

審査の結果の要旨

氏名 田中 啓

二酸化炭素地中貯留や石油・天然ガス開発に関わる開発計画の策定や、貯留層モデルの構築を目的として、貯留層シミュレーションを伴う大域的最適化手法の利用が進んでいる。二酸化炭素の地中貯留はコストの面から取得できる地質データには限りがあり、最適化問題の次元は大きくなる傾向にある。一方で、貯留層シミュレーションには計算時間を要するため、実際に最適化手法が運用される場合、必ずしも十分な最適化計算が行われていない。

当該博士論文は、二酸化炭素の地中貯留を念頭に、貯留層シミュレーションを伴う大域的最適化問題に適した、実用性の高い大域的最適化手法を開発し、その有効性を検証することを目的としている。具体的には、

- 1) 正規化エントロピーを用いた新規の収束判定基準の導入
- 2) 従属ラテン超方格法を用いたロバスト性の向上
- 3) 貯留層シミュレータ及び大域的最適化手法の高速化
- 4) 実問題への適用と提案手法の評価

に関する研究成果をまとめたものである。

本研究では、まず貯留層シミュレータに適した大域的最適化手法について考察し、その結果、多点探索法の1つ、繰り返しラテン超方格法 (ILHS) を選択した。1)では、ILHS の最適化計算の進展に伴うサンプル領域の変化に注目し、最適化計算の収束がサンプル領域の平均情報量 (エントロピー) によって判断できることを示し、最適化計算の収束判定基準を新規に開発した。次に2)では、サンプル点の生成に接合分布関数 (コピュラ) による従属ラテン超方格法を導入することによって、最適化計算の独立試行間のばらつきを低減させることを提案した。1)、2)で開発した手法に対して、複数のベンチマーク関数を用いた数値実験によりその有効性を評価し、どちらの手法に対してもその効果を確認した。

二酸化炭素の地中貯留シミュレーションでは、多孔質媒体の多次元多成分系シミュレータ TOUGH2/ECO2N が利用されることが多く、本研究でもこれを利用している。3)では、貯留層シミュレータ TOUGH2/ECO2N、及び大域的最適

化手法 ILHS の高速化による計算時間の低減を目指した。貯留層シミュレータに対してはタイムステップ幅の更新方法の変更、ソルバーの変更や一部コードの GPU (Graphics Processing Unit) 化を行い、約 3 倍の高速化を達成した。最適化シミュレータについては、MPI 並列による複数 CPU の利用を可能とし、最終的に約 12 倍の高速化を達成している。

最後に、提案手法の有効性を実践的問題によって検証することを目的として、4) 二酸化炭素の地中貯留シミュレーションに関する実問題への適用を行った。以下の 2 つの最適化問題を設定している。

- ・ 貯留層内の可動二酸化炭素を最小化する坑井配置の最適化
- ・ 実データを用いた地層特性把握のためのヒストリーマッチング

前者は問題の次元が小さいため、5 回中 3 回の試行で正規化エントロピーによる収束が判断できた。また、正規化エントロピーは目的関数の値の変化だけでなく、主変数の収束をうまく表現できており、収束基準として有効であることが確認できた。得られた結果から、目的関数の値を維持しつつ、計算時間の低減ができることを確認すると同時に、水平坑井からの二酸化炭素圧入が安定的な地中貯留に効果的であることを示した。

後者のヒストリーマッチングについては、新潟県長岡市において行われた岩野原実証試験に対して貯留層モデルの最適化を行った。問題の次元が大きく、最適化計算の収束には長時間を要するものの、ほとんどの主変数に対してその収束を確認した。提案手法は問題の次元に関わらず有効であるといえる。加えて、目的関数の設定方法が最適化計算の収束に影響すること、地中貯留二酸化炭素の挙動を再現するためには、貯留層の浸透率と孔隙率を同時に最適化する必要があること、といった知見を得た。今後の検討課題として、浸透率分布と孔隙率分布のより詳細な再現、本研究で未検討のパラメータを含めたヒストリーマッチング、多目的最適化の適用が考えられる。

論文審査会において、上記の研究の概要と成果、及び今後の研究の展開について、論文提出者より説明があり、続いて審査委員より質疑が行われた。本論文は前半で実用性の高い最適化手法の提案、後半で実問題への適用を行っており、前半については、正規化エントロピーの値から局所解と大域解への収束を区別できるのかといった質問があった。後半については、目的関数の違いが解探索に及ぼす影響や、観測値にエラーが含まれる場合の対応について議論があった。何れの質疑に対しても、妥当な回答ならびに今後の発展に向けた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。