弾性波速度測定による超臨界 CO_2 の飽和度推定

大成建設(株)技術センター　正会員　○小川　豊和
大成建設(株)技術センター　正会員　平塚　裕介
大成建設(株)技術センター　正会員　山本　肇

１．はじめに

二酸化炭素回収貯留技術CCSは，火力発電所などから回収したCO_2を地中深部の砂岩層などに貯留する技術である．CO_2の地中挙動の予測にあたっては，多孔質媒体中でのCO_2や水などの流体挙動を記述するため，空隙率や浸透率などのパラメータが必要になる．特に相対浸透率は，ある相の流体の有効浸透率を岩石固有の絶対浸透率の比として表したものであり，貯留層内のCO_2移行や圧力挙動に大きく影響する重要なパラメータである．このため筆者らは，岩石試料を用いて超臨界CO_2－水系の相対浸透率の測定を求める実験を行ってきた[1), 2)]．定常法はCO_2と水を一定体積比率で岩石試料に圧入し，定常状態の飽和度における有効浸透率を求めるものであり，非定常法は，水で飽和された岩石試料内にCO_2を圧入し，圧力や流量の非定常変化を解析モデルとマッチングして相対浸透率を同定するものである．ここでは，浸透試験中のCO_2の飽和度変化を予測するため，岩石試料の上下ペデスタルに圧電素子型のP波・S波速度センサー[3)]を取り付けて弾性波速度を測定した．そして，速度と二酸化炭素の飽和度の理論的関係から岩石の飽和度を計算し，物質収支から得られる飽和度と整合するかどうか検証したのでその結果を報告する．

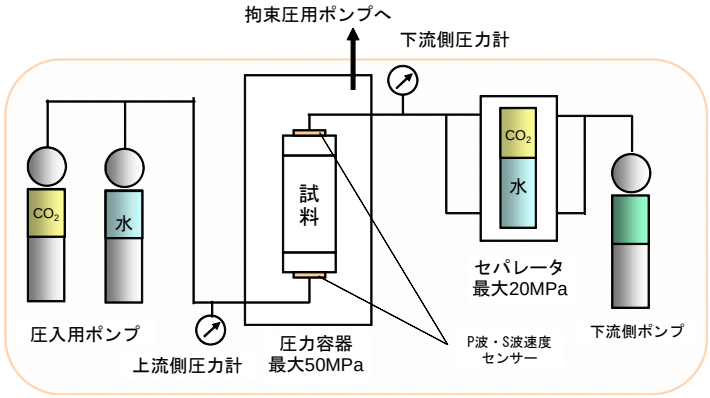


図１　浸透試験装置概略図

２．試験装置

図1に試験装置の概略図を示す．岩石試料を圧力容器内に設置し，拘束圧を加える．その後組み立てたアングルと発泡スチロールの壁で装置全体を囲い，温水循環器と温風器を併用した制御により，±1℃の精度で常温～60℃程度の温度環境で試験を実施できる．上流側のシリンジポンプによって流量を制御して岩石試料にCO_2を圧入し，セパレータを介して，試料から押し出された水とCO_2を圧力制御のための下流側のシリンジポンプに集める．セパレータは，密度の違いによって水とCO_2を上下二相に分離させる装置であり，容量250ccのステンレス管と差圧計を組み合わせて構成されている．このセパレータ内で分離されたCO_2の体積変化を試験中に連続的に測定することで，もう一方の流体（水）の体積および流量を計算することができる．

３．試験結果

岩石試料として，直径50mm，高さ100mmの円柱整形したベレア砂岩と多胡砂岩を用いた．圧入は堆積方向に対して直角に行った．試験開始前に岩石試料の空隙率を測定するとともに，定流量透水試験より絶対浸透率を求めた．透水試験に用いた温度と圧力は45℃，間隙圧9.5MPa,拘束圧12MPaである．

図2に，ベレア砂岩試料について，5cc毎分の速度で超臨界CO_2を圧入した非定常試験で測定した二酸化炭素と水の量比から計算した二酸化炭素の飽和度の経時変化を示す．CO_2の飽和度は圧入開始後約4分後にブレークスルーするまで大きく増加し，その後は漸増している．ブレークスルー時に飽和度の値が一時不安定にな

キーワード　超臨界 CO_2，CCS，飽和度，弾性波速度
連絡先　〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1　大成建設(株)技術センター　TEL 045-814-7237

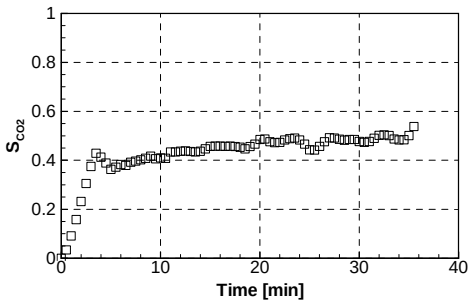
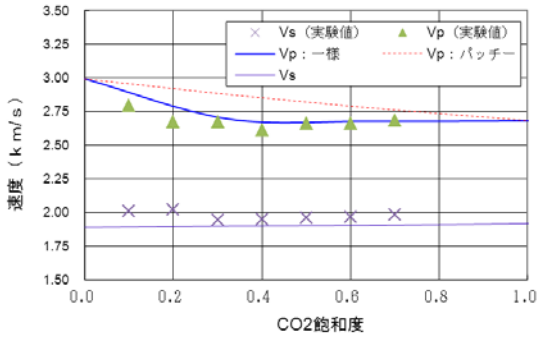


図 2　ベレア砂岩の飽和度経時変化

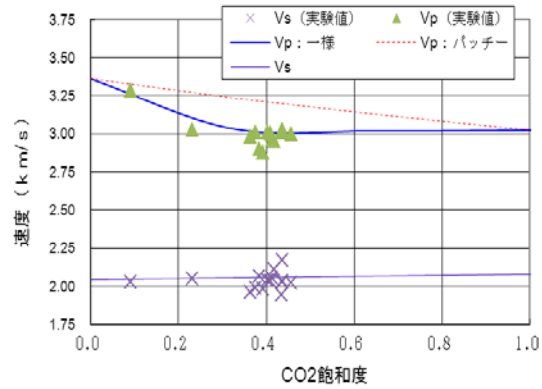
表 1　計算で用いた二酸化炭素と岩石物性値

物性	値
岩石間隙率（実測値）	0.18
岩石鉱物密度	2.70g/cc
鉱物の体積弾性係数	20 - 35GPa
乾燥岩石の体積弾性係数	5 - 7.5GPa
岩石せん断弾性係数	8.5 - 10GPa
水の密度	1.0g/cc
水の体積弾性係数	2.2GPa
CO_2 密度*	0.60g/cc
CO_2 の体積弾性係数	0.1GPa

注：*実験に用いた温度・圧力状態での値



(a)　定常法



(b) 非定常法

図 3　試験で用いた二酸化炭素の飽和度と理論値との比較

るのは，下流側のシリンジポンプの圧力制御の問題と考えられる．また図 3（b）に，試験で圧入した二酸化炭素と水の量比から計算した二酸化炭素の飽和度と，その時測定した P 波・S 波速度の関係を△と×で表示した．比較のため，別の試料について実施した定常法の試験結果も合わせて示した（図 3（a））．図より，CO_2 の飽和度が上昇するにつれ，P 波速度は減少し，S 波速度はやや上昇傾向にあることが分かる．

4．考察

図 3 に岩石モデルから理論的に計算した弾性波速度と二酸化炭素の飽和度の関係を（実線・破線で表示）実測値と比較している．理論値の計算では，モデルの流体置換の影響はガスマンの式で近似することができ，間隙流体の分布は一様な場合とパッチー[4] な場合を考えた[1]．また，試料がほぼ均一で，主要構成鉱物がクリーンな石英であることから，表 1 の物性値を仮定した．図より，これらの試料については試料内の流体分布を一様と考えると実測値と理論値が整合していることがうかがえる．これ以外の試験についても，同様の仮定をすれば，実際に試験で用いた飽和度を理論的に検証できる．また逆に，弾性波の挙動を観察することで，試験における流体挙動が定常状態に達したかどうかも推測できると考えられる．

6．まとめ

岩石試料を用いた超臨界 CO_2 の浸透試験で，試料のバルクの P 波・S 波速度を測定することで CO_2 の飽和度の経時変化予測の可能性について検討した．その結果，弾性波速度の経時変化によって CO_2 の飽和度を予測できる可能性があることが分かった．今後データを収集することで，その有効性について検討を進めたい．

参考文献

1)　平塚裕介ら：超臨界 CO_2 浸透試験の逆解析による相対浸透率曲線の同定, pp.425-430, 第 13 回岩の力学シンポジウム 2013.
2)　小川豊和，今村聡：超臨界 CO_2 の相対浸透率と弾性波速度の測定，電力土木，No. 351，pp. 86-90，2011.
3)　加藤文人ら：岩石コアの弾性波速度と油層特性との関係に関する検討，105 回物理探査学会学術講演会，2001.
4)　Mavko G.. et al. The Rock Physics Handbook, Cambridge University Press, 1998.

[1] 「一様」とは，岩石試料の中を全断面に対して同じ速度で流体が移動する場合を（流体フロントがはっきりしている），「パッチー」とは，試料内の流体分布が不均一で混ざり合っている場合を指す。