

井戸配置の最適化ツールの開発と高速化 -CO₂ 地中貯留への適用-

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
 信州大学 学術研究院工学系 秋本 洋平
 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

地下水位低下工法や土壌・地下水浄化など、井戸を用いた揚水や注水は地下水を人為的に制御する上で最も有効な手段の一つである。しかし、多くの場合に井戸の設置で得られる便益は設置費用とトレードオフの関係にあるため、設置にあたっては、井戸の本数や配置間隔、深度、設置時期など様々な要因を最適化することが望ましい。近年、石油や天然ガスの生産開発などの分野では、井戸設置のコストに対する便益（生産量）を最大化することを目的に、数値シミュレーションをベースとした井戸配置の最適化手法の研究が進められている。具体的には、井戸の本数や配置パラメータを変化させた多数のシミュレーションから、最適解を求めるという手法である(Afshari et al, 2014)。しかし、既存の最適化手法では、最適解の算出に要する膨大な計算時間が大きな課題の一つになっている。

そこで本研究では、井戸の配置を高速に最適化可能なツールの開発を目的として、最適化アルゴリズムと並列計算可能な数値シミュレーションコードを組み合わせたツールを開発し、多数のCPUを有する超並列計算機に実装した。また、従来手法では数値シミュレーションを逐次的に実行していたが、本ツールは並列に実行可能な解候補並列スキームを実装した。

本研究では、開発したツールを二酸化炭素地中貯留

(CCS)の井戸配置の例題に適用し、その実用性と効果を検討した。

2. 最適化ツールの概要

開発した最適化ツールのフローを図1に示す。まず、井戸の設置パラメータ（座標、深度など）の異なる複数の解候補について数値シミュレーションを実施する。次に、それぞれのシミュレーション結果より目的関数値を算出し、これをもとに最適化アルゴリズムにより新たな解候補を生成する。従来手法（同図左）ではこの解候補に対して逐次的にシミュレーションを行っていたが、本ツールでは解候補を並列にシミュレーションすることで、理想的には1度に生成する解候補の数だけ高速化できる。流体シミュレーションには様々な地下水問題に対応できる汎用シミュレータであり、多数のCPUによる並列計算が可能なTOUGH2-MPを使用した。最適化手法には、CMA-ES（Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy）を採用した。CMA-ESでは、生成された解候補の目的関数値にランクを付け、より優良な解候補を生成する多変量正規分布のパラメータ（平均ベクトル、共分散行列等）を更新し、効率的に最適解をもとめる(Hansen et al, 2001)。

3. CCSにおける井戸配置問題

酸化炭素地中貯留(CCS)は、火力発電所などの排ガスから回収したCO₂を地下深部の砂岩層などの貯留層

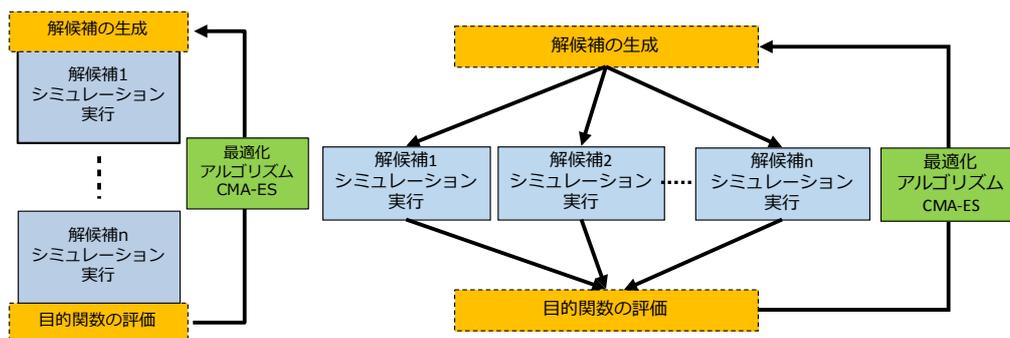


図1 最適化ツールのフロー（左：従来手法、右：解候補並列）

キーワード 最適井戸配置、CMA-ES、Oakforest-PACS、解個体並列

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

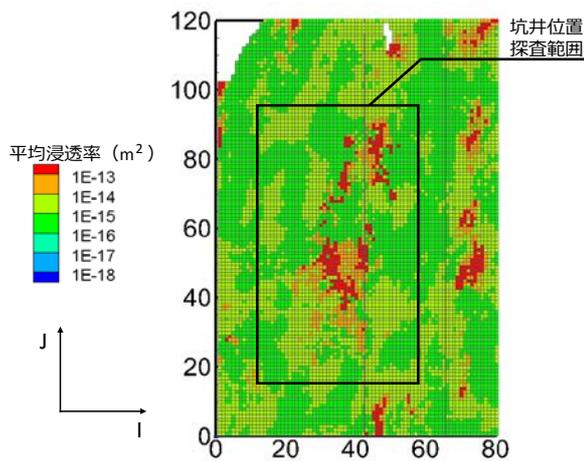


図2 仮想的な貯留層モデルの浸透率分布

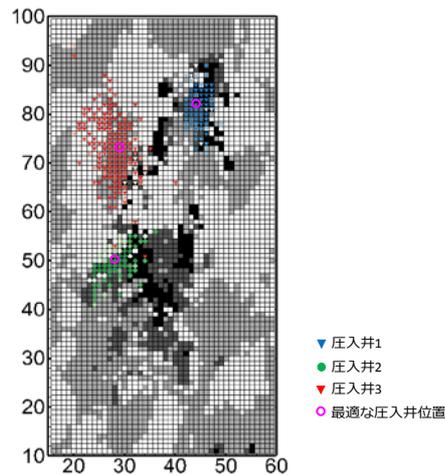


図3 最適化結果

に圧入井を通じて圧入する地球温暖化対策である。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。

今回の例題では、3 本の鉛直井を使用し、目的関数を 3 本の圧入井の CO₂ の累積圧入量とした。CO₂ は貯留層の最大許容圧力で連続圧入されるものとし、圧入期間は 10 年間とした。対象貯留層は平面範囲 8km×12km、貯留層厚 100m であり、3 D 地震探査の解釈から 3 次元の空隙率や浸透率の分布が図 2 の通り与えられている。この不均質場においてどの位置に圧入井配置すると最も多くの CO₂ を圧入できるかを調べる。総グリッド数は約 7 万 (格子間隔 100m×100m×約 15m) である。モデルの上下面及び側面は不透水境界とし、井戸の探査範囲は図 2 中の黒線の内側とした。超並列計算機には Oakforest-PACS (東京大学・筑波大学) を使用した。

4. 結果

図 3 に、最適化の結果得られた 3 本の圧入井の最適位置 (図中、ピンクの丸印) を浸透率分布 (グレイのコンター図) とともに示す。累積圧入可能量は約 800 万 t であった。それらの周辺のプロットは、探索の過程で得られた累積で 500 万 t 以上圧入可能であった位置である。探索の過程において、各井戸が互いに圧力干渉の効果が低くなる距離を保ちつつ、比較的浸透率の高い位置を密度高く探査していることがわかる。なお、最適解を得るためには 2000 回のシミュレーションが必要であった。

ここで、並列計算コード及び解候補並列の効果を示す。今回の最適化計算に要した時間表-1 にまとめた。流体計算の並列化による高速化 (64CPU で約 60 倍) に加え、解候補並列 (20 並列) によって 8 倍高速化して

おり、従来手法より数百倍高速化したと考えられる。

表 1 並列計算及び解候補並列の効果

CPU コア数	流体計算の並列化	解候補並列	計算速度
1	×	×	約 17 年 (推定)
64	○ (64 並列)	×	約 105 日
1,280 (64×20)	○ (64 並列)	○ (20 並列)	約 13 日

5. まとめ

地下流体の制御に有用な井戸配置の最適化ツールを開発した。多数のシミュレーションのために要する計算時間の問題を解決するため、超並列計算機に実装し、CCS における井戸配置に適用した。その結果、並列計算及び解候補並列スキームの効果により、従来の最適化計算より数百倍高速化できる。今後は、幅広い分野での井戸配置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。

Oakforest-PACS の利用は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の支援による (課題番号: jh170028-NAJC) の支援による。

参考文献

- 1) Afshari,S. Pishvarie, R.M and Aminshahidy.B. 2014. Well Placement Optimization Using a Particle Swarm Optimization Algorithm, a Novel Approach. Petroleum Science and Technology 32 (2014), 170-179. Issue 2.
- 2) Hansen.N 2016. The CMA Evolution Strategy :A Tutorial. ArXiv eprint(April 2016)