

# Otway堆積岩を用いた真三軸応力下での 断層沿い透水性と断層安定性に関する 予察的研究

竹村 貴人<sup>1\*</sup>・佐藤 稔<sup>2</sup>・Eric Tenthorey<sup>3,4</sup>・高橋学<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 日本大学文理学部 地球科学科 (〒156-8550 東京都世田谷区桜上水3-25-40)

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所 活断層火山研究部門 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1)

<sup>3</sup> Geoscience Australia (GPO Box 378, Canberra ACT 2601, Australia)

<sup>4</sup> CO2CRC Ltd. (11-15 Argyle Pl. South, Carlton VIC 3053, Australia)

\*E-mail: takemura.takato@nihon-u.ac.jp

断層の力学・水理学的特性は二酸化炭素回収貯留 (CCS: Carbon Capture and Storage) のような地下利用を行う際の実行可能性を考える上で重要なものとなる。貯留層での間隙水圧の上昇や広域応力の増加は断層の再活動の可能性を上げる要因となる。このような再活動で生じた断層は、CCSの場合では、貯留した二酸化炭素を地表へと移動させるための通路となり得る可能性がある。実験的に断層の形成に伴う透水係数の変化を明らかにするために、真三軸応力下で破壊を進行させつつ断層面に平行な方向での透水係数の測定を行う予定である。実験はオーストラリア・Otway堆積盆から採取された砂岩、シルト岩、泥岩を用いる。本研究では、実験前に測定した岩石の基礎物性と中間主応力を考慮した場合の断層の安定性をどのように考えるかについて報告する。

**Key Words :** CCS, Permeability, Fault, Leakage

## 1. はじめに

世界規模でおこりつつある気候変動を緩和するため、国連気候変動枠組条約締約国会議(COP)にて大気中の温室効果ガス濃度の安定化が議論されている。先に行われたCOP21では、パリ協定が採択され、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cより低く保ち、その上昇幅を1.5°Cに抑える努力をするという長期的な目標が掲げられた。国際エネルギー機関(IEA)は、その試算において、2060年までのCO<sub>2</sub>の累積削減量の約14%をCO<sub>2</sub>回収貯留 (CCS) 技術が担うことを期待している<sup>1)</sup>。このようにCCSは社会的な視点から重要な位置付けであるが、地球上での炭素循環を正常化させるという意味でも重要な技術であろう。

CCSでは、CO<sub>2</sub>はキャップロックを始めとする様々なトラップメカニズムにより貯留層に封じこめられている。しかしながら、貯留されたCO<sub>2</sub>の漏洩リスクの一つとして、既存断層の再活動により形成される新たな経路を通じた地表もしくは海中への移動が挙げられる。既存断層の再活動は、間隙水圧の上昇などによる断層面にかかる有効垂直応力の低下により起こる<sup>2)</sup>。しかしながら、その発生のメカニズムや透水係数の変化については不明な点が多く残され

れている。CCSを実施する際のCO<sub>2</sub>の地表への漏洩リスクを考えるため、本研究では、オーストラリア・ビクトリア州南部Otway (Fig. 1) においてCO2CRCとGeoscience Australiaにより実施されている実証試験で掘削・回収されたボーリングコアを使ったせん断透水特性に関する実験の予察的な結果と今後の実験計画を報告する。

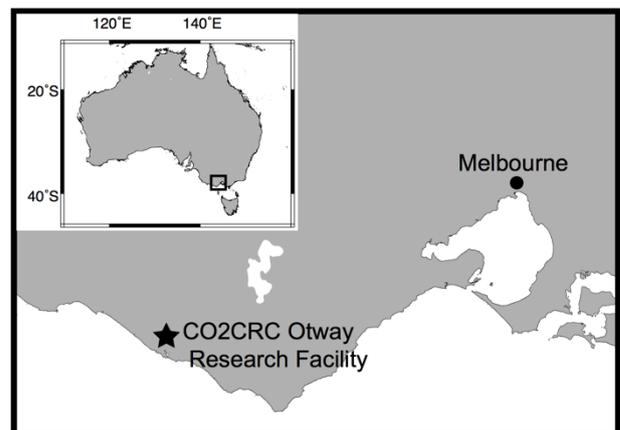


Fig. 1 オーストラリア・ビクトリア州南部Otway実証試験サイト

## 2. 試料および実験方法

実験用試料は、実証用の注入井として2010年に掘削・回収されたCRC-2コアを用いた。CRC-2孔では、約1100-1500mにあるPaarette層が貯留層となり、近傍に位置するNaylar断層は流体の水平方向の移動を止めるシール機能を保持している<sup>3)</sup>。本研究では砂泥互層からなるPaarette層から砂岩、シルト岩、泥岩を採取し (Fig. 2), 基礎物性として、間隙率、間隙半径分布、浸透率、P波速度の測定を行なった。また、最終的には、真三軸応力下での変形に伴う、せん断面に平行な2方向の浸透率の変化を測定する計画である。また、CO<sub>2</sub>圧入時の断層の再活動のリスクを評価するため、各岩石の摩擦係数の測定も行う予定である。本論では、予察的な結果として基礎物性の測定結果を報告する。

基礎物性の測定は、間隙率と間隙半径分布は水銀圧入式ポロシメーターで、浸透率は直径50mm、厚み10~20mmの円盤試料を用いたフローポンプ法により行なった。また、浸透率の測定は間隙水圧を1MPaとし、有効拘束圧を3, 6, 9, 12, 15, 20, 25MPaとした条件で行なった。そして、P波速度は透過法にて計測を行なった。

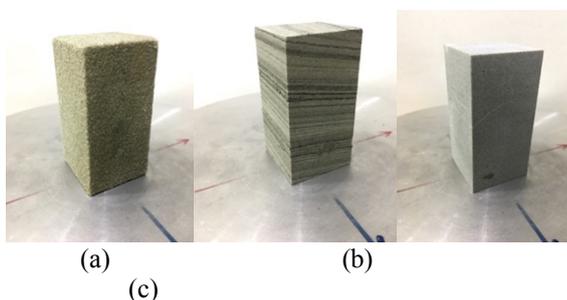


Fig. 2 (a) 砂岩 (1499.17 m - 1499.24 m), (b) シルト岩 (1515.20 m - 1515.27 m), (c) 泥岩 (1579.45 m - 1579.52 m). 写真は真三軸試験用試料 (70mmx35mmx35mm) であり長軸方向が鉛直方向である。

## 3. 結果および考察

Table 1 に間隙率とP波速度の測定結果をまとめた。また、Fig. 3には間隙半径の分布を示す。P波速度の最大値と最小値の比をみると、シルト岩で大きな値となっており、これは肉眼でも観察できるラミナによるものと考えられる。砂岩は肉眼では層状の構造は確認できないもののP波速度では異方性が確認された。また、砂岩の間隙半径は均一であり、基質部に泥やシルトをあまり含んでいないアレナイトに区分される砂岩である。泥岩は、P波速度の異方性も肉眼観察でも特徴的な構造は見られなかった。泥岩の間隙半径分布を見ると間隙半径の多くはナノオー

Table 1 測定結果

	P-wave velocity, Vp				Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Particle density (g/cm <sup>3</sup> )
	Vertical (m/s)	Horizontal-1 (m/s)	Horizontal-2 (m/s)	Vpmax/Vpmin			
Sandstone	0.91	0.86	1.08	1.26	1.85	30.55	2.66
Siltstone	1.38	1.83	1.73	1.32	2.20	19.92	2.74
Mudstone	4.91	4.40	4.57	1.11	2.73	1.26	2.76

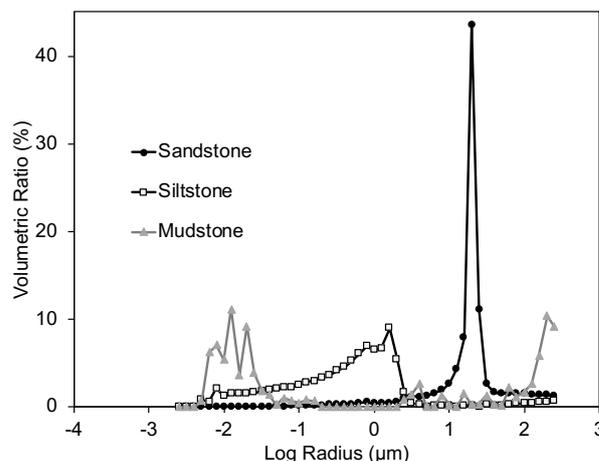


Fig. 3 水銀圧入法によるそれぞれの試料の間隙半径分布

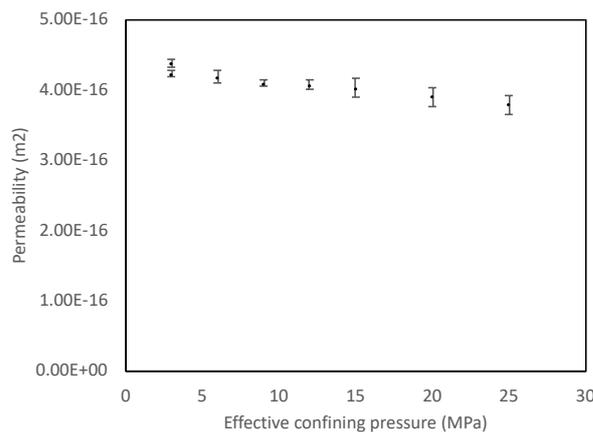
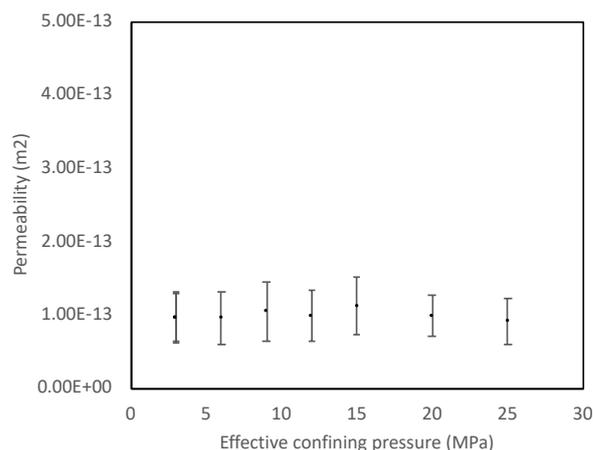


Fig. 4 浸透率の測定結果 (上: 砂岩, 下: シルト岩) .

ダーであり、P波速度からもわかるように圧密・続成が進んでおり非常に硬いことがわかる。Fig. 4 に砂岩とシルト岩の浸透率の測定結果を示した。砂岩は有効拘束圧を25MPaまで増加させたが、その値に変化はほぼ見られなかった。一方で、シルト岩は若干ながら拘束圧依存性が見られた。また、泥岩については、測定したものの、浸透率の測定限界を超えたため $10^{-18} \text{m}^2$ 以下であると考えられる。本コアでの砂岩の層準は天然ガスが胚胎していた貯留層に相当しており、断層により水平方向の移動が抑制されて

おり、浸透率の低い泥岩により鉛直方向の移動が抑制されている。また、シルト岩の写真 (Fig.2) からわかるように層界面は傾斜しており、本地域での同層準は褶曲している。

#### 4. 今後の展望

CCSにおいて、CO<sub>2</sub>を貯留層に圧入した際のリスクとしてあげられるのが既存断層の再活動によるCO<sub>2</sub>含有流体の地表への移動である。既存断層の再活動を考える際、岩石の摩擦係数を使い静止条件を決めることができ、摩擦係数 $\mu$ を $[(\mu^2+1)^{1/2}+\mu]^2$ に代入した時の値が、最大有効主応力と最小有効主応力の比より大きければ断層は安定しているとされている<sup>2)</sup>。例えば、本コアの場合、Tenthorey<sup>4)</sup>によりスクラッチテストによる一軸強度と三軸試験による摩擦係数が得られている。しかしながら、CCSで対象となるような深度では破壊形態が脆性から延性に遷移しており摩擦係数を決める際に困難が伴う。また、初期状態での断層の安定性を考える際には、モールクーロンの破壊基準を用いたいわゆるStress Polygonを用いて評価している。しかしながら、その安定領域が中間主応力を無視できる程度なのかについての議論はされていない。そのため、破壊応力の中間主応力依存性に関するデータの蓄積は断層の安定を考える上で重要であると考えられる。

既存断層は再活動前にはシール機能を有しているも、再活動後には透水性を有する可能性がある。Sato<sup>5)</sup>は、真三軸応力下でせん断面に平行な2方向の透水係数を測定しており、せん断帯の発達に伴い透水性が増加することを確認している。また、その増加率は拘束圧による破壊様式（脆性、延性）に依存すると考えられる。今後、本報告での試料を用いて、特に不透水層となる泥岩のせん断帯形成時の透水係数の変化を原位置での水平方向応力を再現した条件

の下で行う予定である。また、残留応力状態での透水係数を測定するとともに摩擦係数の測定も行う予定であり、得られた摩擦係数を用いて、断層の再活動評価を行う。これらの研究成果は、2019年に行われるOtway実証試験サイトにおける浅部領域での断層沿いのCO<sub>2</sub>の移動プロセスを検証するための断層へのCO<sub>2</sub>圧入実証試験での断層の安定性を評価するための基礎的な知見となるものである。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、日本大学海外派遣研究員制度の支援を受けた。また、プロジェクトリーダーのGeoscience AustraliaのDr. Andrew J. Feitzには浅部領域の圧入試験についての議論をさせて頂いた。

#### 参考文献

- 1) IEA: Energy Technology Perspectives, Catalysing Energy Technology Transformations, [online]. <https://www.iea.org/etp2017>. 2017.
- 2) Zoback, MD. :Reservoir Geomechanics, p.461, Cambridge University Press, 2010.
- 3) Lawrence, M., Arnot, M., Browne, G., Bunch, M., Dance, T.: Geological Interpretation of Core and Wireline Data from Otway Project Wells CRC-1 and CRC-2. Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies, Canberra, Australia, CO2CRC Publication Number. RPT12-3928, 2013.
- 4) Tenthorey, E., Richard, T., Dewhurst, D. :Rock mechanical approaches for predicting fault behaviour during CO<sub>2</sub> injection. *Energy Procedia*, 114, pp. 3273-3281, 2017.
- 5) Sato, M., Takemura, T., Takahashi, M.: Development of the permeability anisotropy of submarine sedimentary rocks under true triaxial stresses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 108, pp.118-127, 2018.

### Preliminary study on fault-parallel permeability and fault stability of sedimentary rocks in the Otway basin under true triaxial stress conditions

Takato TAKEMURA, Minoru SATO, Eric TENTHOREY and Manabu TAKAHASHI

The hydro-mechanical properties of faults are a key component for potentially implementing geological storage systems such as carbon capture and storage, because faults can act as unwanted fluid migration pathways for CO<sub>2</sub>. Increasing the pore pressure or tectonic stress in the reservoir increases the possibility of fault reactivation, which is undesirable as the stored hydrocarbon fluids could migrate to the surface through a given fault. In order to understand the evolution of fault-parallel permeability associated with fault development, we are planning to measure fault-parallel permeability under true triaxial stress conditions using three different kinds of rocks; a sandstone, siltstone, and a mudstone. Moreover, the effect of the intermediate stress on fault stability will also be discussed.