

CO₂貯留研究グループ



グループリーダー
主席研究員

薛 自求

【コアメンバー】

サブリーダー・主席研究員	松田 央	主任研究員	樋脇 和俊
主席研究員	野村 眞	主任研究員	橋本 励
副主席研究員	高須 伸夫	主任研究員	指宿 敦志
副主席研究員	中島 崇裕	主任研究員	清水 信寿
副主席研究員	名井 健	主任研究員	高野 修
主任研究員	内本 圭亮	主任研究員	岡林 泰広
主任研究員	田中 良三	研究員	朴 赫
主任研究員	三戸彩絵子	研究員	伊藤 拓馬
主任研究員	張 毅	研究員	王 璐琛
主任研究員	利岡 徹馬	研究員	三善 孝之
主任研究員	西村 眞	研究員	孫 艶坤
主任研究員	小牧 博信	研究員	翟 鴻宇
主任研究員	渡辺 雄二	研究員	小谷 雅文

安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術研究開発の取組み

1. はじめに

2018年10月にオーストラリアのメルボルンで開催されたGHGT-14は、CCSに関して800を超える発表がなされ、地球温暖化対策としてのCCSの必要性が改めて強調された会議であった。海外の動向に目を向けても、特にトランプ政権になりパリ協定離脱を決定した米国がSection45Qを改正し、CO₂貯留に関する税額控除を増額するなどしてCCSに対するインセンティブを高めたことは注目に値する。欧州におけるCCSプロジェクトは若干停滞気味であるが、英国では2020年代半ばに最初のCCUS施設を運転開始するためのアクションプランを発表するなど事業化に向けた動きが進みつつある。途上国においても、中国では大規模プロジェクトが進行しており、環境問題に対する取り組みが期待されている。

中国のプロジェクトはCO₂-EORが主流であるが、中国では浸透性が低い従来CO₂-EOR技術では石油増産が難しい油田が多くある。一方CO₂貯留研究グループでは、これまで東京ガスと共同でマイクロバブルによるCO₂圧入効率の向上に取り組んできており、本技術は国内外から注目されている。このような

中、CO₂貯留研究グループは2018年11月には中国の君倫石油とマイクロバブル技術の使用許諾に関する契約を締結した。今後マイクロバブル圧入技術は低浸透性油田へのCO₂-EOR適用など事業への展開が大いに期待できる状況である。

二酸化炭素地中貯留技術研究組合の一員として研究開発を進めているNEDO事業「安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発」では、事業性向上に係る研究だけでなく、安全性向上に係る研究開発も重要である。特にCO₂の海洋での漏出は、自然変動との区別が難しく、その発生の有無を判断する適切な基準の設定が大きな課題となる。CO₂貯留研究グループでは現在、実海域において連続的に海水中のCO₂濃度観測を行い最適な基準設定のためのデータ取得・解析を精力的に実施している。

CO₂貯留研究グループでは、国際連携・海外動向調査にも取り組んでおり、2019年2月にはC2ESとの共催で米国ワシントンにおいて国際CCUSラウンドテーブルを開催した。また、苫小牧の大規模実証とも連携してCCSの早期実用化を目指している。

2. 主な研究課題と成果

2.1 大規模貯留層を対象とした地質モデルの確立

CO₂地中貯留技術を実用化するためには、地下情報の不確実性を低減させる技術が必要不可欠である。不確実性の低減に有効な手段は、適切なデータ取得と、データの有効利用であるが、CO₂地中貯留では、経済的制約および漏洩リスクの低減のために、直接的に地下情報を取得できる坑井掘削は限定的にならざるを得ない。そのため、一般的に使用できる坑井データは少なく、対象とする貯留層物性値の空間的な広がりを推定する情報に乏しい。そこで、2D/3D空間を対象とした地震探査データを有効活用することは、地下情報の不確実性を低減する技術として期待されている。過年度までに実施してきた、地震探査データを用いた堆積相解析もその一つである。2018年度は、一次元データである坑井で取得される検層データを、地震探査データと合わせて空間分布モデルへマッピングする技術の一つとして、機械学習によるアプローチの有効性を検討した。

機械学習とは、予測対象の既知のデータと異なる種類の既存データとの関連性を機械的に学習して特定した上で、その異種データを新たなデータと特定した関連性を基にして、予測対象のデータを推定する技術である。ここでは、長岡CO₂圧入実証試験サイトを対象として、地震探査データから作られるアトリビュートデータと坑井で取得した孔隙率データとの関連性を坑井沿いのサンプル点で学習した後、坑井から離れた地点におけるアトリビュートデータから対応する孔隙率の分布予測を試みた。使用した機械学習モデルは、図1 (a) に示すような全結合型ニューラルネットワークモデルで、隠れ層を多層にすることにより学習精度の向上を図ることができる。ただし、地震探査データと検層データのデータ間隔が異なっており、直接的に比較することが難しいため、データ間隔の広いアトリビュートデータは内挿によって補間を行い、データ変動周期の短い検層データに対しては平滑化を行うことで、アトリビュートデータと同等の変動周期を有するデータとした。これらの前処理によって、機械学習にとって重要な学習サンプル数を減らすことなく、地震探査データと同程度の空間分解能の地質モデルを構築

することができた。

機械学習では、訓練データに対するエラーが減少する方向に学習が進むため、訓練データに対するエラー値は一般的には小さな値を示す。それに対して、訓練に用いていない検証データに対するエラーが同様に小さければ、構築されたニューラルネットワークモデルの妥当性は高い。本検討では、坑井沿いの孔隙率分布の機械学習に当たり、全入力データのうちの75%を訓練に使用し、25%のデータを検証データとして用いたときの学習過程における両データに対する平均絶対誤差値を図1 (b) に示す。学習が進むにつれ、訓練エラー（青色）が減少すると同時に、検証データに対するエラー値（橙色）も減少している。そのため、本検討で用いたニューラルネットワークモデルが、新たなデータに対しても同等の予測精度を有していることがわかる。

続いて、構築した坑井沿いの孔隙率分布の予測モデルを用いて、長岡サイトの貯留層における孔隙率の空間分布を推定した。貯留対象層における予測孔隙率の三次元俯瞰図および観測井と圧入井を含む二次元断面図を図2に示す。二次元断面図における坑井位置には、観測された孔隙率を重ねて示す。貯留対象層の中深度付近において坑井で観測されている高孔隙率域（赤～暖色）が薄い層状に広がる様子が見られる。また、坑井より北西方向では、貯留対象層浅部（CO₂圧入区間）において、比較的高い孔隙率分布域が広がることが予測されている。

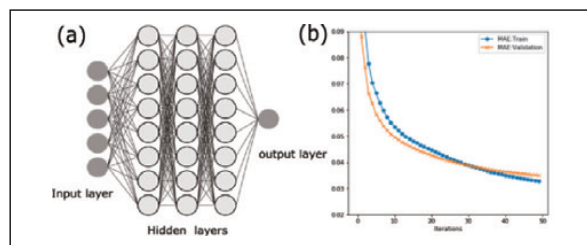


図1 (a) 全結合型ニューラルネットワークの概念図、
(b) 訓練データと検証データの平均絶対誤差

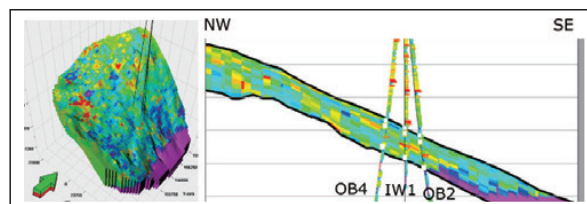


図2 貯留層の孔隙率空間分布図

機械学習を用いたアプローチは、非常に高速で簡便に実施することができるため、CO₂貯留プロジェクト初期の圧入前評価時点における貯留量評価やCO₂圧入シナリオテストに用いる地質モデル構築に有効な技術である。さらに、近年発展目覚ましい深層学習技術によって、推定精度のさらなる向上が期待されている。CO₂貯留研究グループでは地質モデルの確立に、より適した学習手法の構築に取り組んでいる。

2.2 CO₂漏出検出・環境影響評価総合システムの構築

海底下地中にCO₂を貯留する場合、CO₂が海中に漏出していないことを確認するために、また万が一CO₂が漏出した場合にも速やかに漏出を検出できるようにするために海洋の監視を行うことが法令で定められている。漏出が起きていないことを示すことは、社会受容性という観点からも重要なことである。

CO₂は海底から主に気泡として漏出すると考えられるが、CO₂気泡は海水に溶けやすい。そこで、CO₂貯留研究グループでは、漏出監視手法として、CO₂気泡を検知する手法と、海水に溶けたCO₂の指標の一つである海水のCO₂分圧 (pCO₂) の異常値を検出する手法の研究開発を進めてきた。本稿では、海水に溶けている酸素濃度の指標の一つである溶存酸素濃度飽和度 (DO%) とpCO₂が逆相関を持つことを利用したpCO₂の異常値判定手法に関して、ベースライン調査 (異常値判定基準値を作成するための観測調査) の必要年数についての研究を紹介する。

この研究には大阪湾で観測されたデータを用いている。大阪湾では40年以上に渡って大阪府が定点で年に4回 (2月、5月、8月、11月) の四季調査を継続している。CO₂貯留研究グループでは、2002年～2010年の9年分のデータを解析している。

海水には自然状態でもCO₂が溶け込んでおり、その溶解量の指標であるpCO₂は一定の幅で自然変動している。そのため、pCO₂の値で漏出を検出しようとすると、必ず“誤検出”と“漏出の見落とし”が起きる。誤検出は漏出が起きていないにも拘わらず異常値と判定すること、漏出の見落としは漏出が起きているにも拘わらず正常値と判定することである。誤検出を少なくしようとして異常値判定基準値を高く設定すれば漏出

の見落としが増え、漏出の見落としを少なくしようとして異常値判定基準値を低く設定すれば誤検出が増える。そこで、異常値判定基準を設定する際にはどの程度の誤検出や漏出の見落としが起これ得るのかを見積もる必要がある。本研究においては、pCO₂と溶存酸素飽和度の回帰における95%予測区間 (観測されたpCO₂の95%が含まれると予測される範囲: 図3の二本の点線の間) の上限を異常値判定基準値とする。この場合、理論的には2.5%の誤検出が生じる。

大阪湾ではCO₂貯留を行っていないためCO₂漏出時のデータは解析データに含まれない。したがって、判定基準値を超えているデータの割合を誤検出率とみなすことができる。図3 (a) は、解析に使用した9年分の全データ (465個) をプロットしたpCO₂とDO%の散布図に、9年分の全データから計算した95%予測区間 (緑点線) を重ねたものである。15個のデータが判定基準値 (上の緑点線) より上にプロットされている。全データ数が465個なので3.2%の誤検出率となり、理論値に近い。しかし、判定基準値に用いるデータ数が少ないと、場合によっては非常に高い誤検出率になることがある。図3 (b, c) に、2005

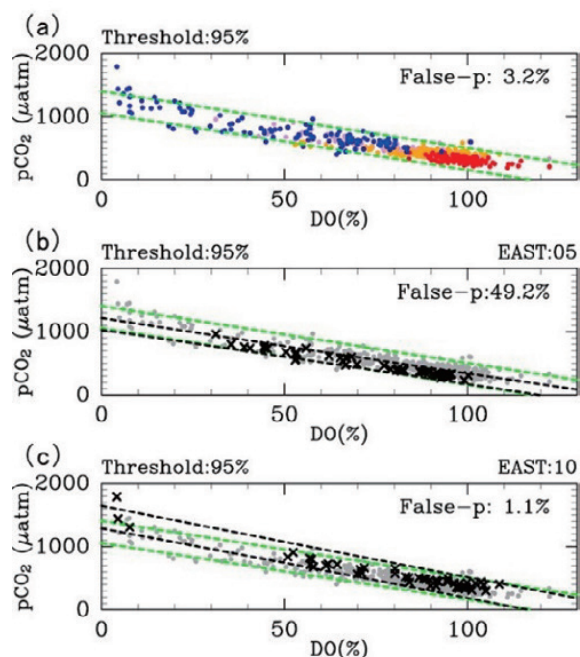


図3 pCO₂とDO%の散布図。
 (a) 2002年～2010年の全てのデータ (色は観測月を表す; 赤: 2月、ピンク: 5月、青: 8月、橙: 11月) とその95%予測区間 (緑点線)。
 (b) 2005年のデータ (x) の95%予測区間 (黒点線)。
 (c) 2010年のデータ (x) の予測区間 (黒点線)。95%予測区間上限を異常値判定基準としている。

年のデータのみ、2010年のデータのみで判定基準値を作成した例を示す。これらの判定基準値を9年分の全てのデータに適用すると、2005年データによる判定基準値の場合には、誤検出率が49.2%になった。図3 (b) の黒×印が基準値を作るのに使ったデータであるが、この年のデータは、9年分のデータの中でpCO₂の下限付近に集中している。そのため、95%予測区間が9年分のデータによるものよりずっと狭く、判定基準値（上の黒点線）も9年分のデータで作った基準値（上の緑点線）に比べて低い。その結果、誤検出が多くなり、2.5%程度の誤検出率の基準値と想定しているにも関わらず、約2回に1回の割合で、自然変動による高値を異常値と誤判定してしまう判定基準値となっている。一方、2010年のデータによる判定基準値の場合、誤検出率が1.1%と低い（図3c）。誤検出率は低いが、この場合には判定基準値が高めに設定されているため、漏出が起きた場合には検出されにくくなる。したがって、必ずしも誤検出率が低ければ良い基準値であるということにはならない。

このようにしてN（1 ≤ N ≤ 8）年のデータを用いて₉C_N通りの基準を作り誤検出率を計算した結果が表1である。基準を作るのに用いる年数が少ないと、想定している誤検出率（2.5%）を大きく超える誤検出率になることがある。検討の結果、少なくとも4～6年のデータを用いて基準を作ることが望ましいと考えられる。

2018年夏季より大阪湾で連続観測を行っている。連続観測データと今回解析した長期の四季調査のデー

表1 基準作成に用いる年数と誤検出率

年数(N)	₉ C _N	誤検出率 (%)
1	9	1.1~49
2	36	1.3~20
3	84	1.5~12
4	126	1.7~8.8
5	126	1.7~7.1
6	84	1.9~6.0
7	36	2.2~5.1
8	9	2.5~3.8
9	1	3.2

タを組み合わせることで、CO₂漏出の有無を判定する基準設定のためのベースライン調査における適切な観測頻度や期間を明らかにできると考えられる。

2.3 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発

CO₂圧入によって圧入井周辺の地表が隆起したり、天然ガスの生産によって地表が沈降したりする現象は、アルジェリアで行われていたIn Salahプロジェクトのサイトで明確に観測された。流体圧入に伴う地層の変形量が大きくなると、貯留層を覆う遮蔽層に亀裂が生じる可能性があり、CO₂地中貯留の安全性に影響を及ぼす恐れがある。このような地層変形の監視には、地下深部から地表まで連続的に観測できることが望ましく、流体圧入に伴う対象層の圧力増加の影響がどのように地表の変位をもたらしたかの検討にも必要である。しかし、従来の地中変位計は埋設場所を事前に決める必要があるほか、作業の観点から多数の変位計を埋設できないため、深度方向に連続的なモニタリングには適さない。分布式光ファイバーセンシング技術を利用すれば、深度方向に連続的なデータ取得が可能となる。以下では室内実験の結果を紹介するほか、光ファイバー測定に地層変形監視技術の有効性を示す。

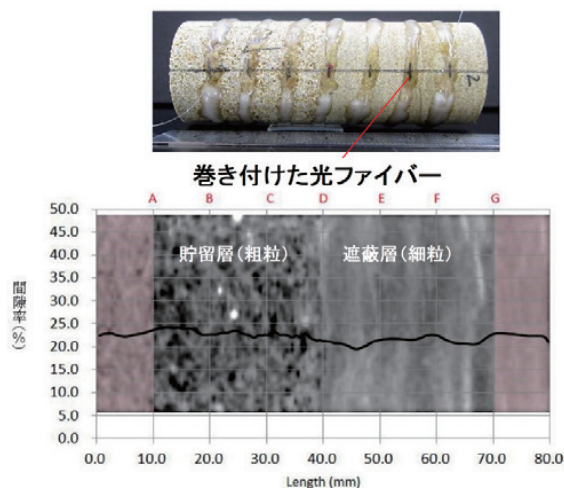


図4 光ファイバーを巻き付けた砂岩試料及びそのX-CTイメージ

図4は地下深部の貯留層と遮蔽層の物理特性を模倣したユニークな砂岩試料を示している。室内実験では地下深部の温度圧力条件を再現したうえで、砂岩試料左端の粗粒部（貯留層）にCO₂を注入しながら、医療

用X-CT装置でCO₂の挙動を可視化した。砂岩試料右端の細粒部は浸透率が低く、粗粒部に溜まるCO₂を封入する遮蔽層の役割を果たしている。細粒部の遮蔽能力を超えると、CO₂は粗粒部から細粒部へ浸入することになる。この室内実験において、X-CT装置は粗粒部にCO₂が溜まっていく過程、細粒部に浸入する様子を可視化することができる。また、砂岩試料に巻き付けた光ファイバーはCO₂が粗粒部に集積する過程の砂岩試料の膨張量や細粒部への力学的影響などを監視することができるようになっている。

界を超えることはなかったが、50mm~60mm区間ではわずかな膨張ひずみが観測された。遮蔽層がわずかな変形を生じるものの、貯留層に溜まるCO₂をしっかりと封じ込んでいることがわかる。室内実験ではCO₂注入圧を大きくし、遮蔽層に浸入する現象も模擬してみたところ、CO₂浸入によって遮蔽層のひずみが急激に増加することが観測された（図6参照）。この室内実験の結果より、圧入井に光ファイバーを設置すれば、遮蔽層の力学的安定性や貯留層からのCO₂漏えいが監視できることが明らかになった。

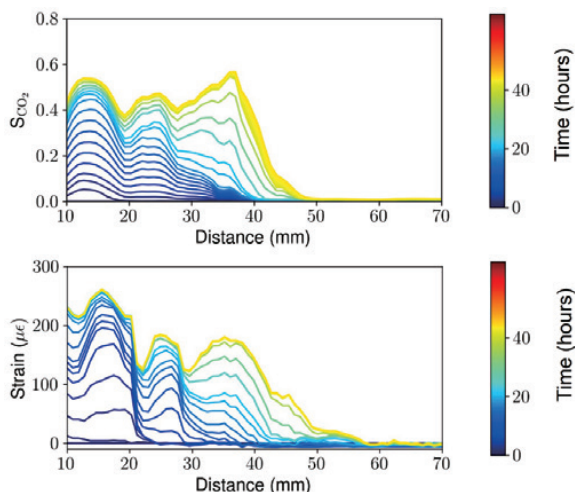


図5 砂岩試料長軸方向におけるCO₂飽和度や膨張ひずみの分布

図5は注入開始後、粗粒部にCO₂が徐々に溜まっていくとき、砂岩試料の長さ方向におけるCO₂飽和度とひずみの分布を示している。CO₂飽和度はX-CTイメージから求めたものであり、ひずみは光ファイバーによって測定された試料の膨張量である。試料左端から注入されたCO₂は45mm付近の粗粒部と細粒部の境

2.4 国際連携および海外動向調査

RITEは、CCSに関係する国際機関やと国際的な枠組みとの連携を通してCCSの普及に貢献するとともに、CCSの海外動向の調査を行っている。ここでは、2018年の海外動向と国際的な枠組みの動向に分けて以下にまとめる。

(1) CCSに係る海外動向

英国では、政府により設置された外部有識者からなるタスクフォースがCCSの普及戦略案を2018年7月に公表した。CCSの普及にはCO₂の輸送および貯留用の共用インフラを核とし、将来の拡張が容易な“クラスター”による推進が有効であるとして、CCSの2030年代の本格普及に向け、2つ以上のCCSクラスターを2020年代半ばに稼働させることを前提に16の提言を示した。CCSの普及は、クラスターにより推進し、かつ、適切なビジネスモデルとリスク分担が確立されれば、民間主導で可能であるとしている点が注目される。一方、政府は2018年11月にCCSに関する

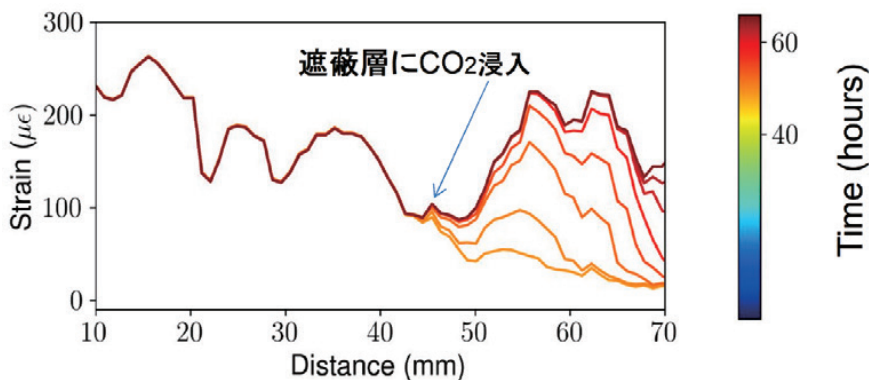


図6 遮蔽層へのCO₂浸入に伴うひずみの急激な増加の様子

行動計画を公表した。タスクフォースによる提言を踏まえたものになっているが、2020年代半ばに稼働させるクラスターは1件となっている。19の具体的なアクションが示されており、これらは最初のプロジェクトの稼働に向けたアクションと、2030年代の本格普及に向けたアクションに大別される。

ノルウェーで検討されていた産業CCSプロジェクトは、CO₂排出源が当初の3つから2つに減ったものの、その基本設計（FEED）の実施が2018年5月に議会により正式決定された。このプロジェクトにおいても、CO₂の船舶輸送と海底下貯留は共用のインフラとなる。プロジェクトの最終投資判断は、2020年度とされている。

CCS分野における共用インフラの草分け的な存在は、米国の石油増進回収（EOR）向けのCO₂パイプラインのネットワークであると言える。この本場の米国では2018年2月に、地中貯留されたCO₂量に応じて付与される税額控除のスキームに、控除額が増額されるなどの改正が施された。この改正を受けて、複数のCO₂回収プロジェクトが新たに検討されるなどしており、CCS普及の活性化が期待されている。

(2) CCSに係る国際枠組みの動向

CCSの共用インフラは国際的にも関心が高く、CCSに係る国際枠組みである炭素隔離リーダーシップフォーラム（CSLF）の技術グループにおいて、共用インフラを対象としたタスクフォースが2018年10月の会合で設置された。まずは共用インフラの現状をレビューし、その結果を踏まえて、タスクフォースの継続の必要性が検討され、継続する場合には具体的な方針が策定されることになっている。なお、同会合において、技術グループの副議長の改選が行われ、日本が豪州およびカナダと共に選出された。日本、ひいてはアジアの視点からの国際CCSコミュニティへの貢献が期待されている。

クリーンエネルギー大臣会合の枠組みにおいては、米国が2017年にCCSに係るイニシアチブの設置を提案していたが、その設置が2018年6月の大臣会合において正式に合意された。同イニシアチブでは、クリーンエネルギーコミュニティにおけるCCSの認知度の向上のほか、CCSと金融の両コミュニティ間のコミュ

ニケーションの活性化などに取り組みことになっている。

5年間でクリーンエネルギーに関する研究開発への公的投資額を倍増することを目標に掲げたミッションイノベーションと呼ばれる国際的な取り組みにおいては、CO₂の回収、貯留、利用、横断的分野の4分野における革新的な研究開発の優先分野を提示したCCSに関する報告書が2018年5月に公表された。CCSコミュニティは、既存技術によるCCSの普及にまい進するとともに、飛躍的な普及を目指して、CCSのコストの大幅な低減に資する研究開発にも取り組むことが求められる。