

堆積盆中の断層に発達する頁岩スミアの流体移動特性

Fluid transport properties of shale smear during fault development in sedimentary basin

高橋 美紀[1]

Miki Takahashi[1]

[1] 産総研

[1] Institute of Geoscience, AIST

断層帯が流体の通路になるか、それとも流体の移動を遮断するシールになるかは、地球内部の流体移動を考える上で重要な問題である。破碎帯の形成が断層内の孔隙を減らし、流体の移動を妨げることは良く知られているが、その他にも堆積盆中の断層が砂岩よりも遙かに低浸透率を持つ頁岩を取り込むことで形成される頁岩スミアは破碎による断層シール能力より更に高い。この頁岩スミアによる断層シールの有無を予測することは、特に石油の移動集積を予測する上で重用なりリスク要因となっている。しかし、頁岩スミアはどの程度流体を遮断できるのか、そのシール能力は断層変位の増加に伴いどう変遷するのか、これら基本的な問題を堆積盆ごとにどうやって調べるか、といった問いに対する定量的かつ系統的研究はない。本研究では、頁岩スミアの発達過程を油圧式高温高压三軸変形透水試験機を用いて実験室で再現し、断層変位の増加に伴うシール能力の変化を、断層変位を与えながら浸透率を計測することで定量化し、実験的手法による頁岩スミアの断層シール能力の評価方法を提案する。また本実験結果を、断層シールが石油の貯留構造を形成しているミリ油田（マレーシア・サラワク州）の露頭における観察結果と比較した。

使用した試験機は、圧力容器、油圧サーボ式載荷プレス、封圧・間隙圧制御用の2台のアクチュエータからなり、難燃性油を圧力媒体としている。また封圧を制御し断層に作用する垂直応力を一定に保つこと、間隙圧振動法による浸透率計測のため正弦波の変動を間隙圧に与えること等が可能である。“砂泥互層中の断層”を単純化して再現するために、サンプルは軸方向から30度方向に切断・研磨した模擬断層をもつ2組みの円柱形 Berea 砂岩試料（有効封圧2MPaでの浸透率 $\sim 10^{-13} \text{m}^2$ 、孔隙率15%）の間に、房総半島・屏風ヶ浦より採取した円盤状のシルト岩（有効封圧5MPaでの浸透率 $\sim 10^{-16} \text{m}^2$ 、孔隙率60%）を挟んだものを用いて、断層変位に伴う頁岩スミアの発達過程とその試料全体に対する浸透率変化を調べた。実験は、20度に保たれた恒温槽の中で、0.14、0.28または1.41 $\mu\text{m}/\text{sec}$ の変形速度、20、30または40MPaの有効垂直応力のもとでおこなった。

軸変位量の増加に伴う浸透率の変化は、以下の3つの領域に分類できる。滑り面上にかかる剪断応力が砂岩の降伏点に到るまでシルト層にかかるコンパクションの影響で浸透率の1~1.5オーダーの急激な低下が実測された（領域1）。その後、断層変位が増加しても浸透率の低い状態がしばらく保たれる領域2が現れ、領域3にて、最終的にさらなる変形の進行が頁岩スミアを引き延ばし、連続性を失わせることに起因して浸透率は緩やかに回復していった。領域2の範囲そのものが、断層変位が進行しても低浸透率を保ちうる高シール能力の範囲であるから、この範囲の大小を比較することで確実に高シール能力領域を定量評価できる。領域2の範囲を shale smear factor (SSF= 垂直変位量/頁岩層の厚さ)を用いてあらわすと、有効垂直応力30MPa以下のとき1.60であり、有効垂直応力40MPaのとき2.31であった。ここで低浸透率を保ちうるSSFの範囲（領域2の範囲そのもの）と、実験後のサンプルを観察することで得られる“スミアが連続性を失うSSFの値（SSF_{crt}）”が頁岩スミアによる断層シール能力の指標として利用できると考えられる。実験後のサンプルの観察結果より、SSF_{crt}は有効垂直応力30MPaのとき4.9であり、有効垂直応力40MPaのとき6.6であった。領域2の範囲やSSF_{crt}の結果は、高有効応力下ほど断層シール能力が高いことを示唆しており、一連の実験手順は頁岩スミアによる断層のシール能力を定量評価する方法として有効と考える。

実験結果がどの程度天然の頁岩スミアを再現しているかを検証するために、マレーシア・サラワク州・ミリ・Airport Road 沿いの露頭に観察される頁岩スミアの調査をおこなった。それぞれの小断層についてSSF_{crt}を求めると断層ごとにその値は4.3~13.1とばらついた。また、発表時までミリ層の砂泥互層を用いたスミア形成実験を行い報告する予定である。

以上の研究結果によって、変形と浸透率を同時に測定することによって頁岩スミアの断層シール能力を定量評価でき、頁岩スミアがシール能力を失う断層変位量も推定できる可能性がある。本実験的手法は世界の堆積盆で多数の応用が期待できる。また、本手法は、堆積岩中の地下水と物質の移動、環境汚染物質の移動など、石油の断層シール能力評価以外の多くの問題にも適用することが可能である。