

# 貯留層変動探査法の最近のトピックスから

石戸 経士<sup>1)</sup>

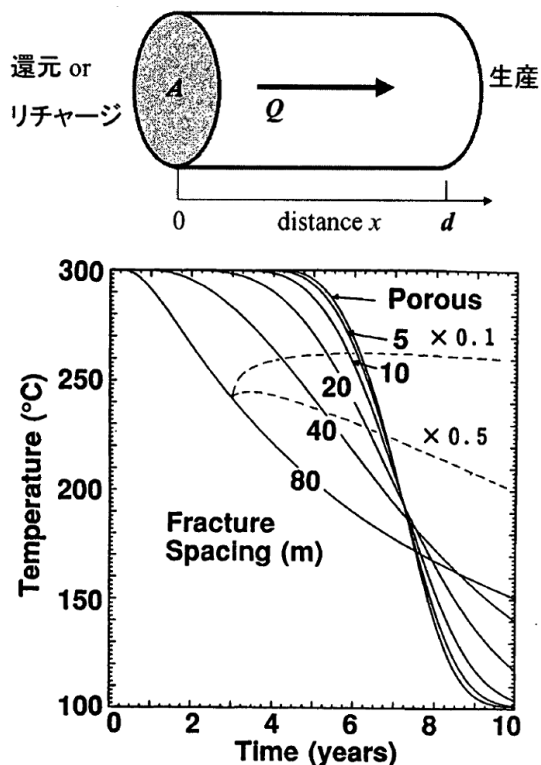
## 1. はじめに

2009年4月15日にミニシンポジウム「貯留層変動探査法の目指したこと」が産総研の共用講堂多目的室で開催されました。このシンポジウムでは、産総研からは貯留層変動探査法開発プロジェクトの概要や2003年以降の主なトピックスが報告されました。また各地域のディベロッパーの方々からは、各地域の近況と貯留層変動探査法の概念や開発された手法を用いた地熱貯留層管理技術に期待することなどをお話いただきました。さらに、地熱貯留層の成因に関する理解の進展や火山を対象とした自然電位研究に関する話題が紹介されました(概要は石戸・當舎, 2010)。

前回の特集号(地質ニュース, 2010年1月号)には、シンポジウムの講演者から寄せられた5件の原稿と投稿原稿1件が掲載されていますが、今回の特集号では、シンポジウムで講演いただいた中西繁隆氏、長谷英彰氏による原稿2件と本稿、ならびに松島喜雄氏による投稿原稿1件が掲載されています。以下、本稿では石戸の講演内容の中からいくつかのトピックスについてご紹介したいと思います。

## 2. 断裂型貯留層の生産後挙動

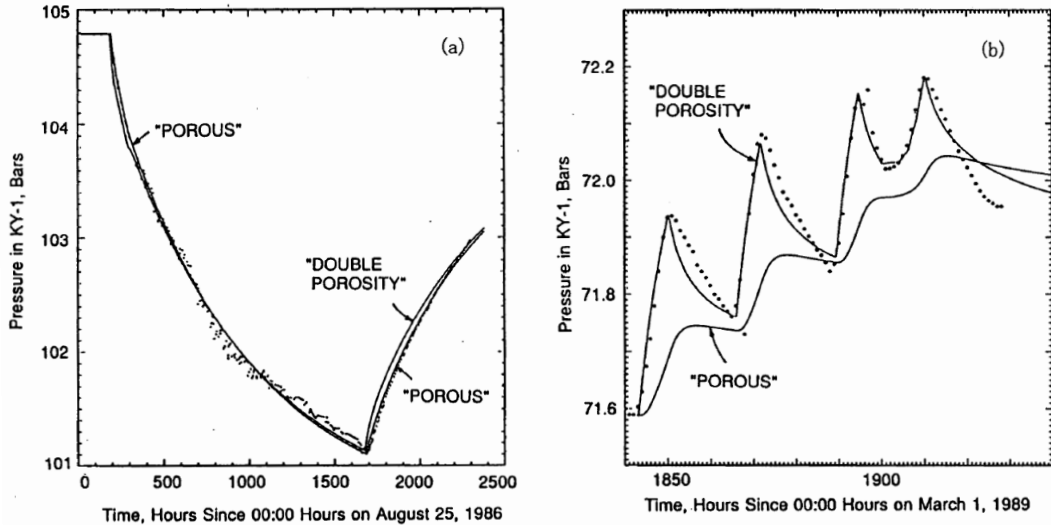
地熱貯留層の多くは、流体の通路が割れ目のネットワークからなっています。還元井が生産ゾーンと割れ目を通して繋がっている場合には、比較的短期間のうちに生産流体の温度低下が発生することがあります。生産流体のエンタルピー低下をもたらすサーマルブレイクスルーは、生産井からの蒸気生産量を低下させるので、これを未然に回避するためには、あらかじめ断裂系の水理特性を把握しておく必要があります。また、開放性の小さい貯留層では生産井へ



第1図 サーマルブレイクスルーについての数値シミュレーション(石戸, 2002から引用)。A=1km<sup>2</sup>, d=1kmとして還元ゾーンから生産ゾーンへ向かってQ=3.4m<sup>3</sup>/sの流動(250MWの発電相当)を仮定した場合のMINCモデルによるシミュレーション結果。貯留層の初期温度を300℃, 還元熱水の温度を100℃として、生産流体温度の時間変化を示す。フラクチャースペーシングλが大きくなるに従い、等価な多孔質媒質の場合に比べて、サーマルブレイクスルーがより早くに発生する。λ=80mの場合について、3年目に流量を1/2, 1/10にした場合の結果も示す。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 断裂型地熱貯留層, 圧力遷移試験, 自然電位, 貯留層モニタリング, 数値モデリング



第2図 澄川地域での圧力干渉試験結果とモデル計算結果の比較 (Ishido *et al.*, 1992より引用)。観測井KY-1にキャピラリーチューブ型圧力計を設置し、200℃以上の高温下でフィードポイントの圧力が長期間、連続的に測定された。(a)は能動井S-4での生産、(b)はS-4での注水に対応したKY-1での圧力応答。

流入する流体の大部分が蒸気となるエクセスエンタルピー現象が発生することもあります。この現象の発生にも断裂系の特性が関与しています。

第1図は還元井から生産井に向かう流れに伴うサーマルブレイクスルーについてのシミュレーション結果ですが、初期温度から還元温度への低下の様子は、割れ目の平均的な存在間隔(フラクチャースペーシング： $\lambda$ )によって大きく違っています。断裂型貯留層の場合、低温水は割れ目の中を流れて生産井に向かいますが、途中で周囲の岩石マトリックスから熱をもらい高温状態になってから生産井に流入します。ただし、 $\lambda$ が数十メートルを超えると、空隙率・浸透率が等価な多孔質媒質の場合に比べ温度低下がかなり早く始まります。多孔質媒質では空隙流体と岩石粒子は熱的に常に平衡状態(局所平衡)にあると仮定できますが、断裂系では割れ目と周囲の岩石マトリックスの間の熱的平衡には $\lambda$ の2乗に比例した時間( $\lambda=10\text{m}$ で1年程度)が必要になります。したがって還元・生産のループに流す流体の流量を大きくしすぎると、岩石マトリックスの大部分は高温のまま割れ目の中だけが冷却された状態になります。 $\lambda=80\text{m}$ のケースでは、1年もしないうちに温度が下がり始め5年後には200℃を下回ってしまいますが、3年目に流量を当初の10分の1にすると、その後、長期にわたっ

て250℃以上の高温状態を維持できます。すなわち大部分の熱を蓄えているマトリックスからうまく熱を回収できる、ということを示しています。

断裂系の平均的なフラクチャースペーシング等の特性は、生産井・還元井の流量や配置を決める前にできるだけ調べておくことが必要ですが、そのための手法の1つとして圧力干渉試験があります。第2図に示すのは、澄川地域での試験結果で、生産井S-4坑での噴気あるいは注水に伴って1km以上離れた観測井KY-1で測定された圧力変化です。貯留層の地質構造や概念モデルに基づいて様々な解析が行われましたが、筆者らは、このデータから断裂系の特性を把握できないか検討を行いました (Ishido *et al.*, 1992)。第2図(a)の2ヶ月間の噴気に伴う圧力応答は、多孔質媒質を仮定したモデルでも、断裂系を表現する二重孔隙媒質を仮定したモデルでも説明できますが、第2図(b)に示すS-4への短期間の断続的な注水に対するKY-1の応答は二重孔隙媒質を仮定したモデルでないと説明できませんでした。フラクチャースペーシングについては、逸泥記録等を参考に100mと固定し、データとのマッチングを図る過程で、断裂系の中の割れ目領域の体積割合や岩石マトリックス領域の浸透率などの推定を行いました。

澄川地熱発電所が運開して8年を経過した時点で、

貯留層変動探査法プロジェクトの一環として、自然状態の貯留層シミュレーションとヒストリーマッチングが行われました (NEDO, 2003)。坑井基地ごとの生産量と生産流体のエンタルピー・塩分濃度のヒストリーを再現する上で、二重孔隙媒質を表現するMINCモデルを用いることが必要となりましたが、当初のパラメータ設定は上に述べた圧力干渉試験から推定されたものに近いものでした。マッチングの過程でかなりの調整が行われ、還元熱水の挙動を説明するために平均的なフラクチャースペーシングを100m以上のかなり大きい値にすることが必要になりました。またトレーサー試験の結果を再現するために、割れ目領域の体積割合を小さくすること、および岩石マトリックスの浸透率を $10^{-19} \text{m}^2$ 以下にすることなどが必要になりました。マトリックスの浸透率を小さくすることはエクセスエンタルピーを再現する上でも必要でしたが、我々が圧力干渉試験の解析に際して暗黙に仮定した $10^{-18} \text{m}^2$ 以上に比べると、ずっと小さい値となりました。きちんとしたヒストリーマッチングの事例が公表されている例はまだ少ないので、澄川の事例は断裂型貯留層の理解を深める上で、大変重要であったと思います。なお澄川地域での貯留層管理の取り組みについては、有木・加藤 (2010) に最近の状況を含め紹介されています。

断裂系の特性を把握するためには、圧力遷移・干渉試験やトレーサー試験などが中心になりますので、引き続き新たな観点からの検討も含め、研究が必要です。トレーサー試験については、本特集号・中西繁隆氏による「鬼首地熱発電所の地熱貯留層管理」に述べられていますが、生産井・還元井の配置を最適化してゆく上で基本的な情報をもたらします。圧力遷移試験については、中尾・石戸 (2003; 2005) などに新たな試みが述べられていますが、今後、なお一層の試験手法、解析手法の高度化が望まれます。西ほか (2008) は釜石鉱山で基礎的な実験を行っていますが、これは圧力遷移試験時に圧力に加えて自然電位の同時観測を行うというものです。圧力遷移試験によって断裂系の特性、特にマトリックスの貯留の効果を評価することは実際には困難な場合が多いですが、流動電位を発生メカニズムとする自然電位の時間変化は、空隙の体積において割れ目部より大きな比率を持つマトリックス部の影響を強く受けます。このため、自然電位測定を併用することで、断裂系の水理バ

第1表 地球物理学的ポストプロセッサの役割。

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 地球物理学的データを用いたヒストリーマッチング</li> <li>• 地球物理学的手法による貯留層モニタリングの設計</li> <li>• ポテンシャル場(重力, 自然電位)のモデリング</li> </ul> |
|---|

ラメータについて今まで以上に正確な情報が得られると期待されます (Ishido *et al.*, 2010)。

### 3. 地球物理学的ポストプロセッサの役割

前回の特集号の中でも述べましたが (石戸・當舎, 2010)、地球物理学的ポストプロセッサは、主として地表で行う地球物理学的モニタリングから得られるデータをヒストリーマッチングに用いるために開発されました。貯留層シミュレーションによって計算される各グリッドブロックの温度、圧力、気相飽和度、塩分濃度等の変化から地球物理学的観測量の変化を求めるための計算ツールです。個々の手法によるデータを独立して解析したのでは有効性は限られますが、ヒストリーマッチングの中で貯留層工学データと密接にリンクさせることで、貯留層モデルの改良に貢献できるものと考えています。

地球物理学的ポストプロセッサの主な用途としては、この他にモニタリング設計における利用があげられます (第1表)。ある程度の貯留層モデル、地熱の場合であれば自然状態シミュレーションを経た生産開始前の貯留層モデルがあれば、それを用いて生産開始後の貯留層挙動について予測シミュレーションを行い、ポストプロセッサを用いて地球物理学的観測量の変動を計算します。貯留層シミュレーションでは、しばしば感度解析が行われますが、これは不確実性の大きい貯留層パラメータについて、その値を振らせて予測結果の違いを見る作業です。感度解析の結果にポストプロセッサを適用することで、モニタリング手法の選択やモニタリングの効果的な実施方法の検討に役立てることができます。ある特定の貯留層パラメータの与え方によって、例えば、特定の範囲のMT法測点での応答が大きく異なるという予測であれば、その範囲に集中したMT法のモニタリングが効果的と考えられます。2次元の比抵抗断面、あるいは3次元の比抵抗構造を決めるための大規模な測定は毎回行う必

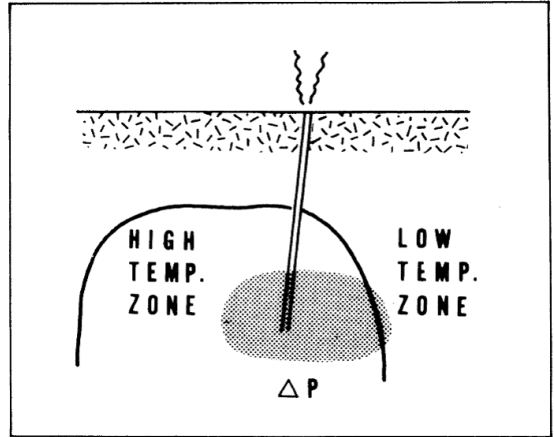
要はなく、ある特定の範囲に集中してモニタリングを行うことで、ヒストリーマッチングによってその貯留層パラメータを推定する際の有効な拘束条件が得られるものと考えられます。

3番目の役割は、重力や自然電位といった地下のソースに起因するポテンシャル場についての解析手法を提供する、ということかと思えます。ポテンシャル場については、インバージョン解析における一意性は保証されません。フォワード計算においても、与えたソースに対するポテンシャル場は一意的に決まるものの、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します。したがってソースについて何らかの制約を設ける必要がありますが、地球物理学的ポストプロセッサによる計算では、その制約にあたるのが坑井データ等から構築された貯留層モデルになります。

#### 4. 自然電位ポストプロセッサの開発と適用

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がありますが、EKPが卓越する場合には、自然電位 (SP) のモデリングにEKPによる電場計算の手法が適用できます。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のみが大きく変わると考えられますので、主たるSP変化はEKP起源であり、SPモデリングとEKP電場モデリングはほぼ等価となります。EKPポストプロセッサ (Ishido and Pritchett, 1999) は、電気二重層の電荷 (イオン) を含む物体 (水) が運動することによって生ずる電流、すなわち携帯電流を計算するもので、磁場計算の機能 (Ishido, 1999; Ishido and Pritchett, 2001) 等も付加されましたが、これら付加的な機能を除いた本体部分をSPポストプロセッサとして「貯留層変動探査法ポストプロセッサ・ユーザー会」を通じて公開しています (石戸・當舎, 2010)。前回を含め本特集号には、自然電位観測あるいはSPポストプロセッサを用いた解析の話が処々に出ていますので、ここで筆者なりにいくつかの話題について触れておこうと思います。

第3図は、地熱貯留層で生産 (および還元) 開始後に発生するEKP起源のSP変化の発生メカニズムを示



第3図 地熱貯留層における生産・還元に伴う自然電位発生メカニズム (Ishido *et al.*, 1989より引用)。高温の貯留層と周囲の低温域との境界は流動電位係数の境界面の候補であり、そこに生産による圧力変化が及ぶと地表に自然電位変化が発生する。

したものです (Ishido *et al.*, 1989)。熱水対流などソースフリーの流れに伴う地表におけるSP発生の電流源は、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します。すなわち勾配  $\nabla Lev$  あるいは  $\nabla(k/Lev)$  があって、その方向に流体が流れる場合に発生します。これに対し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変化発生の必要条件となります。流動電位係数は岩石種によって異なりますし、温度や流体中の塩分濃度によっても変化しますので、その境界面をもたらず候補は、いろいろ考えられます。

SPポストプロセッサでは、ユーザーが入力データとして岩石種ごとに  $Lev$  と  $Lee$  を計算するための地層抵抗係数 (フォーメーションファクター:  $F$ ) を与えるのが基本です。  $F$  を使って、  $Lev = F^{-1}(-\epsilon \zeta / \mu)$ 、  $Lee = F^{-1}(\sigma_f + \Lambda^{-1} \Sigma_s)$  と表されます (ここで  $\epsilon$ : 誘電率、  $\zeta$ : ゼータ電位、  $\mu$ : 粘性係数、  $\sigma_f$ : 空隙流体の電気伝導度、  $\Lambda$ : 有効水理半径 (hydraulic radius)、  $\Sigma_s$ : 表面伝導)。この中で、ゼータ電位は Ishido and Mizutani (1981) のモデルを用いて、流体の電気伝導

度などは経験式を用いて、貯留層シミュレーションの出力(温度、塩分濃度、液相飽和度など)から計算されます。Fの値については、観測量として3次元分布が得られる可能性のあるLeeを再現するよう与えるべきかと思います。またFは貯留層シミュレーションで与える空隙率や浸透率とも関係がありますので(例えば石戸, 2005), 貯留層シミュレーションのパラメータ設定もにらみつつ与えるのが望ましいと考えられます。流動電位係数はLevをLeeで割った量なので直接的にはFに依存せず、岩石の空隙構造に関連するパラメータとしては空隙サイズの尺度である有効水理半径 $\Lambda$ のみに依存します。流動電位係数の変化は、水理半径以外では、主として温度の関数である空隙流体の誘電率と粘性係数、温度と塩分濃度の関数である空隙流体の電気伝導度(および表面伝導)、そしてゼータ電位の変化によってもたらされます。その他、気液二相流でも流動電位係数の値は、液相飽和度の関数として変化します。これら流動電位係数に関する実験的・理論的研究は、1990年代後半以降、我々の研究(Tosha *et al.*, 2003; Ishido and Matsushima, 2007)を含め急速に増えていますので、SPポストプロセッサで用いる構成則を見直してみる時機にきているかと思えます。

地熱貯留層での流体生産開始後のSP変化は、貯留層と(比抵抗が小さい)キャップロックの境界面が流動電位係数の境界面になっているので、通常、生産域では正の変化、還元域では負の変化が期待されます(Ishido and Pritchett, 2000; Yasukawa *et al.*, 2005)。ただし、これはキャップロックの分布や貯留層のタイプによっても違ってきますので注意が必要です。生産開始後、気液二相ゾーンが発達するような貯留層では、生産域で負の変化がしばしば観測されますが、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よるものと考えられます。このメカニズムはIshido and Pritchett (1999)にもダイラタンシーによる電場発生に関連して書きましたが、二相領域の流動電位係数が液相飽和度に依存することと関係しています。奥会津地域(Tosha *et al.*, 2000)や八丈島(松山ほか, 2010)で観測されたSP変動はこのようなタイプと考えられます。残念ながら澄川で観測された負の変化については、本特集号・松島喜雄氏による「自然電位の経時変化に関わるいくつかの研究の紹介」に述べられているように、別の原因による

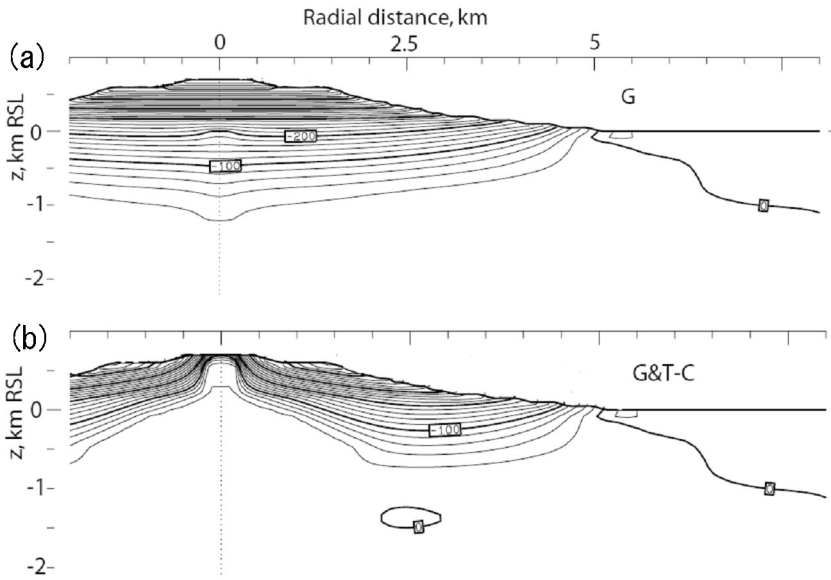
ものが卓越していたため、はっきりしたことが言えません。この大きな負変化については、石戸(2008)はここ数年の連続観測の結果からジオバッテリーによる解釈を提案しています。

気液二相ゾーン発達に伴う負異常は、液相飽和度の変化による流動電位係数の変化に対応して(直感的には熱水の下降流とそれに伴うEKPカップリングによる携帯電流の大きさの変化に対応して)時間とともに変化すると考えられます。このような変化を捉えるには数年以上の長期的なモニタリングが必要と考えられますが、定期修繕時の生産・還元の一時停止などに伴う短期的な変化にも、その時点での貯留層の状態が反映されますので、定期修繕時等に集中的な観測を繰り返すことで、気液二相ゾーンの変動がモニターできるのではないかと思います。奥会津地域については、2002年と2004年の定期修繕時に微小な変化ですが、ほぼ同じパターンのSP変化を検出しています(Nishi *et al.*, 2005; 安達, 2010)。これまでに行った予備的な貯留層シミュレーションとSPポストプロセッサ計算から、このようなデータを用いたヒストリーマッチングによって断裂型貯留層の特性がより絞り込めるものと考えています(Ishido *et al.*, 2005)。定期修繕時の自然電位観測については、本特集号・中西氏による「鬼首地熱発電所の地熱貯留層管理」の中でも述べられていますが、まだまだ解決すべき課題は多いかと思えます。観測に当たって、変化の傾向だけでなく、ある程度、変化の大きさまで予測できないと、SPモニタリングの適用は限られたものになってしまいます。今後、SPポストプロセッサへのパラメータの与え方等について、これまでに蓄積したデータに基づいて十分な検討を加えることが必要と考えています。

## 5. 火山活動モニタリングへの応用

火山地域での自然電位観測とSPポストプロセッサを用いた解析については、本特集号・松島氏による「自然電位の経時変化に関わるいくつかの研究の紹介」と長谷英彰氏による「岩石物性測定と数値シミュレーションによる火山の自然電位解釈」の中で、また相澤(2010)でも述べられています。

第4図は、伊豆大島のような火山島の概念モデルに基づいて火山体内部の天水下降流の数値シミュレ



#### 第4図

火山体内部の天水下降流による電位分布の計算例 (Ishido, 2004より引用). (a)では、標高200m付近より浅部は不飽和状態になっていて、等電位面が水平分布をしている. (b)は、海水準より深部で熱水対流が存在し、それに伴う高伝導性領域が火道周囲浅部に存在する良導体と連結した状態に対応、良導体の存在により火道周囲と火口近くの地表の電位分布が大きく影響を受けている.

ーションを行い、SPポストプロセッサにより求めた地下の電位分布です。不飽和帯の中では天水下は真下に向かって流れ、これに伴う携帯電流も真下に向かって流れます。その結果、地表が負に、深部が相対的に正に帯電して、通常のアームの法則に従う伝導電流が（不飽和帯中では真上に向かって）流れます。その結果、第4図(a)のように、不飽和帯中の等電位面は水平になります。このような状況で、何らかの原因で火山体内部に深部に連なる電気伝導度の大きい良導体が形成されると、第4図(b)のように良導体内部は深部の電位に近い等電位領域となります。良導体の上部が山頂火口直下の比較的浅部まで伸びていると、山頂付近の地表電位もその影響を受けます。良導体がない場合に負であったものが深部の電位（ $\sim 0$ ）近くへ上昇します。別の言い方をすれば、深部から浅部へリターンする伝導電流が良導体の中を集中して流れるため、山頂付近に伝導電流の湧き出しが発生した状況となります。良導体が熱水変質による粘土鉱物や深部の熱水対流によるもので時間的に安定している場合は、地表の電位は“W”字型のSPプロファイルとして安定して存在するものと考えられます (Ishido, 2004)。長谷氏の原稿に述べられているように、良導体の存在以外にも岩石によるゼータ電位の違いなど、火山のSPに特徴的な分布をもたらす原因がいくつか考えられます。したがって、SP分布の解釈に当たっては、火山体の比抵抗分布を測定するこ

とは特に重要ですが、代表的な岩石のサンプルについてゼータ電位の測定をしておくことも必要です。

良導体の時間的な変化、例えばマグマの上昇による火道の電気伝導度の増加などによりSP分布は時間的に変化すると考えられます。ただし、マグマによる付加的な伝導性の効果は、マグマと周囲の母岩との電氣的接触が保たれる場合に限られますので、この点については検討が必要です。Ishido (2009)は、マグマから高温の火山ガスが火道周囲の母岩中に放出される状況を貯留層シミュレータで計算しSP変化を推定しました。母岩中の状態は、浸透率が比較的大きい場合には、マグマに最も近いところが（液体がすべて気化した）ドライアウト領域になり、外側に火山ガスの凝縮領域が形成されます。マグマはドライアウト領域によって電氣的に周囲から切り離されますが、外側にできた凝縮水領域が強酸性で深部まで延びる良導体を形成すると、その影響で山頂付近の電位は大きく増加しうることを示しました。キラウエア等で観測されたマグマ活動に伴う自然電位変化をこのような凝縮水に伴う良導体の発達と消失で説明できるのではないかと考えています。

## 6. おわりに

ニューサンシャイン計画の地熱プロジェクトとして平成9-14年度に実施された「貯留層変動探査法開発」

では、地熱貯留層を形成する断裂系の水理特性や、地熱流体の生産・還元に伴う貯留層の変化を精度良く把握する技術、およびこれらの技術によって得られるデータから貯留層モデルの構築・改良を行い、より精度の高い将来予測を行うための技術について総合的な研究開発を実施しました。産総研は、NEDOと連携を取りつつ「解析・評価」を担当しましたが、プロジェクトの終了後は、民間の方々と密接に協力してフォローアップ研究を実施しました。

本稿では、断裂系の水理特性把握と貯留層モニタリングに関わる研究トピックスの中から、筆者が長い間、研究に携わってきた自然電位モニタリングを中心に比較的最近の話題をご紹介します。火山活動のモニタリングへの適用も始まっていますが、今後、貯留層変動探査法のコンセプトを軸にCO<sub>2</sub>地中貯留分野などへの展開を図りつつ、手法の確立を目指して研究が進展することを期待しています。

#### 参 考 文 献

- 安達正敏 (2010) : 奥会津地熱フィールドの現状と今後の貯留層管理技術研究への期待, 地質ニュース, 665, 12-19.
- 相澤広記 (2010) : 電磁気観測で推定する火山体内部の地下水流動, 地質ニュース, 665, 46-52.
- 有木和春・加藤久遠 (2010) : 澄川地熱発電所の地熱貯留層管理, 地質ニュース, 665, 20-27.
- Ishido, T. (1999) : Magnetic field generation by electrokinetic coupling in 3-D resistivity structures, *22<sup>nd</sup> IUGG, Abstract JSA15-A.73*, Birmingham.
- Ishido, T. (2004) : Electrokinetic mechanism for the "W"-shaped self-potential on volcanoes, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15616, doi:10.1029/2004GL020409.
- Ishido, T. (2009) : Self-potential changes caused by magma ascent and degassing, AGU Fall Meeting, Abstract V33F-03.
- Ishido, T. and Mizutani, H. (1981) : Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775.
- Ishido, T., Kikuchi, T. and Sugihara, M. (1989) : Mapping thermally driven upflows by the self-potential method, in *Hydrogeological Regimes and Their Subsurface Thermal Effects* (Geophysical Monograph 47, IUGG Volume 2) Edited by A.E. Beck, G. Garven and L. Stegena, AGU, 151-158.
- Ishido, T., Kikuchi, T., Yano, Y., Miyazaki, Y., Nakao, S. and Hatakeyama, K. (1992) : Analysis of pressure transient data from the Sumikawa geothermal field, *Proc. 17<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, 181-186.
- Ishido, T. and Pritchett, J.W. (1999) : Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, *J. Geophys. Res.*, 104, 15,247-15,259.
- Ishido, T. and Pritchett, J.W. (2000) : Using numerical simulation of electrokinetic potentials in geothermal reservoir management, *Proc. World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, 2629-2634.
- Ishido, T. and Pritchett, J.W. (2001) : Prediction of magnetic field changes induced by geothermal fluid production and reinjection, *GRC Transactions*, 25, 645-649.
- Ishido, T., Goko, K., Adachi, M., Ishizaki, J., Toshi, T., Nishi, Y., Sugihara, M., Takakura, S. and Kikuchi, T. (2005) : System integration of various geophysical measurements for reservoir monitoring, *Proc. World Geothermal Congress 2005*, Antalya.
- Ishido, T. and Matsushima, N. (2007) : Streaming potential measured for an intact granite sample at temperatures to 200°C, *Proc. 32<sup>nd</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University.
- Ishido, T., Nishi, Y. and Pritchett, J.W. (2010) : Application of self-potential measurements to geothermal reservoir engineering: characterization of fractured reservoirs, *Proc. 35<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University.
- 石戸経士 (2002) : 地熱貯留層工学, 日本地熱調査会, 176p.
- 石戸経士 (2005) : 岩石の輸送特性と貯留層工学, 地学雑誌, 114 (6), 885-900.
- 石戸経士 (2008) : 酸化還元反応に起因する自然電位の変化, 地球電磁気・地球惑星圏学会第124回講演会.
- 石戸経士・當舎利行 (2010) : 貯留層変動探査法の目指したこと, 地質ニュース, 665号, 7-11.
- 松山一夫・村岡政行・下田昌宏・高村光一・佐々木英代 (2010) : 八丈島におけるローカルエネルギーとしての地熱開発について, 地質ニュース, 665, 28-35.
- 中尾信典・石戸経士 (2003) : 周期的流量による圧力遷移試験法を用いたフラクチャー型地熱貯留層の水理特性評価, 日本地熱学会誌, 25, 1-13.
- 中尾信典・石戸経士 (2005) : 圧力干渉試験データのインバージョン解析—森地熱地域の解析例—, 日本地熱学会誌, 27, 27-40.
- NEDO (2003) : 貯留層変動予測技術マニュアル, 443p.
- 西 祐司・石戸経士・根本健之 (2008) : 坑井内自然電位連続測定—フラクチャー岩体の水理特性推定のための新しいアプローチ, 物理探査, 61, 285-299.
- Nishi, Y., Ishido, T., Sugihara, M., Toshi, T., Adachi, M., Saeki, K. and Ishizaki, J. (2005) : Reservoir monitoring in the Okuaizu geothermal field using multi-geophysical survey techniques, *Proc. World Geothermal Congress 2005*, Antalya.
- Toshi, T., Ishido, T., Matsushima, N. and Nishi, Y. (2000) : Self-potential variation at the Yanaizu-Nishiyama geothermal field and its interpretation by the numerical simulation, *Proc. World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, 1871-1876.
- Toshi, T., Matsushima, N. and Ishido, T. (2003) : Zeta potential measured for an intact granite sample at temperatures to 200°C, *Geophys. Res. Lett.*, 30(6), doi:10.1029/2003GL016608.
- Yasukawa, K., Ishido, T. and Suzuki, I. (2005) : Geothermal reservoir monitoring by continuous self-potential measurements, Mori geothermal field, Japan, *Geothermics*, 34(5), 551-567.

ISHIDO Tsuneo (2010) : Recent topics of researches on geothermal reservoir dynamics.

< 受付 : 2010年7月27日 >