

二酸化炭素地下貯留による周辺環境影響の予測シミュレーション

プロジェクト責任者

山本 肇 大成建設株式会社 技術センター

著 者

山本 肇^{*1}、七井 慎一^{*1}、Keni Zhang^{*2}、丸井 敦尚^{*3}、上原 均^{*4}、西川 憲明^{*4}

* 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

* 3 独立行政法人産業技術総合研究所

* 4 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 19 年 7 月 10 日～平成 20 年 3 月 31 日

アブストラクト

二酸化炭素の地下貯留技術とは、地球温暖化対策の一つとして、製鉄プラントや火力発電所から排出される二酸化炭素ガスを、地下深部（約 1km 以深）の地層中に圧入するというものである。本技術の実用化にあたり、社会的受容の観点からも、圧入後の二酸化炭素の地下挙動を正確にシミュレートし、副作用として生じる可能性のある環境影響リスクを正確に予測する技術の確立が重要な課題になる。そのためには、地表近傍～地下深部数 km、平面的に数 10～数 100km の広大な領域を対象とした大規模シミュレーション技術が必要になると考えられる。本研究の目的は、関東地方南部を対象に地形や地層構造、地下水の圧力、温度、水質などの情報を反映した高精度の広域地下水流動モデルを構築し、二酸化炭素の圧入により生じる広域地下水流動系への影響を検討することである。今回、地球シミュレータを用い、1000 万グリッド規模の二酸化炭素の圧入シミュレーションを実施した。その結果、地球シミュレータによる大規模解析は、二酸化炭素の局所的な地中挙動と広域的な環境影響を総合的に検討する上で有効であることが分かった。

キーワード： 大規模シミュレーション、二酸化炭素、地球温暖化、環境影響、地下水

1. 目的

地球温暖化対策の一つとして、製鉄プラントや火力発電所から排出される二酸化炭素ガスを、地下深部の地層中に圧入するという、二酸化炭素の地下貯留が国内外で認知されつつある¹⁾。その実用化にあたっては、社会的受容の観点からも、圧入後の二酸化炭素の地下挙動を正確にシミュレートし、副作用として生じる可能性のある環境影響リスクを正確に予測する技術の確立が重要な課題になる。わが国で考えられている二酸化炭素の帯水層貯留は、自然水圧を保持している天然の帯水層（地下水を保持している浸透性の高い地層）に対して、二酸化炭素を連続的かつ大規模に圧入するものであり、圧入される二酸化炭素量は、1 地点あたり年間 100 万トンを超えると予想される。二酸化炭素をパー

ジンの帯水層へ圧入すると、相当量の地下水が帯水層から排除されることになる。排除された地下水は深部から浅部へと移動し、生活圏を含む広域の地下水の流動形態や水質を変化させる可能性がある。既往の研究では、二酸化炭素ガスの地中挙動のみに焦点を当てた研究が行われているが、周辺の地下水に与える環境影響については、十分な検討はなされていない。本研究は、圧入された二酸化炭素が及ぼす広域地下水流動場を含む周辺環境への影響を高精度で評価する技術の開発を目指している。

本プロジェクトの初年度である本年度は、地球シミュレータでプログラムを実行するための準備期間として、申請プログラムの最適化を主に行った。そして、128 ノード (1024AP) にて、1000 万グリッド規模の予備解析を実施した。以下、その結果を報告する。

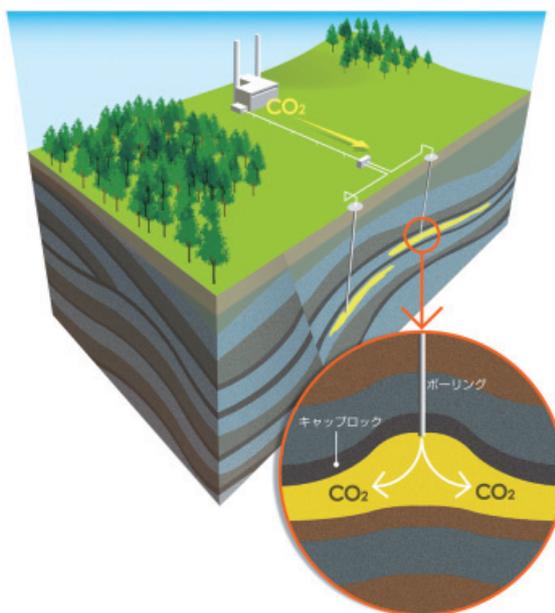


図-1 二酸化炭素の地下貯留の概念

2. 解析手法

2-1 解析コード

二酸化炭素は地下深部約 1km に圧入するのが安全面、効率面において最適と考えられているが、その温度・圧力条件下において二酸化炭素は超臨界状態となる。超臨界状態の二酸化炭素の密度や粘性は、温度・圧力に対して敏感に変化する。また、水と二酸化炭素の相互作用（溶解、混相流特性）も考慮する必要がある。本研究では、二酸化炭素の物理化学・流動特性をモデル化した地下流体シミュレータ TOUGH2²⁾ の並列化バージョンである TOUGH2-MP³⁾ を用いる。

2-2 支配方程式

閉境界 G_n に囲まれた体積 V_n に対して積分された次式のエネルギー・質量保存則は次式で表される。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^{\kappa} dV_n = \int_{\Gamma_n} \mathbf{F}^{\kappa} \cdot \mathbf{n} d\Gamma_n + \int_{V_n} q^{\kappa} dV_n \quad (1)$$

ここに、 M^{κ} :成分 κ の単位体積当たりの質量 (kg/m^3) またはエネルギー (J/m^3)、 \mathbf{F}^{κ} :成分 κ のフラックス ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ または $\text{J}/\text{m}^2\text{s}$)、 q^{κ} :成分 κ のシンク/ソース項 ($\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$ または $\text{J}/\text{m}^3\text{s}$)、 \mathbf{n} は部分面要素 dG_n の法線ベクトルである。左辺の M^{κ} は次のように書ける。

$$\text{質量} : M^{\kappa} = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} \quad (2)$$

$$\text{熱} : M^h = (1 - \phi) \rho_R C_R T + \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} U_{\beta} \quad (3)$$

ここに、 ϕ :空隙率、 S_{β} : β 相の飽和度、 ρ_{β} : β 相の密度 (kg/m^3)、 X_{β}^{κ} : β 相における成分 κ の質量分率、 ρ_R :岩石粒子の密度 (kg/m^3)、 T :温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 C_R :岩石の比熱 ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)、 U_{β} : β 相の内部エネルギー (J/kg)、上付き添字の h は熱を表す。

移流による質量フラックスは、全ての相のフラックスを合計して求められる。

$$\mathbf{F}^\kappa \Big|_{\text{adv}} = \sum_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} \mathbf{F}_{\beta} \quad (4)$$

β 相の質量フラックスは、次式の多成分に拡張したダルシー則により計算する。

$$\mathbf{F}_{\beta} = \rho_{\beta} \mathbf{u}_{\beta} = -k \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \mathbf{g}) \quad (5)$$

ここに、 μ_{β} : β 相の粘性係数 (kg/ms)、 \mathbf{u}_{β} : 流速、 k : 絶対浸透率 (m^2)、 $k_{r\beta}$: β 相の相対浸透率、 P_{β} : β 相の圧力 (MPa) である。熱フラックスは、熱伝導と熱対流を考えて、

$$\mathbf{F}^h = -\lambda \nabla T + \sum_{\beta} h_{\beta} \mathbf{F}_{\beta} \quad (6)$$

ここに、 λ : 熱伝導率 ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)、 T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 h_{β} : β 相の比エンタルピー (J/kg) である。

2-3 数値解法

(1) 式を、積分差分法により時間と空間について離散化すると、次のような残差形式の非線形代数方程式が得られる。

$$\begin{aligned} R_n^{\kappa}(\mathbf{x}^{t+1}) &= M_n^{\kappa}(\mathbf{x}^{t+1}) - M_n^{\kappa}(\mathbf{x}^t) \\ -\frac{\Delta t}{V_n} \left\{ \sum_m A_{nm} F_{nm}^{\kappa}(\mathbf{x}^{t+1}) + V_n q_n^{\kappa,t+1} \right\} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、ベクトル \mathbf{x}^t : 時間 t における解 (温度、圧力、飽和度など)、 R_n^{κ} : グリッドブロック n における成分 κ に関する残差、 V_n : ブロック n の体積、 q : 質量またはエネルギーのシンク/ソース、 Δt : 時間ステップ、 A_{nm} : ブロック n と m が接する面積、 F_{nm} : ブロック n と m 間の平均フラックス、である。そして、(7) 式をニュートン・ラプソン法により解く。

$$-\sum_i \frac{\partial R_n^{\kappa,t+1}}{\partial x_i} \Big|_p (x_{i,p+1} - x_{i,p}) = R_n^{\kappa,t+1}(x_{i,p}) \quad (8)$$

ここに、 $x_{i,p+1}$ は i 番目の変数の p 回目の反復計算ステップでの値である。

2-4 計算プログラムの最適化

TOUGH2-MP は、これまでスカラー計算機に対して最適化されており、初期のベクトル化率は5%未満であったが、ループ構造の書換えやインライン化を全面的に行った結果、ベクトル化率は93.7%まで向上した。並列化については、出力ファイルの分散化などの処置を行い、99.93%の並列化効率を得られた。今後は、ソルバーの変更などにより、ベクトル化効率のさらなる向上を図る。

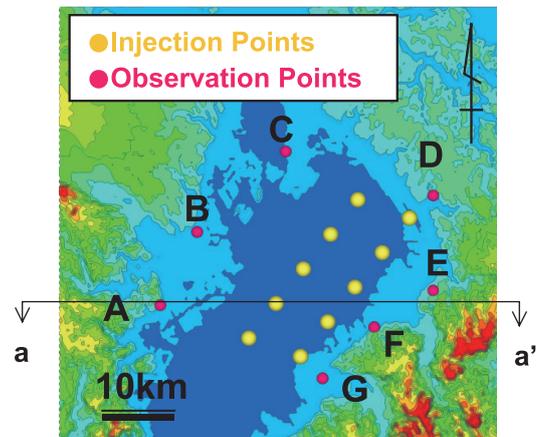


図-2 解析領域と仮定した圧入箇所

3. 解析モデル

3-1 解析グリッド

図-2に示す関東平野南部地域の60km×70km領域を対象に、地形面と地層面形状を反映した3次元高解像度の地質構造モデルを構築した。地形面形状と地層面形状（下総層群と上総層群）には、佐々木ら⁵⁾による3次元形状データ（平面格子間隔200m）を用いた。RITE¹⁾を参考に、上総層群の中部または下部を二酸化炭素貯留層とし、その上部を被覆する上総層上部と下総層を遮蔽層に設定した。水理物性値など、他のモデル設定については山本ら⁷⁾を参照されたい。解析グリッドを図-3に示す。平面方向に格子点距離約200mでポロノイ分割し、深度方向には、地形や地層面形状に沿って100レイヤーに分割した結果、グリッド総数は約1000万となった。特に圧力やガス飽和度が急激に変化する圧入井近傍は、解析の精度を向上させるため、最小5mからのグリッドの詳細化を施した(図-3参照)。

3-2 境界条件

(1) 二酸化炭素の圧入条件

二酸化炭素を圧入する帯水層は、前述の通り、深度800m以上の上総層群中部の梅ヶ瀬層と東日笠層とした⁷⁾。この深度においては、二酸化炭素は全て超臨界状態となる。圧入井は、図-2に示すように、東京湾の東側（上総層群の分布深度が深い房総半島寄り）に、10本を2列に分けて設定した。圧入レート（質量流量）は一定とし、圧入井1本当たり100万t/年とした。従って、計10本トータルの圧入速度は、1,000万t/年である。圧入は100年間継続した後中止し、シミュレーションは圧入開始から1,000年後まで実施した。

(2) 外部境界条件

地盤表面（地表面・海底面）と側方境界は、圧力固定（完全水飽和）とし、底面を不透水境界とした。圧力は、地表面及び海水面で大気圧（1atm）とし、側方境界面には静水圧分布を与えた。

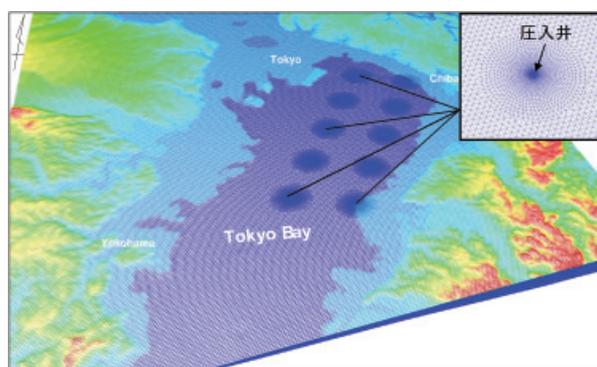


図-3 解析グリッド

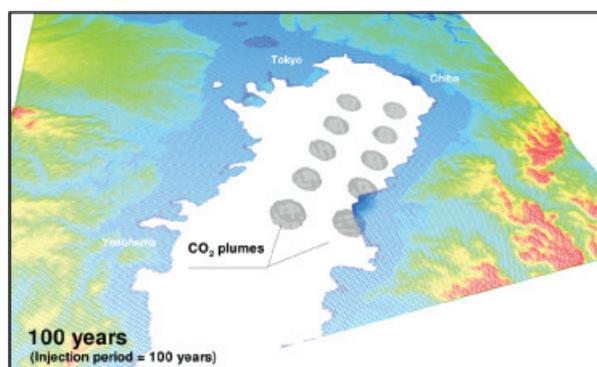


図-4 二酸化炭素プルーム（100年後）

4. 解析結果

4-1 二酸化炭素の地中挙動

圧入開始から100年後における二酸化炭素プルームを図-4に示す。東京湾下に前述の10地点から圧入されたプルームが確認される。図-5は、ある断面における二酸化炭素（超臨界状態）プルームの形状変化を飽和度で示している。この図を見ると、プルームは、貯留層（砂

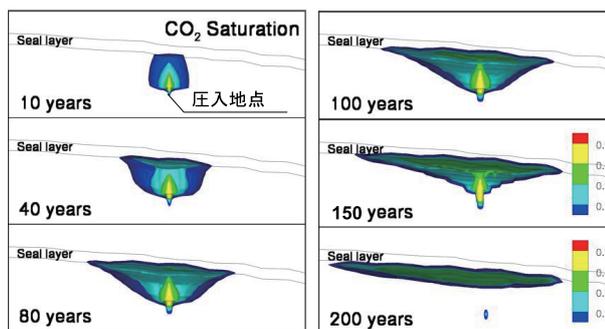
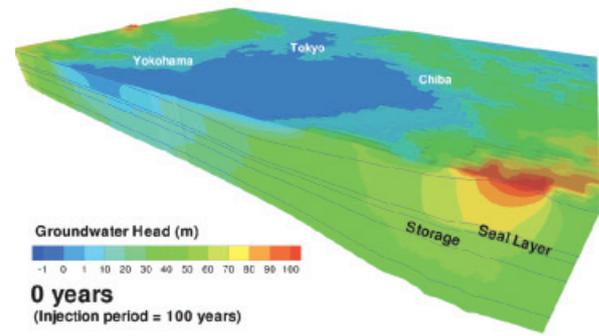
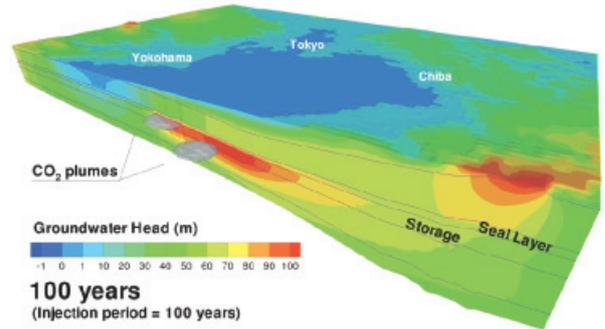


図-5 プルームの形状変化（CO₂飽和度）

層)を覆う遮蔽層(泥層)により、上昇が抑えられているが、浮力により、100年間の圧入終了後も斜め上方へ遮蔽層に沿って移動することが分かる。図には示さないが、圧入された二酸化炭素は、初期には大部分が超臨界流体として存在するが、プレュームの拡大とともに、地下水中に溶解する割合が増加する。



(a) 圧入前



(b) 圧入開始から100年後

図-6 周辺地下水圧の変化(全水頭換算)

4-2 広域地下水流動系への影響

(1) 地下水圧の変化

二酸化炭素の圧入前後の地下水圧(全水頭換算)の分布を図-6に示す。この図から解析領域のほぼ全域にわたり全水頭変化が生じている。

東京湾周辺の地下水圧の上昇量(全水頭換算)の経時変化を図-7に示す。観測地点のうち、A、C、G地点の結果のみを示した。圧入中の100年間の水圧上昇後、圧力が初期状態に回復するには同程度の時間がかかることが分かる。A地点の水圧上昇量は非常に小さいが、G地点では、例えば、深度300mにおいて水頭換算で約15mの水圧上昇が生じている。両者の違いは、モデルで設定した浅部遮蔽層の存在の有無に起因しており、浅部において連続性の良い泥層が存在すると、既存の深井戸で顕著な水圧上昇が生じる可能性を示唆している。

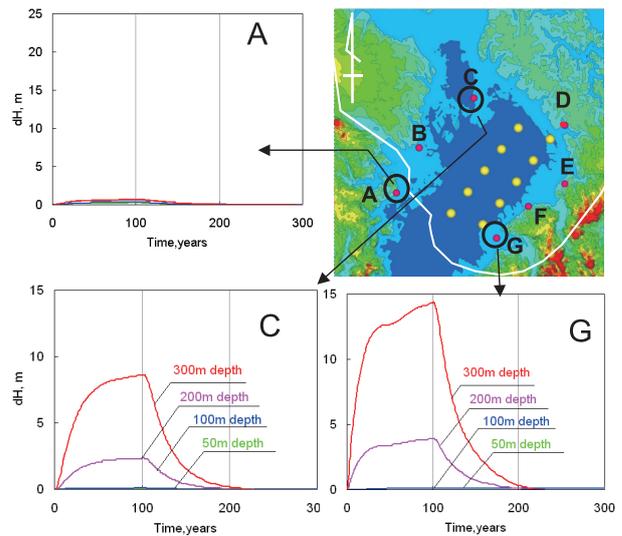


図-7 湾岸域での水圧上昇量(全水頭換算値)

(2) 地表面/海底面流出量の変化

大量の二酸化炭素を圧入すると、相当量の地下水が地表面や海底面に排出される可能性がある。

地表面/海底面への地下水流出量の変化(初期定常状態と100年後の差)を図-8に示す。図中の白線の北側は下総層群で覆われている領域である。これらの図より、地下水流出量の増加は、局所的に最大で20mm/年程度である。これは、関東地方南部の過去30年間の平均的な年間降水量(約1400mm/年)の1.5%以下であり、年変動レベルよりも小さい。また、

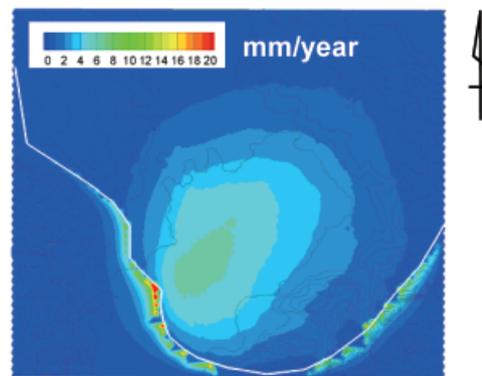


図-8 地表面/海底面への地下水流出の増加量

流出量変化の生じる箇所的大部分は海底であり、地表への影響は相対的に小さい。

5. まとめ

本プロジェクトの初年度である本年度は、地球シミュレータでプログラムを実行するための準備期間として、申請プログラムの最適化を主に行った。そして、128 ノード (1024AP) にて、関東平野南部地域を対象に、1000 万グリッド規模の予備解析を実施した。その結果、地球シミュレータによる大規模解析は、二酸化炭素の局所的な地中挙動と広域的な周辺環境影響を総合的に検討する上で有効であることが分かった。

謝 辞

本研究は、文部科学省平成 19 年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム「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」の一環として行われた。地球シミュレータの利用に際しては、独立行政法人海洋研究開発機構の新宮 哲氏、廣川雄一氏に懇切なるご指導、ご協力をいただいた。プログラムの最適化には、NEC システムテクノロジー株式会社の野口孝明氏に多大なるご協力をいただいた。サンコーコンサルタント株式会社の佐々木勝司氏、日向 哲氏には地質データをご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。最後に、研究の実現ならびに実施をサポートしていただいたローレンスバークレー国立研究所の唐崎建二氏、Karsten Pruess 氏、大成建設株式会社の今村聡氏、青木智幸氏、小川豊和氏にお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) (財)地球環境産業技術研究機構(RITE), 平成 17 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業, 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書, 2006.
- 2) Pruess, K., The TOUGH Codes—A Family of Simulation Tools for Multiphase Flow and Transport Processes in Permeable Media, Vadose Zone J., Vol. 3, pp. 738 - 746, 2004.
- 3) Zhang, K., C. Doughty, Yu-Shu Wu, K. Pruess, Efficient Parallel Simulation of CO₂ Geologic Sequestration in Saline Aquifers, SPE 106026, 2007.
- 4) Zhang, K., Y.S. Wu, and G.S. Bodvarsson, Massively Parallel Computing Simulation of Fluid Flow in the Unsaturated Zone of Yucca Mountain, Nevada, Journal of Contaminant Hydrology, 2002.
- 5) 佐々木勝司, 日向哲, 中村静也, 堀川滋雄, 丸井敦尚, 宮越昭暢, 東京湾東部地域の深部帯水層の層序について, 日本地下水学会 2006 年春季講演会講演要旨, pp.80-85, 2006.
- 6) Yamamoto, H., K. Zhang, K. Karasaki, A. Marui, Impact of large-scale geologic CO₂ storage on regional groundwater systems, Japan Geosciences Union Meeting 2007 (abstract), 2007.
- 7) 山本 肇, Zhang, K., 唐崎建二, 丸井敦尚, 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, 大成建設技術センター報, 第 40 号, 41-1 ~ 10, 2007.