

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

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}、
中島 研吾^{*5}

* 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

* 5 東京大学 情報基盤センター

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 20 年 4 月 1 日～平成 21 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、火力発電所や製鉄所など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。地層の浸透率などに関する感度解析により、浅部の地下水圧力や地下深部の塩水系地下水移動への影響について検討した。

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、火力発電所など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。二酸化炭素をバ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。

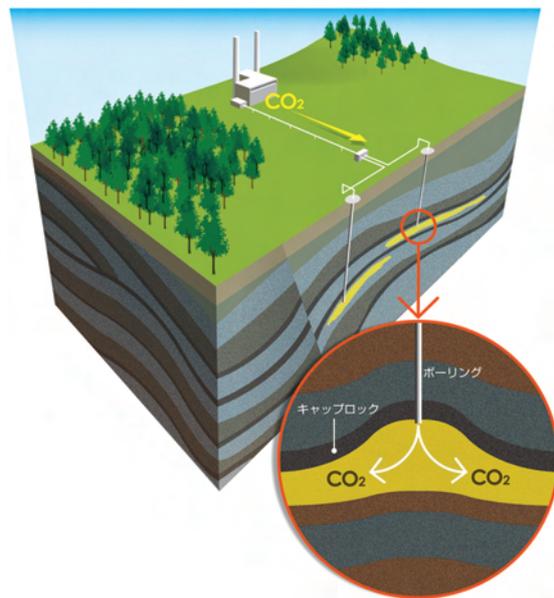


図-1 二酸化炭素の地下貯留の概念

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 Γ_n に囲まれた体積 V_n に対して積分されたエネルギー・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 $d\Gamma_n$ 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。

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

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 ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)、 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。

平成 19 年度に地球シミュレータ向けにベクトル計算機用のチューニングを行った結果、並列化率 99.93%、ベクトル化率 93.7% であった。ベクトル化率については、現在ベクトル計算に適したソルバーへの変更作業を実施中である。

3. 解析モデル

3.1 解析グリッド

解析モデルは、昨年度と同様である。関東平野南部地域の $60\text{km} \times 70\text{km}$ 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⁶⁾ を参照されたい。解析グリッドを図-2 に示す。平面方向に格子点距離約 250m でボロノイ分割し、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。

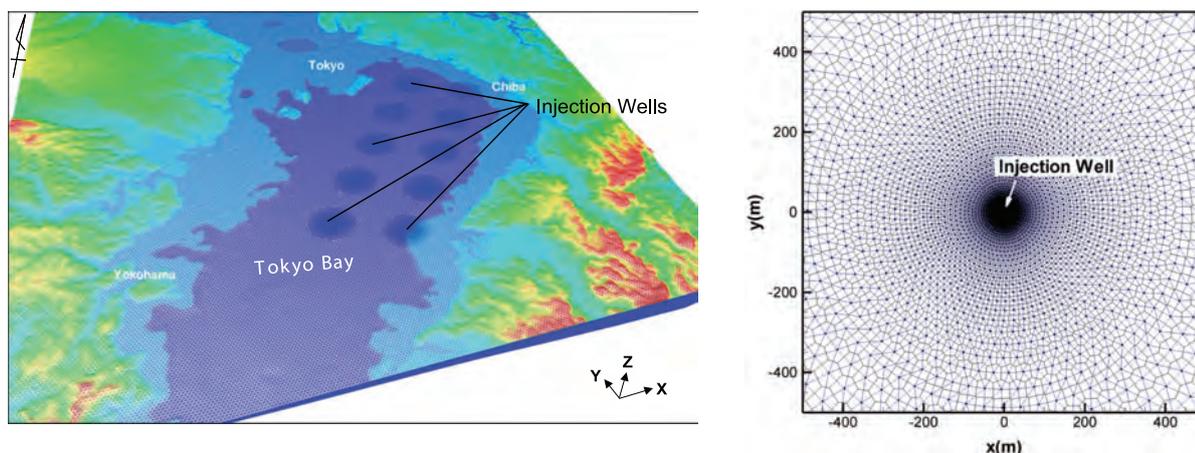


図-2 解析グリッド (左：鳥瞰図 (上斜め方向)；右：圧入井近傍の拡大図)

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 以深の上総層群中部の梅ヶ瀬層と東日笠層とした⁶⁾。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。

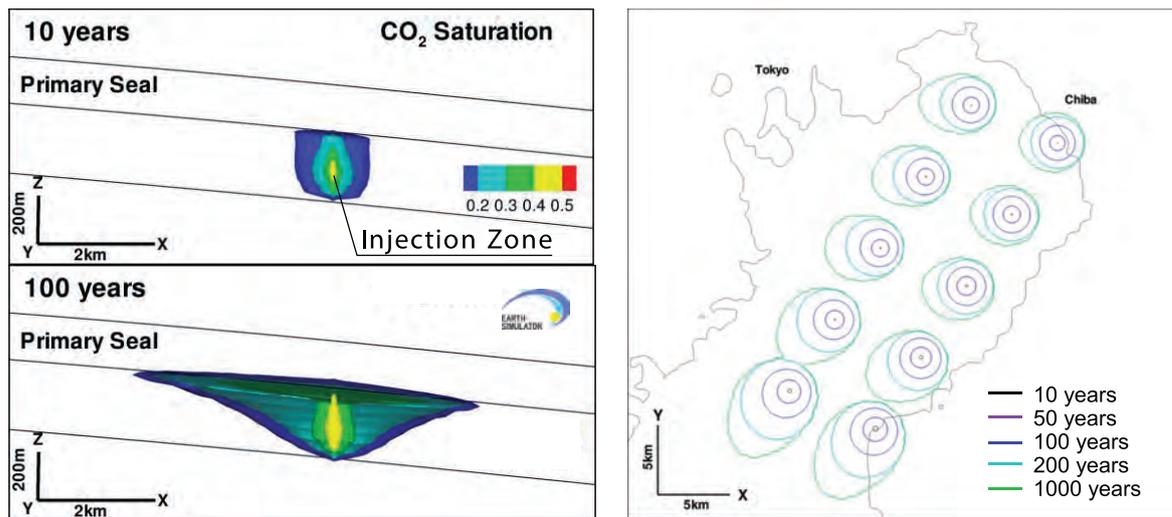
(2) 外部境界条件

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（1 atm）とし、側方境界面には静水圧分布を与えた。

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-3 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-3 (a) 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（図-3 (a)、(b)）。図-3 (b) の CO₂ プルームの平面形状を見ると、圧入中は、主として圧力勾配によって移動するため円形で広がるが、圧入終了後（100 年以降）は、浮力による移動が主体となり遮蔽層の最大傾斜方向に伸びた楕円形を呈する。図には示していないが、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、プル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) 東西方向断面図 (CO₂ 飽和度)

(b) 平面図 (CO₂ 飽和度 5% コンター)

図-3 CO₂ プリュームの変化

4.2 広域地下水流動系への影響

二酸化炭素の圧入後の地下水圧（全水頭換算）の分布を図-4に示す。図中には、貯留層（storage）、深部遮蔽層（primary seal）、浅部遮蔽層（shallow seal）の分布をあわせて示した。図-5に深部遮蔽層と浅部圧力上昇量の平面分布を示すが、1bar以上の圧力上昇域が湾北部全域にわたって広がっていることが分かる。地下水圧が上昇すると地盤隆起や地下構造物の浮力増加などが生じる可能性も考えられる。深部に存在する塩水系の地下水が移動することで浅部地下水の水質などに影響を与える可能性も考えられるが、しかし、図-6（a）に示す鉛直方向の地下水流速の増加は、最大50mm/year程度と緩慢であり、少なくとも1000年オーダーの期間での浅部地下水への影響はほぼ無視しうると考えられる。ただし、断層や亀裂などの卓越した地下水経路が存在する場合は、地下水流速の速い経路を形成すると考えられる。遮蔽層の浸透率など不確実な要因について行った感度解析結果を図-7に示す。ここでは、図-4の地点Gの深度300mでの圧力上昇量の経時変化を示した。基本ケースでは最大1.5bar程度の水圧上昇が予測される。これは、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。ただし、この結果は、浸透率の設定によって大きく異なり、例えば、図-7（b）で浅部遮蔽層の浸透率を1/10にしたケース3bでは、基本ケースの約2倍の圧力上昇が予測される。従って、貯留サイトの評価にあたっては、貯留層近傍だけでなく、浅部における水理地質構造のキャラクタリゼーションの重要性が指摘される。

5. まとめ

本研究では、ケーススタディーとして、関東地方南部地域での商業規模のCO₂地下貯留（帯水層貯留）のシミュレーションを行い、周辺地下水の圧力や移動について検討した。その結果、遮蔽層の浸透性が高い場合には、浅部においても広域的な水圧上昇が生じる可能性があることが分かった。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。今後の課題は、プログラム性能（バクトル化率）向上とデータによるモデル検証であり、ソルバー改良や実証試験への適用を進める必要がある。

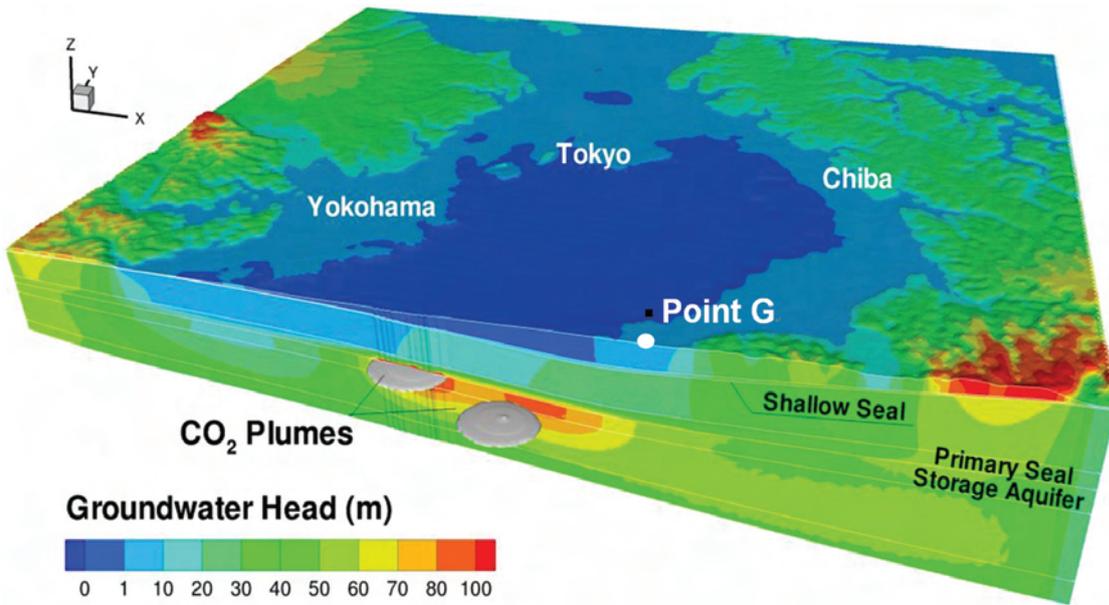
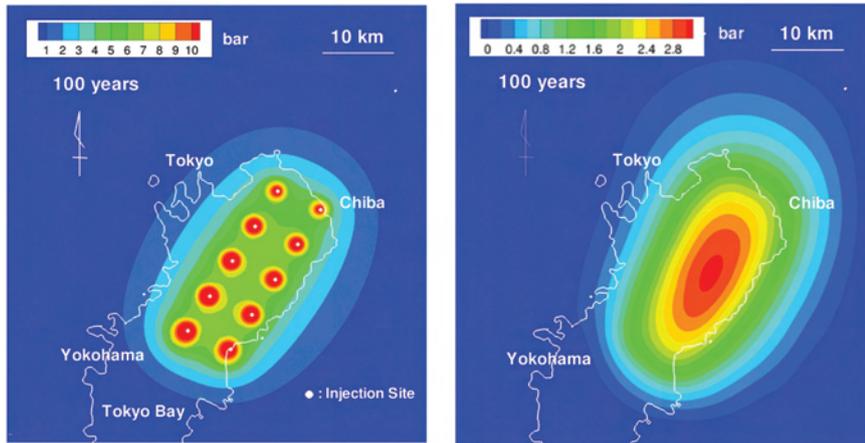


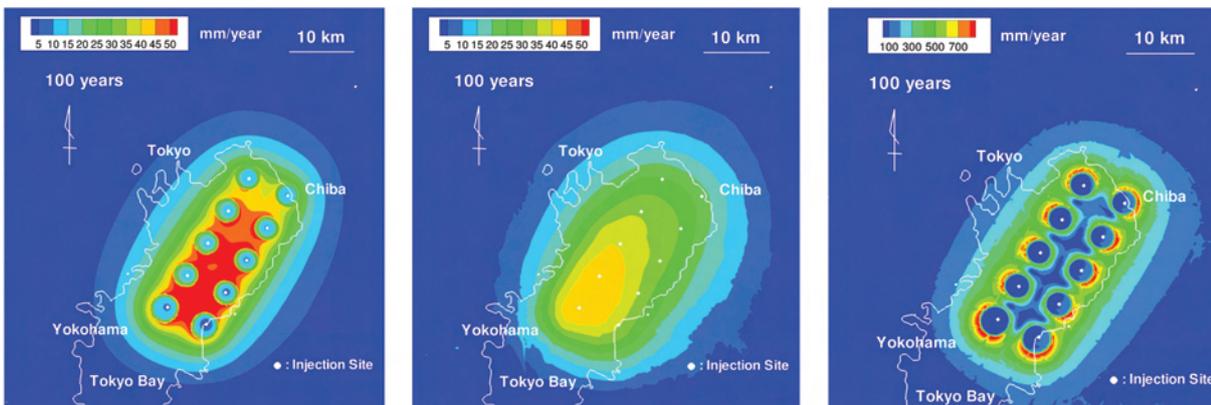
図-4 CO₂ 圧入後の地下水圧（全水頭換算）の分布（100年後）



(a) 深部遮蔽層下面

(b) 浅部遮蔽層下面

図-5 圧力上昇量の平面分布（初期状態からの増分、圧入開始から100年後）



(a) 鉛直方向

(b) 鉛直方向

(c) 水平方向

(深部遮蔽層下面)

(浅部遮蔽層下面)

(貯留層内)

図-6 地下水実流速の変化（初期状態からの増分、圧入開始から100年後）

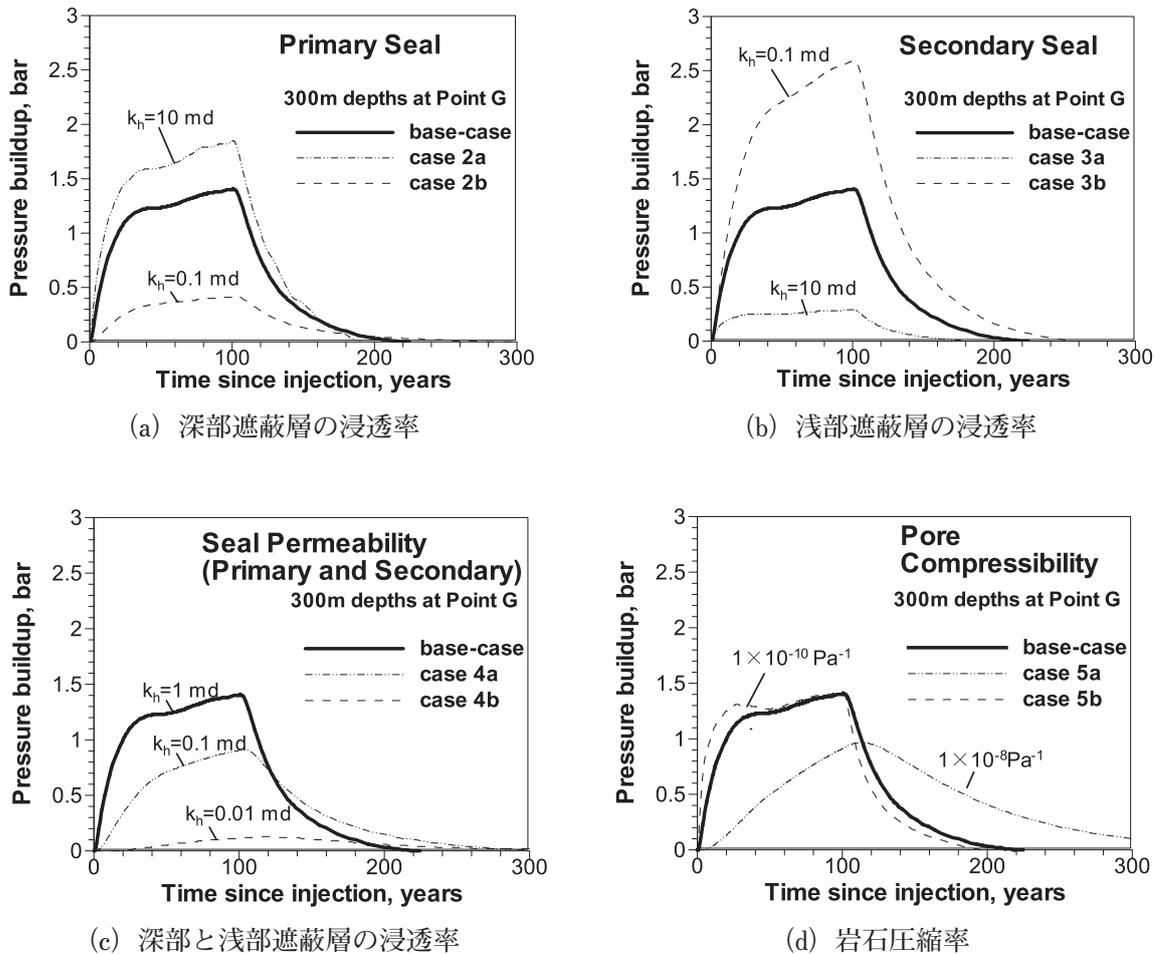


図-7 感度解析結果 (G 地点)

謝 辞

本研究は、文部科学省平成 20 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) 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) 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) 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) 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) 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.

外部発表等

投稿論文

山本 肇, K. Zhang, 丸井敦尚, 上原 均 (2009) : 地球シミュレータを用いた二酸化炭素地下貯留シミュレーション, 地盤工学会誌, 第 57 卷, 第 4 号 (2009 年 4 月号), pp.18-21.

Yamamoto, H., Zhang, K., Karasaki, K., Marui, A., Uehara, H., and Nishikawa, N., 2009, Numerical investigation for the impact of CO₂ geologic sequestration on regional groundwater flow, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol.3, pp.586-599.

学会発表等

Yamamoto, H., Zhang, K., Karasaki, K., Marui, A., Uehara, H., and Nishikawa, N., 2008, Large-scale numerical simulation of CO₂ geologic storage and its impact on regional groundwater flow: A hypothetical case study at Tokyo Bay, Japan, in: *Proceedings of GHGT-9 (9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies)*, Washington D C., Nov. 16-20, 2008.

講演等

第 25 回 NEC-HPC 研究会 (2008 年 6 月 19 日、NEC 本社ビル)

地球シミュレータ産業利用シンポジウム (2008 年 9 月 5 日、学術総合センター)

次世代スーパーコンピュータ産業利用促進セミナー (2009 年 2 月 18 日、関西経済連合会)