

逆解析による超臨界 CO₂-水系の相対浸透率曲線の同定

大成建設(株)技術センター 正会員 ○平塚 裕介, 山本 肇, 小川 豊和

1. 目的

二酸化炭素回収貯留技術 (CCS) では, 地下深部の貯留層内に圧入した超臨界CO₂の挙動を予測・評価することが必要になる. 著者らは, その基礎データとして, 超臨界CO₂-水系の相対浸透率の測定を行ってきた¹⁾. 相対浸透率の測定方法には, 定常法と非定常法がある. 定常法はCO₂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るのに対し, 非定常法は水で飽和された岩石試料内にCO₂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. 非定常法は定常法に比べ, 試験時間が短い, 超臨界CO₂-水系での実施事例は少なく, 定常法との比較も十分になされていない. 本稿では, 非定常法による超臨界CO₂-水系の浸透試験を行い, 自動逆解析による相対浸透率曲線の同定を試みた結果を報告する.

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, 拘束圧をかけた後, 上流側のシリンジポンプによって試料中にCO₂を一定流量で圧入する. 試料から排出される水とCO₂は, セパレータを経て下流側の定圧制御されたシリンジポンプ内に集められる. セパレータは, 試料から流出した水と超臨界CO₂を二相分離する装置であり, 容量203cc, 内径17.5mmのステンレス管と差圧計を組み合わせで構成される. セパレータ内で分離されたCO₂カラムの高さを差圧計により経時的に測定することで, CO₂流量を求めることができる. 水の流出量は, 下流側のシリンジポンプへの総流出量からCO₂流量を差し引くことにより求められる. 試験中は, 上・下流の配管に設置した圧力計と温度計により, 流体の圧力と温度を測定する.

3. 試験条件

今回の試験では, 所定の温度・圧力で飽和溶解度に達したCO₂溶解水で試料内を飽和した後, 超臨界CO₂を圧入し, 試料から流出する水と超臨界CO₂の流量と試料

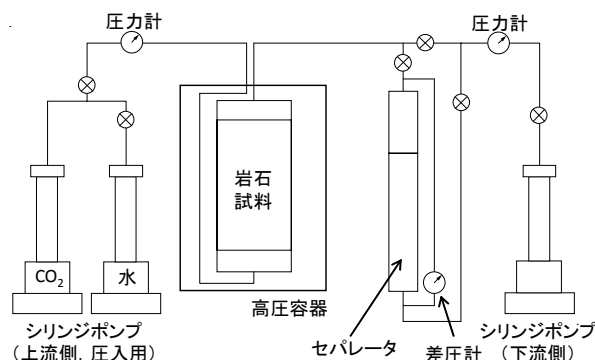


図 1 試験装置の概略図

上下端の温度・圧力を連続的に測定する. 岩石試料は, 直径49.5mm, 高さ100mmに円柱整形したベレア砂岩を用いる. 有効孔隙率は18%, 絶対浸透率は $5.0 \times 10^{-15} \text{m}^2$ である. 流体の温度, 圧力を44.7°C, 9.49MPaに, 拘束圧を12.1MPaに設定し, 超臨界CO₂を流量5ml/minで圧入する. 圧入量は試料の空隙体積の3~4倍程度である.

4. 実験結果

試料の上・下流の流体圧力の経時変化を図 2に示す. 上下流の差圧は最大で約 0.23MPa である. 次に, 試料下流から流出した水と CO₂ の流量の経時変化を図 3に示す. 圧入開始から約 3.8 分後に CO₂ のブレイクスルーが確認できる. ブレイクスルー後, CO₂ 流量は速やかに流体の圧入流量と同程度に達し, 水流量はゼロに近い値になった. これは岩石試料内の移動可能な水の多くが押し出されたことを示すが, 試験終了時(35 分)でも未だ定常状態には至っていないと考えている.

5. 数値逆解析による相対浸透率の推定

実験結果について, 自動逆解析コードを用いたヒストリーマッチングにより相対浸透率曲線の同定を行う. 自動逆解析には, 米国ローレンスバークレー国立研究所で開発された iTOUGH2(1999)²⁾を用いた. 逆解析では順解析コード TOUGH2(1991)³⁾の計算を繰り返しながら, 観測値と計算値の残差の最小化するように, 数値モデルの未知パラメータ (今回は相対浸透率) を同定する.

相対浸透率は気相あるいは液相の飽和度の関数で表すことができる. ここでは, 相対浸透率曲線をBrooks

キーワード 超臨界 CO₂, CCS, 相対浸透率, 逆解析

〒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 TEL045-814-7237

and Coreyの式で表現する．水の相対浸透率 k_{rw} とCO₂の相対浸透率 k_{rCO_2} は各々以下のように表される．

$$k_{rw} = S_e^{(2+3\lambda)/\lambda} \quad (1)$$

$$k_{rCO_2} = (1 - S_e)^2 \left(1 - S_e^{(2+3\lambda)/\lambda} \right) \quad (2)$$

$$S_e = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw} - S_{rCO_2}} \quad (3)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 S_{rw} 、 S_{rCO_2} はそれぞれ水、CO₂の残留飽和度、 λ は空隙径分布等により変化する指数である．式(3)の通り、今回は有効飽和度にCO₂の残留飽和度を考慮している．但し、水の相対浸透率 k_{rw} に対しては $S_{rCO_2}=0$ とした．ここでは、 S_{rw} 、 S_{rCO_2} 、 λ の3つの相対浸透率パラメータを逆解析で求める未知パラメータとする．入口側の圧力およびCO₂と水の出口流量の実測の経時変化を観測データとし、逆解析による相対浸透率曲線の推定を試みる．

6. 逆解析結果

圧力の逆解析結果を図2中の実線で示す．解析結果は、圧入開始当初は圧力が上昇し、流量の経時変化が示すCO₂のブレイクスルーを機に減少した後、定常状態となる挙動を示す．一方、実測では圧入開始直後のピークは見られないが、その後の定常圧力については数値解析によりある程度再現されている．水とCO₂の排出流量を図3中の実線で示す．実測のブレイクスルーのタイミングや、その後の流量も解析結果と平均的には概ね合致している．逆解析から求めた相対浸透率パラメータは $S_{rw}=0.063$ 、 $S_{rCO_2}=0.15$ 、 $\lambda=0.71$ となり、これらのパラメータから相対浸透率曲線を描くと図4中の実線と破線のようになる．

ここで比較のため、定常法による既往の測定結果として、小暮⁴⁾ならびにPerrin *et al.*⁵⁾がベレア砂岩に対して求めた超臨界CO₂-水系の相対浸透率を図4中に併せてプロットした．この図を見ると、今回の非定常法で求めた測定結果は、既往の定常法で測定された値と概ね整合的であるといえる．ただし、今回評価した相対浸透率は既往値よりも全般的にやや大きく、岩石試料の違いだけでなく試験条件の違いが原因になっている可能性がある．また、流量の違い（キャピラリー数）による影響や、逆解析における解の一意性や不確実性の幅についても検討が必要である．

7. まとめ

本研究では、非定常法による超臨界CO₂浸透試験を行

い、実測の圧力と流量データとのヒストリーマッチングにより、超臨界CO₂-水系の相対浸透率を求めた．逆解析の結果、実測の圧力・流量を解析でよく再現できた．逆解析で求めた相対浸透率曲線は既往の定常法で測定されたものと概ね整合しており、非定常試験での相対浸透率の同定について有効性が示された．

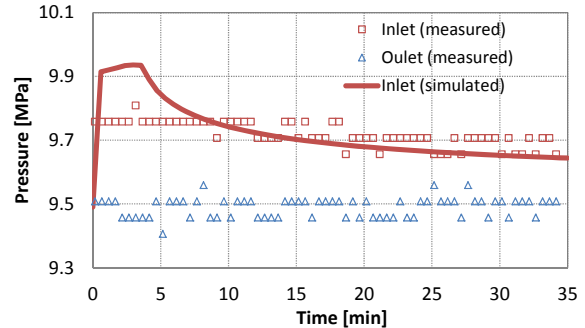


図2 圧力の経時変化

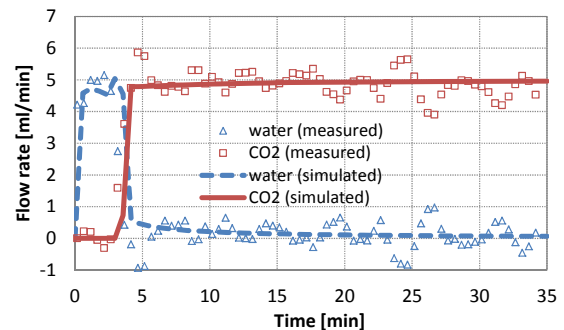


図3 流量の経時変化

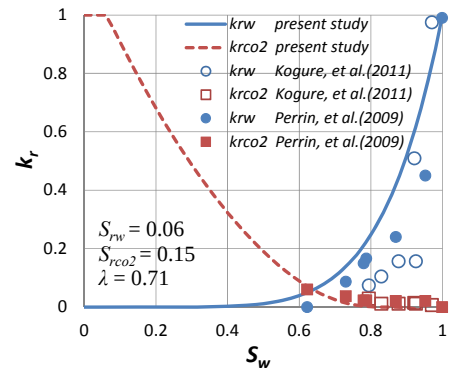


図4 相対浸透率曲線

参考文献

- 1) 小川豊和, 今村聡: 超臨界 CO₂ 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.
- 2) Finsterle, S.: *iTOUGH2 User's Guide*, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, CA94720, 1999.
- 3) Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G.: *TOUGH2 USER'S GUIDE, VERSION 2.0*, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, and Berkeley, CA94720, 1999.
- 4) 小暮哲也, 北村圭吾, 山田達也, 西澤修, 薛自求: 多孔質砂岩中の定常流動状態における水-超臨界 CO₂ 系の相対浸透率, 地学雑誌, pp.944-959, 2011.
- 5) Perrin, J.C., Krause, M., Kuo, C.W., Miljkovic, L., Charoba, E. and Benson, S.M.: Core-scale experimental study of relative permeability properties of CO₂ and brine in reservoir rocks, *Energy Procedia*, 1, pp. 3515-3522, 2009.