

CCS プロジェクトの安全性向上を目指した研究

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

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、日本でも民間主導による CCS (Carbon Capture and Storage) 事業化に向けた取り組みが進められている。CCS 事業の推進にあたっては、多面的な事業リスクの検討が不可欠であり、特に CO₂ 地中貯留に伴う漏洩や微小振動への対応・安全対策が重要な技術課題となっている。

本研究では、断層安定性解析のための広域ジオメカニクスシミュレータの開発、流体の地下圧入・貯留に伴う微小振動リスクの定量的評価手法の構築、ならびに効果的なリスクコミュニケーション手法の検討を行う (図 1)。これらを通じて、国内 CCS プロジェクトの安全性向上と、操業地域住民の理解増進に貢献することを目的とする。

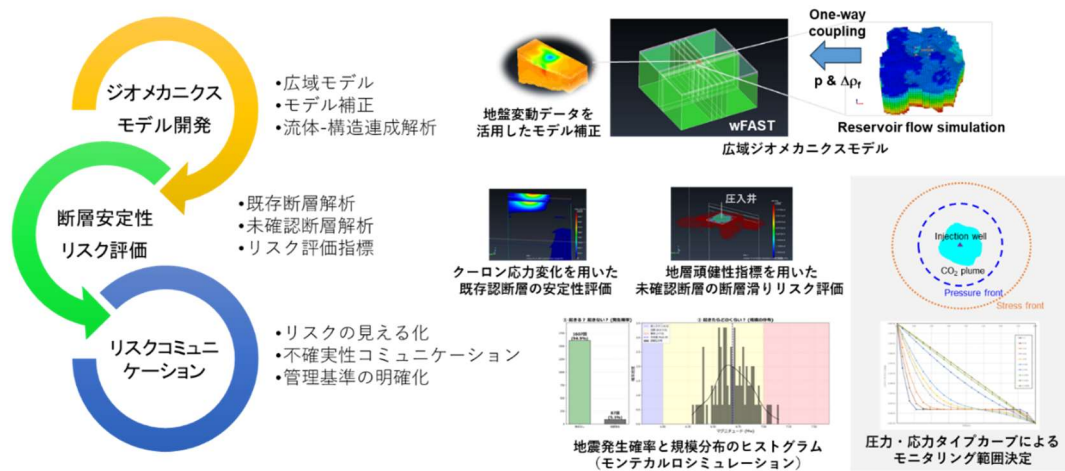


図 1 CCS 安全性向上に向けた微小振動リスク評価とリスクコミュニケーションの全体像

2. 主な研究成果

2.1 CO₂ 流動シミュレータの開発と高塩分濃度地層水の影響評価

CO₂ 地中貯留における流動挙動を実用的な計算コストで評価するため、CO₂-塩水系の PVT 特性を考慮した 3 次元 CO₂ 流動シミュレータを開発した。CO₂-塩水系溶液の相挙動をブラックオイルモデルとして表現し、完全陰解法化および PARDISO の実装により、計算の収束性と高速性を向上させた。Sleipner field を模擬したケーススタディを実施 (図 2) し、地層水の塩分濃度が高い条件において地層水粘度の増加と CO₂ 溶解度の低下が生じ、閉鎖系貯留層では顕著な圧力上昇を生じることが示された。さらに、生産井による減圧効果は高塩分条件下で低下し、圧力管理において塩分濃度を考慮する重要性が明らかとなった。

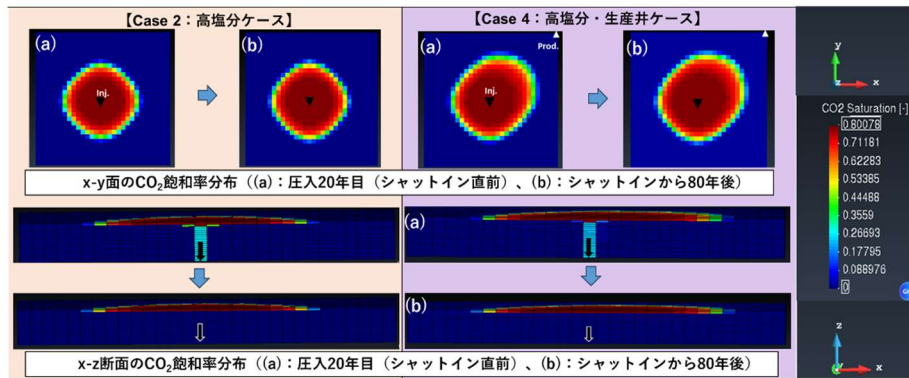


図 2 高濃度塩水層における CO₂ プリューム分布の時間変化と圧力緩和井の影響

2.2 圧力緩和井による微小振動リスク低減効果の評価

CO₂ 圧入に伴う孔隙圧上昇と応力再分配が断層安定性に及ぼす影響を評価するため、貯留層流体流動解析と 3 次元ジオメカニクス解析を片方向連成する評価手法を構築した。本研究で開発した連成解析の解析結果の例を図 3 に示す。既存断層についてはクーロン応力変化や地震モーメントを、未確認断層については地層頑健性指標 (FRI: formation robustness index) や弾性ひずみエネルギー密度を用いて地震リスクを評価した。圧力緩和井を用いた Hydro-Mechanical Voidage Management (HMVM) のケース比較により、圧力緩和井は基盤岩上部付近の微小振動リスクを低減し得る一方、過剰な生産は地盤沈下や応力集中位置の移動を引き起こす可能性が示された。特に、深部仕上げの圧力緩和井掘削と適切な voidage 管理は、圧力制御と微小振動・地盤対策に優れた有力な開発手法であることが示された。

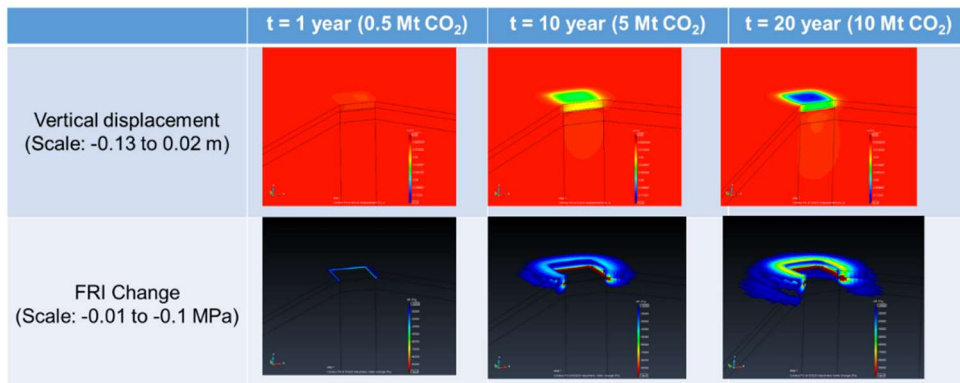


図 3 CO₂ 圧入に伴う地表変動と地層頑健性指標の変化の計算例

2.3 圧力・応力タイプカーブの開発

微小振動モニタリングにおける観測範囲の決定を目的として、流体の地下圧入に伴う圧力・応力変化を推計可能なタイプカーブの開発を行った。流体圧入時には、圧入流体フロント、圧力フロント、応力フロントがそれぞれ異なる速度で岩盤中を伝播する。特に応力フロントは、圧入流体が到達していない領域にも到達し得るため、その広がり適切に評価することが微小振動モニタリングでは重要となる。

本研究では、孔隙流体流動と岩盤変形の相互作用を評価可能な 3 次元有限要素法モデルを開発し、岩石の浸透率やヤング率が圧力・変位・応力応答に及ぼす影響を整理した。さらに、これらの応答

を無次元化することで、汎用的なタイプカーブを構築した。これにより、詳細な数値解析を毎回実施することなく地下応答を概略評価し、微小振動モニタリング範囲の設定や断層影響評価に活用できる可能性が示された。

2.4 不確実性を考慮した断層滑りリスク評価とリスクコミュニケーション

地下深部の断層物性や応力状態には大きな不確実性が存在する。そのため、本研究では、ジオメカニクスシミュレータ (wFAST) を反復実行するモンテカルロ・シミュレーション制御プログラムを開発した。さらに、断層摩擦係数や臨界応力変化量などを確率分布として扱うことで、不確実性を考慮した微小振動リスク評価手法を構築した。また、評価結果を地域住民に分かりやすく伝えることを目的として、地震発生確率と規模分布を示すヒストグラム、震度換算に基づく簡易ハザードマップ、リスクマトリックスの3つの可視化手法を提案した。これにより、不確実性を含む技術的評価結果を透明性高く提示し、CCS 事業における安全管理とリスクコミュニケーションの双方に資する枠組みを示した。

3. 共同研究者

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 講演

- Hydro-Mechanical Coupled Simulation for Assessing Deep Seismic Risk in Geological CO₂ Storage, Geoproc, Nicosia Cyprus, October 2025.
- ジオメカニクスの知見を活用した CCS における誘発地震リスク評価とその対策, 令和7年度石油技術協会春季講演会シンポジウム講演, 新潟, 2025.
- CO₂ 地下貯留における未確認断層の断層滑りリスク評価, 令和7年度石油技術協会春季講演会開発・生産部門個人講演, 新潟, 2025.

4.2 学会および社会的活動

- 8th International Conference on Coupled THMC Processes: Geomechanics for Energy and Environmental Applications, Program Committee, 2025.
- (独) エネルギー・金属鉱物資源機構, 水素事業アドバイザー委員会 委員
- 経済産業省, 産業保安基本制度小委員会/カーボンマネジメント小委員会 委員

5. 研究活動の課題と展望

今後の課題は、これまでに開発した CO₂ 流動解析モデル、広域ジオメカニクス解析モデル、および確率論的リスク評価手法を、実際の国内 CCS サイトへ適用可能な形へ高度化することである。特に、地層物性や断層特性に関する不確実性、圧力緩和井の最適配置、モニタリング範囲の設定などを統合的に評価できる枠組みの構築が求められる。本寄附研究は第3期を迎え、2026年3月に終了となる。一方、2026年4月からは、早稲田大学理工学術院総合研究所の研究交流事業として「CCS ジオメカニクス研究コンソーシアム」が新たに開始され、これまでの研究活動の一部が発展的に引き継がれる予定である。今後は、産学連携を一層強化し、本寄附研究で得られた知見と技術基盤をさらに発展させることで、CCS の安全かつ円滑な社会実装に貢献していく。