

地下熱水活動の指標としての自然電位
—1990～1995年雲仙岳噴火におけるケーススタディー—

京都大学理学部 橋本武志

Self-Potential as an Indicator of Subsurface Hydrothermal Activity
—A Case Study on the 1990-1995 Eruption of Unzen Volcano—
Takeshi HASHIMOTO
Faculty of Science, Kyoto University

1. はじめに

活動的火山では自然電位（SP）の異常が検出されることがある。特に、噴気地や高温異常域では正のSP異常が見られることが多くそれらはしばしば熱水の上昇を示す兆候として注目される。正のSP異常を地下の熱水上昇に結び付ける考え方は、流動電位（多孔質媒質中の流体流れに伴うイオンの選択的輸送によって発生する電位差）の理論に基づくものである。数百mVを超えるような大きな電位異常を説明できる機構は現在のところこの流動電位以外には有力なものがなく、最近の研究はこの考え方を基軸としたものが多い。

地表のSP異常と地下の流体流動の関連が指摘される一方で、多孔質媒質中の流体流動や熱輸送そのものの研究も盛んに行われてきた。活火山のフィールドは、しばしば地下熱水系における過渡現象が実現される場であり、準定常的な熱水系のフィールドである地熱地帯とは違った意味で興味深い研究対象であるといえる。

1990年11月、198年ぶりに始まった雲仙火山の噴火は、総計約2億m³のデイサイト溶岩を地表に噴出して1995年5月にほぼ終息した。この噴火は、ある時点に地下浅部にセットされた熱源が周辺の地下水を加熱しながらどのように熱水系を形成していくかを考察するには格好のイベントといえる。著者を含む観測グループは今期の噴火のほぼ全期間を通じて活動火口周辺のSPを連続観測および繰り返し測定によって調査しており、初期の観測結果に基づく予察的な解釈は Hashimoto and Tanaka (1995)¹⁾に報告されている。また、本研究会でもこれまでの観測の経過とその解釈が報告されている（橋本他 (1992)²⁾、橋本他 (1993)³⁾。本稿では、SPを地下の流体流動を間接的に捉える手法として位置づけ、噴火終息までの一連の観測データに基づいて得られた知見をまとめる。

2. 1990-1995年雲仙岳噴火の概要

雲仙火山は島原半島のほぼ中心に位置するデイサイト質溶岩からなる火山群の総称であり、雲仙火山の中央部には妙見カルデラと呼ばれる南東側に開いた馬蹄形カルデラが形成されている。普賢岳はその中心部に位置し、妙見岳、国見岳、江丸岳などがカルデラ縁を形作っている。

1989年11月から12月にかけて、今期の噴火の端緒となった一連の地震活動が雲仙火山の西に位置する橘湾内に発生した。1990年7月以降、震源域は島原半島西部にその深度を浅くしつつ移動した（馬越他、1994⁴⁾。また、この頃から火山性微動も発生し始めている。1990年11月17日には山頂の地獄跡（じごくあと）、九十九島（くじゅうくしま）両火口が噴火を開始、翌年2月12日には屏風岩（びょうぶいわ）火口も活動を始めた。同年5月20日には溶岩ドームが出現し、これ以降火砕流が頻繁に発生するようになった。溶岩はその出口を変えながら噴出と崩落を繰り返しつつ全体としては溶岩ドームを成長させていった。時間を追って溶岩ドーム上に形成されては崩落した溶岩の塊はローブと呼ばれ、1995年までに13個の溶岩ローブが出現した。溶岩ドームの成長様式は、当初溶岩の噴出と崩落を繰り返す外成的成長が主であったが、1993年末以降は、局所的かつ急激な地殻変動を伴う内成的成長が主要な部分を占めるようになった（九州大学他、1994⁵⁾。1995年以降は溶岩の噴出がほぼ停止するとともに、表面的な火山活動も終息した。今期の噴火に伴う主なイベントを時系列にして第1図に示す（溶岩噴出量のグラフは Nakada and Shimizu (1995)⁶⁾による）。

3. 観測

著者を含む観測グループは、溶岩ドームが出現する約2カ月前の1991年3月から雲仙岳山頂部でSP観測を開始した。第2図に電位測定点の配置を示す。電極(鉛-塩化鉛)は各測定点の約50cm深に埋設した。当初はドームの南西側に配置した6点(第2図のB~G)で連続観測を行っていたが、その後1991年12月に測定点を拡充してからは繰り返し測定による面的な電位分布が得られるようになった。連続観測のサンプリング間隔は40分とした。繰り返し測定はほぼ1カ月に1度の頻度で実施した。また、埋設された電極のドリフトをチェックするため、繰り返し測定の際に銅-硫酸銅電極と埋設電極との電位差を測定した。第3図-(a),(b),(c),(d)にそれぞれ1991年12月、1992年12月、1993年12月、1994年12月のSP分布を示す。最も顕著なSP変化は溶岩ドームが出現した1991年5月の前後で観測されたが、この時期にはまだ面的な測定が行われていなかったため第3図中には示されていない。ドーム貫入に伴うSP変化については後に論じる。ドーム出現後も有為なSP変化が観測されたが、調査範囲の基本的な電位分布の特徴は変わっていない。第3図に示された各時期のSP分布には共通して3つの高電位域(H1, H2, H3)と1つの低電位域(L1)が認められる。Hashimoto and Tanaka (1995)⁹⁾に記述されているように、H1とH2は地形効果による高電位であると考えられる(一般に地形標高の低いところほど高電位となる)。また、溶岩ドーム近傍に見られるH3の高電位は熱水の上昇流に伴う流動電位が原因であると考えられる。第3図に見られるように、L1の低電位は時間と共にその強度と位置が変化している。L1の時間変化については後述する。

噴火に伴うSP変化の様子は普賢岳の南北で大きく異なっていた。ここでは、南北の代表点としてそれぞれSite DとSite 15の時系列プロットを第4図に示す。観測されたSPは、溶岩ドームの成長様式の変化(外成的/内成的)やドーム近傍の局所的地殻変動に大きな影響を受けているようである。そこで、特に両者の対応関係に着目して噴火を3つの時期に分ける。第1期は1991年3月から1991年6月までであり、観測開始から溶岩ドーム出現までに対応し、マグマ頭位が地表に向かって上昇していた時期にあたる。この時期には南側の測点群で急激な電位上昇が観測されている。第2期は1991年6月から1993年12月までの約2年半で、この時期に溶岩ドームは主として外成的成長を見せた。南側でのSPは上昇を続けたが、その上昇率は、ドーム出現を境に明瞭に変化した。例えば、site Dにおいては第1期の電位上昇率が約5.7mV/dayであったのに対し、第2期には約0.4mV/dayとなっている。一方、この時期に北側の測点群では電位が低下している。最も変化が大きかったsite-15での電位低下率は約-1.4mV/dayであった。第3期は、1994年1月以降で、ドームの成長様式が内成的になり、やがて噴火が沈静化していった時期にあたる。南側の測点群では電位上昇率がやや大きくなったのち、1995年以降はほとんど停滞している。北側の測点群では、第2期の電位低下が上昇に転じたのち、1995年以降はやはりほとんど停滞したことが第4図から読み取れる。

4. SPから推定される地下熱水系

流動電位は、多孔質媒質の固液境界面に沿った流体流れによる選択的な電荷の運搬(携帯電流)がその起電力となって生じる現象である(通常の地質環境においては正の電荷が流れと共に運ばれる)。流れに沿って流動電位係数(流体流れに伴う電荷の運ばれ易さを表す係数)が急激に減少するところで正の過剰電荷が取り残されて携帯電流につりあう伝導電流源が発生する。流動電位係数が空間的に非一様になる原因として、流れに沿った温度変化(流動電位係数は温度が高いほど大きくなる(Ishido and Mizutani, 1981)⁷⁾)や固体側媒質の物性の非一様などが考えられる。火山の噴気地帯では水蒸気の上昇流に伴って正電荷が運ばれるが、噴気が地表に放出される際にはこの電荷が置き去りにされる(もしくは温度低下による流動電位係数の低下)ため地表では正のSP異常が発現していると考えられる。なお、系全体では電荷の中性条件により地表付近の正の電流源に見合う負の電流源が系のどこかに存在する必要がある。噴気が地表に放出される場合の流れを考えると、上昇流の出発点付近に負の電流源があるはずだが、このような場所として熱源(マグマ)が周囲の地下水を加熱沸騰させている箇所などが考えられる。こうした箇所が十分深い位置にあれば、地表で観測される正のSP異常は第1近似的には地表付近に置かれた正の等価電流源だけで説明可能であるが、正電流源と同程度の深さにある場合には両者を考慮に入れた解釈が必要になる。

地表で観測される生のSP分布には地形標高の高低差に起因するいわゆる地形効果の電位分布や、地

質の違いなどに起因するやや長波調のバックグラウンドの電位分布が潜在的に含まれているので、これをそのまま火山活動に起因する流体流動の効果のみとして評価する訳にはいかない。地形標高に対する電位勾配の係数を調査範囲内で一様と仮定した1次の補正が行われることがあるが、この手法を不均質性の強いフィールドに適用すると奇妙な結果を与える危険がある。ことに、雲仙岳の場合には第3図のH1, H2 付近に見られるように-7~-10mV/mという大きな地形効果があり、これによって単純な補正を施すと小さな異常がかえってマスクされてしまう可能性がある。そこで、以下の第2期と第3期の議論では、ある時点の電位分布を仮想的な初期状態とみなした時間変化分のみを考察の対象とすることにする。バックグラウンドの電位分布は時間的に不変であると仮定すれば、原理的にはこの処理によって、火山活動に起因する変化分を抽出できることになる。以上のような考え方に基づいて、前節の3つの時期について考察を行う。

第1期 (1991年3月~6月; マグマ頭位の上昇に伴う熱水上昇流の発達)

第5図は、第1期について、連続観測点 B~G における電位をそれぞれ月毎に平均して測線に沿った月毎の空間分布の時間変化を示したものである。測線に沿った地形標高のプロファイルも併せて示してある。大局的には溶岩ドーム側で高電位となっているが、ドーム貫入前の電位上昇は測点E付近を中心として起こっていることがわかる。このことは、ドーム貫入以前の水蒸気噴火によって活動火口を中心とした正のSP異常が既に形成されていたところに測点E付近の地下に新たな正の電流源がつけ加わったことで説明できる。

大学合同観測班のMT観測によれば島原半島の広い範囲で海拔-1.0km~+0.5kmに水を多く含むと考えられる低比抵抗層が捕捉されている(大学合同観測班, 1992)⁹。溶岩ドームが地表に出現するまでの水蒸気噴火の段階では噴気中の水には天水起源成分が半分程度含まれていたことが火山ガスの同位体分析から明らかにされている(Hirabayashi, 私信)ことを考えると、噴火初期には主にこの深さの地下水が加熱されて上昇し噴気として放出されていたと思われる。従って、この時期の負電流源は熱水の上昇が始まる海拔下1km付近に固定されており、マグマ頭位の上昇に伴って効果的に電荷を運搬できる高温部分に対応した正電流源のみが浅部に移動してきたと考えられる。この状況を第6図-(a)に模式的に示した。

第2期 (1991年6月~1993年12月; 浅部熱水対流系の形成)

第4図から読み取れるように、第2期における自然電位変化の特徴は、南側の測点群で電位が上昇しているのに対し、北側の測点群では電位が低下していることである。このことは、第3図-(a),(b),(c)に示されたSP分布の変化で低電位域 L1 がその中心をやや北に移しつつ強くなっていったことに対応している。

先述した通り、ここでは電位分布の時間変化分を議論する。第2期の初期状態としては本来1991年6月の電位分布を使用するべきであるが、この時期には面的な測定がなかったので1991年12月を仮想的な初期状態として、時間変化分を第7図-(a)に示した。

第7図-(a)から読み取れるように、この時期の電位低下は、site 15 付近を中心として直径500m程度の範囲に及び、その量は最大-500mVに達している。一方、電位上昇は溶岩ドーム南西部を中心として起こっているように見える。観測された電位上昇量は最大+300mV程度である。電位上昇の範囲は、等値線が閉じていないので不明瞭であるが、+200mV以上の領域をもって電位上昇域の南西半分とみなせばその広がり先述の電位低下域とほぼ同程度である。

溶岩ドームの貫入後、地下浅部に高温のマグマから準定常的に熱が供給されるようになると近傍の間隙水が加熱されて上昇流を形成したと考えられる。上昇流ができると、欠損した間隙水を補う流れが生じて周囲では地下水の下向きの流れが生じたと推定される。上昇流がドーム南西部の電位上昇を、site 15 付近を中心とする局所的な下降流が電位低下をもたらし、時間と共にこれらが徐々に発達したと考えられると観測事実をうまく説明できる。この状況を第6図-(b)に模式的に示した。

第3期 (1993年12月~1995年; 上昇域の拡大)

第3期におけるSP変動を抽出するために、先程と同様に第3図-(c)と(d)の差をとり、第7図-(b)に示した。この図から明かなように、第3期の電位上昇は溶岩ドームの南西部を中心として起こっている。

第3期は、溶岩ドームの主たる成長様式がそれまでの外成的成長から内成的成長に変化したことで特徴づけられる。溶岩ドームが内成的成長を起こした時期には、しばしばドーム近傍で急激な地殻変動が観測されている(地質調査所, 雲仙岳測候所, 1995)⁹⁾ことからわかるように、浅部の破碎が急速に進行した。ドームの内成的成長は、火道が閉塞された状態のときに起こっており、ドーム内部ではマグマが出口を求めて内圧を高めていたと考えられる。内成的成長の状況下で出口がキャップされた為にドーム直下の熱水上昇の領域が周囲に広がったと考え、ドーム近傍の高電位域が拡大したことを説明できる(第6図-(c))。

4. 議論

(1) 下降流の位置

第2期の電位低下がsite 15付近で局所的に起こったことは、妙見カルデラの浅部構造に関係があると考えられる。雲仙岳山頂部周辺ではさまざまな手法で大地比抵抗の調査が行われた(例えば、茂木他(1995)¹⁰⁾の空中電磁探査、著者の直流電気探査(Schlumberger method, dipole mapping method)など)。これらを参考にして妙見カルデラ西部の北西-南東断面を描くと第8図のようになる。妙見カルデラの西外輪部(妙見岳および国見岳)は周囲よりも高比抵抗である。このことは、外輪部が周囲に比べてより緻密で水分に乏しい岩帯で形成されているためと考えられる。一方、普賢岳側では、表層100-200mの高比抵抗層(数k~数十kohm-m)の下に低比抵抗層(数十~数百ohm-m)が捕捉されている。このことは、茂木他(1995)¹⁰⁾でも指摘されているように、表層の普賢岳期溶岩類の下に、風化が進行して含水量が多くなっている層が存在しているためと考えられる。前節に述べた第2期の対流形成に伴う地下水の下降は緻密なカルデラ外輪に沿って生じると考えられるが、その際、下降流の始まる第2層の上面付近で負の電流源が発生すると考えられる。このように考えれば、第2期にsite 15付近で局所的な電位低下が生じたことが説明できる。

(2) 他の観測量との比較

山頂部の地殻変動(光波測距による斜距離変化; 地質調査所, 雲仙岳測候所, 1995)⁹⁾と、プロトン磁力計による全磁力変化(田中他, 1995)¹¹⁾をSP変化と併せて第9図に示した。特に顕著な地殻変動と磁場変化は、1991年5月と、1993年12月に観測されている。これらの時期が、自然電位が顕著な変化を示した時期ともほぼ一致していることは注目し得る。田中他(1995)¹¹⁾は、前者の磁場変化が、主としてマグマの貫入に伴って磁性体である火山岩が押し退けられた効果で説明できるとしており、また、後者の磁場変化については、ドームの約200m西方の地表に極めて近い位置に等価消磁源を仮定するモデルで説明できるとしている。彼らは、雲仙岳の噴火は大きな地殻変動や熱水活動を伴っているため、磁場変化の原因を特定するのは必ずしも容易ではないとしているものの、破碎された地殻内を火山ガスや熱水が流動できる状況下においては、熱拡散が容易に進行するので熱消磁過程が重要になると指摘している。1993年12月の磁場変化をこのような観点でとらえるならば、この時期に溶岩ドームの成長様式が内成的になったことで、地表近くでは熱水や火山ガスの出口がドームの周辺に拡大すると共に、熱消磁を進行させたと考えるのが自然であろう。この考えは、自然電位変化から推定した著者の第3期のモデルとも整合する。

第3期の溶岩噴出の様式は、出口が閉塞されているという点で溶岩ドーム出現前の第1期の状態と似ている。SPの変化の仕方もまた、第1期、第3期ともにドームの南西側を中心として起こっているという点で一致している。溶岩ドームの南西側の地下浅部には火山ガスの浸透できる割れ目、あるいは地表まで達しない火道の支流があって、溶岩ドーム側のマグマの出口が閉塞されるとこちらに圧力がかかることを意味しているのかもしれない。

5. 今後の課題

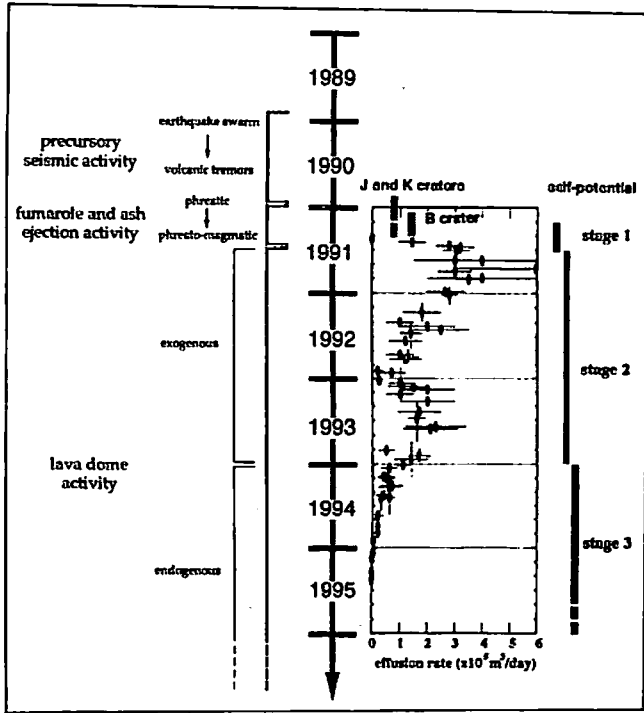
本稿では、各時期に対応したSP変化を、定性的な等価電流源の移動や強度変化で説明した。今後、大地比抵抗構造を考慮した定量的なモデリングを行い、電流源強度から現実の流体流量を見積もる予定である。その際、他の観測から推定されている熱放出量や水蒸気の放出量との整合性も議論されるべきである。

6. まとめ

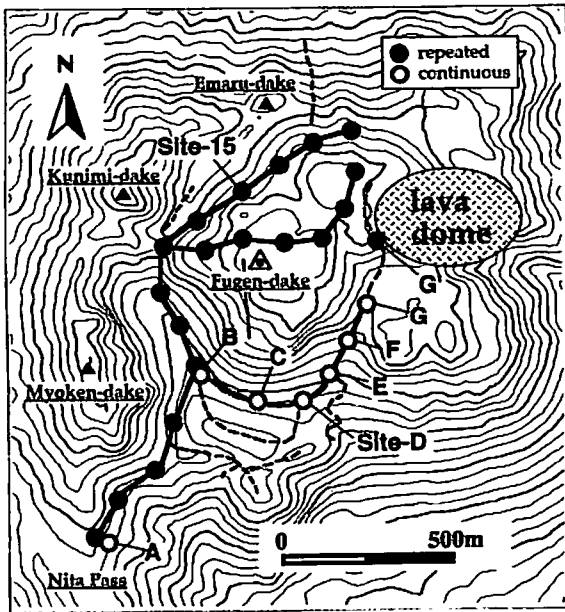
1990-1995年の雲仙火山噴火における熱水および地下水の流動をS Pの分布とその変動から推定した。S P変動の特徴から噴火は3つの時期に分けられるが、各時期はそれぞれ一貫して一つの対流系の発達過程における熱水および地下水の流れで特徴づけられる。雲仙岳では、噴気口近傍に熱水の上昇流があり、その周囲には地下水の下降流が存在して噴気口に水を供給していたと考えられる。更に、時間の経過とともにこのような対流系が発達したと考えれば観測された現象を説明できる。雲仙岳のように地表近くに高温の熱源が貫入した状況下では、噴気口からの水の放出には周囲の地下水の補給が必然的に伴っていて、両者は密接に関連していると考えられる。このような場合、火口周辺部の低電位異常は熱源であるマグマの冷却過程と浅部熱水系の形成過程を考える上で重要な情報を提供する。

引用文献

- 1) Hashimoto, T. and Y. Tanaka, A large self-potential anomaly on Unzen Volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 22-3, 191-194, 1995.
- 2) 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*, 249-255, 1992.
- 3) 橋本武志・田中良和・増田秀晴・歌田久司・鍵山恒臣・増谷文雄, 自然電位観測から推定される雲仙岳の地下熱水対流, *CA研究会論文集*, 178-186, 1993.
- 4) 馬越孝道・清水洋・松尾 道, 精度の良い震源分布から推定した1990-94年普賢岳噴火活動のマグマ上昇経路, *火山*, 39-5, 223-235, 1994.
- 5) 九州大学理学部地球惑星科学科・東京大学地震研究所・大学合同観測班地質グループ, 雲仙普賢岳噴火, 1994年6月～10月の地質学的観察記録, *火山噴火予知連絡会会報*, 60, 119-130, 1994.
- 6) Nakada and Shimizu, The 1991-1994 Activities of Unzendake Volcano, in *Reports on Volcanic Activities and Volcanological Studies in Japan for the Period from 1991 to 1994, presented at the XXI General Assembly of IUGG in Boulder, Colorado*, 2-9, 1995.
- 7) Ishido, T. and H. Mizutani, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 81, 1763-1775, 1981.
- 8) 大学合同観測班地球物理班, 雲仙火山1990～1992年噴火の地球物理観測(その1), *火山*, 37, 209-215, 1992.
- 9) 地質調査所・気象庁雲仙岳測候所, 光波測距による雲仙, 普賢岳の山体変動観測(1994年6月から1994年10月), *火山噴火予知連絡会会報*, 60, 99-106, 1995.
- 10) 茂木透・田中良和・森川剛夫・日下部和宏・棚橋道郎・中塚正・田中耕平・歌田久司, 空中電磁法・全磁力測定による雲仙普賢岳及び眉山の地下構造, *火山*, 40, 263-276, 1995.
- 11) 田中良和・増田秀晴・橋本武志・歌田久司・笹井洋一・鍵山恒臣, 地磁気変化からみた雲仙岳の火山活動, 平成6年度科学研究費補助金・総合研究(A)(課題番号06306011, 研究代表者; 太田一也)・研究成果報告書, 14-21, 1995.

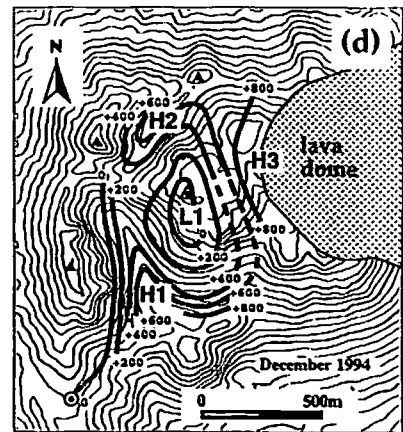
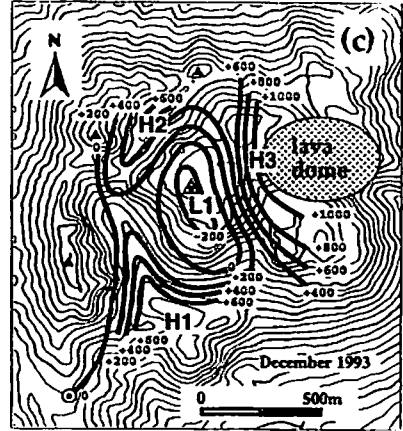
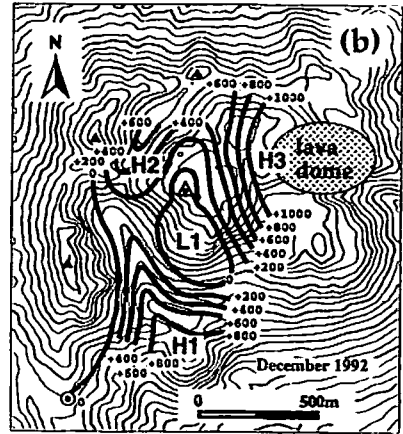
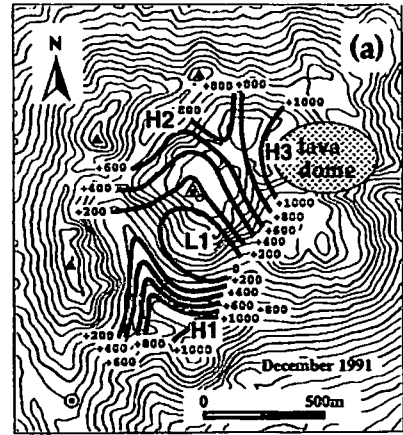


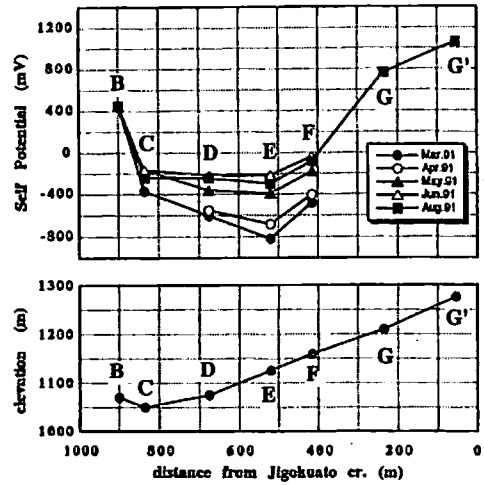
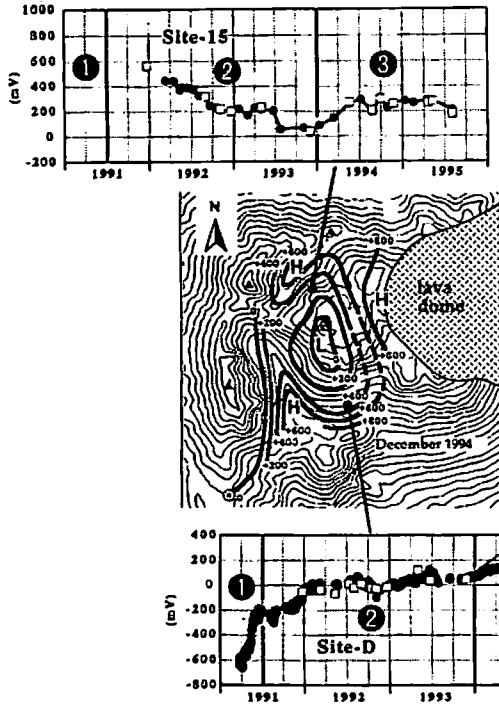
第1図：雲仙岳噴火の概要



第2図：S P観測点の配置

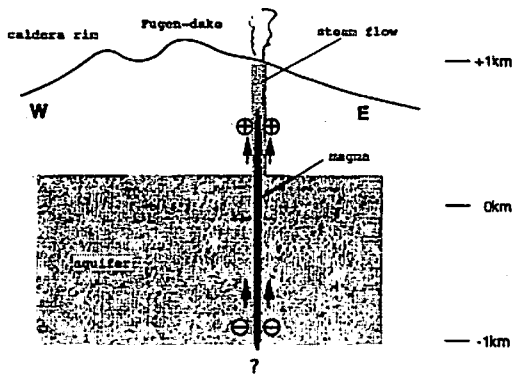
第3図：S Pの等電位線図
 (a)1991年12月 (b)1992年12月
 (c)1993年12月 (d)1994年12月





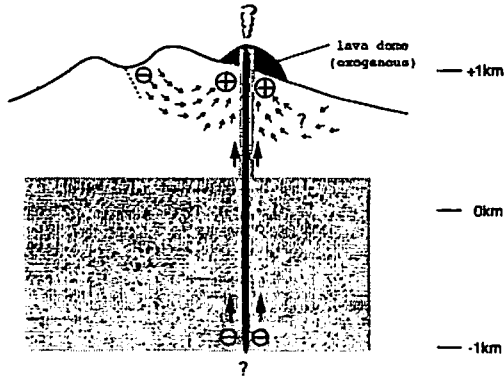
第5図：(上) 第1期における
 ↑ B-G'の電位プロファイル変化
 (下) B-G'の地形標高

(a) First Stage (Mar.1991-Jun.1991)
 hydrothermal upwelling with magma ascent

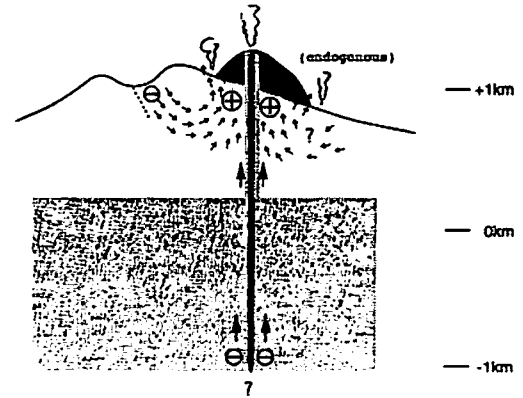


第4図：site 15 および site D における S P の時間変化。黒丸は鉛-塩化鉛電極，白抜きは銅-硫酸銅電極による測定。

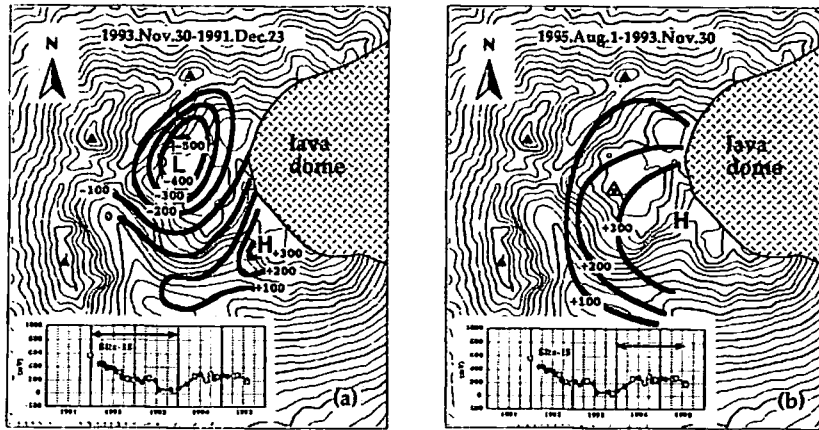
(b) Second Stage (Jun.1991-Dec.1993)
 establishment of hydrothermal convection



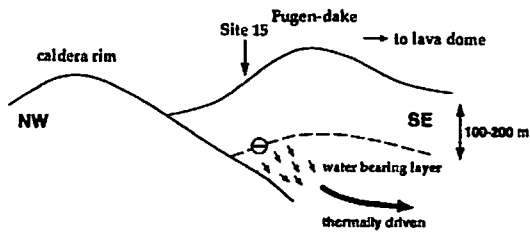
(c) Third Stage (Dec.1993-)
 lateral expansion of upwelling area



第6図：S P変化から推定される等価電流源と熱水系モデルの模式図



第7図：(a)第2期の電位分布変化
(b)第3期の電位分布変化



第8図：妙見カルデラ西部の北西-南東断面図。地表では，site 15 付近で負のSP異常が観測された。

第9図：

- (上) 光波測距による斜距離変化
(地質調査所・雲仙岳測候所，1995)
- (中) プロトン磁力計による全磁力変化
(田中他，1995)
- (下) site 15 および site D の SP 変化

