

## 二酸化炭素地中貯留のための圧入井本数の最小化 —バイナリー最適化手法の適用—

大成建設（株） 正会員 ○宮城 充宏, 正会員 山本 肇, 正会員 熊本 創

### 1. はじめに

二酸化炭素回収貯留(Carbon dioxide Capture and Storage : CCS)は、火力発電所等から排出される CO<sub>2</sub> を回収し、地下深部の砂岩層などで構成される貯留層に圧入井(圧入用の井戸)を通じて貯留する地球温暖化対策技術である。商業規模の CCS では、複数の圧入井から大量の CO<sub>2</sub> (1 地点あたり年間 100 万 t 以上)を地中に圧入することが想定される。圧入井は、概ね 1km の大深度に設置されるため、そのコストは高額となる。そのため、プロジェクトのコスト削減の点で、少ない圧入井の本数で必要な量の CO<sub>2</sub> を圧入することが望ましい。

圧入井の最小本数を求める一つの方法として、圧入井の本数とその位置を変化させながら数値シミュレーションを繰り返し、最適な本数と位置を見出すことが考えられる。このパラメータスタディーは最適化問題として定式化すれば、最適化アルゴリズムを使用することで効率的に最適解を探索できると考えられる。

本研究では、圧入井の最小本数を求める問題をバイナリー最適化問題として定式化することを提案する。この問題の最適解を探索するために、バイナリー最適化手法 PBIL(Population Based Increment Learning)<sup>1)</sup>と CO<sub>2</sub> 地中貯留解析コード TOUGH2 ECO2N<sup>2)</sup>を組み合わせた最適化ツールを新たに開発した。本報では、最適化問題及び開発したツールの概要を説明するとともにツールの動作を検証した結果を報告する。

### 2. 圧入井本数の最小化問題

図 1 に最適化問題の概要を示す。同図中、灰色の格子は貯留層モデルの解析用格子、黄色の格子は圧入井を設置した解析用格子、青線で囲んだ領域は圧入井設置の探索領域を各々示している。青線領域内から圧入井設置の候補位置を複数選択し、それらの位置に圧入井設置に関するバイナリー変数  $b_i$  を設定する。ここで、 $i$  は圧入井の候補位置の通し番号であ

る。 $b_i$  が 1 であれば  $i$  番目の候補位置に圧入井を設置し、0 であれば設置しない。今回、以下のような目的関数において、圧入井の最小本数を求める最適化問題として定式化した。

$$\text{目的関数} : \frac{V}{N_{\text{well}}} \rightarrow \text{最大化}$$

$$N_{\text{well}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{max}}} b_i$$

ここで、 $V$  : 圧入可能量、 $N_{\text{well}}$  : 圧入井の本数、 $N_{\text{max}}$  : 圧入井の候補位置の総数、である。目的関数は、圧入井 1 本あたりの圧入可能量を表している。

### 3. 最適化ツール

上記の目的関数を最小化するために、バイナリー最適化手法 PBIL と流体解析コード TOUGH2 を組み合わせた最適化ツールを開発した。最適化ツールの計算フローは、次の 3 つのステップを繰り返す。① PBIL が  $\lambda$  個の解候補  $B = (b_1, \dots, b_{N_{\text{max}}})$  を生成する。②生成された解候補についてシミュレーションし、目的関数値を算出する。③得られた目的関数値に基づいて PBIL のパラメータが更新される。そして、再度  $\lambda$  個の解候補を生成する(上記①~③のステップを以後、1 反復と呼ぶ)。PBIL のパラメータやその更新方法については文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

PBIL は二項分布から解候補を生成する多点探索手法である。

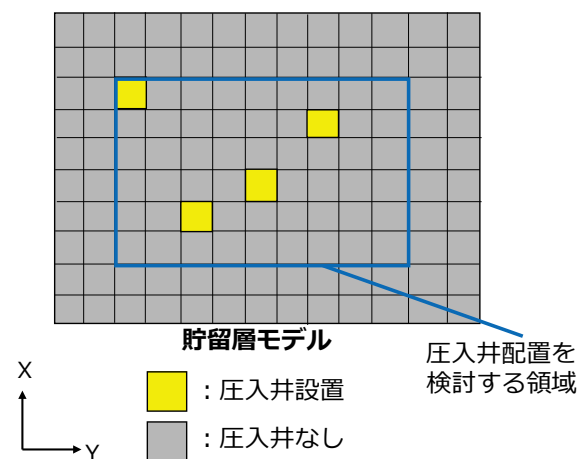


図 1 圧入井本数の最小化問題の概念図

キーワード 二酸化炭素地中貯留, 圧入井本数最適化, PBIL, メタヒューリスティクス

連絡先 〒245-0051 横浜市内戸塚区名瀬町 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 TEL045-814-7221

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{if } (z_{i,k} \leq p_i^G) \\ 0 & \text{if } (z_{i,k} > p_i^G) \end{cases} \quad \text{for each } i = 1, \dots, N_{max}$$

ここで、 $G$  : 反復数、 $k$  : 解候補の通し番号、 $z_{i,k}$  : 0 から 1 の一様乱数、 $p_i^G$  :  $G$  回反復後における  $i$  番目の圧入井の設置確率、である。PBIL は圧入井の設置確率  $p_i^G$  を適切に更新することで、最適解を算出する。

#### 4. 最適化ツールの妥当性検証

開発した最適化ツールの妥当性検証のため、正解が既知のテスト問題に適用した。テスト問題は、60 万 t の水を帯水層に圧入するための最小な圧入井本数を求める問題とした。目的関数の  $V$  は水の注水量となる。本ツールのターゲットは  $\text{CO}_2$  圧入井の最適化であるが、ここでは検証を簡単にするために水のみを圧入を考えている。

帯水層モデルは  $10.1 \text{ (km)} \times 10.1 \text{ (km)} \times 0.05 \text{ (km)}$  の直方体で、これを  $101 \times 101 \times 1$  個の格子に分割した。間隙率は 0.2、絶対浸透率を  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  で均一とした。帯水層の初期圧力を 10MPa、初期温度を  $45^\circ\text{C}$ 、上下面ならびに側面境界は閉鎖境界とした。坑底圧力を 13 MPa に固定して水を 10 年間連続圧入した。圧入井は格子の中心に設置するものとした。

テスト問題における圧入井の候補位置を図 2 に示す。候補位置の総数  $N_{max}$  は 121 ( $11 \times 11$ ) である。圧入井は 1km 以上の離間距離を保って配置する条件とした。今回の問題では、モデル中央に 1 本の圧入井を設置することが正解となる。

#### 4. 最適化結果

シミュレーション回数の増加に伴う各圧入井の設置確率の推移を図 3 にプロットした。同図では、図 2 に示した圧入井の候補位置の設置確率  $p_i^G$  を各々異なる色の線で示している。そのため、線の総数は 121 ( $N_{max}$ ) である。最適解探索初期では全ての位置の圧入井の設置確率が減少したが、シミュレーション回数が約 9000 回以降で正解位置(帯水層中央の位置)の設置確率のみが上昇している。すなわち、最終的に、正解位置を算出できたことが分かる。

#### 5. まとめ

商業規模 CCS の  $\text{CO}_2$  貯留コスト削減に関し、圧入井本数の最小化問題を検討した。最小の圧入井本数を探索するために最適化手法 PBIL と  $\text{CO}_2$  地中貯留解析コード TOUGH2 ECO2N を組み合わせた最適化ツールを新たに開発した。本ツールを正解が既知で

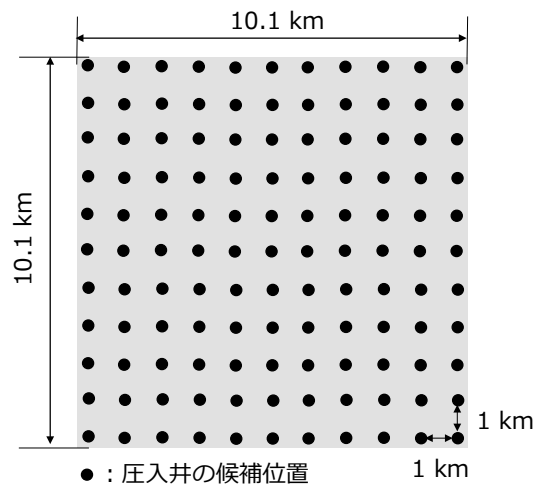


図 2 テスト問題における圧入井の候補位置の分布

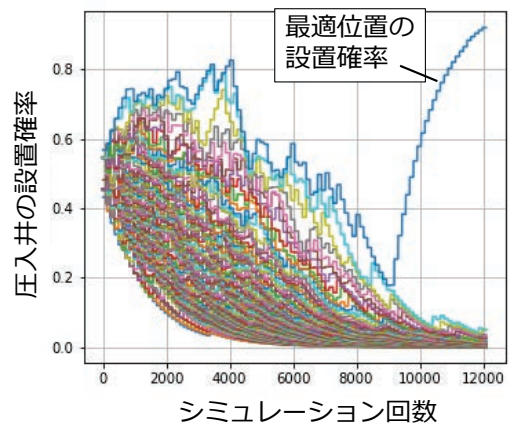


図 3 シミュレーション回数の増加に伴う各圧入井の設置確率の推移

ある水圧入のテスト問題に適用し、圧入井の本数と位置を正しく算出できることを確認した。これより最小な圧入井本数を求めるうえで妥当なツールを開発できたと考えている。今後は、具体的な貯留サイトを対象にした CCS の圧入井配置設計への適用を進めていく予定である。

#### 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP18006) の結果得られたものである。

#### 参考文献

- 1) Baluja, S. (1994). Population-based incremental learning: A method for integrating genetic search based function optimization and competitive learning. Carnegie Mellon University, Technical Report CMU-CS-94-163.
- 2) Pruess, K. (2005). ECO2N : A TOUGH2 fluid property module for mixtures of water, NaCl, and  $\text{CO}_2$ . Technical Report LBNL-57952, Lawrence Berkeley National Laboratory, California.