

自然電位観測の現状と今後

石戸 経士 (産総研)

自然電位あるいはその変化の発生原因としては、界面動電現象(EKP)以外にも拡散電位、熱拡散電位、あるいは酸化還元反応に関連したジオバッテリーなどがある。我々は、これまでに地熱地域で自然電位 (SP) 観測を数多く行ってきたが、流体生産開始数年後の地熱貯留層では、温度、流体化学成分等の分布はあまり変わらず流動パターン (圧力分布) のみが大きく変わるので、主たる SP 変化は EKP 起源と考えられる。

岩石の空隙中を流体が流れると、電気二重層の液体側にある電荷(通常、正イオン)が流体とともに運動することによって電流(携帯電流)が生じる。その結果、電場(流動電位)が発生し、それに応じて通常の伝導電流が流れる。ただし、地下での流体流動によって地表に SP (変化) が発生するには、地表に伝導電流の流れていることが必要であり、このための伝導電流源は、熱水対流などソースフリーの流れについては、EKP カップリングの係数 (Lev) の境界面 (これには地表面も含まれる)、あるいは浸透率 k (正しくは k/Lev) の境界面を流体の流れが横切るところに発生する。すなわち、勾配 ∇Lev あるいは $\nabla(k/Lev)$ があって、その方向に流体が流れる状況がないと地表に SP は発生しない。これに対して井戸での生産や注水といった流体ソースによる流れの場合は、流動電位係数 ($C = -Lev/Lee$ 、ここで Lee は媒質バルクの電気伝導度) の境界面に圧力変化の及ぶことが地表における SP 発生の必要条件となる。流動電位係数は岩石種によって違い、温度や流体中の塩分濃度によっても変化するので、その境界面をもたらず候補はいくつか考えられる。

フォーメーションファクター(F)を使って、 $Lev = F^{-1}(-\epsilon\zeta/\mu)$ 、 $Lee = F^{-1}(\sigma_f + \Lambda^{-1}\Sigma_s)$ と表される (ここで ϵ : 誘電率、 ζ : ゼータ電位、 μ : 粘性係数、 σ_f : 空隙流体の電気伝導度、 Λ : 有効水理半径(hydraulic radius)、 Σ_s : 表面伝導)。これらから $C = \epsilon\zeta/\mu(\sigma_f + \Lambda^{-1}\Sigma_s)$ となる。C はゼータ電位などだけでなく、空隙サイズの尺度である Λ にも依存する。また、気液二相流では C の値は液相飽和度の関数として変化する。これら流動電位係数に関する実験的・理論的研究は、近年、地球科学分野でもかなり盛んに行われている。

地熱貯留層で流体生産開始後、気液二相ゾーンが発達するような場合には、しばしば生産域で負の変化が観測される。これは生産に伴う減圧沸騰と気液二相ゾーンの中の熱水の下降流に伴う携帯電流によるものと考えられる。我々は、このようなデータを解析するために、貯留層シミュレーションの計算結果 (圧力・温度・塩分濃度・液相飽和度などの分布) から携帯電流の分布を求め、ポアソンの方程式を解いて電位分布を求めるための計算ツール (EKP ポストプロセッサ) を開発し用いている。ポテンシャル場については、同じポテンシャル場を再現するソースの与え方は何通りも存在する。ソースについて何らかの制約を設ける必要があるが、EKP ポストプロセッサによる計算では、その制約に相当するのが坑井データ等にもとづいて構築された貯留層モデルということになる。

EKP 起源の SP を測定する目的は、“プライマリーフロー”である流体流動を推定すること、あるいは関連する媒質の物性（の変化）を推定することにある。逆解析も試行されているが、流体流動の数値シミュレーションに立脚した順解析が基本になると考えている。さまざまなデータを総合して流体流動モデルを構築し、それにもとづいて SP の分布なり変化を計算し、実測値と比較する。その過程で流体流動モデルを改良できれば SP データを有効に使えることになる。地表の電位発生には流動電位係数 C の不均質性が深く関与しているが、比抵抗値の境界面は C 境界面の候補である。したがって、自然電位データの解析にとって比抵抗分布のデータは特に重要である。

自然電位観測は、地上の測定であれば、2 個の非分極性電極と電線、デジボルがあれば可能で、低コストで実施できるが、流動電位に着目した調査は、適当な定量的解析法がなかったこともあり、適用事例は限られていた。ただし、この状況はこの 10 数年の間に変わりつつある。地熱貯留層モニタリング以外にも、活火山での測定・解析事例は現在も増加しつつある。国際的にも、地下水分野などでの研究が盛んであり、油層モニタリングや CO2 帯水層貯留のモニタリングなどへの取り組みも始まっている。

最後に海底における自然電位観測の可能性について考えてみたい。海底面では水頭 ($h = p/\rho g + z$) が一定に保たれるので、海底面下の媒質の流動電位係数 C が一様であると、流体のソース・シンクによる流れ（圧密に起因する流れや多孔質弾性変形による流れ）が海底面を横切っても海底面で SP 異常は発生しない。ただし断層などを通しての流れであれば、通常、断層帯と周囲の母岩では C の大きさが違うと考えられるので、この限りではない。また、浮力による流体流動であれば、 C の不均一がなくても海底面を流れが横切るところで SP 異常が発生する。

海底面を横切る流れがない状況では、流体圧変化が十分に大きく、その付近に C の境界面が存在すれば、観測可能な SP 変化が海底面でも発生するかもしれない。また、掘削孔が利用できる場合には、より発生源に近づいた観測や鉛直方向の電場測定が有効かもしれない。流体流動によって磁場の発生も考えられるが、 C が一様で携帯電流と伝導電流が逆向きに重なってしまう状況では、当然ながら地下を含め磁場は発生しない。磁場発生のためには媒質の不均一性、異方性が前提となる。これらの点は、海底面下での流体流動あるいは流体圧変化を想定して電場や磁場の変化を見積もる際に、留意すべき点であろう。