

氏 名	たか はし み き 高 橋 美 紀
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	論 理 博 第 1419 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Experimental and Field Studies on the Fault-Seal Potential of Shale Smear for Hydrocarbon Migration (石油の移動に対する頁岩スミアの断層シール能力に関する実験及びフィールド研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 嶋 本 利 彦 教 授 増 田 富 士 雄 助 教 授 山 路 敦

論 文 内 容 の 要 旨

石油探査においては、砂泥互層中の断層が砂岩よりも遙かに低浸透率をもつ頁岩（泥岩、シルト岩を含む）を取り込むことで形成される断層シール構造（頁岩スミア）の有無を予測することが、石油の移動集積を予測する上で大きな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、その断層シール能力は断層変位の増加とともにどう変遷するのか、これら基本的な問題を油田地帯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かった。本研究では、頁岩スミアの発達過程を実験室で再現し、断層変位の増加に伴う断層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、頁岩スミアのシール能力を実験的に評価する方法を提案する。

上記の目的のために、油圧式高温高压三軸変形透水試験機を開発した。本試験機によって、変形に伴う浸透率の変化を、間隙圧振動法を用いて地下深部条件下ではほぼ連続的に測定することが可能になった。“砂泥互層中の断層”を再現するために、サンプルは軸方向から 30° の方向に切断・研磨した模擬断層をもつ 2 組みの円柱形 Berea 砂岩試料（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（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室温下で調べた。

頁岩スミアの発達過程は、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ほぼ降伏点に到るまでに、シルト層の圧密に伴って浸透率は 1～1.5 オーダーほど急激に低下した（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、それに続く領域 3 では浸透率は緩やかに回復していった。領域 3 における浸透率の緩やかな回復は頁岩スミアが引き延ばされて連続性を失うことに起因している。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。断層のシール能力は、領域 3 の始まりに対応する shale smear factor ($SSF = \text{垂直変位量} / \text{頁岩層の厚さ}$)、つまり頁岩スミアが連続性を失う SSF の値 (SSF_{crit}) を用いて定量的に評価することができる。実験後のサンプルの観察結果より、 SSF_{crit} は断層に作用する垂直応力が 30 MPa の時には 4.9 ± 0.2 、40 MPa の時には 6.6 ± 1.0 であった。この結果は、世界各地における頁岩スミアの観察結果 ($SSF_{crit} = 5 \sim 7$) とよく一致している。また、実験結果と比較するために、マレーシア・サラワク州・ミリ油田において、デルタ性堆積物中の正断層沿いに発達した頁岩スミアの調査をおこなった。その結果、頁岩は断層破碎帯の成長および副次的な破断面の形成に伴って断層帯に取り込まれることが判明した。これらの頁岩スミアは本実験によって再現された頁岩スミアと非常によく似ており、頁岩スミアが連続性を失う SSF_{crit} は断層ごとにややばらついて 4.3～13.1 の値をとった。

以上の研究結果によって、天然の頁岩スミアとよく似た構造を本実験は再現しうることで、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シール能力を定量的に評価でき、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ことが明らかになった。本実験的手法は世界の油田地帯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、石油地質学以外の多くの問題にも適用することが可能である。

論文審査の結果の要旨

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、石油の探査のみならず、地球内部の流体移動を考える上で非常に重要である。多くの研究者は、やや漠然と、断層帯は流体移動の通路になると考えてきた。しかし、最近では、多孔質な堆積岩中の断層の場合には、構成粒子の破壊による細粒化と粒子間のセメンテーションによって、断層帯は母岩よりもほぼ1桁低い浸透率をもつという測定結果が報告されるようになった。頁岩・シルト岩は砂岩よりも数桁低い浸透率をもつので、断層帯にそれらの岩石がとりこまれて頁岩スミアを形成すると、断層帯はさらに流体を通しにくくなるはずである。そのような認識に基づいて、石油探査の分野では、断層の垂直変位量を頁岩層の厚さで割った値を *SSF* (shale smear factor) と定義し、*SSF* によって断層のシール能力（断層が石油をトラップする能力）を経験的に評価するようになった。つまり、断層変位が大きくなると頁岩スミアはちぎれて連続性を失い、断層帯は石油に対するシール能力を失うだろうと判断するのである。しかし、頁岩スミアのシール能力に関する体系的な研究はなされていなかったため、断層シール問題は、最近世界的にも注目を集めるようになった。

高橋氏は、石油公団に新たに導入された油圧サーボ式高温高圧三軸変形透水試験機をほぼ自力で整備・調整し、変形にもなう浸透率の変化をほぼ連続的に測定できるシステムを構築した。この試験機は、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、外熱炉からなり、石油地質学の分野では世界最高レベルの性能を有している。同氏は、この試験機を用いて、多孔質な Berea 砂岩中の断層沿いに頁岩スミアが形成されるプロセスを再現する実験を考案した（頁岩質層としては房総半島・屏風ヶ浦産のシルト岩を使用）。その結果、(1)断層変位量の違う試料の観察によって頁岩スミアの発達過程を調べることが可能であること、(2)断層帯は、断層が動きはじめてから頁岩スミアが連続性を失うまでの間、もっとも高いシール能力を有すること、(3)頁岩スミアを含む断層帯は通常の断層帯よりもさらに1～2桁低い浸透率をもつこと、(4)頁岩スミアが連続性を失い始める時の *SSF* の値 (*SSF_{crit}*) は4.9～6.5になり、圧力の増加とともに *SSF_{crit}* は増加すること、などが明らかになった。この *SSF_{crit}* の値は、これまでに野外調査によって報告された値と同じオーダーである。また、高橋氏は、マレーシア・ミリ油田の見事な頁岩スミアの野外調査をおこなって、実験によって天然の頁岩スミアが再現できていることを示した。また、この地域の *SSF_{crit}* はやや大きく(4.3～13.1)、断層のシール能力を評価する上で有効な *SSF_{crit}* は、対象とする地域ごとに決める必要があることを示した。

高橋氏は、上述の成果に基づいて、実験的手法による頁岩スミアのシール能力の評価方法を提唱した。この手法は、堆積岩中の地下水と物質の移動、堆積盆地の発達過程の解析、環境汚染物質の移動など、学問的にも社会的にも重要な多くの問題にも適用することができる。なお、2002年には頁岩スミアの形成に関する実験的論文が2編報告されたが、浸透率の測定をしていないので、断層シール能力の定量的な評価にはいたっていない。

以上の研究成果を総合的に判断して、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと結論した。また、論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。