

貯留層変動探査法の目指したこと

石戸 経士¹⁾・當舎 利行¹⁾

1. 特集号の経緯

「貯留層変動探査法開発」は、地熱エネルギーを安定に抽出するため各種の探査データをあらゆる角度から解析して貯留層の実態を把握することを目標として1997年度から国のプロジェクトとしてNEDOにおいて実施されました。しかし、この技術開発プロジェクトは、他の地熱技術開発プロジェクトと同様に、2003年3月にて終了を余儀なくされました。国の技術開発プロジェクトでは、貯留層の実態を把握するための様々な探査手法の開発を行いました。それらを組み合わせての実フィールドへの適応は実施できませんでした。このためプロジェクトの終了後は、産業技術総合研究所(産総研)と民間とが密接に協力した共同研究や連携研究によってシステムの統合を目指したフォローアップの研究調査が進められ、地熱貯留層の実体解明、長期予測に有効な手法がいくつか開発されてきました。貯留層変動探査法開発プロジェクトで得られた成果概要は、総括報告書(NEDO, 2003a)、技術マニュアル(NEDO, 2003b)、予測技術マニュアル(NEDO, 2003c)、解析・評価総括報告書(産総研, 2003)等によって知ることができます。

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この6年間の主なトピックスが報告されました(當舎と石戸の講演)。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(安達正敏、松山一夫、中西繁隆、有木和春各氏の講演)。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(花野峰行、相澤広記、長谷英彰各氏の講演)。

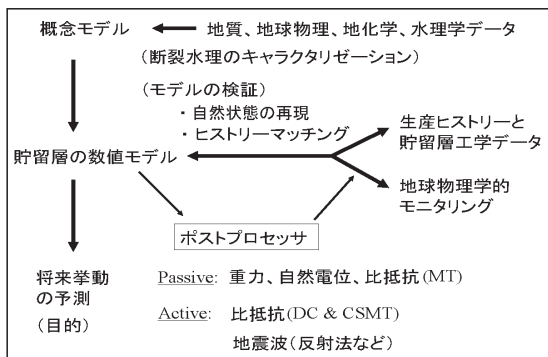
当日は、63名の方の参加があり、シンポジウム後の懇親会を含め活発な意見交換が行われました。シンポジウムの企画・準備は地圏資源環境研究部門の安川香澄氏、西澤 修氏、電源開発(株)の中西繁隆氏、および當舎が担当し、当日の開会挨拶は矢野雄策氏、進行・司会は安川香澄氏、西 祐司氏、および電源開発(株)の赤坂千寿氏にお願いしました。この場をお借りして、講演者の皆様はじめ関係各位に感謝申し上げます。さて本特集号ですが、シンポジウムの講演者から寄せられた5件の原稿と投稿原稿1件からなっています。特集号の企画と原稿の取りまとめは、地圏資源環境研究部門の杉原光彦、柳澤教雄両氏が担当しています。誌面の関係上、シンポジウムの講演すべてを本特集号に掲載することが不可能なため、時を改めて、続編の刊行が予定されています。

2. 貯留層変動探査法のコンセプト

地熱貯留層の開発にあたっては、どの程度の地熱流体の生産規模が適切か、また長期的に安定して貯留層に蓄えられている熱を回収できるかを評価しておくことが必要となります。調査、開発の各段階で、何らかの貯留層評価が行われますが、発電所の建設を決定する段階では、数値シミュレーションによる評価が行われます。第1図に数値シミュレーションによる貯留層評価の流れを示しますが、この段階では、自然状態シミュレーションによって貯留層の数値モデル(以下、貯留層モデルと略称)が作られ、予測シミュレーションによって、想定する生産・還元計画が数十年の期間にわたって可能であることを確認します。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 地熱貯留層, モニタリング, 数値モデリング



第1図 貯留層変動探査法における貯留層評価の流れ。

自然状態シミュレーションというのは、熱水対流というダイナミックな状態を数値シミュレーションにより再現し様々なデータを統合する作業と言えます。例えば貯留層の温度分布は対流の影響を強く受けていますので、井戸で測定された温度プロファイルを再現するためには貯留層モデルで設定する浸透率の分布を調整することが必要になります。浸透率は井戸の生産性を左右する重要なパラメータですから、坑井テストなどによって原位置の値を測定しますが、3次元かつ不均質性の強い地熱貯留層の全体にわたって測定値を得ることは不可能です。限られた測定値から全体の分布を推定する上で自然状態シミュレーションはなくてはならない手法となっています。

ただし、自然状態シミュレーションの段階では、生産条件下での境界条件や貯留層の断層特性などについて確実な設定ができません。そこで、この段階で行う予測シミュレーションでは断層系の水理特性にかかわるものなど不確実性の高いパラメータについては、“控えめ”なパラメータ設定を採用することが求められます。控えめなパラメータ設定とは、かなりの幅をもってしか推定できないパラメータについて、その幅の中でパラメータを変化させて何通りかの予測計算を行い、可能な発電規模として最も小さい値を与えるようなパラメータ設定を意味します。計画している発電規模が控えめな設定で予測した結果より小さければ、その計画は実行に移せることになります。逆の場合には、計画規模の縮小を検討するか、さらに調査を行ってパラメータの推定幅を小さくした上で再度予測計算を行うことが必要になります。

発電所の運転が開始し本格的な地熱流体の生産がはじまると、地熱貯留層では様々な変化が発生し

ます。生産ゾーンでの圧力減少とそれに伴う周辺あるいは還元ゾーンからの低温流体の流れや、閉鎖性の強い場合には貯留層内での沸騰などが発生します。発電開始後の貯留層の変動を捉えることは貯留層を維持・管理する上で不可欠ですが、貯留層モデルの不確実なパラメータについてより良い推定値を得る上でも重要です。貯留層の変動を再現するように貯留層モデルのパラメータを調整するヒストリーマッチングは、貯留層モデルに基づく予測の信頼性を上げるのにはなくてはならないものです。

貯留層モニタリングは、いわば人工的な刺激に対する貯留層応答を観測することであり、ヒストリーマッチングによって境界条件、断層特性などのより確実な推定が可能となります。モニタリング項目のうち、生産・還元井の流量、生産流体のエンタルピーや化学成分は必須のものです。しかし、通常これらだけから貯留層モデル改訂のための十分な拘束条件を得るのは困難です。このため、観測井を掘削して圧力、温度などをモニターすることが望まれますが、これを広範囲にしかも3次元的に行うのは膨大な費用を要することから、一般的には困難です。

そこで「貯留層変動探査法開発」では、地球物理学的なモニタリング手法とそのデータを用いたヒストリーマッチング技術について研究開発を行いました。重力、自然電位、比抵抗、微小地震・地震波の地球物理学的モニタリング手法について、繰り返し測定法、連続測定法、データ解析法の改良と高精度化を目指した研究が行われました。地表からの観測は坑井を用いた観測に比べ間接的ですが、フィードゾーン近傍の不均質性の影響を強く受ける坑井情報に比べ、貯留層内のマクロな変動を捉えることが可能です。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期待されます。

第1図に示したポストプロセッサは、地球物理学的モニタリング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(主として地表における)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(當舎ほか, 2001)。重力では基本式は単純ですが、他のポストプロセッサでは比抵抗や弾性波

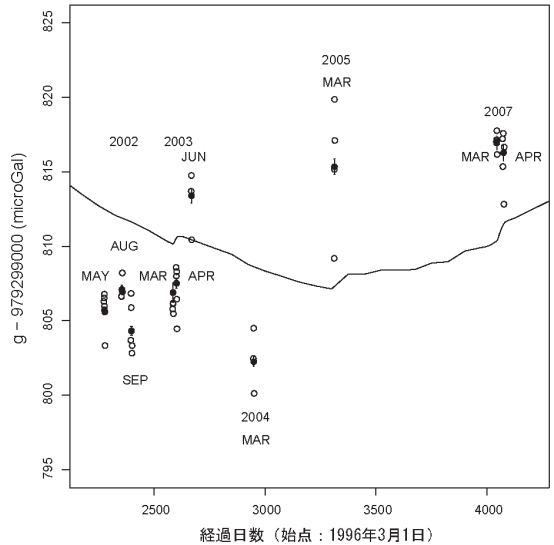
速度を求めるために種々の構成則、関係式が用いられています。

3. 断裂系のキャラクターゼーション

地熱貯留層の多くは、流体の通路が断裂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。また、開放性の小さい貯留層では生産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します。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ますので、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。このため、貯留層変動探査法開発では、「断裂水理探査法」のサブテーマのもと坑井テストや検層法についての研究開発が行われました。また、「モデリング支援技術」のサブテーマでは、地質、地球化学的観点から貯留層の時間発展を含めた概念モデル構築に資するための研究が行われました。

4. システム統合化

産総研では、国のプロジェクトとしての「貯留層変動探査法開発」で為し得なかった複数の地球物理学的モニタリング手法による結果を、一つの貯留層モデルに当てはめてその改良を目指す「システム統合化」のための共同研究を2002-2004年の3年間、ディベロッパー、電力会社との間で実施しました。また、その後も個別の手法について共同研究を継続しています。大霧、柳津西山、澄川地熱発電所等において、定期修繕時の生産・還元一時停止の機会などを捉えて重力、自然電位などの連続的な観測を行い、得られたデータのヒストリーマッチングを試みています。重力モニタリングについては、基準点に可搬型絶対重力計を設置したハイブリッド測定(本特集号・杉原光彦氏による「絶対重力計測の現場から」参照)により、従来は捉えることのできなかった微小な変化の検出に成功しています。重力と自然電位では貯留層内で発生する変動の異なる面を反映していますので、貯留層モデル改良のためには、重力と自然電位の組み合わせのように複数項目を同時にモニタリングする



第2図 大霧地域における絶対重力測定の結果。実線は貯留層シミュレーションと重力ポストプロセッサによる計算値(Sugihara and Ishido, 2008より引用)。

ことが効果的と考えられます(Ishido *et al.*, 2005)。

柳津西山地熱発電所のある奥会津地域では、微小重力の繰り返し測定が発電所運開前の1994年から行われ、国のプロジェクトがこれを引き継ぐ形で実施されました(本特集号・安達正敏氏による「奥会津地熱フィールドの現況と今後の貯留層管理技術研究への期待」)。システム統合化の共同研究の中では、自然電位とMT法測定に加え、発電所の定期修繕時を中心にハイブリッド重力測定、自然電位連続測定を行っています。自然電位については、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変化を検出しています。これまでに予備的な貯留層シミュレーションを行い、重力に加えて自然電位の変動をマッチングすることで断裂型貯留層の特性をより絞り込める可能性を確認しています(Ishido *et al.*, 2005)。今後、より詳細なモデルを構築して、重力・自然電位の変動データを用いたヒストリーマッチングを行う計画です。

大霧地域では、国のプロジェクトの中で自然電位と比抵抗モニタリングの研究開発が行われましたが、産総研と日鉄鹿児島地熱(株)の共同研究の中では、自然電位モニタリングの一部を引き継ぐとともに、ハイブリッド重力測定、微小地震観測、傾斜計観測、繰

り返し3次元電気探査、MT法データの3次元インバージョン解析などを行ってきました。第2図に示すのは、2002年から2007年までの間の絶対重力計の測定結果です。ハイブリッド重力測定で得たデータについては、国のプロジェクトで構築された貯留層モデル(NEDO, 2003a)をベースにしてヒストリーマッチングを行い、流体リチャージに関する貯留層の境界条件を推定する上で有効な拘束条件になることを確認しました(Sugihara and Ishido, 2008)。貯留層モデルの自然状態シミュレーションでは、銀湯断層沿いの噴気を再現することに留意しました(Yano and Ishido, 1995の考え方を踏襲)。貯留層内に存在する気液二相ゾーンを再現することは、広範囲の浸透率分布や境界条件の調整も必要になりますので、貯留層モデルの構築にとっては重要なステップとなります。自然状態シミュレーションを進めるには貯留層を含む地熱系の理解が欠かせませんが、そのベースは多くの先人たちの調査・研究によって築かれたものです(この点について本特集号・花野峰行氏による「蒸気卓越型地熱資源の理解進展のきっかけ」が大変参考になります)。

澄川地域では、本特集号・有木和春、加藤久遠両氏による「澄川地熱発電所の地熱貯留層管理」にありますように、割れ目構造の把握が重要な課題となっています。地質調査所時代の共同研究では、圧力干渉テストから推定された断裂系の水理特性をもとに貯留層シミュレーションによる重力変動の予測計算などを行いました(Ishido et al., 1995)。その後、実際の測定で還元に伴う重力増加などを検出しましたが、より精度を上げた重力観測の必要性が認識され(Sugihara and Ishido, 1998)、その後の可搬型絶対重力計の導入に至っております。産総研になってからの共同研究の中では、「断裂水理探査法」で開発された流量制御型の空気注入装置などを用いて100m級観測井での圧力遷移・干渉テストを試行し、同時に自然電位、比抵抗、重力等のモニタリングを実施しました。さらに自然電位については、定期点検時の生産・還元一時停止に伴う変化の検出を目的に、地上(1m深)および観測井内に非分極性電極を設置し連続観測を継続しています。澄川地域では地表配管などの人工構造物に伴うノイズの影響が強くなっていますが、その実態が解明されつつあります。

産総研では、これまでに地熱貯留層評価・管理技

術に関する共同研究を上記の3地域に加え、森、松川、葛根田、上の岱、鬼首、八丁原の各地域を対象として行い、要素技術の適用と改良を図ってきました。また、本特集号・松山一夫氏ほかによる「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」に紹介されていますが、八丈島地熱発電所では貯留層モニタリング手法として自然電位の繰り返し調査が採用され、蒸気生産に伴う変化が検出されています。このデータをヒストリーマッチングで役立てていただくためには、自然電位ポストプロセッサの実データへの適用事例を増やし、必ずしも簡単ではない関連パラメータの設定法をマニュアル化していくことが必要です。自然電位の時間変化は例えば貯留層内沸騰の推移を反映していますので、当面、時間変化のパターンに注目した解析は可能と思います。今後、室内実験によるカップリング係数の測定なども含め実用化を目指して研究を継続したいと考えています。なお、第1図に示したポストプロセッサのうち、重力、自然電位、比抵抗については、2004年に「貯留層変動探査法ポストプロセッサ・ユーザー会」を組織し、現在、地圏資源環境研究部門CO₂地中貯留研究グループが事務局となって、その普及を図っています。

(ユーザー会のホームページ:

<http://staff.aist.go.jp/ishido-t/usergroup/>)

5. 他分野への展開

産総研では、CO₂地中貯留研究グループを中心として、帯水層に注入されたCO₂挙動の解明と予測精度向上のための研究を進めています。帯水層中のCO₂貯留においては、注入されたCO₂の挙動を把握する上で種々のモニタリングが不可欠であり、繰り返し反射法などが基本的なモニタリング手法と考えられています。産総研では、NEDOの貯留層変動探査法開発におけるポストプロセッサ開発を引き継ぐ形で、第1図に示す地震波ポストプロセッサ等の開発を進めてきました。現在、反射法に加え、重力、自然電位、電磁法比抵抗の各モニタリング手法について、仮想の帯水層モデルを用いて注入CO₂挙動の数値シミュレーションを行い、ポストプロセッサ計算によって各手法の可能性について検討を進めています(石戸ほか, 2006)。

これまでに多くの火山で“W”字型の自然電位プロ

ファイルが報告されています。山を登るにしたがって電位は下がっていきませんが、山頂火口に近づくにしたがって電位が急激に上昇し麓の電位値程度に回復します。自然電位法が地熱探査に用いられるきっかけの1つとなったハワイ、キラウエアでの測定結果、噴火割れ目に沿う1voltを超える正電位異常も、海岸付近を基準にすると一旦下がった電位が割れ目付近で元にもどった結果と解釈できます。“W”字型プロファイルの成因については、火山体内部の天水下降流の数値シミュレーションと自然電位ポストプロセッサ計算により定量的なモデルを提案しています(Ishido, 2004)。本特集号・相澤広記氏による「電磁気観測で推定する火山体内部の地下水流動」では、国内の5つの活火山での自然電位と比抵抗の観測結果から、火山体内部の地下水流動について概念モデルを構築し、流動シミュレーションと自然電位ポストプロセッサ計算によってこのモデルが定量的にも成り立つことを示しています。今後、自然電位と比抵抗の観測は、火山体内部の地下水流動探査にとって重要な手法として発展することが期待されます。

参 考 文 献

- Ishido, T. (2004) : Electrokinetic mechanism for the "W"-shaped self-potential on volcanoes, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15616, doi:10.1029/2004GL020409.
- Ishido, T., Sugihara, M., Pritchett, J. W. and Ariki, K. (1995) : Feasibility study of reservoir monitoring using repeat precision gravity measurements at the Sumikawa geothermal field. *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*, 853-858, Florence.
- 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, *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya.
- 石戸恒雄・杉原光彦・當舎利行 (2006) : 帯水層CO₂地中貯留の物理探査モニタリング, 地質ニュース, 621号, 38-44.
- NEDO (2003a) : 貯留層変動探査法開発総括報告書.
- NEDO (2003b) : 貯留層変動探査法技術マニュアル.
- NEDO (2003c) : 貯留層変動予測技術マニュアル.
- 産総研 (2003) : 貯留層変動探査法開発の解析・評価総括報告書, AIST03-C00018.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (1998) : Gravity monitoring at the Sumikawa geothermal field, Japan, *Geothermal Resources Council Transactions*, 22, 191-195.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (2008) : Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry, *Geophysics*, 73, WA37-WA47.
- 當舎利行・石戸経士・中西繁隆・横井浩一 (2001) : 地熱地域における貯留層診断技術-熱水流動シミュレーションと組み合わせた解析方法, 物理探査, 54, 433-454.
- Yano, Y. and Ishido, T. (1995) : Numerical modeling of the evolution of two-phase zones under a fractured caprock, *Geothermics*, 24, 507-521.
- Ishido Tsuneo and TOSHA Toshiyuki (2010) : The goal of researches on geothermal reservoir dynamics.

<受付：2009年11月10日>