

火山地帯における自然電位観測 ——雲仙火山の場合——

橋本 武志・田中 良和・須藤 靖明

SELF-POTENTIAL OBSERVATIONS IN VOLCANIC AREAS ——Unzen volcano——

By Takeshi HASHIMOTO, Yoshikazu TANAKA and Yasuaki SUDO

Synopsis

Unzen is an active volcano located on the center of Shimabara peninsula, Kyusyu island, Japan. The volcanic activity of Mt. Fugen, the central dacite lava dome of Unzen, broke out in November, 1990 after 198 years quiescence. We started the self-potential (SP) survey and continuous observation around the active craters of Mt. Fugen from March, 1991. The SP near the active craters showed sharp increase as the lava dome was extruded in May, 1991. The most significant change exceeded 600mV per three month. The spatial distribution of SP was also measured through repeated surveys. We found a positive SP anomaly with its center at the newly extruded lava dome. It has the radius of about 500m and the intensity of over 1000mV. We suppose that the electrokinetic process accompanied with subsurface hydrothermal convection should be responsible for this positive anomaly. The sharp increase of SP described above is then considered as the result of growth of the hydrothermal system.

1. はじめに

大地には、様々な原因によって電位差が生じている。大地の自然電位を測定して地下の状態を探索する方法を自然電位法と呼んでおり、古くから物理探鉱に利用されてきたが、火山地帯への応用は比較的最近のことである。最近の研究から、火山地帯では特に大きな自然電位の異常が存在する場合があることがわかってきた。また、火山地帯の自然電位異常には地下の熱水活動が関与していることが指摘されている^{1),2)}。地下の帯水層の存在が噴火に密接に関与しているような火山では、自然電位を火山活動のひとつのモニターとして利用できる可能性があると言える。

我々は、1990年に始まった長崎県雲仙普賢岳噴火に際して、溶岩ドームが出現する約2カ月前の1991年3月から、普賢岳を含むいわゆる妙見カルデラ³⁾一帯で自然電位の観測を開始した。今回の我々の観測は、火山活動が活発化していく時期の自然電位変化をとらえたという点で過去に例を見ない。本稿では、観測から明らかになった普賢岳周辺の自然電位分布とその時間変化について報告する。

2. 観測

雲仙岳は、粘性の高いデイサイトの溶岩からなる火山で、1990年の活動までは最高峰であった普賢岳を中心として、妙見岳、国見岳などからなる妙見カルデラを形成している。カルデラの中心に位置する普賢岳

と、カルデラ縁を形成する国見岳、妙見岳の間には北から鬼人谷、紅葉谷、薊谷と呼ばれる谷地形がある。

1990年11月、普賢岳の東側に位置する九十九島火口、地獄跡火口が噴気を上げ活動を開始した。1991年2月には屏風岩火口が火山灰を出す活動を見せている。その後、屏風岩、九十九島火口は活動を弱めたが、同年5月20日、地獄跡火口からは溶岩ドームが出現した。溶岩の流出は続き、しばしば大規模な火山砕屑物流も発生するようになった。その後も溶岩ドームは成長と崩落を繰り返し、1994年2月までに出現した溶岩ロープは12を数えるに至った。第12溶岩ドームロープの出現以後は、やや内成的な成長に移ったとされているものの、1994年2月現在もなお、火山活動は活発なレベルを維持している。

我々が、雲仙岳で自然電位の観測を開始したのは、九十九島及び地獄跡火口の噴火開始の約4ヵ月後、1991年3月である。測点は、連続観測点群と繰り返し測定点群とがあり、それぞれFig. 1-(a)およびFig. 1-(b)にその配置が示されている。いずれの測点にも自作の鉛—塩化鉛電極が約50cmの深さに埋設されており、それぞれ電線によって結ばれている。

連続観測点は、普賢岳の南側の測点群(A～H)と、北側の測点群(P～U)とに分かれ、測定値はそれぞれD点、P点に置かれたデータロガーに記録される。サンプリングは40分に1回である。A～Fは1991年3月20日から、Gは同年7月から、HおよびP～Uは1992年11月から、それぞれ連続観測を開始している。

繰り返し測定点は、自然電位の長期的変動を面的にとらえることを目的として、1991年12月から展開されている。繰り返し測定の頻度はおよそ1ヵ月に1回である。繰り返し測定と同時に銅—硫酸銅電極と埋設電極との電位差の測定もしている。これを利用して埋設電極のドリフトを補正することにより、数10mV程度の精度まで議論が可能である。

また、上述の繰り返し測定だけではカバーしきれない領域、あるいは常時の繰り返し測定を実施するのが困難な領域については、随時銅—硫酸銅電極を用いた移動測定を実施した。

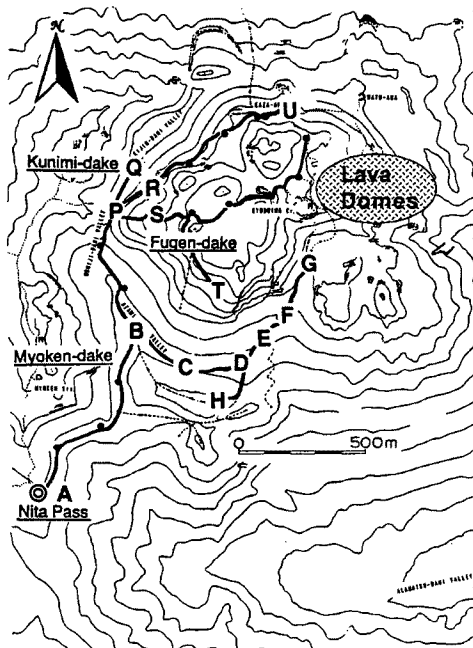


Fig. 1-(a) Distribution of continuous observation sites (denoted by letters).

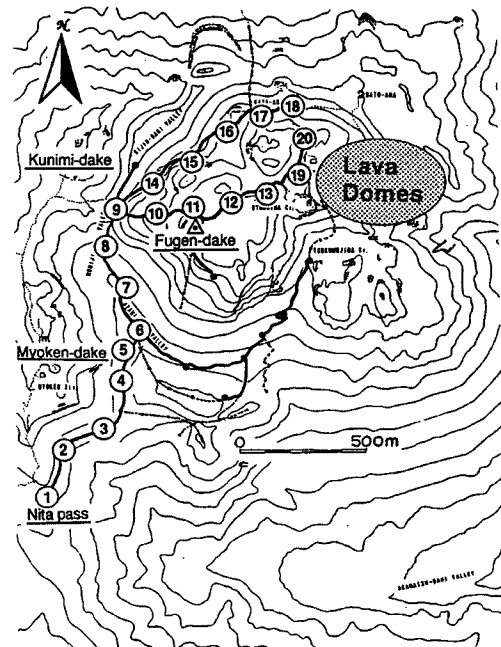


Fig. 1-(b) Distribution of repeated survey points (denoted by numerals).

3. 観測結果

3.1 自然電位の空間分布

上述の繰り返し測定と、随時実施した移動測定をもとに、調査範囲の自然電位分布図を作成した。Fig. 2-(a), (b), および (c) はそれぞれ 1991 年 12 月 23 日, 1992 年 12 月 18 日, および 1993 年 12 月 1 日の電位分布を示している。電位の基準はいずれも仁田峠 (Fig. 1-(a) の A 点) にとっている。3 つの時期を通じて共通に見られる特徴として次の 3 点が明瞭に読み取れる。

- 1) 火口原に近づくに従って高電位となっている。
- 2) 薊谷, 鬼人谷付近は高電位となっており, 電位勾配も大きい。
- 3) 火口原と薊谷に挟まれた領域 (普賢岳の南斜面) に低電位の中心がある。

1 年毎の分布図を時間を追って見ると, 「上述 3) の負の電位異常が発達しながら北上した」ことがわかる。この事実は, 後でも述べるように, 普賢岳南側の測点群では電位上昇が, 北側では電位低下が観測されたことに対応するものである。それぞれの期間の変動分を抽出したのが Fig. 2-(d) および Fig. 2-(e) である。これらの図から次の事柄が読み取れる。

- 4) 溶岩ドームのごく近傍では電位の上昇が続いており, 2 年間で約 100mV 電位が上昇した。
- 5) 溶岩ドームの西方約 500m 付近を中心として電位の低下が続いている。特に, 1991 年 12 月から 1992 年 12 月までの 1 年間で電位低下が大きく, 変化量は -400mV に達している。
- 6) 薊谷周辺では, 1991 年 12 月からの 1 年間で有為な電位変化がなかったが, 次の 1 年間で約 100mV 電位が上昇した。

3.2 自然電位の時間変動

次に, 連続観測の結果から自然電位の時間変動を見る。Fig. 3-(a) に南測点群の連続記録を, Fig. 3-(b) に北測点群の連続記録を示した。電位の基準はいずれも仁田峠 (A 点) にとっている。これらの図から次の事柄を読み取ることができる。

- 7) 1991 年 5 月の第 1 溶岩ドーム出現前後で仁田峠から見て火口側の測点は大きな電位上昇を示した。電位の上昇は E 点を中心として起こったように見える。E 点での変動量は第 1 溶岩ドームロープの出現前後で +600mV に達する。
- 8) 南測点群ではその後も平均的に 40 ~ 50mV/月程度の割合で火口側の電位の上昇が続いている。
- 9) 北測点群では, 電位は低下を続けている。

7) の急激な電位上昇は, 計測誤差や電極のドリフトの範囲を超えており有為な変化である。しかも, 溶岩ドーム出現の直前で加速度的に電位変化が起こり, ドーム出現と共に変化量が急激に小さくなったことから考えて, 噴火活動に伴った現象であることはほぼ確実であると思われる。8) と 9) の現象は先に述べたように普賢岳南斜面の負電位異常が時間と共に北上したことに対応している。なお, 1993 年 6 月以降は, 例年に比べて特に降水量が多かったことに加えて, 南東から北西方向に E 点と F 点の間をえぐり取るような形で崖崩れが進行したために, 特に南側の測点群でそれまでと傾向の異なる変動が観測されている。

次に, 1991 年 12 月から 1993 年 12 月までの繰り返し測定の結果を Fig. 4 に示す。電位の基準はやはり仁田峠 (A 点) にとっている。繰り返し測定の結果からも 4), 5), 6) の事実が読み取れる。

連続観測, 繰り返し測定ともに, グラフ中の白抜きの点は, 銅-硫酸銅電極による測定値を示している。

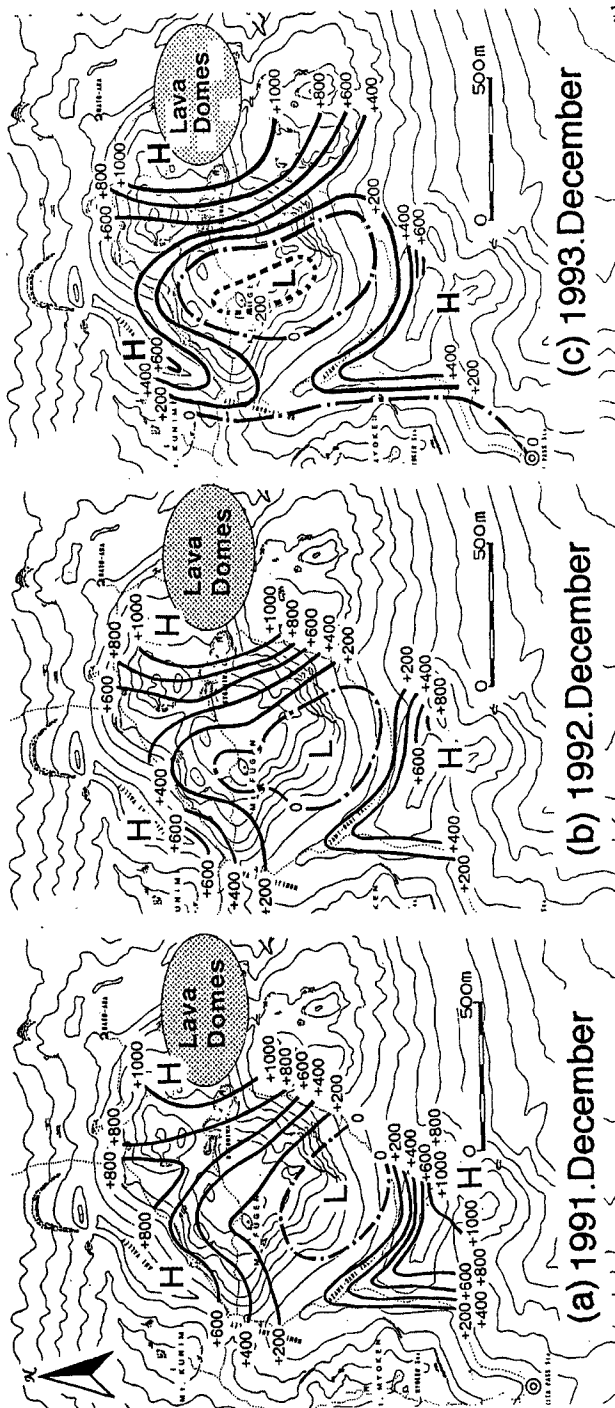


Fig. 2 Self-potential distributions on Mt.Fugen: (a) December, 1991 (b) December, 1992 (c) December, 1993. Units in millivolts. Potential reference is Nita-pass (denoted by ⊙ in the figure).

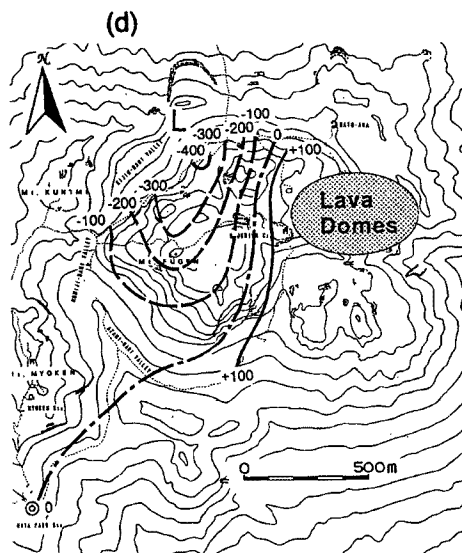


Fig. 2-(d) Distribution of self-potential change from Dec. 1991 to Dec. 1992 (Fig. 2 (b) - (a)). Units in millivolts.

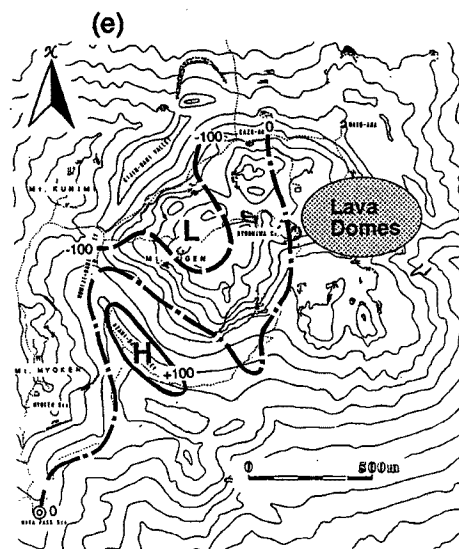


Fig. 2-(e) Distribution of self-potential change from Dec. 1992 to Dec. 1993 (Fig. 2 (c)-(b)).

これによれば、連続観測に使用した埋設電極（鉛-塩化鉛）には大きなドリフトはなかったことがわかる。

4. 観測結果の解釈

4.1 地形の効果

蘆谷周辺では電位の標高に対する相関が強く、標高が高くなるにつれて高電位となっていることから、地形標高（正確には地下水面）の高低差によって生じた地下水の流れによる流動電位にその原因があると推定できる⁴⁾。蘆谷と同じような地形を持つ鬼人谷でも移動調査を行った結果、両者は良く似た電位分布を示すことがわかった。さらに、妙見岳や国見岳での移動調査（本稿では割愛した）の結果を合わせると、蘆谷、鬼人谷、妙見岳、および国見岳の周辺での電位分布は、基本的には地形の効果で説明可能であり、火山活動とはひとまず切り放して考えて良いものといえる。

我々の測定によれば、蘆谷および鬼人谷周辺の標高に対する電位の変化率は -10mV/m 程度である。この値は、他の地域での測定例に比べてかなり大きな値である。Namba⁵⁾の測定によれば、標高相関の係数は -3mV/m （阿蘇米塚）、 -1mV/m （阿蘇夜峰山）、 -5mV/m （別府扇山）などとなっている。一方、1984年のNEDOによる自然電位広域調査⁶⁾によって求められた雲仙西部地域の平均的な標高相関の係数は約 -1.6mV/m である。従って、蘆谷や鬼人谷で見られる大きな標高相関の電位勾配は、雲仙岳全域に一樣なものではなく、局所的なものであると考えられる。

4.2 熱水対流の効果

3.1で述べた火口原近傍の正の電位異常は上述の標高相関の電位では説明できない。高度が増すに従って高電位となっているからである。この異常は溶岩ドームを中心に分布しており、振幅も 1V を超える大きさであることから火山活動にその原因があるものと考えられる。鍵山・他⁷⁾のMT観測によれば、火口原の直下には低比抵抗層が存在するとされている。この低比抵抗が帯水層を表していると解釈するならば、

地下の高温の溶岩によって加熱された地下水は、熱水対流を形成していると推定されるが、1)の電位異常はそのような熱水対流に伴う界面動電現象による可能性が高い⁵⁾。

界面動電現象の室内実験 Ishido and Mizutani⁸⁾によれば、温度が低くなるに従って電位(界面動電現象を特徴づけるパラメータの一つで固液界面の電気二重層の強さと関係がある)は小さくなる。このことは、同じ流体流量の場合、温度が高い方がより多くの電荷を運ぶことを意味する。そこで、温度勾配を横切って熱水の流れが存在する場合を考えると、流れに沿って温度が低下する領域では正電荷が取り残され正電流源を形成する。逆に流れに沿って温度が上昇する領域では正電荷が不足して負電流源が形成されることになる。また、地熱流体が液相から蒸気相に転移する境界では流動電位係数(パラメータに電位を含む量で、圧力勾配に対する電位差の大きさを表す)が急激に小さくなる⁹⁾ために正電荷が取り残される。ここでも正電流源が発生すると考えられる。従って、熱水上昇域は正電流源となり、対流が戻っていくやや深い領域が負電流源となることが推定される。普賢岳火口原近傍の正の自然電位異常は、地下で熱水の上昇があることを強く示唆するものであると言えよう。

4.3 時間変動についての考察

観測開始後、大きな電位変動を示したのは、溶岩ドームの近傍よりもむしろそれを取り巻くやや離れた領域である(Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4)。その変動量の大きさは、季節的な変動、降雨による変動、電極のドリフトによる変動などでは説明できず、火山活動によって直接、あるいは二次的に誘起されたものであることはほぼ間違いのないと言える。変動を起こした領域はせいぜい数百mの空間的広がりであることから、変動の源は比較的浅部(数百m以浅)にあると推定される。自然電位の振る舞いに対応して地下で起こっている現象について、可能性としては次のようなことが考えられる。

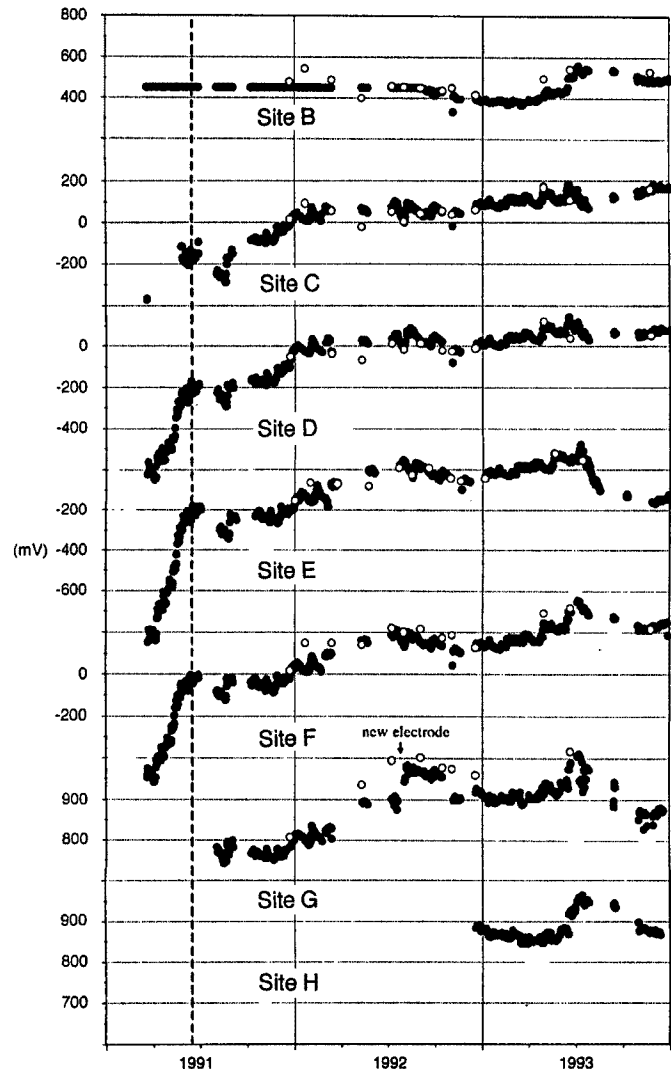


Fig. 3-(a) Self-potential changes of southern site-group (daily average). Potential reference is at site-A in Fig.1-(a) (Nita-pass). A vertical broken line denotes the day of first appearance of lava (May. 20, 1991). The electrode of site-G was replaced with new one in Jul. 1992. Open circles denote the measured values with Cu-CuSO₄ electrodes pair.

* 溶岩ドーム直下に熱水の上昇域があり、それが消長あるいは移動することにより、周辺部の自然電位変動をもたらした。

(=正電流源の消長, 移動)

* 電位変動を示す領域の直下に貯水域があり、そこから火口へ向かって地下水が選択的に供給されるようになった。あるいは、そのような供給経路が移動した。

(=負電流源の消長, 移動)

さらに具体的な解釈を与えるためには、明らかにすべき点がいくつかある。それについては第6章で触れる。

5. まとめ

雲仙普賢岳を中心とした約1 km 四方の領域で1991年3月から自然電位の観測を行った。現在までの3年近くにわたる観測結果から以下の点が明らかになった。

- 1) 雲仙岳には自然電位の異常が存在し、それは以下の4点に特徴づけられる。
 - (a) 溶岩ドームを中心とする半径約500m程度の正電位異常。
 - (b) 薮谷, 鬼人谷, 国見岳, および妙見岳などに見られる標高相関の正電位異常。
 - (c) 溶岩ドーム貫入に伴う(a)の正電位異常の発達。
 - (d) 普賢岳南斜面の負電位異常の発達と北への移動。
- 2) (a)の異常は、溶岩ドーム地下に発達した熱水対流に伴って発生した流動電位によるものであると考えられる。
- 3) (b)の異常は地下水面の高低差によって生じた地下水の流れによる標高相関の電位であると考えられる。この領域での標高に対する電位の係数は雲仙地域の平均的な係数よりも大きい。
- 4) (c)の変動は、噴火活動によって火口原地下の熱水の上昇流が徐々に発達した結果であると考えられる。
- 5) (d)の変動は、火山活動に関連したものであると思われるが、原因は明かではない。

6. 今後の展望

我々の当初の目的は、雲仙岳において火山活動に伴う自然電位異常の空間分布と時間変動を検出し、か

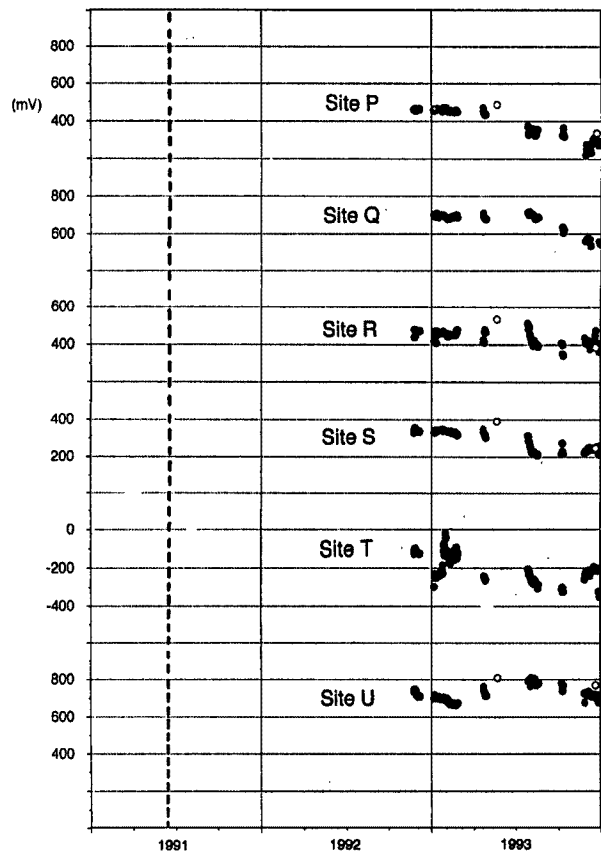


Fig. 3-(b) Self-potential changes of northern site-group (daily average). Format is the same as Fig.3-(a).

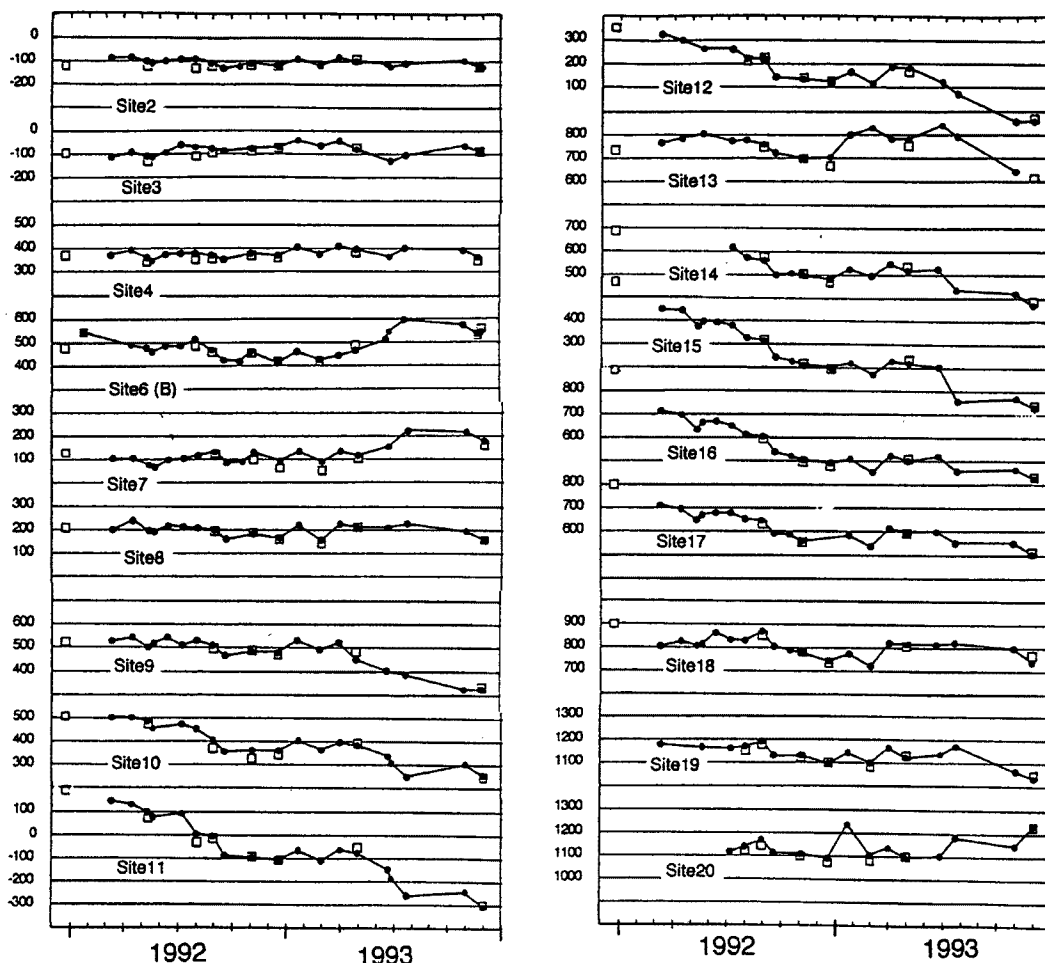


Fig. 4 Self-potential changes of repeated survey points. Units of vertical axis are in millivolts. Open squares denote the measured values with Cu-CuSO₄ electrodes pair. Note that the terms of horizontal axis are different from those in Fig. 3.

つ、その原因を明らかにすることであった。3年間の観測によって、前者の目的はほぼ達せられた。しかし、後者についてはいくつかの課題が残された。

最大の課題は、普賢岳南斜面の負の電位異常の振る舞いの原因を明らかにすることである。過去にさかのぼって観測を行うことはできないが、今後、噴火の終息段階の変動を観測することでかなり重要な情報を取り出すことができるはずである。その際に、自然電位の観測を継続することはもちろんであるが、同時に次のような情報は自然電位データの解釈上重要な制約条件を与えるものである。

- *火口原直下に想定した熱水対流を担う水はマグマ起源か、或いは天水からなる比較的浅部の帯水層起源か。(火口原から放出されている噴気に天水起源の水はどの程度含まれているか。)
- *比較的浅部に帯水層が存在するならばそれはどのように分布しているのか。

前者については同位体地球化学的手法、後者にはオーディオ帯域のMT法や直流電気探査法等が有効であると思われる。

最後に、現地での観測にあたって、九州大学島原地震火山観測所の太田一也教授をはじめ、所員の方々に

は多大なる便宜をはかって頂いたことを、ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Nishida, Y and H. Tomiya: Self-potential studies in volcanic areas (1) -Usu volcano-, Jour.Fac.Sci., Hokkaido univ., Ser.VII. (Geophysics), vol.8, No.2, 1987, pp.173-190.
- 2) 石戸経士：自然電位から推定される火山地域の地下流体流動, CA 研究会論文集, 1991, pp.86-93.
- 3) 太田一也：雲仙火山—地形・地質と火山現象—, 1984.
- 4) 橋本武志・田中良和・増田秀晴・歌田久司・鍵山恒臣・増谷文雄：1991年の雲仙岳における自然電位観測, CA 研究会論文集, 1992, pp.249-255.
- 5) Namba, M.: An investigation of the earth-current on the volcano Aso, Dr.thesis, Kyoto univ., 1939.
- 6) NEDO 地熱開発促進調査報告書 No.15. 雲仙西部地域, 1988.
- 7) 鍵山恒臣・歌田久司・増谷文雄・山本哲也・村上英記・田中良和・増田秀晴・橋本武志・本蔵義守・三品正明・松尾 道・清水洋：雲仙火山のMT観測とそれによって推定されるマグマの上昇過程, 平成3年度科学研究費補助金・総合研究(A)「雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究」・研究成果報告書, 1992, pp.73-86.
- 8) Ishido, T. and H. Mizutani: Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, J.G.R., vol.81, 1981, pp.1763-1775.
- 9) Marsden, S.S.: Two phase streaming potentials, Proc.12th work-shop on geothermal reservoir engineering, Stanford univ., 1987, pp.147-151.