

京都大学	博士（工 学）	氏名	金 鍾旭
論文題目	Experimental and simulation studies on evaluation of reservoir characterization and storage capacity for sequestration of carbon dioxide (CO ₂ 地中貯留における貯留層特性と貯留量評価の実験とシミュレーション研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、二酸化炭素(CO₂)の地中隔離において発生する CO₂ の地下深部貯留層内での CO₂ の流動挙動に対して、岩石コア試料を用いた室内実験を実施し、さらにその解析結果と、岩石コア試料内部での CO₂ の流動シミュレーション結果との比較検討を行い、CO₂ の分布状況に及ぼす貯留層特性と貯留量の関係、さらにその評価法に関してまとめたものであって、7章からなっている。			
第1章は緒言であり、本論文で考察した CO₂ の地中隔離の技術に関して概要を述べるとともに、地中に存在する CO₂ の分布域のモニタリング技術の問題点を明らかにし、本研究の背景と目的を述べている。			
第2章では、CO₂ 排出量を削減するための有効な技術として知られている CCS 技術(二酸化炭素の分離回収および地下貯留)について概説している。さらに CO₂ の地中貯留メカニズムをして現在提案されている、物理的トラッピング、残留ガストラッピング、溶解トラッピング、鉱物固定トラッピングに関してそれらのメカニズム、これらのトラッピングの長所と短所を概説している。地下深部においては温度・圧力が上昇するため、CO₂ は相変化を起こし、超臨界状態になる。ここではこの条件に関して議論している。さらに地下での CO₂ の分布領域を知るための手法である地球物理的探査手法と岩石物理学との関連性を論じ、本研究での課題の明確化を行った。			
第3章では、室内実験で使用されるベレア砂岩サンプルの均質性と、多胡砂岩サンプルの不均質性を、顕微鏡写真や粒径分布などから説明した。また多胡砂岩の不均質性を際だたせている層理面の分布に関して詳細に検討を加えた。さらに岩石コア試料への P 波速度測定に利用するピエゾ素子と、比抵抗測定に利用する電極の取り付け方法、実験の手続き、実験手順について詳細に論じた。今回の実験の特徴は弾性波と比抵抗が同時に計測されていることであり、そのための試料の準備方法と計測装置について概説した。実験は水で飽和された岩石試料に対して、超臨界状態の CO₂ を圧入し、圧入に伴う弾性波速度の変化と、比抵抗値の変化を計測した。			
第4章では、排水過程(CO₂ 注入)および吸水過程(水注入)中に比抵抗および P 波速度の変化を測定するために行なわれた室内実験について説明した。P 波速度は合計 16 個の圧電素子を用いて計測された。その結果、均質砂岩試料と見なすことが可能なベレア砂岩と、不均質試料と見なすことが可能な多胡砂岩において、CO₂ の圧入に伴って、圧入側から順次 P 波速度の低下が観測された。			

京都大学	博士（工 学）	氏名	金 鍾旭
さらにこれらのデータを用いてトモグラフィ解析を行い、岩石試料中の P 波速度の分布を明らかにした。比抵抗変化を計測した結果、CO₂ の圧入に従って順次比抵抗の値の上昇が計測された。また吸水過程においては、弾性波速度が上昇し、比抵抗が低下する現象が観測された。これによって吸水過程において、間隙に存在していた超臨界 CO₂ が、圧入された水によって置換されていることが明かとなった。その結果 CO₂ の圧入によって弾性波、比抵抗がほぼ同時に変化を始めたことから、物理探査法を適用して地表から CO₂ の分布域のモニタリングの可能性が示された。 第 5 章では、排水過程において水に置換された移動可能な CO₂ と、吸水過程において、一部の CO₂ が水に置換されずに岩石間隙中に残った残留ガスに関して詳しい考察を与えた。CO₂ の地中圧入時に地表からの物理探査法によってその分布域を推定するモニタリングは安全性の議論において重要である。第 4 章で取得された弾性波のデータと比抵抗のデータを基に、CO₂ の飽和度の推定式を構築した。さらにこの式の一般性を確認するために、新潟県長岡市で実施された CO₂ の圧入実施サイトで取得されたデータに適用し、良好な結果を得た。残留ガスは、深部貯留層内でそれ以上流動できないガスであるため、安全な CO₂ の地下貯留において重要な役割を持っており、その検討が期待されていた。今回の実験により不均質性を有する砂岩の場合の残留ガスの飽和度は約 10% であり、均質な砂岩での残留ガス飽和度は約 5% であった。これは不均質性により、残留するガスの割合が増加していることが示唆された。 6 章では、単純化したモデルを考え、CO₂ 圧入試験に対する流動シミュレーションを TOUGH2 シミュレータを使用して行った。シミュレーション結果はトモグラフィ解析の結果と高い整合性を示した。また不均質砂岩における飽和度の分布を、岩石コア内に存在する層理面の傾きによって説明することに成功した。 第 7 章は結言であり、本論文で得られた成果について要約している。第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章の内容を個別に要約した後、本論文の成果の今後の展開に関して言及している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、二酸化炭素(CO₂)地中貯留の際 CO₂ 分布域のモニタリングに利用される物理探査法利用の基礎となる CO₂ 飽和度分布の評価手法の開発と、貯留層の特性による CO₂ 飽和度分布の違いの検討、残留ガス飽和度分布の評価の三つを目的とし、室内実験とシミュレーションを組み合わせで議論している。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 岩石コア試料を用いた室内実験の結果、P 波速度は、CO₂ 飽和度が 20% 以上の時には速度変化が見えなかった。一方、比抵抗を用いた計測においては CO₂ の飽和度が 20%を超えても比抵抗値の上昇が観測された。このため、CO₂ 飽和度の推定においては、比抵抗の計測は、弾性波速度による CO₂ 飽和度の予測の難しさを効果的に補うことができることが示された。比抵抗と弾性波速度を結合することによって、砂岩試料に圧入された超臨界 CO₂ 挙動及び CO₂ 飽和度分布が予測できた。以上より、CO₂ 地中貯留のモニタリングによる CO₂ 飽和度分布の評価法として両者を利用する事で、広い範囲の飽和度の予測が可能であることを示すことが出来た。またその際、計測値から飽和度を推定する理論式を完成させた。
2. 均質なモデル及び不均質なモデルを用いて超臨界 CO₂ 注入の際の CO₂ 流動シミュレーションを行った。その結果と、均質な岩石試料及び不均質な岩石試料を用いた超臨界 CO₂ 圧入実験で取得された比抵抗と弾性波速度の実験結果と比較することで、CO₂ 飽和度分布の予測を行った。不均質な岩石試料に CO₂ を圧入した場合、CO₂ 飽和度は約 50%であった。一方、均質な岩石試料ではCO₂ の飽和度は約 30%であり、不均質砂岩の方がより多くの CO₂ がトラップされることが解った。以上より、貯留層の特性によって CO₂ 飽和度分布の違いが明らかとなった。
3. 均質な CO₂ 飽和砂岩及び不均質な CO₂ 飽和砂岩に水をそれぞれ圧入し、比抵抗と P 波速度の測定実験を行った。この計測結果から残留 CO₂ 飽和度分布を推定した。不均質な岩石試料に注入した残留 CO₂飽和度は約 10%となった。一方、均質な岩石試料に圧入した場合の残留 CO₂ 飽和度は約 5%であった。以上より、貯留層の特性の違いはCO₂ の残留飽和度に影響することが解った。さらに残留ガス飽和度は 5%以上ある事が始めて明らかとなった。

以上、本論文は CO₂ 地中貯留における貯留層の特性と貯留量との関係を明らかにするとともに、飽和率の評価法を提案した。さらに本論文で計測された残留ガスの飽和度は、将来 CO₂ の地中貯留の貯留量予測において大変重要な研究成果と言える。これらの研究成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 23 年 2 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。