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・オイルといった非在来型油ガス資源に関する調査・生産技術の開発、温室効果ガス削減のための二酸化炭素地下圧入・貯留で懸念されている二酸化炭素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来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

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二つの側面からアプローチした先端的研究を展開している。

実験的解析では、JOGMEC-TRC で実施した造影剤を用いたコア掃攻試験とテキサス A&M 大学での酸圧入実験より得られた CT 画像データを画像解析ソフト ImageJ により解析した。酸処理前の水流動経路と酸処理時のワームホール伸展経路（**図１**）の比較を行い、浸透率の高い流路に沿った形で酸処理時にワームホールが伸展する様子を定量的に示すことに成功した。

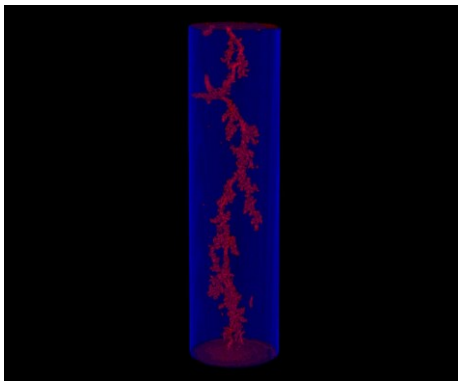

図１ ：酸処理ワームホールの CT 画像
（4 インチ径 Austin Chalk コア試料）

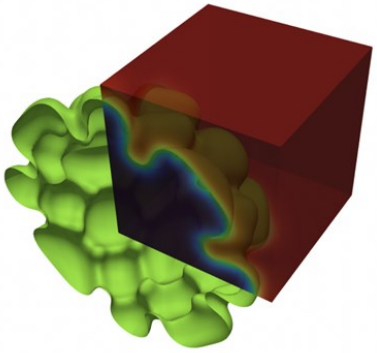

図２ ：３次元フェーズフィールド法
ワームホールモデルの計算例

ヘルムホルツ研究所と共同で実施しているワームホールの伸展を予測する数値解析モデルの開発では、反応性流体の浸透不安定化問題の解析解とフェーズフィールド法を用いたシミュレーショ

ンモデルの計算結果を比較することで、モデルの検証を行った。数値解析モデルで解析解と同様の結果を再現できたことで、ワームホールの発生・発達現象が、数値的に予測可能であることが示され、フェーズフィールド法モデルの妥当性を示すことができた。また、鉱物析出・溶解モデルの支配方程式であるフェーズフィールド変数の時間発展方程式と溶液濃度の拡散方程式を３次元へ拡張することに成功した。界面不安定化の数値的な再現で必要となる液相と固相の境界面の曲率項は、従来の手法を拡張し導出し、３次元問題においても固液界面の不安定化現象を再現できることを確認した（**図２**）。

2.2 特殊ポリビニルアルコールを用いたシェールガス削井材料の研究

本プロジェクトでは、三菱ケミカルと共同で開発を進めるダイバーティングエージェント（以下 DA）のき裂閉塞機構における PVOH 樹脂の膨潤の影響を明らかにするため、低温透水試験（**図３～５**）を実施した。パウダーの膨潤・溶解度が高くなると DA の閉塞性能が低下することが分かった。一方で、ペレットの膨潤性は閉塞性能を若干向上させるが、その影響はパウダーに比べて小さいことが分かった。排液中のパウダー量を計測するために吸引ろ過装置を用いたろ過試験を実施した。実験結果より、フィルターケーキを透過する残存パウダー量は非常に少ないということが確認された。

図３：き裂を模擬したスリット

図４：DA によるき裂閉塞の様子

図５：高温高圧透水試験装置

先行研究で開発した坑内流体流動・温度分布解析シミュレータを用い、Eagle Ford や Permian Basin を対象としたフィールドスタディを実施した。実フィールドの条件では、DA 圧入時にはペレットとパウダーの残存率は十分高く、一方で、水圧破砕後 2 週間以内には坑底で完全に溶解することが示された。

DA によるき裂閉塞予測を目的として、過去の透水試験データを用いた機械学習モデルを開発した。代表的なアルゴリズムとして、ニューラルネットワーク、サポートベクターマシン分類、ランダムフォレスト、適応ブースティングなどの各種解析手法を比較検討し、適切なモデルのキャリブレーションを行うことで、約 85%の予測精度で閉塞の可否を推定出来ることが分かった。また、開発された各試験パラメータの特徴量重要度を算出し、ペレットやパウダーの形状やケン化度などが重要なパラメータであることを示した。

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

本プロジェクトでは、注水誘発地震に関する文献調査を実施し、米国デラウェア盆地で観測された誘発地震の事例、地震性・非地震性断層滑りの分類手法、誘発地震リスク低減注水手法、TLS（Traffic Light System）への機械学習モデルの導入、地熱開発に関連した誘発地震事例などに関

する文献を収集した。開発地域の地質構造、応力状態、地層内の流体流動などが局所的な誘発地震発生頻度の差異に影響している可能性も指摘されており、誘発地震対策には地質学的、工学的な観点を踏まえた総合的アプローチが必要となることが推定される。

米国 Coso 地熱開発に関する文献からは、Ridgecrest 地震（Mw 7）の発生では周辺地域で多数の余震が観測されたが、Coso 地域では余震が極端に少なかったことが報告されている。余震低減のメカニズムとして、当該地域の岩盤温度低下により地下の圧縮応力が大きく低下し、非地震性クリープ変位が起こりやすい状態であった可能性が指摘されている。非地震性のクリープ変位が断層で発生することで、当該地域の余震低減に繋がった可能性があり、Coso の事例でみられる応力解放機構が、大規模地震の緩和策となりえる可能性が指摘されている。

誘発地震予測モデルの開発では、ジョイント要素を用いた有限要素法誘発地震予測シミュレータのプロトタイプを開発し、米国のイリノイ州ディケーターにおける CCS プロジェクトで 2013 年に観測された微小振動結果を題材にケーススタディを実施した。

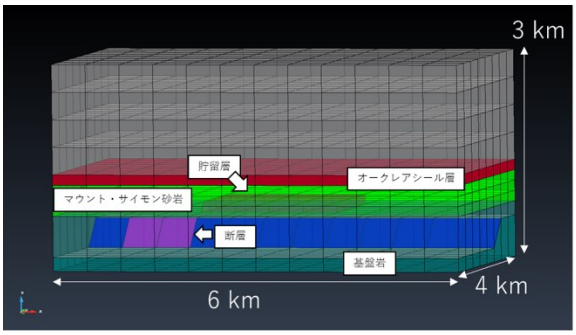

図６　ケーススタディで使用した有限要素法モデルの設定

３．　共同研究者

吉岡　慶太（ヘルムホルツ環境研究所・Group Lead）　　樋本　諭（招聘研究員）

４．　研究業績

4.1 学術論文

Furui, K., Abe, T., Watanabe, T., Yoshioka, K. 2022. Phase-field modeling of wormhole formation and growth in carbonate matrix acidizing. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol 209. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109866

Ikebata, K., Onishi, T., Furui, K., Mandai, S., Hirano, Y., Kanamori, Y., Psihogios, B., and Taniguchi, R. 2022. Design and Analysis of Improved Swelling and Degradable Diverting Agent for Multistage Hydraulic Fracturing. SPE *Prod & Oper* 1-18. https://doi.org/10.2118/209784-PA

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

古井健二、「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」、JOGMEC-TRC Week 2021－資源ミライ開発　脱炭素社会を支える資源開発技術を拓く、2021 年 10 月 27 日

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動
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検討する。ダイバーティングエージェントの研究では、シェール開発だけでなく地熱増進システム（EGS）でのき裂の透水性の改善が可能かの検討を開始する。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、フィールドデータを使用したモデルの妥当性の検証を進める。また、地震性と非地震性の断層変位を区別するためにクリープを考慮した断層モデルを導入することで、流体の圧入・生産手法の安全性の評価を目指す。