

# 地下の流体流動に伴う磁場発生

地質調査所 地殻熱部 石戸経士

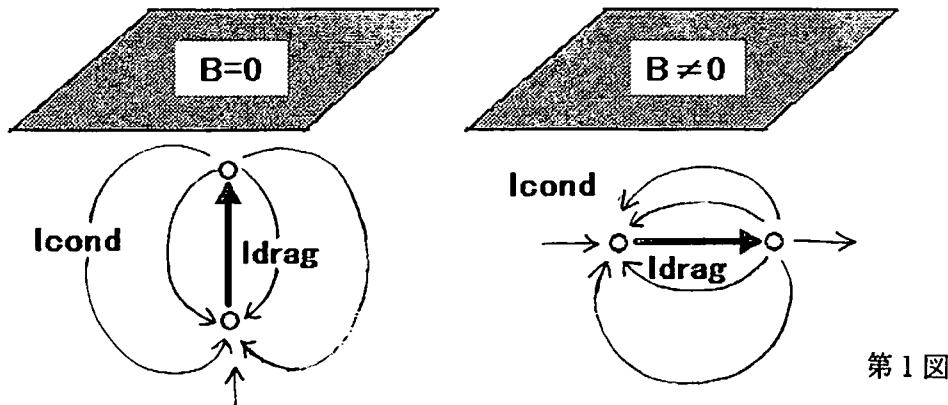
## Magnetic field generation associated with subsurface fluid flow

Tsuneo ISHIDO

Geological Survey of Japan

### 1. はじめに

地下で何らかの原因で流体が流れると、界面動電カップリングにより“携帯電流”が流れ、その結果、マクロに電場が発生し伝導電流が流れる。カップリング係数が不均一の場合、伝導電流の流れは携帯電流を完全に打ち消すようには流れないので磁場発生の可能性がでてくる。比抵抗分布が均一等方の場合、携帯電流が水平成分をもつ場合のみ、地表に磁場が発生する。携帯電流が鉛直成分のみの場合、その両端に発生する伝導電流のソース・シンクによるものを合わせた全電流系は軸対象となるので、外部（地表）には磁場は発生しない。（第1図参照）

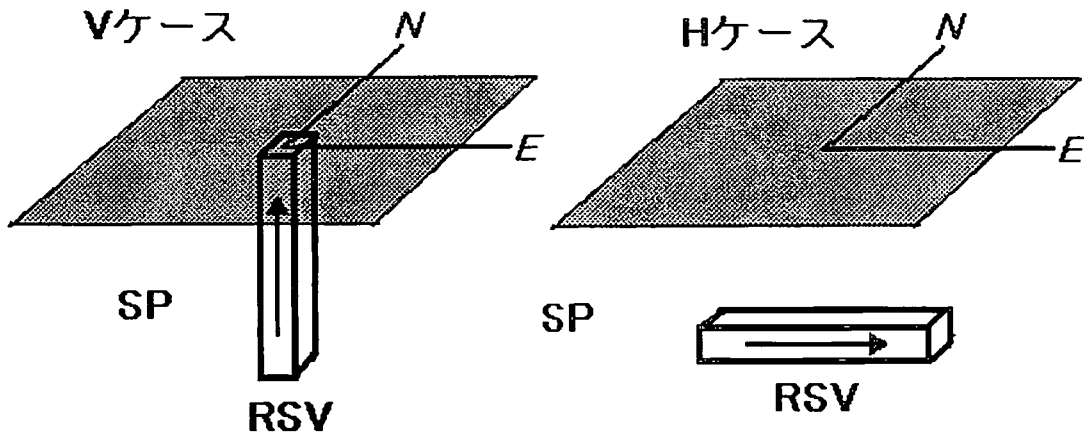


### 2. 界面動電現象による磁場発生の計算

比抵抗分布が均一でない場合には、携帯電流が鉛直成分のみであっても、伝導電流を合わせた全電流系は軸対象からずれてくるので、地表に磁場発生が期待される。3次元的な比抵抗構造中での磁場発生を定量的に見積もるために、数値シミュレーションによる検討を行った。計算の進め方は、まず、浸透率分布、境界条件等を与え流体（および熱）の流動をシミュレーションし、圧力・温度・塩分濃度等の分布を求める。次に、その結果からカップリング係数の分布を計算し携帯電流を求める。3番目のステップでは、携帯電流の発散をソース項とする電位についてのポアソン方程式を解いて、電場および伝導電流の分布を求める。（ここまでのステップは、界面動電現象による電場発生を計算する場合と同じである（Ishido and Pritchett, 1998 参照）。）磁場を計算する場合は、4番目のステップが加わって、携帯・伝導電流の分布に対しビオ・サバル則を適用し地表における磁場分布を計算する。以下、2から4番目のプロセスを計算するプログラムを“EKP ポストプロセッサー”と呼ぶ。

### 3. 計算結果

第2図に示すような簡単なモデルを仮定し予備的な計算を行った。流体流動の計算領域 (RSV グリッドと呼ぶ) は1次元とし、断面積  $1 \text{ km}^2$ 、長さ  $5 \text{ km}$  とする。図の中のVモデルでは、流体は地下深部から地表に向かって流量  $500 \text{ kg/s}$  で鉛直方向に流れる。浸透率 10 ミリダルシー、空隙率 0.1 とし、温度は  $100^\circ\text{C}$ 、流体の塩分濃度は海水の  $1/10$  で一様とする。EKP ポストプロセッサは、この状態に対応して、ゼータ電位を約  $-40 \text{ mV}$ 、岩石・流体バルクの電気伝導度を約  $0.2 \text{ S/m}$  と計算している。ゼータ電位が負であるので、携帯電流も流体と同じ方向に流れ、結果として下端に伝導電流のシンク、上端にソースが発生する。

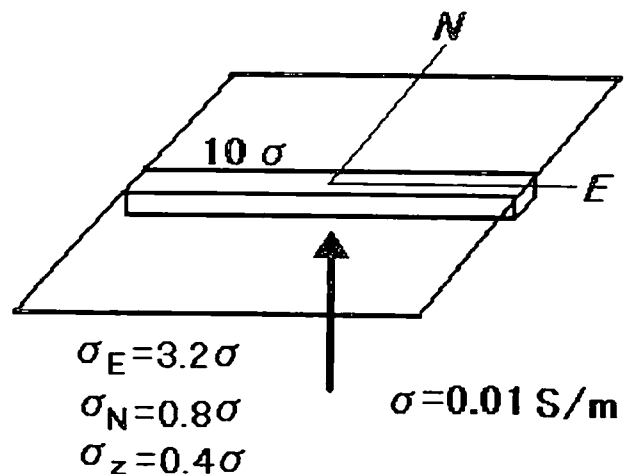


第2図

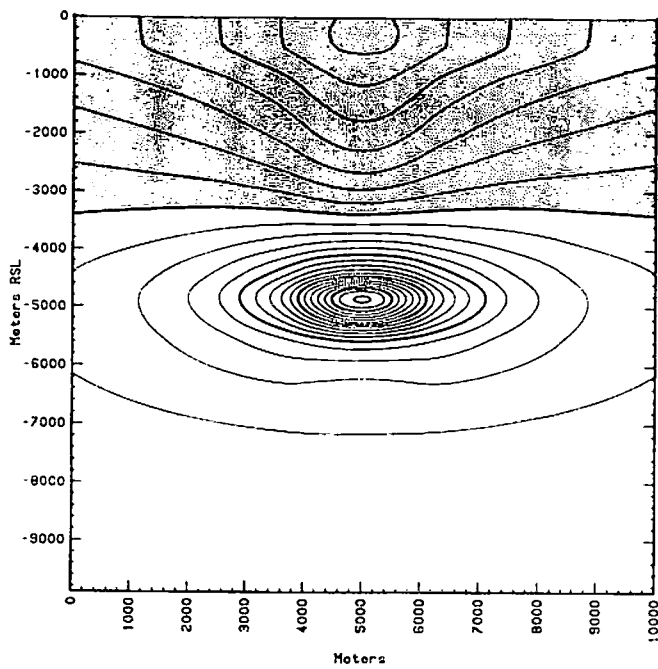
RSV グリッドの外側は電気伝導度の分布をあらかじめ与えておく領域 (SP グリッドと呼ぶ) であり、今回の計算ではこの領域に異方性や3次元的不均一性を与えた。SP グリッド外側の境界条件は、電場を計算するときは地表のみノイマン型で、あとは電位一定のディリクレ型とすることが多いが、磁場を計算するので (伝導) 電流が計算領域外に逃げないように、今回はすべてノイマン型 (電位勾配 0) とした。

まず始めに SP グリッド内の電気伝導度が一様均一の場合の計算を行った。Vモデルの場合、直方体である SP グリッドを大きくするに従って発生磁場は無視できるほど小さくなった。これは伝導電流の分布が鉛直方向の携帯電流を軸として軸対称に近づくためである。

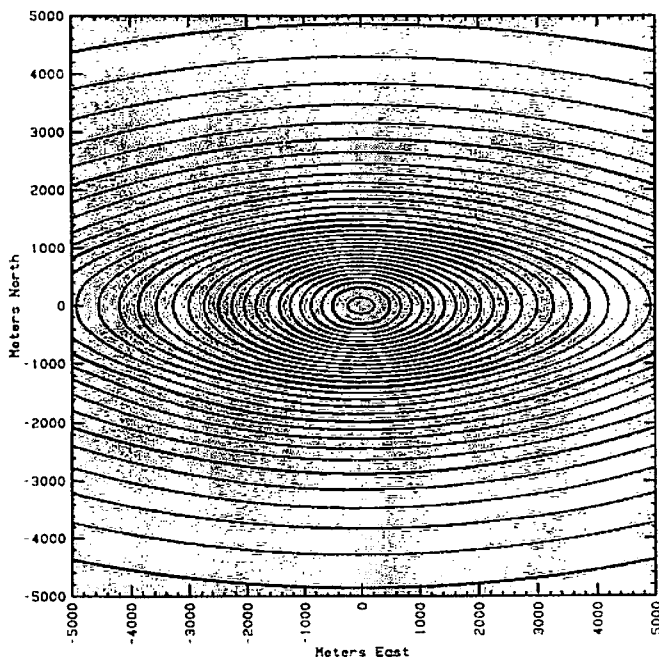
次に SP グリッド内の電気伝導度に異方性を持たせて計算したが、この場合は、有意な磁場が地表に発生した。異方性に加え伝導性の高い領域を加えた第3図の場合について、地表の全磁力異常を計算した結果を第4図(c)に示す。



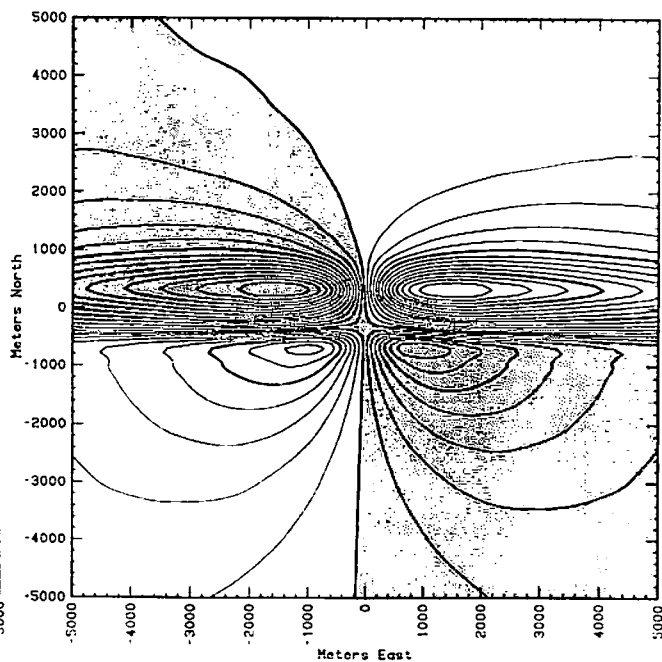
第3図



第4図(a) Vモデル(第3図)の電位分布、  
東西鉛直断面。コンター間隔は50 mV。  
陰影部が正電位。

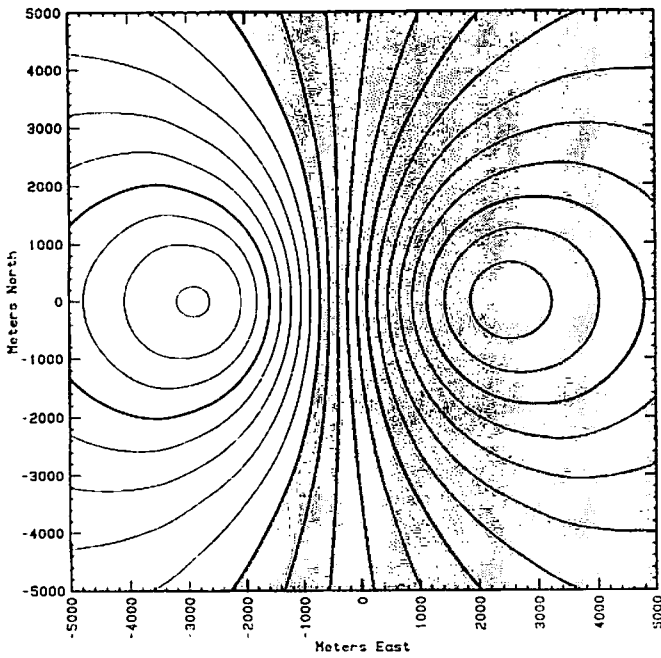


第4図(b) 地表における電位分布。  
コンター間隔は10 mV。

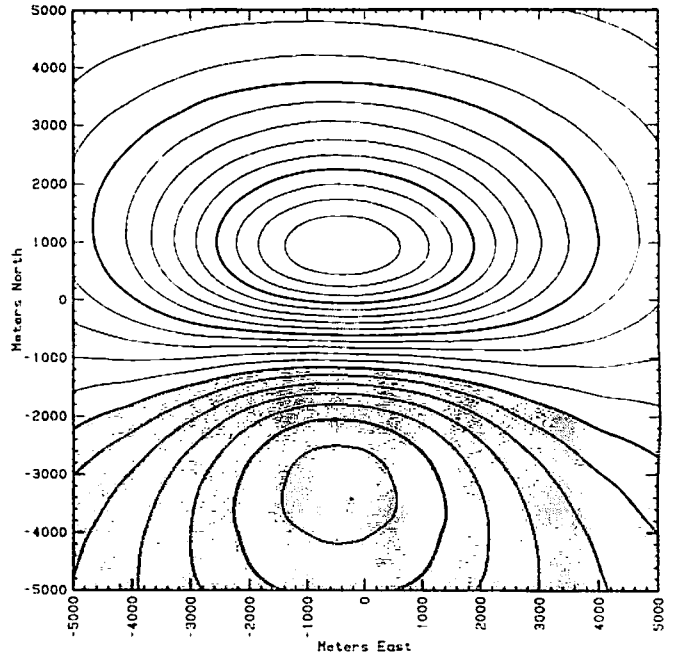


第4図(c) 全磁力異常の地表分布。  
コンター間隔は0.2 nT。

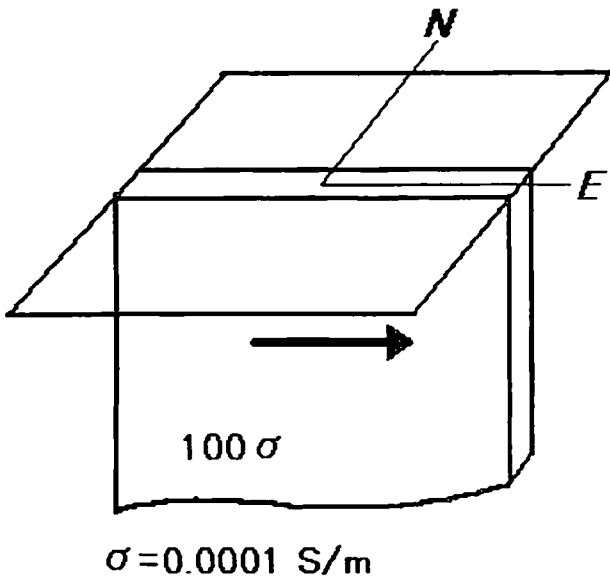
第2図の中のHモデルは、RSVグリッドを深さ5 kmに横に倒したものである。この場合、SPグリッド内の電気伝導度が均一であっても地表に磁場が発生する(第5図)。ただし、磁場異常のパターンは、電気伝導度の不均一性によって大きく変わる。第6図のような板状の伝導性の高い領域を入れると、第7図の様なパターンになる。



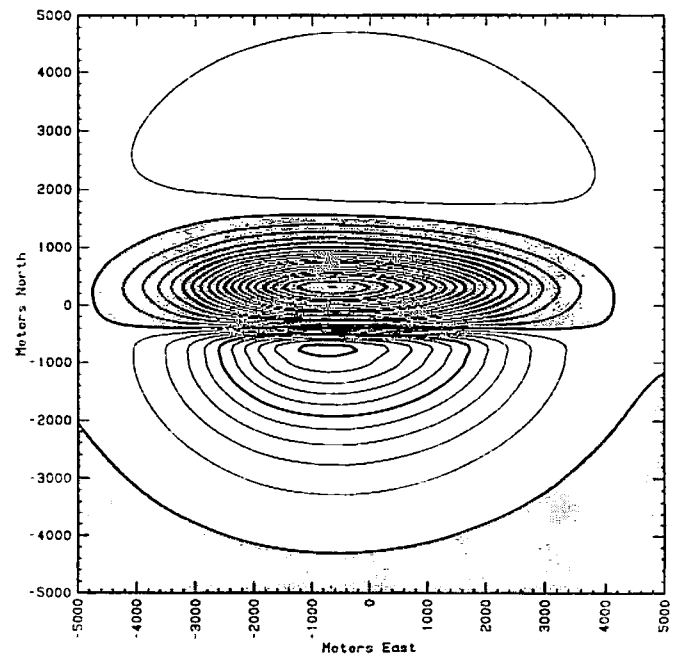
第5図(a) Hモデルの地表における電位分布。  
コンター間隔は10 mV。



第5図(b) 全磁力異常の地表分布。  
コンター間隔は0.05 nT。



第6図



第7図 Hモデル(第6図)の全磁力異常の  
地表分布。コンター間隔は0.02 nT。

#### 4. おわりに

界面動電現象による磁場発生を計算するのに、“トータルポテンシャル”のソースである電流ダイポールの分布から解析的に求める方法もある (Fitterman, 1978)。ただし、この手法は厳密ではあるものの、水の流れが浮力による場合に適用できない、また、比抵抗が3次元的な分布をしている場合に適用が困難である。地殻の電気伝導度が均一ということはありません、何らかの不均一性、異方性を持つと考えられ、また、今回の予備的計算からも明らかのように、地表に発生する磁場の分布は、3次元的な比抵抗構造によって大きく変わる。したがって、差分法等を用いて数值的に計算することが必要と考えられる。

磁場の強さは、当然ながら携帯電流の大きさに比例する。流体の塩分濃度が高いとカップリング係数が小さくなるが、温度が高くなるとある程度の大きさを持つと考えられる。携帯電流の大きさは、カップリング係数および圧力勾配に比例するので、何らかの原因で大きな圧力勾配が発生すると、携帯電流はかなり大きくなるものと考えられる。

今回のモデル計算では、RSVグリッド内の約0.2 S/mに対し、外側のSPグリッド内の伝導度が小さくなると、磁場は小さくなる傾向にある（これに対し、電場は大きくなる）。これは外側の伝導度が小さくなると、それだけRSVグリッド中を携帯電流と反対向きに流れる伝導電流が大きくなるためである。外側の電気伝導度の分布が、軸対称からはずれるような伝導電流を強める場合に地表の磁場発生は大きくなる。

松代群発地震の際に観測された全磁力変化の原因として、界面動電現象が提案されている (Mizutani and Ishido, 1976)。また、ロマ・プリエタ地震の際の前兆的なULF磁場変動を界面動電現象で説明する試みもなされている (Fenoglio et al., 1995)。これらの論文に示されている計算は半定量的なものであるが、今後、今回のシミュレーション手法を用いて定量的な検討を加えたいと考えている。

#### 文献

Fenoglio, M.A., M.J.S. Johnston, and J. Byerlee, Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones - application to the Loma Prieta ULF emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, 12,951-12,958, 1995.

Fitterman, D.V., Electrokinetic and magnetic anomalies associated with dilatant regions in a layered earth, *J. Geophys. Res.*, 83, 5923-5928, 1978.

Ishido, T., and J.W. Pritchett, Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, submitted to *J. Geophys. Res.*, 1998.

Mizutani, H., and T. Ishido, A new interpretation of magnetic field variation associated with Matushiro earthquakes, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 28, 179-188, 1976.