

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・生産技術の開発、温室効果ガス排出削減のためのCO₂地中貯留で懸念されているCO₂漏洩や誘発地震に関する研究を行う。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、2050年に向かって持続的未來社会が進むべき道を探査し、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

炭酸塩岩へ酸を圧入することで、ワームホールと呼ばれる高浸透率の流路が形成され、坑井の生産能力が飛躍的に向上することが知られている。本プロジェクトでは、炭酸塩岩貯留層におけるワームホール現象について、室内実験と数値解析の両面からアプローチした先端的な研究を展開している。2022年度は以下の3つの項目について研究を実施した。

- 3次元ワームホールモデルの開発
- 酸処理ワームホール現象における浸透率不均質性・異方性の影響評価
- 不溶解性鉱物の影響を考慮した炭酸塩岩酸処理ワームホール伸展解析モデルの開発

3次元ワームホールモデルの開発では、ワームホール現象の支配方程式を、3次元で離散化し、先行研究で開発した2次元ワームホール伸展解析モデルを3次元へと拡張した(図1)。3次元モデルによるケーススタディを実施し、固液界面の小さなゆらぎが、臨界速度を境に不安定化・再安定化する様子など、3次元空間でのワームホール伸展挙動について考察を行った。

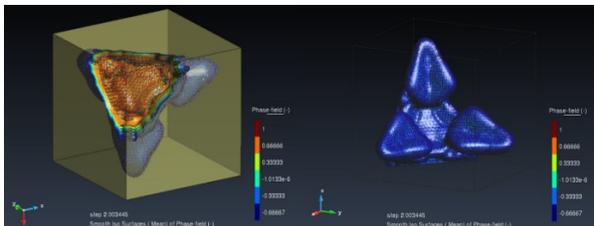


図1 3次元WHモデルのシミュレーションの例

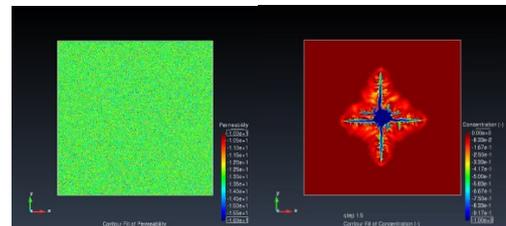


図2 不均質浸透率場での数値解析結果

酸処理ワームホール現象における浸透率不均質性・異方性の影響評価では、SPM (Source Point Method) 法を用いてランダムだが空間的相関を有する不均質な浸透率分布(図2左)を発生させるモデル及び浸透率の分布を評価するセミバリオグラムと条件付き共分散のプログラムを開発した。

浸透率不均質性、異方性をパラメーターとした感度解析を実施し、ワームホール形状の変化を確認した（図2右）。

不溶解性鉱物の影響を考慮した炭酸塩岩酸処理ワームホール伸展解析モデルの開発では、フェーズフィールド変数を再定義し、炭酸塩鉱物だけでなくシリカ鉱物などの塩酸に溶けにくい鉱物を考慮した1次元フェーズフィールド法酸処理ワームホールモデルを開発した。実験式として広く用いられている浸透率と孔隙率のべき乗則モデルをシミュレータへ導入し、解析解と比較することでモデルの妥当性を検証した。

2.2 真三軸応力条件下での出砂量予測モデルの開発

出砂現象は砂岩貯留層の開発で起こる最も深刻な生産障害の一つである。日本でも2013年と2017年のメタンハイドレート海洋産出試験において、坑内に砂が流入する出砂トラブルにより生産試験が中断される事例が発生している。出砂障害を軽減しつつ、坑井の生産・圧入能力を維持できる最適な仕上げ手法の選定には出砂予測が必要となる。しかし、出砂現象は岩石の強度、岩盤の応力状態、孔隙流体流動など様々な要因が複雑に関わっており、出砂量を精度良く予測することは困難である。

本研究では、出砂予測技術の向上を目的とし、真三軸圧縮試験装置を用いた出砂実験、非線形有限要素法モデルによる岩石破壊シミュレーション（図3）、室内実験や実際のフィールドで得られた出砂データに基づく半解析的手法による出砂量予測手法を開発した。

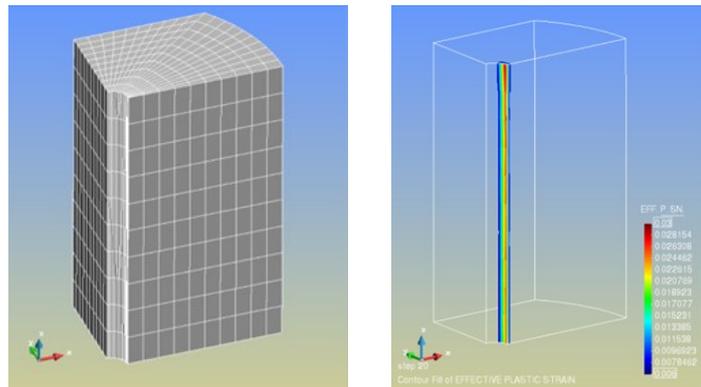


図3 真三軸圧縮試験データ解析に使用した有限要素法メッシュと塑性ひずみ計算の例

中空円筒装置による実験データを基とした出砂予測モデルとフィールドデータをベースとした経験則によるモデルでは、出砂量予測結果に大きな差異を生じることが指摘されていたが、本研究では、実際のフィールドの応力状態を再現した大型真三軸圧縮試験装置を用いた出砂実験を SINTEF の実験施設にて実施し、応力異方性の影響を明らかにすることで、出砂予測モデルの精度を向上することに成功し、室内実験とフィールドデータをベースとしたモデル間の計算結果の差異が応力異方性によるものであることを明らかにした。

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

今年度の文献調査では、イタリアのバル・ダグリ油田での誘発地震管理手法について調査を実施した。当該地域は地震活動が非常に活発であり、日本国内の油ガス田開発・地熱開発・CCS での誘発地震対応において参考となる事例と考えられる。クーロン応力の変化、累積地震モーメント、地震

発生頻度などの指標が、誘発地震リスクの評価や操業管理に利用できることが分かった。一方、Castor 天然ガス地下貯蔵の誘発地震の事例からは、地震計が密に設置されていなかったことで震源位置特定の不確実性につながったことが指摘されている。ガス圧入による孔隙流体密度の低下（浮力）の影響、クリープ変位などの非地震性すべりによる応力変化、岩盤変形による圧力変化が誘発地震の原因であった可能性があり、将来の誘発地震リスク評価でこれらの諸要因を考慮したシミュレータの開発が必要となることが示唆された。

また、本研究で開発されたジョイント要素（有限要素法）モデルを使用し、実フィールドでの水圧破碎作業で観測された微小振動データの評価を行った。シミュレーションの計算結果が、観測された微小振動データと比較して過大評価してしまうことが明らかになったが、水圧破碎時の孔隙圧変化の不確実性の影響が大きいことも分かった。

動的断層すべり解析では、多孔質弾性ばねスライダーモデルの支配方程式の理論的背景を理解し、感度解析により、各パラメーターの物理的意味を明らかにした。感度解析の結果より、垂直応力が大きいと、地震自体は起こりにくくなるが、滑りが生じたときにより規模の大きな揺れとなることが分かった。動的断層滑りモデルを用いて、実フィールドで観測された微小振動データと同規模の大きさの地震を再現することに成功した。微小振動の発生時刻については、岩盤の浸透率を増加させることで観測データと合致した結果を得た。このことは、岩盤（シェール層）中に浸透率を向上させるようなナチュラルフラクチャーが存在している可能性を示している。

3. 共同研究者

吉岡 慶太（レオベーン大学・教授）

Euripides Papamichos（SINTEF Industry・教授）

樋本 諭（招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

Furui, K. and Yoshioka, K.: A Numerical Study of Wormhole Formation and Growth in Homogeneous and Heterogeneous Carbonate Rocks, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-8971, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-8971>, 2022.

Chan, Chin Hsiang, Furui, Kenji, Mandai, Shusaku, Kuwagaki, Setsuka, Kanamori, Yuuya, and Yasuhiro Hirano. "Machine-Learning-Assisted Modeling of Diverting Agent Performance for Multiple Fracture Propagation." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, October 2022. doi: <https://doi.org/10.2118/209995-MS>.

Furui, Kenji, Zhang, Junjing, Zwarich, Nola R., and Eric R. Davis. "Formation Failure Analysis for Longitudinally Fractured Horizontal Wells Completed by Multistage Fracturing Sleeves." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, October 2022. doi: <https://doi.org/10.2118/210048-MS>.

Papamichos, E., Furui, K., Berntsen, A. N., Rolli, O. A., Morita, M., Koch, C., Li, G., Morgan, S., Nes, O.-M., and Z. Yao. "Comparison of Sand Onset and Sand Mass Models in a Field Case." Paper presented at the 56th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Santa Fe, New Mexico, USA, June 2022. doi: <https://doi.org/10.56952/ARMA-2022-0425>.

古井健二、Papamichos Euripides、「流体地下圧入・生産における出砂予測技術向上への挑戦」石

油技術協会誌, 87 号, 359-365 頁 (2022 年) .

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

古井健二、「過去の事例から学ぶ注水誘発地震の特徴と誘発地震リスクに関する数値解析的検討」、2022 JX Technical Workshop、2022 年 9 月 22 日

4.4 受賞・表彰

4.5 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

石油技術協会 作井技術委員会 運営幹事

石油技術協会 生産技術委員会委員、会誌編集委員会委員

5. 研究活動の課題と展望

酸処理におけるワームホールモデルの開発では、3次元化へ向けて計算効率の大幅な向上が必要であり、今後は開発コードの並列化やPETScなどのオープンソースのソルバーの利用を引き続き検討する。計算効率化の作業と並行して、過去の酸処理実験データの解析などを進め、モデルの妥当性の検証を行う。

出砂に関する研究では、岩石の種類による破壊特性の変化、毛細管圧の変化といった孔隙流体の影響、砂の流動化や破壊領域の安定化機構の解明など、出砂現象には未解明な部分も多く今後のさらなる研究が求められる。その他にも、出砂対策スクリーンやグラベルの閉塞や摩耗による坑内機器の損傷および破壊のメカニズムなど、坑井生産能力の維持のための研究も必要である。今後は、CCSにおける二酸化炭素地下圧入・貯留、メタンハイドレートの開発などの分野においても、石油天然ガス開発分野で用いられている最新の出砂予測手法や出砂対策の技術が活用されることが期待される。

誘発地震予測モデルの開発では、実フィールドの解析にはより詳細な地質構造を考慮する必要性があることが明らかとなった。今後は要素自動分割プログラムとの統合をすすめ、大規模な問題を扱えるように計算効率の向上を目指す。また、本年度の研究成果より動的断層滑りの有用性が示されたため、断層のばねスライダーモデルと有限要素法モデルとの統合を検討していく。