

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820392

研究課題名(和文) 応力下X線CTを用いた超臨界CO₂と水が共存する砂岩貯留層のポロメカニクスの解明研究課題名(英文) Analysis of poromechanics in sandstone reservoir containing supercritical CO₂ and water using X-ray CT under stress

研究代表者

渡邊 則昭 (Watanabe, Noriaki)

東北大学・環境科学研究科・准教授

研究者番号：60466539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：二酸化炭素(CO₂)の地中貯留において、砂岩等の多孔質岩石からなる貯留層の多孔質弾性体としての力学(ポロメカニクス)を理解することは極めて重要である。例えば、CO₂のモニタリング手法として期待される地表面変位の逆解析手法では、流体移動に起因する貯留層の変形と地表面変位とを多孔質弾性論で結び付けるため、貯留層の多孔質弾性パラメータにおける封圧、間隙圧、CO₂飽和率および温度依存性の定量的把握および定式化が求められる。そこで本研究では、水と超臨界CO₂が共存する砂岩の多孔質弾性パラメータを応力下ノイズレスX線CT等の室内実験を通じて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In geologic sequestration of carbon dioxide (CO₂), it is important to understand poromechanics for reservoirs consisting of porous rocks such as sandstone. It is required to quantitatively understand and formulate dependencies of poroelastic parameters on confining pressure, pore pressure, CO₂ saturation and temperature, for reservoirs, because inversion techniques utilizing changes in elastic wave velocities, and tilt data of the ground surface, associated with migration of CO₂, are based on the poroelastic theory. The present study has quantitatively revealed poroelastic parameters of sandstones containing water and supercritical CO₂ via laboratory experiments including noiseless X-ray CT on sandstones under stress.

研究分野：貯留層工学

キーワード：二酸化炭素排出削減 地球温暖化ガス排出削減 環境技術 大深度地下 廃棄物処理

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化という世界的規模の環境問題を解決するため、各国が二酸化炭素(CO₂)の排出量削減に取り組んでいる。特に我が国では、東日本大震災の影響により、当面は電力需給の観点から火力発電が極めて重要な役割を担うため、CO₂の排出量削減技術の早急な確立が望まれる。CO₂の排出量削減のための即効的な技術の一つとして、ノルウェー沖合の北海油田 Sleipner 鉱区でのCO₂地中圧入を機に注目されるようになった地中貯留技術が挙げられる。Sleipner 鉱区では天然ガス精製時に分離したCO₂を海底下約1000mの砂岩からなる帯水層に圧入しており、このような砂岩からなる貯留層は、CO₂の有望な貯留層候補として期待されている。

CO₂の地中貯留の安全性を検討あるいは検証するためには、貯留層に圧入されたCO₂のモニタリングが必要であるため、各種物理探査を用いた手法が検討され、例えば比較的短期間のモニタリングに適した手法の一つとしては地震探査手法が挙げられ、さらにより長期的なモニタリングに適した手法の一つとしては、地表面変位の逆解析手法が挙げられる。これらの手法においては、多孔質弾性論に基づいて、弾性波速度変化から地下におけるCO₂飽和率分布変化の逆解析、あるいは、地表面変位から地下における流体の体積変化の逆解析を実施するため、信頼性の高いモニタリングのためには、体積弾性率など貯留岩の多孔質弾性パラメータを把握することが要求される。また多孔質弾性パラメータの把握は、CO₂の地中貯留への応用に限らず、貯留岩の多孔質弾性体としての基本的な力学特性を理解する上でも重要である。

CO₂地中貯留においては、様々な封圧、間隙圧および温度の組み合わせにおけるCO₂の圧入が想定され、また、貯留層に圧入されたCO₂は、もともと貯留層に存在していた地層水を置換、あるいは水に溶解しながら移動するため、実際の貯留層内ではCO₂と水の割合(CO₂飽和率)は様々な変化するものと予想される。したがって、貯留岩の多孔質弾性パラメータを把握するという事は、多孔質弾性パラメータに及ぼす封圧、間隙圧、温度およびCO₂飽和率の影響を定量的に明らかにし、定式化することを意味する。しかしながら、有望な貯留岩候補の砂岩に関してさえ、室内実験を通じて多孔質弾性パラメータを決定した既存研究は少なく、現状では、水飽和砂岩の一部の多孔質弾性パラメータにおけるTerzaghiの有効応力依存性が報告されている程度である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、島根県産来待砂岩およびBerea砂岩の各種多孔質弾性パラメータの封圧、間隙圧、温度およびCO₂飽和率依存性を室内実験により定量的に明らかにし、定式化することを目的とした。なお、本研究にお

いて来待砂岩およびBerea砂岩を用いた理由は、世界の約3万の既存砂岩貯留層の大部分が10%~30%の空隙率をもつため、この空隙率範囲の中間的な空隙率(約20%)をもつ来待砂岩およびBerea砂岩が貯留層を構成する砂岩の代表例として適していると考えたためである。

3. 研究の方法

本研究ではまず、砂岩からなる貯留層内において地層水のみが存在するか、もしくはCO₂が地層水に完全に溶解した場所を想定し、水で飽和した島根県産来待砂岩およびBerea砂岩に関して、様々な封圧(7~40MPa)および間隙圧(5~25MPa)の組み合わせ、すなわち様々なTerzaghiの有効応力(2~35MPa)条件下における12種類の多孔質弾性パラメータ(排水および非排水Young率、Poisson比、剛性率、体積弾性率、SkemptonのB値、パラメータHおよびR、Biot-Willis係数)を室内実験により明らかにした。また、通常は1を超えないと考えられているBiot-Willis係数(有効応力係数)が、膨潤性粘土鉱物が水で膨潤することで1を超える場合があることが示唆されたため、このことを明確にする目的で膨潤性粘土鉱物が膨潤しないように間隙流体として水ではなく窒素ガスを用いた補完的な実験も実施した。

さらに、砂岩からなる貯留層内において地層水およびCO₂が共存した状態を想定し、有効応力30MPaの条件下におけるBerea砂岩に関して、様々なCO₂飽和率(0~1)、間隙圧(5~15MPa)および温度(30~50℃)の組み合わせ条件下におけるSkemptonのB値、非排水条件下のYoung率、Poisson比、体積弾性率および剛性率を室内実験により明らかにし、最終的に有効応力2MPa以上、CO₂飽和率0~1、間隙圧10~30MPaおよび温度40~60℃の範囲で適用可能と考えられる多孔質弾性パラメータの推算式を考案した。また実験の実施に際しては、30wt%炭素繊維充填PEEK(VICTREX® PEEK™ 450CA30)製封圧容器を用いたノイズレスX線CTによる応力下砂岩供試体内部CO₂分布の評価もあわせて実施し、供試体内部で水とCO₂は密度差により分離せず、供試体内部のCO₂分布は一様であることを確認している。

4. 研究成果

水で飽和した来待砂岩およびBerea砂岩に関して、様々な封圧および間隙圧の組み合わせ、すなわち様々なTerzaghiの有効応力条件下における12種類の多孔質弾性パラメータを室内実験により測定した。その結果、多孔質弾性パラメータの封圧依存性および間隙圧依存性はTerzaghiの有効応力依存性に統一することができることが明らかになった。Terzaghiの有効応力依存性が顕著でなく、ほぼ一定とみなせる一部の多孔質弾性パラメータ(非排水ポアソン比およびパラメータ

R)を除くと、その他の多孔質弾性パラメータは、Terzaghiの有効応力(σ_{eff})および多孔質弾性パラメータに依存する二つの定数を用いた式に基づいて概ね記述できることが示された(図1)。

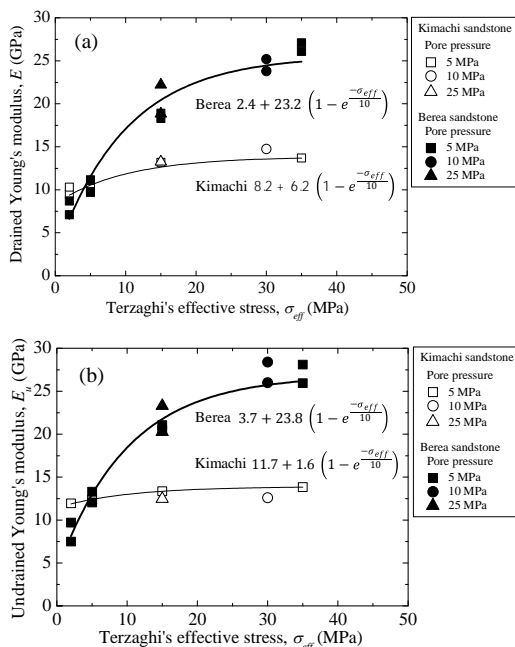


図1. 多孔質弾性パラメータのTerzaghiの有効応力依存性の例。

また、膨潤性粘土鉱物を含有する来待砂岩においては、これまでの常識とは異なり、Terzaghiの有効応力の増加にともないBiot-Willis係数が1を越えることがあることが明らかになったが、そもそもBiot-Willis係数が1を越えるような高応力レベルにおいては多孔質弾性パラメータの応力レベル依存性が小さいため、膨潤性粘土鉱物の有無にかかわらず多孔質弾性パラメータの封圧依存性および間隙圧依存性はTerzaghiの有効応力依存性に統一することができると考えられる。

実際の貯留層内では水飽和率は様々であると予想できるため、 CO_2 の地中貯留条件下の砂岩の多孔質弾性パラメータのより良い理解のためには、後述のように CO_2 と水の二相条件下における多孔質弾性パラメータの解明が必要ではあるものの、砂岩の多孔質弾性パラメータにおける封圧および間隙圧依存性がTerzaghiの有効応力依存性に統一でき、一定のTerzaghiの有効応力レベルを超えるとTerzaghiの有効応力依存性が顕著ではなくなるという現象は二相条件下においても起こりうると予想できる。砂岩からなる貯留層では、多孔質弾性パラメータの間隙圧等による変化が小さくなる条件が存在し、このような条件下で CO_2 の地中貯留を実施すれば、逆解析手法を用いたモニタリングにおける多孔質弾性パラメータの不確定性を減少させることができると期待できる。

水および CO_2 を包有する Berea 砂岩に関し

て、有効応力一定の条件下において、様々な CO_2 飽和率、間隙圧および温度の組み合わせ条件下におけるSkemptonの B 値、非排水条件下のYoung率、Poisson比、体積弾性率および剛性率を室内実験により測定した。その結果、全ての多孔質弾性パラメータの CO_2 飽和率依存性、間隙圧依存性および温度依存性は同様で、それぞれ非線形的な減少、直線的な増加および直線的な減少であり、これらは主に CO_2 飽和率と CO_2 の体積弾性率の変化による間隙流体の体積弾性率の変化に起因するものであることがわかった(図2)。

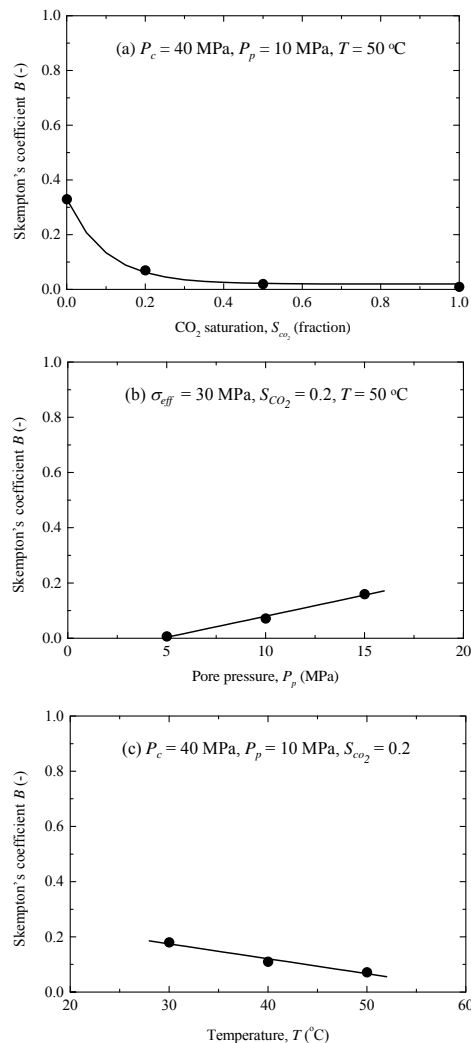


図2. 多孔質弾性パラメータの CO_2 飽和率、間隙圧および温度依存性の例。

また、この知見と先述の多孔質弾性パラメータの有効応力依存性に関する知見とを統合することで、有効応力2 MPa以上において、間隙圧が10~30 MPa、温度が40~60 °Cの超臨界 CO_2 が飽和率0~1で存在するような CO_2 地中貯留条件下における多孔質弾性パラメータの推算式を考案することができた。この推算式を用いることにより、地表面変位あるいは弾性波速度変化の逆解析においては、貯留岩の多孔質弾性パラメータが有効応力、間隙圧、温度および CO_2 飽和率の組み合わせで

様々に変化することを考慮すべきであることがより明確になった(図3)。

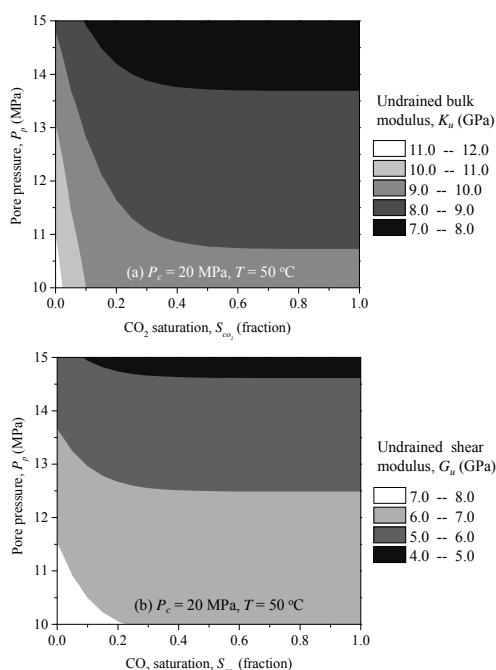


図3. CO₂ 地中貯留条件下における多孔質弾性パラメータの多様性の例。

加えて、Berea 砂岩と類似の物理的・力学的特性を有する砂岩貯留層を対象とした弾性波速度測定においては、間隙圧をモニタリングするとともに、貯留時の最大 CO₂ 飽和率を弾性波速度の CO₂ 飽和率依存性が比較的大きな残留飽和率程度(0.2)に計画的に留めるのが、CO₂ 飽和率のモニタリングの信頼性向上および残留ガストラップによる漏洩リスクの低減の観点から望ましいことがわかった(図4)。

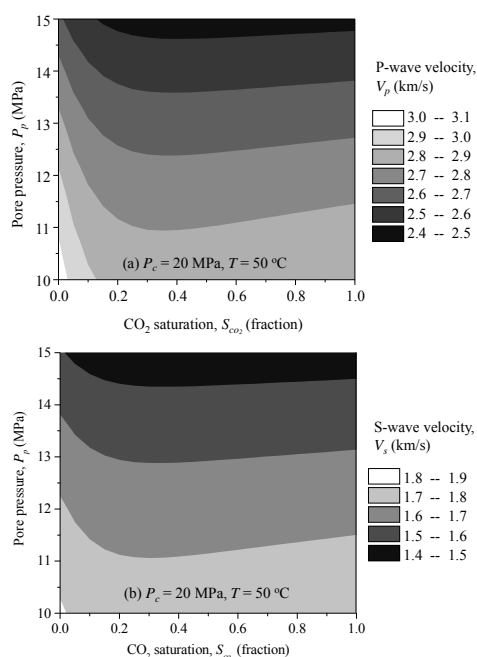


図4. CO₂ 地中貯留条件下における多孔質弾性パラメータから推算した弾性波速度の例。

なお本研究では、剛性率も間隙流体の特性に依存して変化するという既存の Gassmann 理論とは異なる結果が得られたが、この結果は Gassmann 理論が常に成立するわけではないこと、すなわち、本研究のように実験的に多孔質弾性パラメータを決定することの重要性を示している。

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3件)

渡邊 則昭, 臼井 祐人, 木崎 彰久, 坂口 清敏, CO₂ 地中貯留条件下における水および CO₂ を包有する Berea 砂岩の多孔質弾性パラメータ, 石油技術協会誌, 査読有, vol. 80, No. 5, 2015, pp. 385-396

渡邊 則昭, 臼井 祐人, 木崎 彰久, 坂口 清敏, 砂岩の多孔質弾性パラメータにおける Terzaghi の有効応力依存性 - 来待砂岩と Berea 砂岩を例として -, 石油技術協会誌, 査読有, vol. 79, No. 4, 2014, pp. 224-233

DOI:10.3720/japt.79.224

Yuto Usui, Noriaki Watanabe, Akihisa Kizaki, Kiyotoshi Sakaguchi, Poroelastic parameters of Sandstones with and without Selling Clay Minerals, Proceedings of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 査読無, USB memory, 2014, Paper No. P0-83

[学会発表](計2件)

臼井 祐人, 渡邊 則昭, 坂口 清敏, ベレア砂岩の多孔質弾性パラメータの CO₂ 飽和率依存性, 資源・素材学会平成 27 年度春季大会, 2015 年 3 月 27 日, 千葉工業大学 津田沼キャンパス(千葉県千葉市)

Yuto Usui, Noriaki Watanabe, Akihisa Kizaki, Kiyotoshi Sakaguchi, Poroelastic parameters of Sandstones with and without Selling Clay Minerals, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014 年 10 月 14 日, ロイトン札幌(北海道札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 則昭 (WATANABE, Noriaki)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号: 60466539