

火山活動に伴う SP 変動

石戸 経士 (産業技術総合研究所・地質調査総合センター)

Self-potential changes associated with volcanic activity

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るが、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、火山体の中腹まで (伊豆大島ではカルデラの縁まで) 顕著であるが、山頂部付近でははっきりせず、むしろ周囲より高電位となっていることが多い (“W字型” プロファイル)。この W 字型の自然電位プロファイルの発生に関しては、前回の CA 研究会で報告したように、火道周囲の低抵抗体の存在が重要な役割を果たしていると考えられる。本稿では、まず前回までの内容をまとめ、次に、火山活動に伴う SP 変化について、これまでに行った予備的シミュレーションの結果を述べる。

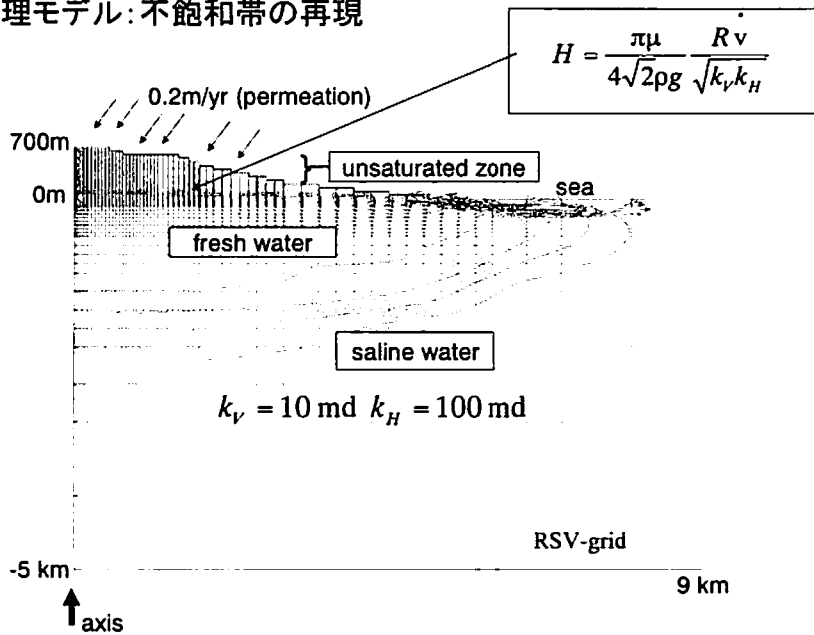
1. W 字型プロファイルの発生

数値シミュレーションでは、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樣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 L 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。

次に、EKP ポストプロセッサ (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電位分布を求めたが、不飽和領域でのカップリング係数、電気伝導度については第 2 図に示す 3 つのモデルを考えた。流動電位係数 C として整理すると、モデル 1 は C が液相飽和度によらず一定の場合、モデル 2 は液相飽和度が小さくなるに従い (電気伝導度が小さくなる効果が効いて) C が大きくなる場合、モデル 3 は、液相飽和度が小さくなるに従い C が小さくなる場合である。いずれを選択するかは、今後の実験的・理論的研究を待たなければならないが、モデル 3 は、最近行われた Guichet et al. (2003) の室内実験の結果に近い。

火道周囲に低抵抗体が存在しない場合、いずれのモデルを用いても、計算された地表電位は山頂部を含め地形標高と負の相関を持ち (第 3 図(a)を参照)、その大きさは -1mV/m 程度となる (な

水理モデル: 不飽和帯の再現



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。

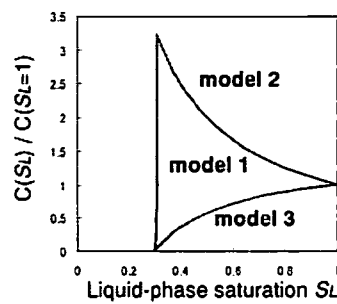
不飽和領域の流動電位係数

$$C(S_L = 1) = \frac{\Delta\phi}{\Delta P} = -\frac{L_{cv}}{L_{ce}} = \frac{\epsilon\zeta}{\sigma\mu}$$

$$\frac{C(0 < S_L < 1)}{C(S_L = 1)} = \frac{R_{cv}}{S_L^n}$$

← reduction in L_{cv}
← reduction in L_{ce}

- model 1**
 $R_{cv} = S_L$ ($S_L \geq S_{LR} = 0.3$)
 $n = 1$
- model 2**
 $R_{cv} = S_L$ ($S_L \geq S_{LR} = 0.3$)
 $n = 2$ (Archie's law)
- model 3**
 $R_{cv} = R_L$ ($S_L \geq S_{LR} = 0.3$)
 $n = 1$



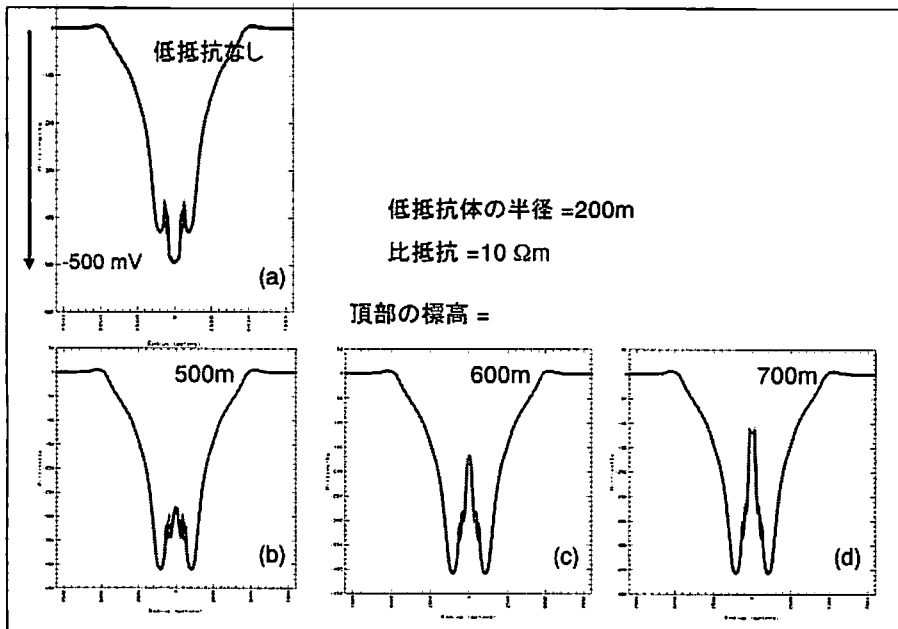
第2図 不飽和領域のカップリング係数と電気伝導度、流動電位係数についての3つのモデル。

お、ゼータ電位の値は、塩分濃度や温度によって違うが、今回の計算条件では、不飽和帯ならびに淡水層では-38 mVで一定している)。標高相関電位の大きさはモデル3が一番小さく、モデル1、モデル2と大きくなる。当然ながらこの差は、地下への天水浸透量が十分大きく地表近くまで地下水位が来ている場合にはなくなる。また、逆に天水浸透量が小さくなり不飽和帯の平均的液相飽和度が小さくなるに従い、モデルによる差は大きくなる。モデル1は、液相飽和度によらず流動電位係数が一定であるから、山体全体が飽和している場合も、地下水位が低く飽和度が残留飽和度の0.3に近い場合も、標高相関電位の大きさは同じになって良さそうである。しかし、今回の流動モデルでは、天水浸透量が小さくなると淡水層の厚さが薄くなり、その下部にある塩水層（良導体）の影響が強くなるため、標高相関電位の大きさは小さくなる。

不飽和帯の平均的液相飽和度は天水浸透量／鉛直方向浸透率によって、また地下水位は天水浸透量／水平方向浸透率によって概ね決まる。天水浸透量を1桁変えた場合、標高相関の電位は最も大きく変化するモデル3の場合でもファクター2程度しか変わらない。また、モデルによる違いも小さい。この結果は、多くの火山で観測されている標高相関電位の大きさが-1 mV/m近くであることを説明するものと考えられる。

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、以上の計算では、岩石による伝導度をゼロとしていた。以下の計算では、火山体の軸に沿って半径200mの円柱領域（以下C領域）について高い伝導度を与えている。第1図と同じ状態にEKPポストプロセッサーを適用した結果を第3図の(b)-(d)に示すが、C領域（岩石部分の伝導度を0.1 S/mに設定）の上面は、

“W”型 SP プロファイル発生：火道周囲の低抵抗体



第3図 第1図の状態に対し中心軸に沿って低抵抗領域を仮定した場合の地表電位分布。(a)は低抵抗体が存在しない場合、(b)-(d)での低抵抗体の頂部は(b)海拔500m、(c)600m、(d)700m（地表）。(a)図で見られる $r = 1$ km 付近のスパイク状の電位は、グリッド分割が粗いことによる数値的な誤差。

それぞれ海拔 500 m、600 m、700 m（地表）である。いずれの場合も、第 3 図(a)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くら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 3 図(a)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。また、C 領域で天水の下降流が発生しない場合やゼータ電位がゼロの場合、山頂付近に多少の電位上昇をもたらすが、低抵抗の効果に比べると小さい。

2. 火山活動による SP 変化

火道周囲の低抵抗体は、熱水活動による変質鉱物や熱水対流による高塩分流体の上昇によってもたらされる。前者は時間的に安定して存在するが、後者は熱水対流発達の間スケールで変化する。伊豆大島でいうと、後者は地下水位より下での低抵抗の原因となっていることが考えられ、対流系の変化によって、例えば高塩分流体のプルームと浅部の低抵抗体の接触状態が変化すると第 3 図に示した W 字型プロファイルに変化をもたらす（第 3 図(b)-(d)の結果はすべて低抵抗体の底部は計算領域の下面-5km であるが、これを例えば海水準程度とすると、山頂付近の正電位はかなり小さくなる）。熱水対流がある場合、上昇流自体のもたらす正電位も存在するが、これは多くの場合、W 字型プロファイルの山頂部付近正電位を若干、大きくする程度の効果しか持たないと考えられる。

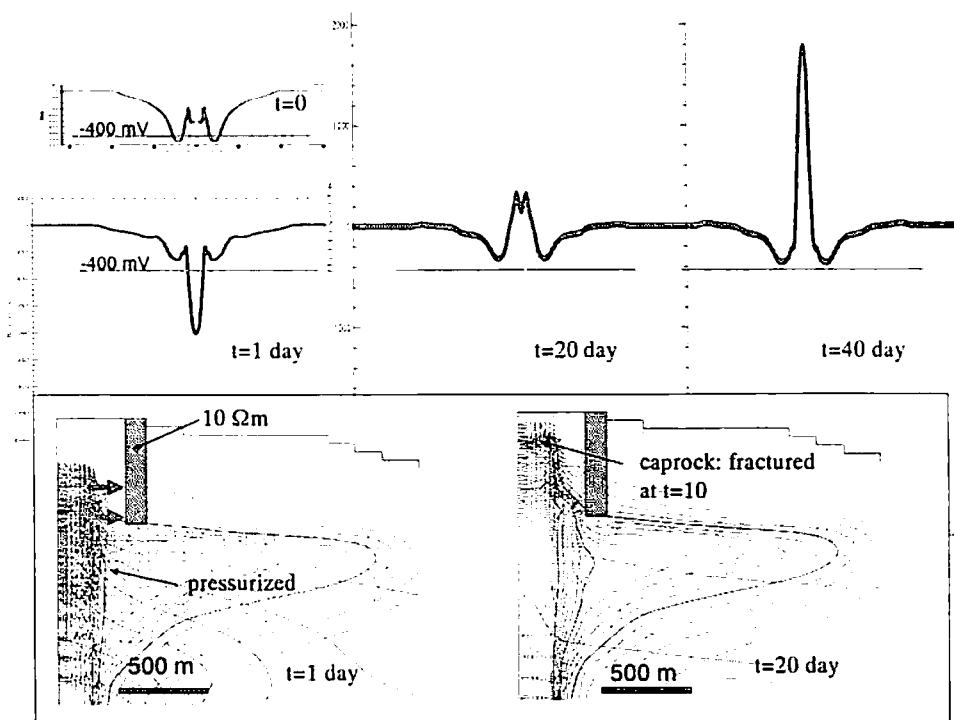
低抵抗が溶融マグマによっている場合は、第 3 図に示すように、マグマの上昇により山頂部付近の正電位が成長することも考えられる。この点については、溶融マグマと周囲の帯水層（不飽和帯）との電気的コンタクトが過熱蒸気の発生により失われる可能性なども含め、今後の検討が必要である。

第 4 図に示すのは、火道に沿う半径 200m の領域が（マグマからの高温・高圧ガスの上昇により）急激に加熱・加圧された状態を初期条件として、その後の火道周辺の流体流動と SP の時間変化を計算した結果である。ここでは第 3 図の場合と違い、低抵抗体は図に示すような形で中心軸から 400-500 m の範囲に 10 Ω m の値を設定している。t = 10 日までは火道の上部は標高 400-500 m に存在するキャップロックによって覆われているが、t = 10 日でキャップロックが破壊され、火口へ向かって高圧ガス（水蒸気）の上昇が始まる。

t = 10 日目までで顕著なのは、火口付近で電位が大きく低下すること、r = 500 m から r = 2 km の範囲では逆に電位が 100 mV 程度上昇することである。これらの変化は主として火道から水平方向外向きに流れる携帯電流によって発生する。t = 10 日目以降は高圧ガス（水蒸気）の上昇流に伴って火口付近の電位は上昇に転ずる。火口付近の電位変化が非常に大きくなっているが、これは増圧の程度（この計算例では、火道内は初期に 300℃ 近くに加熱され、その結果 80 気圧程度まで加圧される）に比例するとともに、火道周囲の液相飽和度にもよる。例えば、火口へ向かう上昇流が、乾き蒸気の状態になれば、図に示したような t = 10 日目以降の大きな電位増加は発生しない。

火道の急激な加熱・加圧と低抵抗体の組み合わせは、火口周囲に局在した急激な変動をもたら

し、多様な変動パターンが考えられる。この点については、今後、さらに検討を進める予定である。



第4図 火道が急激に加熱・加圧された場合の電位変化計算例。下図2つは、流動シミュレーションの結果で火道周囲の状態を示す。

引用文献

- Guichet, X., L. Jouniaux, and J.-P. Pozzi, Streaming potential of a sand column in partial saturation conditions, *J. Geophys. Res.*, **108**(B3), 2141, doi:10.1029/2001JB001517. 2003.
- 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.