

連携記事

日本周辺でのCO₂地中貯留に向けた モニタリングとモデリング技術

Monitoring and Modeling Technologies for CO₂ Injection around Japanese Island

辻 健
Takeshi Tsuji

九州大学
カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所
准教授

1 日本などのテクトニクス活動の盛んな場所でのCO₂地中貯留

Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) は、CO₂の大規模排出源においてCO₂を分離・回収し、地中に貯留する技術である(図1)。CCSは、大気中に放出されるCO₂を削減することのできる現実的な手法とされている¹⁾。また、既存の石油開発の技術を用いて、近未来的にCO₂を削減できる点でも注目されている。既にCCSプロジェクトは実施されており、CCSによるCO₂の削減が始まっている。特に海外では、CO₂を地中に圧入して原油の回収を増進するプロジェクト(Enhanced Oil Recovery ; EOR) が多く実施されている。国

内でのCCSプロジェクトとしては、長岡のパイロットプロジェクトや、平成28年度からCO₂の圧入を開始する苫小牧CCSプロジェクトがある。さらに経済産業省と環境省によって、CO₂貯留の適地調査が実施され、将来のCO₂貯留地域の選定も進んでいる。

このCO₂地中貯留の課題として、地中に圧入したCO₂をモニタリングとモデリングする技術、つまりCO₂が安定して貯留層内に留まっていることを確認する技術を確立する必要がある。圧入CO₂のモニタリングとモデリングを実施して安全を確認することは、CCSを実施する上で必須となりつつある。CCSのモニタリングは、石油開発の場合と異なり、連続的に長期間実施する必要がある。さらに日本は、プレートが衝突する場所に位置し、地震や火山が多い。このようなテクトニクス活動の盛んな場所の地質構造は、オーストラリアや米国などの広大な貯留層(大陸地殻)に比べて複雑である。つまり日本周辺でCO₂を地中貯留するには、モニタリングやモデリングに求められる要求が高くなる。日本周辺でCO₂地中貯留を実施する上での課題を整理すると、次のようになる²⁾。

(1) 不均質な地質構造

プレート沈み込み帯に位置する日本では、米国などの大陸性の地質に比べて、地層の不均質性が強い。CO₂の漏洩経路となるフラクチャーや断層といった局所的な高透水性の地質イベントが密に存在する。そのため貯留層シミュレーション(CO₂の挙動モデリング)に用いる地質モデルを作成する際、またモニタリング調査を行う際には、地質構造の不均質性を考慮する必要がある。つまり、地層の不均質性を検出するための物理探査(地下探査)技術の開発が求められる。

(2) 限られた背斜構造

貯留層が背斜構造をなし、その上に不浸透性の地層(遮蔽層)があれば、貯留層に石油やガスがトラップされる。炭化水素の探鉱の対象となる多くの貯留層は、この背斜構造をして

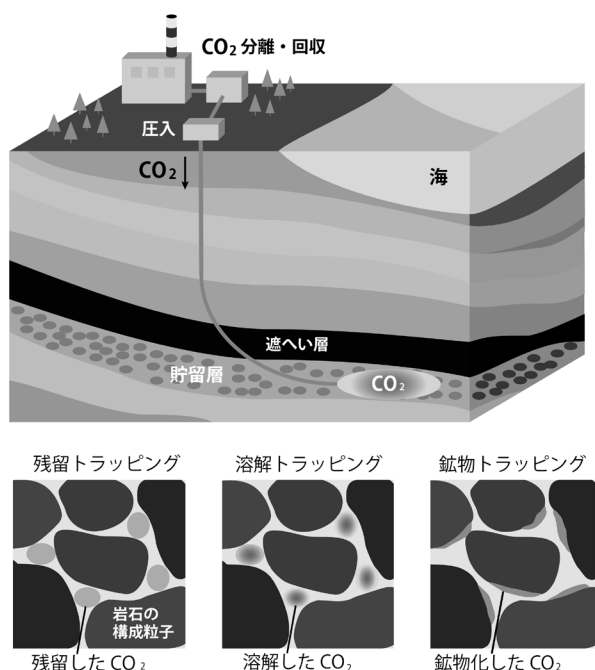


図1 CCSの模式図。下図はCO₂のトラッピングメカニズムの模式図

いる。CO₂の地中貯留においても、背斜構造にCO₂を圧入すれば、安定的にトラップされることが知られている（構造性トラッピング）。しかし日本のような大陸縁辺部では、CO₂貯留に適した背斜構造を見つけることが困難である。背斜構造がある場合にも、断層による変形を受けていることが多い。そこで、背斜構造を必要としない残留トラッピング・溶解トラッピング・鉱物トラッピングを考える必要がある（図1）。これらの非構造性のトラッピングを評価するためには、岩石内部（間隙内）でのCO₂の挙動を調べるのが重要となる。

(3) 限られた貯留層の情報

原油の生産フィールドでは、多くの物理探査データや掘削データが取得されているため、地質モデルの構築が容易である。一方で、日本周辺の帯水層では、貯留層や遮蔽層に関する情報が少なく、圧入CO₂の挙動を推定する上で重要となる地質モデルの構築が難しい。この限られたデータを使って、地質モデルを構築し、CO₂の挙動を予測する技術の開発が重要となる。

(4) 海底下の貯留層

日本は陸地が限られていて、CO₂の圧入は海域で実施するのが、一般的となると考えられる。確かに日本の周辺には、海盆に堆積した厚い堆積層が発達しており、CO₂の圧入層としてのポテンシャルは大きいと考えられる。一方、日本近海では漁業が活発に行われているため、漁業者への理解を得る必要がある。そのためにも、信頼できるモニタリングとモデリングデータの取得と提供が必要となる。またCO₂を、沖合の圧入井に輸送するシステムの構築も重要となる。

(5) 誘発地震の防止

CO₂地中貯留は、地震を誘発させる可能性があり、それを防止する必要がある。地震は、断層にかかるせん断応力が、断層面の摩擦抵抗に打ち勝つ時に発生する。断層面の摩擦抵抗は、以下の式で表すことができる。

$$\tau_{critical} = \mu(\sigma_n - p_f)$$

ここで μ は断層の摩擦係数、 σ_n は断層面に垂直方向に働く応力、 p_f は岩石間隙内の流体圧（間隙水圧）である。この式からCO₂を地中に圧入して間隙水圧が増加すると、摩擦抵抗（ $\tau_{critical}$ ）が小さくなり、地震を誘発しやすくなることが分かる。この問題は日本のような島弧域に限ったことではないが、テクトニックな活動が活発な場所は、もともと応力が不安定であるため（せん断応力が大きい）³⁾、地震を誘発する可能性が高い。このCCSによる地震誘発の危険性は、米国政府議会で報告されるなど注目されている⁴⁾。この問題を解決するためには、貯留層周辺の間隙水圧とせん断応力を正確に推定することや、CO₂圧入に伴う間隙水圧の上昇をコントロールすることが必要である。また日常から絶えず発生している自然地

震と、誘発地震を区別する手法の開発も求められている。

(6) 長期のモニタリングとモデリング

長期間にわたって、貯留層内のCO₂をモニタリングし、貯留層内のCO₂挙動を知る必要がある。これは原油の増産（EOR）におけるモニタリングと大きく異なる点である。また圧入CO₂の漏洩に迅速に対応するため、連続的にモニタリングする技術が求められている。圧入CO₂のモニタリングには、反射法地震探査を繰り返し行い、その変化を調べるのが一般的である⁵⁾。しかし反射法地震探査の実施は高価であり、また不連続的に行われるため、突然の漏洩や地殻応力の不安定化に対応できない可能性がある。一方、圧入CO₂のモデリングでは、長期間のCO₂の挙動を予測する必要があるため、CO₂の地層水への溶解過程や鉱物化の影響を考慮する必要がある。

以上のように、日本のような場所でCO₂を貯留するためには、いくつかの課題を検討する必要がある。しかし、これらの課題を克服すれば、日本の周辺だけでも1000億トン以上のCO₂を圧入する地層があると推定されている⁶⁾。この量は、日本の総CO₂排出量の100年以上に相当し、非常に大きなポテンシャルがあることが分かる。

ここでは日本のようなテクトニック活動の盛んな場所において、安全にCO₂貯留を実施するために必要となるモニタリング技術とモデリング技術に関する研究の動向を説明する。これらの課題の解決は、我々の研究グループ（I2CNER- CO₂貯留部門）の目的でもある。

2 モニタリング技術

2.1 地震探査による地下構造・物性・応力の推定

貯留層の構造や、間隙率（岩石内の空隙の割合）といった貯留層の特性を調べる際は、反射法地震探査が一般的に用いられる。この探査では、地表（または海面）で人工的に振動を発生させる。その振動は地下深部へ伝播し、音響インピーダンス（P波速度×密度）が変化する地層境界で反射して、再び地表へ戻ってくる。その反射波を地震計で記録し、解析することにより、地下構造や物性を調べることができる。この方法は、医療用のエコー診断や、構造物の非破壊検査とよく似ている。

図2に、南海トラフで取得された反射法地震探査データを解析して得られた断面図と、間隙水圧を推定した例を示す⁷⁾。南海トラフ（図2a）は活断層が多く、CO₂の貯留には不向きな場所であるが、断層分布や地層の変形が分かりやすい。CO₂貯留に適した場所の反射断面図を使うと、地質構造が単純で、断層といった不均質構造の説明が難しいのである。南海トラフで取得された地震探査データから、日本列島の下に沈み込んでいるフィリピン海プレートや、地震・津波を発生させる巨大分岐断層を見ることができる。また浅い地層に注目する

と、密に発達する断層群を見ることができる(図2bの矢印)。この反射法地震探査は、3次元的に実施されているため、断層の3次元形状を抽出することもできる(図2c)。断層の3次元形状は、地層の応力状態を反映しているため、地層の安定性を評価する上でも重要な情報となる。また反射法地震探査で捉えることのできない小さな亀裂を検出するために、地震波の減衰の情報を用いる手法の開発も行われている⁸⁾。

地震探査データからは、断層といった地下構造だけでなく、弾性波速度(P波とS波が岩石を伝わる速度)を推定することができる。我々の研究グループでは、波形インバージョンと呼ばれる解析を改良することで、高精度に弾性波速度を推定する試みを行っている(図2d)^{9,10)}。さらに弾性波速度と掘削データを統合することで、地震の評価で重要となる間隙水圧の推定も可能となる(図2e)⁷⁾。実際、プレート境界断層

では、高い間隙水圧が推定されており(図2e)、地震が発生しやすい状態であることがわかる。CO₂の地中貯留では、間隙水圧の低い場所を選ぶのが一般的である。

2.2 地震探査によるモニタリング

貯留層の岩石は、地層水で飽和しているのが一般的である。水で飽和している岩石にCO₂が圧入された場合、その岩石を伝わる弾性波速度は遅くなる。つまり反射法地震探査を繰り返して実施し、CO₂圧入前と圧入後の結果(音響インピーダンスの分布)を比較すれば、CO₂圧入に伴う弾性波速度の変化を抽出することができる⁵⁾。このモニタリング手法を、繰り返し地震探査(Time-lapse seismic survey)と呼ぶ。この手法は有効であるとされているが、反射法地震探査は高価である。また高価であるが故に、不連続的に(数年間隔で)

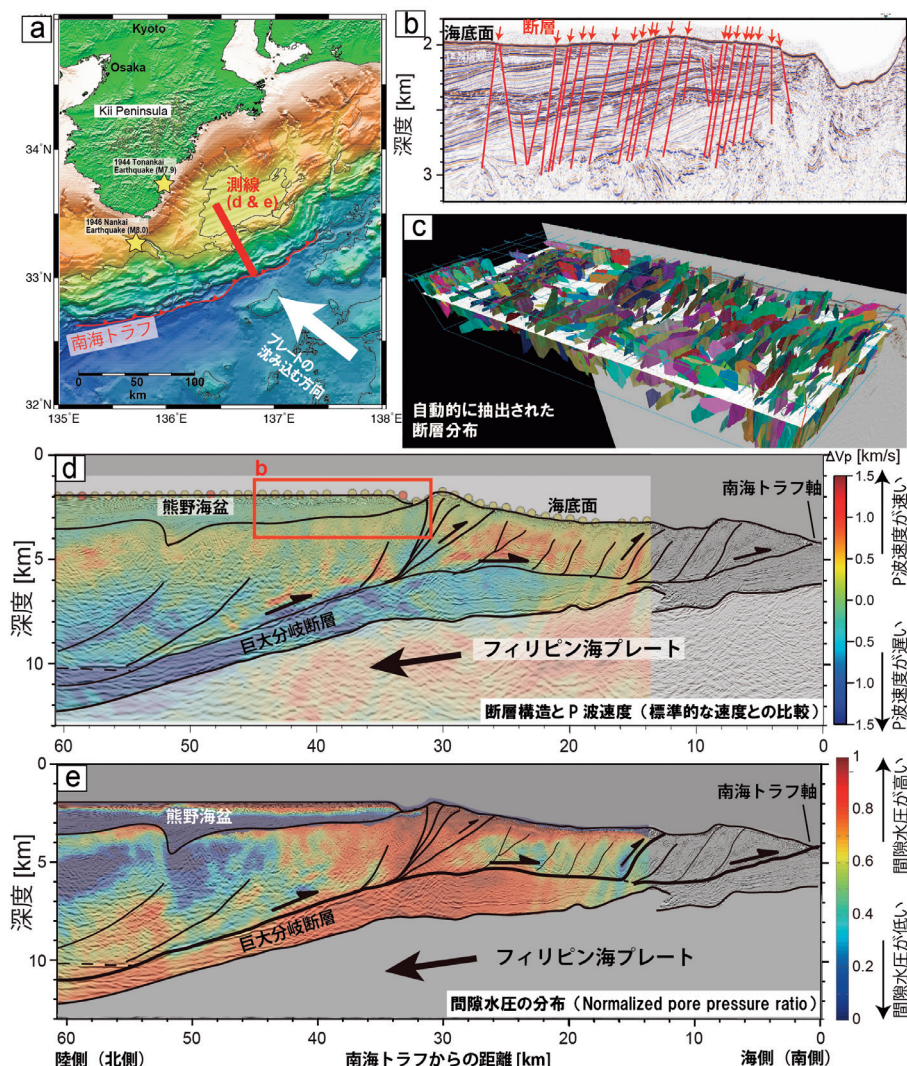


図2 (a) 南海トラフで取得された地震探査データの測線の位置(赤直線)。(b) 反射法地震探査データに見られる断層分布(赤線)と、(c) その反射法地震探査データから抽出した断層の三次元形状。場所はパネル(d)に示す。(d) 地震探査データに波形インバージョンを適用して得られたP波速度分布⁹⁾。黒線は断層分布を示す。巨大分岐断層の下側がフィリピン海プレートで、日本列島(右側)の下に沈み込んでいる。(e) 弾性波速度から推定した間隙水圧分布⁷⁾。赤色の部分が高い間隙水圧を示す。

実施される。そのため、突然の漏洩や地殻応力の不安定化（誘発地震）に対応できない可能性がある。

我々の研究グループでは、微動ノイズや人工的に微動を発生する装置を使って、連続的に圧入CO₂をモニタリングする手法の開発を行っている。我々の周囲には、大気の圧力の振動や海洋の波の散乱、風や都市部の交通など、様々な要因が定常的に微動を作り出している。このような微動は、通常地震探査データの解析においてはノイズとされる。一方で、このような微動ノイズには、それが伝播した地層の情報を含んでいる。その伝播した地層の情報を取り出すために、地震波干渉法とよばれる手法¹¹⁾を用いると、その伝播経路のインパルス応答（伝達関数）を推定することができる^{12,13)}。この方法を使えば、微動ノイズから仮想的に人工震源を用いた地震探査データを作成できる。つまり、地震計のデータだけを使って（人工震源を使わずに）、貯留層周辺の地質構造を調べることができる。また微動は常に発生しているので、貯留層内部の変化を連続的に抽出することが可能となる¹⁴⁾。実際に、微動ノイズに対して地震波干渉法を適用し、反射断面図を仮想的に作成した結果、貯留層に圧入した流体分布（時間変化）を、強振幅の反射面として捉えることに成功している（図3）。このアプローチは低コストであり、さらに連続的にCO₂の挙動をモニタリングすることができる。この手法はS/Nが低いといった課題も残っているが、日本のような漏洩経路が多い地域では、有効なモニタリング手法になる可能性がある。

3 モデリング技術

3.1 貯留層スケールでのCO₂挙動

地震探査などを用いて作成した地質モデルに対して、貯留層CO₂挙動シミュレーションを実施することで、将来のCO₂の分布を予測し、CO₂の圧入計画を立てることができる。またCO₂の圧入開始以降は、モニタリングで得られた実際の

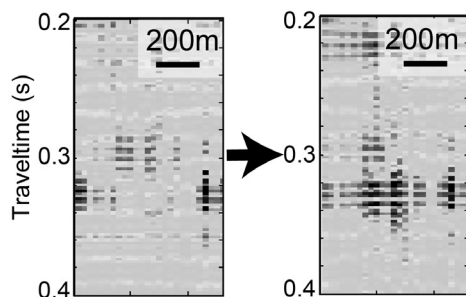


図3 微動データに対して地震波干渉法を適用して、貯留層に圧入した流体をモニタリングした結果。左側が圧入前の断面図で、右側が圧入後の断面図である。圧入した流体の分布を強振幅値として確認できる。縦軸は往復走時（反射波が戻ってくるまでの時間）であり、深度に対応する。

CO₂の挙動を、貯留層シミュレーションにフィードバックすることで、シミュレーションの精度を上げることができる。CO₂貯留を目的とした貯留層シミュレーションの場合には、数100年後といった長い期間のCO₂挙動を予測し、安全を確認する必要がある。このような長期のシミュレーションでは、CO₂の地層水への溶解や鉱物化といった化学反応を考える必要があり複雑である。近年は、そのような複雑なプロセスを考慮した大規模シミュレーションも実施され始めている¹⁵⁾。

ここでは貯留層シミュレーションの実施例として、インドネシア・グンディ CCS プロジェクトの例を紹介する（図4）。インドネシアで生産される天然ガスには、高濃度のCO₂が含まれている。このCCSプロジェクトでは、生産ガスからCO₂を回収し、ガス田の近傍にCO₂を圧入する予定である²⁾。インドネシアは、日本と同様にテクトニクス活動の活発な場所にあるため、このプロジェクトで得られる知見は、日本のCCSにも重要である。まず反射法地震探査データに波形インバージョンを適用して高解像度の地質モデルを構築した（図4a）。その地質モデルに対して貯留層シミュレーションを適用し、将来のCO₂の分布を推定した（図4b）²⁾。その結果から、圧入したCO₂は地層に沿って浅い方向（西側）へ向かい、圧入サイトの北側にある断層の方向には移動しないことが明らかとなった。また貯留層シミュレーションでは、CO₂圧入に伴う岩石内部の水圧（間隙水圧）の変化を計算することができる。今回の結果から、計画されているCO₂圧入量では、近接する断層周辺の間隙水圧の上昇量は小さいことも確認できている。日本やインドネシアといった場所では、地層の不均質性が強いいため、様々な条件（例えば浸透率；図4b, c）で貯留層シミュレーションを実施し、安全を確認する必要がある。

3.2 間隙スケールでのCO₂の挙動

CO₂貯留を目的とした貯留層シミュレーションでは、残留トラッピングを考えたり、溶解過程や鉱物過程を組み込む必要があったりと、入力パラメータが多い。そのパラメータを決定するために実験室での岩石測定が実施されるが、実験で実施できる条件は限られている。また複雑な形状の間隙内部のCO₂の挙動は、定量化が難しいことが多い。さらにCO₂の飽和度や圧入効率などは、間隙スケールのCO₂挙動が支配している。ここでは、これらの課題を解決できるアプローチとして、デジタル岩石物理を紹介する。

近年のイメージング技術が発達により、実際の岩石の間隙形状（デジタル岩石）を、 μm の解像度で抽出することができるようになった（図5a）。このデジタル岩石モデルに対して、2相の格子ボルツマン法（LBM）を用いることで、間隙内の水とCO₂挙動の計算が可能となる¹⁶⁾。LBMは圧力ポアソン方程式を解かず、また局所的な計算がメインであるため、複雑な

多孔質形状内の流れの計算に適している。しかし多くのLBMシミュレーションでは、計算の制限から、低い解像度かつ小さいスケールで実施されることが多かった。近年、Graphics Processing Unit (GPU) を用いた並列計算を行うことによって、実際の岩石の間隙モデル (図5a) に対して、高い解像度 ($3\mu\text{m}$) かつ大規模 (グリッドサイズ: 1000^3) に、LBMシミュレーションを行うことが可能になってきた (図5b)¹⁷⁾。計算領域のサイズアップを行うことで、これまでのポアスケール (μm スケール) から、岩石スケール (mm ~ cm スケール) での間隙流体シミュレーションが可能となった。このサイズアップにより、LBMシミュレーションで得られた結果を、岩石スケールで実施される実験データと比較することが可能となった (シミュレーション結果の検証が可能になった)。また、一般的な (フラクチャーを含まない) 砂岩内部の流体挙動の代表要素体積 (REV) よりも大きなモデルに対して、間隙流体のシミュレーションを実施することが可能になってきた。

図5に、貯留層の条件 (界面張力) が、圧入 CO_2 に与える影響を調べた例を紹介する。界面張力を変化させて CO_2 の挙動などを調べたところ、界面張力の小さい場合 (図5c) のほうが CO_2 は速く流れる (浸透率が高く圧入効率が良い) ことが分かった。一方、界面張力が大きい場合 (図5d) のほうが、最終的な CO_2 の飽和度は大きくなること分かった。このように、このアプローチを用いれば、界面張力に依存した CO_2 の飽和度や浸透率を定量的に推定することができる^{17,18)}。さらに CO_2 の圧入が終了した後に、水を圧入するシミュレーション

を実施すれば、残留トラップする CO_2 量を定量的に評価することができる¹⁹⁾。また間隙内の CO_2 の挙動を考慮した鉱物化モデリングでは、実験データと整合的な結果が得られるなど、鉱物トラップの定量化も可能となりつつある²⁰⁾。このようにデジタル岩石を用いることで、実際の地下で生じている CO_2

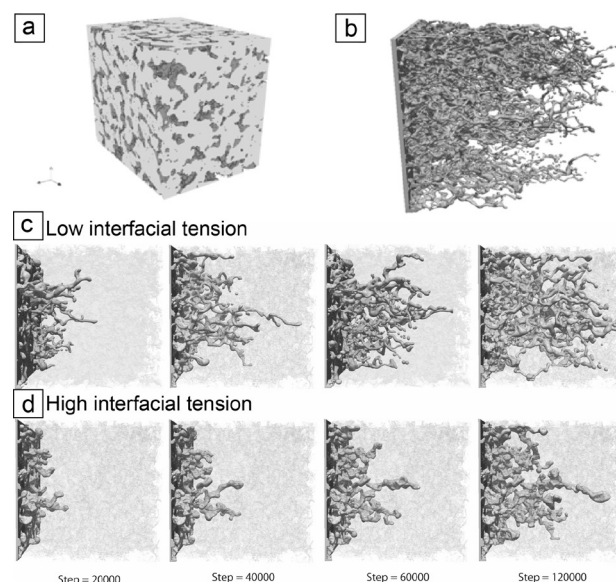


図5 (a) マイクロフォーカスCTを用いて得られたベレア砂岩の間隙形状。一辺の長さは1.5mmである。(b) 世界最高サイズのデジタル岩石モデルに二相の流体シミュレーションを実施した結果。ここでは圧入した CO_2 だけを表示し、水と岩石 (固体) は透明にしている。(c) 低い界面張力で圧入した場合の CO_2 の挙動。(d) 高い界面張力で圧入した場合の CO_2 の挙動¹⁷⁾。

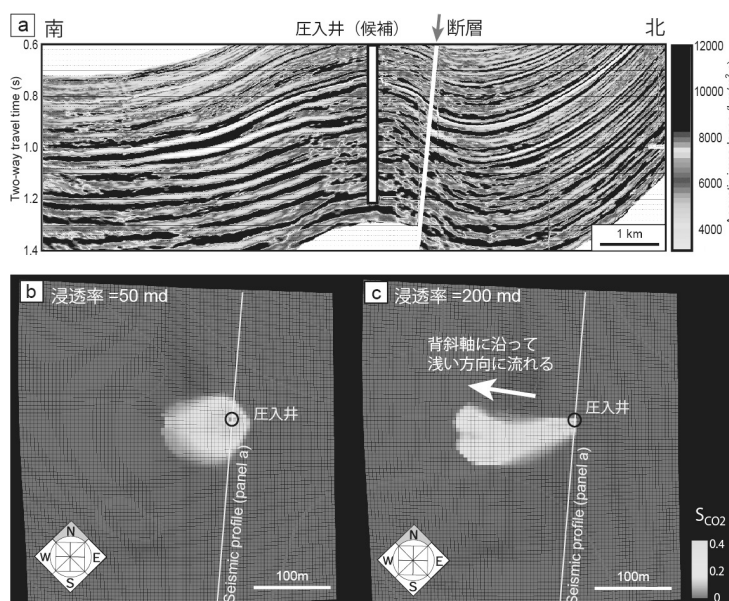


図4 地質モデルと貯留層シミュレーションの結果 (グンディ CCS プロジェクトの例)²⁾。(a) 波形インバージョンによって精度良く推定した貯留層周辺の音響インピーダンス構造。縦軸は往復走時であり、深度に対応する。(b) 貯留層シミュレーションで得られた CO_2 の飽和度。貯留層を上から見た図。左図は貯留層が低い浸透率 (50 md) の場合の CO_2 の飽和度分布、右図は高い浸透率 (200 md) の場合の結果である。

の挙動や地化学反応を、計算で再現できるようになってきた。

4 CO₂地中貯留はサイエンスが凝縮

CO₂地中貯留は、ナノスケールからキロメートルスケールまで、非常に幅の広いスケールを扱う必要がある。また長期間のCO₂の挙動を考える必要もある。さらに人工物ではなく、不均質性の強い自然の岩石を扱う必要がある。このようにCO₂地中貯留は、チャレンジングな研究要素を多く含んでいる。不確定な要素を一つずつ排除していく取り組み(研究)の継続と、学問分野の融合が、より安全なCO₂の地中貯留を可能にすると考えられる。

5 最後に、なぜCCSは必要か?

大気中のCO₂が増えているのは事実である。産業革命前に比べて1.5倍程度も増えている。地球の気候は様々なファクターによって影響を受けており、CO₂の増加だけが気候の変化をコントロールしている訳ではない。しかし、CO₂の増加が地球の気候に何らかの影響を与えているのは確かであり、また気候変動は後戻りできない(一度変化してしまうと元に戻るのが難しい)問題である。また気候だけでなく、植物や動物への影響、海洋に与える影響などを考えると、人間が引き起こしている急激な環境の変化(CO₂の増加)を、このまま無責任に放っておくことはできない。CO₂排出を押さえるために、太陽光発電といったCO₂フリーのエネルギーの開発が急がれるが、現在のCO₂フリー技術では、増加し続けるCO₂排出量を即座に食い止めることは難しい。CO₂フリーのエネルギーが開発・普及されるまでにも、一刻も早くCO₂を削減する必要がある。そのため、CO₂貯留という現実的な(近未来的な)方法も必要になると考えられる。CO₂貯留は将来へ問題を先送りしているという意見もあるが、CO₂フリー技術が開発されるまで、CCSは重要なアプローチの一つであると私は考えている。

謝辞

本稿の一部には、日本学術振興会(JSPS)の世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)の助成を受けて行った成果が含まれている。

参考文献

- 1) IPCC : IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, (2005)
- 2) T.Tsuji, K.Kitamura, T.Matsuoka, Y.Yamada, W.G.A Kadir, M.R.Sule, A.Priyonom, T.Ariadji, B.Sapiie, M.Hato, T.Takahashi, K.Onishi, D.S.Widarto, R.I.Sebayang, A.Prasetyo and Gundih CCS Project Team : Energy Procedia, 63 (2014a), 6335.
- 3) T.Tsuji, R.Hino, Y.Sanada, K.Yamamoto, J-O.Park, T.No, E.Araki, N.Bangs, R.von Huene, G.Moore and M.Kinoshita : Geochem.Geophys.Geosyst., 12 (2011), Q0AD19, doi : 10.1029/2011GC003583.
- 4) M.D.Zoback and S.M.Gorelick : Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 109 (2012), 10164.
- 5) R.A.Chadwick, D.Noy, R.Arts and O.Eiken : Proceedings of the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, (2009), ISSN : 1876 6102, Elsevier.
- 6) T.Ogawa, T.Shidahara, S.Nakanishi, T.Yamamoto, K.Yoneyama, T.Okumura and T.Hashimoto : International Journal of Greenhouse Gas Control, 5 (2011), 318.
- 7) T.Tsuji, R.Kamei and G.Pratt : Earth and Planetary Science Letters, 396 (2014b), 165.
- 8) T.Ikeda and T.Tsuji : Earth, Planets and Space, (2015), submitted.
- 9) R.Kamei, G.Pratt and T.Tsuji : Earth and Planetary Science Letters, 317-318 (2012), 343.
- 10) R.Kamei, G.Pratt and T.Tsuji : Geophysical Journal International, 194 (2013) 2, 1250.
- 11) R.Snieder and K.Wapenaar : Physics Today, 63 (2010) 9, 44.
- 12) S.Minato, T.Matsuoka, T.Tsuji, D.Draganov, J.Hunziker and K.Wapenaar : Geophysics, 76 (2011) 1, SA19.
- 13) N.Nakata, R.Snieder, T.Tsuji, K.Larner and T.Matsuoka : Geophysics, 76 (2011) 6, SA97.
- 14) S.Minato, T.Tsuji, S.Ohmi and T.Matsuoka : Geophysical Research Letters, 39 (2012) 9, L09309.
- 15) H.Yamamoto, S.Nanai, K.Zhang, P.Audigane, C.Chiaberge, R.Ogata, N.Nishikawa, Y.Hirokawa, S.Shingu and K.Nakajima : Energy Procedia, 37 (2013) 3997.
- 16) J.Tölke, S.Freudiger and M.Krafczyk : Computers & Fluids, 35 (2006) 820.
- 17) F.Jiang, T.Tsuji and C.Hu : Transport in Porous Media, 104 (2014) 1, 205.
- 18) Y.Yamabe, T.Tsuji, Y.Liang and T.Matsuoka : Environmental Science & Technology, 49 (2015) 1, 537.
- 19) F.Jiang and T.Tsuji : Water Resour.Res., (2015), Doi : 10.1002/2014WR016070.
- 20) F.Jiang and T.Tsuji : Physical Review E, 90 (2014), 053306.

(2015年3月11日受付)