

二酸化炭素の地中挙動解析における 格子形状・解像度の影響検討

ーカリフォルニア州の実証試験の事例からー

山本 肇^{1*}・Christine Doughty²

¹大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²Lawrence Berkeley National Laboratory (One Cyclotron Road, Berkeley, California, USA)

*E-mail: hajime.yamamoto@sakura.taisei.co.jp

二酸化炭素回収・貯留は、火力発電所や製鉄所などの工場からの排気ガスに含まれる二酸化炭素 (CO₂) を分離・回収し、パイプラインなどを通じて輸送し、地中あるいは海洋などに貯留する技術であり、地球温暖化対策の切り札の一つと考えられている。著者らは、米国カリフォルニア州において計画中のCO₂地下貯留の実証試験 (年間25万 t のCO₂を地下深度2kmの塩水帯水層へ4年間連続圧入) を対象とし、CO₂の地中挙動や固定化機構に関する予測シミュレーションを実施している。今回、圧入したCO₂ブリュームの形状や広がり、井戸近傍の現象 (塩水がCO₂ガスに蒸発して生じる塩析出など) に関して、地層モデルを離散化する際の解析格子の形状や解像度 (格子分割数) の影響を検討した事例を報告する。

Key Words : carbon dioxide, numerical simulation, grid resolution, Voronoi discretization

1. はじめに

二酸化炭素回収・貯留 (CCS : carbon dioxide capture and storage) は、火力発電所や製鉄所などの工場からの排気ガスに含まれる二酸化炭素 (CO₂) を分離・回収し、船舶やパイプラインなどを通じて輸送し、地中あるいは海洋などに貯留 (固定化) する技術であり、地球温暖化対策の切り札の一つと考えられている。米国炭素隔離地域パートナーシップWESTCARBでは、カリフォルニア州のKimberlinaサイトにおいて、年間25万 t のCO₂を地下深度2kmの塩水帯水層へ4年間連続圧入する実証試験を計画している。著者らは、上記の実証試験を対象に、CO₂の地中での挙動や固定化機構に関して予測シミュレーションを実施している^{1,2)}。本稿では、特に、地下におけるCO₂ブリュームの広がりや移動方向、あるいは井戸近傍で生じる塩析出などの現象に着目し、地層モデルを離散化する際の解析格子の形状や解像度 (格子分割数) による解析結果への影響を検討した事例を示す。

2. 実証試験サイトの概要

米国炭素隔離地域パートナーシップWESTCARBでは、カリフォルニア州南部で建設予定の純酸素燃焼式のKimberlina火力発電所 (50MW) のサイト内において、年間25万 t のCO₂を地下深度2kmの塩水帯水層へ4年間連

続圧入する実証試験を計画している (図-1)。このサイトは、カリフォルニア州において最大の貯留可能容量を有すると推定されるCentral Valleyの堆積盆に位置しており、本実証試験で得られる知見は、同堆積盆での地下貯留プロジェクトに幅広く適用可能と考えられる。

CO₂の圧入対象となる貯留層は、Vedder層と呼ばれる高浸透性の砂岩/泥岩互層である。CO₂は、圧力7.38MPa、温度31℃以上の温度・圧力で超臨界流体となり、気体と液体の中間的な物理化学的性質 (粘性、密度など) を示す。気体よりも密度が大きく、液体よりも粘性が小さい超臨界の状態での圧入の方が、貯留効率や安全性の面で有利と考えられている。超臨界状態のCO₂密度は0.5~0.8 g/cm³であり、地下水中で浮力が働くが、貯留層の上部に泥 (岩) 層などの遮蔽層が存在すれば、CO₂を貯留層内に長期間留めることが可能と考えられている。本サイトにおいては、Vedder層を覆う低浸透性の泥岩 (Freeman-Jewett層) が、CO₂の漏洩を防ぐ遮蔽層として働くものと期待される。

3. 解析モデル

(1) 数値解析コード

数値解析コードには、積分差分法による多成分・多相系の流体解析コードTOUGH2³⁾の並列化バージョン (複数CPUによる並列計算が可能) TOUGH2-MP⁴⁾を用

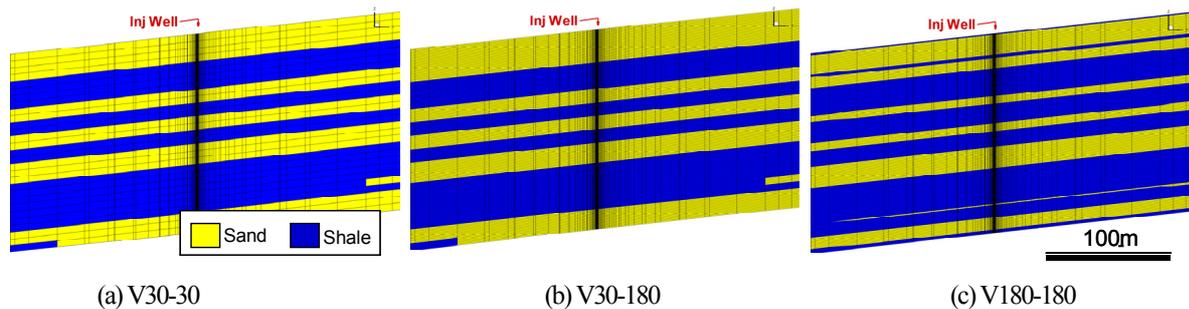


図4 解析格子の鉛直断面図 (圧入井を通る東西断面, 井戸近傍のみを拡大して表示)

(3) 解析条件

初期状態として, 帯水層上面の間隙水圧を井戸地点で 220 bar に設定し, 温度は 81°C, 塩分濃度 50,000 mg/L を仮定する. 解析に用いた物性値を表-2 に示す. 境界条件は, 上下面と東西側面を no-flow 境界とし, 南北側面のみを圧力などの状態固定境界とした. なお, 後述する井戸近傍の塩析出に伴う浸透性変化は今回は考慮しない.

表-1 用いた解析格子

Model	Grid type	Geologic Layers	TOUGH2 Layers	Number of Elements	Number of Connections
R30-30*	Rectangular	30	30	63,360	185,208
V30-30	Voronoi	30	30	73,170	289,221
V30-180	Voronoi	30	180	439,020	1,747,521
V180-180	Voronoi	180	180	439,020	1,747,521

* Doughty(2009)

表-2 解析に用いた物性値

Property		Sand	Shale
Porosity	n	28%	15%
Horizontal permeability	$k_{x,y}$	200md	0.1md
Vertical permeability	k_z	20md	0.01md
Relative permeability parameters			
Residual liquid saturation	S_{lr}	0.2	0.3
van Genuchten parameter	m	0.457*	0.457*
Capillary pressure parameters			
Capillary pressure strength	P_0	1.88×10^4 Pa	8.41×10^5 Pa
van Genuchten parameter	m	0.412	0.412

* 0.917 is adopted in Doughty(2009)

4. 解析結果

(1) 基本ケース

岩相モデル、解析格子とも詳細化している V180-180 格子を用いて計算した, 圧入開始から 4 年後の CO_2 飽和度, 水相中の CO_2 と NaCl 濃度, 固相飽和度 (塩析出量) を図-5 に示す. ここで, CO_2 飽和度とは岩石の間隙中、 CO_2 が占める体積と間隙の体積の比率である. 固相飽和度も同様に, 初期の間隙体積に対して新たに生成した固相 (今回は塩のみ) の体積比を示す. 図中の白線は砂岩と頁岩層の境界線である. 圧入開始後, CO_2 は圧力勾配によって井戸から放射状に広がるが, 超臨界 CO_2 の密度は地下水よりも小さいため (今回の温度・圧力条件では約 0.6

g/cm^3) 浮力が作用する. 図-5a の鉛直断面上の CO_2 飽和度分布を見ると, CO_2 のプルームはすり鉢状を呈しながら, 貯留層上面 (遮蔽層) の傾斜 (約 7°) に沿って上

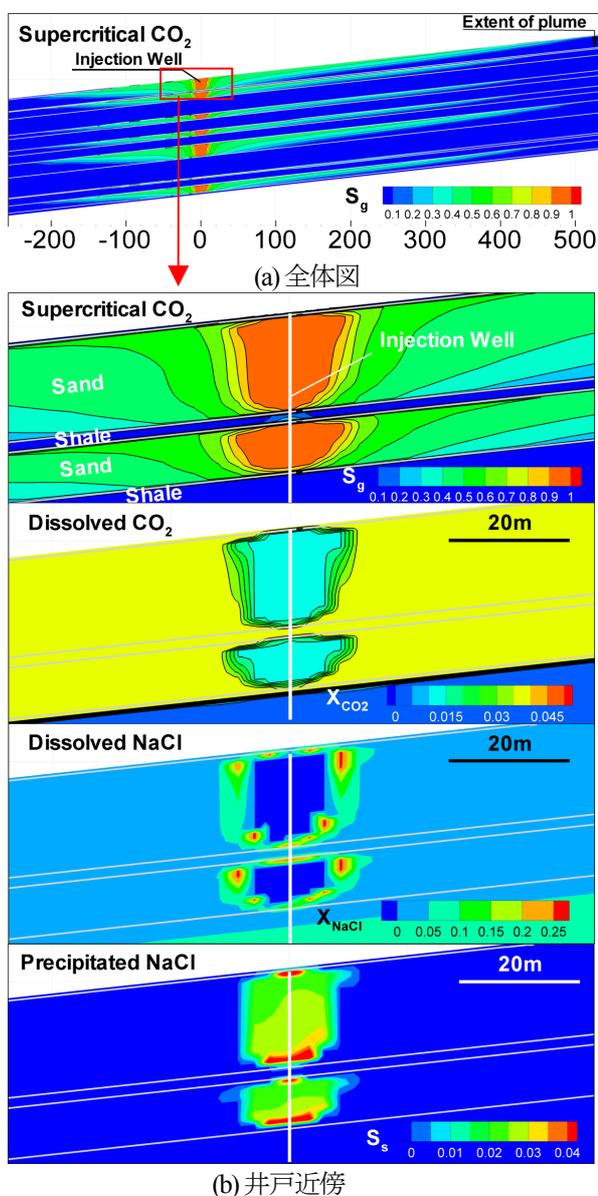
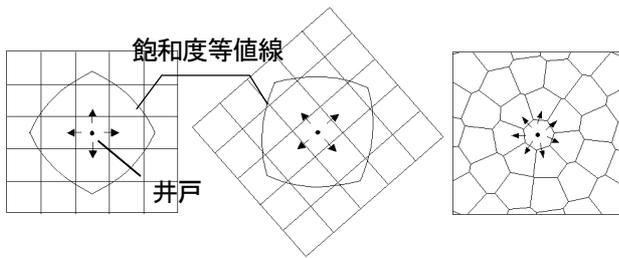
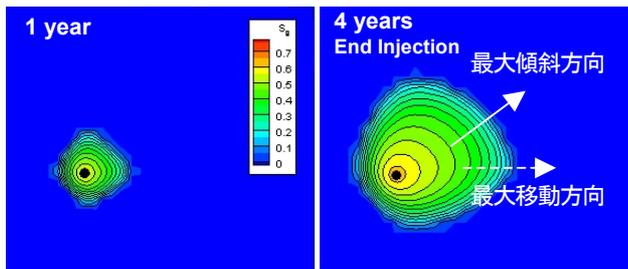


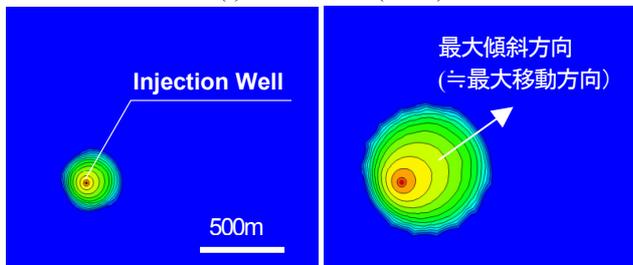
図-5 基本ケース (V180-180 格子) による解析結果 (圧入井を通る東西断面. 圧入開始から 4 年後. S_g : CO_2 飽和度, X_{CO_2} , X_{NaCl} : 各々, 水相中における CO_2 と NaCl の質量分率, S_s : 固相飽和度)



(a) 平行格子 (b) 対角格子 (c) 多角形ボロノイ格子
 図-6 矩形格子での形状効果とボロノイ格子



(a) 矩形格子¹⁾ (図-3a)



(b) 多角形ボロノイ格子 (図-3b)

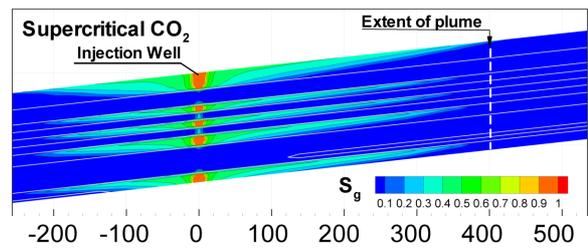
図-7 格子形状による CO₂挙動の予測結果の違い
 (モデルの最上面での CO₂飽和度分布)

方に移動するのが分かる。浮力の作用によって、CO₂プルームが地下水の楔状に乗り上げる現象は、重力オーバーライド (gravity override) と呼ばれている (後述)。

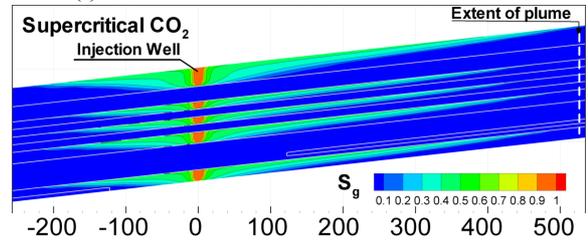
(2) 格子形状効果

今回のように、地下水で満たされた地層中に、井戸から別の流体 (ガスなど) を圧入する二相流問題を5点差分スキームの有限差分法で解析する場合、格子に沿った二相フロント移動が強調され、図-6の二つの矩形格子 (平行格子と対角格子) では、計算結果 (例として図中の飽和度等値線) が異なることが良く知られている。これは「格子形状効果」と呼ばれ、石油開発工学の分野で1970年代から指摘されており、二相流体の易動度比 (mobility ratio) が大きいほど格子方向へのフロント移動が強調される⁷⁾。また、この効果は、9点差分スキームなどにより低減できることが知られている⁸⁾。

TOUGH2は積分差分法であり、非構造格子を用いることができるが、隣接する格子点間を結ぶ直線が格子面と直交するボロノイ格子を使用することが計算精度上望ましい。最も単純なボロノイ格子といえる矩形格子を用い



(a) 鉛直方向の格子分割数=30 (V30-30)



(b) 鉛直方向の格子分割数=180 (V30-180)

図-8 鉛直方向の格子分割数による予測結果の違い
 (圧入井を通る鉛直断面上での CO₂飽和度分布)

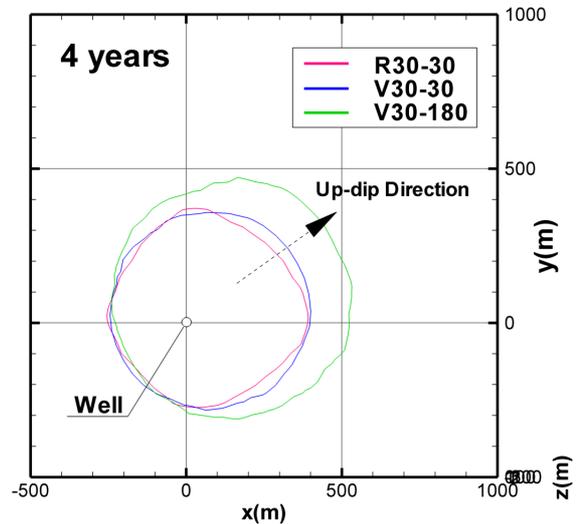


図-9 二相フロント形状の比較 (モデルの最上面における $S_g=10\%$ のコンター線)

ると通常の5点差分スキームの有限差分法と同等となり、格子形状効果が顕著に現れる。しかし、高次多角形のボロノイ格子であれば、例えば、正八角形であれば9点差分と同様になるため、格子形状効果を低減できるものと考えられる。

矩形格子 (R30-30) とボロノイ格子 (V30-30) の解析結果の比較を図-7に示す。今回の解析モデルでは、砂層に等方で均質な水理物性を与えているため、浮力の作用によるCO₂の移動は地層の最大傾斜方向に沿って生じるはずである。しかし、図-7aに示したように、矩形格子では、格子方向の移動が強調され、CO₂プルームの最大移動方向と貯留層上面の最大傾斜方向が明らかに異なる。一方、ボロノイ格子の場合 (同図b) には、両者がほぼ一致する。この結果から、ボロノイ格子は格子形状効果を低減する上で有効であることが確認される。

(3) 格子解像度の効果

重力オーバーライドは、密度の小さい流体が密度の大きい流体の上に乗る現象であり、CO₂の最大移行距離や貯留効率（貯留後に地層の空隙中に占めるCO₂の割合）に影響を与えるため、貯留性能や漏洩経路を検討する上で重要な要因の一つである。オーバーライドの程度は、2つの流体の密度比や粘性比が大きく、地層の浸透率が高く、圧入速度が遅いほど大きくなる。

数値解析での鉛直方向の格子分割数が少ないと、重力オーバーライドを過小評価することが良く知られている⁷⁾。今回の解析結果のうち、岩相モデルが同じで鉛直方向の格子分割数のみを変えたV30-30とV30-180の比較を図-8と図-9に示す。これらの図から、鉛直方向の格子分割数が少ないV30-30による解析結果は、分割数の多いV30-180と比べて、（地層の最大傾斜方向に沿った）CO₂の最大移行距離を約30%過小評価している（図中の白破線）。移行距離の差は、傾斜した地層の上方向で著しく、下方向での違いは比較的目立たない。

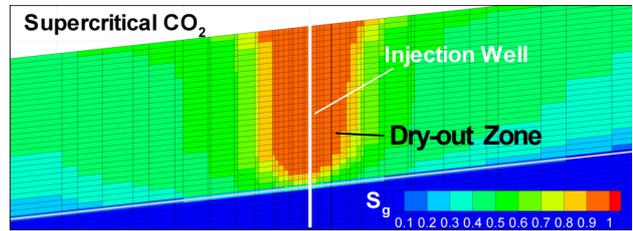
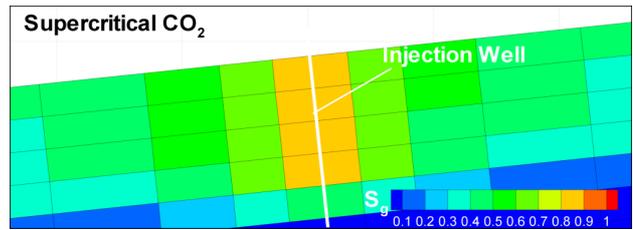
(4) 井戸近傍の現象

井戸近傍の解析結果への格子分割数の影響（R30-30とV30-180）を図-10に示す。図-10aを見ると、V30-180（井戸近傍を詳細化したボロノイ格子）の方が、R30-30（格子間隔5m一定の矩形格子）に比べて、CO₂飽和度分布がよりシャープに計算されていることが分かる。

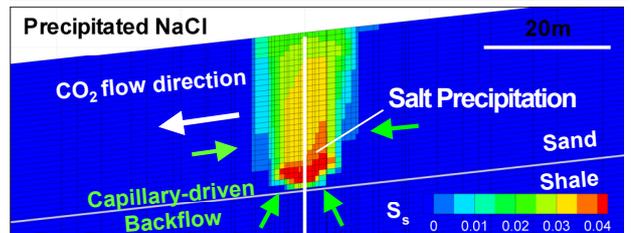
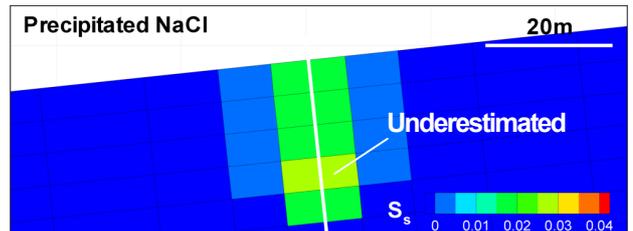
CO₂を塩水帯水層に圧入すると、圧入井周辺で塩水系地下水がCO₂中に蒸発し、ドライアウトゾーン（dry-out zone）が形成される^{2), 9), 10)}。地層の空隙中で塩（NaCl）の析出が多量に生じると、地層の空隙率や浸透率が低下して、圧入操作を困難にする恐れがある。

今回の解析での井戸近傍の塩析出力（固相飽和度）を図-10bに示す。まず、格子が粗いR30-30の場合、一つの格子の体積が大きいため、井戸周辺のCO₂飽和度の上昇が緩慢となり、塩析出力の過小評価が生じる²⁾。一方、格子が細かいV30-180では、圧入区間の下部領域での塩析出力が明瞭に示されており、この部分での空隙率ならびに浸透率の低下が懸念される。

圧入区間の下部領域で塩析出力が卓越する理由は次のように考えられる。塩の析出は、通常、CO₂と水が接触する二相フロント付近で生じる。重力オーバーライドの効果により貯留層上部にCO₂が選択的に流れる経路が形成されると、貯留層下部のCO₂流速が低下して二相フロントが停滞し、一定の位置で塩が析出し続けるため、塩の固相飽和度が上昇しやすい⁹⁾。加えて、capillary-driven flow（井戸周辺の不飽和部と周辺の地下水飽和部との毛管圧力差によって生じる地下水流れ）による泥岩からの塩水供給があると、塩析出力はさらに増加する。



(a) CO₂飽和度（上：R30-30, 下：V30-180）



(b) 固相（塩）飽和度（上：R30-30, 下：V30-180）

図-10 格子分割による井戸近傍の解析結果の違い（圧入井を通る東西方向の鉛直断面図）

塩析出による浸透率低下に対する工学的対策として、CO₂圧入に先立ち、塩分濃度の低い水圧入を行うことにより貯留層中の塩水系地下水をフラッシュし、塩析出を防止する方法が考えられる⁹⁾。ただし、砂泥互層の場合、浸透率の低い泥岩中の塩水系地下水を短時間にフラッシュできないため、長期的に泥層からの塩分供給による塩析出を完全に避けることが難しい可能性がある。

(5) 岩相分布の解像度による影響

高解像度の（格子数の多い）解析格子を用いると、岩相分布をより詳細に解析に反映できる。今回の場合では、図-4のbとcに示したように、岩相モデルを簡略化することにより、薄い泥層の存在や連続性の情報が失われる。しかし、今回の解析結果の場合に限れば、図-5aと図-8bに示すように、岩相モデルの解像度の違いは大局的なCO₂挙動に大きく影響していないように見える。今回の結果にかかわらず、一般的に不均質な岩相分布の表現は非常に重要な不確実性要因であり、今後も引き続き検討していく予定である。

5. まとめ

米国で計画中のCO₂地下貯留の実証試験を対象としたCO₂地中挙動解析を実施し、解析格子の形状や解像度(格子分割数)による予測結果の違いを検討した。その結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 本解析のように、対象とする流体(CO₂と水)の易動度比が大きいと、格子コネクション方向への二相フロントの移動が強調され、「格子形状効果」が顕著となる。ボロノイ格子は矩形格子に比べて格子形状効果を低減する上で有効であることを確認した。
- 2) 二相流体の密度や粘性の差が大きい場合、重力オーバーライドが生じやすい。重力オーバーライドの数値解析では、鉛直方向の格子分割数を十分に確保する必要がある。今回の検討結果では、格子分割数が不十分な場合、CO₂プルームの最大移動距離を30%以上過小評価する場合が見られた。
- 3) 塩水帯水層へのCO₂圧入では、地下水がCO₂ガスに蒸発して塩が析出し、井戸近傍の空隙率や浸透性が大きく低下する可能性がある。その評価にあたり、井戸周辺の格子分割数が少ないと塩析出量を過小評価する場合がある。

本研究で用いた高解像度のボロノイ格子は、CO₂地下挙動解析において、モデル離散化による不確実性を低減する上で、実用的で有効性が高いことを確認した。今後は、地球シミュレータなどを用いた高解像度シミュレーション¹¹⁾や、実際のCO₂圧入時のデータとの比較検討を実施していきたい。

謝辞：地質モデルをご提供いただいたローレンスリバモア国立研究所のJeff Wagoner氏、研究の実施にご助力いただいた大成建設(株)の今村聡氏、青木智幸氏、小川豊和氏、ローレンスバークレー国立研究所のLarry Myer氏、Curt Oldenburg氏、Keni Zhang氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Doughty, C., Investigation of CO₂ plume behavior for a large-scale pilot test of geologic carbon storage in a saline formation, *Transport in Porous Media*, doi:10.1007/s11242-009-9396-z, 2009.
- 2) Yamamoto, H. and C. Doughty, Investigation of gridding effects for numerical simulation of CO₂ geologic sequestration, *Proceedings of TOUGH Symposium 2009*, 2009.
- 3) Pruess, K., C. Oldenburg, and G. Moridis, TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Rep. LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 1999.
- 4) Zhang, K., Y.S. Wu, and K. Pruess, User's Guide for TOUGH2-MP, Rep. LBNL-315E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2008.
- 5) Pruess, K. and N. Spycher, ECO2N – A fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO₂ storage in saline aquifers, *Energy Convers. Manage.*, 48(6), pp.1761-1767, 2007.
- 6) Wagoner, J., 3D geologic modeling of the southern San Joaquin basin for the Westcarb Kimberlina demonstration project – a status report. Rep. LLNL-TR-410813. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 2009.
- 7) Aziz, K. and A. Settari, *Petroleum Reservoir Simulation*, Applied Science Publishers, London, 1979.
- 8) Doughty, C. and K. Pruess, Modeling supercritical carbon dioxide injection in heterogeneous porous media, *Vadose Zone Journal*, 3, 837-847, 2004.
- 9) Pruess, K. and N. Müller, Formation dry-out from CO₂ injection into saline aquifers: 1. Effects of solids precipitation and their mitigation, *Water Resour. Res.*, 45, W03402, doi:10.1029/2008WR007101, 2009.
- 10) Pruess, K., Formation dry-out from CO₂ injection into saline aquifers: 2. Analytical model for salt precipitation, *Water Resour. Res.*, 45, W03403, doi:10.1029/2008WR007102, 2009.
- 11) Yamamoto, H., K. Zhang, K. Karasaki, A. Marui, H. Uehara, and N. Nishikawa, Numerical investigation concerning the impact of CO₂ geologic storage on regional groundwater flow, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 3, pp. 586-599, 2009.

INVESTGATION OF GRIDDING EFFECTS FOR NUMERICAL SIMULATION OF CO₂ INJECTION IN GEOLOGIC FORMATIONS – AN EXAMPLE FROM CENTRAL VALLEY, CALIFORNIA–

Hajime YAMAMOTO and Christine DOUGHTY

Numerical simulation of CO₂ geologic sequestration at the WESTCARB Phase III pilot test, in which a large-volume of CO₂ will be injected in a saline formation in California's Central Valley, was performed to predict CO₂ plume migration and trapping mechanisms. In this study, uncertainties due to gridding effects in terms of grid shape and resolution are investigated using high-resolution models with Voronoi discretization. Our results indicate that (1) high-order Voronoi discretization significantly reduces grid-orientation effects; (2) Coarse grids considerably underestimate gravity override, and thus the maximum lateral extent of CO₂ plumes is also underestimated to a few tens of percent for our cases; (3) A fine grid resolution in the vicinity of the injection well may be needed to simulate near-well phenomena. Salt precipitation associated with formation dry-out could be highly underestimated by the use of coarse grids.