

非定常法における水-超臨界 CO₂系の相対浸透率測定における 逆解析解の妥当性評価

大成建設(株) 正会員 ○平塚 裕介
大成建設(株) 正会員 山本 肇

1. はじめに

CCS(二酸化炭素回収貯留技術)では、地中に圧入したCO₂の挙動を予測することが重要であり、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が行われる。相対浸透率の測定方法の一つである非定常法は、水で飽和された岩石試料内に超臨界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(ヒストリーマッチング)して相対浸透率パラメータを同定するものである。しかし、ヒストリーマッチングでは、パラメータを最適化する際に一意の解が得られず、推定値の信頼性と客観性が欠ける場合がある。本報では実測値と解析値との残差から求まる目的関数を計算し、未知パラメータの組み合わせと目的関数の関係について考察することで、得られた相対浸透率パラメータの一意性および不確実性について評価した結果を報告する。

2. 自動ヒストリーマッチング

今回はベレア砂岩を対象とし、非定常法による相対浸透率測定を行った¹⁾。測定では、CO₂を溶解させた炭酸水で飽和した岩石試料に、超臨界CO₂を温度44.1°C、間隙水圧9.5MPa、一定流量1.0ml/min条件で圧入した。図1に岩石試料の上下端の入口側圧力と出口側流量の実測データを示す。試験終了時点での岩石試料内の水飽和度は約30%であった。これらの非定常データを対象に逆解析コードiTOUGH2²⁾/ECO2Nを用いて、自動ヒストリーマッチングを行い、相対浸透率曲線を同定した。逆解析では、順解析コードTOUGH2の計算結果に基づき、実測値と計算値の残差を最小化する。具体的には未知パラメータを変化させ以下の目的関数を計算し、Levenberg-Marquardt法²⁾によって最小化が図られる。

$$F = \sum_{i=1}^m \frac{r_i^2}{\sigma_{z_i}^2} = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i^* - z_i)^2}{\sigma_{z_i}^2} \quad (1)$$

F : 目的関数, σ_{z_i} : 分散量, r_i : 残差ベクトル
 z_i^* : 実測値, z_i : 計算値

相対浸透率曲線は液相あるいは気相の関数として表される。ここでは式(2)~式(4)に示すBrooks and Coreyの式を採用し、式中の S_{rw} , k_{rgmax} , λ の3つを未知パラメータとした。ヒストリーマッチングの結果をそれぞれ、図1に示す。圧入開始当初に見られる圧力のピークやCO₂のブレイクスルーのタイミングなど、圧力、流量ともに実測データを良く再現できている。

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

S_e : 有効飽和度, S_{rw} : 水の残留飽和度

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

S_{rCO_2} : CO₂の残留飽和度
 λ : 空隙径分布に関わる形状パラメータ

$$S_e = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw} - S_{rCO_2}} \quad (4)$$

k_{rgmax} : エンドポイント(図4参照)におけるCO₂相対浸透率

3. パラメータ同定の妥当性の検証

上記3つの未知パラメータと目的関数(式(1))の関係を図2に示す。各パラメータの変化範囲を、 S_{rw} は0.0~0.2、 k_{rgmax} は0.0~1.0、 λ は0.5~2.0とし、全ての組み合わせで順解析を行って目的関数を計算した。同図中にiTOUGH2による自動ヒストリーマッチングで求めた最適解(目的関数の最小値=260)を白点で示す。この図から、最適解は目的関数の小さい領域(寒色部)に位置していることが確認される。今回のパラメータの範囲内では、それ以外の局所的な最小値は存在せず、一意性の高い解が得られたと考えられる。

キーワード CCS, 相対浸透率, 非定常法, 逆解析

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 TEL045-814-7237

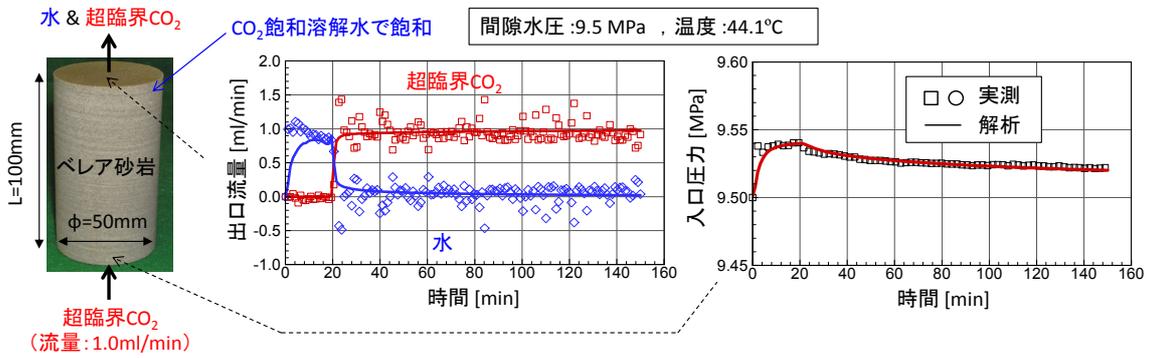


図1 ヒストリーマッチング結果 (点：実測，線：解析)

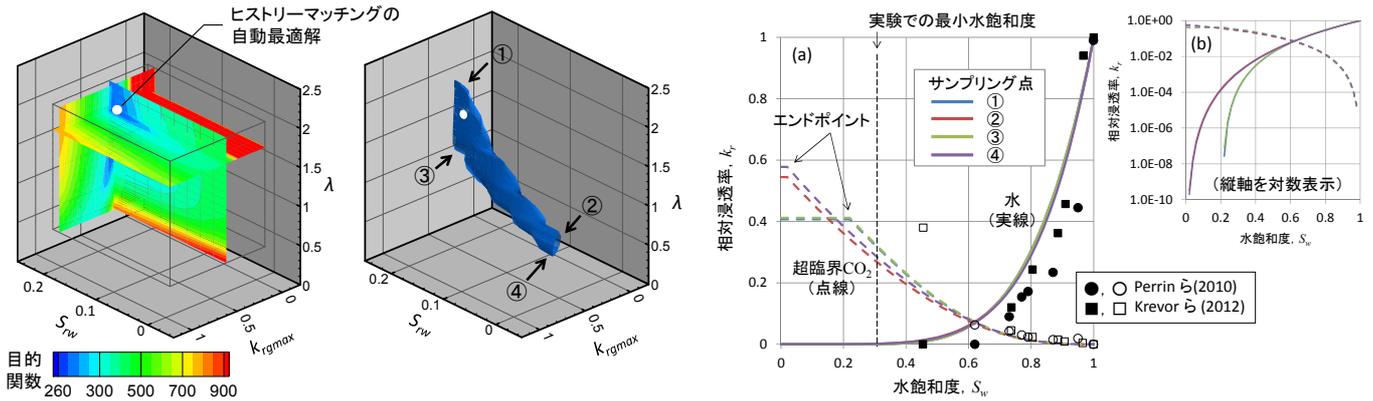


図2 目的関数の分布

図3 目的関数の等値面 (F=273)

図4 相対浸透率曲線

次に目的関数に対する未知パラメータの感度について考察する。あるパラメータの変化に対して目的関数の変化が大きければそのパラメータの感度は大きい。図2の目的関数の分布から、最適値周辺で目的関数が小さい領域として $F=273$ の等値面のみを図3に示した。この図から、 k_{rgmax} と比べて、 S_{rw} と λ が変化しても目的関数の値が大きく変わらないことが分かる。すなわち、 S_{rw} と λ の感度は比較的小さく、得られた最適値の不確か性が大きいことが示唆される。ただし、試みに、図3の分布の四隅(①~④)のパラメータの組み合わせを用いて相対浸透率曲線を描くと、図4(a)のようにいずれも曲線形状に大きな違いがみられない。つまり、目的関数の最小値付近では、 S_{rw} と λ はほぼ同一の曲線をもたらすように相関して変化していることが分かる。ただし、同図の縦軸を対数目盛で表示すると(図4(b))、水飽和度が低い範囲(40%以下)では大きな違いが確認される。前述の通り、今回の実験では水飽和度は約30%までしか低下していない。そのため、低飽和度の領域での相対浸透率の同定が不定問題になっていることを示唆しており、今回の手法によるパラメータ同定の限界を示している。既往の研究により他手法(定常法)で求めた相対浸透率を図4(a)に併せて示す。今回の非定常法による実験結果は既往の定常法と同様の結果が得られていることが分かる。また、岩石試料(ベレア砂岩)内の水を水飽和度40%程度以下に排水することができていない。今後は、逆解析による相対浸透率パラメータの同定にあたっては、別途試験により S_{rw} の範囲に制約条件を設けるなどの工夫を検討していく必要がある。

4. おわりに

非定常法による相対浸透率測定で得られた実測データに対し、自動ヒストリーマッチングを行い、相対浸透率パラメータを同定した。求めたパラメータの妥当性について、目的関数のマッピングや既往の実験結果との比較から考察した。その結果、今回のパラメータ同定は一意性が高く、求められた相対浸透率曲線も既往の実験とも整合的であることが示された。しかし、実験での CO_2 圧入過程でカバーできない水飽和度の低い範囲(40%以下)でのパラメータ推定には限界があることが分かった。

参考文献

1) Hiratsuka, Y and Yamamoto, H. : Numerical inversion for determining two-phase relative permeability of supercritical CO_2 and water, *8th Asian Rock Mechanics Symposium*, 2014. 2) Finsterle, S. : iTOUGH2 User's Guide, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 1999.