

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求し、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 坑井安定性解析手法の高度化

本研究では、油ガス井掘削時の坑井安定性評価手法の高度化を目的とし、従来の流体-構造連成有限要素法モデルを拡張し、掘削泥水と地層の温度差に起因する熱応力を考慮可能な熱-流体-構造連成解析機能を実装した(図1)。熱応力は力の釣り合い式に熱荷重として導入し、弱連成モデルとして定式化した。

ケーススタディの結果、坑井安定性は主として力学的要因および水理的要因に支配されることが確認された。一方で、坑壁近傍では温度変化に伴う有効応力の増加が認められ、熱影響は全体としては副次的であるものの、局所的な坑壁安定性評価においては無視できない可能性が示された。

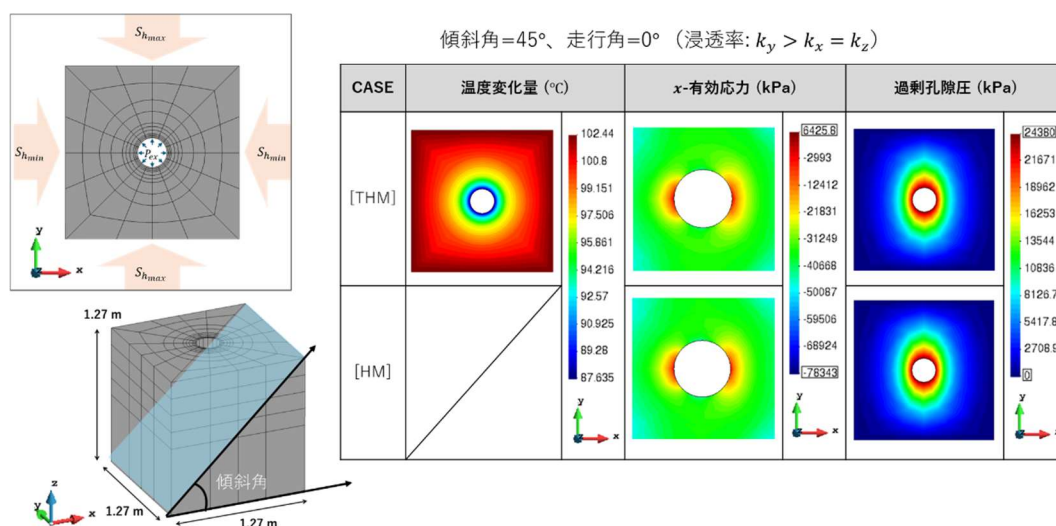


図1 熱-流体-構造連成解析の例. 垂直応力, 最大水平応力, 最小水平応力は-49.8 MPa, -52.0 MPa, -46.4 MPa を設定. 掘削時の泥水圧は 24.4 MPa, 泥水温度は 24°C を想定した.

2.2 静的断層安定性解析モデル (GiD-wFAST) による微小振動解析基盤の整備

断層安定性解析では、汎用ジオメカニクスシミュレータ GiD-wFAST を大規模計算へ適用するため、コードの改変と計算基盤の強化を行った。数値計算ライブラリ PETSc の導入、ソースコードの統合・整理、反復法ソルバーの実装により、計算効率およびコード保守性が大幅に向上した。

また、CO₂地下圧入・貯留に伴う重量変化の影響を評価するため、wFAST に重力荷重項を新たに導入した。年間数百万トン規模の CO₂圧入を想定したケーススタディでは、重力増加の影響は貯留層膨張に伴う応力伝播と比較して最大約 2%にとどまり、基盤岩 (深部層) 断層の安定性への影響は限定的であることが示された。

2.3 動的断層安定性解析モデルを用いた自然地震サイクルへの流体圧入影響評価

滑り速度・状態依存摩擦則を組み込んだ Spring-Slider Model に基づく地震サイクル解析モデルを開発し、自然地震および CCS に伴う流体圧入が地震サイクルに及ぼす影響を評価した。CO₂圧入により断層の有効応力や摩擦係数が低下すると、地震再来周期が短縮する可能性があることが明らかとなった。しかし、流体地下圧入は、新たな地震を単に誘発するというよりも、既存の地震サイクルを早めたり遅らせたりする応力摂動として作用することが示された。また、本研究の検討範囲では、流体圧入による地震規模の増大は認められず、断層の大きさで決定されることも分かった。

次に、より詳細な数値解析を目的として、地震サイクルシミュレータ Tandem へ孔隙弾性体モデルを実装し、流体圧入問題に適用可能な解析基盤を構築した。孔隙圧の影響を岩盤・断層の構成式に組み込み、弱連成アプローチを採用することで、計算効率を維持しながら主要な物理過程を再現可能とした (図 1)。ケーススタディでは、均質岩盤中では遠方断層への応力変化の影響は限定的である一方、高透水性破碎帯が存在する場合には、孔隙圧伝播により地震発生が顕著に早期化することが示された。さらに、複数断層系では応力再分配が生じ、断層間相互作用が誘発地震挙動を評価する上で重要であることを確認した。

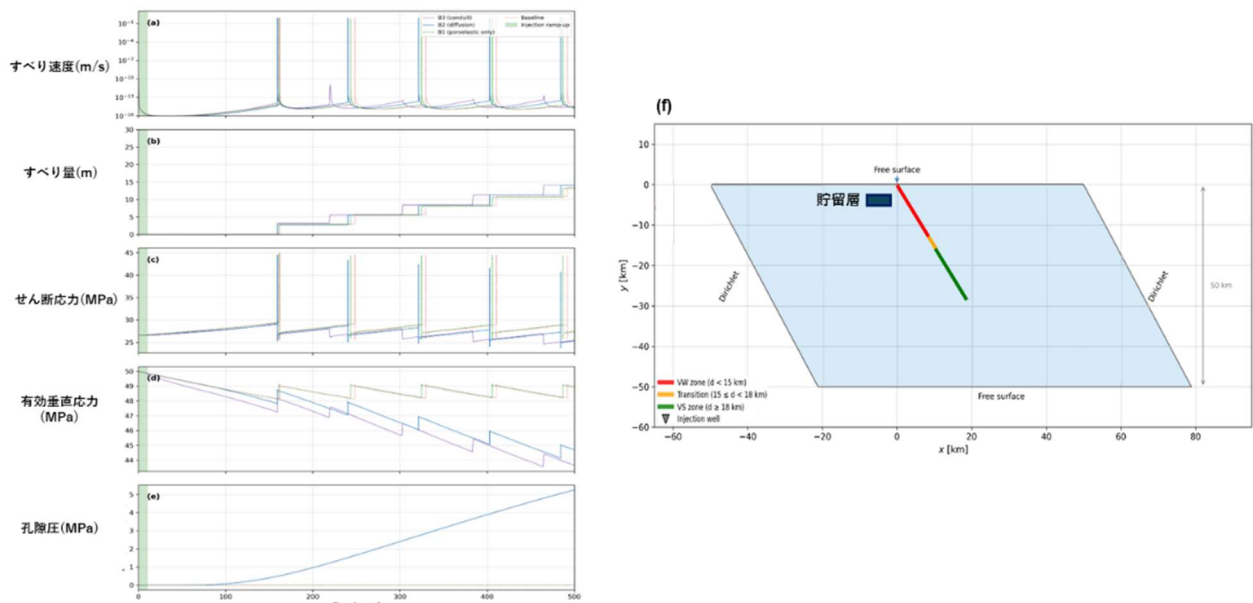


図 2 Tandem を用いた地震サイクルシミュレーションの例。貯留層と断層間の水理導通の条件を変化させて複数ケースを解析。高透水性破碎帯が存在するケース (紫線) で、地震発生時期が早期化していることが示されている。

2.4 酸処理ワームホールモデルの開発

界面エネルギー異方性を考慮した2次元ワームホールモデルを理論解と比較し、反応性流体の浸透不安定化現象であるワームホール形成を適切に再現できることを確認した。既存 Fortran コードを Python 化し、再現性と拡張性の高い解析基盤の整備も実施した。さらに異方性項を3次元へ拡張し、成長方向制御の可能性を示すとともに、MPI 並列化により大規模3次元解析の計算時間短縮を実証した。

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

- Al Hashmi, A., Vo, T.-H., and Furui, K. 2025 "Numerical Simulation Study of Underground Hydrogen Storage for Uncertainty Evaluation in Salt Domes in Oman" Paper presented at the International Geomechanics Conference, Al Khobar, Saudi Arabia, November 2025. <https://doi.org/10.56952/IGS-2025-0131>.
- Vo, T.-H. and Furui, K. 2025. Deep Learning Driven Reservoir Simulation for Mapping Performance of CO₂-EOR and Storage in Tight Oil Reservoir. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, October 2025.
- Vo, T.-H. and Furui, K. 2025. Machine Learning-Informed Reservoir Simulation for Performance Mapping of CO₂-EOR and Storage in the SACROC Field. World CCUS Conference 2025, Sep 2025, Volume 2025, p.1-5.

4.2 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
- 公益社団法人 石油学会 理事
- WPC Energy 技術委員会 委員

5. 研究活動の課題と展望

坑井安定性解析では、より複雑な岩石の構成則、非線形クラック浸透率モデル、粘土鉱物の膨潤などの化学的作用を FEM モデルに組み込み、実坑井条件により近い坑井安定性評価手法の構築を目指す。誘発地震解析では、wFAST については MPI 並列化を進め、スーパーコンピュータ環境での大規模解析を可能とするコード体系の構築を目指す。また、動的モデルおよび Tandem を用いた解析では、より複雑な断層系、透水構造、不均質な地質条件を考慮することで、CCS や地下資源開発に伴う微小振動リスク評価の実用性を高めることが期待される。これらの研究成果は、地下開発の安全性向上とリスク管理技術の高度化に資するものである。酸処理ワームホールモデル開発の研究では、安定条件の整理、超並列性能評価、HPC 環境での 10 億格子級解析が課題である。今後は、放射状流条件での 3 次元ワームホール分岐評価の実施と、コアサイズ効果の検証を予定している。