

## 超臨界 CO<sub>2</sub> 注入に伴う上総層群大田代層泥岩の力学特性及び弾性波速度変化

幌延 RISE・西本壮志, 木山保, RITE・薛自求,  
幌延 RISE・熊倉聡(現, (株)ドーコン), 石島洋二

### 1. はじめに

キャップロックの長期安全性の評価は、CO<sub>2</sub> 地中貯留にとって基本的かつ重要な研究課題である。典型的なキャップロックとして、低浸透率(  $\mu$  darcy)・高間隙率(40~50%)の泥質岩を挙げることができるが、実験手法確立が困難なことなどの理由で、その力学特性については殆ど明らかにされていない。本研究の目的は、低浸透率が予想される泥質岩のブロックから円柱供試体を作成し、封圧条件下で P 波速度、ひずみ、CO<sub>2</sub> 流量を計測し、さらに軸載荷を加えて三軸試験を行い、超臨界 CO<sub>2</sub> 注入が力学特性に及ぼす影響を解明することである。ここで得られた知見は CO<sub>2</sub> 地層貯留におけるキャップロックの長期安全性の評価モデルの構築に寄与する。

### 2. 試料岩石および供試体のジャケッティング

試料岩石は、第四紀更新統上総層群下部の大田代層の最上部に位置する泥岩(千葉県 養老溪谷弘文洞跡より採取)を使用した。供試体は直径 50mm、高さ 125mm の円柱形に整形したものをを用いた。大田代泥岩の平均密度は 1.83 g/cm<sup>3</sup>、平均間隙率は 40.6% である。

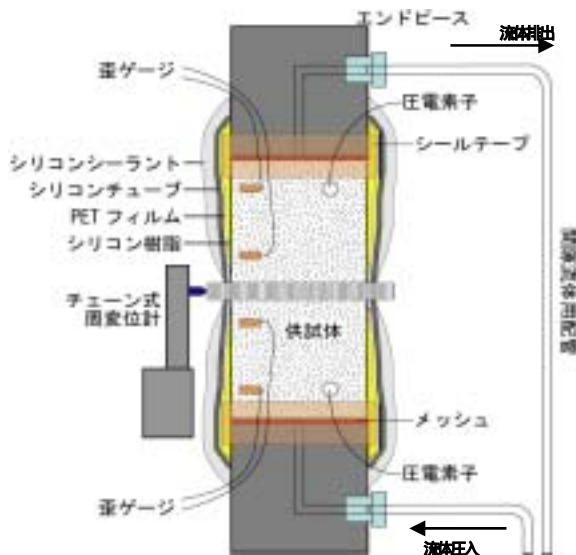


図1 供試体のジャケッティング

本研究で CO<sub>2</sub> 浸透試験を行うに当たり、試験中の供試体内部への封圧用油の浸入を防止し、供試体内からの CO<sub>2</sub> のリークを防止しつつ測定計器を設置できるように、以下のように供試体のジャケッティングを行った(図1)。一番内側に、厚さ 50  $\mu$ m のチュ

ーブ状の PET フィルムを被覆させた。PET フィルムは、薄く加工が可能な素材でガス透過性が低いという特徴を持つため使用した。供試体と被覆材間には、間隙流体の側方流動防止のために、シリコン樹脂を塗布した。ただし、チェーン状周変位計が接触する供試体中央部は、塗布していない。供試体とエンドピースは、間にステンレスメッシュを挟み、シールテープを巻き固定した。その上にシリコン素材の熱収縮チューブで供試体を被覆し、エンドピースとシリコンチューブをクランプ式バンドで締結した。最後にペースト状のシリコンシーラントを厚さ 2~3mm 程度塗布し、固結後同様に3度重ね塗りを行った。シリコンシーラントもチェーン状周変位計が接触する中央部分には塗布していない。

### 3. 試験装置と試験方法

#### (1) 載荷試験装置およびひずみ、弾性波測定装置

圧縮試験では三軸セルを組み込んだ軟岩用岩石試験装置および、間隙流体コントロールにはシリジポンプを使用した。試験中に三軸セル内の温度を一定に保つため、セル周囲には低温恒温槽と接続したステンレス容器内を 40℃ に保たれた不凍液が循環している。また試験装置全体は、温度による微小な変形を防ぐために設定温度の 40 ± 2℃ に制御された恒温室内に設置した。ひずみ及び弾性波測定のために、供試体には 8 枚のひずみゲージ及び 4 枚の圧電素子 (P 波) を貼付しており、ひずみは動ひずみアンプ、弾性波はデジタルオシロスコープ及び、高圧型パルスジェネレータを用い測定を行った。これらのデータは DAQ ボードを通じて Labview8.2 で開発されたプログラムで同一の時系列に整理され記録された。

#### (2) 間隙水圧負荷と CO<sub>2</sub> 圧入の方法

地下 1000 m 付近の帯水層内に CO<sub>2</sub> を圧入した場合、CO<sub>2</sub> は地温地力条件から超臨界状態と推定される<sup>1)</sup>。貯留層上部のキャップロックは、地下水圧に加え、下部の貯留層より超臨界 CO<sub>2</sub> の圧力を被ることになる<sup>2)</sup>。これを想定し本研究では封圧 12~18MPa、間隙圧 10MPa 条件で試験を行った。試験手順として、始めに泥質岩供試体を封圧 5.0 MPa、間隙圧 2.0 MPa、動水勾配 1.9 MPa で通水させ含水飽和させた後、各試験の設定封圧条件および間隙水圧 10 MPa まで 0.1 MPa/min の速度で負荷した。3t 法にて圧密打ち切り時間を確認後、上端面に水圧をかけたまま、下端面から CO<sub>2</sub> 圧を負荷し、供試体内の水と CO<sub>2</sub> を置換させながら飽和させた。その後、上下端面を共に 10 MPa で安定させた後、三軸ベッセル内を 40℃ に上昇させ液体 CO<sub>2</sub> を超臨界 CO<sub>2</sub> に相変化させ、三軸圧縮試験を実施した。三軸圧縮試験

は、含水飽和試料及び超臨界 CO<sub>2</sub> 飽和試料で行った。載荷時の軸ひずみ速度は  $2.0 \times 10^{-6}/s$  である。

#### 4. 試験結果及び考察

##### (1) 液体 CO<sub>2</sub> の飽和時間

液体 CO<sub>2</sub> 飽和は含水飽和供試体中の間隙水との置換によって行い。試験結果の例として、図 2 に BOSO-06 における液体 CO<sub>2</sub> 注入時における周ひずみ、弾性波走時の変化を時系列で示した。

注入側と排出側の差圧が 1.0 MPa の時(Phase3)、約 120 時間の注入を継続させたが弾性波速度、ひずみ共にほとんど変化が観察されず、排出側の流量はほぼ 0 ml/min であった。差圧を 2.0MPa に変化させた時(Phase4)、注入側の流量が徐々に増加し、排出側も微量ながら流量の変化が見られた。約 50 時間の注入を継続させたが、差圧 1.0 MPa の時と同様、弾性波速度及びひずみにはほとんど変化が見られなかった。差圧を 3.0MPa (Phase5) にすると、注入側・排出側の流量が連続的に大きく変化した。それに伴い、連続的に弾性波走時の増加、ひずみの張(～約+700  $\mu$  Strain) が観察された。差圧を 3.0MPa に設定して約 130 時間後に、排出側の弾性波走時、ひずみ( )ともに安定した。同様の結果は他の CO<sub>2</sub> 圧入試験でも確認されたため、本試験で使用している大田代層の泥質岩の threshold 圧が 3.0 MPa 程度であると示唆される。

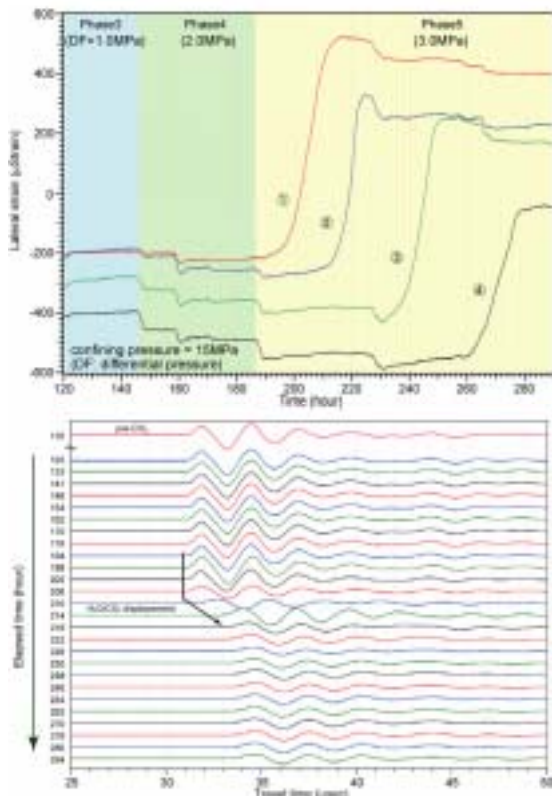


図 2 液体 CO<sub>2</sub> 注入時の周ひずみ(上)、弾性波走時の変化(下)。周ひずみは注入側( )から排出側( )、弾性波走時は注入側(Vp-A)の変化。

##### (2) 超臨界 CO<sub>2</sub> 飽和供試体の三軸圧縮試験

封圧条件下で行った超臨界 CO<sub>2</sub> 飽和供試体の三軸圧縮試験の応力 - ひずみ線図を図 3 に示す。図では載荷時の挙動を比較するため、各有効封圧下における載荷直前のひずみを原点に表記した。封圧 15MPa 条件下において、ピーク強度は 16.2MPa で、塑性的な挙動を示し破壊は起きなかった。封圧 18MPa の時も塑性的な挙動を示し破壊は起きなかった。このときのピーク強度は 15.3MPa と封圧 15MPa の時より約 1MPa 低い値が得られた。封圧 12～18MPa 条件に置いて含水供試体の強度が 15.5～15.7MPa が得られているため<sup>3)</sup>、間隙流体・封圧にかかわらずピーク強度はほとんど同じであった。

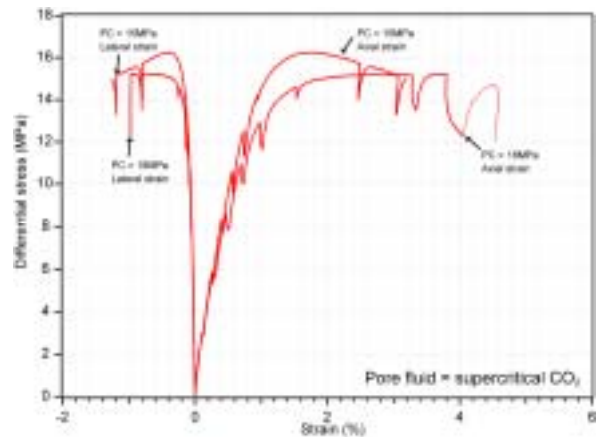


図 3 間隙流体が超臨界 CO<sub>2</sub> としての時の応力 - ひずみ線図

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では泥質岩を使用して、封圧条件下で P 波速度、ひずみ、CO<sub>2</sub> の流量及び軸載荷を加える三軸試験を行った。CO<sub>2</sub> 注入時においてひずみ・弾性波速度に顕著な変化が見られた。CO<sub>2</sub> 注入試験ではどの供試体においても差圧を 3MPa に設定して初めて CO<sub>2</sub> の移動が確認できた。三軸圧縮試験において、封圧・間隙流体の違いによって、ピーク強度に大きな変化が見られなかった。本研究では圧電素子、ひずみゲージをある特定の位置に貼付している。今後、間隙流体が供試体の通過する際のフィンガリングや飽和度を評価するためにセンサー貼付位置の工夫や構成を考えていきたい。

#### 参考文献

- 1) 薛自求, 大隅多加志 (2005): 帯水層貯留における CO<sub>2</sub> 挙動のモニタリング技術開発に関する実験的研究, 地下水学会誌, 第 47 巻第 1 号, pp.29-44
- 2) 小玉齊明, 木山保, 薛自求, 熊倉聡, 西本壮志, 石島洋二 (2007): 珪質岩の力学的特性に及ぼす超臨界 CO<sub>2</sub> の影響評価に関する実験的研究, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 CD-ROM, 講演番号 60
- 3) (財) 北海道科学技術総合振興センター (2007): 泥質岩の力学特性に及ぼす超臨界 CO<sub>2</sub> 注入の影響評価試験業務実施報告書