

論文の内容の要旨

二酸化炭素地中貯留の安全な実施のための 大域的最適化アプローチの構築

氏名 合田 隆

二酸化炭素(CO₂)の過剰排出に対する実効的な抑制策として、CO₂回収・貯留技術(CCS, Carbon dioxide Capture & Storage)が注目されており、深部塩水層や枯渇油・ガス田といった堆積盆地へのCO₂貯留は世界各地で実証試験が稼働または計画されている。今後2050年までに3000以上の大規模なCO₂地中貯留プロジェクトを実施する必要があるとの予測があり、長期安定性の確保を目的とした最適な貯留システムの早期確立が必要不可欠である。CO₂地中貯留には油・ガス田開発で培われた多くの技術を転用できるものの、経済的なインセンティブは期待できないため、これまでとは異なる、より効率的なアプローチが要求される。本研究では、CO₂地中貯留の安全な実施に向けた工学的アプローチの構築を目的として、圧入したCO₂を地層内で安全に留めるための坑井配置の最適化と、地層の不均質性を少数のパラメータで効率的に推定するヒストリー・マッチングに取り組んだ。

流動シミュレータにはTOUGH2/ECO2Nを用いた。地下環境における流動現象の観点から、孔隙中でCO₂が不動化される残留ガストラッピングは貯留信頼性に重要な貢献を果たすと言われており、本研究においてもこのメカニズムをシミュレーション上で再現できるよう、Landのモデルに従ってImbibition過程の相対浸透率を計算するような改良を加えた。また、地層内におけるCO₂の存在形態を可動、不動、溶解に分類し、それぞれの形態のCO₂の質量を計算する機能を追加することによって、貯留信頼性に関する定量的な評価を可能にした。さらに、実際の地質構造を簡便にモデリングするためのグリッド・システム構築手法を確立し、実用に資する統合的なシミュレーション・ツールを開発した。

本研究で取り組む問題はいずれも大域的最適化問題として定式化できるが、最小化または最大化する目的関数の値は流動シミュレーションを用いて評価されるため、要する時間の制約を受けて、関数評価回数は十分に大きくできない。この問題に対応するため、数値積分や大域的感度分析などに用いられるラテン超方格サンプリングの構成法に着想を得て、新規大域的最適化手法「繰り返しラテン超方格法」を開発した。目的関数の各入力変数に対して最適解が存在すると期待される区間ほどサンプル点の間隔が小さくなるような順位付けに基づく確率モデルを導入し、ラテン超方格サンプリングを繰り返し用いながら、各入力変数に対する確率モデルを逐次更新していく、という手順によって有界な高次元空間

内の大域的最適解を探索する多点探索法である。この手法に必要な制御パラメータは繰り返し1回あたりに用いるサンプル数と確率モデルに要する指数の2つだけである。

まず、性質が異なる多数のベンチマーク関数を用いた性能評価によって、問題の次元に応じた適切な制御パラメータの設定についての指針を得た。次に、その設定に基づいて様々な次元の問題に適用した結果と他の多点探索法である Nelder-Mead 法、粒子群最適化法、差分進化法を用いて計算した結果を比較し、本手法の工学的な有効性を検証した。さらに、CO₂ 圧入坑井配置の最適化に適用するため、離散変数を含む混合変数関数の大域的最適化手法に拡張した。拡張のために用いた方法では、同じ繰り返しのステップにおいて同一の目的関数値を取るサンプルが複数存在し得るため、各サンプルの順位をどのように与えるかが問題となる。そこで、幾つかの順位付けの方法を考え、ベンチマーク関数を用いた性能比較によって適切な方法を選定した。

以上のように改良を加えた流動シミュレータと開発した大域的最適化手法を用いて、CO₂ 圧入坑井配置の最適化と、不均質性を効率的に推定するヒストリー・マッチングに取り組んだ。まず前者では、貯留信頼性の高い CO₂ 地中貯留を実施するための方策として、坑井配置を適切に決定することで、キャップロックの遮蔽性に依らない残留ガストラッピングと溶解トラッピングによって地層内に留まる CO₂ の質量を最大化する問題として定式化した。圧入レートが固定されている時に、圧入坑井の数を1本から3本まで変えて、各坑井の位置と圧入レートの割合を同時に最適化するような計算を繰り返しラテン超方格法によって試行した。1坑井の場合には、事前に全ての解の候補に対してシミュレーションを実行し、それによって得られた解析解に一致するまで最適化計算を実行した。その結果、独立した多数の試行全てで候補数より大幅に少ない関数評価回数で解析解と一致する結果が得られた。2坑井の場合、最小化された目的関数の値についてはどの試行でも類似しており、工学的な区別がつけられなかったが、坑井配置の最適解は異なる2つの分類に大別されるような配置となった。3坑井の場合には、どの試行でも目的関数の値、坑井配置ともに類似した解が得られた。どの坑井数の問題でも少ない関数評価回数で最適化した。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、得られた最適解が良好であることが確認された。

ヒストリー・マッチングについては、観測データと流動シミュレーションによって評価される結果のずれを最小化する問題として定式化し、最適化するパラメータの探索には繰り返しラテン超方格法を用いた。多くの坑井を掘削できない CO₂ 地中貯留では、事前に浸透率や孔隙率などの不均質性について情報を得ることは困難である。したがって、CO₂ を圧入してから得られる坑底圧や CO₂ の広がりなどの観測データに合うように、ヒストリー・マッチングを行って推定することになる。離散化された全てのグリッドの値を推定しようとする、パラメータ数がグリッド数と等しくなるため、数千や数万といった極めて

高次元の最適化問題を扱うことになる。これを回避するために、少ないパラメータ数で不均質な分布を近似できるような基底関数の線形和を用いた次元削減法を提案した。油層工学の分野における多くの文献では、事前に不均質な分布が推定されていることを前提としているが、本研究で提案するアプローチではその必要はない。基底関数としては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 関数の 3 つを取り上げた。

グリッド数よりも少ない数のパラメータで分布を近似することの妥当性を検証するため、次のような数値計算例を示した。不均質な分布が既知であると仮定して、それをグリッド数と同じ数の Walsh 関数で分解し、その中から対応する係数の絶対値が大きい順に部分集合を取り出して分布を復元する。このようにして復元される分布が元の分布に近ければよいことになる。実際に地球統計学的手法を用いてランダムに発生させた分布を分解・復元すると、少ない基底関数の線形和でも元の分布に類似した分布が得られることが定量的に確認された。また、分布に大きな影響を及ぼす基底関数は主に次数ないし交差数が少ないものであった。

グリッド数の異なるモデルを用いて擬似観測データを作成し、それにマッチングするような浸透率の不均質性を推定した。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を最適化するパラメータとして、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て計算した。観測データには圧入井と観測井における圧力変化と観測井への CO₂ 到達日時を考慮した。不均質性が異なる幾つかのモデルで擬似観測データを作成して、3 つの次元削減法でヒストリー・マッチングを試みたが、どの試行についても観測データと良く一致するようなシミュレーション結果が得られた。この計算例では、グリッド数 1024 に対して、不均質性の推定に用いたパラメータ数は 25 と十分に少なく、効率的にヒストリー・マッチングができたと言える。

最後に、新潟県南長岡の岩野原実証試験サイトで実施された CO₂ 地中貯留プロジェクトで得られた地質モデルと、圧力・CO₂ 到達日時の観測データを用いて、実際のヒストリー・マッチングを試みた。ここで用いるモデルでは 1 回のシミュレーション実行に要する時間が数分から数十分であるが、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の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・マッチングが可能になった。

浸透率の不均質性のみ推定する問題、浸透率と孔隙率の不均質性を併せて推定する問題、浸透率の不均質性と岩石圧縮率や相対浸透率に関わる他のパラメータを併せて推定する問題の 3 つを取り扱い、いずれの場合にも本研究で構築したアプローチが有効であることが示された。観測井で囲まれた領域内における浸透率の不均質性は、どの次元削減法を用いても傾向の類似した分布が得られた。一方、孔隙率の不均質性まで併せてヒストリー・マッチングを図っても、観測データとのずれは改善されなかったことから、あまり重要なパラメータではないと考えられる。また、不均質性以外のパラメータを考慮した場合に、最

も当てはまりの良い結果が得られた。各問題で最適化するパラメータ数は 25, 50, 45 と異なるが、関数評価回数はこの個数に比例するように設定しており、問題の次元に応じて関数評価回数を大幅に増加させなくても良好な解が得られることが分かった。