

ポストプロセッサによる地球物理観測量の変動予測

石戸経士¹⁾・杉原光彦¹⁾・西 祐司¹⁾

1. はじめに

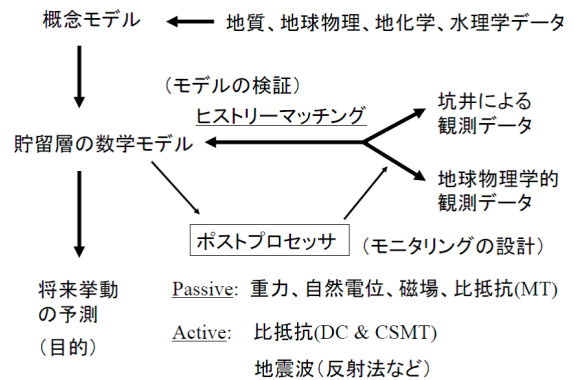
地下に圧入したCO₂の貯留層内での挙動を把握するため、また、貯留層からのCO₂漏洩という潜在的なリスクに備えるため、適切なモニタリングの実施はCCS事業にとって不可欠な要素となっています。また、モニタリングにより検知した変化をフィードバックすることによって、地下モデルが精緻化され、貯留層内の挙動のより正確な把握と将来予測精度の向上が図れると考えられています。

種々のモニタリングによって得られたデータを数値シミュレーションによって再現するよう貯留層の数値モデルを変更・調整する作業をヒストリー・マッチングといいます。産業技術総合研究所では、物理探査手法(微小重力測定、地震探査、電気・電磁気探査等)によって得られたデータをヒストリー・マッチングで使えるようにするための研究を進めています。具体的には、地下の流体流動シミュレーション(以下、貯留層シミュレーション)によって計算される圧力、温度、塩分濃度、CO₂飽和度等の変化を、地球物理観測量の変化に変換するためのプログラムの開発・整備を行っています。この物理量変換プログラムのことを地球物理(学的)ポストプロセッサと呼んでいます。

以下、本稿では、地球物理ポストプロセッサの概要と、最近の適用例を紹介します。

2. 地球物理ポストプロセッサの開発

地球物理ポストプロセッサの開発は、産業技術総合研究所(旧地質調査所)における地熱分野の研究の中で始まりました。1997年までに、汎用貯留層シミュレータSTARによるシミュレーション結果を処理して地球物理観測量の変動を計算するための基本フレームを構築し、微小重力、自然電位測定に対応したポストプロセッサを開発しました(Ishido *et al.*, 1995; Ishido and Pritchett, 1999)。その後、NEDOの「貯留層変動探査法開発」プロジェクトとして、地熱貯留層管理技術のための応用研究が進められ(當舎ほか, 2001; 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2003;



第1図 地球物理ポストプロセッサを用いたヒストリー・マッチング。

産業技術総合研究所, 2003), 直流法やMT法といった比抵抗探査に対応したポストプロセッサの開発や、フィールド・データへの適用を通して手法毎のポストプロセッサの改良が行われました(第1図)。また、各ポストプロセッサで使われる構成則を改良するために、例えば、自然電位ポストプロセッサ関連では高温下の流動電位係数について室内実験などを行いました。さらに、複数の物理探査手法の適用によるヒストリー・マッチングの効率化を目指して「システム統合化」のための共同研究などを実施しました(Ishido *et al.*, 2005; 石戸・當舎, 2010)。

CCSの研究が始まってからは、特に地震波ポストプロセッサの開発を加速させ、反射法や坑井間探査に対応した機能を整備するとともに、地震波速度・減衰変化のCO₂飽和度依存性をパッチィ飽和モデルで与えるよう構成則の改良を行いました。また、汎用貯留層シミュレータSTAR(Pritchett, 1995, 2002)用に状態方程式パッケージとして、CO₂の臨界点近傍を高精度に扱えるよう“SQSCO2”を開発しました。このパッケージを使うと、H₂O、CO₂、NaClの3成分と、水溶液(CO₂とNaClが溶解)、CO₂の気相(超臨界相)・液相とNaCl固相の4相を扱えますが、これに対応して地球物理ポストプロセッサの拡張を行っています。これまでに開発したポストプロセッサのCO₂地中貯留分野での適用性についてはIshido *et al.* (2011)で報告しています。その他、現在手掛けているのは、地表変位ポスト

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: CO₂地中貯留, 貯留層シミュレーション, モニタリング, 物理探査

プロセッサの改良と、自然電位ポストプロセッサについて界面動電効果に加え、坑井の金属ケーシングパイプ周りの“ジオバッテリー”効果を扱うための機能の拡張です (Ishido *et al.*, 2013)。

ちなみにポストプロセッサという命名は、対象とする地球物理観測量を計算するのに、地球物理現象の支配方程式を貯留層シミュレーションの支配方程式とカップルさせて解く必要はなく、貯留層シミュレーションの結果（スナップショット）を使って“後から”解けばよいということに因っています。例えば、自然電位のポストプロセッサで扱う界面動電現象では、岩石空隙中の流体流動にカップルして電流が流れる、その結果、流体の圧力差に比例した電位差（流動電位）が発生する現象を扱いますが、電位差が発生するとそれが二次的な圧力差を発生させるという電気浸透現象も同時に発生します。ただし、二次的に発生する圧力差は非常に小さく無視できるので、界面動電現象の支配方程式を流体流動の支配方程式と同時に解く必要はありません。貯留層シミュレーションではT（熱）とH（流体・化学種）の輸送を記述する支配方程式をカップルさせて解くので、T-Hカップルド・シミュレーションですが、これにG（地球物理観測量）を加えたT-H-Gシミュレーションは一般には必要ではありません。ただし、地下の流体圧や温度の変化による応力変化や地表の変位を計算する際に、応力変化による空隙率や浸透率などの変化を考慮するには、M（力学）を入れたT-H-Mカップルド・シミュレーションが必要になります。現在、我々が改良を進めている地表変位ポストプロセッサでは、当然ながらこのフィードバックは扱えませんが、貯留層シミュレータSTARのほうで、空隙率・浸透率の圧力・温度依存性の力学モデルを組み込んであるので、そちらの方で限定的な取り扱いが可能です。

これまでに開発したポストプロセッサは、「汎用貯留層シミュレータSTAR用地球物理ポストプロセッサ」として産業技術総合研究所の知財管理システム：AIMSに登録されています。各ポストプロセッサは、汎用貯留層シミュレータSTARの計算出力ファイル（“geoファイル”）を入力として、地球物理観測量の空間分布・時間変化を計算するためのモジュール群であり、他の汎用貯留層シミュレータの計算出力もgeoファイル形式に変換可能であればポストプロセッサに入力可能です。現在までにTOUGH2の計算出力をgeoファイルに変換するインターフェースも開発しています。ポストプロセッサは、基盤レイヤー（geoファイルの入力、図化ファイルへの出力処理、日付・時刻処理等の各探査手法共通の処理を実施）、物性モデリング・レ

イヤー（geoファイルに記録された圧力・温度・塩分濃度・CO₂飽和度等から構成則を用いて地震波速度・減衰、流動電位係数、比抵抗構造等、各探査法に関連する物性値を計算）、および探査モデリング・レイヤー（物性値の3次元分布から各物理探査の観測量を計算）の3つのレイヤーから構成されています。なお、MT法のポストプロセッサでは、探査モデリング・レイヤーは外部プログラムへのインターフェースのみを準備し、計算は外部プログラムを使用して実施するようにしています。

3. 繰り返し反射法を補完する微小重力モニタリング

CO₂地中貯留の分野において、貯留層シミュレーションとリンクした地球物理ポストプロセッサ計算は、以下のようないくつかの目的で使用できるものと考えています。

① 適切なモニタリング・システムの選択・配置の検討：想定した地下モデルおよび潜在リスクに対して、地表における物理探査データの分布および変化を予測し、これを測定するための適切なモニタリング手法の選択とその配置などを検討する。

② 地下状態の迅速な把握：実測で得られたモニタリング・データを、計算により予測された物理探査データの変化と比較することによって、圧入したCO₂が予測通り貯留されているか確かめる。

③ 予測とは異なる実測値が得られた場合、実測値を説明するよう地下モデルを改良し、CO₂の挙動も含めて差異が生じた原因を究明する。また、予測とは異なる挙動が、潜在リスクに起因する可能性が考えられる場合には、その監視のための効果的なモニタリング手法の選択とその配置などを検討する。

④ 貯留モデルの検証・高精度化：ヒストリー・マッチングによる地下モデルの改良により、より精度の高いCO₂の将来挙動予測を行う。

ここでは、上記の①の観点で行った、潜在リスクを想定した貯留層シミュレーションと、その結果に重力および地震波（反射法）のポストプロセッサを適用した計算例を紹介いたします。

(1) 貯留層シミュレーション

ここで述べる貯留層シミュレーションは、米国ユタ州のGordon Creek地域の概念モデルにもとづいて行ったものです。第2図に示すように、かなり単純化したもので、Entrada砂岩層（200~400 mRSL）を圧入帯水層、その上

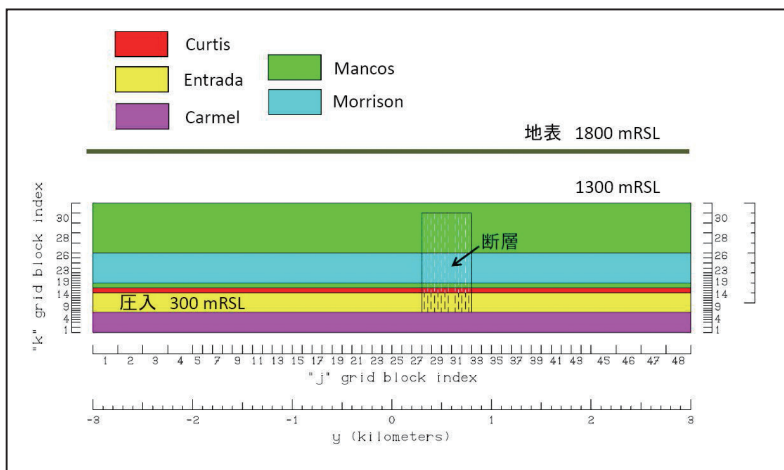
位のCurtis層を遮蔽層と設定し、CO₂を年間100万トンで圧入した場合の地下におけるCO₂の流動を計算しました。

解析対象範囲の地表標高は海拔1800 mで平坦とし、数値グリッドは鉛直方向(z方向)に海拔0 mから1300 mをk=1~31の31レイヤーに分割、水平方向にはx, y方向とも6 kmをi=1~48, j=1~48のブロックに分割しています。ブロックのサイズは中央の圧入深度付近で100 m×100 m×25 mと最も詳細にしています。岩石の浸透率は、Entrada層には水平方向100 mD(ミリダルシー)、鉛直方向10 mDを与え、遮蔽層となるCurtis層とMorrison層には(水平・鉛直とも)それぞれ0.01 mDと0.1 mD、浅部帯水層であるMancos層には100 mDを与えています。相対浸透率は水についてはvan Genuchtenの関係式、CO₂についてはCoreyの関係式で与え、毛管圧はvan Genuchtenの関係式で与えています(スレシヨルド圧は砂岩層と断層部で~0.02 bar, 遮蔽層で~1 bar)。また、空隙率は断層部以外ではすべて10%としました(第2図)。

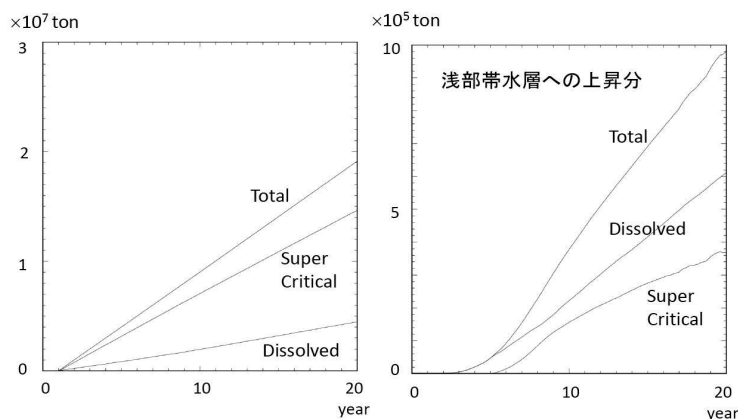
境界条件は、シミュレーション対象領域の上面(海拔1300 m)で不透水・30℃の温度固定、領域下面で不透水・69℃の温度固定、側面は最上層(k=31)とEntrada層中のk=10を除いて不透水・断熱としています。k=31の側面境界では50 barsの圧力固定、またk=10の側面境界では、圧力の10 barsの上昇に対して年間~100万トン相当の流体が系外に流出する圧力依存型の境界条件を設定しました。初期状態は、流体はすべて質量分率0.03のNaClを含み、地温勾配~30℃/kmの静水圧状態としました。

CO₂の圧入は、海拔250 mに位置する中央(x=0, y=0)の4つのブロックに年間100万トンのレートで行い、地下の流体流動を計算しました。なお、圧入CO₂の温度は60℃となるよう設定しています。

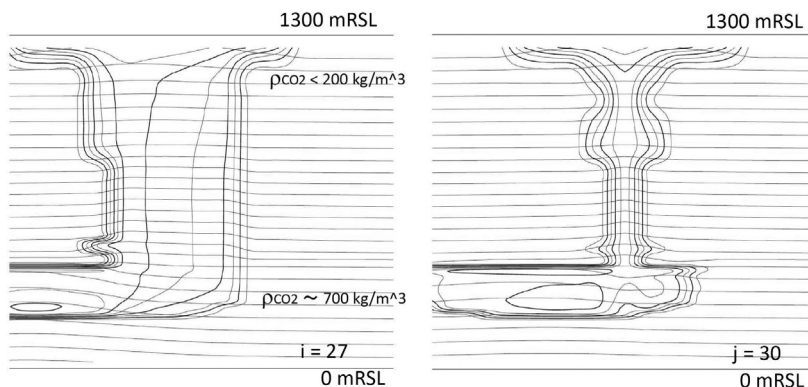
ここでは断層のない場合と、潜在リスクとして仮定の鉛直断層を設定した場合の2つのケースについてシミュレーションを行いました。



第2図 数値モデルで設定した地層区分とグリッドのブロック分割(i=27のyz断面)。地表標高は1800 mとし、深度方向に海拔0 mから1300 mを31レイヤーに分割、水平方向には6 km×6 kmを48×48のブロックに分割。断層ありのケースでは、i=27, j=28~32, k=7~30の範囲に断層ゾーンを設定。反射法ポストプロセッサの計算では、1300~1800 mRSL間の領域の弾性率等は、貯留層シミュレーションの最上k=31ブロックの値と等しいとした。



第3図 断層ありの場合の系内の気相(超臨界)CO₂、水に溶解したCO₂、それぞれのトータル質量の時間変化。(左)計算領域全体、(右)浅部帯水層。浅部帯水層へは圧入量の約5%が上昇。CO₂圧入はt=1~20年の間、100万トン/年。



第4図 10年時点での断層面付近の気相(超臨界相)CO₂の飽和度の分布(コンター間隔は0.05)。(左)i=27のyz断面、(右)j=30のxz断面。圧力分布は5 bars間隔の細線のコンターで示す。

た。断層ゾーンは、第2図に示すように、 $x=200\sim 300$ m, $y=300\sim 800$ m, $z=200\sim 1200$ mRSLの範囲に設定し、浸透率100 mD, 空隙率0.3%としています。Gordon Creek地域では、鉛直方向の断層の存在が知られていますが、ここでは、そのような断層の1つがCO₂圧入によって開口し透水性を獲得したら、という仮の設定をしています。

第3図には、鉛直断層を設定した場合について、トータルのCO₂量、そのうち超臨界状態（気相）のまま存在する量、および水に溶解する量の時間変化を示しています。左図の計算領域全体の時間変化は断層なしの場合もほぼ同じですが、右図に示すように断層ありの場合は、トータルの圧入量のうち約5%が断層を上昇し浅部帯水層へ流れ込みます。

第4図には、断層ありの場合のCO₂の上昇の様子を示しました。浅部帯水層へ上昇したCO₂は半分以上が水に溶解していますが、圧力が低下するためCO₂ガスの密度は ~ 200 kg/m³以下まで小さくなります（圧入深度では約700 kg/m³）。

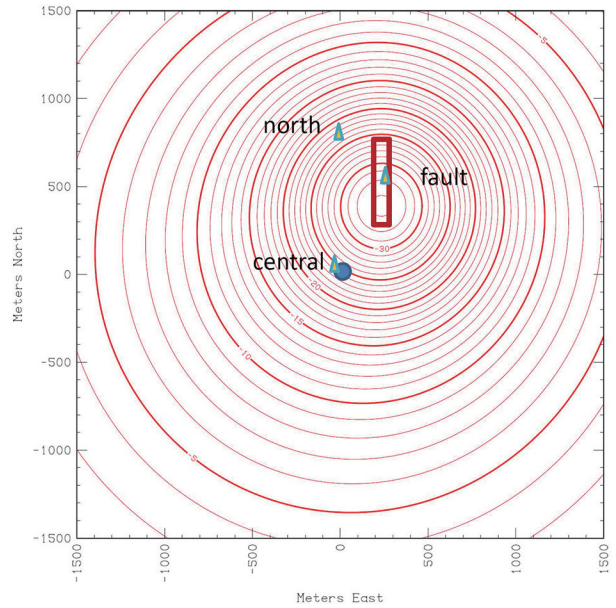
(2) ポストプロセッサ計算

以下、(1)で述べた流動シミュレーションの結果にポストプロセッサを適用して計算した微小重力測定と反射法探査に現れる変化を説明します。

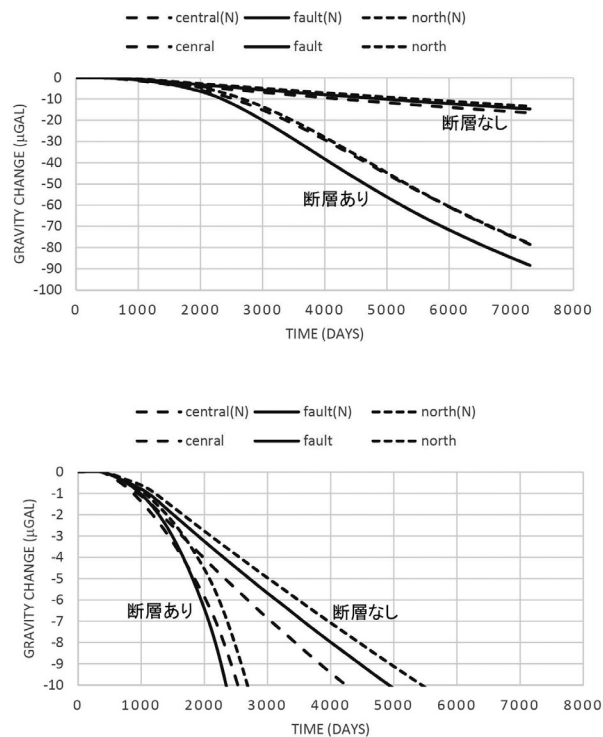
第5図に、圧入開始9年後の断層ありの場合の地表の重力分布の変化を示します。断層を通して浅部帯水層へ上昇した低密度のCO₂ガスにより、断層の直上に重力低下の目玉ができています。これに対して断層なしの場合は、重力低下の目玉は中心にあり、また低下量は第6図に示すように、断層ありの場合の3分の1程度となります。

第6図では、断層なしと断層ありの場合について重力の時間変化を比較していますが、圧入開始6年後（2500日）あたりから差が広がり始めます。また、どちらの場合も、比較的広い範囲で同様な変化となるので、1か所で高精度の連続観測を行えば、断層なしと断層ありのどちらであるかを判断できると考えられます。また、超伝導重力計による連続観測等でサブマイクロガルの変化を検出できるようになれば、もっと早い圧入開始3年後（1500日）くらいである程度の判断ができると考えられます。

第7図には、断層ありの場合の反射法の応答を示しています。中心をx方向に走る測線では、圧入帯水層内でのCO₂プルームの拡大に対応したイベントは明瞭に現れますが、圧入開始後6年でも浅部帯水層に上昇したCO₂に

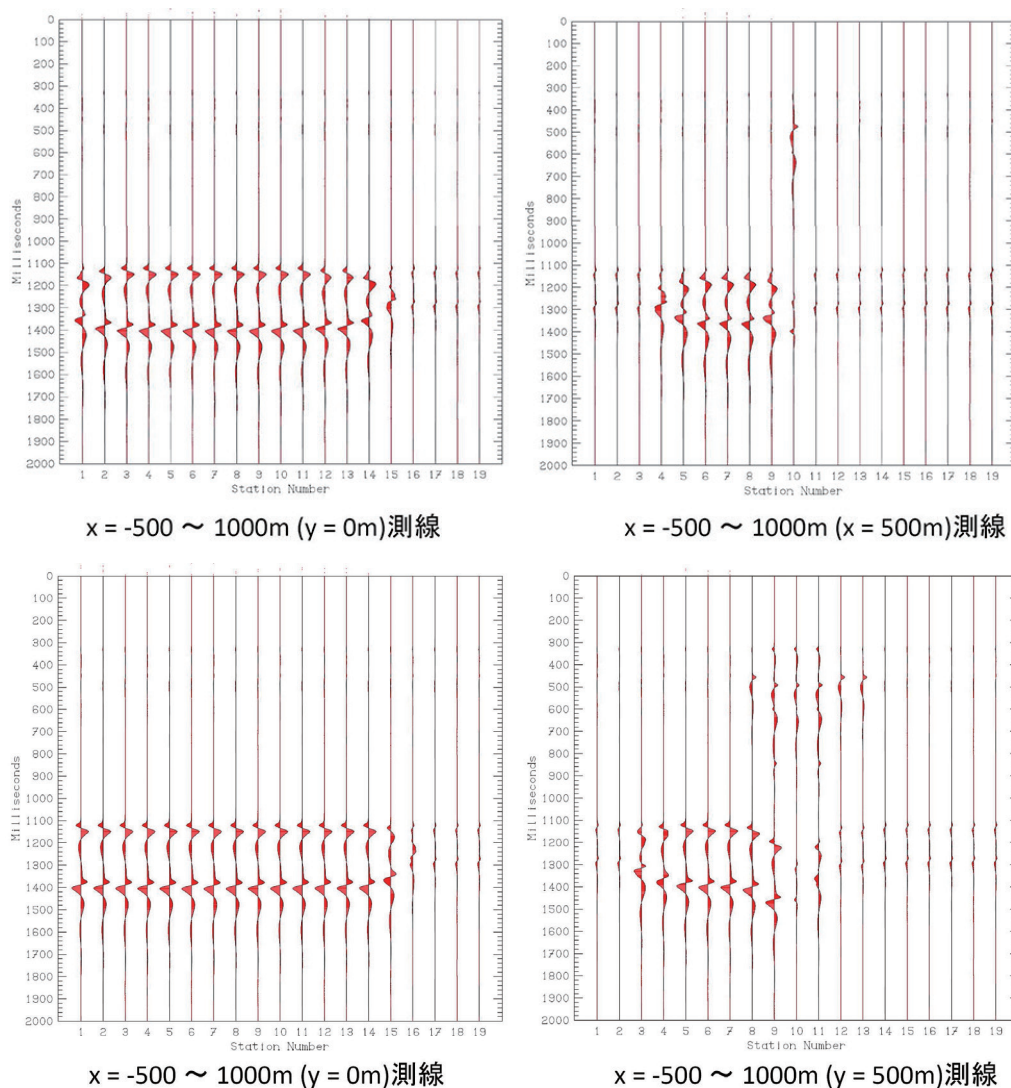


第5図 10年時点での地表での重力変化の分布（3km × 3kmの範囲）。中心の圧入点直上の central, 断層の直上の fault, 北側の north の3観測点での重力時間変化を第6図に示す。



第6図 観測点 central, fault, north における重力の時間変化。観測点名に (N) の付いているのは、断層なしの場合の結果。下図は上図の縦軸スケールを拡大。

対応するイベントは発生していません。これに対し中心からy方向へ500 mの距離にある断層直上をx方向に横切る測線では、圧入開始後4年から6年の間に浅部帯水層に上昇したCO₂に対応するイベントが出現します。反射法だから、浅部帯水層へのCO₂上昇を検出しようとすると、断層位置が事前にわかっていない場合、平面的に測点を配置



第7図 反射法ポストプロセッサで計算した注入開始後4年(上)と6年(下)における時間記録断面. 左側は中心点をx方向に走る測線(測点8が中心点位置), 右側は中心からy方向へ500mの距離にある断層直上をx方向に横切る測線の結果. 右下の6年後の結果で, 浅部帯水層に上昇したCO₂ガスによる反射イベントが現れている.

した3次元反射法をかなりの頻度で行うことが必要になります.

繰り返し反射法は, 潜在リスクに対処する上でも基本的なモニタリング手法ですが, 3次元の反射法をしばしば実施するのは費用の面から難しいと思われます. ここで紹介した計算例は, 1, 2か所での高精度の重力連続観測を併用することにより, 反射法の実施間隔を長くできる可能性を示唆しています. また, 超伝導重力計の導入によりサブマイクロガルの測定ができれば, 早い段階で潜在リスクの存在に気づいて, その挙動を監視するための反射法を含めた最適なモニタリング計画を立案するのにも役立つでしょう. 今回の設定ではモデルの上面が深度500 mですが, この深度まで上昇した時に検知できれば, さらに浅部への

移行を未然に防ぐ対策を立案するのにも役立つものと考えられます.

ここでは, 微小重力測定が有力なモニタリング手法となるケースを考えましたが, 別のケース, 例えば, 浅部帯水層の浸透率がもっと小さく, CO₂の上昇によって圧力がかなり増加するケースを考えると, CO₂密度がそれほど低下しないので, 5%程度の移動では重力の顕著な変化はなかなか現れません. この場合には, 浅部帯水層での圧力測定や(圧力変化に感度のある)自然電位測定などがモニタリング手法の候補になるでしょう. 今後, 様々なケースについて, 反射法を補完する物理探査手法によるモニタリングについて体系的な検討を進めたいと考えています.

文 献

- Ishido, T. and Pritchett, J.W. (1999) Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow. *J. Geophys. Res.*, 104, 15247–15259.
- 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*, no. 665, 7–11.
- 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. *Proc. World Geothermal Congress, Florence*, 853–858.
- Ishido, T., Goko, K., Adachi, M., Ishizaki, J., Tosha, T., Nishi, Y., Sugihara, M., Takakura, S. and Kikuchi, T. (2005) System integration of various geophysical measurements for reservoir monitoring. *Proc. World Geothermal Congress, Antalya*, paper no.1160, 1–10.
- Ishido, T., Tosha, T., Akasaka, C., Nishi, Y., Sugihara, M., Kano, Y. and Nakanishi, S. (2011) Changes in geophysical observables caused by CO₂ injection into saline aquifers. *Energy Procedia*, 4, 3276–3283.
- Ishido, T., Pritchett, J.W., Tosha, T., Nishi, Y. and Nakanishi, S. (2013) Monitoring underground migration of sequestered CO₂ using self-potential methods. *Energy Procedia*, 37, 4077–4084.
- Pritchett, J. W. (1995) STAR — a geothermal reservoir simulation system. *Proc. World Geothermal Congress, Florence*, 2959–2963.
- Pritchett, J. W. (2002) STAR's user manual ver.9.0. *Report SAIC-02/1055*.
- 産業技術総合研究所(2003)貯留層変動探査法開発の解析・評価総括報告書. AIST03-C00018.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2003) 貯留層変動予測技術マニュアル. 443p.
- 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.
-
- ISHIDO Tsuneo, SUGIHARA Mituhiko and NISHI Yuji (2014) Prediction of changes in geophysical observables by using so-called geophysical postprocessors.
-
- (受付:2014年3月27日)