

二酸化炭素地中貯留モデリングの国際比較研究 Sim-SEQ —事前予測シミュレーション—

大成建設(株) 技術センター 正会員 ○山本 肇

ローレンスバークレー国立研究所

Sumit Mukhopadhyay

1. はじめに

二酸化炭素回収貯留 (CCS) は、化石燃料を使用する火力発電所などから回収した CO_2 を地下深部の貯留層 (深度 1km 以深の砂岩層など) に圧入して地中貯留し、大気中への CO_2 排出を削減する地球温暖化対策である。 CO_2 の地中貯留にあたっては、操業中だけでなく操業完了後の長期 (100~1000 年以上) に渡り CO_2 の地中挙動を予測する必要があり、数値モデルによるシミュレーションが重要な方法になる。しかし、数値モデルは、作成者によって着目する物理化学プロセスや地質・水理データの解釈などの違いから、大きく異なる予測結果を導く場合がある。

Sim-SEQ¹⁾は、米国エネルギー省のイニシアチブのもと、複数のモデリングチームによる予測結果の相互比較を通じて、 CO_2 の地中挙動モデルに係る不確実性の程度や原因の理解を目指した国際共同研究プロジェクトであり、米国内外 8 か国の 15 チーム (表-1) が参加している。本稿では、米国・ミシシッピ州の試験サイト (S-3 サイト) を対象に、第一段階として実施中の CO_2 の地中挙動の事前予測シミュレーションについて、筆者らのモデリングの概要と複数チームによる予測結果の比較について簡単に報告する。

2. S-3 サイトにおける CO_2 地中挙動モデリング

1) S-3 サイトの概要

米国炭素隔離地域協力 SECARB では、米国ミシシッピ州の南西部において大規模な CO_2 圧入試験を実施中である。図-1 中に示す DAS (Detailed Area Study) サイトでは、白亜紀河川成砂岩である下部 Tuscaloosa 層 (深度 3300m) を CO_2 圧入対象の貯留層とし、圧入井 (F-1) と 2 本の観測井 (F-2, F-3; 圧入井の東側の各々 70m, 100m 地点) を掘削し、2009 年 4 月に開始した CO_2 圧入中の経時変化データ (圧力、温度、地層中の CO_2 飽和度など) を取得している。

2) 解析モデル

上述の通り、Sim-SEQ では複数のチームが独立に数値モデルを構築しており、概念モデルや使用している数値解析コード (表-1) は様々である (詳細は Mukhopadhyay ら^{1), 3)}を参照されたい)。ここでは、大成建設チームが構築した数値モデルについてのみ簡単に述べる。

数値解析には、積分差分法による多孔質・亀裂媒体中の非等温・多成分・多相流体解析コードである TOUGH2-MP を用い、超臨界 CO_2 - 水 - NaCl の 3 成分 2 相系の EOS モジュール ECO2N を用いた。

モデル化領域は、圧入井 F-1 を中心とした半径 1.2km の貯留層とし、図-2 の解析格子を構築した。貯留層の上面起伏は、図-1 の標高データを用い、層厚 24.8m を 50 レイヤーに均等に分割した。平面方向はボロノイ分割²⁾し、格子間隔を圧入井と観測井周辺で最小 20cm まで詳細化し、外縁へ向けて徐々に粗くした (格子数 223,901)。

上下面境界は不透水境界とし、側面は圧力固定境界とした。初期条件は、圧入開始前の計測データに基づき、圧力: 約 32MPa (静水圧)、

表-1 参加チームと解析コード

No	Organization/Institution	Name of Software/Model
1.	Bureau of Economic Geology, USA	CMG-GEM
2.	BRGM, France	TOUGH2/Petrel
3.	Geological Storage Consultants, USA	Not available
4.	Imperial College, UK	Eclipse
5.	Institute of Crustal Dynamics, China	CCS_MULTIF
6.	Lawrence Berkeley National Laboratory, USA	TOUGH2-ECO2N
7.	Pacific Northwest National Laboratory, USA	STOMP-CO2E
8.	RIITE, Japan	TOUGH2-ECO2N
9.	Sandia National Laboratory, USA	Not available
10.	UFZ, Germany	OpenGeoSys
11.	Shell (China) Innovation and R&D Center	MoReS
12.	Taisei Corporation, Japan	TOUGH2-MP/ECO2N
13.	Uni Research, Norway	VESA
14.	University of Stuttgart, Germany	DUMUX
15.	University of Utah, USA	STOMP-CO2E

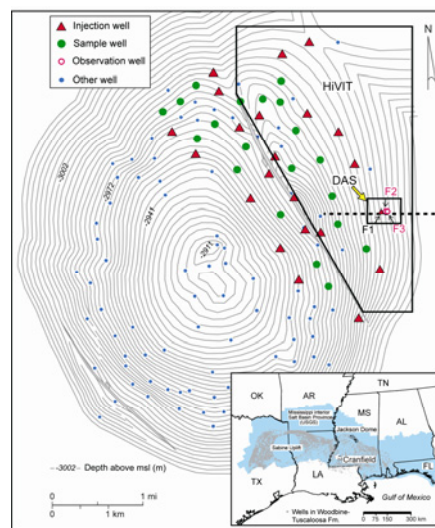


図-1 対象サイト¹⁾

キーワード 二酸化炭素, CCS, 数値モデル, 不確実性

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株)技術センター TEL045-814-7237

温度:100℃, 地下水中に溶存する塩分濃度:139,800 ppm, 同 CO₂ 濃度:855ppm とした。CO₂ 圧入レートは, 実測の変動レートを適用し, 総圧入量は約 11 万 t である。

有効孔隙率と絶対浸透率は, 観測井 F-3 で取得されたコア試験データ (図-3) に基づき, 深度ごとに異なる値を解析格子の各層に与えた。本貯留層は河川堆積物で側方への激しい岩相変化が予想されるが, 上記の仮定は水理物性値の側方への完全な連続性を仮定していることに相当しており, 今回のモデリングにおける最大の不確実性要因になっている。相対浸透率と毛管圧力は vanGenuchten モデルで表現した。

3) 解析結果

圧入開始から 1 年後の CO₂ 飽和度の分布を図-4(a)に示す。CO₂ は貯留層の中部と下部に存在する高浸透性ゾーン中 (図-3) を選択的に広がっている。層下部により中部の移動が卓越しているのは, 超臨界 CO₂ と地下水の密度差による浮力効果である。観測井 F2 と F3 での CO₂ 飽和度の変化を図-4(b)に示す。CO₂ の到達時間は各々 8.8 日, 21.8 日と計算される。

3. 複数チームの結果比較

解析結果のうち, 観測井 F2 と F3 への CO₂ 到達時間を他チームと比較した結果³⁾を表-2に示す。全体として F2 で 8~36 日, F3 で 18~94 日と予測に大きな差があることが分かる。実測の到達時間は 11 日 (F2) と 16 日 (F3) であった。CO₂ の移行速度は, 貯留層モデルの有効孔隙率や浸透率の値や分布の不均質性などによって大きな影響を受ける。PNNL の計算結果に見られる幅は, 貯留層の浸透率や孔隙率を地球統計学による確率的試行 (10 ケース) によるものであり, 同一の概念モデルにおいても 2 倍以上の差があることが分かる。その他, 詳細な分析は文献 1), 3)を参照されたい。

4. まとめ

本稿では, 米国ミシシッピ州の CO₂ 大規模圧入試験を対象に実施中の CO₂ 地中貯留モデリングの国際比較研究を紹介した。今回は事前の予測解析であったが, 今後は観測データに基づくキャリブレーション等によるモデル改良を行ない, 不確実性の低減を図る予定である。

参考文献

- 1) Mukhopadhyay, S. et al., Comparison of Selected Flow Models of the S-3 Site in the Sim-SEQ Project *Transport in Porous Media* (submitted)
- 2) Lu, J. et al., Reservoir characterization and complications for trapping mechanisms at Cranfield CO₂ injection site, *International Journal of Greenhouse Gas Control* (in press).
- 3) Mukhopadhyay, S. et al., 2012, Model Comparison and Uncertainty Quantification for Geologic Carbon Storage: The Sim-SEQ Initiative, Proceedings of 11th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-11), Kyoto, Japan, November 18th - 22nd, 2012.
- 4) Yamamoto, H. and C. Doughty, Investigation of gridding effects for numerical simulation of CO₂ geologic sequestrations, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 5, pp.975-985, 2011.

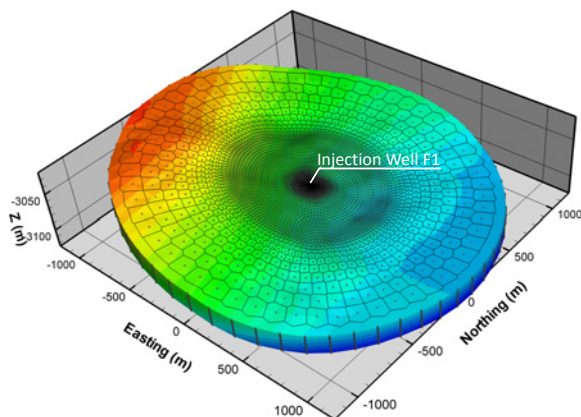


図-2 解析格子 (ポロノイ分割、色は標高値)

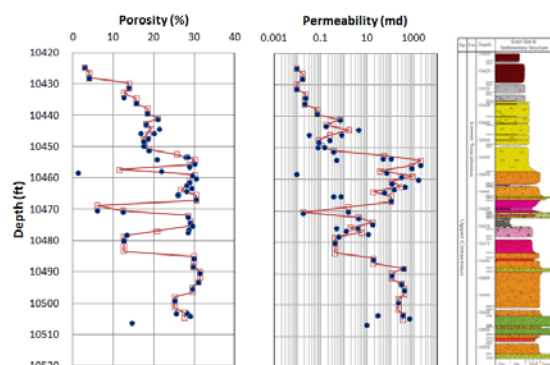
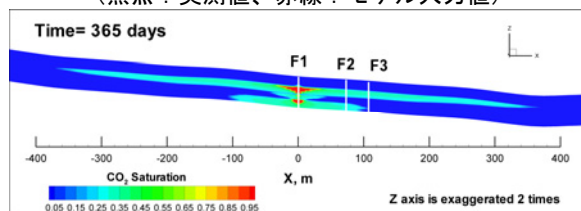
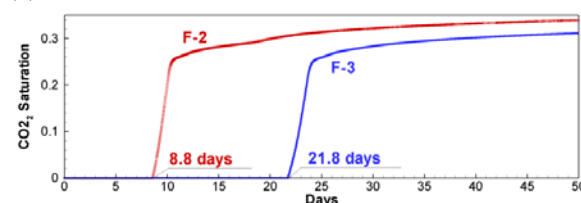


図-3 観測井 F-3 内の岩相、孔隙率、浸透率²⁾
(黒点: 実測値、赤線: モデル入力値)



(a) CO₂ 飽和度の分布 (圧入井と観測井を通る鉛直断面)



(b) 観測井 F2 および F3 における CO₂ 飽和度の経時変化
図-4 解析結果

表-2 複数チームの結果比較³⁾

Team	Scheme (Spatial Distribution of Permeability/Porosity)	CO ₂ Arrival Time at Well F2 (Days)	CO ₂ Arrival Time at Well F3 (Days)
LBNL	Layering	19	53
PNNL	Zonation/Random/ SGSIM	8-14	19-53
Shell	Sequential Indicator	19	39
Taisei	Layering	9	22
URN	Homogeneous	27	65
ICL	Layering	36	94
Observed		11	16

URN: Uni Research, Norway; ICL: Imperial College London, UK