

伊豆大島 SP 発生モデル再考

石戸 経士 (産業技術総合研究所・地質調査総合センター)

A revised model of self-potential generation on Izu-Oshima volcano

Tsuneo Ishido (Geological Survey of Japan, AIST)

多くの火山で、地形標高に相関した自然電位 (通常、標高が 1m 上がると電位が 1mV 下がる程度) が観測されているが、これは地下に浸透した天水の下降流に伴う界面動電現象によって説明される。地下水位が地形起伏に沿っている場合には、理論的に、均一媒質について電位と標高の間に負相関の成り立つことが示される。また、地下水位が低く数百メートルの深さまで不飽和帯の発達している場合にも、数値シミュレーションから負相関の発生することが示される。

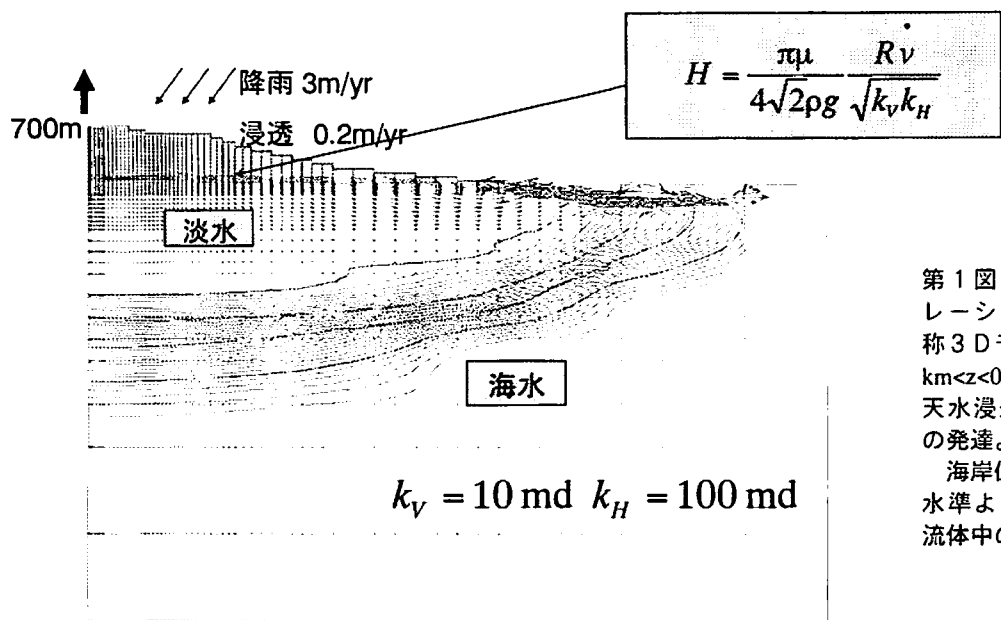
この負相関は通常、火山体の斜面で顕著であるが、山頂部付近でははっきりせず、むしろ正電位異常となっていることも多い (“Wパターン”)。大島について 1996 年に提案したモデルでは、2次元の数値シミュレーション結果に基づいて、山頂の正電位異常は相対的なものであり、山頂火口の噴気活動が天水下降流を打ち消すことによってもたらされ、熱水上昇流によるものは二次的であると推定した (Ishido et al., 1997)。

今回は、1996 年の数値シミュレーションで未検討であった厚く発達した不飽和帯の影響および比抵抗分布不均一の影響を中心に、軸対称 3次元モデルによる再検討を行った。

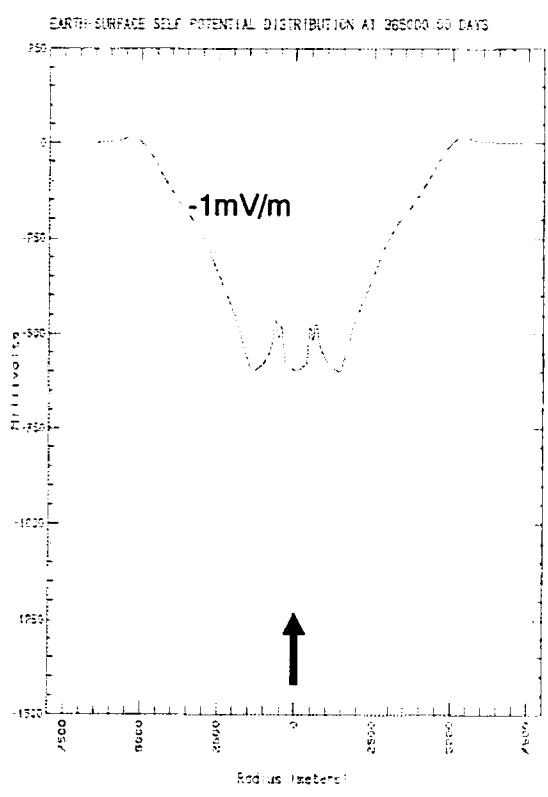
1. 不飽和帯のある場合の標高相関自然電位

数値シミュレーションでは、大島三原山を大まかに模して高さ 700m の軸対称の山体を設定した。まず火山活動のない状態について地表全体に一律な天水浸透量を与え、定常状態を求めた。第 1 図に示すのは、山体の浸透率を水平方向 100md、鉛直方向 10md ($1\text{md}=10^{-15}\text{m}^2$)、天水浸透量 0.2m/yr とした場合の結果であり、海水に飽和した層の上に淡水層がレンズ状に浮かんでいて、さらにその上に海拔~150m から地表まで不飽和帯が厚く存在している。理論的考察から、淡水層上面の海拔標高 H は天水浸透量および山体の水平方向の広がり に比例し、浸透率に逆比例することが示されるが、天水浸透量を変えて行った数値シミュレーションでは理論的予測と同様の結果を得た。

第 2 図に示すのは、EKP プロセッサ (Ishido and Pritchett, 1999) を第 1 図の流体流動シミュレーション結果に適用して得た地表の電位分布である。半径 1.5km 以内のカルデラ部分で局所的な高電位がみられるが全体的には -1mV/m の標高相関の電位が発生している。天水浸透量を 0.2m/yr から 2m/yr (年間降水量のほとんどが地下に浸透するとした場合) へ 10 倍に大きくすると、標高相関は -2mV/m 強となるが、その増加は顕著でない。この原因は、不飽和帯中の携帯電流の大きさが天水浸透量に敏感でないこと、また電気伝導度が浸透量が増えるに従い増加することなどによっている。



第1図 流体流動シミュレーションに用いた軸対称3Dモデル ($0 < r < 9\text{km}$, $-5\text{km} < z < 0.7\text{km}$ の範囲) と、天水浸透による不飽和帯の発達。
海岸位置は $r=5\text{km}$ で、海水準より下のコンターは流体中の塩分濃度を示す。



第2図 第1図の状態に EKP ポストプロセッサを適用して計算した地表電位の分布。

$$(1) \quad I_{\text{drag}} = \eta r^{-2} \frac{\epsilon \zeta}{\mu} R_{\text{ex}} \nabla(p + \rho g z)$$

$$= -\eta r^{-2} \epsilon \zeta \frac{R_{\text{ex}}}{R_L} \frac{\dot{v}}{k_z}$$

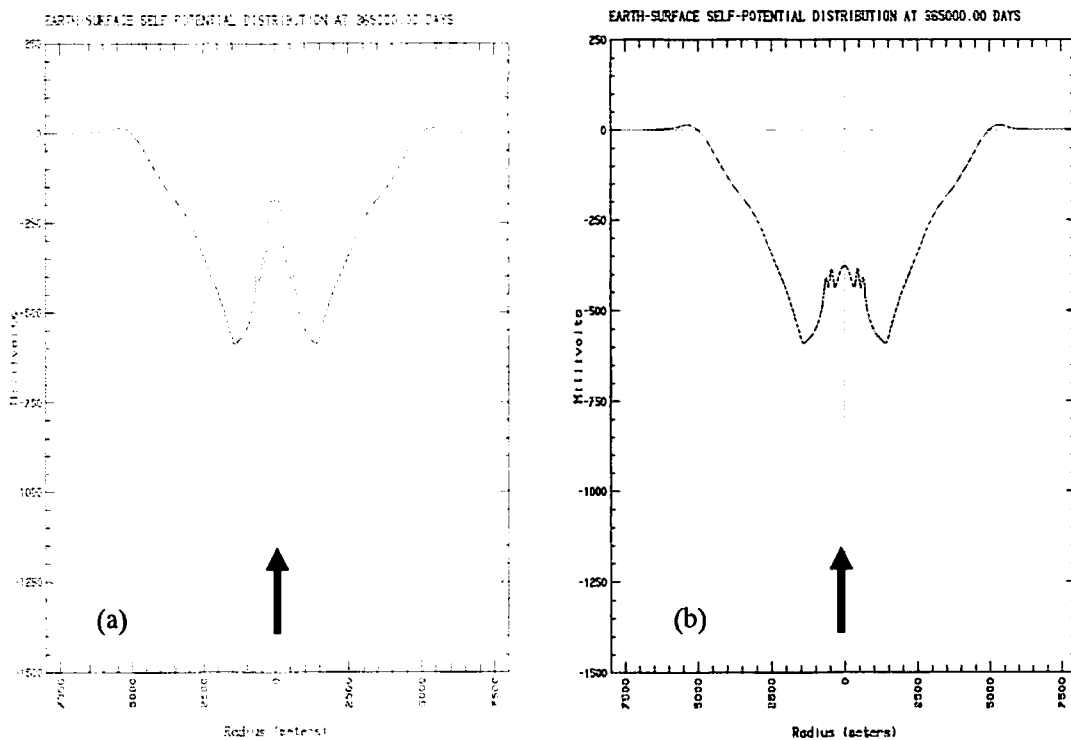
$$(2) \quad \frac{\dot{v}}{k_z} = 0.02 \text{ m/yr/md} \Leftrightarrow -1 \text{ mV/m}$$

= 0.1	$\Leftrightarrow -1 \sim 2 \text{ mV/m}$
= 0.2	$\Leftrightarrow -2 \sim 3 \text{ mV/m}$

不飽和領域中を流れる携帯電流は、第2図の(1)式によって表される。重力による鉛直下向きの流れであるので、携帯電流は浸透体積流量に比例し、鉛直方向浸透率に逆比例する。液相飽和度による影響は、 R_{ev} と R_L を通して発生するが、気液二相流の携帯電流低下を表すパラメータ R_{ev} は液相飽和度 S_L より大きいと考えられる(今回のシミュレーションでは $R_{ev} = S_L$ と設定)。また相対浸透率は $R_L < S_L$ の関係を満たすので(今回は $S_L = 1$ における $R_L = 1$ から直線的に減少し $S_L = 0.3$ で $R_L = 0$ と設定)、(1)式中の R_{ev}/R_L は 1 より大きくなる。しかも天水浸透量が小さくなり S_L が残留飽和度 0.3 に近づくほど大きくなるので、結果として携帯電流の天水浸透量への依存度は小さくなる。今回の計算では電気伝導度は S_L に比例するとしたが、これをアーチーの経験式に従い S_L の2乗に比例すると仮定すると、(天水浸透量/鉛直方向浸透率)への依存度はさらに小さくなる。大島以外にも $-1mV/m$ 程度の標高相関が多くの火山で測定されているが、その原因は以上のメカニズムで説明されるのではなかろうか。なお、屈斜路カルデラ中央火口丘で観測されたような $-10mV/m$ といった大きな相関は、不飽和帯がほとんど無く地下水面が地表近くに維持されている場合に発生するものと考えられる。

2. 比抵抗不均一分布の影響

地下の電気伝導度は、岩石と空隙流体の混合物について計算されるが、前節の計算では、岩石による伝導度をゼロとしていた。ここでは、火山体の軸に沿って半径 200m の円柱領域(以下 C



第3図 第1図の状態に対し中心軸に沿って高電気伝導度を仮定した場合の地表電位分布。高伝導度領域の頂部はそれぞれ(a)地表(海拔700m)、および(b)海拔500m。

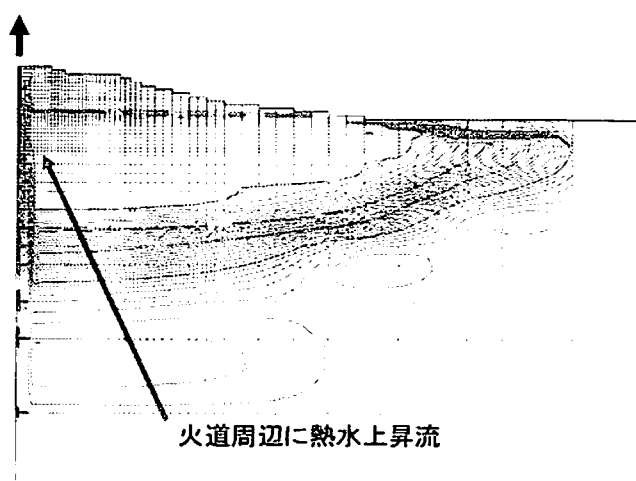
領域) について高い伝導度を与えた場合の計算結果を示す。第 1 図と同じ状態に EKP ポストプロセッサを適用した結果を第 3 図に示すが、(a)は C 領域 (岩石部分の伝導度を 0.1 S/m に設定) の上面が地表にある場合、(b)は海拔 500m (山頂から 200m の深さ) にある場合の結果である。いずれの場合も、第 2 図の結果と比べると、山頂付近が周囲に比べて著しく高電位となっている。天水下降流によって深部は地表付近に比べ高電位となっているが、この高電位が C 領域を通して地表に現れたためと解釈される。第 3 図には示していないが、C 領域の上面を海拔 300m と深く設定すると、第 2 図とほぼ同じ結果となり C 領域の効果はほとんど現れない。

3. 火山活動による SP 変化

海拔 500m までの C 領域を設定した第 3 図(b)に対して、地下でマグマ上昇、脱ガスや熱水対流が発生した場合の電位変化について予備計算を実施した。いずれも熱活動は地下に限られていて地表での噴気活動がはじまっていない状況を想定している。

第 4 図に示すのは、第 1 図に示す状態を初期条件として、火道に沿う半径 50m の領域がほぼ不透水性の固結マグマ (350°C) で満たされ、周囲が徐々に加熱され深部ほど高温になり、火道に沿った 50m<半径<200m の鉛直方向浸透率の大きい領域 (100md) に熱水対流が励起された状態である。この状態について電位を計算した結果を第 5 図および第 6 図(b)に示す。熱活動のない状態での電位分布：第 3 図(b)に比べ、火口付近の電位が 100mV ほど高くなっている。

第 6 図(a)に示すのは、やはり第 1 図の状態を初期条件として、火道に沿う半径 50m の領域に海拔-500m までマグマが存在し、マグマ頂部からの活発な脱ガスによる高温蒸気 (使用した状態方程式の制約から 350°C を仮定) が火道に沿う半径 200m の大きな鉛直方向浸透率の中を上昇する



第 4 図 第 1 図の状態を初期条件として、火道周囲が加熱され熱水対流が発達した状態。熱水上昇流は塩分濃度のコンターから見て取れるように、火道周囲に局在している。

とした場合の結果である。海拔 400m 付近までの火道周囲が高温になった状態で、火口付近に顕著な負異常が発生している。これは火道周囲が高温になるとともに周りに比べ高圧になったため、外側に向かう放射流が発生し、これが火道付近を負に帯電させたためと解釈される。

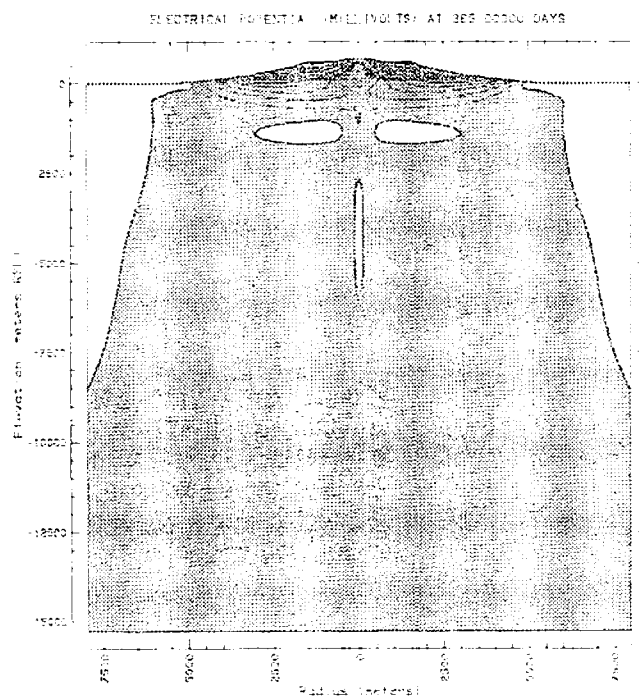
4. 軸対称3Dモデルによる検討結果のまとめ

大島における地下水面位置はカルデラの直下で海拔100-200m程度と推定され(Utada and Shimomura, 1990)、不飽和帯が厚く存在すると考えられる。今回のシミュレーションからは、不飽和帯が厚く存在しても-1 mV/m程度の標高負相関SPの発生することが示された。

三原山火口周辺の高電位、カルデラを横切る測線上に現れる“Wパターン”は、1989年から1994年に至る毎年の測定、および2000年の測定で捉えられ、安定して存在している。1996年の2Dモデルによる数値シミュレーションでは、火口周辺の高電位は、噴気活動によって天水下降流が打ち消されている限りは、噴気量の大小によらず安定に存在すると解釈した。

今回のシミュレーションでは、火口周辺の高電位は、火道に沿って低抵抗領域を設定することで再現された。熱水上昇流が存在しても、低抵抗領域を設定しないと第2図とほぼ同じ結果となり第6図(b)のようなパターンは得られなかった。今回のモデルでは地下水位が低く、その下で発達する熱水上昇によって作られる正異常が、伝導性のチャンネルなしでは地表にまで現れないためと考えられる。

熱水上昇の効果は1996年モデルと同様、2次的であるが、+100mV程度の電位発生があるので、大島で1989年から1990年にかけて観測されたカルデラ内の電位低下は、熱水上昇流の減衰に伴うものとして解釈することもできる。



第5図 第4図の状態について計算した電位断面。

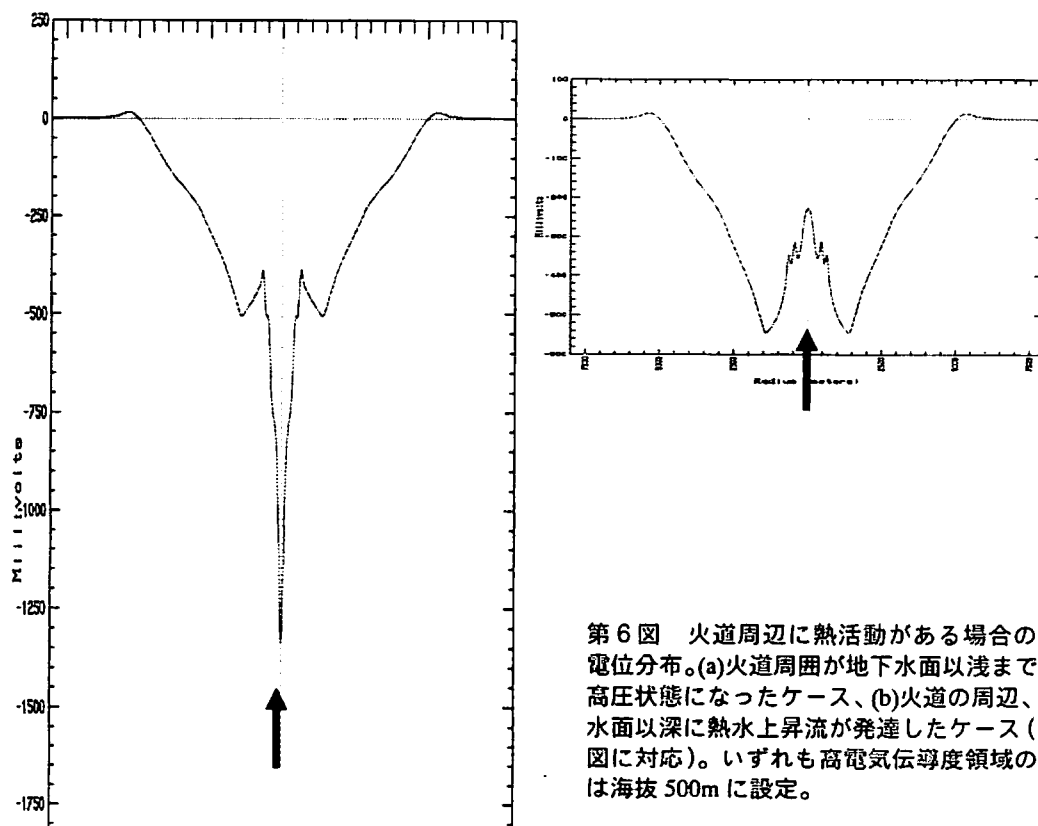
火道周囲が高温高圧状態になった場合の火口周囲の局所的な負電位発生は、火山活動の監視の観点からは興味深い現象であるが、大島での観測では、このような変化を捉えていない。今後、この点については、マグマ貫入からはじまって地表の噴気活動や火道周辺の熱水対流が発達するまでの一連の過程をシミュレーションする中で、より詳細に検討したい。

引用文献

Ishido, T., T. Kikuchi, N. Matsushima, Y. Yano, S. Nakao, M. Sugihara, T. Tosha, S. Takakura, and Y. Ogawa, Repeated self-potential profiling of Izu-Oshima volcano, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 1267-1278, 1997.

Ishido, T., and J.W. Pritchett, Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, *J. Geophys. Res.*, **104**, 15,247-15,259, 1999.

Utada, H., and T. Shimomura, Resistivity structure of Izu-Oshima volcano revealed by the ELF-VLF magnetotelluric method, *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 1267-1278, 1990.



第6図 火道周辺に熱活動がある場合の地表電位分布。(a)火道周囲が地下水面以浅まで高温高圧状態になったケース、(b)火道の周辺、地下水面以深に熱水上昇流が発達したケース(第5図に対応)。いずれも高電気伝導度領域の頂部は海拔500mに設定。