

二酸化炭素地下貯留の数値シミュレーションの現状と課題

山本 肇¹

Challenges in numerical simulation of CO₂ geologic storage

Hajime YAMAMOTO¹

1. はじめに

二酸化炭素地下貯留は、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、船舶やパイプラインなどを通じて輸送し、ボーリング等を通じて地層中に貯留 (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 (例えば、地球環境産業技術研究機構, 2005)。CO₂ の貯留層としては、CO₂ が超臨界状態となる深度 (約 800 m 以深) の、遮蔽層 (浸透性の低い泥岩など) で覆われた多孔質で浸透性の高い地層 (砂岩層など) が考えられる (Fig. 1)。

2. 地下貯留メカニズムと周辺環境リスク

CO₂ は、圧力 7.38 MPa, 温度 31 °C 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 (Fig. 2)。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は圧入する方が、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 cm⁻³ であり、地下水で浮力が働くが、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。

CO₂ を地層中にトラップするメカニズムは、構造トラップ、残留ガストラップ、溶解トラップ、鉱物トラップなどがある (Fig. 3)。構造トラップは、CO₂ が低浸透性の地層 (遮蔽層) の下に物理的にトラップされることである。残留ガストラップは、気泡が貯留層の空隙に取り残されて動けなくなるメカニズムをいい、溶解トラップは CO₂ が地下水中に溶解することを意味する。鉱物トラップは炭酸塩鉱物化による固定化を意味し、十分な量の炭酸塩鉱物が生成するには 1000 年以上の長期を要すると考えられている (Fig. 4)。

IPCC (2005) は、地下貯留サイトでのローカルな漏洩リスクについて、適切にサイトが選択、管理されれば非常に小さいと評価している。一方、漏洩シナリオとしては、(1) 井戸の不完全な閉鎖あるいは腐食、劣化、(2)

浸透性の高い断層や割れ目の存在、(3) 遮蔽層の連続性が途絶えること、(4) 注入圧による遮蔽層の破壊、(5) 自然地下水流れによる CO₂ の輸送、などが考えられる (Fig. 5)。漏洩が生じると、グローバルな気候変動対策

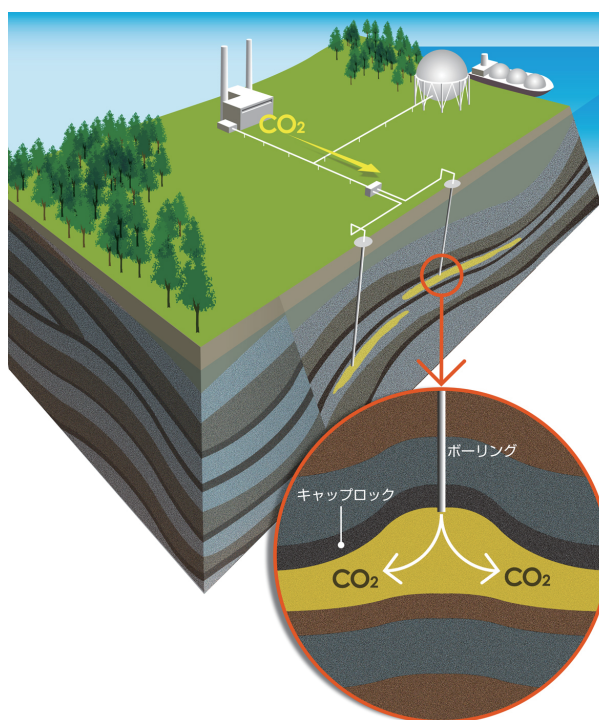


Fig. 1 二酸化炭素地下貯留の概念。

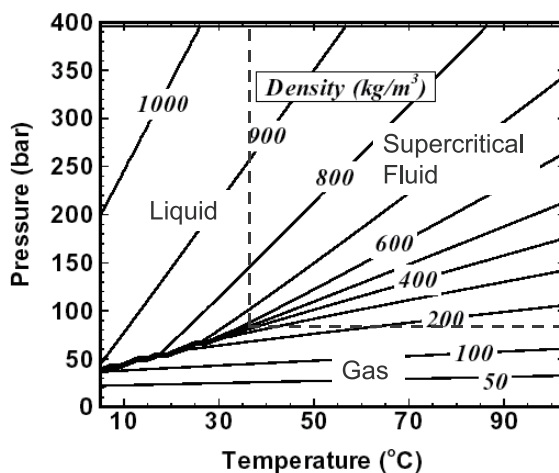


Fig. 2 温度・圧力条件による CO₂ の相と密度変化 (Pruess, 2002)。

¹Taisei Technology Center, 344-1 Nase-cho, Totsuka-ku, Yokohama 245-0051 Japan. Corresponding author: 山本 肇, 大成建設 (株) 技術センター

2010年2月13日受稿 2010年2月15日受理
土壌の物理性 114号, 53-58 (2010)

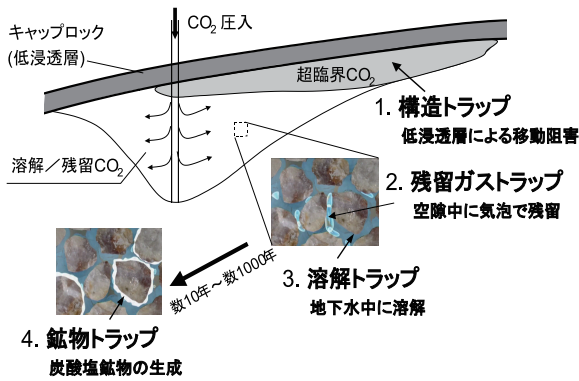


Fig. 3 CO₂ を地層中にトラップするメカニズム .

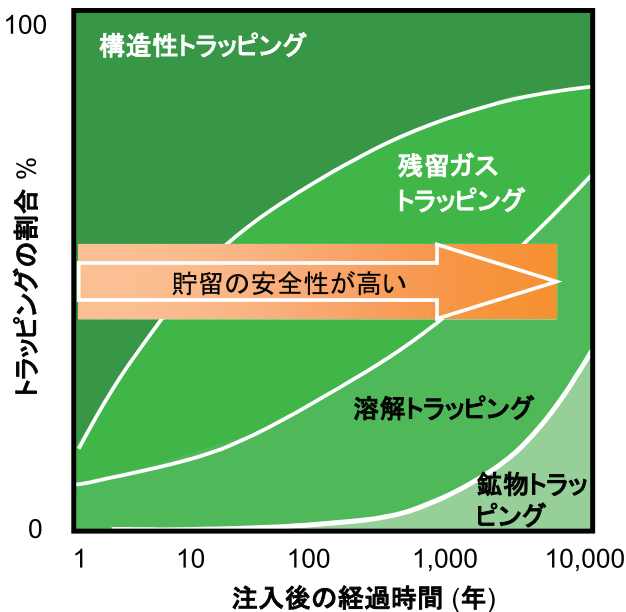


Fig. 4 貯留メカニズムの時間変化 (IPCC, 2005) .

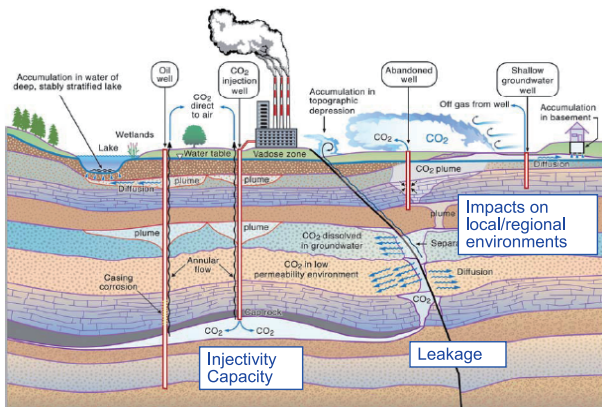


Fig. 5 二酸化炭素地下貯留の地質リスク (Oldenburg, 2005 に追記) .

としての有効性が低下するだけで無く、ローカルな地域において人体や生物環境に影響を与える可能性がある。特に、井戸から漏洩する場合には、急激に大量 CO₂ を放出する可能性があり、CO₂ は低い濃度では人体に対して無害であるが、7 ~ 10 % に達すると人が即死する可能性もある。その他の漏洩シナリオは、地下水で満たされた地質媒体を通じた緩慢な漏洩と考えられる。しかし、井

戸とは異なり漏洩箇所の特が困難であるため、漏洩した CO₂ が長期間未検知のまま蓄積すると、最終的には、窪地などの空気の滞留箇所でも CO₂ 濃度が局所的に上昇する。あるいは地下水/海水の水質が変化する可能性も指摘されている。また、圧入箇所周辺の地下水に対する潜在的な影響も考えられる。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 CO₂ を連続的かつ大規模に圧入すると、相当量の地下水が帯水層から排除されて、広域的な地下水圧の上昇や地盤隆起が生じる可能性も指摘されている (例えば、Birkholzer et al., 2009) .

3. 数値シミュレーションの現状と課題

数値シミュレーションは、貯留サイトの経済性 (貯留可能量等) や安全性 (漏洩リスク等) を評価するために重要な方法の一つである。シミュレーションでは、上記の CO₂ トラップ機構を考慮するために、温度・圧力条件等で変化する超臨界 CO₂ の流体物性 (密度、粘性、地下水への溶解度) や、地下水との相互作用 (水相 - CO₂ 相間の成分移動や二相流特性: 相対浸透率、残留飽和度、毛管圧力等) を正確に考慮できる多成分・多相系シミュレータを使用する必要がある。加えて、鉱物トラップを考慮するために、地球化学計算との連成解析が必要となる場合もある。

CO₂ 地下貯留用の数値シミュレータは、石油や地熱開発等で実績のある二相流シミュレータをベースに開発されている。短期的な貯留層内での CO₂ 挙動については、EOR (石油増進回収法) や実証試験などでの検証が進められている。例えば、Doughy et al., (2008) は、米国テキサス州の地下約 1.5 km の塩水帯水層で実施した CO₂ 圧入試験 (Frio Brine Pilot Test) において、CO₂ の地下挙動シミュレーションを実施し、弾性波トモグラフィーや孔内検層 (RST) の結果との比較を試みている (Fig. 6) . ノルウェーの Sleipner やアルジェリアの In Salah など、すでに数年以上にわたって年間 100 万 t を超える CO₂ を圧入している大規模な商業規模プロジェクトでは、圧入の計画や管理において、数値シミュレーションは重要な役割を果たしており、その意味では実用段階にある (例えば、Ringrose et al., 2009) .

一方、長期的な CO₂ の安定性や漏洩の予測、周辺環境影響など、プロジェクトの安全性を確保し、社会的受容性を高める上で重要なテーマについては、多くの研究課題が残されている。例えば、長期的安定性が高いとされる残留ガストラップや鉱物トラップの有効性は、主に数値解析の検討から示されているが (例えば、Juanes et al., 2006; Xu et al., 2007) , フィールド試験での実データに基づいた検証が待たれる。残留ガストラップは、相対浸透率のヒステリシスに基づいた概念であり (Land, 1968; Doughy, 2008) , 土壌物理学とも関連したテーマと思われる。周辺への環境影響に関しては、断層からの漏洩 (例えば、Pruess, 2005) , 地表面の隆起 (例えば、Rutqvist et al., 2010) , 広域的な地下水圧上昇 (例えば、

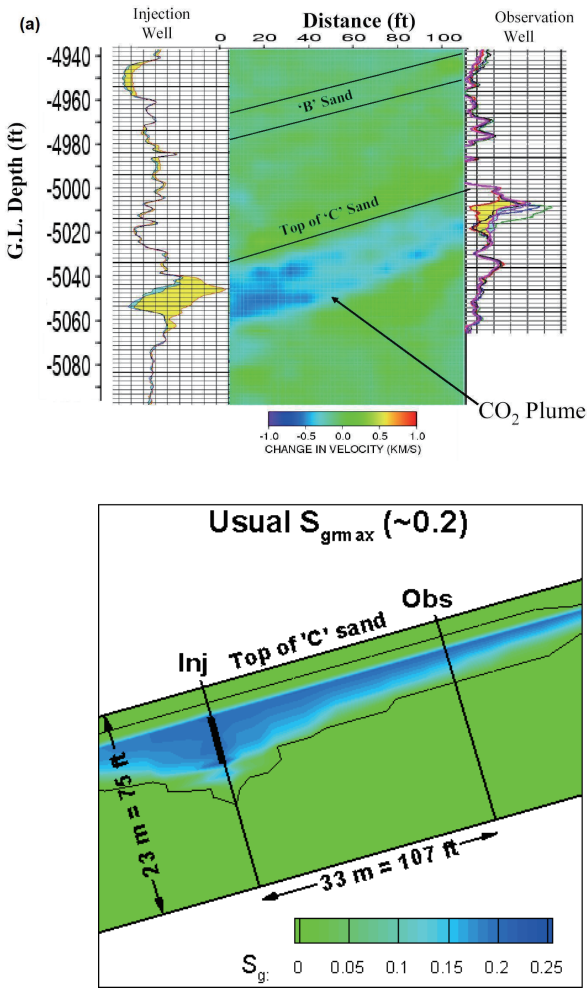


Fig. 6 CO₂ 圧入前後での孔間トモグラフィー（弾性 P 波速度差）と数値シミュレーション結果の比較（米国，フリオ実証試験；Doughy et al., 2008）. (a) 孔間弾性波トモグラフィー (b) 数値シミュレーション

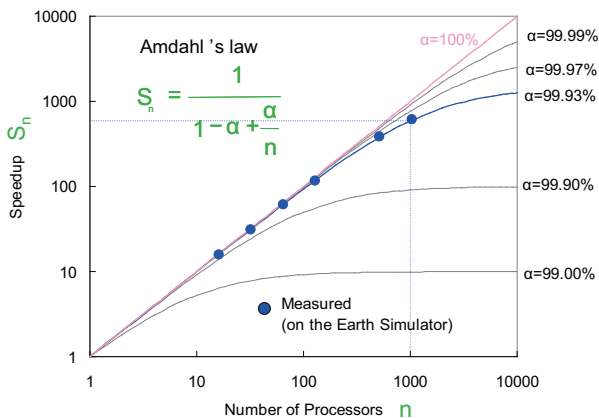


Fig. 7 地球シミュレータにおける TOUGH2-MP の並列化による性能向上率； α ：並列化率， n ：CPU 数．

Birkholzer et al., 2009；Yamamoto et al., 2009），貯留層内の昇圧に伴う深部塩水の浅部侵入による水質変化（例えば，Nicot, 2008），地下水の pH 低下による重金属溶出などの地球化学変化（例えば，Xu et al., 2009）などの幅広いトピックについて，数値解析的な検討がなされている．周辺環境影響の法的な規制に関しては，米国の環境保護局（USEPA）では，今後の CO₂ 地下貯留の圧入

井の許認可にあたり，貯留サイトが地下水環境に影響を及ぼしうる区域を，数値シミュレーションなどの手法により特定し（area of review），水圧などをモニタリングして報告することを求める方向で議論が進められている（USEPA, 2008）. 実際のプロジェクトでの影響評価にあたっては，対象領域が極めて広いこと（数 10 km ～ 数 100 km 以上）や，比較的長期（少なくとも数 10 年以上）の評価が必要になる可能性が高いこと，複数の事業者による複合的な影響を示す必要があることなどから，実用的な評価アプローチの一つとして，数値シミュレーション技術の果たす役割の重要性は増すものと考えられる．

4. 並列計算による大規模数値シミュレーション

著者らは，CO₂ 地下貯留プロジェクトの長期的・広域的な安全性を評価するツールの一つとして，CO₂ 地下挙動の高速・大規模シミュレーション技術の開発に取り組んでいる．ここでは，我が国を代表する超並列スーパーコンピュータである地球シミュレータを用いた二酸化炭素の地下挙動の計算事例（Yamamoto et al., 2009）を紹介する．シミュレーションでは，東京湾での地下貯留を仮想的に想定した．

4.1 大規模並列計算

二酸化炭素の物理化学・流動特性をモデル化した代表的な地下流体シミュレータとして TOUGH2 ECO2N（Pruess, 2004；Pruess and Spycher, 2007）がある．しかし，上述のように，CO₂ の地下挙動解析には，超臨界 CO₂ の流体物性や二相流特性など，多くの非線形要因が含まれており，計算に多くの時間を要する．そこで，本研究では，複数の CPU を同時に用いた高効率の並列計算が可能で TOUGH2-MP（Zhang et al., 2007）を用いている．一般に並列化可能な部分と並列化不可能な部分（逐次実行部分）がある．並列化可能な部分の割合を並列化率 α とすれば，計算の速度向上率は，アムダールの法則（Fig. 7 中の式）で表される．この法則に従えば，プログラム全体の 90% が並列実行可能なプログラムを 1000 CPU で動かしたとしても，10 倍以上速くならない（同図）．TOUGH2-MP の地球シミュレータ上での並列化率 α は 99.93% であり，1000 個以上の CPU の総合性能を生かした計算が可能である．

4.2 解析モデル

関東平野南部地域の 60 km × 70 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（2006）による 3 次元地層形状データ（平面格子間隔 200 m）を用いた．深度 800 m 以深の上総層群中部の梅ヶ瀬層と東日笠層を貯留層とし，その上部を被覆する上総層上部と下総層を遮蔽層とすることを想定した．水理物性値など，他のモデル設定については Yamamoto et al. (2009) を参照されたい．解析グリッドを Fig. 8 に示す．このポロノイ分割によるグ

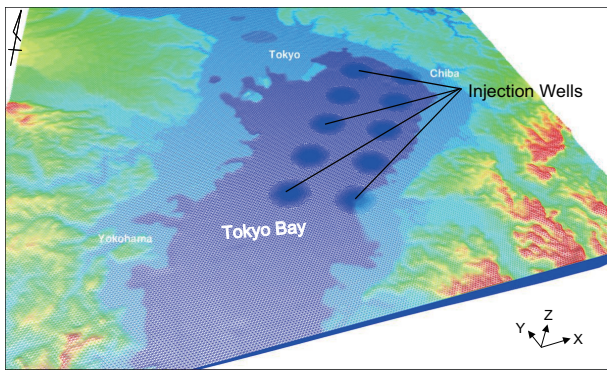


Fig. 8 解析グリッド.

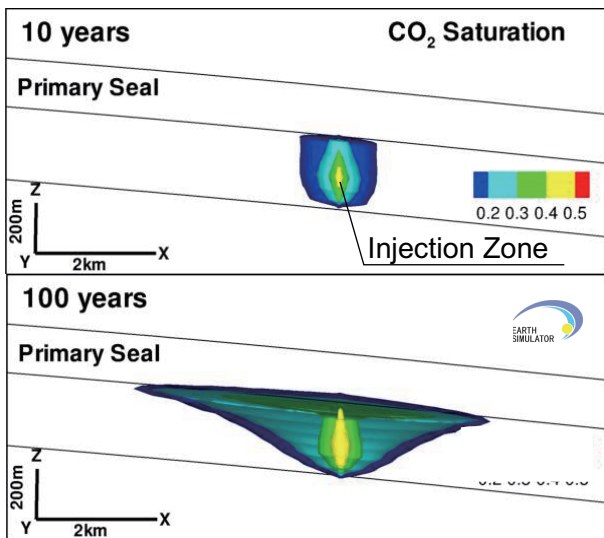


Fig. 9 CO₂ プリュームの変化.

リッド総数は約 1000 万である．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 5 m からのグリッドの詳細化を施した．

圧入井は，Fig. 8 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 列に分けて想定した．圧入レート（質量流量）は圧入井 1 本当たり 100 万 t/年とした（計 10 本トータルでの圧入速度は 1,000 万 t/年）．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．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．

4.3 解析結果

4.3.1 二酸化炭素の地中挙動

圧入開始から 100 年後における超臨界 CO₂ プリュームを Fig. 9 に示す．ある鉛直断面上での超臨界 CO₂ プリュームの形状を CO₂ 飽和度（間隙体積中で占める超臨界 CO₂ 体積の割合）のコンターで表示したものである．図を見ると，浮力によるプリュームの鉛直方向への上昇は，貯留層（砂層）を覆う遮蔽層（泥層）により抑えられているが，遮蔽層に沿った斜め上方への移動が生じているのが分かる．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，プリ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．

4.3.2 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 Fig. 10 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

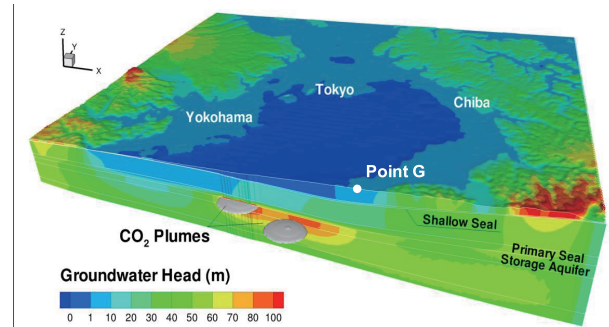


Fig. 10 CO₂ 圧入開始から 100 年後の地下水圧（全水頭換算）の分布．

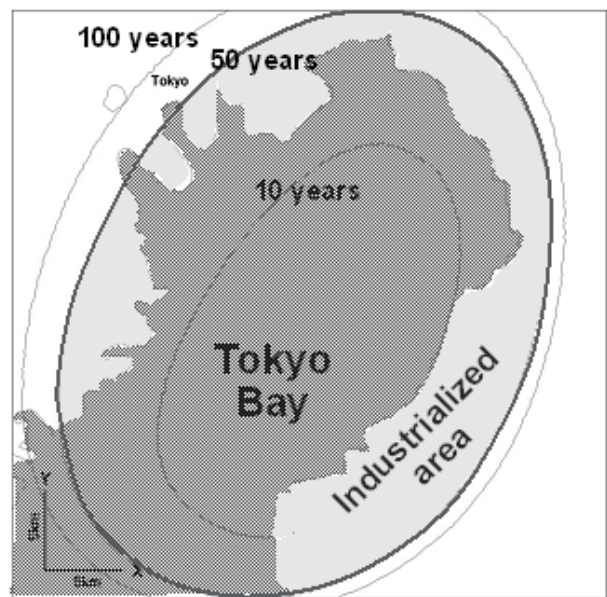


Fig. 11 貯留層内の圧力上昇域 ($dP = 1$ bar)．

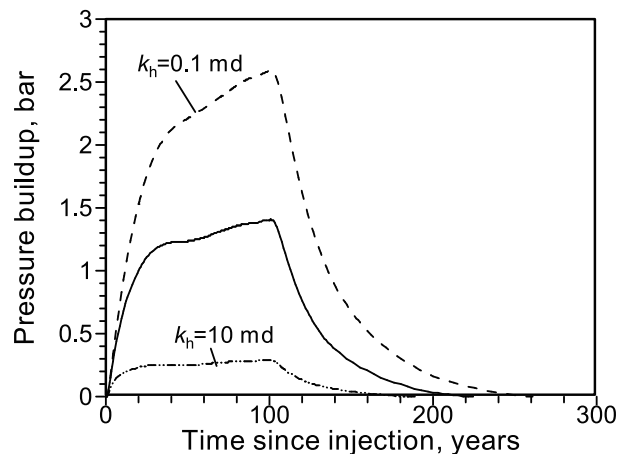


Fig. 12 G 地点の深度 300 m における地下水圧上昇量．

をあわせて示した。Fig. 11 に貯留層内における 1 bar 以上の圧力上昇域を示すが、圧入開始から 50 年後には、圧力上昇域が湾北部全域にわたって広がる計算結果となっている。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に加えて、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。Fig. 10 の地点 G の深度 300 m での圧力上昇量の経時変化を Fig. 12 に示した。浅部遮蔽層の浸透率 k_h を変えると（同図中の破線）結果が大きく異なるが、図中の太線で示した基本ケースでは最大 1.5 bar 程度の水圧上昇が予測されており、浅部に連続性の良い遮蔽層（泥層）が存在すると、既存の深井戸などで顕著な水圧上昇が生じる可能性を示唆している。

5. おわりに

CO₂ 地下貯留の数値シミュレーションの概要を説明するとともに、その現状と課題に関して最近の研究事例を簡単に紹介した。また、著者らが行っている並列計算による大規模数値解析技術に関連して、仮想的な商業規模の CO₂ 地下貯留（帯水層貯留）を対象とした周辺地下水影響のシミュレーション事例を紹介した。地球シミュレータのような大規模並列計算機による数値解析は、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。数値解析の高速化は、単なる数値解析の精度や解像度の向上だけでなく、空隙スケールからフィールドスケールまで同時に解析するマルチスケール解析や、特に環境影響評価で重要な温度－水理－力学－化学の多連成モデルなど、数値解析の統合化・高度化に向けた重要な技術であり、引き続き取り組んでいきたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省平成 19 年度～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。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Birkholzer, J.T., Zhou, Q. and Tsang, C.F. (2009): Large-scale impact of CO₂ storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 3: 181–194.
- 地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2006): 図解 CO₂ 貯留テクノロジー. 241p., 工業調査会, 東京.
- Doughty, C., Freifeld, B.M. and Trautz, R.C. (2008): Site characterization for CO₂ geologic storage and vice versa: the Frio brine pilot, Texas, USA as a case study. *Environ Geol.*, 54: 1635–1656.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005): IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos and Leo Meyer (Eds.), pp. 431, Cambridge University Press, UK.
- Juanes, R., Spiteri, E.J., Orr Jr., F.M. and Blunt, M.J. (2006): Impact of relative permeability hysteresis on geological CO₂ storage. *Water Resources Research*, 42: W12418, doi:10.1029/2005WR004806.
- Land, C.S. (1968): Calculation of imbibition relative permeability for two and three-phase flow from rock properties. *Soc. Pet. Eng. J.*, 8(2): 149–156.
- Nicot, J-P. (2008): Evaluation of large-scale CO₂ storage on freshwater sections of aquifers: an example from the Texas Gulf Coast Basin. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2: 582–593.
- Oldenburg (2005): Health, safety, and environmental screening and ranking framework for geologic CO₂ storage site selection, LBNL-58873. Lawrence Berkeley National Laboratory, California.
- Pruess, K., Garcia, J. (2002): Multiphase flow dynamics during CO₂ disposal into saline aquifers. *Environmental Geology*, 42: 282–295.
- Pruess, K. (2004): The TOUGH Codes—A family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media. *Vadose Zone J.*, 3: 738–746.
- Pruess, K. (2005): Numerical studies of fluid leakage from a geologic disposal reservoir for CO₂ show self-limiting feedback between fluid flow and heat transfer. *Geophys. Res. Lett.*, 32(14): L14404, doi:10.1029/2005GL023250.
- Pruess, K. and Spycher, N. (2007): ECO2N—A fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO₂ storage in saline aquifers. *Energy Conversion and Management*, 48(6): 1761–1767.
- Ringrose, P., Atbi, M., Mason, D., Espinassous, M., Myhrer, O., Iding, M., Mathieson, A. and Wright, I. (2009): Plume development around well KB-502 at the In Salah CO₂ storage site. *First Break* 27: 85–89.
- Rutqvist J, Vasco, D.W. and Myer, L. (2010): Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO₂ injection and ground deformations at In Salah, Algeria. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, doi:10.1016/j.ijggc.2009.10.017, 4: 225–230.
- 佐々木勝司, 日向 哲, 中村静也, 堀川滋雄, 丸井敦尚, 宮越昭暢 (2006): 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, 80–85.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency)(2008): Federal requirements under the underground injection control (UIC) program for carbon dioxide (CO₂) geologic sequestration (GS) wells. Proposed Rule, 40 CFR Parts 144 and 146, EPA-HQ-OW-2008-0390.
- Xu, T., Apps J., Pruess, K. and Yamamoto, H. (2007): Numerical modeling of injection and mineral trapping of CO₂ with H₂S and SO₂ in a sandstone formation. *Chemical Geology*, 242: 319–346.
- Xu, T., Kharaka Y., Doughty C., Freifeld, B.M. and Daley, T.M. (2010): Reactive transport modeling to study changes in water chemistry induced by CO₂ injection at the Frio-I Brine Pilot. *Chemical Geology* (in press).

- 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. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 3: 586–599.
- Zhang, K., Doughty, C., Wu, Y.S. and Pruess, K. (2007): Efficient parallel simulation of CO₂ geologic sequestration in Saline Aquifers. SPE 106026, Proceedings of the 2007 SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas.
- Zhang, K., Wu, Y.S. and Bodvarsson, G.S. (2002): Massively parallel computing simulation of fluid flow in the unsaturated zone of Yucca Mountain, Nevada. *J. Contaminant Hydrol.*

要 旨

二酸化炭素地下貯留は、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、船舶やパイプラインなどを通じて輸送し、ボーリングを通じて地層中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。地下貯留の経済性や安全性を評価する上では、数値シミュレーションが重要な方法となる。シミュレーションには、石油開発分野等で実績のある二相流シミュレータが用いられており、実証試験を通じた適用性の検証が進められている。しかし、長期的な CO₂ の安定性や漏洩の予測、広域的な地下水環境への影響などは今後の研究課題である。

キーワード: 地球温暖化, 二酸化炭素, 地下貯留, 数値シミュレーション