

環境調和型次世代油ガス生産技術の研究

研究代表者 古井 健二
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 研究課題

本プロジェクトでは、将来、商業化が期待されている低浸透率炭酸塩岩貯留層やシェールガス・オイル、メタンハイドレートといった非在来型の油ガス資源に関する調査・生産技術に関する研究や、温室効果ガス排出量の削減で注目されている CO₂ 地下圧入・地中貯留に関する研究を実施する。エネルギー安定供給と温室効果ガス排出削減の両面から研究を展開することで、持続的未來社会が進むべき道を探索し、その成果を社会に提示することを目指している。

2. 主な研究成果

2.1 酸処理におけるワームホール現象の実験的解析及び数値計算による研究

フェーズフィールド法ワームホールモデルの開発では、固相（岩石）と液相（ワームホール）の境界面における界面エネルギーの異方性を考慮した項を導入することに成功した。界面エネルギーの異方性強度 ε_m および異方性モード m をパラメータとして設定することにより、主枝および側枝の発達をそれぞれ独立に制御することが可能（図1）となり、ワームホールの伸展方向が差分格子の配列方向に影響を受けるという従来モデルの課題が解決できた。

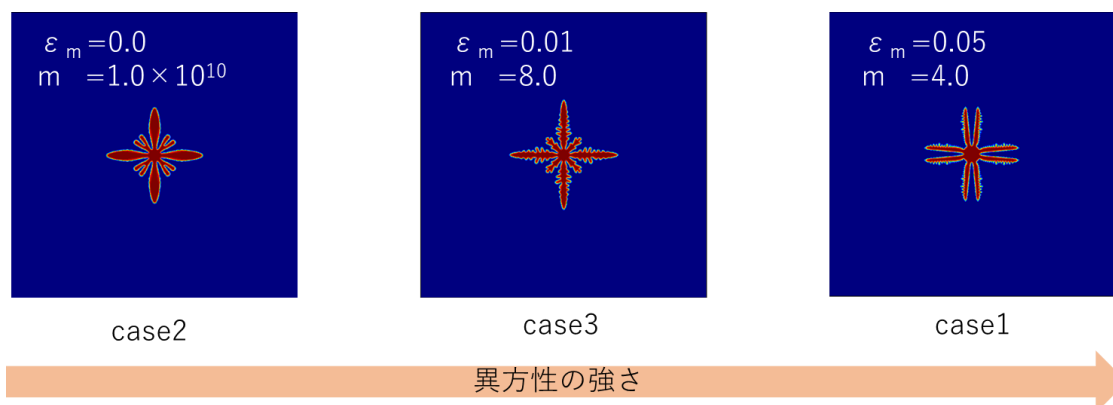


図1 界面異方性パラメータとワームホールの形状の関係

また、ワームホールモデルの三次元化作業では、コード改訂作業を進め、MPI 並列計算が可能となった。孔隙流体の流動方程式に対する線形方程式の求解に、MPI 並列計算に対応した反復解法ライブラリである PETSc を使用し、Unix 環境へモデルを移植した。また、MPI のプロセス群を三次元のプロセス格子に定義し、隣接プロセス間で情報を通信・共有することが可能となった。直接法ソルバ PARDISO を使用する従来モデルと、本年度の研究で作成した反復法ソルバ PETSc を使用

するモデルの計算時間を比較した結果、格子点数 $100 \times 100 \times 100$ 、時間ステップ数 1 の条件で、並列化前のプログラムと比較して、1 並列実行時の計算時間は約 1/30 に短縮された。また、並列化プログラムのスケーラビリティを評価するため、MPI プロセス数を 1~24 まで変化させた計算を実施し、8 並列での計算時間が非並列時の約 1/5 に短縮できたことを確認した。

2.2 岩石の異方性や時間依存性挙動等を考慮した坑井安定性解析シミュレータの開発

今年度の坑井安定性解析に関する研究では、実フィールドで採取された頁岩コア試料を用いた三軸圧縮試験および PTT (Pressure Transmission Test) 実験のデータを使用し、クラックテンソルの幾何学的・力学的パラメータの推定や、頁岩基質部およびクラックの浸透率推定を行い、坑井安定性解析に必要なモデルパラメータの決定手法の検討を行った (図 2)。

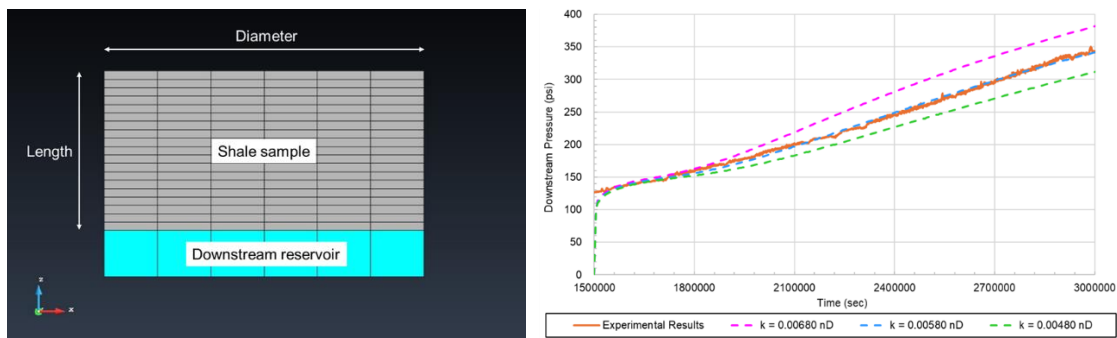


図 2 PTT 試験データ解析に使用した有限要素法モデルと岩石浸透率推定のための圧力マッチングの例

2.3 流体地下圧入・長期貯留に伴う誘発地震及び漏洩のリスク評価システムの構築

誘発地震リスク解析の研究では、動的断層滑り解析モデルの開発では、不連続ガラーキン有限要素法を用いた二次元モデルを開発することに成功 (図 3) し、地震サイクルの計算や断層の応力相互作用の影響評価が可能であることを示した。また、Spring-Slider 実験装置の開発では、レーザ変位センサーを導入したことで、スライダーの動きを直接計測可能となった。これにより、二つのスライダーを直列に接続した実験が可能となった。

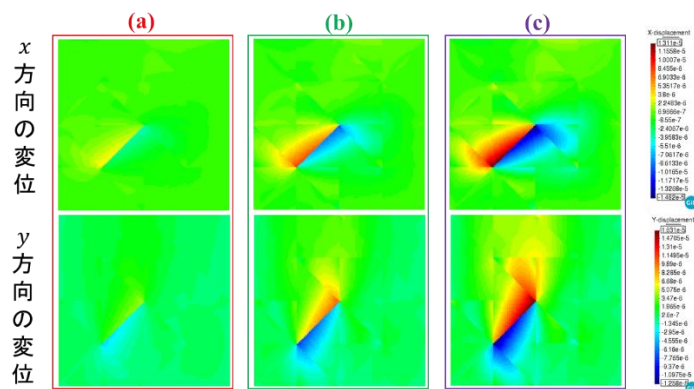


図 3 二次元不連続ガラーキン有限要素法モデルを用いた断層の滑り解析の例 (上列: x 方向の変位, 下列: y 方向の変位)

3. 共同研究者

吉岡 慶太（レオベーン大学・教授）

Vo Thanh Hung（早稲田大学理工学術院総合研究所・研究院講師）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- Furui, K. and Yoshioka, K. (2025). A phase-field modeling study for reaction instability and localized fluid flow in carbonate rocks. *Geoenergy Science and Engineering*. Vol 245. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213438>.
- Komatsubara, T., Furui, K., Sata, T., and Tsusaka, K. (2024) "Analysis of Time-Dependent Anisotropic Wellbore Stability Using Fully Coupled Hydro-Mechanical Model." Paper presented at the International Geomechanics Conference, Kuala Lumpur, Malaysia ARMA-IGS-2024-0205. <https://doi.org/10.56952/IGS-2024-0205>
- Katayama, K., Vo, T.H., Furui, K., and Taniguchi, T. (2024) "Fault stability analysis for CCS using regional-scale 3D geomechanics model integrated with commercial pre- and post-processing software." *J. Japanese Assoc. Petrol. Technol.* Vol. 89, No. 5 p.346-349
- Ozawa, K., Furui, K. (2024) "Fault slip experiment using the Spring-Slider Earthquake Machine and numerical analysis of rate-and-state dependent friction law – Evaluation of the influence of induced seismicity on CCS." *J. Japanese Assoc. Petrol. Technol.* Vol. 89, No. 5 p.342-345

4.2 招待講演

- Geomechanics for Geological CO₂ Storage, CCS Technical Workshop ~Exploring the Core Technologies of CCS from Subsurface to Surface~, Da Nang, Vietnam, 2024.
- CCS 技術の今後の展望と課題～CO₂ 地中貯留の安全性向上へ向けて～, SPEED 研究会, 東京, 2024.

4.3 学会および社会的活動

- ARMA (American Rock Mechanics Association) East Asia Blue Ribbon Group, Co-Chair
- 石油技術協会 理事
- WPC Energy 技術委員会 委員

5. 研究活動の課題と展望

ワームホールモデルの開発では、MPI 並列計算機能を使用した大規模 3D シミュレーション（格子点数が 10^9 規模）を実施し、ワームホールのサイズ効果の検証と先行研究で実施した酸処理実験データとの比較を進める予定である。坑井安定性解析モデルの開発では、クラック浸透率の応力依存性の導入、ならびに熱応力や粘土鉱物膨潤の影響を組み込むことで、熱-流体-力学-化学連成を可能にし、さらなるモデルの実用性向上を目指す。動的断層滑り解析モデルの開発では、tandem などのオープンソースの不連続ガラーキン法モデルを利用し、そのコードを改変することで、研究を進めていく計画である。また、Spring-Slider 実験装置が複数のスライダーを用いたデータ取得を可能にしたことで、実験データと動的モデルを比較し、断層連動性への理解を深めることを目指す。