

## 審査の結果の要旨

氏名 合田 隆

二酸化炭素地中貯留は、地球温暖化の主要因と考えられている二酸化炭素の大気中過剰排出に対する実効的な対応策として期待されている。過度に多数の坑井を掘削することなしに、二酸化炭素地中貯留を安全に実施するためには、情報が少ない不確実性下で最適な操業を遂行するための手法が不可欠であり、その技術開発が喫緊の課題として認識されているところである。

当該博士論文は地下環境における二酸化炭素の流動現象の観点から、二酸化炭素地中貯留技術を最適化するための工学的アプローチ構築を目的とし、具体的には

- 1) 流動シミュレータの改良
- 2) 簡易的な流動モデリング
- 3) 二酸化炭素圧入坑井配置の最適化
- 4) ヒストリー・マッチングによる未知パラメータの推定

に関する研究成果を纏めたものである。

本論文ではオープン・ソースの流動シミュレータ TOUGH2/ECO2N を用いており、まず項目 1) では以後の課題解決に必要な機能、即ち、多相流動に見られる相対浸透率のヒステリシス効果、二酸化炭素存在形態の可動・不動・溶解への定量的分類、ならびに柔軟なグリッドシステム構築などが追加されている。一方で、計算に膨大な時間を要する流動シミュレーションに対峙するアプローチとして、項目 2) の簡易的流動モデリングにも取り組み、状況に応じた解析手法の多様化を可能としている。

項目 3) 4) は共に大域的最適化問題である。実際の貯留層を対象として最適化するには流動シミュレーションを用いて計算される値を最小化ないし最大化することになる。この場合、最適解を探索するためのシミュレーション実行回数は要する時間の制約を受けるため、無制限に設定することはできない。当該論文ではそこで、ラテン超方格法の構成法に着想を得た新規大域的最適化手法、即ち、繰り返しラテン超方格法を開発し、多数のベンチマーク関数を用いた数値実験ならびに他手法との性能比較によって、工学的な有用性が明らかにされている。

開発された最適化手法を用いて項目3) 4) に取り組み、3) では、キャップブロックの遮蔽性に依らないメカニズムによりトラップされる二酸化炭素量を最大化し、貯留信頼性・安全性を向上させるという目的で坑井位置と各坑井の圧入量割合の最適解を求めることに成功している。油層工学固有の近似的手法が算出する解との比較によっても本手法の優位性が示されている。

浸透率のように地層内で不均質な分布を有する物性は、把握が難しく不確実性が高い一方、二酸化炭素の流れに大きく影響する。したがって、限られた観測データと整合的な分布を推定することは重要な課題として認識されている。項目4) では、不均質な分布を効率的に推定するための次元削減法として、正規直交基底をなすルジャンドル多項式、コサイン関数、Walsh 関数を取り上げられている。次数あるいは交差数の少ない基底関数をあらかじめ抽出し、それらの線形和に表れる各係数がパラメータとして選ばれている。シミュレーション結果が観測データと一致するように繰り返しラテン超方格法を用いた計算を実施し、3つの次元削減法で良好かつ効率的なヒストリー・マッチング結果が示されている。

更に、新潟県南長岡の岩野原実証試験サイトで実施された二酸化炭素地中貯留プロジェクトで得られた地質モデルと、圧力・二酸化炭素到達日時の観測データを用いて、実データに対するヒストリー・マッチングが試みられている。次元削減に加えて、GPU(Graphics Processing Unit)を用いた数値シミュレーションの高速化と多点探索における関数評価を並列に実行できる環境整備を行うことによって、数日程度という現実的な時間でのヒストリー・マッチングを可能とした。浸透率・孔隙率・相対浸透率に関わるパラメータ等を併せて推定する問題を取り扱い、当該論文で構築したアプローチが有効であることが示されている。

論文審査会においては、上記のような研究成果と今後の研究展開について論文提出者より説明があり、その後審査委員よりその内容についての諮問が行われた。当該論文では大きく分けて、大域的最適化手法の開発と二酸化炭素地中貯留の安全な実施に資するための実際的問題への応用の2点が議論されている。前者の開発手法に関して、実際的問題への応用を念頭に置いた場合の繰り返し数の適切な設定方法、ならびに更新履歴の活用について質疑応答があった。また、後半の応用では、より大規模貯留層モデルを用いた長期観測データを想定した場合の提案手法の拡張性・適用可能性についての議論があった。何れの質疑に対しても、妥当な回答ならびに今後の発展的研究指針が論文提出者より適切に示された。また、当該論文には、新規性・有用性・外部発表実績が十分に備わっていることも確認された。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。