

# CO<sub>2</sub> 地中貯留での地盤変化を予測する —岩石力学—流体流動シミュレーション研究—

奥山康子<sup>1)</sup>・船津貴弘<sup>1)</sup>・藤井孝志<sup>1)</sup>

## 1. 岩石力学—流体流動シミュレーション技術とは？

CO<sub>2</sub>地中貯留では地下の貯留層にCO<sub>2</sub>を圧入・貯留するため、地下を満たした流体の圧力（間隙圧）を上げ、地下の応力分布を変化させる可能性があります。この変化はさらに、岩盤の変形や岩盤内の微小亀裂の活動などの動的変化につながる可能性があります。実際に天然ガス生産のためにCO<sub>2</sub>を圧入しているアルジェリア、In Salahガス田では、CO<sub>2</sub>圧入井の周りで年1cm程度の地盤隆起、ガス生産井の周りで同じ程度の地盤沈下が起きていることが、衛星からの合成開口レーダー観測で判明しています（Onuma and Ohkawa, 2009）。地質学的な変動帯にある日本でCO<sub>2</sub>地中貯留を行って、こういった変化が目に見える規模でおきる心配はないのでしょうか？ わが国でCO<sub>2</sub>地中貯留を安全に安定的に行い、貯留サイト周辺に限らず広く社会に受け入れてもらうためには、この問いに答えるための技術開発が欠かせません。

この技術の芽として注目されているのが、「岩石力学—流体流動連成シミュレーション技術」です。これは地下での流体流動のシミュレーションと、応力分布の変化にともなう岩石力学的变化のシミュレーションを連成させたもので、CO<sub>2</sub>地中貯留だけではなく、シェールガス開発や人工的な地熱貯留層形成など、地下での応力状態を変える必要のある開発行為が盛んになるにつれ注目されてきました。このシミュレーション技術は発展途上にありますが、中でも米国・ローレンス・バークレイ国立研究所（Lawrence Berkeley National Laboratory: LBNL）が開発した「TOUGH-FLAC」（Rutqvist *et al.*, 2002）は特に注目されています。TOUGH-FLACシミュレータは、LBNLが開発した流体流動シミュレータであるTOUGH2シミュレータと、土木工学や鉱山開発分野で岩盤安定性の評価に広く使われている商用シミュレータFLAC3Dを連成させたものです。TOUGH-FLACは、地熱開発など岩石物性上「硬岩」

とされる岩盤の流体流動を伴った変形の解析に実績があり（Todesco *et al.*, 2004）、またCO<sub>2</sub>地中貯留への適用例もできています（Rutqvist *et al.*, 2007, 2008, 2010）。

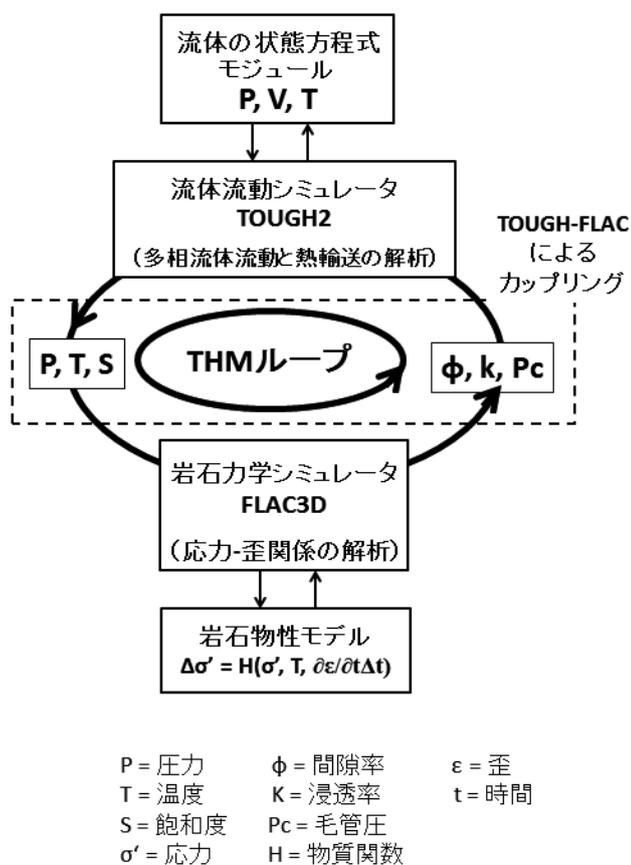
わが国でCO<sub>2</sub>地中貯留の場に想定されるのは、地球環境産業技術研究機構が実証試験を行った新潟県長岡地区に代表される新生代の地層であり、それらは岩石物性上「軟岩」と総称される堆積岩から主に構成されます。軟岩は、応力変化に対して硬岩と異なる応答をすることが経験的に知られ、硬岩地域の現象の解析に実績のあるTOUGH-FLACがそのまま軟岩岩盤へのCO<sub>2</sub>地中貯留に適用できるかは自明ではありません。わが国でのCO<sub>2</sub>地中貯留に向けTOUGH-FLACを軟岩用にカスタマイズする—これが産総研のCO<sub>2</sub>地中貯留研究開発での目標の1つです。

## 2. TOUGH-FLACシミュレーションの流れ

TOUGH-FLACシミュレータで取り扱う物理量と、シミュレーションでの情報の受け渡しを、第1図に模式的に示します。CO<sub>2</sub>貯留層は、地層水に満たされた多孔質媒体と考えられます。ここで貯留層に流体（この場合、CO<sub>2</sub>）を圧入すると、間隙流体圧が上がり、地層水と圧入流体の流動が起きます。間隙流体圧の変化は、貯留層岩石のわずかな変形につながります。また貯留層と圧入流体の間に温度差があると、流体が流動して広がることで熱が輸送され、温度変化に起因する岩石変形もおこるでしょう。流体流動シミュレータは間隙流体圧、温度、飽和度の変化を計算し、結果を岩石力学シミュレータに送ります。岩石力学シミュレータの側では、粒子の変形を計算し、間隙率・浸透率・毛管圧の変化として出力します。新たな浸透率などの値は、流体流動シミュレータ側で次のステップの流動計算に使われます。こうして計算は進みます。計算された変形の積み重なりが、岩盤・地盤の隆起や沈降という形で表現されます。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード：CO<sub>2</sub>地中貯留、岩石力学、流体流動、連成シミュレーション、変位



第1図 TOUGH-FLACで取り扱う物理量と計算の流れ. Rutqvist et al. (2002)に基づき作図.

### 3. CO<sub>2</sub>質流体活動による岩盤変位のナチュラル・アナログ研究

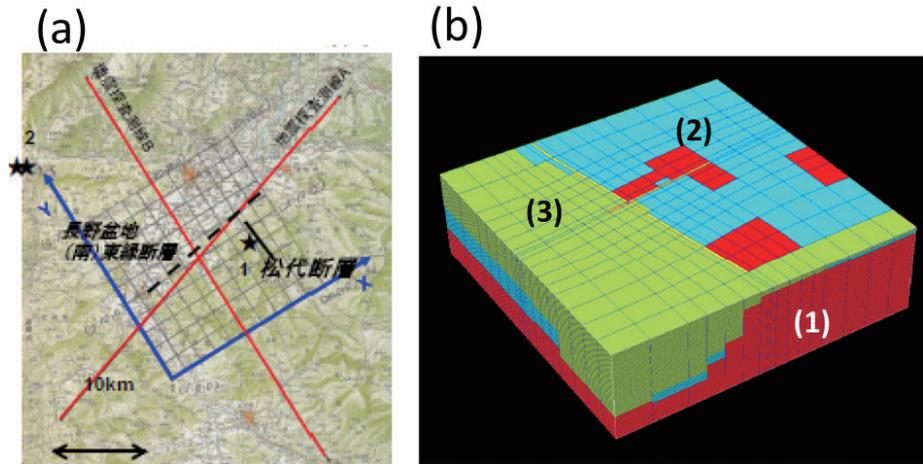
シミュレーション研究では、実データと計算結果をつき合わせる「ヒストリー・マッチング」が欠かせません。岩石力学-流体流動連成シミュレーションでのヒストリー・マッチングには、実際のCO<sub>2</sub>地中貯留実証試験などで岩盤に対する影響を計測したデータを用いるのが最も望ましいといえます。しかし岩盤の動的な変化はCO<sub>2</sub>地中貯留実証試験で起こってほしくないものの1つであり、実際に長岡などでは観測されていません。実証試験での実データ取得は無理であるため、産総研では、天然でのCO<sub>2</sub>質流体の活動による類似の現象の観測例をヒストリー・マッチングに使用する「ナチュラル・アナログ研究手法」を採用しています。ナチュラル・アナログ研究の対象地域には、長野県長野市南東部の松代地区を選定しました。ここでは、1965-1967年の足掛け3年にわたって顕著な群発地震が起き、のちには地割や断層露頭が出現し、地割れに沿ってCO<sub>2</sub>を含む高濃度の塩水が湧出するなど、CO<sub>2</sub>地中貯留で

の極端な漏洩事象とみなせる天然現象が起きました(大竹, 1976; 石川, 2006)。この現象にて地下から湧き出した塩水は、総量1,000万トンと推定されています。CO<sub>2</sub>と塩水の自然湧出や地震活動は現在おさまっていますが、今では当時の湧水と似た水質の温水を地下深くからくみ上げて盛んに温泉利用しているように、松代一帯の地下はまだ高温の含CO<sub>2</sub>塩水で満たされているとみられます。

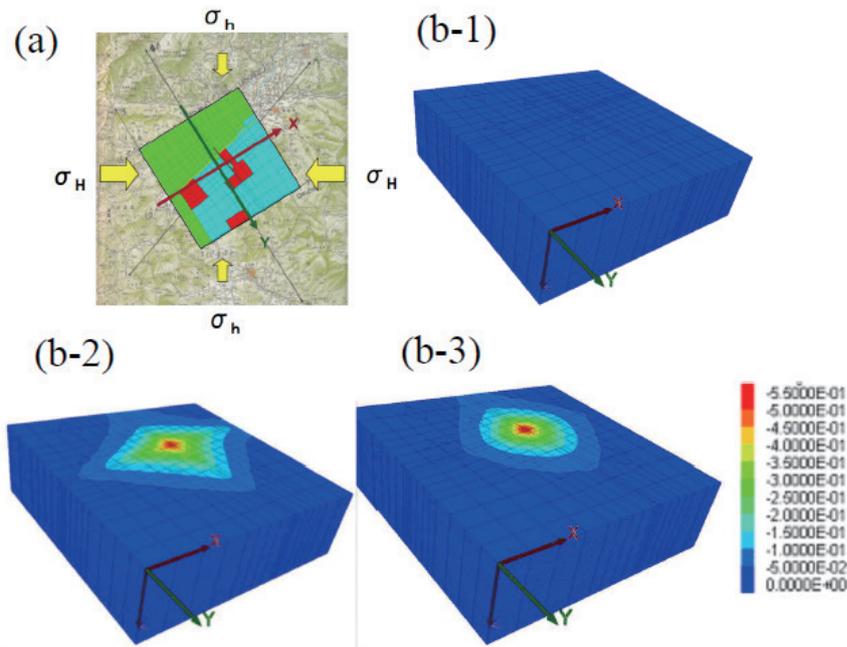
TOUGH-FLACを用いた松代群発地震の研究については、シミュレータ開発者であるLBNLの研究者たちによる先行研究がありますが(Cappa et al., 2010)、用いた地質モデルは極度に単純化されています。このため産総研では、実際の地質データに合致した地質モデル上でTOUGH-FLACが現象を再現するよう運用することを最初の課題として、研究を進めてきました。

第2図に、シミュレーション研究用に作成した地質モデルを示します。地質モデルは、松代の市街地を中心とする地表20 km四方、深さは地下6 kmで、上面は海水準としています。松代地区の位置する長野県中-北部は、群発地震を契機に現在に至るまで繰り返し地球物理学的地下構造調査が行われ、地震波速度構造などの地下データが豊富です。また地表地質も、産総研による調査を含め、比較的よくわかっています。地質モデルは、これら既存データを基に作成しました(※地質モデル作成にあたって参照した文献は、本論では割愛します)。この地質モデルは、P波速度がそれぞれ6.0, 4.5, 3.0 kmである3層構造をなし、それらが地震波探査などで得られた地下断面と合った分布をなす点が先行研究と異なります。モデル内には、群発地震期に注目された「松代断層」と、地質学的に存在が推定された「長野盆地南東縁断層」(加藤・赤羽, 1986)を共役関係に置きました。広域応力場の設定は、東西に最大圧縮軸、南北に最小圧縮軸です(第3図)。このモデルを断層部分は非常に細かく、周囲のマトリックス部分は断層から遠方に向けて粗くなるよう段階的にグリッド分割し(深度方向は500 m間隔で均等分割)、セル総数を9,248としました。試験的なシミュレーションにあたっての各種パラメータ(浸透率、岩石のヤング率など)やCO<sub>2</sub>質流体の圧入レートは、先行研究(Cappa et al., 2010)にあわせました。これは、先行研究に対して地質モデルの大きさと精密密度を変えたシミュレーションに相当します。

試験的なシミュレーションでの上面の鉛直変位分布を、第3図に示します。計算された最大隆起量は55 cmで、観測量約75 cmにほぼ匹敵する値となりました。モデル上面での隆起量分布や、破壊領域(天然現象での震源域に相



第2図 松代地区を対象としたシミュレーション用地質モデル. a) 地勢図上に示すモデル範囲. 赤色実線: 1969年の反射法人工地震探査測線, 黒実線: 松代断層, 黒鎖線: 長野盆地南東縁断層 (SEBF). b) 3次元地質モデル. a)の北西側から見た配置. (1) 6 km 層, (2) 4.5 km 層, (3) 3.0 km 層.



第3図 試験的シミュレーションの結果. a) 仮定した広域応力配置. b) TOUGH-FLACシミュレーション結果. b-1: 圧入前, b-2: 3年経過後, b-3: 5年経過後. 深さ方向を正に取っているため, 隆起はマイナスの値で表現されている.

当)の広がりについても、観測事実に比較的良好であった結果を得ました。また非対称な隆起量分布など、地質モデルの特性を反映した結果が出る要素があることもわかりました（詳しくは、Funatsu *et al.*, 2013参照）。

#### 4. むすび

TOUGH-FLACを軟岩用にカスタマイズするためには、岩石の変形様式を記述する構成則を軟岩用に更新する必要

があります。次のステップでは、CO<sub>2</sub>地中貯留の場を模した流体存在下で軟岩岩石に対する力学試験を行って、流体流動に伴う軟岩岩盤の変形様式を導き、それをシミュレータに組み込むことが必要になります。こうして改良したシミュレータを地質モデル上で動かして良好な結果を得ること、さらに松代地区に留まらない他の地域の地質条件に対しても適用可能であることを確認したうえで、最終的には手法を技術手順としてまとめることを目指していきます。

軟岩岩石の力学特性試験では、日本の後期新生代の多

様な岩石類も取り上げています。これは研究開発の最終目標が、わが国でのCO<sub>2</sub>地中貯留に向けたシミュレーション手法の一般化にあるからです。最近行った代表例が、CCS大規模実証試験が予定されている北海道、苫小牧地区の坑井試料についての摩擦強度試験です。この試験の結果は断層の安定性評価に用いられ、評価結果を受けて2012年2月に実証試験の開始が正式に決まりました。産総研は直接CO<sub>2</sub>地中貯留試験を行うわけではありませんが、この事例のように実証試験の要所要所に対してカギとなる情報を提供し、地下に関する専門研究所として必要な助言を行っています。こうして、わが国でのCO<sub>2</sub>地中貯留の実用化に向け貢献しています。

## 文 献

- Cappa, F., Rutqvist, J. and Yamamoto, K. (2009) Modeling crustal deformation and rupture processes related to upwelling of deep CO<sub>2</sub>-rich fluids during the 1965–1967 Matsushiro earthquake swarm in Japan. *J. Geophys. Res.*, **114**, B10304, doi:10.1029/2009JB006398.2009.
- Funatsu, T., Okuyama, Y., Lei, X-L., Nakashima, Y., Uehara, S., Fujii, T. and Nakao, S. (2013) Assessing the geomechanical responses of storage system in CO<sub>2</sub> geological storage: an introduction of research program in the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). *Energy Procedia*, **37**, 3875–3882.
- 石川有三 (2006) 松代群発地震から40年. 月刊地球, **28**, 753–757.
- 加藤碩一・赤羽貞幸 (1986) 長野地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, つくば, 120p.
- Onuma, T. and Ohkawa, S. (2009) Detection of surface deformation related with CO<sub>2</sub> injection by DInSAR at In Salah, Algeria. *Energy Procedia*, **1**, 2177–2184.
- 大竹政和 (1976) 松代地震から10年. 科学, **46**, 303–313.
- Rutqvist, J., Wu, Y.-S., Tsang, C.-F. and Bodvarsson, G. (2002) A modeling approach for analysis of coupled multiphase flow, heat transfer, and deformation in fractured porous media. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **39**, 429–442.
- Rutqvist, J., Birkholzer, J., Cappa, F. and Tsang, C.-F. (2007) Estimating maximum sustainable injection pressure during geological sequestration of CO<sub>2</sub> using coupled fluid flow and geomechanical fault-slip analysis. *Energy Convers. Manage.*, **48**, 1798–1807.
- Rutqvist, J., Birkholzer, J. T. and Tsang, C.-F. (2008) Coupled reservoir-geomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO<sub>2</sub> injection in multilayered reservoir-caprock systems. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **45**, 132–143.
- Rutqvist, J., Vasco, D. and Myer, L. (2010) Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO<sub>2</sub> injection and ground deformation at In Salah, Algeria. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **4**, 225–230.
- Todesco, M., Rutqvist, J., Chiodini, G., Pruess, K. and Oldenburg, C. (2004) Modeling of recent volcanic episodes at Phlegrean Field (Italy): geochemical variations and ground deformation, *Geothermics*, **33**, 531–547. doi: 10.1016/j.geothermics. 2003.08.014.

---

OKUYAMA Yasuko, FUNATSU Takahiro and FUJII Takashi (2014) Assessing ground motions associated with CO<sub>2</sub> geological storage; coupled fluid flow-rock mechanics simulation.

---

(受付：2014年3月27日)