

断層内の水の流れに伴う電場発生－3D比抵抗不均－を考慮した数値シミュレーション

石戸 経士 (地質調査所)

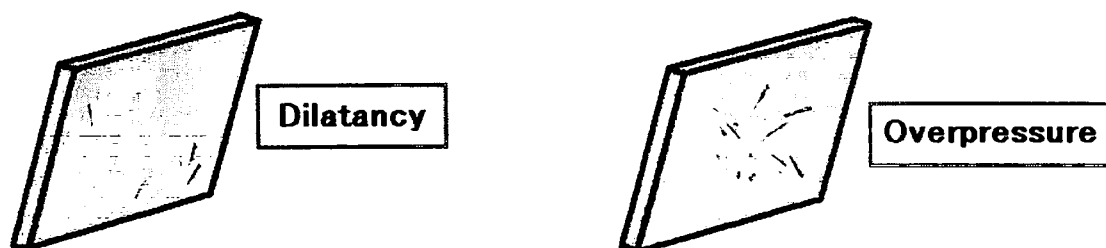
Electric field produced by fluid flow within a fault - 3D numerical simulation considering inhomogeneous resistivity structure

Tsuneo Ishido (Geological Survey of Japan)

1. はじめに

地震に関連する界面動電現象をメカニズムとする電磁気現象¹⁾については、これまでにかなりの研究がなされている。筆者は、ダイラタンシー領域での流体圧力の低下とそれに伴う沸騰の発生を仮定して、地表で期待される電場の大きさを見積もった^{2), 3)}。その際、ダイラタンシーは体積的にかなり大きな領域で発生するものとし、比抵抗分布を均一として”トータルポテンシャル”⁴⁾の電流ダイポール解によって計算を行った。

今回は、水の流れが断層、すなわち薄べったい領域に限られる場合について検討を進めた。計算は3次元数値シミュレーションにより行い、断層領域と地表を結ぶ導電性チャンネルの影響等を調べた。なお、断層内の水の駆動力としては、1つはダイラタンシーであり、沸騰発生に伴う水(液相)の落下運動を想定する。いま1つは何らかの原因による高圧水の断層領域への侵入であり、断層内で水の拡散を想定する(第一図)。



第一図

2. 界面動電現象の3次元数値シミュレーション

筆者ら⁵⁾は最近、地下の熱水流動シミュレーションの結果から、界面動電現象による電場を計算するための”EKPポストプロセッサー”を開発した。以下、その概要を紹介する。

地下の流体流動に伴う界面動電現象は、次の基本式により記述される⁶⁾。

$$I = -Lee \nabla \phi - Lev \nabla \xi \quad (1)$$

$$J = -Lve \nabla \phi - Lvv \nabla \xi \quad (2)$$

ここで、 I は電流密度、 J は流体の体積流量密度であり、 $\nabla \phi$ は電位勾配、 $\nabla \xi$ は流体流動の駆動力（間隙圧勾配）である。また、 Lab は現象論係数であり、式(1)の右辺第1項はオームの法則、式(2)の右辺第2項はポーラス媒質中の流動についてのダルシー則に相当する。係数 Lev 、 Lve のついている項が界面動電効果を表しており、オンサガーの定理により $Lev = Lve$ である。

式(1)の右辺第1項は通常の伝導電流 (I_{cond}) である。第2項を携帯電流 (I_{drag}) と呼ぶことにすると、式(1)は

$$I = I_{cond} + I_{drag} \quad (3)$$

となる。電荷の保存則をこの式に適用して、伝導電流のソースは次のように表せる。

$$\nabla \cdot I_{cond} = \nabla \cdot (-Lee \nabla \phi) = -\nabla \cdot I_{drag} \quad (4)$$

今回、開発したEKPポストプロセッサは、地下の流体流動によって発生する電場を2段階の手順で計算する。第1段階は、流体流動シミュレーションと同じグリッド（以下、RSVグリッドと呼ぶ）で、温度、圧力、塩分濃度等の分布から携帯電流 (I_{drag}) および電気伝導度 (Lee) の分布を計算する。この際、カップリング係数 (Lev) は、室内実験に基づいた定式化⁶⁾ から与える。第2段階では、通常、RSVグリッドよりかなり大きい差分グリッド（以下、SPグリッドと呼ぶ）を設定しポアソン方程式(4)を解いて電位分布を求める。なおSPグリッド内のRSVグリッドと重ならない部分では、 Lee をあらかじめ与えておく。

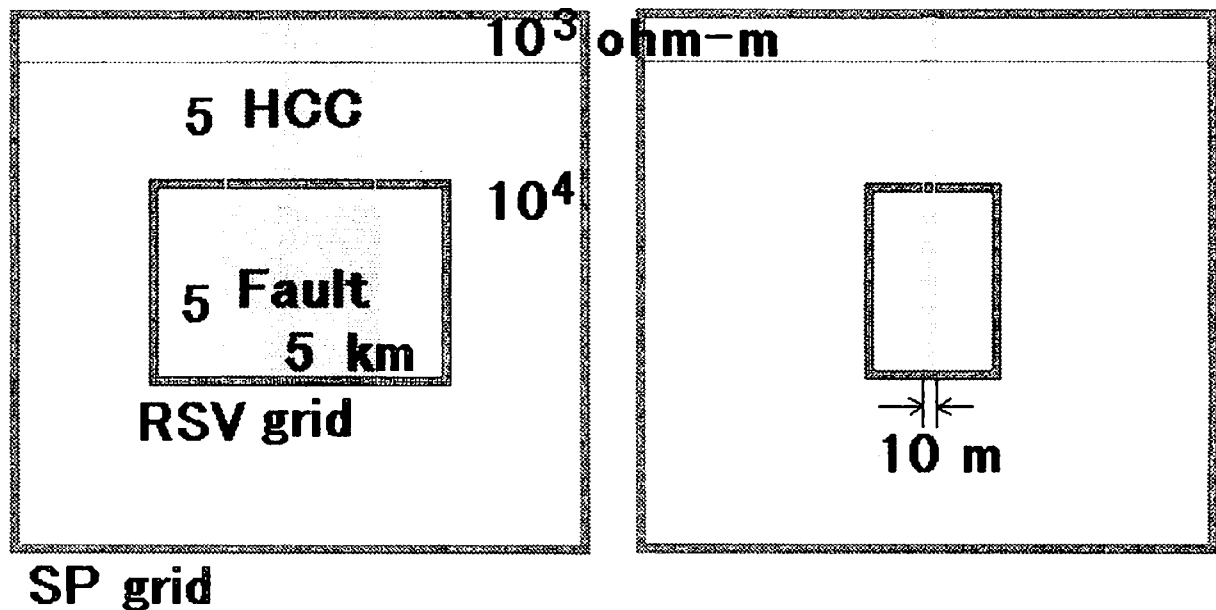
3. 計算モデル

計算モデルを第2図に示す。鉛直方向に広がる5 km x 5 km、幅10 mの断層領域を考え、上端の深度を5 kmとする。RSVグリッドは、断層を含む、深さ方向に6 km、水平方向に10 km x 5 kmの領域に設定する。SPグリッドはRSVグリッドを含んで、上面を地表とし、深さ方向に約15 km、水平方向に約20 km x 20 kmの領域とする。上面では電位勾配がゼロ、側面および底面では電位ゼロの境界条件を課する。

SPグリッド内の比抵抗値 ($1/Lee$) は、深さ1 kmまでを1 k Ω m、それ以深を10 k Ω mとしている。RSVグリッド内では、比抵抗値は塩分濃度（今回、NaCl:0.06 mol/l）、温度、空隙率等の関数として与えられるが、断層内でおおよそ10 Ω m、外部でおおよそ10 k Ω mになっている。導電性チャンネルを設定する場合、断層の上方、地表までの延長部分を10 Ω mとした。

RSVグリッド内では、まず水の流れをシミュレートするが、浸透率については、断層内が

高透水性で100 millidarcy (10^{-13} m^2)、外部が不透水性に近い状態で0.1 millidarcy (10^{-16} m^2)とした。カップリング係数(Lev)は、やはり塩分濃度、温度、空隙率等の関数として与えられるが、断層内部に比べ外部では実質、ゼロに近い値に設定している。



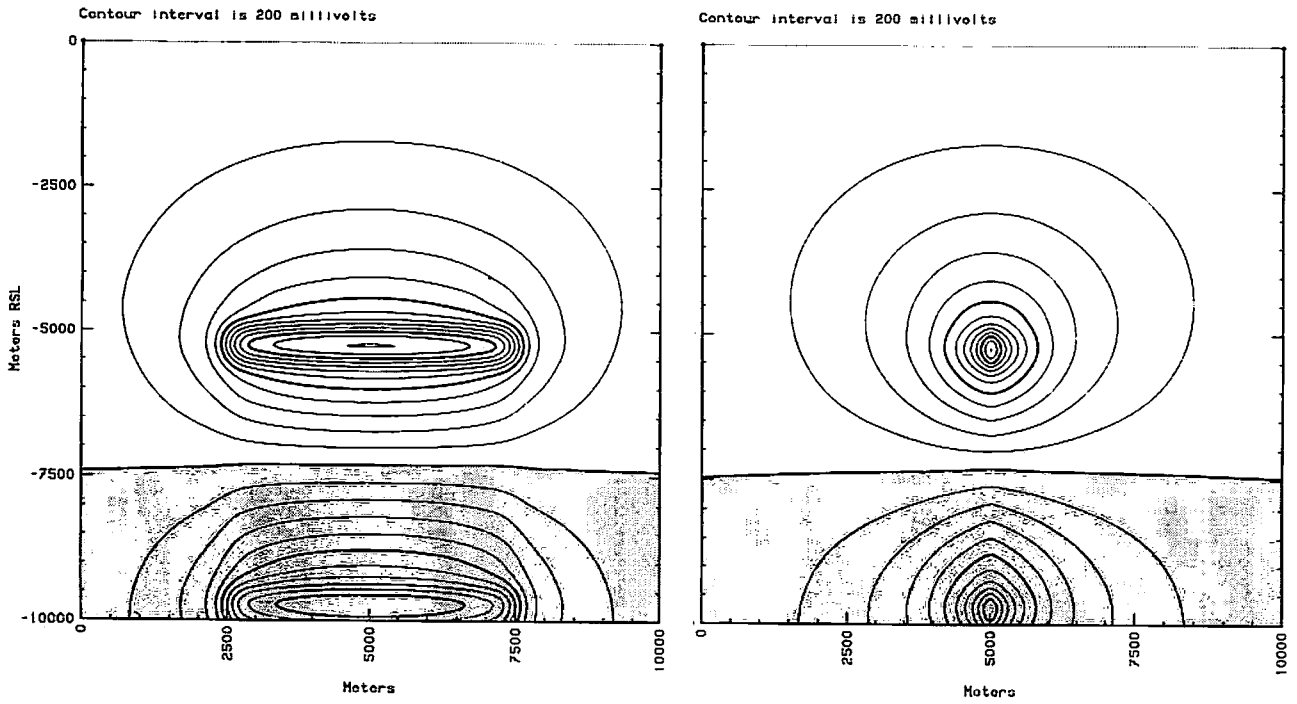
第2図 計算モデル。左図が断層の走向方向、右図が直角方向の断面。

1. ダイラタンシー

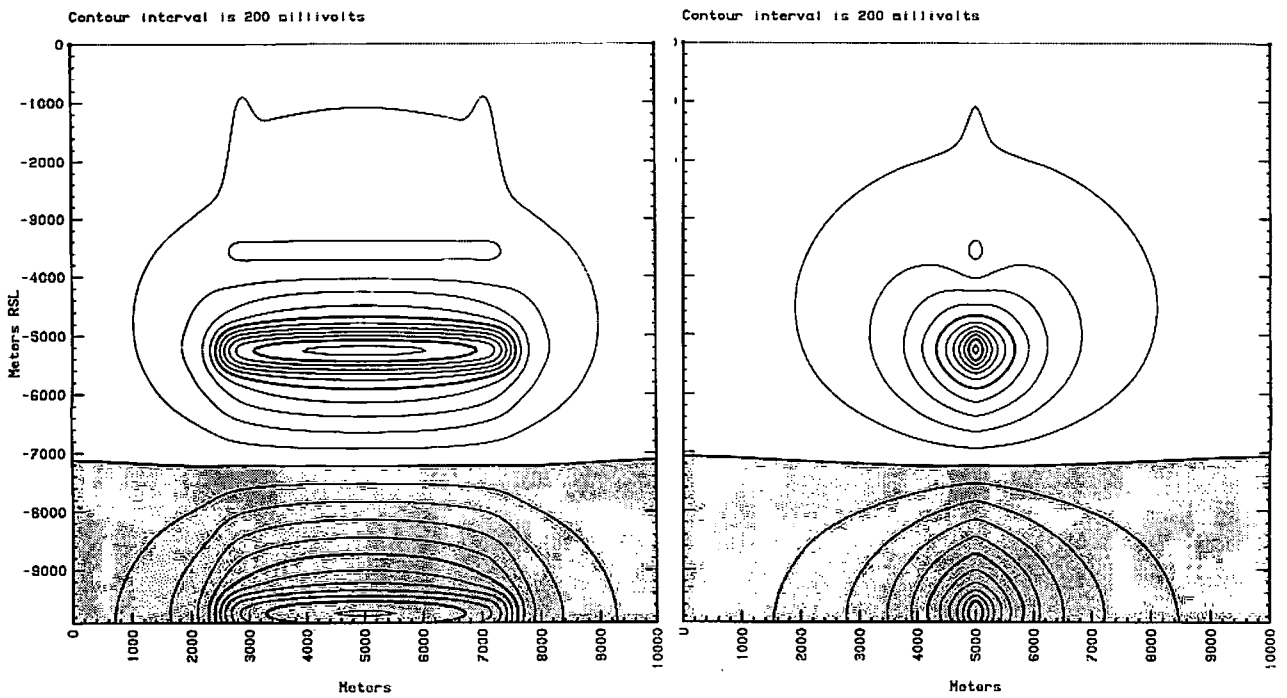
まずはじめに断層領域で空隙体積が急激に30%ほど増加した場合の計算を行った。流体流動の様子は、第一図に概念的に示したようになる。断層周辺の浸透率が小さく、水の供給がほとんど無い場合、液相の水の落下運動はかなり長期間、続くことになる。

第3、4図に示すのは、流体流動のシミュレーション結果（ダイラタンシー発生後1時間）にEKPポストプロセッサーを適用し、電位分布を計算した結果である。断層の上端付近を中心に負電位が、下端付近を中心に正電位が発生している。電位の大きさは、いずれも2ボルトを越えている。

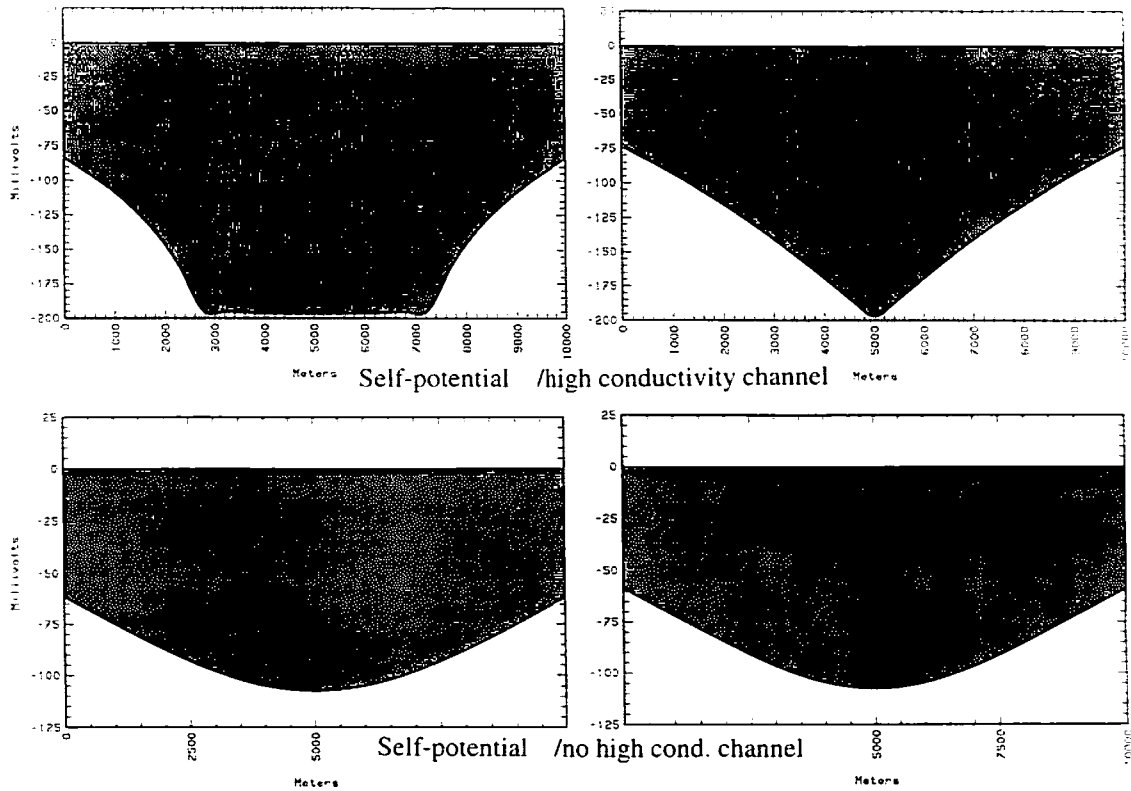
第5図に地表に発生する電位を示す。地表での電位は-100 mV程度とかなり小さくなるが、導電性チャンネルを仮定した場合には-200 mV程度となる。導電性チャンネルを仮定した場合に特に注目されるのは、断層の走向方向、導電性チャンネルの両端付近で電位勾配がかなり大きくなること（50 mV/km程度）である。



第3図 地下の電位分布。左図が断層の走向方向、右図が直交方向の断面。



第4図 導電性チャンネルがある場合の電位分布。



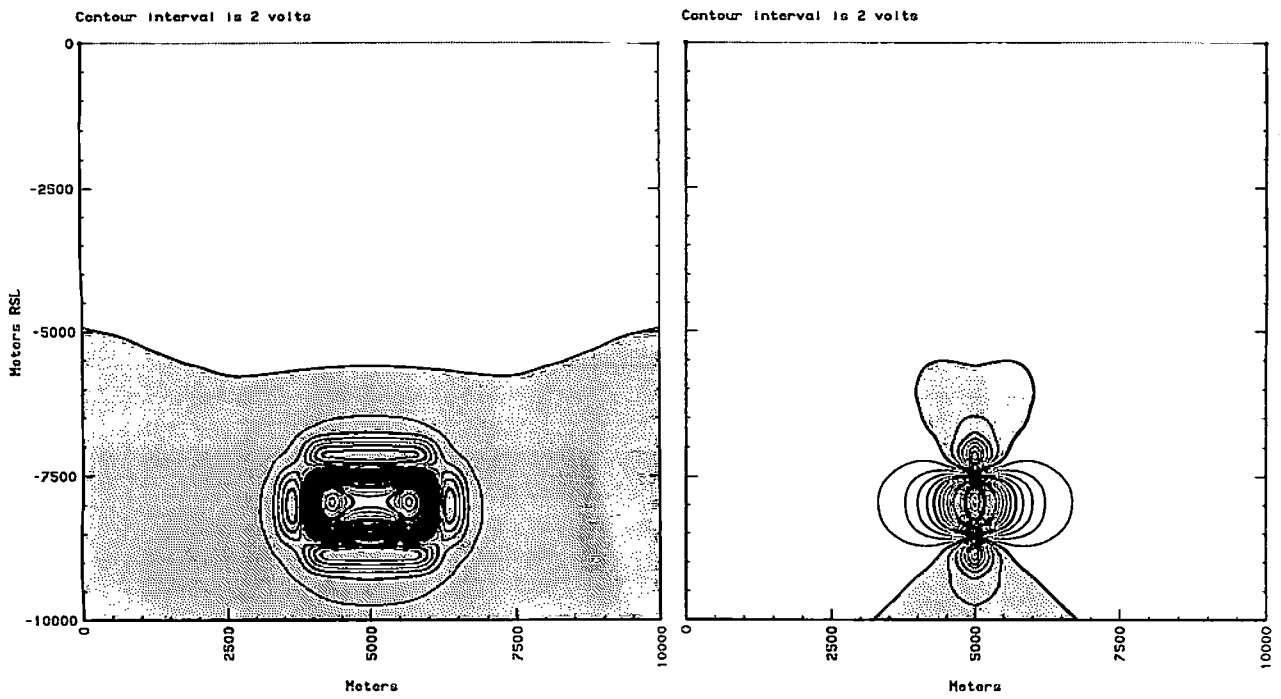
第5図 地表の電位分布。上側に導電性チャンネルのある場合、下側に無い場合の結果を示す。いずれも左図が断層の走向方向、右図が直交方向の電位プロファイル。

5. 高圧水の侵入

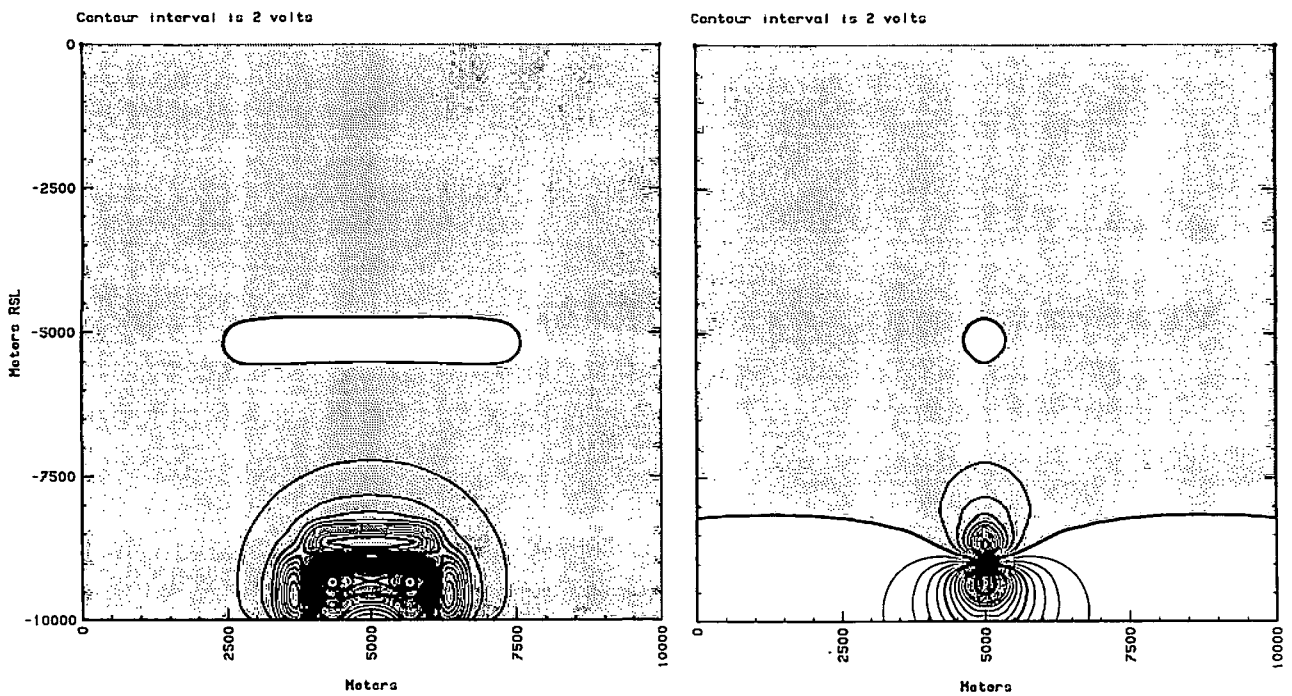
断層領域の初期圧力分布は、地表からの静水圧勾配で与えられている。次に計算したのは、ある瞬間にリソスタティックに近い高圧の水が断層領域に侵入した場合を想定している。1時間後の流体流動分布についてEKPポストプロセッサを適用し、電位分布を計算した(第6、7図)。

高圧水の侵入した場所に負電位が現れるが、その大きさは数十ボルトと大きい。ただし、近接した(断層内の水の流れの)下流側に正の伝導電流源が取り囲むように現れるので、地表の電位はそれほど大きくはならない(第8図)。高圧水が断層の下端に侵入した場合は、対になる正電流源が上方に分布するので、地表にも正電位が発生する。

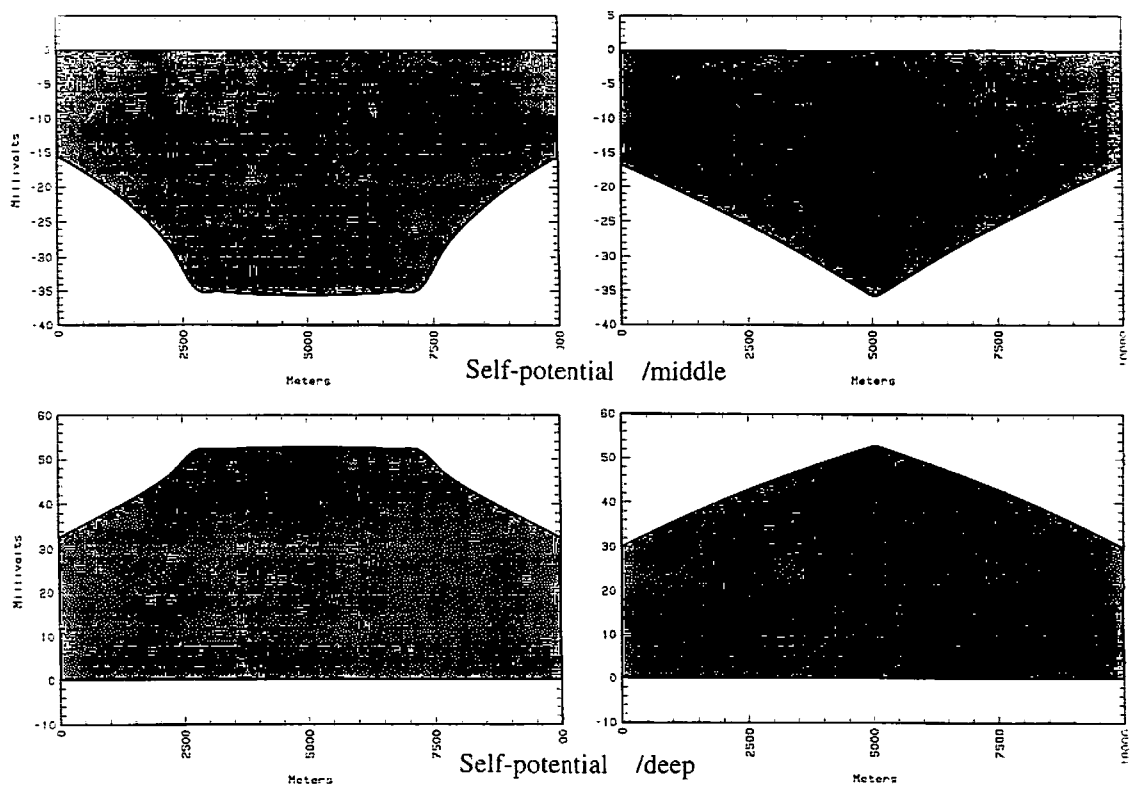
このケースでは、流体流動の発生している領域での電位に比べ、地表に発生する電位は3桁ほど小さい。計算結果が精度の点で意味のあるものかどうか、今後の検討が必要である。カップリングの係数が均一で、本来、地表に電位の現れないケースについて計算することや、グリッド分割を変えて結果の違いを調べること等が必要であろう。



第 6 図 地下の電位分布。高圧水が断層の中心付近に侵入した場合。



第 7 図 地下の電位分布。高圧水が断層の下端に侵入した場合。



第 8 図 地表の電位分布。上側は高圧水が中心付近、下側は下端に侵入した場合。

参考文献

- 1) Mizutani, H., Ishido, T., Yokokura, T. and Ohnishi, S., Electrokinetic phenomena associated with earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 365-368, 1976.
- 2) 石戸経士、蒸気ゾーン形成に伴う界面動電現象、CA研究会論文集、187-194, 1993.
- 3) 石戸経士、沸騰に伴う界面動電現象—地震の電磁気的前兆現象のメカニズム、CA研究会論文集、100-105, 1995.
- 4) Fitterman, D.V., Electrokinetic and magnetic anomalies associated with dilatant regions in a layered earth, *J. Geophys. Res.*, 83, 5923-5928, 1978.
- 5) Ishido, T. and Pritchett, J.W., Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, in *Proc. 21st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 143-149, Stanford Univ., 1996.
- 6) Ishido, T. and Mizutani, H., Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775, 1981.