

## 二酸化炭素の地中挙動解析における格子形状効果について

### —ボロノイ格子と矩形格子の比較—

大成建設 (株) 技術センター 正会員 ○山本 肇

#### 1. はじめに

差分法による多相流の数値解析では、格子形状によって異なる解析結果が得られること(格子形状効果; grid orientation effect)が良く知られている。本稿では、二酸化炭素の地下貯留のシミュレーションを対象に、高次多角形のボロノイ格子により形状効果の低減を試みた結果を報告する。

#### 2. 二酸化炭素の地中挙動解析

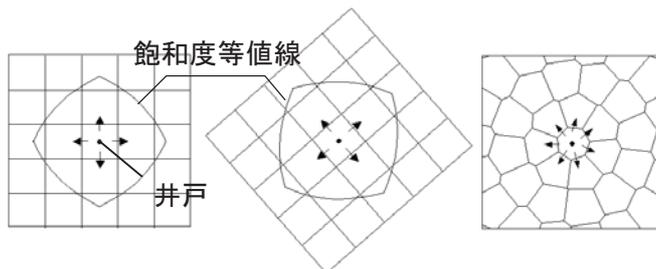
二酸化炭素地下貯留は、火力発電所や製鉄所などの排出ガスから CO<sub>2</sub> を回収し、地下深部の地層中に圧入する地中温暖化対策である。その実用化にあたり、圧入後の CO<sub>2</sub> の地中挙動を正確に予測・把握する技術の確立が重要な課題となる。CO<sub>2</sub> は温度・圧力条件から超臨界状態となる地下約 1km 以深に貯留される。そこで、CO<sub>2</sub> の地中挙動解析では、温度・圧力に対して敏感に変化する超臨界 CO<sub>2</sub> の流体物性(密度や粘性など)や、水と CO<sub>2</sub> の相互作用(二相流特性、溶解など)をモデル化した多成分・多相系の流体解析コードを使用する必要がある。これまでに開発されたコードの多くは差分法であり、本研究では、積分差分法による解析コード TOUGH2 ECO2N<sup>1),2),3)</sup>を用いている。積分差分法は、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。なお、最も単純なボロノイ格子といえる矩形格子を採用した場合には、通常の5点差分スキームの有限差分法と同等となる。

#### 3. 格子形状効果

例えば、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有限差分法で解析する場合を考える。このとき、図-1の二つの矩形格子(平行格子と対角格子)では、計算結果(例えば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)が大きいほど著しい<sup>4)</sup>。明らかな流れの主方向があれば、その方向に合わせて格子を回転すれば良いが、井戸周りや水理的な異方性や不均一性がある場合には、主方向を設定することは難しい。この形状効果は、9点差分スキームや2点風上法などにより低減できるが、計算の負荷も大きくなる。本研究では、非構造格子を使用可能な積分差分法コードである TOUGH2 の特徴を生かし、高次多角形のボロノイ格子による形状効果の低減について検討した。

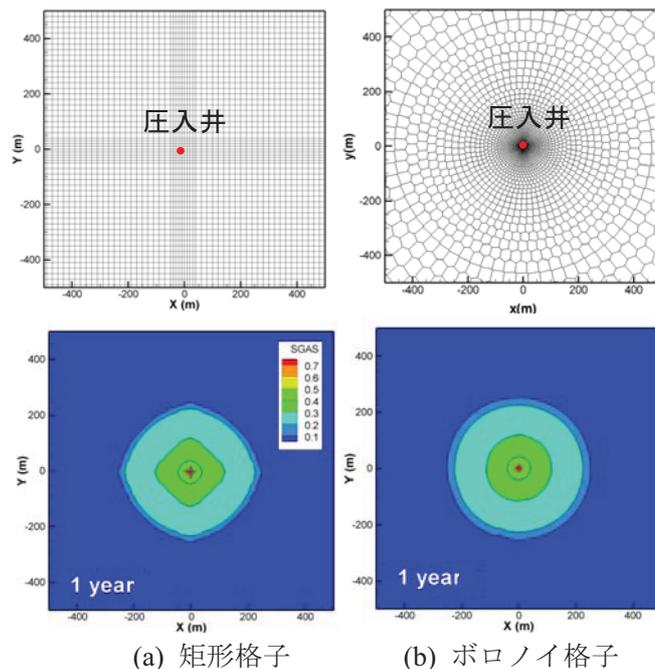
#### 3. ボロノイ格子と矩形格子の比較

簡単な条件で二酸化炭素の地下圧入解析を行い、矩形格子(四角形)とボロノイ格子(高次多角形)の格子形状効果を比較する。解析では、深度1km相当(温度45°C、圧力10MPa)の水平な帯水層(広さ10km×10km、厚さ1m)の中央に圧入井を設定し、超臨界CO<sub>2</sub>を0.52(kg/s)の速度で圧入した。境界条件は、上下面



(a) 平行格子 (b) 対角格子 (c) ボロノイ格子

図-1 矩形格子での形状効果とボロノイ格子



(a) 矩形格子 (b) ボロノイ格子

図-2 格子によるCO<sub>2</sub>飽和度の分布形状の違い

キーワード CO<sub>2</sub>地下貯留, 多相流, ボロノイ格子, 格子形状, 地下水

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設 (株) 技術センター TEL 045-814-7237

を閉鎖境界，側面を固定境界とした．地層物性は，有効空隙率：40%，絶対浸透率：100md（ミリダルシー）とした．圧入開始から1年後のCO<sub>2</sub>飽和度の計算結果を図-2に示す．この図から，(a)の矩形格子ではCO<sub>2</sub>飽和度分布が四角形状になっているのに比べて，(b)のポロノイ格子では，真円形の分布が得られ，解析結果における見かけの異方性が十分に低減されていることが分かる．

4. 実サイトへの適用例

米国の西海岸炭素隔離地域協力 WESTCARB では，カリフォルニア州の Kimberlina において年間 25 万 t の CO<sub>2</sub> を 4 年間連続圧入する商業規模実証試験を計画している<sup>5), 6)</sup>．試験サイト周辺の石油・ガス田のボーリングデータから構築した 3 次元地質モデル<sup>5)</sup>を図-3に示す．図中，CO<sub>2</sub>圧入対象層である Vedder 層は，深度約 2.3km，厚さ約 160m の砂・泥岩互層である（圧力 約 22MPa，温度 80℃）．この Vedder 層のうち，最上部の砂岩層（厚さ約 27m）に約 8.2 万 t/年の速度で圧入した CO<sub>2</sub> の地中挙動の解析結果を図-4 と図-5 に示す．浸透率などの計算用パラメータは，Doughty ら<sup>6)</sup>とほぼ同様とした．貯留層の砂岩層とそれを覆う遮蔽層である泥岩層の絶対浸透率は，水平方向で各々 200md，0.01md（鉛直方向はその 1/10）である．圧入開始後，CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> の密度は地下水よりも小さい（今回の温度・圧力条件では約 0.6 g/cm<sup>3</sup>）ため，CO<sub>2</sub> のプルームには浮力も作用する．従って，図-4 の鉛直断面上で見ると，CO<sub>2</sub> 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°）に沿って上方に移動するのが分かる．図-5 に示す貯留層上面の CO<sub>2</sub> 飽和度の分布を見ると，同図 a の矩形格子の場合には CO<sub>2</sub> の最大移動方向が貯留層上面の最大傾斜方向と異なるのに対して，同図 b のポロノイ格子の場合には，両者がほぼ一致する．

5. まとめ

- 1) 井戸からの CO<sub>2</sub> 圧入挙動を矩形格子（5 点差分法）で解析する場合，格子方向の影響が不可避である．
- 2) 積分差分法では，高次多角形のポロノイ格子を用いることにより，格子方向性の影響を十分に低減できる．

謝辞：解析用データをご提供いただいたローレンスバークレー国立研究所の C. Doughty 氏，C. Oldenburg 氏，ローレンスリバモア国立研究所の J. Wagoner 氏に感謝いたします．

参考文献：1) Pruess, K. et al., 1999. TOUGH2 user's guide. Version 2.0. LBNL Report. LBNL-43134. 2) Pruess, K. ECO2N: A TOUGH2 fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO<sub>2</sub>, 2005. LBNL Report, LBNL-57952. 3) Yamamoto, H. et al., 2009, Numerical investigation for the impact of CO<sub>2</sub> geologic sequestration on regional groundwater flow, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, (in press). 4) Aziz, K., Settari, A., 1979, Petroleum Reservoir Simulation, Applied. Science Publishers, London. 5) Wagoner, J., 2007. Update on the geologic model of the Kimberlina Area, *Westcarb Annual Business Meeting*, Seattle, WA, Nov. 28, 2007. 6) Doughty, C. et al., 2008. Predictions of long-term behavior of a large-volume pilot test for CO<sub>2</sub> geological storage in a saline formation in the Central Valley, California, *Energy Procedia*, Vol.1 (Proc. 9th Int. Conf. Greenhouse Gas Control Tech.), pp.3291-3298.

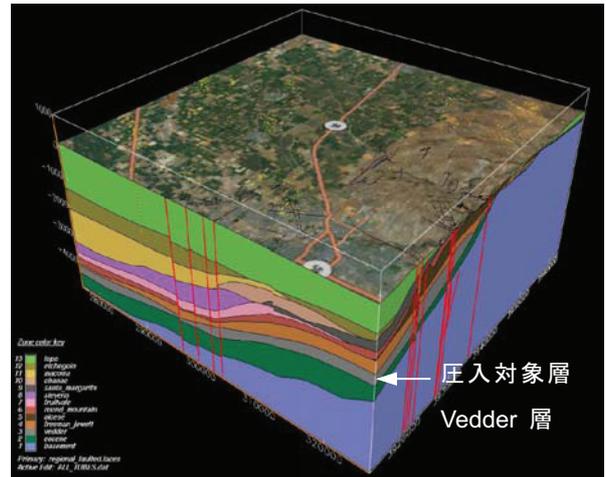


図-3 実証試験サイトの3次元地質モデル<sup>5)</sup>

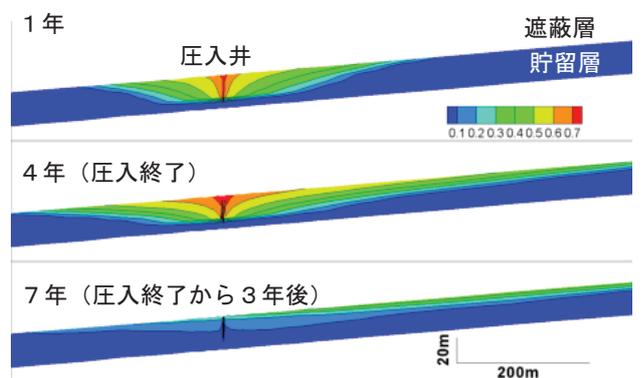
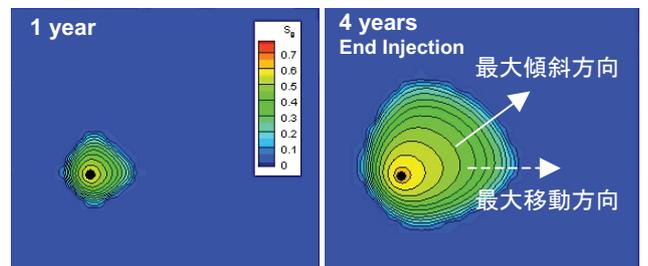
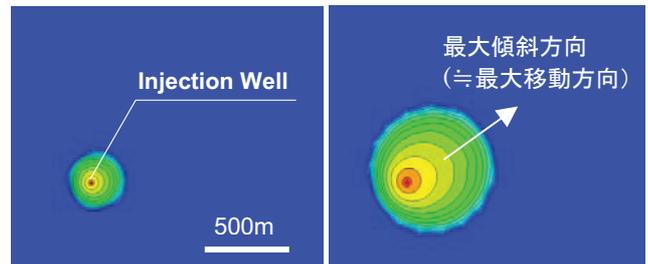


図-4 CO<sub>2</sub> 地中挙動（鉛直断面上の CO<sub>2</sub> 飽和度）



(a) 矩形格子<sup>6)</sup>



(b)ポロノイ格子（高次多角形）

図-5 格子形状による CO<sub>2</sub> 挙動の予測結果の違い（貯留層上面での CO<sub>2</sub> 飽和度分布）