

# マルチスケールにおけるジオメカニクモデリング

雷 興林<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub> 地下貯留・シェールガスフラッキング・油田及びガス田廃水処分・地熱開発・石油天然ガスの EOR 等の分野において、地下深部に高圧流体を圧入する必要がある。これにより、貯留層およびその周囲の地層・岩石の空隙に存在する間隙水の圧力（間隙圧）を上昇させることが予測される。この変化は地下岩盤での応力分布を変え、その変形、潜在する亀裂や断層の再活動、場合により被害性誘発地震をきたす恐れもありうる。CO<sub>2</sub> 地下貯留の場合では、既知の一定規模以上の断層を避けて貯留サイトを選定することができるが、ほかのアプリケーションでは注水サイトを自由に選ぶことは制限される。また、弾性波探査の分解能には限界があり、貯留層および周辺の岩盤に亀裂や小断層が認知されていない可能性は排除できない。近年、地熱開発・シェールガス開発・廃水地中貯蔵など地下貯留層に流体を圧入することに起因と見られる誘発地震が急増し（Ellsworth, 2013；Lei *et al.*, 2008, 2013；Zoback and Gorelick, 2012）、被害性誘発地震の発生により事業が中止されたケースも発生した（Deichmann and Giardini, 2009）。

以上のような事情を背景に、地下注水関連事業を社会が受け入れたうえで実施するためには、岩盤破壊・被害性誘発地震及びこれらの変動に関連する漏洩等の現象が起きないように事業者が何らかの対策をあらかじめ講じる必要がある。

地下深部に CO<sub>2</sub> の流体を圧入することにより、間隙圧力上昇・地層の変形・亀裂の進展・断層活動・浸透率やシール圧力などの水理特性の変化などが連動的に発生することが予想されている。このような現象を総括したジオメカニクモデリング技術として注目されている。この技術は、多孔質媒体である含水地層・岩盤中の流体流動と熱伝播に関する数値シミュレーションと、地層・岩盤の力学的応答に対する数値シミュレーションを、岩石ひずみに対す

る浸透率の変化を媒介して連成解析するシミュレーション手法である。

ジオメカニクモデリングにおいて、まず、貯留システムの地質モデルを構築する。そして、地質モデルを数値化して数値モデルを作成する。そのため、地層の力学・水理学物性値、変形破壊を支配する構成則、物性と変形のカップリングを定義する関係式を与えなければならない。これらの物性値と構成則は一般的に室内岩石実験により得られるが、スケールアップが必要である。しかし、貯留層及び帽岩からなる貯留システムに対する情報には限界があり、最初に作れるモデルは妥当である保障はない。モデル予測値と観測値を用いてヒストリー・マッチングを行い、モデルを改良していくことが現実的なアプローチである。さらに、貯留層及び帽岩からなる貯留システムのスケールにおいて、様々な大きさの地層本来の不均質構造があり、あらゆる物性パラメータにはある程度の固有的な不確定さを持つ。これにより、解析結果にも不確定さが生じる。その不確定さを評価するため、物性値の不確定さの統計的な特徴を把握するモンテカルロ手法を用いる確率論的な評価手法を採用する必要がある。

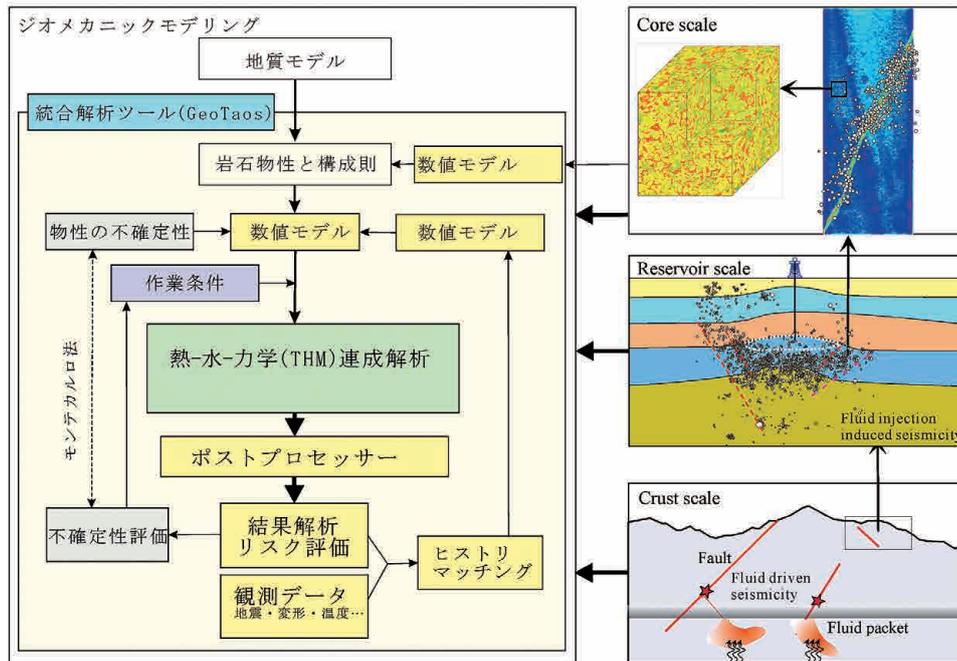
地圏メカニクス研究グループの中心的な研究の一つは、マルチスケールにおいてジオメカニクモデリング手法を開発することを目的とし、下記包括的な研究内容を含む。

- 1) 岩石力学実験により、岩石物性についての実パラメータを取得し、特に岩石の変形と浸透率変化との関係に関するデータ蓄積して構成則を作成する。データと構成則をモデリングに組み込む。
- 2) 断層安定性評価などを行うための室内実験を行い、連成解析のポストプロセッサを開発する。
- 3) モンテカルロ手法を用いる確率論的な評価手法を開発し、モデリングに適用する。
- 4) 注水誘発地震実例解析及び地下流体が関与する自然地震の研究を通して関連現象の特徴とメカニズムを解明する。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

キーワード：流体圧入、地盤変形、誘発地震、流体漏洩リスク、地下モデル、岩石実験、モデル構築、解析ソフトウェア

この原稿は地圏資源環境研究部門が発行した「GREEN Report 2015」より転載したものです。



第1図 マルチスケール・マルチアプローチを統合したジオメカニクモデリングフレームワーク。

5) 様々なスケールの試験モデルに対し、ジオメカニクモデリングを行い、スケーリングアップや履歴マッチングなどを含むモデリング手法を検証する。

6) ジオメカニクモデリングのための一般的なフレームワークを構築し、データ解析等の研究ツール群を融合・集積した統合プログラム (GeoTaos) を開発する。

室内実験研究では、多チャンネル弾性物性・水理特性・AE震源等の同時計測システムの開発と整備を行い、これを駆使して様々な岩石試料を用いて、様々な条件下での岩石実験を系統的に実施している。注水誘発地震の研究では、特に中国四川盆地の天然ガス田やシェールガス開発現場での注水誘発地震に着目し、被害性地震の発生条件・誘発地震予測モデルなどの研究と技術開発に取り込んでいる。大スケールの自然地震の研究は地熱活動地域の地震に集中し、地球潮汐・近辺及び遠隔の大地震への反応などを研究し、地下流体が地震に及ぼす影響の究明に努めている。

## 2. 室内岩石実験研究

地圏メカニクス研究グループでは、1) 三軸岩石透水(気)実験システム、2) 三軸岩石クリープ実験システム、と3) 弾性特性・水理特性・AE震源等同時計測システム等の実験装置が稼働している。これらの装置を用いて様々な条件において、1) 岩石の浸透率・ひずみ・弾性波速度等を同時に測定すること (Fujii *et al.*, 2015), と2) 水圧

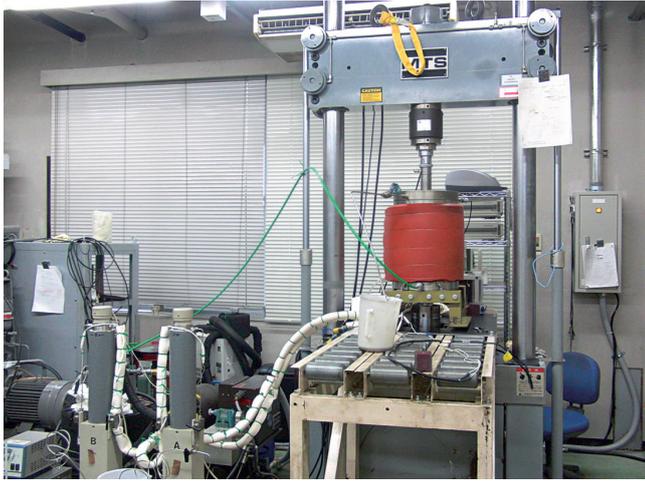
破碎を含む岩石破壊実験において静的変形から動的な破壊までの過程に微小破壊震源の時空間分布と弾性・水理物性値の変化を時空間において密に計測することが可能である。以下の図面は主要実験装置の写真と最近の代表的な実験成果を示す。各システムを活用した研究内容と成果の詳細は当グループメンバーのページに譲る。

## 3. コアスケールにおけるジオメカニクモデリング

室内では、よく制御した条件下での岩石注水実験を行うことができる。また、岩石試料の物性などを密に測定することにより、現場より優れたデータセットを収録できる。従って、実験データを用いてジオメカニクモデリング手法を開発・検証することが有効なアプローチである。

ここに、石英の脈を含有する花崗岩の三軸(封圧下)圧縮破壊実験の結果を用いて連成解析した結果 (Lei *et al.*, 2015) を紹介する。実験の条件は封圧 80 MPa で、軸応力を一定速度で上げて、破壊させた。その際、歪ゲージ 6 個、AE センサー 32 個を設けて破壊に至る過程の変形と微小破壊の時空間分布を調べた。また、複数のセンサーに電圧パルスを与え振動させて弾性波速度計測も実施した。トモグラフィ解析により岩石変形や流体による速度構造の変化を求めることができた。

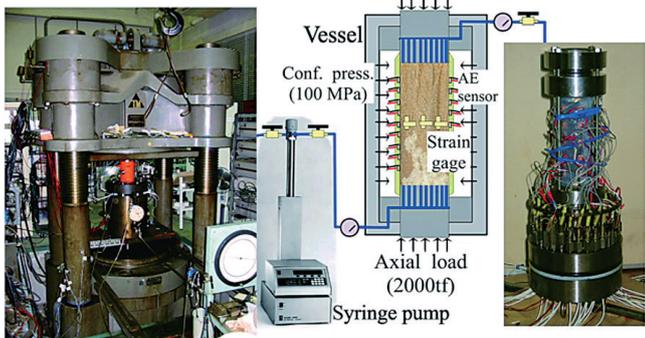
軸応力が 400 MPa を超えた時、AE、つまり微小破壊が急増し始め、破壊に強度接近していることが示される(第6図-A)。軸応力が 420 MPa になったとき、一旦



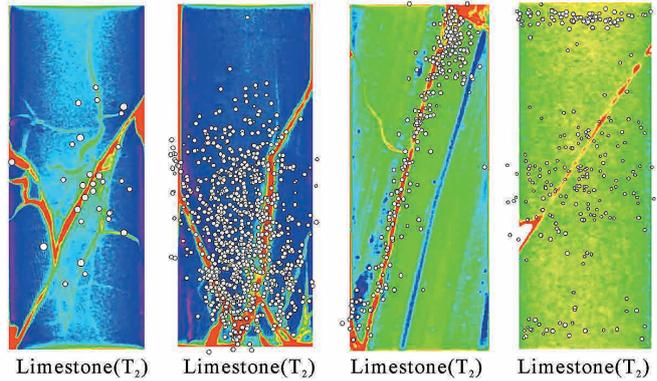
第2図 三軸岩石透水（気）実験システム差压下，岩石の浸透率・ひずみ・弾性波速度等を同時に測定。



第3図 三軸岩石クリープ実験システム。



第4図 弾性特性・水理特性・AE震源等同時計測システム。



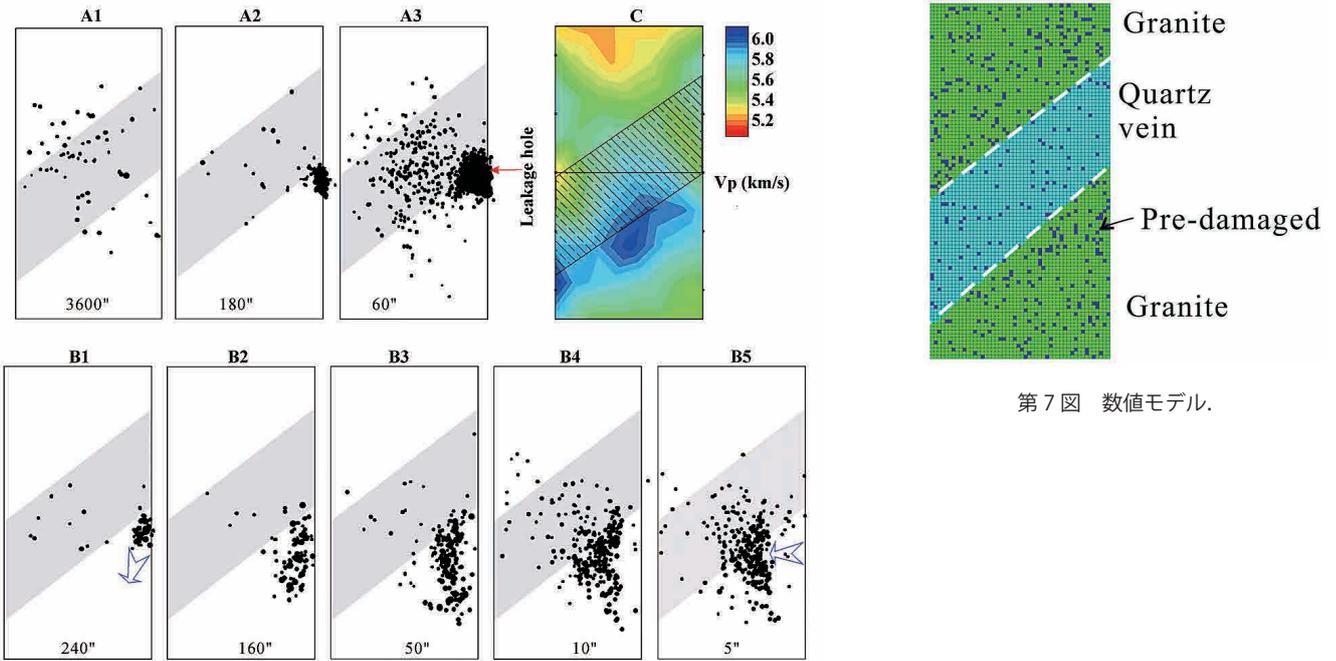
第5図 四川盆地注水誘発地震代表岩石試料の破壊実験結果。破壊過程に発生したAEの震源と試料（実験後）のX線CT画像 (Lei et al., 2014)。

180 MPa まで軸圧を減少させ、2 時間後再び軸圧を上げることにした。通常であれば、応力記憶効果により、一回目の最大応力を超えるとき、AE が再び活発化し、最終破壊に至ることが期待されるが、今回の場合、既存脈の影響により、一回目のロードの最後段階で AE が岩石表面に集中して発生したため、シリコンジャケットに穴ができてしまい、80 MPa の封圧オイルが試料内にリークする現象が発生した。試料内のオイル拡散はこの弾性波速度トモグラフィ画像（第6図-C）や AE 震源の空間的な広がり様子に見て取れた（第6図-B）。空隙にオイルが入ると P 波速度が大きくなるため、試料下部の青色で示した高速度領域はオイルに飽和（あるいは部分飽和）されていることは明らかである。

二回目のロードはこの影響を受けて、軸圧 280 MPa で破壊した。当初の目的という意味では失敗した実験であるが、自然界においても高压油田やガス田などで類似現象が観測され、実験結果は無意味ではないと思われる。ここで、この実験データを用いてジオメカニックモデリング手法を検証することを考えた。

数値モデル作成に当たり、1) モデル及び構成則はなるべく簡単なものにする、2) 不確定性の少ない物性をモデルの基本的な物性とする、3) 実験結果の細かいところではなく、本質的な実験データを重視することを基本方針とした。AE に着目する時、今回の試料の場合、インタクトな結晶質岩石であるため、既存の微小割れ目の密度がキーファクターであることが分かっており、これを如何にモデルに取り込むかについて様々な検討を行った。

様々な検討の末、最終的に、次に示すモデルにたどり着いた。まず、単純化のため、2次元モデルとした。サンプルは試料と同様に花崗岩に石英脈を入れる形にした。既存



第6図 三軸圧縮水圧破碎実験でのAE震源分布と弾性波速度トモグラフィ結果。

第7図 数値モデル。

のクラックの扱いとして、個々のクラックを考慮することは不可能なため、欠陥セルをランダムに配置する方法を選んだ。欠陥セルの割合は脈では5%、他は10%とした。欠陥セルに対し、構成則として、Mohr-Coulombの破壊則とStrain softeningモデルを用いた(第7図)。

石英脈、花崗岩、欠陥セルの引っ張り強度はそれぞれ20, 10, 0.5 MPaとした。Cohesionは引っ張り強度の倍とした。これは基本モデル、モデル-1とした。さらに、欠陥セル以外部分の弾性率に約15%と25%のガウス型ランダム的な揺らぎを付加したモデルをモデル-2とモデル-3とした。この三つのモデルに対する数値シミュレーションを行った。

実験結果と数値シミュレーション結果を対比してみると、モデル-2は岩石の破壊強度、応力-歪関係、AEの全体の時空間特徴など基本的な実験データを良く再現できていることが分かった(第8図)。

結論として、マクロな不均質構造+欠陥セル+歪ソフトリング+ランダム物性分布+Strain softeningを有する数値モデルにより岩石試料の強度・流体圧の影響・AE発生の主な特徴を再現できた。このようなモデルと準静的な解析は健全性評価、リスク回避、AEあるいは微小地震を利用するモニタリング等において十分適用できると思う。また、ダイナミック破壊と破壊後の振る舞いは良く再現できなかったが、動的な解析を導入すれば改善できると考えられる。

#### 4. ナチュラル・アナログ研究

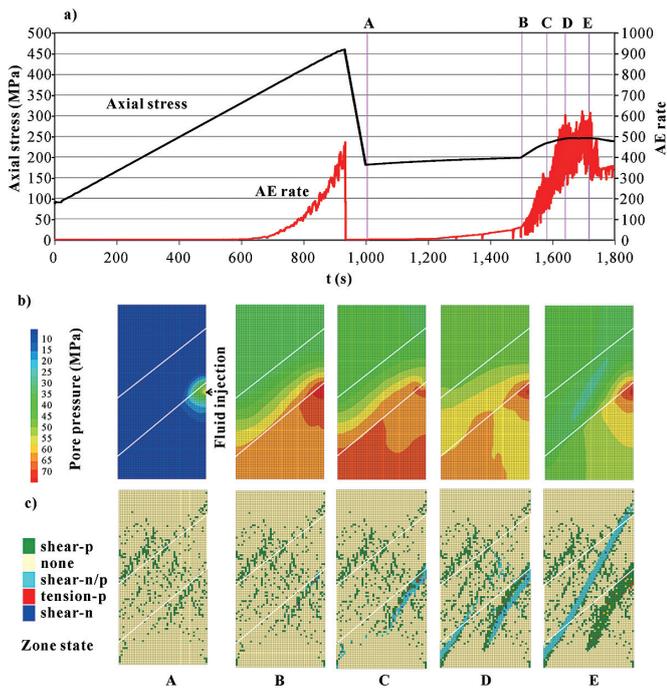
ナチュラル・アナログの研究例として、長野県松代地域にて1965-67年に発生した深層水湧出に伴う群発地震及び関連する事象に対する研究を行った。その詳細について、“地圏メカニクス研究グループの紹介”を参考にしてほしい。

#### 5. 統合解析プログラム (GeoTaos) の開発

ジオメカニクモデリングの一般的なフレームワークをベースに、熱-水理-岩石力学連成解析・ポストプロセッサ・ヒストリマッチング・不確定評価・観測データ解析等、関連する解析・処理プロセスを統合したプログラムであるGeoTaosを開発している。インターフェース・計算・統計解析・可視化を融合したソフトウェアを、研究の副産品として開発・集積したもので、日々成長していることが特徴である(第9-10図)。

#### 6. まとめ

地下深部に高压流体の圧入を必要とするCO<sub>2</sub>地下貯留・シェールガスフラッキング・ガス田廃水処分・地熱開発・石油天然ガスEOR等の分野において、マルチスケールを統合したジオメカニクモデリングが合理的である。本稿



第 8 図 連成解析結果.

では、室内実験・スケーリングアップ・ヒストリーマッチング・不確定性評価のあり方について、異なるスケールにケーススタディを通して議論した。このようなアプローチを基本とし、関連事業においてリスク評価とリスク低減方法へ発展させたいと考えている。

文 献

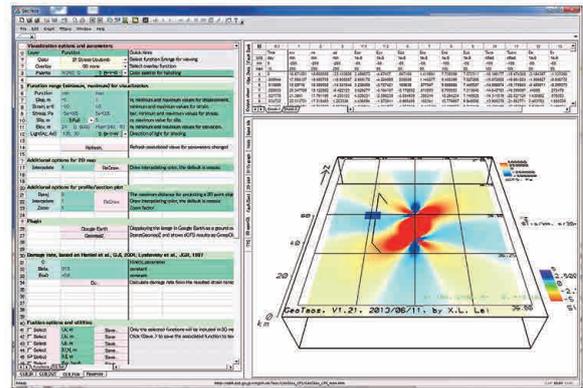
Deichmann, N. and Giardini, D. (2009) Earthquakes Induced by the Stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland). *Seismological Research Letters*, **80**, 784–798.

Ellsworth, W.L. (2013) Injection-induced earthquakes. *Science*, **341**, 1225942.

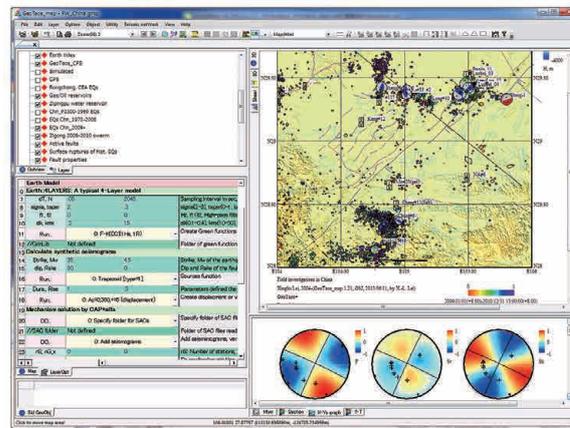
Fujii, T., *et al.* (2015) Evolution of Permeability during Fracturing Processes in Rocks under Conditions of Geological Storage of CO<sub>2</sub>. *Materials Transactions*, **56**, 679–686.

Lei, X., *et al.* (2008) Earthquakes induced by water injection at ~ 3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China. *Journal of Geophysical Research*, **113**, B10310.

Lei, X., *et al.* (2013) A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in



第 9 図 統合解析ソフトウェア GeoTaos クローン応力解析画面.



第 10 図 統合解析ソフトウェア GeoTaos 総合地震解析画面.

Zigong, southwestern Sichuan Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 4296–4311.

Lei, X., Li, X. and Li, Q. (2014) Insights on Injection-induced Seismicity Gained from Laboratory AE Study —Fracture Behavior of Sedimentary Rocks. in 8th Asian Rock Mechanics Symposium. 2014. Sapporo, Japan: Japanese Committee for Rock Mechanics.

Lei, X., *et al.* (2015) A laboratory acoustic emission experiment and numerical simulation of rock fracture driven by a high-pressure fluid source. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1–8.

Zoback, M.D. and Gorelick, S.M. (2012) Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proc Natl Acad Sci, U.S.A.*, **109**, 10164–10168.

LEI Xinglin (2016) A multiscale approach for geomechanic modelling.

(受付：2016年3月3日)