

地球シミュレータ産業利用シンポジウム 2011
2011年10月19日 学術総合センター

二酸化炭素地下貯留に関する 大規模シミュレーション技術の開発

山本 肇^{*1}, 七井慎一^{*1}, K. Zhang^{*2}, P. Audigane^{*3}, C. Chiaberge^{*3}
西川憲明^{*4}, 廣川雄一^{*4}, 新宮 哲^{*4}, 緒方隆盛^{*5}, 中島研吾^{*6}

*1 大成建設株式会社 技術センター

*2 ローレンスバークレー国立研究所 (LBNL)

*3 フランス地質調査所 (BRGM)

*4 独立行政法人 海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター

*5 日本電気株式会社 HPC事業部

*6 東京大学 情報基盤センター

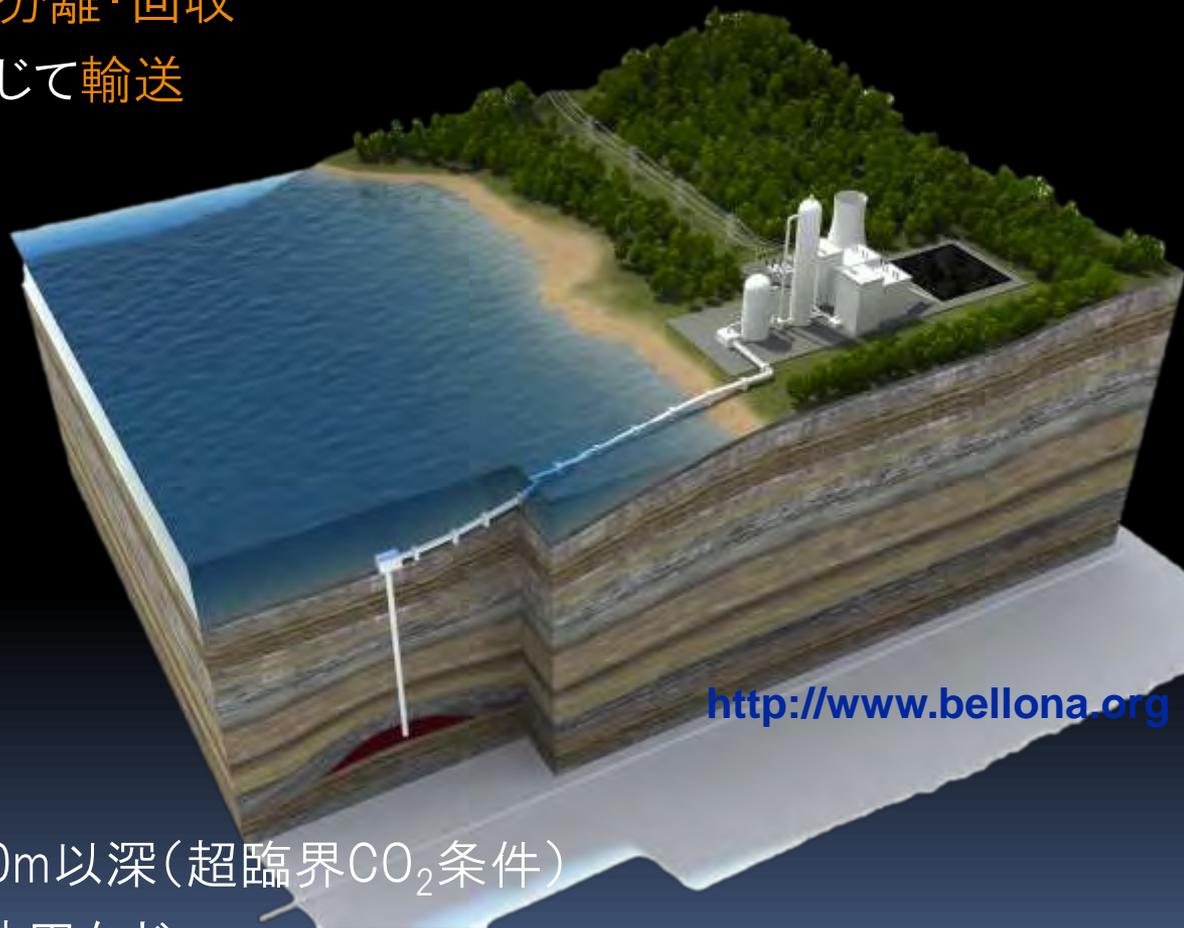
- 二酸化炭素の回収・貯留技術
- 数値シミュレーションの役割
- H22年度成果のご報告
 - 高度不均質性を有する貯留層内のCO₂挙動解析
 - 重力不安定性を考慮したCO₂の長期安定性の解析

二酸化炭素の回収・貯留

CCS: Carbon dioxide Capture and Storage

地球温暖化対策

- 火力発電所等の排ガスから分離・回収
- パイプラインや船舶などを通じて輸送
- 地中(あるいは海洋)に貯留



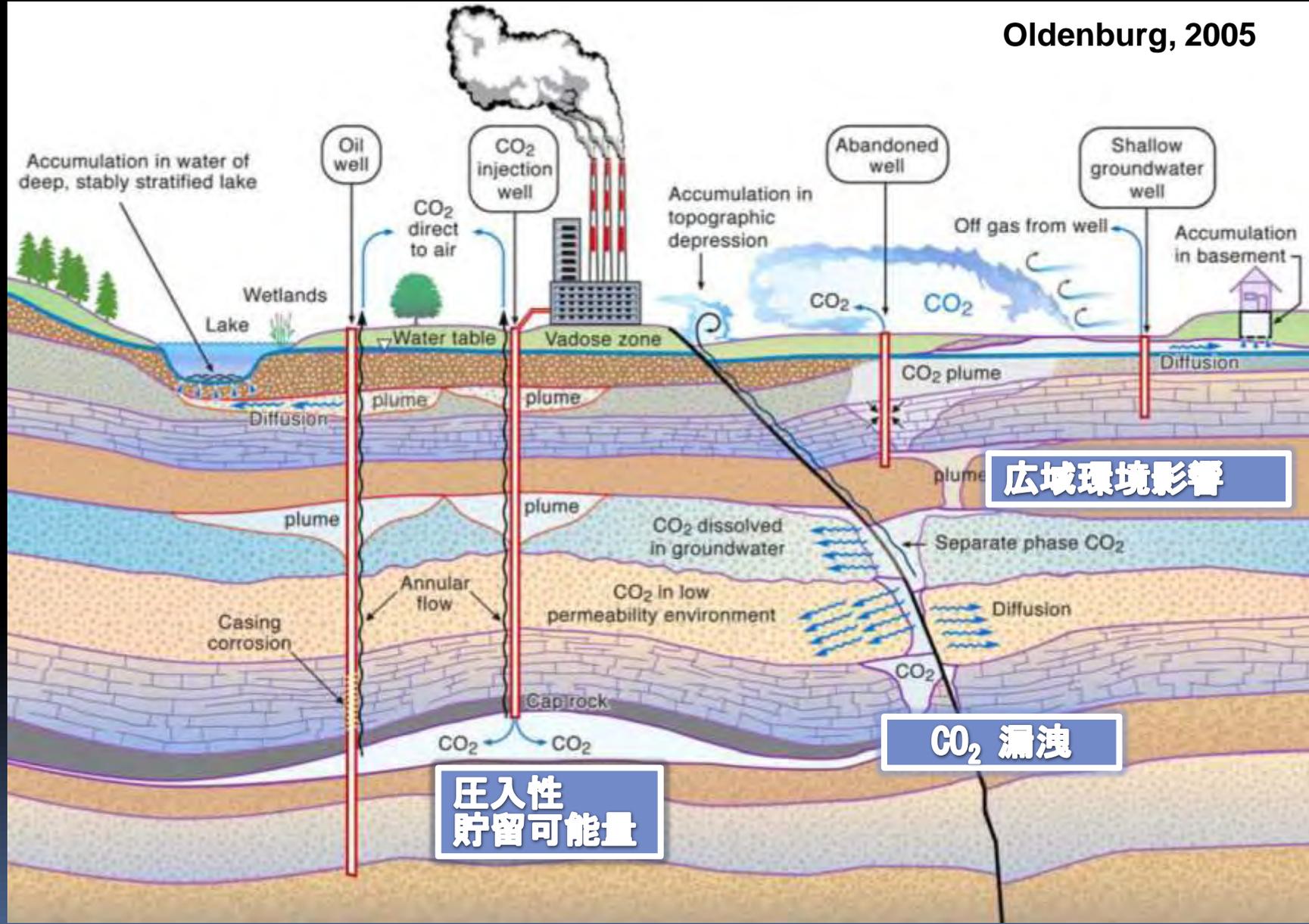
<http://www.bellona.org>

貯留層となりえる地層

- 泥岩層などで遮蔽、深さ800m以深(超臨界CO₂条件)
- 塩水帯水層、枯渇ガス田・油田など

CO₂ 地中貯留のリスク (帯水層貯留)

Oldenburg, 2005



広域環境影響

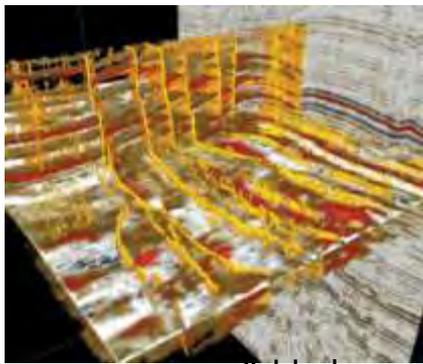
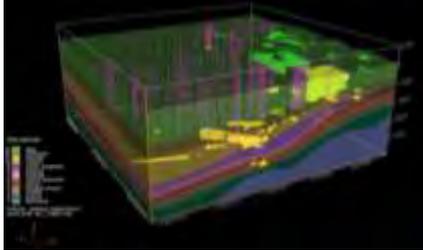
CO₂ 漏洩

圧入性
貯留可能量

CO₂地中貯留のシミュレーション

地質モデル

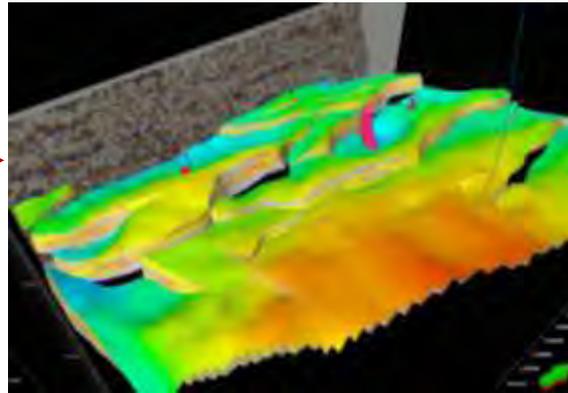
井戸検層、地震探査



©Schlumberger

シミュレーションモデル

- 貯留層
- 水理地質構造
- 地球化学、地盤力学 ...

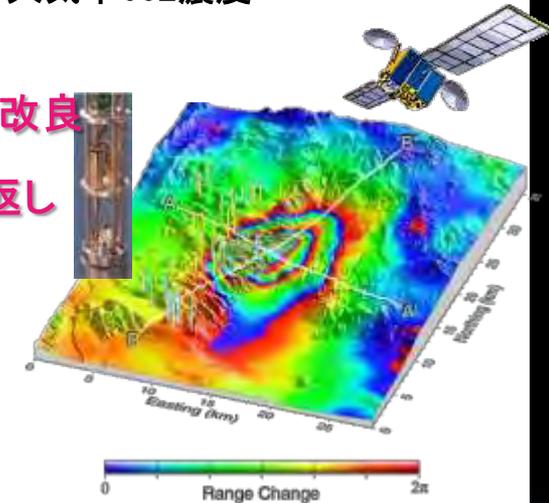


©Schlumberger

モニタリング

- 地震探査 (4D, VSP ...)
- 温度・圧力分布
- 地下水化学
- 地表面変形、誘発地震
- 微生物活動
- 大気中CO₂濃度...

モデル改良
繰り返シ



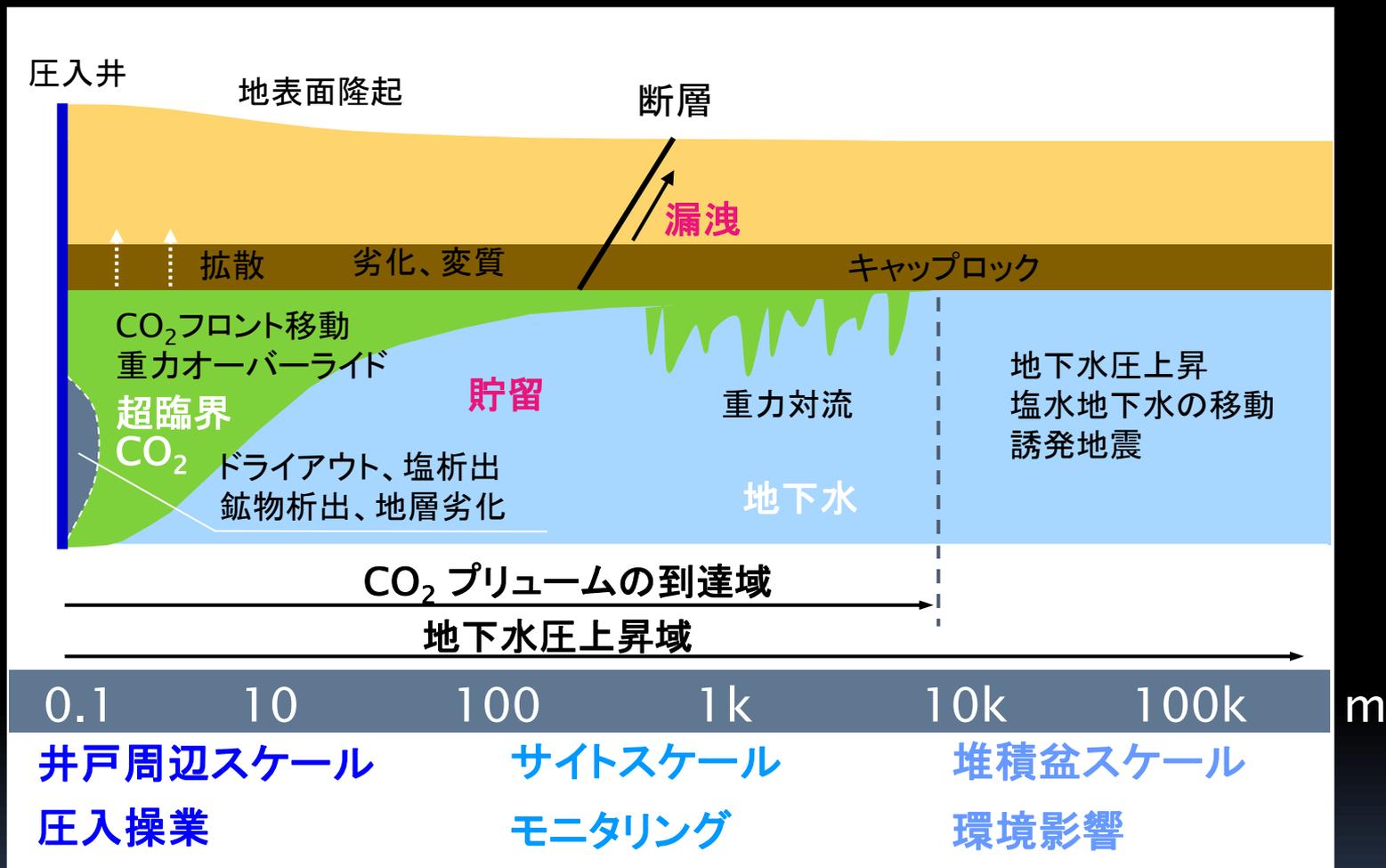
↓ 数値予測

貯留層の性能

周辺環境への影響

CO₂の長期的安定性

解析対象となる様々スケールの現象



- 多孔質・亀裂媒体中の非等温・多成分・多相系流体解析
 - 地盤の応力・変形解析
 - 地球化学反応解析
- } 流体との連成解析

長期の物理・化学連成プロセス

- 超臨界CO₂流体物性、地下水への溶解、岩石との化学反応、力学変形・破壊
- 100年～1000年以上

幅広いスケール間の相互作用

- 井戸近傍～サイト～堆積盆スケール
- 地層物性の高度な不均質性



1つのアプローチ： 大規模数値解析

1. 解析コードの高速化について
2. 高度不均質性を有する貯留層内のCO₂挙動解析
3. 重力不安定性を考慮したCO₂の長期安定性の解析

Aztec (Sandia National Lab.)



HPC-MW

スカラー計算機用
マトリクス格納形式: VBR形式
ベクトル長が短く、VOR向上に限界

ベクトル計算向きソルバー
マトリクス格納形式: JDS形式
ベクトル長を長くとれる

行列ソルバーのベクトル化率の大幅向上



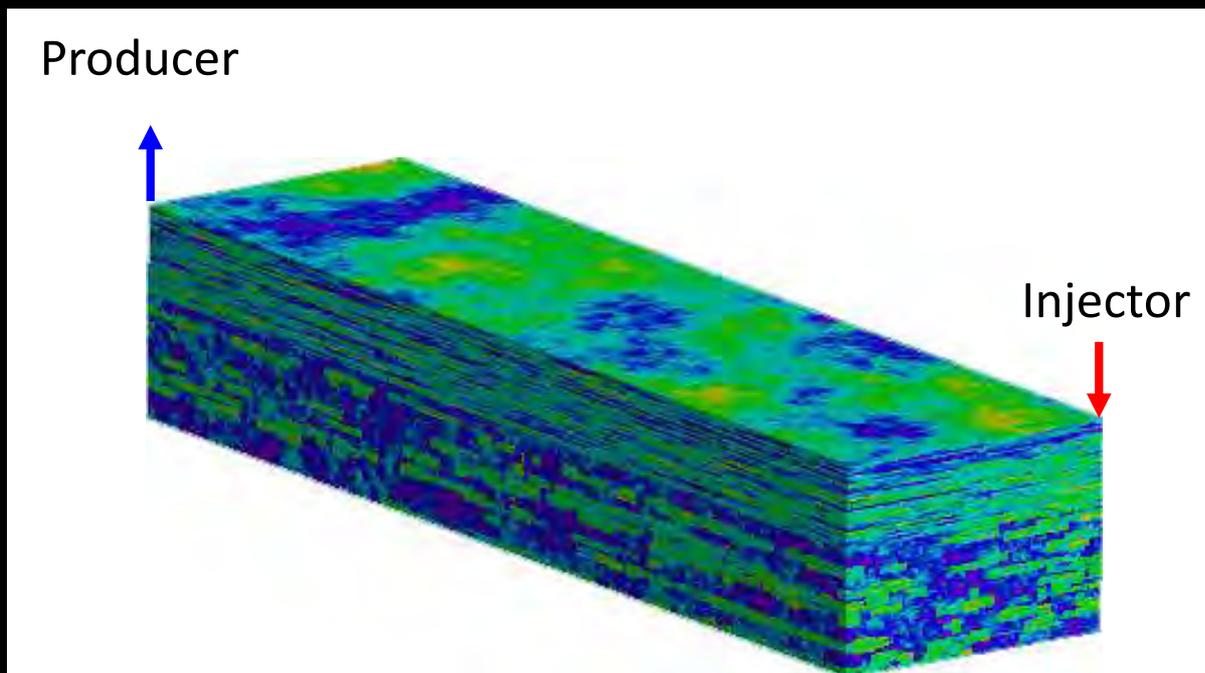
トータル性能: 当初より50倍以上の高速化

ベクトル化率 : 99.7%

並列化率 : 99.93%

- 疎行列反復法ソルバ部分に、地球シミュレータ用の反復法ソルバを実装
- 地球シミュレータ向けにベクトルチューニングを行い、演算性能を改善
- 並列計算性能(通信量・通信回数、ロードインバラス等)の分析を行い、通信性能を改善
- 飽和水蒸気圧の算出式をMin-Max近似し、計算量を削減
- I/O処理を簡略化するツールを作成し、I/Oの処理時間を削減

浸透性の大きく異なる砂と泥が重なり合った地層 SPE10 Model (Christie and Blunt, 2001)



6400m × 8800m × 170m

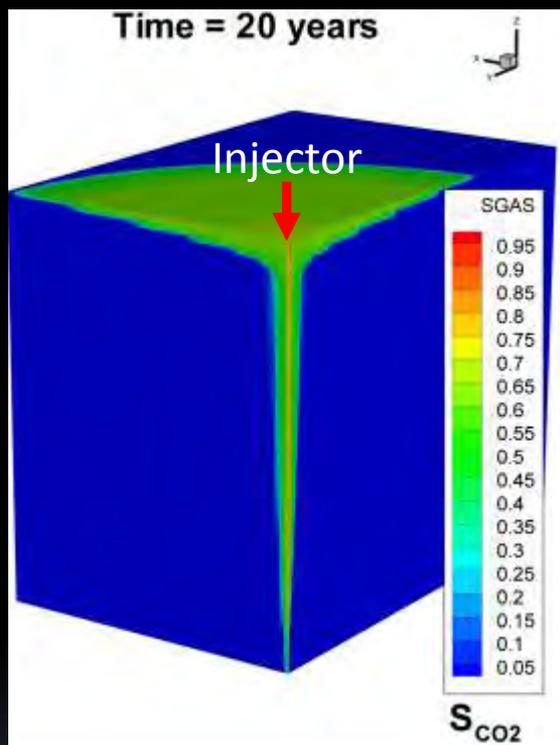
約100万格子 ($60 \times 220 \times 85 = 1.122 \times 10^6$)

不均質媒体中の二相流解析は計算に多くの時間を要することが多い。通常は平均化・粗視化することにより、計算負荷を低減する。

今回は、ESを用いてダイレクトに解析することを試みた。

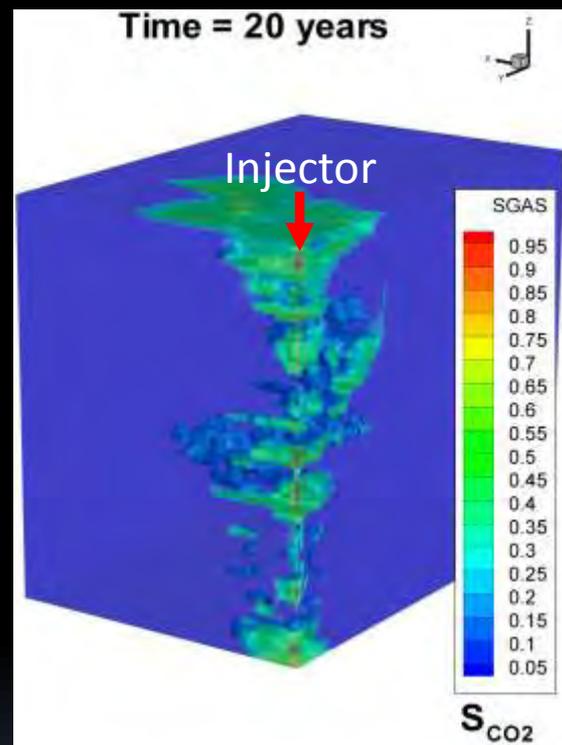
高度不均質貯留層内のCO₂挙動解析

均質モデル (平均化)



約3ノード時間
(約650ステップ)

不均質モデル (オリジナルSPE10)



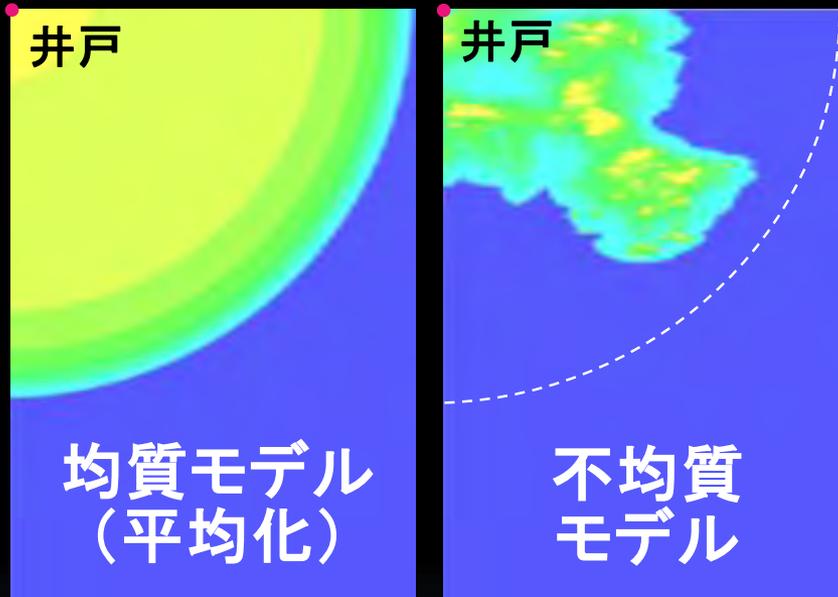
約900ノード時間
(約40,000ステップ)

計算時間
約300倍

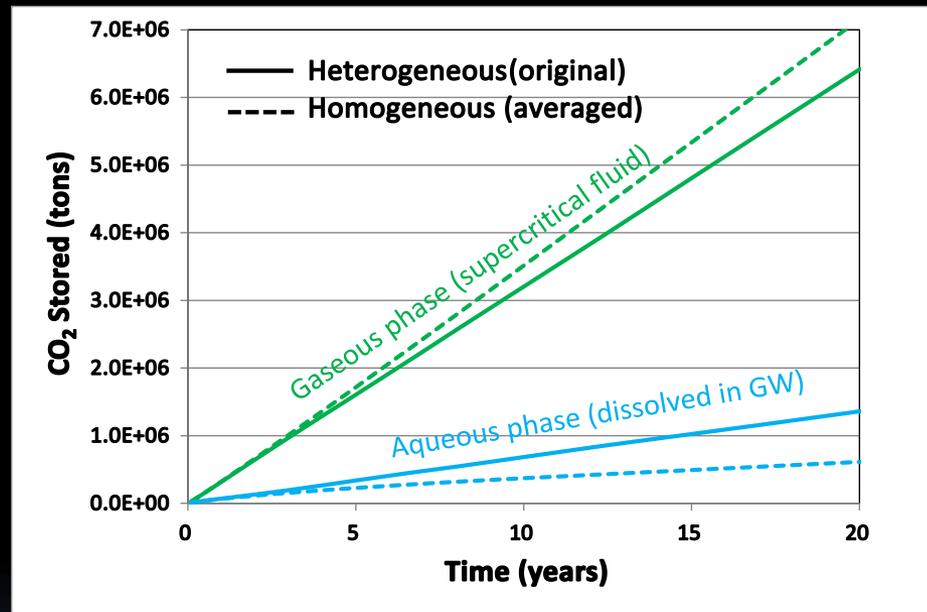


高度不均質場の二相流解析は多くの計算時間を要する

CO₂プルームの広がり (貯留層上面)



CO₂の貯留形態 (超臨界状態 vs 地下水溶解)



この場合※均質モデルは、

- CO₂の地下水中への溶解量を過小評価
- CO₂プルームの平面的広がりを過大評価

※不均質場の特性によって、今回の逆あるいは平均化の影響が小さい場合もある

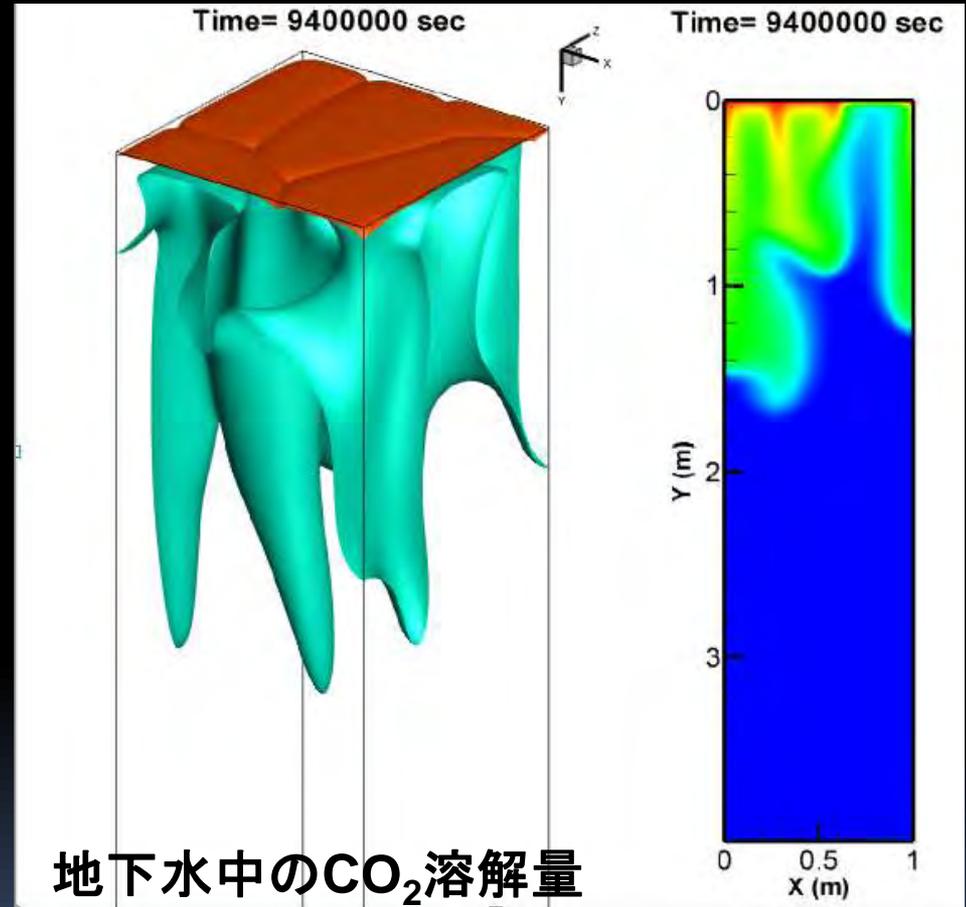
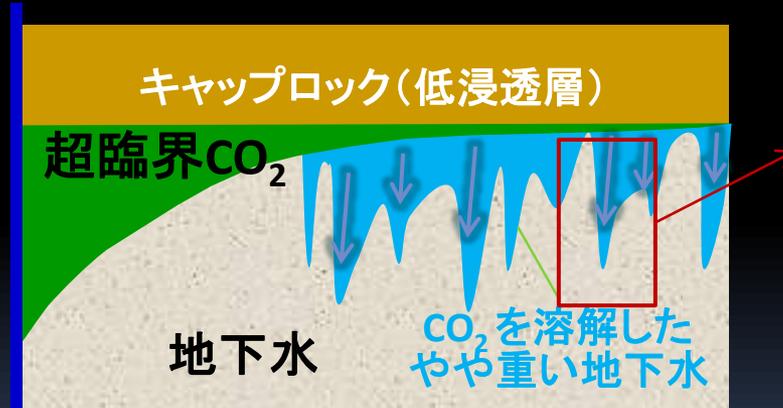
重力不安定性を考慮したCO₂の長期安定性の解析

局所モデル (約400万格子)
1m x 1m x 4m → dx=1cm

圧入井



圧入井



地下水中のCO₂溶解量

溶解・拡散・対流プロセス (Dissolution Diffusion Convection)

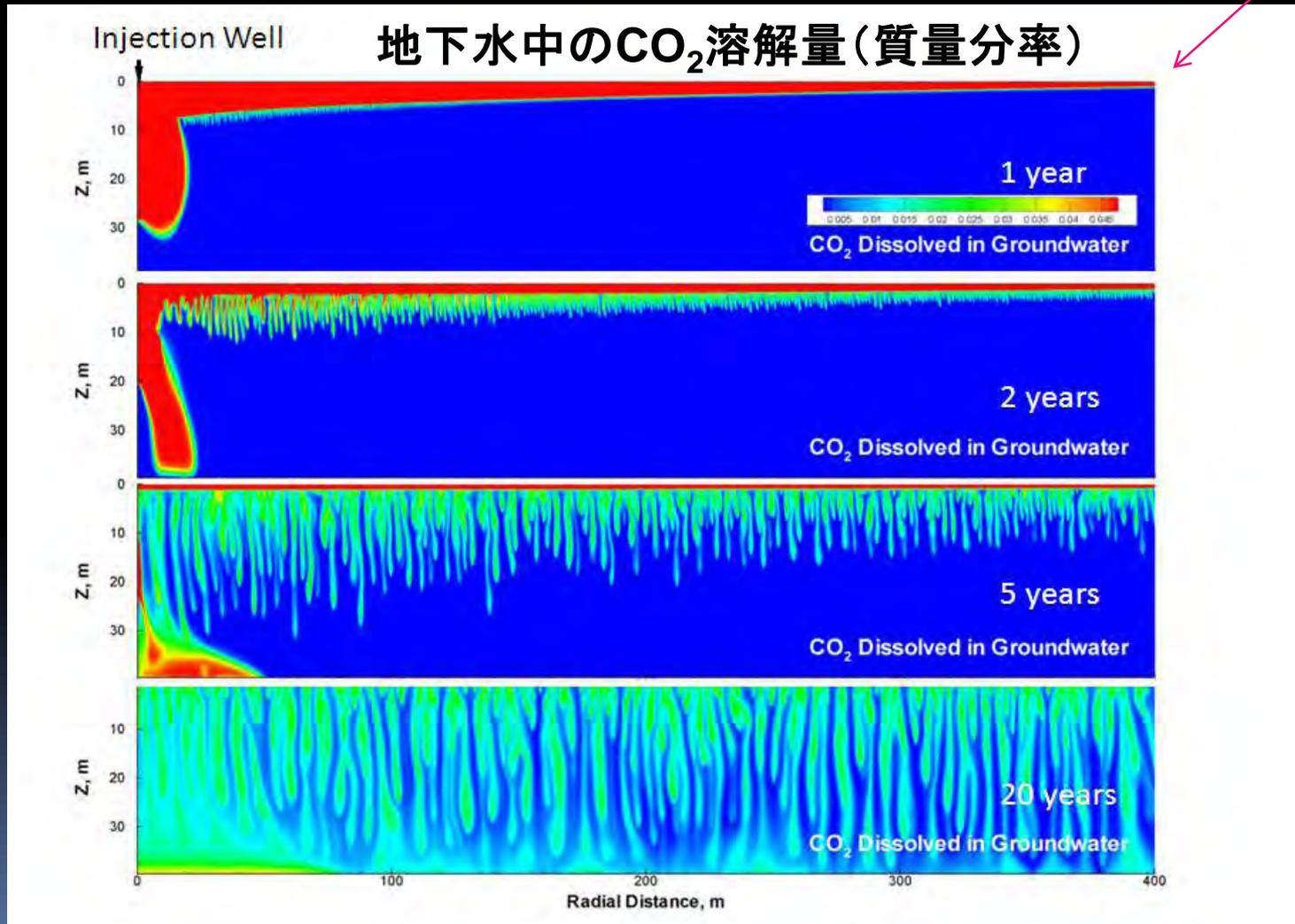
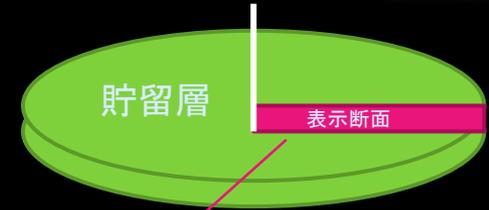
→ レイリー・テイラー不安定性 (Rayleigh-Taylor instability)

フィンガリングが地下水中への溶解を促進 → より安定した貯留形態へ

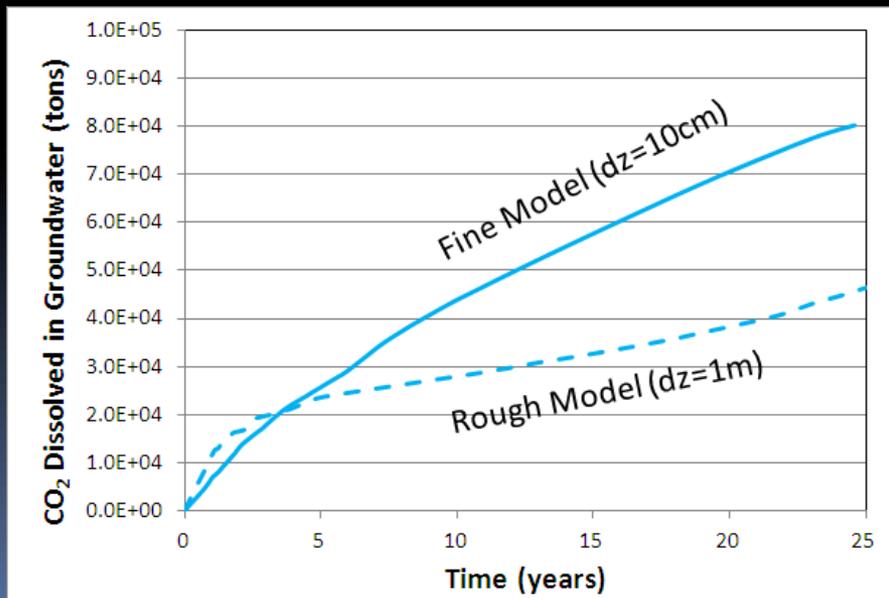
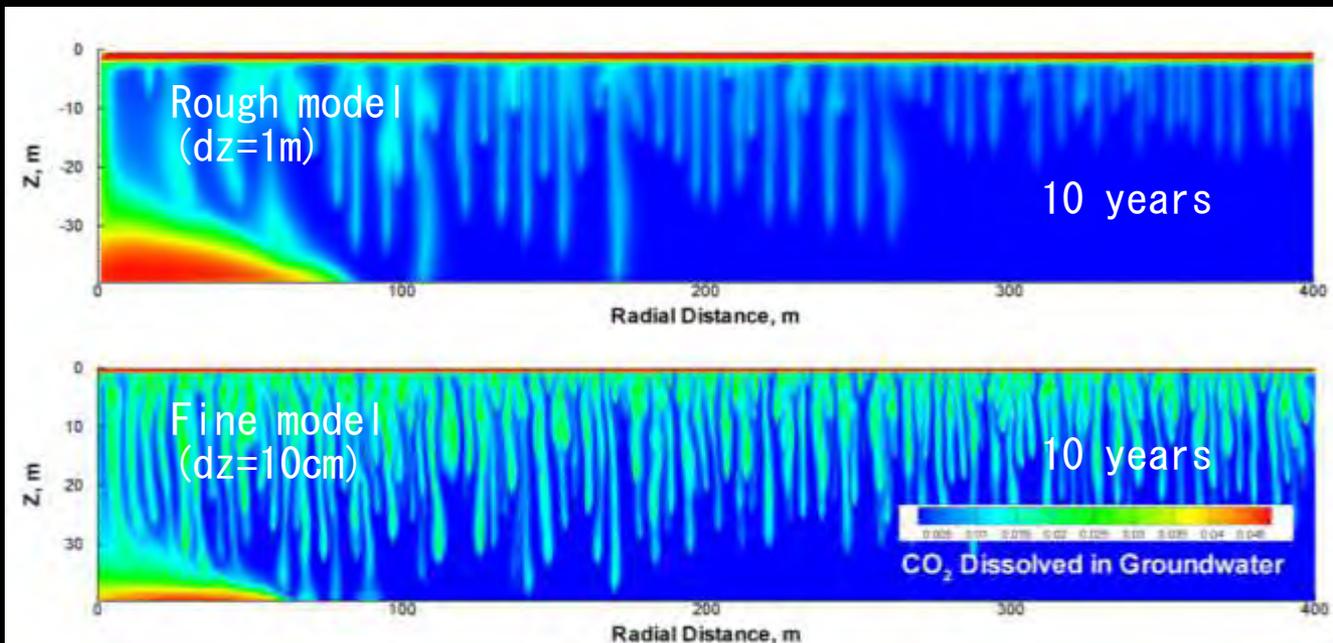
重力不安定性を考慮したCO₂の長期安定性の解析

予察シミュレーション(貯留層スケールモデル)

厚さ40m、半径10kmの軸対称モデル
格子間隔: dz=10cm, dx=20cm



格子間隔による地下水溶解量の違い



- 地層の不均質性や重力対流などの効果に関し、数値モデルの簡略化（平均化、格子間隔）が及ぼす、CO₂地中挙動の予測結果への影響を調べた。
- 高度不均質性を有する貯留層内のCO₂挙動解析
不均質媒体中の二相流解析は多大な計算時間を要することが多い。
均質化したモデルを用いれば計算時間を大幅に短縮されるが、CO₂の貯留効率や長期安定性を過大あるいは過小評価する。
- 重力不安定性を考慮したCO₂の長期安定性の解析
重力不安定性（レイリー・テイラー不安定性）を考慮すると、フィンガリングにより地下水へのCO₂の溶解が大きく促進される。
しかし、上記不安定性の計算には、cmオーダー以下の極微細な計算格子が必要になる。
- 上記のような不均質性や非線形性の強い問題を解くために地球シミュレータは有用である。より実用的には、求める計算精度と現実的な計算時間を考慮し、モデルや計算手法を簡略化する手法も必要である。その場合にも、地球シミュレータにより得られる高精度の計算結果はリファレンスとして価値が高い。

■ 東京湾ケーススタディー関連

- 論文 4件(査読付2件)
 - International Journal of Greenhouse Gas Control
 - 地盤工学会誌
 - 大成建設技術センター報
 - 土壌の物理性
- 学会発表
 - 9th Int. Conf. Greenhouse Gas Control Tech. (米国, ワシントンDC)

■ 米国WESTCARBプロジェクト関連

- 論文 4件(査読付1件)
 - International Journal of Greenhouse Gas Control
 - TOUGH Symposium 2009 (米国, バークレー)
 - 土木学会年次学術講演会、土木学会岩盤力学に関するシンポジウム

■ 講演(招待)

- AAPG/SEG/SPE Hedberg Research Conference (カナダ, バンクーバー)
- SciDAC2010 (米国、エネルギー省)、SHPCO2 (フランス、IFPほか共催)
- 第25回NEC-HPC研究会, 次世代スパコン産業利用促進セミナー,
- 土壌物理学会, 地盤工学会、情報処理学会, など

■ 受賞

- 平成22年度 地盤工学会賞(地盤環境賞)

ご清聴ありがとうございました

For a lively world

