

令和2年度土木学会全国大会 研究討論会
岩盤力学委員会 岩盤力学におけるICT/AIの活用

メタヒューリスティクスによる 二酸化炭素地中貯留の井戸配置最適化



大成建設株式会社 技術センター
宮城 充宏

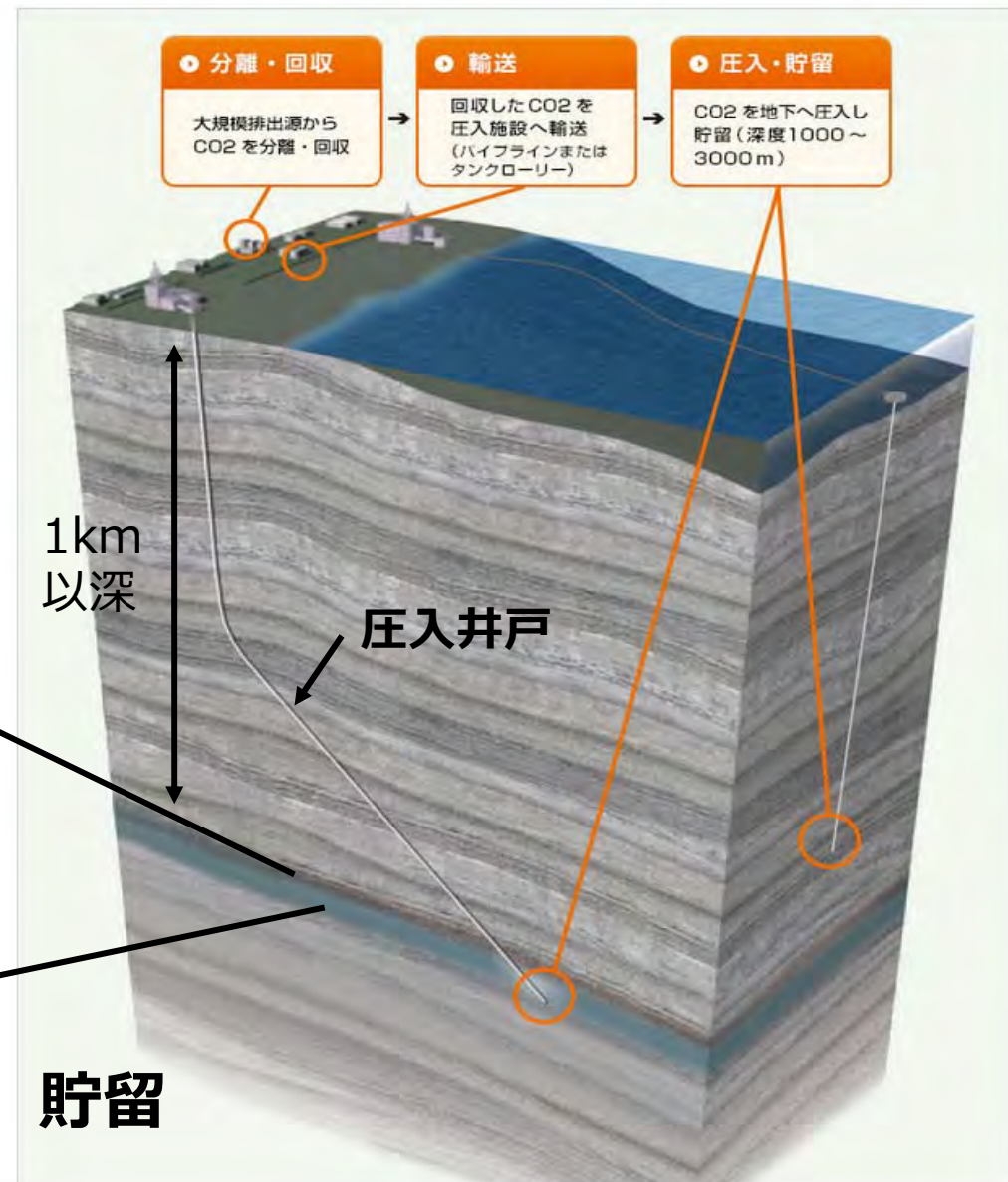
二酸化炭素回収・貯留 (CCS)

火力発電所等から排出されるCO₂を
大規模削減できる温暖化対策技術

キャップロック(泥岩)



貯留層(砂岩)



From JCCS website
<http://www.japanccs.com/business/demonstration/>

CCSにおける井戸配置問題とは

CO₂地中貯留の大深度井戸は高コスト

指標となる性能

- 貯留量
- 地層圧力
- CO₂の広がり
- CO₂の長期安定性
など



設計すべき変数

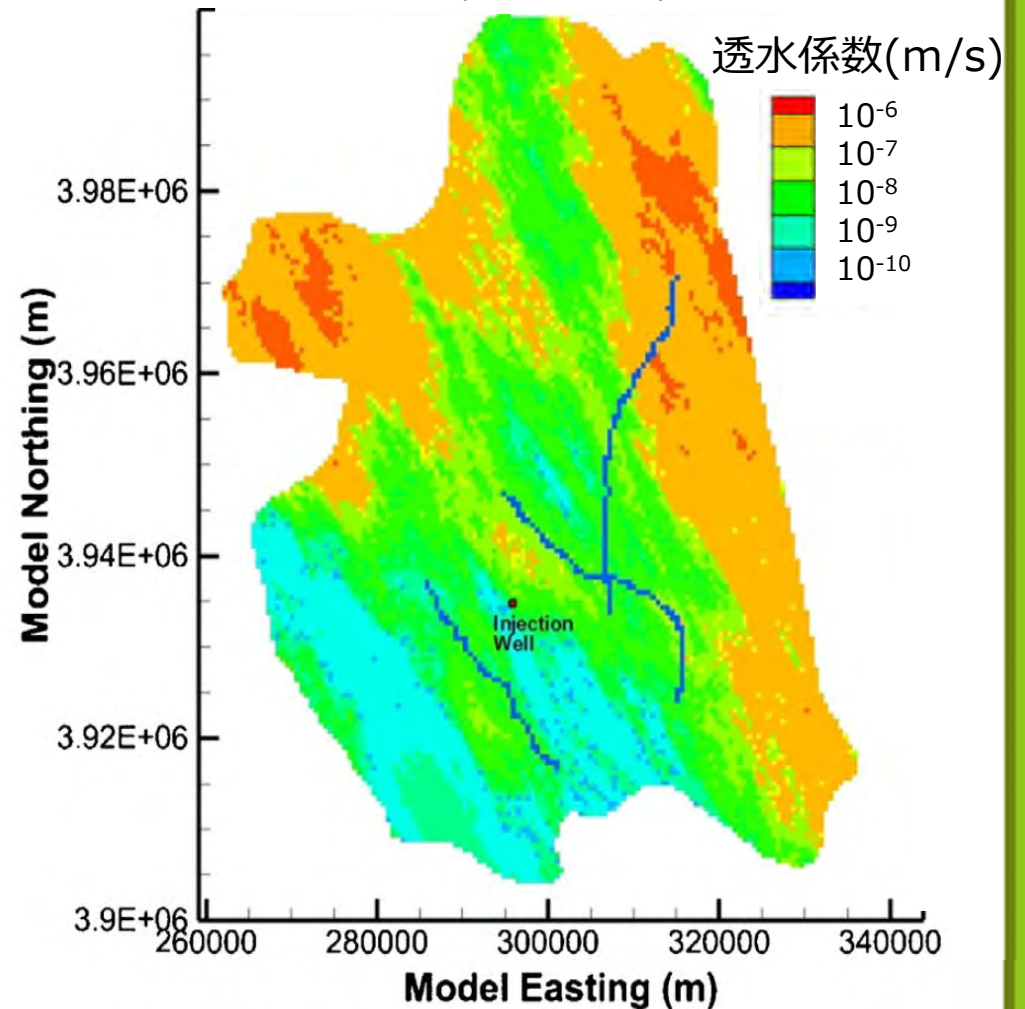
- 本数
- 位置
- 形状 (垂直、水平)
- スケジュール
など



シミュレーションで検討

貯留層モデルの例

Veddar Sand, California, US



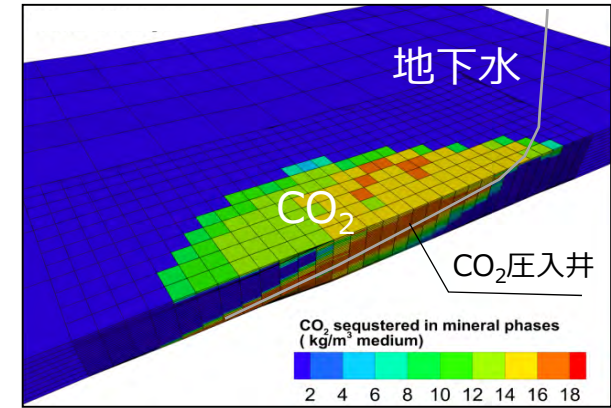
Cihan et al (2015)

課題とアプローチ

課題

最適な井戸配置を求めるために、井戸や貯留層のパラメータを変化させた複数ケースのシミュレーションスタディを行うことが多いが、検討ケースには限界がある。

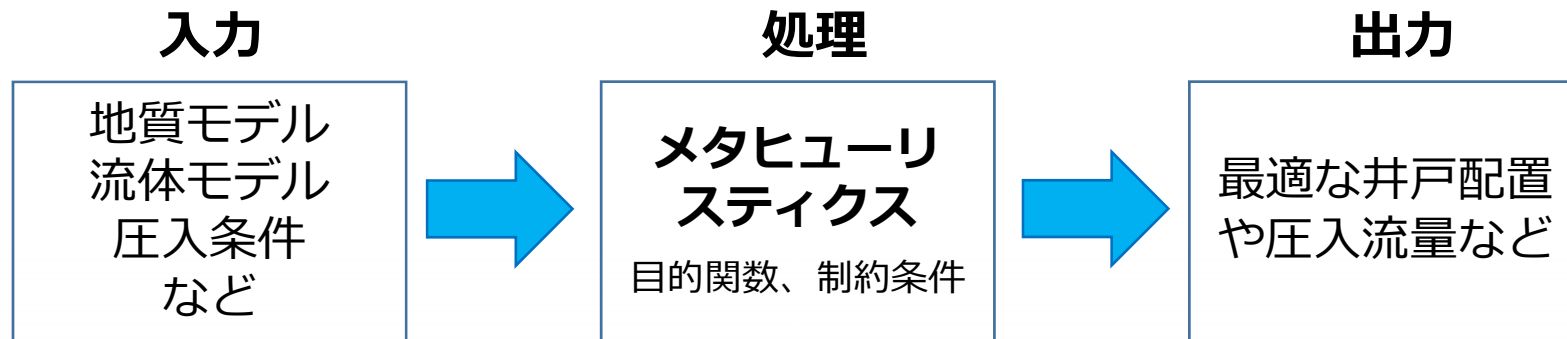
貯留シミュレーションの例



アプローチ

機械学習により最適化するツールを開発
(メタヒューリスティクス+貯留シミュレータ)

※メタヒューリスティクスは機械学習等で使用される近似最適化手法



メタヒューリスティクス

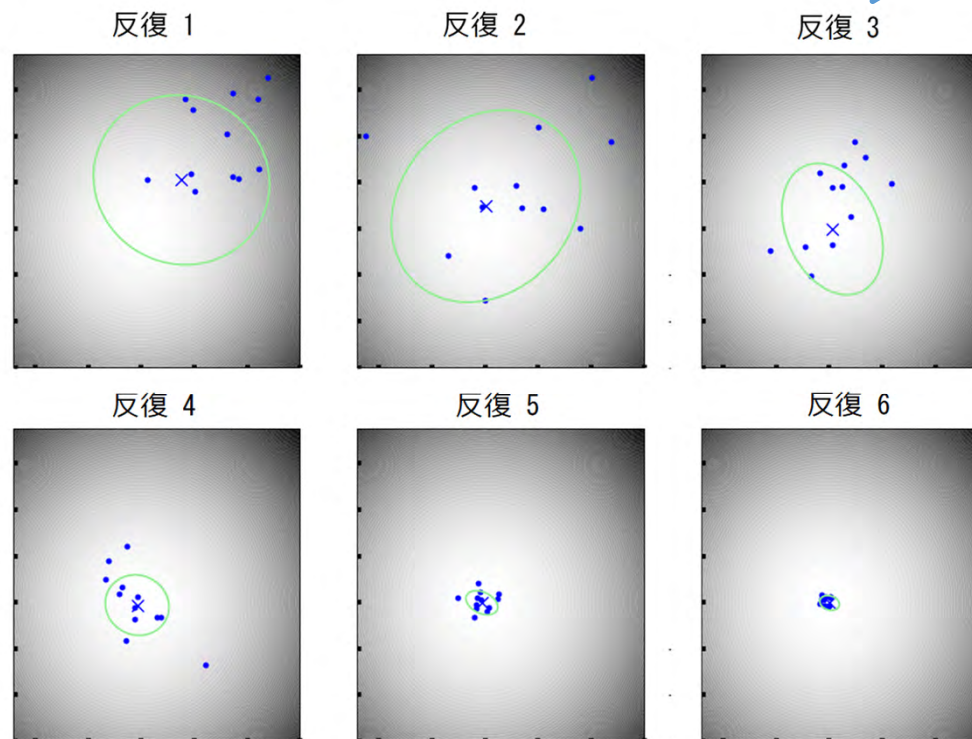
CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation – Evolution Strategy)

$$\mathbf{x}_k^{g+1} = \mathbf{m}^g + \mathbf{N}(0, \mathbf{C}^{(g)}), k = 1 \dots \lambda$$

\mathbf{m} : 解候補平均
 \mathbf{C} : 解候補の共分散行列

解候補は多変量正規分布から生成される。 Hansen and Ostermeier (1996)

目的関数が改善される方向へ移動



徐々に分散が小さくなり最適値に収束

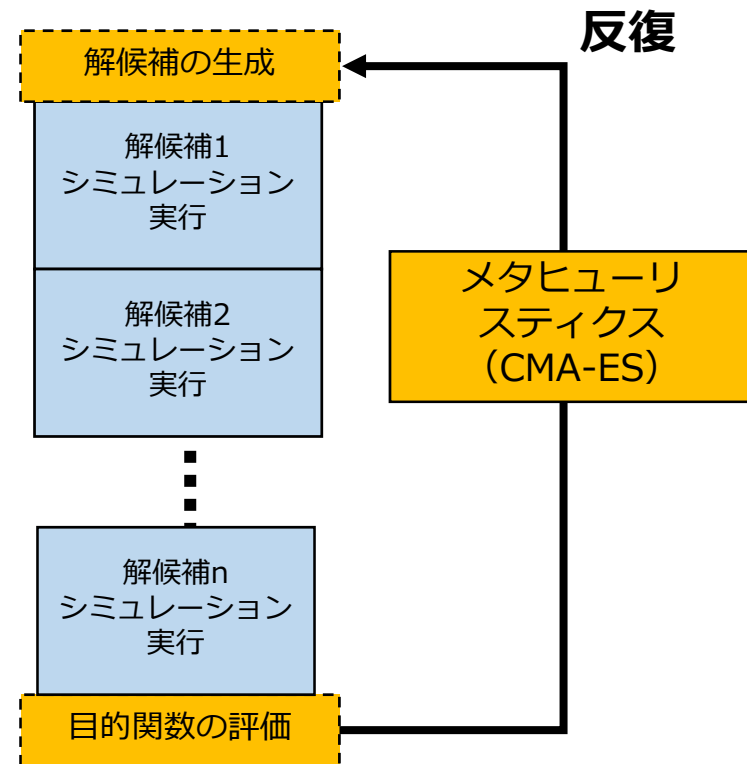
メタヒューリスティクスによる最適化

目的関数（最適化したい要因）：
CO₂貯留可能量

解候補：
圧入井戸の位置座標 (x, y)

自動最適化のステップ

1. 解候補を自動生成
2. それぞれの解候補を用いてシミュレーション
3. 全ての解候補からの目的関数を評価



複数の解候補の目的関数を評価し自動的に配置パラメータを変えた新たな解候補を生成



種々の条件（解候補の生成数等）を満たすまでシミュレーションを自動的に繰り返す

実規模モデルでの最適化

貯留層の地質モデル

- 格子数：71,822
- 格子サイズ：100m×100m×約15m
- 貯留層厚：約100m(7層)
- 透水係数： $10^{-6} \sim 10^{-10}$ m/s(不均質)
- 境界条件：閉鎖境界（上下及び側面）

CO₂の圧入条件

- 坑底圧固定（最大許容圧=40MPa）
- 圧入期間：10年

数値シミュレータ

- 多成分多相流体シミュレータTOUGH2
（CO₂と水の二相流体流れ）

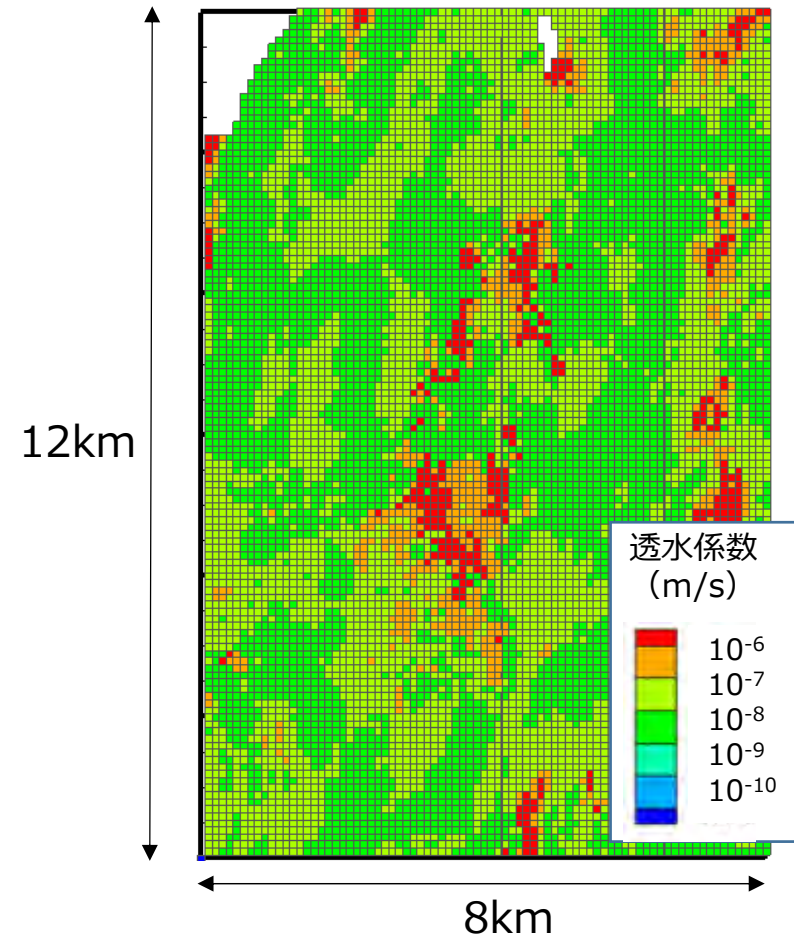
目的関数：

CO₂貯留可能量 → 最大化

解候補：

1本の圧入井戸の位置座標 (x, y)

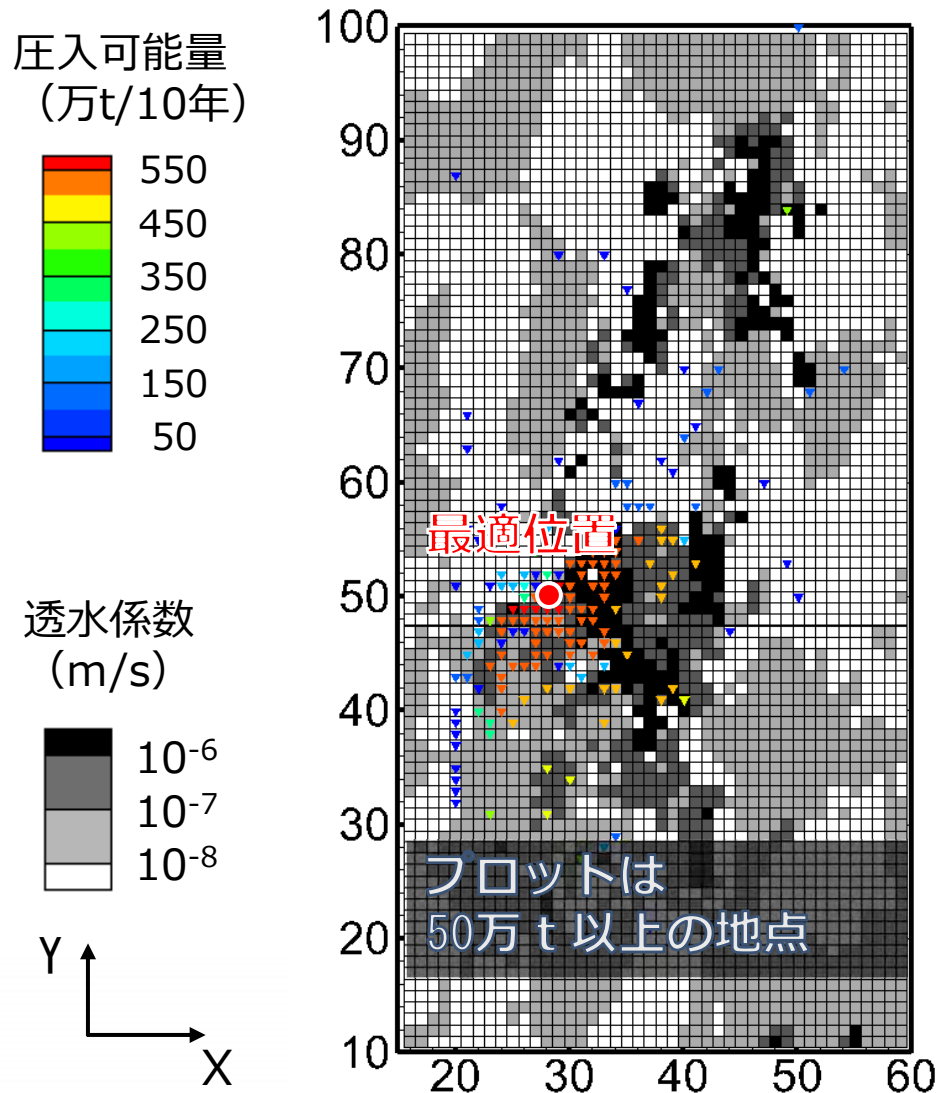
貯留層の3次元地質モデル
(平面図)



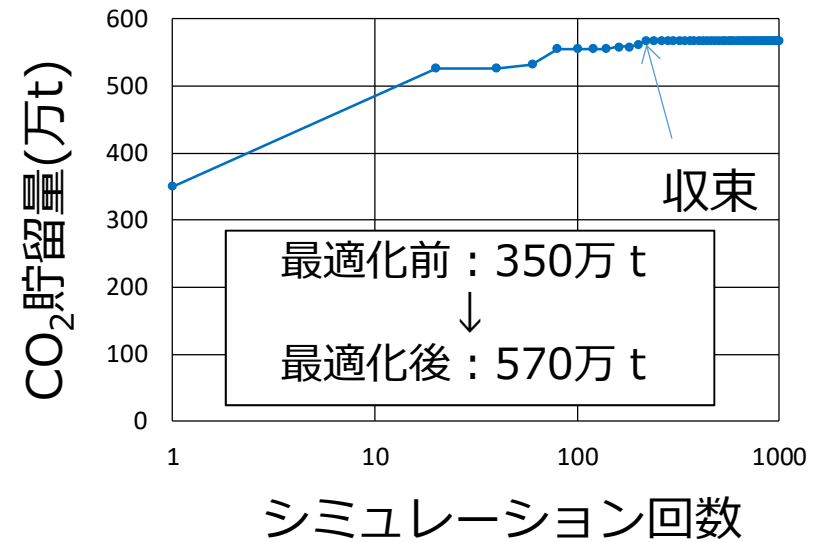
宮城ほか (2018)

最適化結果

目的関数の分布
(背景の灰色は透水係数)



シミュレーション回数
に伴う目的関数の増加



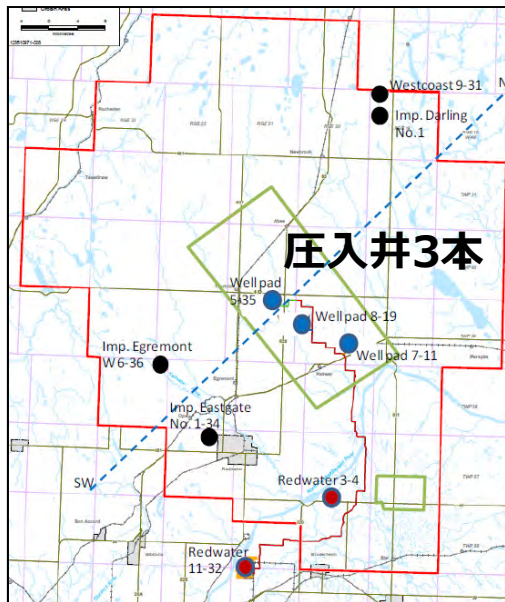
- 透水性が良く、地層標高の高い位置が最適位置として選定
- シミュレーション回数440回でほぼ最適解に収束

宮城ほか (2018)

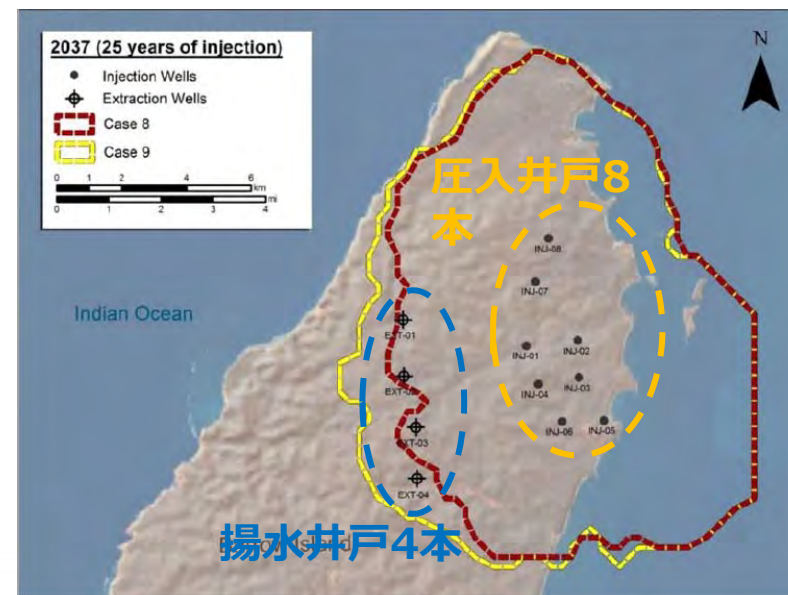
商業規模CCSにおける複数井戸設置の事例

- 商業規模CCSでは、CO₂貯留量が100万トン/年以上となることが想定され、複数の圧入井戸を設置する必要がある。
- 大量のCO₂圧入による地層圧の上昇を緩和する方策として圧入井戸の他に揚水井戸を設ける可能性もある。

Quest (カナダ) の事例



Gorgon (豪州) の事例



まとめ

- 二酸化炭素地中貯留のための井戸配置を機械学習で最適化するツールを開発した。
- 商業規模のCCSプロジェクトで必要となる複数の井戸配置の最適化などに活用できる。
- 複数井戸の配置設計における計算量の増大に対応するため、スパコンによる並列処理機能も開発済みである。

現在の取り組み

- 最適解探査で用いるモデルは実際のサイトを十分に表現できることが前提となる。しかし、多くの場合地質モデルには不確実性が含まれる。
- 地質の不確実性を具体化した複数のリアライゼーションに対して最適な井戸配置を算出できる手法を検討している。

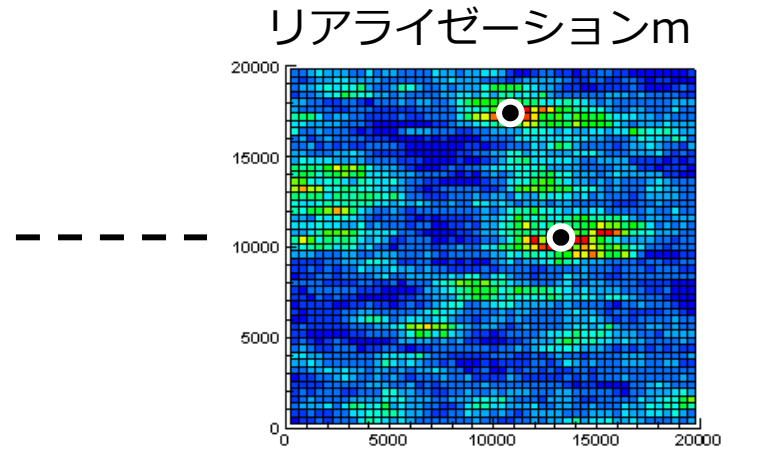
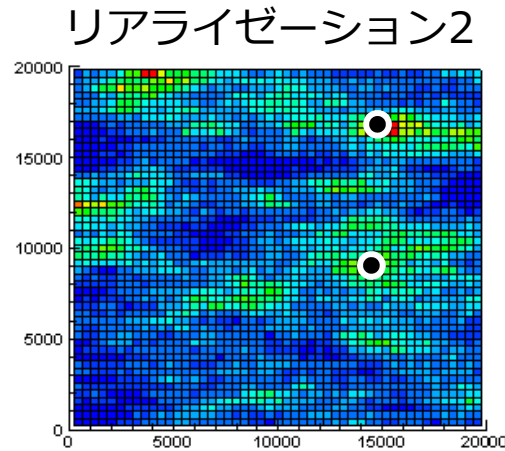
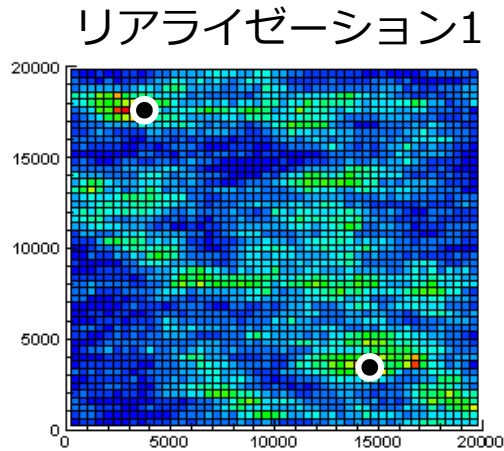
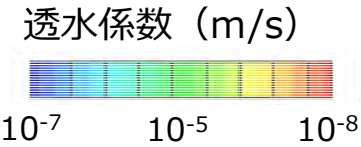
御清聴ありがとうございました

テーマ2 実用化に向けた課題

地質モデルの不確実性

- 最適化ツールの使用は、地質モデルが実際の貯留サイトを十分に表現できていることが前提となる。
- 実際には地質調査データの不足など様々な要因による不確実性が地質モデルには含まれる。
- 地質の不確実性を具現化した複数のリアライゼーション（可能性のある地質モデル）に対して圧入井の配置を最適化する。

各地質モデルに対して個別に最適配置を探索
(透水係数の分布の不確実性を考慮した場合)



透水係数が高い位置を選定した最適解がn個求められる

最適解を一意に決定できない

● : CO₂ 圧入井の最適配置

複数リアライゼーションでの 圧入井戸配置最適化の考え方

1つの解候補に対してm個のリアライゼーションについてシミュレーションを実施し、異なるCO₂圧入量を統合化した値を最大化する

