

# 自然電位観測から推定される雲仙岳の地下熱水対流

京大理 橋本武志, 田中良和, 増田秀晴  
東大震研 歌田久司, 鎌山恒臣, 増谷文雄

## Subsurface Hydrothermal Convection Inferred from the Self Potential Observations on Unzen Volcano

Takeshi HASHIMOTO, Yoshikazu TANAKA, Hideharu MASUDA\*  
Hisashi UTADA, Tsuneomi KAGIYAMA and Fumio MASUTANI\*\*

\* Faculty of Science, Kyoto Univ.

\*\* Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo

### 1. はじめに

1990年11月17日に始まった雲仙普賢岳の噴火は1993年6月現在もなお活発なレベルを維持している。著者のグループは、最初の溶岩ドームが出現する2カ月前の1991年3月から普賢岳の火口周辺で自然電位の観測を継続してきた。連続観測を開始してまもなく火口原に近い観測点群で急激な電位の上昇が見られた。その後、普賢岳を含む妙見カルデラ内部でのサーベイによって、火口原を中心とした正の自然電位異常が明らかになった。1992年のCA研究会論文集では、これらの観測事実を報告するとともに火口原を中心とした正の電位異常は地下の熱水の上昇によって引き起こされている可能性が高いことを指摘した。<sup>1)</sup> 本稿では、それ以降の観測結果を中心に示し、それにより得られたいくつかの知見について述べる。

### 2. 観測

はじめに雲仙岳の地形について簡単に触れておく。雲仙岳は粘性の高いデイサイトの溶岩からなる火山で、普賢岳（ふげんだけ）を取り巻く直径約1800mの妙見カルデラを形成している。国見岳（くにみだけ）、妙見岳（みょうけんだけ）、江丸岳（えまるだけ）はそのカルデラ縁にあたる。カルデラの南東側は普賢岳の形成期に破壊されその原型をとどめていない<sup>2)</sup>。普賢岳と国見岳、妙見岳との間には北から鬼人谷（きじんだに）、紅葉谷（もみじだに）、薊谷（あざみだに）と名付けられた谷地形があり、鬼人谷と

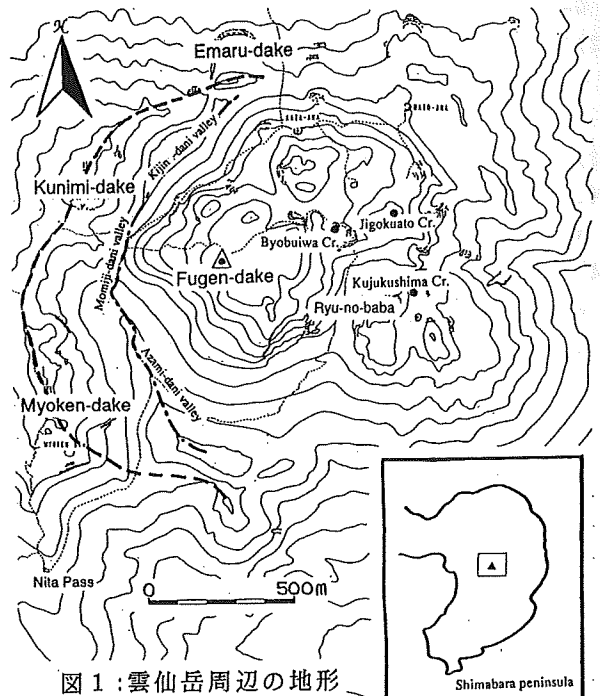


図1:雲仙岳周辺の地形

薮谷は凹陷地形になっている。主要な地形を図1に示した。1992年から1993年にかけて行った自然電位観測は以下の通りである。

1) 従来の連続観測の継続。

図2に連続観測点の配置を示した。従来からの連続観測点は図中のAからGである。記録はD点におかれたデータロガーに収録される。測定間隔は40分である。

2) 繰り返し観測。

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月に図3のように繰り返し観測点を配置した。観測の頻度はおおよそ1カ月に1回である。繰り返し観測点にも、連続観測点と同じく自作の鉛-塩化鉛電極を50cm深に埋設して固定電極としている。ほとんどの点では2個ずつ電極が埋設されており、電極固有の異常を発見しやすくしてある。また、固定電極のドリフトを監視するため、繰り返し観測の度に銅-硫酸銅電極との電位差を測定している(著者の製作した鉛-塩化鉛電極は、銅-硫酸銅電極に対して通常おおよそ-470mVの電位を示す)。こうして固定電極のドリフトを補正することにより、数10mV程度の電位変動まで議論できる可能性が出てきた。

3) 新たな連続観測点の設置。

繰り返し観測の結果、特に電位変動の大きい点については、1992年11月から連続観測に切り替え、より詳細な記録を得ることをめざした。新設した連続点は図2のH点(A~Gと合わせて南測点群と呼ぶ)、およびP~T点(北測点群と呼ぶ)である。データロガーはP点(紅葉谷)に設置した。なお、連続点のA, B, P, R, S, Uはそれぞれ繰り返し点の1, 6, 9, 14, 10, 18と同一である。

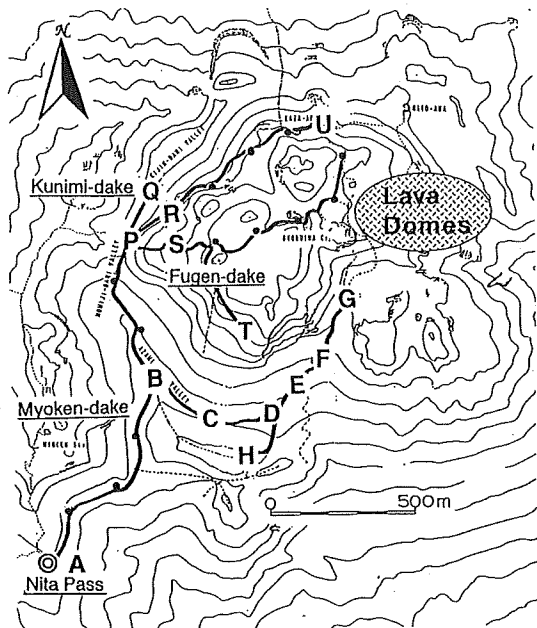


図2: 連続観測点配置図

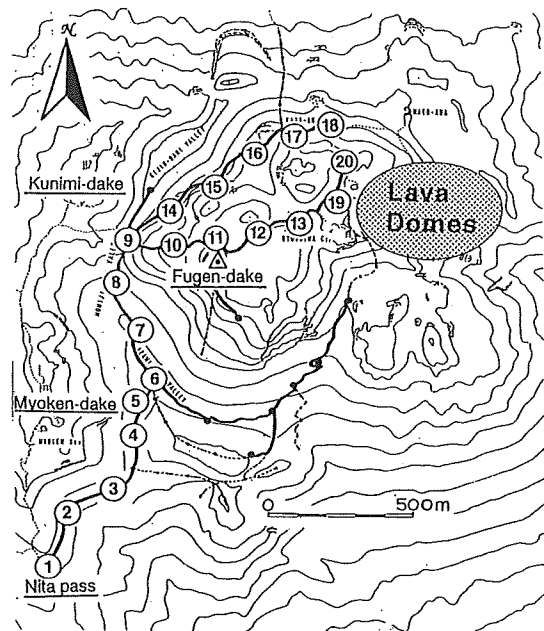


図3: 繰り返し観測点配置図

#### 4) 臨時の移動観測.

上述の繰り返し観測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、臨時的に銅-硫酸銅電極を用いた移動観測を実施した。具体的には、妙見カルデラの北西部に位置する鬼人谷や、普賢岳山頂からほぼ真南に山中を下るルートなどを調査した。

### 3. 観測結果

#### 3.1 自然電位の空間分布

上述の繰り返し観測と、臨時に実施した移動観測を元に、調査範囲の自然電位分布図を作成した。図4、図5はそれぞれ溶岩ドームが出現してから約半年後の1991年12月23日、およびそれから約1年後の1992年12月18日の電位分布図である。電位の基準はいずれも仁田峠(図2のA点)にとっている。2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) 薊谷付近は標高が下がるにつれて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)に低電位の目玉がある。

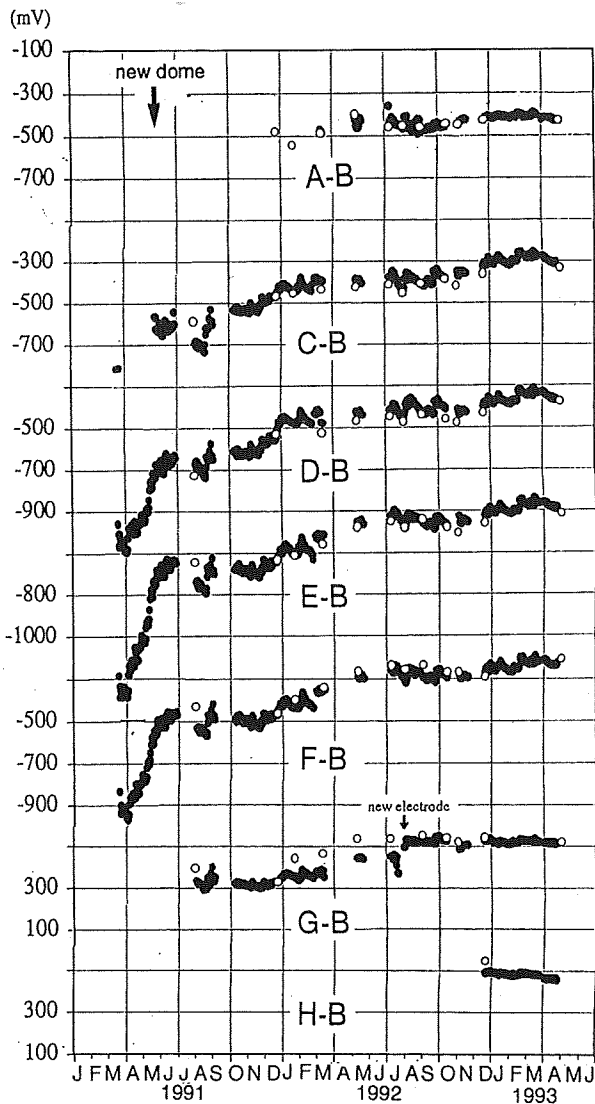
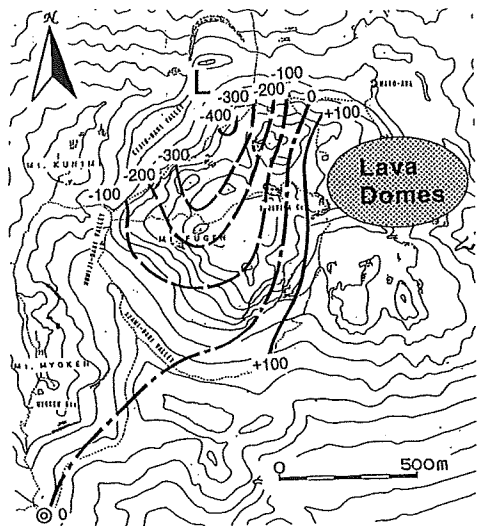
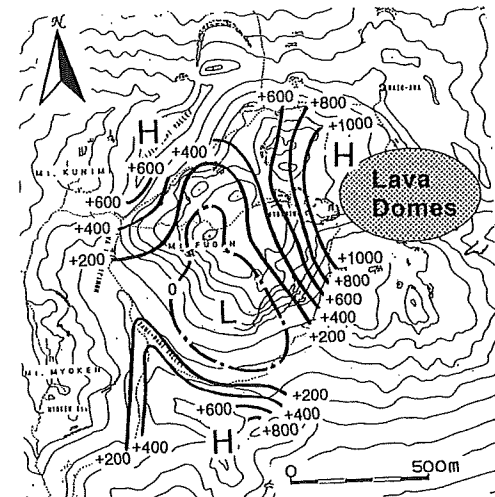
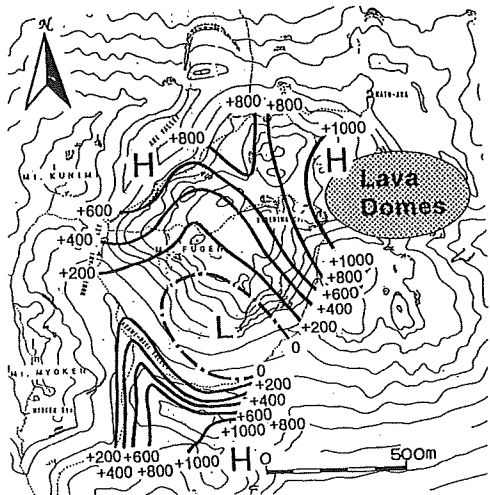
さらに、図5(1992年12月)と図4(1991年12月)の差をとると図6のようになる。この図から、2つの時期の間に次のことが起こったことがわかる。

- 4) 溶岩ドームの近傍で100mV程度電位が上昇した。
- 5) 溶岩ドームの西北西約500m付近を中心として最大400mV程度の電位の低下があった。
- 6) それ以外の領域(例えば薊谷周辺)ではほとんど有為な電位変化がなかった。

#### 3.2 自然電位の時間変動

上で見たように図4から図5にかけての時期は主に溶岩ドームの北西部で電位変動が見られたが、それより以前には、溶岩ドームの南西部が大きな電位変動を示していたことが次に示す図7からわかる。図7は1991年3月から1993年4月までの南測点群の連続記録である。連続観測を開始した当初はA点の観測がなかったため電位の基準はいずれも薊谷(B点)にとっている。なお、1992年11月からは北測点群の連続記録もあるが、期間が短く、また特に大きな変動も見られなかったので本稿では割愛する。図7からは次のことが読み取れる。

- 7) 1991年5月の第1溶岩ドーム出現前後で薊谷から見て火口側の測点は大きな電位上昇を示した。この時期の電位の上昇はE点が最も大きい。残念ながらこの時期には面的な観測がなかったため、この変動が測線と直行方向(北西-南東方向)にどの程度の広がりをもっていたのかは分からない。
- 8) その後も平均的に40~50mV/月程度の割合で電位の上昇は続いている。



(左上) 図4: 1991年12月23日の電位分布図

電位の基準は仁田峠。

コンターの単位は (mV)

(左中) 図5: 1992年12月18日の電位分布図

(左下) 図6: 図5 - 図4

(右) 図7: 1991年3月から1993年4月までの

南測点群の連続観測記録。プロットは日平均値。白い点はCu-CuSO<sub>4</sub>電極による平行観測の値。G点は1992年8月に電極を取り替えた。

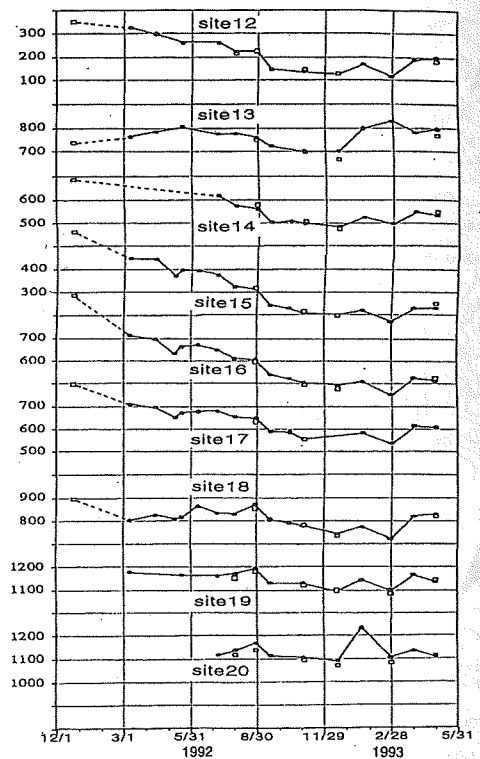
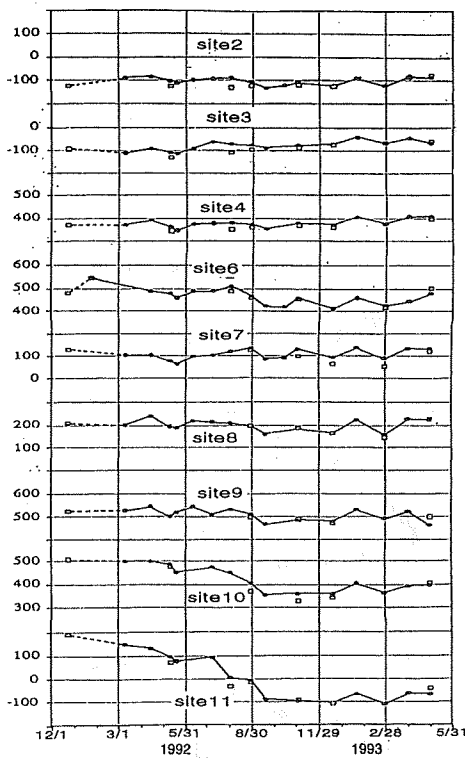


図8: 繰り返し観測の結果. 縦軸は100mV/div.  
 白点はCu-CuSO<sub>4</sub>電極による平行観測の値.  
 site5は観測していない.

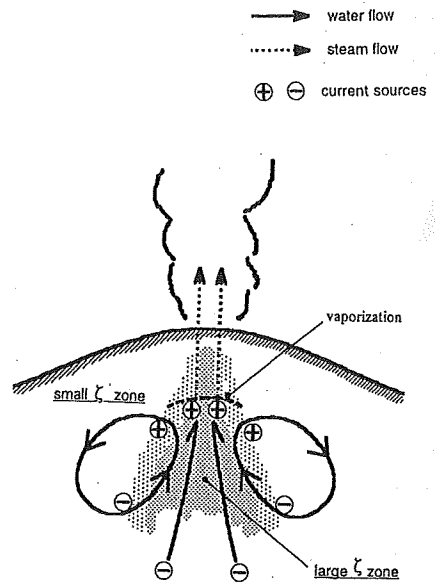
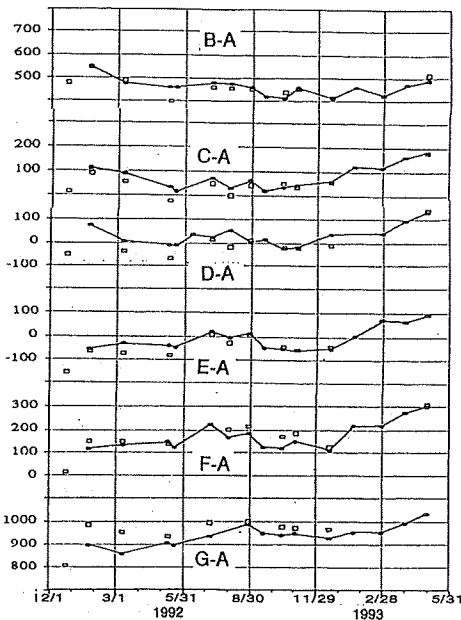


図9: 熱水対流によって発生する電流源.

8)の変動に加えて、夏期には電位の上昇が停滞し、冬期に電位上昇が進行する傾向があるようにも見える。地下の水位変化等による年周変化は十分に考えられることであるが、定量的な議論をするにはデータが不足している。

次に、1991年12月から1993年4月までの繰り返し観測の結果を図8に示す。電位の基準は仁田峠(A点)にとっている。比較のために、連続点(B~G)についても同じフォーマットで変動を示してある。繰り返し観測の結果からも4), 5), 6)の事実がよりはっきりと読み取れる。連続観測、繰り返し観測ともに、銅-硫酸銅電極によって平行観測を行ったが、両者の値はほとんど一致している。

#### 4. 観測結果の解釈

##### 4.1 地形の効果

3.1の2)の事実についてはこれまで、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してきた(橋本ら(1992))<sup>1)</sup>。その後、蘆谷と同じような地形を持つ鬼人谷で移動調査を行った結果、標高に対する電位の変化率は約-10mV/mと蘆谷とほぼ同じ値を示した。1984年のNEDOによる雲仙西部地域の自然電位広域調査<sup>3)</sup>によって求められたこの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。蘆谷や鬼人谷の凹陷地形には、周囲から地下水が集まってくることが容易に想像される。地下水の流量密度の増加は、界面動電現象による電流密度の増加につながり、それによって生じる流動電位も大きなものとなるであろう。蘆谷や鬼人谷ではこのような理由で局所的に地形効果が強く、高電位となっているものと考えられる。

##### 4.2 熱水対流の効果

3.1で述べた1)の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。鍵山ら(1992)<sup>4)</sup>のMT観測によれば、火口原の直下には帯水層が存在するとされている。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(橋本ら(1992))<sup>1)</sup>。

単純化した溶岩ドーム地下の推定断面図によってそれを説明する(図9)。実験(Ishido & Mizutani, 1981)<sup>5)</sup>によれば、温度が低くなるに従って流動電位係数は小さくなる。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、図のように温度勾配を横切って熱水の対流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、地熱流体が気化してしまうと、もはや界面動電現象を起こさないの、液相と蒸気相の境界では正電荷が取り残される。ここでも正電流源が発生することになる。このような場合には、溶岩ドーム直下は正電流源となり、対流が戻っていくやや深い領域が負電流源となるはずである。

負電流源が正電流源よりも十分深部にある場合には、地上の電位に負電流源が大きく影響することはない。以下、溶岩ドーム直下に正電流源のみが存在すると仮定し、石戸(1992)<sup>6)</sup>の方法を使っていくつかの量を見積もってみる。

今、電流源の強さを  $I$ 、その深さを  $d$  とする。一様な半無限空間を想定すると、地表で観測される電位  $\phi(r)$  は次のように表される。

$$\phi(r) = I \cdot \rho / \{2\pi \cdot (d^2 + r^2)^{-1/2}\} \quad (1)$$

ここで  $r$  は電流源までの水平距離、 $\rho$  は大地の比抵抗を表す。観測された電位分布から見て、溶岩ドームを中心とした正電位異常の空間的広がり半径は約500m程度であるから、(1)式より正電流源の深さはおよそ200mと推定される。これは、鍵山らの観測から推定されている帯水層の深さ(150m)ともほぼ一致している。大地の比抵抗を今、仮に  $100 \Omega \cdot m$  で一様とすると、観測された電位異常の大きさが1Vであるから、等価電流源の強さは約10Aと推定される。更に、いくつかの量を仮定すれば電流量から熱水対流の物理量についての推定を行うことが可能である。Ishido & Mizutani(1981)<sup>5)</sup>によれば、電流量  $I$  と、媒質の空隙率  $\eta$ 、トーチオシティ  $t$ 、浸透率  $k$ 、間隙流体の誘電率  $\epsilon$ 、ゼータ電位  $\zeta$  の間には次のような関係が成り立つ。

$$I = \{ \eta \cdot t^{-2} \cdot \epsilon \cdot \zeta \cdot J \} / k \quad (2)$$

$\eta \cdot t^{-2} \sim 0.2$ 、 $\epsilon \sim 7 \times 10^{-10}$  (F/m) (水27°C)、 $\zeta \sim 0.1$  (V)、 $k \sim 0.1$  (darcy) を採用すると、流体流量は約1万トン/日と推定される。もしもこれがすべて気化して水蒸気として地上に放出されたとすると、その熱放出量は約300MWと見積もられる。噴気のビデオ映像から推定された熱放出量は1000MWという見積もりがなされている(鍵山、私信)。パラメータの誤差を考えれば2つの値はよく一致していると考えられる。1)の正電位異常がこのような地下の熱水対流によるものと考えれば、4)の事実は熱拡散によって対流が発達あるいは拡大したことを意味すると考えられる。火口近傍の地磁気観測(Tanaka, 1993(b))<sup>7)</sup>からも、溶岩ドーム貫入後、地下浅部で熱の拡散が進んだことが示唆されている。

#### 4.3 時間変動を示した領域についての考察

図7や図8を注意深く見れば、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ことがわかる。これらが火山活動によって直接、あるいは二次的に誘起された変動であることはほぼ間違いない。しかも、変動を起こした領域はせいぜい数百mの空間的広がりしか持たないことから、変動のソースは比較的浅部(数百m以浅)にあるはずである。

具体的に地下で起こった現象についてはいくつかの可能性が考えられるが、単純化すれば次の2つに帰着されると考えられる。

\* 溶岩ドーム直下の熱水対流系そのものの消長、移動。(=正電流源の消長、移動)

\* 周辺部から火口へ向かう局所的な地下水の吸い上げとその供給経路の移動。(=負電流源の移動)

現時点ではそのいずれが正しいかについて結論を得ることは難しいが、今後、他の物理量の観測からその可能性を限定していくことは可能であろう。

## 5. まとめ

雲仙普賢岳を中心とした約1km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2年余りに亘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3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) 薊谷及び鬼人谷に見られる標高相関の正電位異常。
  - (c) 溶岩ドームと薊谷の間、及び溶岩ドームと鬼人谷の間の領域で見られた電位の上昇、及び低下。
- 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。異常の空間的広がりとその強さから、ソースの深さ、電流量、流体流量、熱放出量などについて推定を行った。
- 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約5倍大きい。これは、谷地形による集水効果が働いているためと考えられる。
- 4) (c) の変動は、いずれも火山活動によって誘起されたものであると考えられるが、詳細な因果関係は今のところ解明できていない。

## 6. 謝辞

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便宜をはかって頂きました。また、大学合同観測班の皆様にも多大なる助力を頂いたことを深くお礼申し上げます。



## 参考文献

- 1) 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 1992年C A研究会論文集 p.249-255 (1992)
- 2) 太田一也 雲仙火山-地形・地質と火山現象- (1984)
- 3) NEDO 地熱開発促進調査報告書 No.15. 雲仙西部地域 (1988)
- 4) 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, 松尾綱道, 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)
- 5) Ishido, T. and Mizutani, H. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics: J. G. R., vol. 81, p. 1763-1775. (1981)
- 6) 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 1991年C A研究会論文集 p. 86-93 (1991)
- 7) Tanaka, Y. Volcanomagnetic effects on the Unzen Volcano(1990-1992): J. G. G., in printing (1993(b))