the Loma Prieta ULF emissions. *J. Geophys. Res.*, **100**, 12951-12958.
- 6) Fitterman, D.V. and Corwin, R.F. (1982): Inversion of self-potential data from the Cerro Prieto geothermal field, Mexico. *Geophysics*, **47**, 938-945.
- 7) Fujinawa, Y. and Takahashi, K. (1990): Emission of electromagnetic radiation preceding the Ito seismic swarm of 1989. *Nature*, **347**, 376-378.
- 8) Fujinawa, Y., Takahashi, K., Matsumoto, T., Iitaka, H., Yamane, S., Nakayama, T., Sawada, T., and Sakai, H. (2000): Electromagnetic Field Anomaly Associated with the 1998 Seismic Swarm in Central Japan. *Physics and Chemistry of the Earth*, **25**, 247-253.
- 9) 藤縄幸雄・松本拓己・飯高 弘・葛西直子・中野 洋・佐藤宗純・齊藤俊幸・土井卓也・高橋耕三・青柳 勝・佐々木清志・資宗克行 (2001a): 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 - . CA 研究会 2001 年論文集, 28-36.

- 10) Fujinawa, Y., Matsumoto, T., Takahashi, K., Yamane, S., Iitaka, H., and Enomoto, Y. (2001b) : spatio-Temporal Relationship between Anomalous ELF/VLF Band Signals and Earthquakes. Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, **61**, 55-81.
- 11) Fujinawa, Y., Takahashi, K., Matsumoto, T., Iitaka, H., Doi, T., Nakayama, T., Sawada, T., and Sakai, H. (2001c) : Electric Field Variations Related to Seismic Swarms. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, **76**, 391-415.
- 12) Fujinawa, Y., Matsumoto, T., and Takahashi, K. (2002) : Modeling confined pressure changes inducing anomalous electro magnetic fields related with earthquakes. J. of Applied Geophysics, **49**, 101-110.
- 13) Fujita, E., Ukawa, M., Yamamoto, E., Okada, Y., and Kikuchi, M. (2000) : Seismic and volcanic tremor activity during the 2000 Miyakejima volcanic eruption. The Volcanological Society of Japan, **2**, 17 (Ibaraki, Japan, 2000).
- 14) Gaeta, F.S., De Natale, G., Peluso, F., Mastrolorenzo, G., Castagnolo, d., Troise, C., Pingue, F., Mita, D.G., and Rossano, S. (1998) : Genesis and evolution of unrest episodes at Campi Flegrei caldera : The role of thermal fluid-dynamical processes in the geothermal system. J. of Geophys. Res., **103**, 20921-20933.
- 15) Hashimoto, T. and Tanaka, Y. (1995) : A Large Self-Potential Anomaly on Unzen Volcano, Shimabara Peninsula, Kyushu Island, Japan. Geophys. Res. Lett., **22**, 191-194.
- 16) Ishido, T. and Mizutani, H. (1981) : Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics. J. Geophys. Res., **86**, 1763-1775.
- 17) Jouniaux, L. and Pozzi, J.P. (1995) : Streaming potential and permeability of saturated sandstones under triaxial stress : Consequences for electrotelluric anomalies prior to earthquakes. J. Geophys. Res., **100**, 10197-10209.
- 18) Kaidzu, M., Nishimura, T., Murakami, M., Ozawa, S., Sagiya, T., Yarai, H., and Imakiire T. (2000) : Crustal deformation associated with crustal activities in the northern Izu-islands area during the summer, 2000. Earth Planets Space, **52**, ix-xviii.
- 19) Kamo, K., and Ishihara, K. (1988) : A Preliminary experiment on automated judgement of the stages of eruptive activity using tiltmeter records at Sakurajima, Volcanic Hazards in Volcanology, **1**, 585-598.
- 20) Klein, F. (1984) : Eruptive forecasting at Kilauea Volcano, Hawaii. J. Geophys. Res., **89**, 3059-3073.
- 21) Koizumi, N., Kamigaichi, O., and Matsumoto, N. (1999) : Preseismic changes in groundwater level and volumetric strain associated with earthquake swarms off the east coast of the Izu Peninsula, Japan. Geophys. Res. Lett., **26-23**, 3509-3512.
- 22) Liu, J.Y., Chen, Y.I., Pulinets, S.A., Tsai, Y.B., and Chuo, Y.J. (2000) : Seismo/ionospheric Signatures Prior to the September 20, 1000, Taiwan Earthquake. Geophys. Res. Lett., **27**, 3113-3116.
- 23) Matsumoto, T., Fujinawa, Y., and Takahashi, K. (1996) : ULF-bands electric field changes related to seismic swarms. J. Atmospher. Electri., **16**, 175-191.
- 24) Michel, S. and Zlotnicki, J. (1998) : Self-potential and magnetic surveying of La Fournaise volcano (Reunion Island) : Correlations with faulting, fluid circulation, and eruption. J. of Geophys. Res., **103**, 17845-17857.
- 25) Miyagi, I., Hoshizumi, H., Tomiya, A., Kawanabe, Y., Morishita, Y., Kita, N., and Nakano, S. (2000) : Petrological characterization of the July Miyake 2000 eruption. The Volcanological Society of Japan, **2**, 6 (Ibaraki, Japan, 2000).
- 26) Mizutani, H., Ishido, T., Yokokura, T., and Ohnishi, S. (1976) : Electrokinetic phenomena associated with earthquakes. Geophys. Res. Lett., **3**, 365-368.
- 27) Nakada, S., Fujii, T., Kikuchi, M., and Yamanaka, Y. (2000) : The Volcanological Society of Japan, **21** (Ibaraki, Japan, 2000).
- 28) Nourbehecht, B. (1963) : Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems. (Mass. Inst. of Technol., Cambridge, Mass., 1963).
- 29) Perier, F., Trique, M., Lorne, B., and Avouac, J.P. (1998) : Electric potential variations associated with yearly lake level variations. Geophys. Res. Lett., **25-11**, 1955-1958.
- 30) Rymer, H. and Willians-Jones, G. (2000) : Volcanic eruption prediction : Magma chamber physics from gravity and deformation measurements. Geophys. Res. Lett., **27**, 2389-2392.
- 31) 笹井洋一・上嶋 誠・歌田久司・鍵山恒臣・Zlotnicki, J.・橋本武志・高橋優志 (2001) : 地磁気・地電位観測から推定される三宅島火山の2000年活動. 地学雑誌, **110-2**, 226-244.
- 32) Sigurdsson, H. and Sparks, R.S.J. (1978) : Rifting episode in North Iceland in 1874-1875 and the eruptions of Askja and Sveinagja. Bull. Volcanol., **41**, 149-167.
- 33) 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, 2000, **208**, 1-224.
- 34) Trique, M., Richon, P., Perrier, F., Avouac, J.P., and Sabroux, J.C. (1999) : Radon emanation and electric po-

- tential variations associated with transient deformation near reservoir lakes. *Nature*, **399**, 137-141.
- 35) Ukawa, M., Fujita, E., Yamamoto, E., Matsumoto, T., Okada, Y., and Kikuchi, M. (2000) : The 2000 eruption of Miyakejima-observation and modeling, *The Volcanological Society of Japan*, **2**, 15 (Ibaraki, Japan, 2000).
- 36) 鶴川元雄 (2001) : 低周波地震と噴火予知. 火山災害軽減. 月刊地球, No. **269**, 784-790.
- 37) Utada, H., Sasai, Y., Nakagawa, I., Koyama, S., Ishikawa, Y., and Hamano, Y. (1984) : in *The Eruption of Miyake-jima Volcano 113-124* (Japan Volcanologist Association, Tokyo, 1984).
- 38) Yukutake, T., Utada, H., Watanabe, H., Hamano, Y., and Shimomura, T. (1990) : Changes in the Electrical Resistivity of the Central cone, Mihara-yama, of Oshima Volcano Observed by a Direct Current Method. *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 151-168.
- 39) Zlotnicki, J. and Le Mouel, J.L. (1990) : Possible electrokinetic origin of large magnetic variations at La Fournaise Volcano. *Nature*, **343**, 633-636.
- (原稿受理 : 2001 年 12 月 28 日)

要 旨

三宅島では水平・鉛直成分の電場計測を、1999 年 4 月より行っている。観測データの解析の結果、以下の事柄が判明した。

1. 2000 年の火山活動の数か月前から平常時とは異なる種々の異常変動が記録されている。
2. 噴火活動の開始のほぼ一か月前から低周波帯域で顕著な変動があった。
3. 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。
4. 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、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。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 電界電動観測は、傾斜変動・地震などの観測とは独立かつ有効な観測の窓である。

キーワード : 火山噴火, 前兆, マグマ, 電磁場, 予知, 地下水