

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760587

研究課題名（和文） X線CT法による岩石内超臨界 CO<sub>2</sub> 移行プロセスの高精度分析研究課題名（英文） Analysis of Migration Process of Super Critical CO<sub>2</sub> in the rock by means of X-ray CT

研究代表者：

佐藤 晃（SATO AKIRA）

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：40305008

## 研究成果の概要：

本研究では、地下帯水層の貯留層としての性能、あるいは貯留後の超長期に渡る CO<sub>2</sub> 地中貯留の安全性を評価の実施を目的として、超臨界状態における帯水層内での水→CO<sub>2</sub> 置換プロセス、貯留後の超臨界 CO<sub>2</sub> の拡散や流動のプロセスを、非破壊検査法の 1 つであり、かつ、高精度の分解能を有する X 線 CT 法により評価分析した。具体的には、X 線 CT 法を岩石への超臨界 CO<sub>2</sub> 圧入室実験に適用して圧入・溶解プロセスを X 線 CT スキャナーにより高精度に可視化し、微視的な視点から CO<sub>2</sub> の岩石内挙動を分析した。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,200,000	0	2,200,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	270,000	3,370,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム

キーワード：CO<sub>2</sub> 地中貯留、X 線 CT、超臨界 CO<sub>2</sub>

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化が原因と考えられている異常気象が世界各地で発生していることが報告されている。このような地球規模での気候変動の要因としては、石炭あるいは石油といった化石燃料の大量消費によって大気中に放出された温室効果ガスである二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の急激な濃度上昇が挙げられる。日本における大規模な CO<sub>2</sub> 排出源として、工場などの産業部門および発電所等のエネルギー変換部門が全体の 5 割弱を占め

ており、有効な削減対象として注目されている。こうした大規模な排出源では集約的に CO<sub>2</sub> を集積することが可能であり、これらを処分する方法として、地下深部の帯水層に CO<sub>2</sub> を貯留する「地中貯留」が有望視されている。

地中貯留とは難透水性の地層を上部に持つ帯水層に CO<sub>2</sub> を貯留する方法である。ここでは、エネルギーコストの観点から深度 1,000m 程度の帯水層が主な貯留対象となっている。深度に対する地下の温度と圧

力の増加勾配をそれぞれ 30 /km および 10.5MPa/km 程度と仮定すると、地下 800m 以深の帯水層では温度と圧力が CO<sub>2</sub> の臨界点を超過しており、CO<sub>2</sub> は高い圧縮性（気相的）と大きい密度（液相的）を有する超臨界状態となる。岩盤内における超臨界 CO<sub>2</sub> の挙動に関して、これまで弾性波探査手法が応用され、岩石試料を用いた検証が行われた結果、CO<sub>2</sub> の挙動をある程度モニタリング可能であることが示されている。また、弾性波探査手法により圧入された CO<sub>2</sub> の挙動のみならず CO<sub>2</sub> の貯留量評価も試みられている。これらの方法は、実フィールドにおける大規模な CO<sub>2</sub> の挙動モニタリングに応用できる反面、分割された領域での平均的な現象を見ているに過ぎず、さらに微視的な現象を捉えるには他の方法を用いる必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、地下帯水層の貯留層としての性能、あるいは貯留後の超長期に渡る CO<sub>2</sub> 地中貯留の安全性を評価の実施を目的として、超臨界状態における帯水層内での水→CO<sub>2</sub> 置換プロセス、貯留後の超臨界 CO<sub>2</sub> の拡散や流動のプロセスを、非破壊検査法の 1 つであり、かつ、高精度の分解能を有する X 線 CT 法により評価分析する。具体的には、X 線 CT 法を岩石への超臨界 CO<sub>2</sub> 圧入室に適用して圧入・溶解プロセスを X 線 CT スキャナーにより高精度に可視化し、微視的な視点から CO<sub>2</sub> の岩石内挙動を分析する。さらに、従来から用いられている弾性波探査法による評価結果を比較検討することにより、実フィールドにおけるモニタリング結果の高精度評価に寄与するとともに、地中における CO<sub>2</sub> 挙動シミュレーションの高精度化のための資料を供することを目的としている。

## 3. 研究の方法

### (1) 岩石内超臨界 CO<sub>2</sub> 挙動可視化システムの開発

X 線 CT スキャナー内で超臨界状態を安定的に維持しつつ、X 線 CT 撮影が実施可能な岩石内超臨界 CO<sub>2</sub> 挙動可視化システムの開発に主眼を於いて研究を実施した。具体的には、比較的密度が小さく引張強度の高いカーボンファイバー樹脂を用いた圧力容器を設計

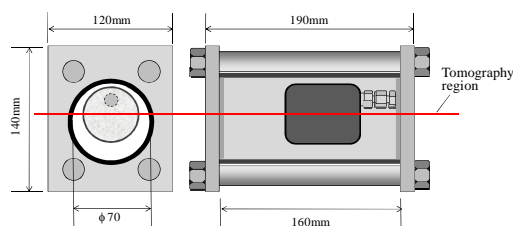


図1 超臨界 CO<sub>2</sub> 貯留装置

製作した。

### (2) 超臨界 CO<sub>2</sub> 挙動定量化手法の開発

空隙内が超臨界 CO<sub>2</sub> で置換されるプロセス、ならびに置換後の挙動を X 線 CT 画像から定量化する手法を開発した。また、画像データからの高精度変化量抽出法の開発を行い、超臨界 CO<sub>2</sub> 挙動の経時変化求め、X 線 CT 画像データから水・超臨界 CO<sub>2</sub> の置換率を評価する方法を開発した。

## 4. 研究成果

本研究では、超臨界 CO<sub>2</sub> の岩石内での圧入・流動の様子を、非破壊検査法の一つである X 線 CT スキャナー法を用いて可視化し、X 線 CT 画像データから多孔質岩石試料内での CO<sub>2</sub> の圧入・流動メカニズムを明らかにするとともに、空隙を満たしている水が CO<sub>2</sub> で置換された量を示す置換率を定義し、岩石の構造と置換率の関係、圧入方向と置換率の関係について論じた。

まず本研究では、岩石試料内部での CO<sub>2</sub> 流動現象を産業用 X 線 CT スキャナーにより可視化するために、新たに X 線 CT 用超臨界 CO<sub>2</sub> 流動試験システムを開発した。本試験システムを用いて実験に供されたベレア砂岩の固有浸透率の測定した結果、堆積層に対して平行、垂直方向で透水特性に大きな異方性があることを示した。

次に、本システムを用いて岩石試料への CO<sub>2</sub> 圧入試験を実施し、その様子を X 線 CT スキャナーにより可視化した（図2）。原画像からは CO<sub>2</sub> の挙動を明瞭に判別することはできなかったが、画像間差分法ならびにデータのスタッキングにより、CO<sub>2</sub> の圧入により空隙内の水が CO<sub>2</sub> に置換の様子をとらえることができた。また、この結果より、実際に岩石試料内部で水が CO<sub>2</sub> に置換された割合、すなわち、置換率  $R_V$  を評価した（図3）。その結果、固有浸透率の異方性と同様に、置換率にも異方性があることが明らかになり、同じ岩石試料であっても堆積層に垂直に CO<sub>2</sub> を

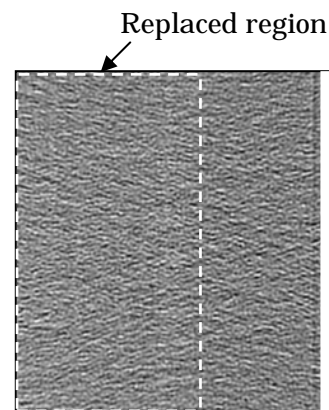


図1 CO<sub>2</sub> 注入時の X 線 CT 差画像

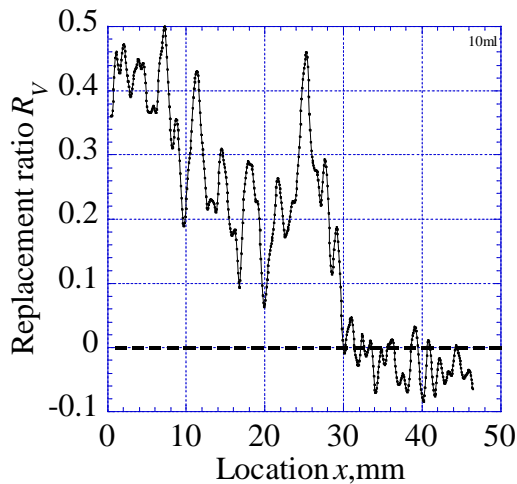


図3 圧入軸方向の置換率  $R_V$  の分布

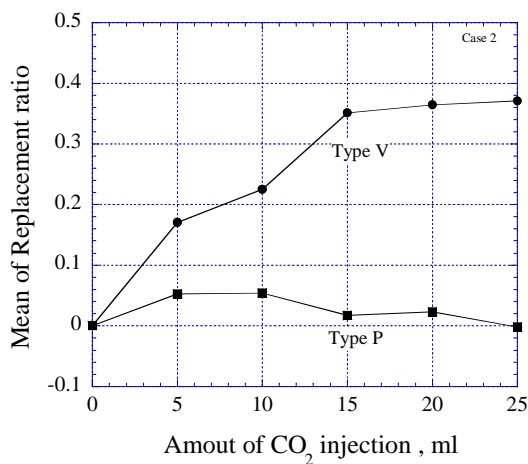


図4  $\text{CO}_2$  圧入流量による平均置換率  $R_V$  の変化

圧入した場合には置換率は 0.4 程度の値を取り、水平方向に圧入した場合よりも大きいことが分かった(図4)。

水と  $\text{CO}_2$  の密度差の影響を検討するために、水平方向だけでなく鉛直方向に対して上向き、下向きの3種類の方向に  $\text{CO}_2$  の圧入を実施した。その結果、鉛直方向に圧入を行った場合の方が貯留率がやや大きくなる傾向を示した。

地球環境産業技術研究機構(RITE)で用いている  $\text{CO}_2$  貯留可能量の算定式から、本研究で定義した置換率  $R_V$  を評価した結果  $0.125 < R_V < 0.250$  程度であった。しかし、本研究で用いたベレア砂岩の場合には、圧入方向により  $\text{CO}_2$  の貯留量が大きく異なっていた。本研究で示したように岩石の異方性などを事前に評価することにより、より詳細な地中貯留計画の立案が可能になるものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

佐藤晃, 有水拓人, 田中克也, 塩手隆志, X線CT法による多孔質岩石内  $\text{CO}_2$  流動および貯留現象の分析, Journal of MMIJ, 掲載決定済み, (2009), 査読有り

佐藤晃, 有水拓人, 米村拓峰, 澤田淳, X線CT法による亀裂内トレーサー移行プロセスの可視化と分析, Journal of MMIJ, 掲載決定済み, (2009), 査読有り

米村拓峰, 佐藤晃, X線CT法による亀裂内およびマトリクス内部の移流・拡散現象の可視化, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, Paper No.7(CD-ROM), (2008), 査読有り

有水拓人, 田中克也, 米村拓峰, 佐藤晃, X線CT法による水-空気置換プロセスにおける置換率と残留飽和度の評価, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, Paper No.8(CD-ROM), (2008), 査読有り

A.Sato and A.Sawada, Analysis of tracer migration process in the crack by means of X-ray CT, Proceedings of 11th ISRM Congress, Vol.1, pp.15-18 (2007), 査読有り

[学会発表](計11件)

米村拓峰, 佐藤晃, X線CT法による亀裂内およびマトリクス内部の移流・拡散現象の可視化, 第12回岩の力学国内シンポジウム, 2008.9, 宇部市

有水拓人, 田中克也, 米村拓峰, 佐藤晃, X線CT法による水-空気置換プロセスにおける置換率と残留飽和度の評価, 第12回岩の力学国内シンポジウム, 2008.9, 宇部市

田中克也, 吉田和晃, 佐藤晃, X線CT法による多孔質岩石内  $\text{CO}_2$  流動現象の可視化, 材料学会第57期学術講演会, 2008.05, 鹿児島市

田中克也, 有水拓人, 佐藤晃, X線CTを用いた多孔質岩石内  $\text{CO}_2$  貯留分析, 資源・素材学会九州支部平成20年度春季例会, 2007.5, 福岡市

米村拓峰, 佐藤晃, 菅原勝彦, 澤田淳, X線CTによるトレーサー移行プロセス分析方法の開発, 資源・素材学会平成19年度春季大会, 2007.3., 東京都

有水拓人, 米村拓峰, 佐藤晃, X線CT法による岩石内水-空気置換プロセスの可視化と分析, 材料学会第56期学術講演会, 2007.05., 名古屋市

有水拓人, 米村拓峰, 佐藤晃, 多孔質岩空隙内の水-空気置換プロセスの分析, 資源・素材学会九州支部平成19年度春季例会,

2007.5、福岡市

谷口貴子、緒方奨大、佐藤晃、菅原勝彦、X線CT 透水試験の画像処理に関する検討、資源・素材学会九州支部平成 19 年度春季例会、2007.5、福岡市

A. Sato, A Sawada, Analysis of tracer migration process in the crack by means of X-ray CT, ISRM 2007, 2007.7., Lisbon

米村拓峰、有水拓人、緒方奨大、佐藤晃、X線CT法による亀裂内流動現象の可視化と分析、第 28 回西日本岩盤工学シンポジウム、2007.9、宇部市

佐藤晃、有水拓人、米村拓峰、谷口貴子、緒方奨大、X線CTで岩石を"はかる"、資源・素材学会平成 19 年度秋季大会、2007.9.宇部市

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

佐藤 晃 ( SATO AKIRA )

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：40305008

### (2)研究分担者

### (3)連携研究者