

二酸化炭素地中貯留における坑井配置の自動最適化

大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 ○ 宮城 充宏
 大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 山本 肇
 地球環境産業技術研究機構 CO₂貯留研究グループ 薛 自求

1. はじめに

二酸化炭素地中貯留（CCS）では、火力発電所などの排ガスから CO₂ を回収し、地下深部の砂岩層などの貯留層に坑井（圧入井）を通じて圧入する。CCS を大規模で実施する場合、年間 100 万 t を超える大量の CO₂ を圧入するため、複数の圧入井が必要となる。さらに、貯留層内の圧力上昇により圧入可能な CO₂ 量が制約されることが指摘されており、その解決策として、揚水により圧力上昇を緩和する坑井（圧力緩和井）が提案されている¹⁾。このように、圧入井や圧力緩和井を含む複数の坑井の設置計画に際しては、坑井の位置、圧入／生産レート等の多数の設計変数を最適化する必要がある。本研究では、自動最適化手法である PSO（Particle Swarm Optimization）と多成分多相流解析コード TOUGHREACT を複合したツールを構築し、仮想的な貯留層モデルを対象に、坑井配置の自動最適化を試みたので、その結果を報告する。

2. 最適化方法

今回作成した最適化ツールのフローを図1に示す。図中の PSO²⁾とは、群知能の一種で、メタヒューリスティックの 1 つである。動物等の群れにおいて一匹が良い餌場を見つけると、他の動物もそれに倣うといった高度な集団として見せる動きをモデル化したアルゴリズムである。探索空間上に生成された複数の解個体（設計変数）の集合を 1 つの群れとして扱い、解個体は互いに目的関数値（最適化の評価値）に関する情報を交換しながら、大域的最適化解の方向に群れ全体を進めていく。各解個体は次式にしたがって生成される。

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_{k+1}$$

ここで、 $\mathbf{X}$ は解個体、 k は解個体の生成回数、 $\mathbf{V}$ は解個体の生成傾向や生成履歴等を考慮して更新されるベクトルである。それぞれの解個体の目的関数値

は TOUGHREACT による貯留シミュレーションから算出する。貯留層内に圧入した CO₂ や圧力などの空間分布の経時変化を解析し、解個体に対する目的関数値や制約条件に関する情報を求める。

3. 問題設定

対象とした貯留層モデルを図 2 に示す。平面範囲 20km×20km、貯留層厚 100m の平面モデルである。解析用格子は、鉛直方向は 1 層とし、平面方向は格子間隔 400m 一定で分割した。同図中の孔隙率分布は、SGSIM コード³⁾による地質統計学シミュレーション（Sequential Gaussian simulation）で与えたものであり、浸透率は孔隙率との関係（Kozeny-Carman 式）から決定した。初期の温度と圧力は 45℃、10MPa、モデルの上下面及び側面は不透水境界とした。図中の圧入井から、CO₂ を 100 万 t/年のレートで 50 年間圧入する。

圧入井の位置と圧入レートを上記の通り固定した条件で、1 本の圧力緩和井の位置と地層水の生産レートを最適化する問題を考える。目的関数は、地層水の揚水や水処理にかかるコストを最小化する観点から、地層水の生産レートとする。設計変数は圧力緩和井の位置と生産レート（一定）とした。制約条件は、①圧入井格子での圧力上昇値が 3MPa 以下、②圧力緩和井に CO₂ が到達（リーク）しない、の 2 つを設定した。

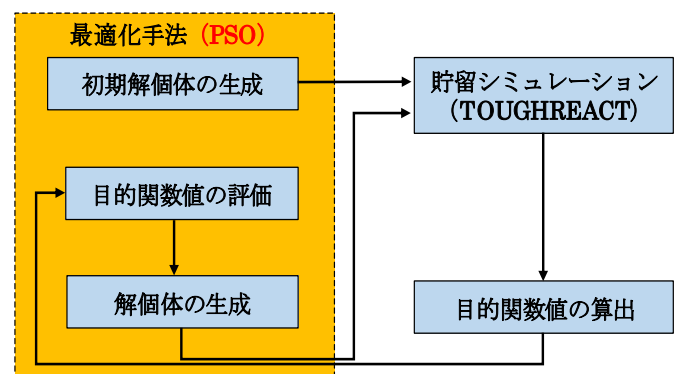


図1 最適化ツールのワークフロー

キーワード CCS、最適坑井配置、多相流解析、PSO

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室 TEL045-814-7217

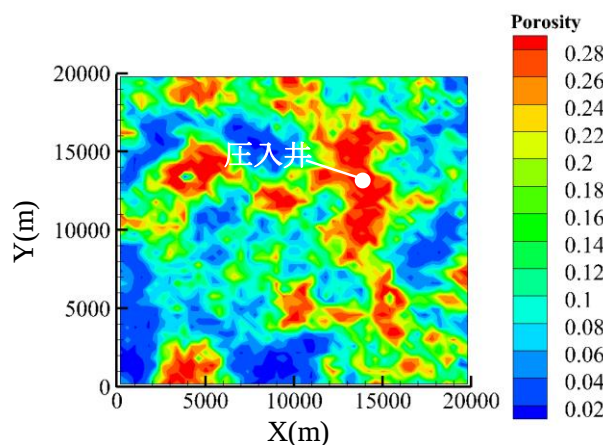


図2 貯留層モデルの孔隙率分布

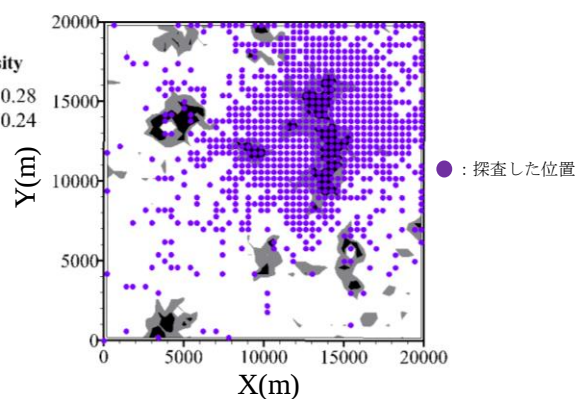


図3 PSO が探索した位置

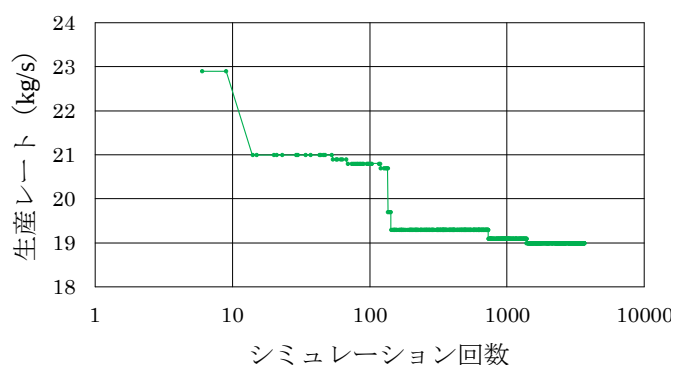


図5 シミュレーション回数と生産レートの関係

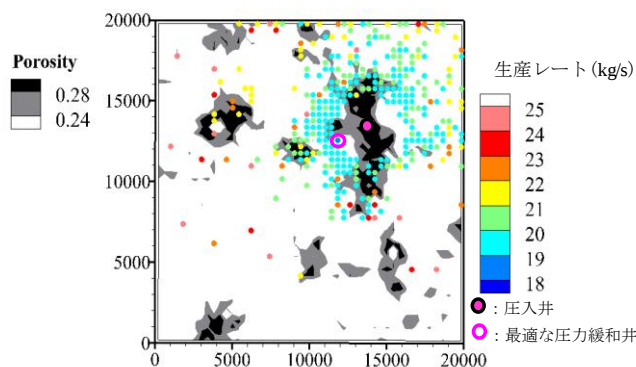


図4 制約条件を満たした圧力緩和井の位置と生産レート

4. 結果

最適化の過程で探索した位置を図2の孔隙率分布（グレイコンター）とともに図3に示す。また、制約条件を満たした解の圧力緩和井の位置と生産レートを図4に示す。なお、色はその地点での最小の生産レートを示している。図中に示す最適位置（ピンク色の○印）での生産レートは19.0kg/sであった。図3と図4を比較すると、制約条件②（CO₂が生産井に到達しない）から、圧入井の周辺の探索点が除外されていることがわかる。別途実施した解空間全域の探索結果から、今回PSOが算出した位置と生産レートが大域的最適解であることを直接的に確認している。最適位置を算出するために要した貯留シミュレーション回数は1386回であった。

図5にシミュレーション回数と生産レートの関係を示す。図に示すように、貯留シミュレーションを繰り返して最適化を進めることで生産レートが小さくなり、1000回程度で一定値に収束している。

5. まとめ

今回PSOとTOUGHREACTを組み合わせた最適化ツールを開発し、CO₂地中貯留の坑井配置の最適化

問題に適用した。その結果、1000回以上の数値シミュレーションを要する不均質な貯留層内での圧力緩和井の最適配置探索を自動的かつ迅速に行うことができた。算出した最適解が今回の最適化問題における大域的最適解であることも確認した。今後は、実際のCO₂貯留層を対象とした問題への適用を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、経済産業省から二酸化炭素地中貯留技術研究組合が委託された「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」の成果の一部である。

参考文献

- 1) Cihan, A., Birkholzer, J. and Bianchi, M. (2015) 'Optimal well placement and brine extraction for pressure management during CO₂ sequestration', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol.42, pp175-187
- 2) Afshari, S., Pishvaie, M. and Aminshahidy, B. (2014) 'Well placement optimization Using a Particle Swarm Optimization Algorithm, a Novel Approach', *Petroleum Science and Technology*, 32:2, 170-179
- 3) Deutsch, C. V. and Journel, A. G. (1998) *Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York, OXFORD UNIVERSITY PRESS, second edition