

堆積盆地に発達する頁岩スミアの 連続性と流体移動特性

高 橋 美 紀*

Continuity and Transport Properties of Shale Smear in Sedimentary Basin

Miki TAKAHASHI *

Abstract

To quantify the transport properties of faults, a series of laboratory experiments is performed on permeability change during deformation of simulated shale smear. The fluid sealing potential of faults is important for better understanding of the hydrocarbon migration-accumulation process and abnormal fluid pressure build-up below faults in a sedimentary basin. One of the possible mechanisms of the fault sealing process is role of shale smear characterized by migration of mudstone into the fault plane, forming a barrier to the fluid flow. To evaluate the sealing potential of a fault, it is necessary to develop tools and methodology to monitor the permeability of faults during deformation, and to compare experimental results with field observations. First, the author investigated the smear continuity developed in deltaic sediments on Airport Road outcrop, Miri, Sarawak, Malaysia. At this site, the critical shale smear factor (SSF_{crit} : showing maximum continuous smear at a shale-thickness/throw data) was approximately 8, which is larger than previously reported data at other sites. Then the author conducted experiments using sandstone-shale interbedded specimens obtained from the Miri formation. The natural specimen was inserted into a part of an artificial fault of pre-cut Berea sandstone, and the permeability of the sample was measured. Similar to results of the previous experiments on siltstone by Takahashi (2003) permeability show the following three stages: (1) Regime 1, rapid reduction due to compaction prior to faulting, (2) Regime 2, constant and relatively lower permeability, and (3) Regime 3, permeability recovery caused by erosion of smear. Except for an experiment with a sandy specimen, moreover, all experiments show permeability recovery of 0.5 orders of magnitude after Regime 1. This characteristic permeability change from Regime 1 to Regime 2 for mud-rich specimens appears to indicate dilation induced by fault propagation in the over-consolidated specimen at starting fault sliding. Fault structures observed from the outcrop and from experimental products are similar. The laboratory experiments can thus accurately reproduce the mechanism of fault sealing by shale smear, suggesting that experimental studies are essential to understand fault sealing by shale smear.

* 石油公団・石油開発技術センター（現所属：産業技術総合研究所地球科学情報研究部門）

* Technology Research Center, Japan National Oil Corporation. (Present address: Institute of Geoscience National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Key words : shale smear, smear continuity, permeability

キーワード : 頁岩スミア, 浸透率, スミアの連続性

I. はじめに

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。特に堆積岩中に発達する断層近傍の流体移動特性を知ることによって、大地震の発生に大きく関わるとされる断層直下の異常間隙圧の発生、油・ガスなどの資源の移動・集積の予測、汚染物質の地層処分に関わる諸問題等、社会・産業に対し大きな貢献が期待される。

堆積岩、特に砂泥互層中に発達する断層がシール能力を持つに至る代表的なメカニズムの一つに頁岩スミアと呼ばれるものがある。頁岩スミアについては実のところ明確な定義が存在するわけではなく、断層岩の分類を当てはめるならば断層ガウジに相当する。Peacock *et al.* (2000) によると、低浸透性を持つ泥岩が断層内に入り込み断層面上を覆うことで、流体の移動に対するバリアを形成する形態のことを頁岩スミアと呼んでいることから、ここではその定義に従ってこの名称を使用し、破碎による細粒化と変質によって生じる断層ガウジと区別することとした。頁岩スミアによる断層シール能力は断層ガウジやカタクラサイトより高いとされることから (Knipe, 1992), 頁岩スミアによる断層シール能力を知ることが堆積岩に発達する断層の流体移動特性を把握する上で重要である。頁岩スミアが断層シールとして有効に働くためには、厚い頁岩スミアが断層面上に連続して存在することが必要である。断層運動により低浸透性の頁岩層が断層内に供給されることになるが、断層変位量の増加とともに頁岩スミアは削剥され薄くなり、最終的には連続性を失うようになる。

断層の変位量に対する頁岩スミアのシール能力を評価することを目的に Takahashi (2003) は室内実験により断層変位に伴うスミアの発達の再

現と浸透率の同時測定に成功している。ここではマレーシアで最も古い油田地域であるサラワク州 Miri における露頭調査を行い、Takahashi (2003) の手法を天然へ応用することを試みた結果を報告する。

II. 地質概要

Miri 油田はボルネオ島西岸、ブルネイ南に位置するマレーシア・サラワク州 Miri にある (図 1a)。本油田地域は、1910 年より採掘が始まったマレーシアで最も古い油田であり、現在も沖合にて採掘が続けられている。Miri 油田は Baram デルタ形成域の西側にある。Baram デルタは West Baram Line を境界に Luconia 陸塊と接している。Luconia 陸塊は白亜紀後期から始新世にかけて南下し、ボルネオ島へ衝突した。これにより中新世～鮮新世にかけて Baram デルタが発達したとされる (Madon, 1999a, b)。堆積盆の発達に伴い北東-南西方向に堆積同時性の正断層が発達し (中新世中期)、中新世後期にそれら正断層を切る Shell Hill 断層 (正断層) が形成された。

鮮新世にて Baram デルタ堆積盆は圧縮場に変わったとされ、これにより背斜構造と Canada Hill 断層 (衝上断層) が北東-南西走向に発達し、Miri 油田が形成された。Miri 油田は堆積同時性の正断層により区画化されていることが知られており (図 1b)、これら断層は石油の移動に対しシール能力を持っていると考えられる。

露頭は Airport Road 添いにあり、上部 Miri 層 (中新世後期) の堆積岩 (456 Sands) が露出している (図 1a, 図 2)。Airport Road outcrop (図 2b) では、粗粒-細粒の斜向層理を持つ砂岩と砂泥互層の繰り返しが見られている。このことから Airport Road outcrop は海進時の干潟の環境であったと推測されている (Tan *et al.*, 1999)。本露頭断面にて観察される正断層中 (例えば図 2b, c) に頁岩スミアの発達が報告されている (van

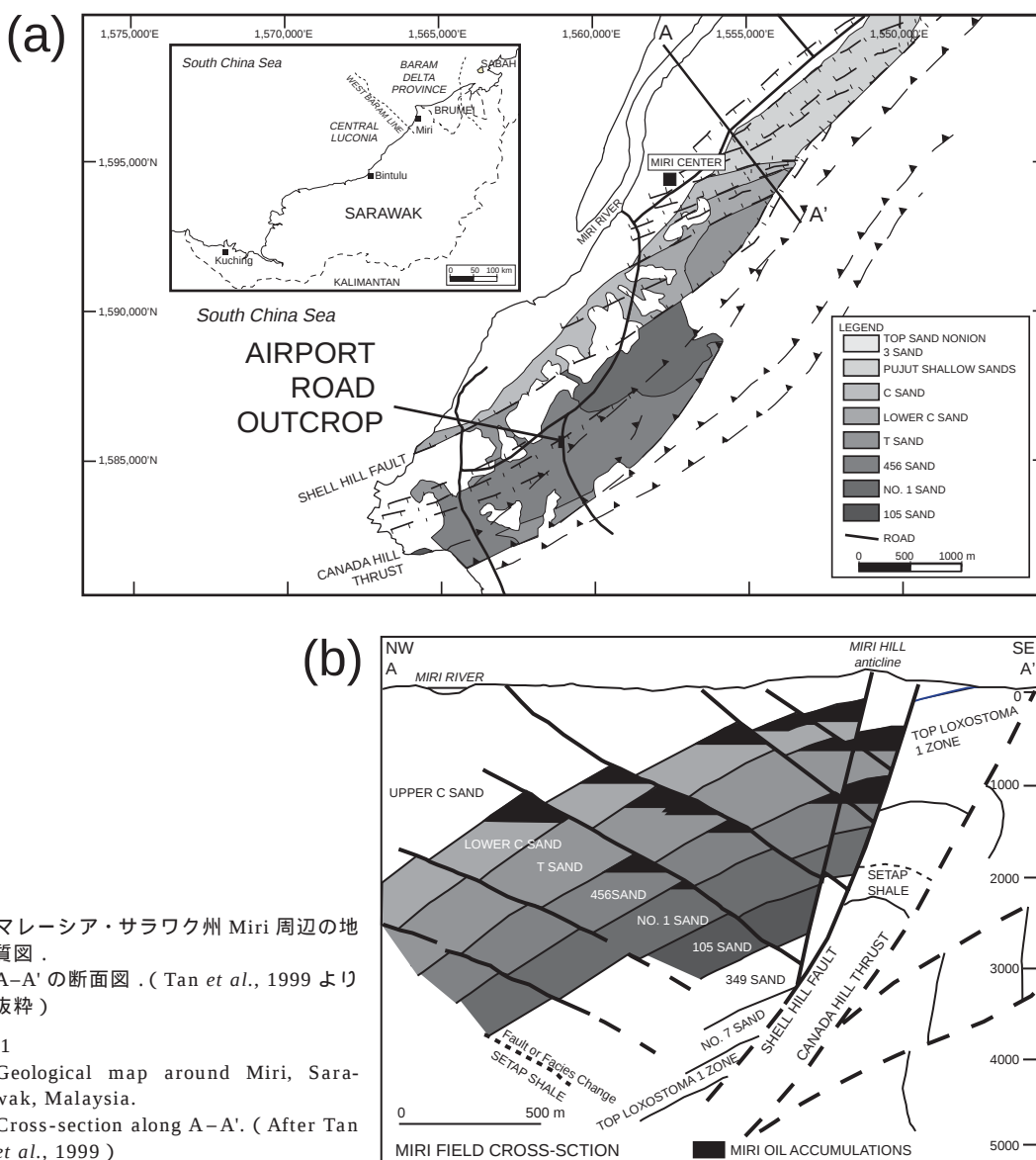


図 1

- (a) マレーシア・サラワク州 Miri 周辺の地質図。
 (b) A-A' の断面図。(Tan *et al.*, 1999 より抜粋)

Fig. 1

- (a) Geological map around Miri, Sarawak, Malaysia.
 (b) Cross-section along A-A'. (After Tan *et al.*, 1999)

der Zee, 2002) ことから、頁岩スミアが Miri 油田を区画化する断層シール構造である可能性が高い。

III. 調査露頭域における頁岩スミアの連続性

本露頭にてスミアの連続性について調査を行った。一般にスミアは供給源となる頁岩層の厚さが厚く、断層変位量の少ないものほど連続性がよい。スミアの発達を定量化するために Lindsay *et al.*

(1993) や Yielding *et al.* (1997) は頁岩層の厚さと断層の垂直変位量の幾何情報を元に様々な指標を提案している。その中で最も単純な無次元量である shale smear factor (*SSF*) を用いてスミアの連続性について検討を試みたい。*SSF* は断層の垂直変位量 (throw) を頁岩層の厚さで割った量であり、頁岩層の厚さの減少・断層変位の増加とともに大きくなる量である (図 3a)。つまり

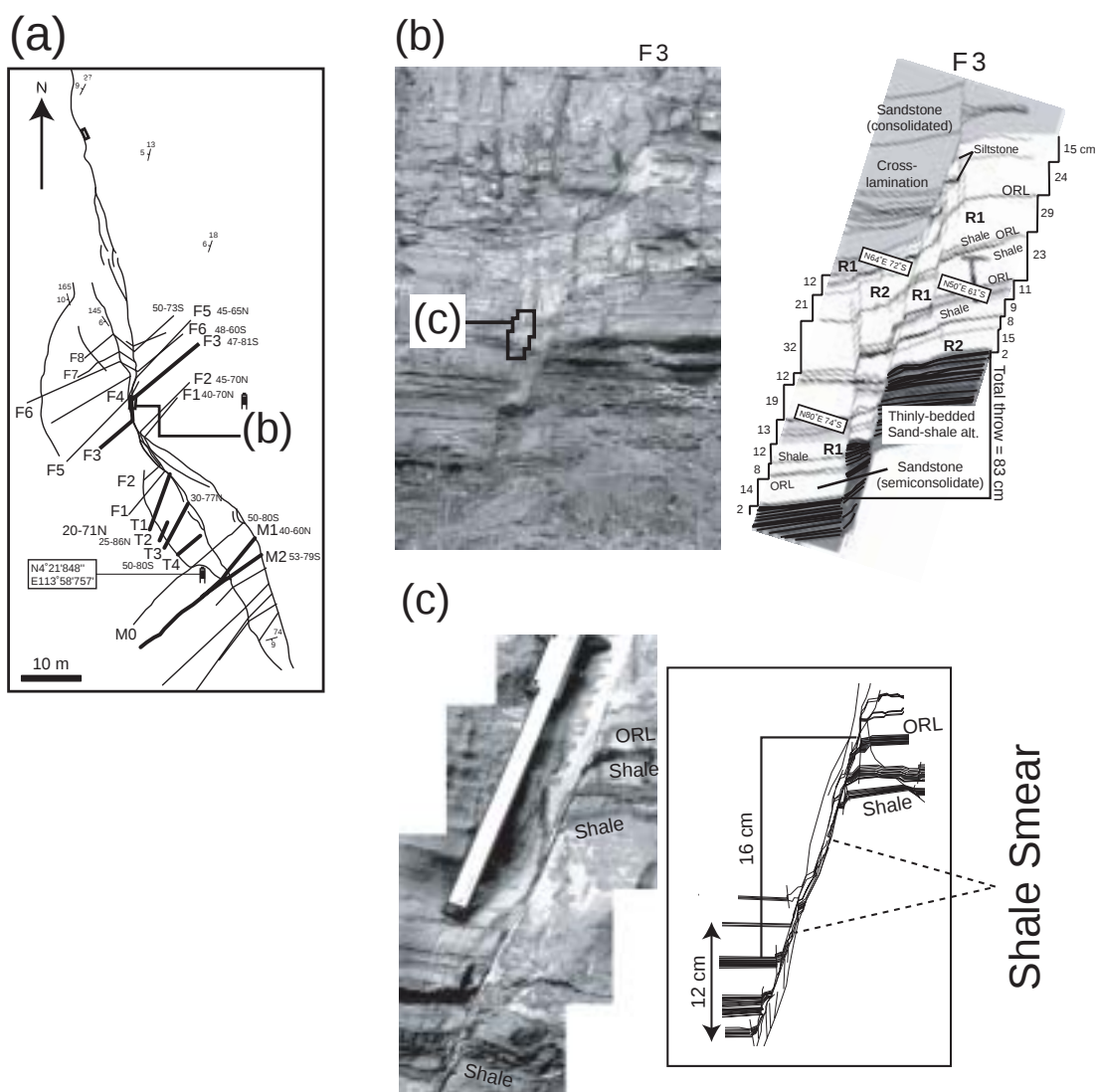


図 2 (a) Airport Road outcrop のルートマップ (鈴木, 2002). 頁岩スミアの連続性を調べるために調査対象とした断層を太線で示す。(b) は F3 断層の写真およびスケッチ。スケールはハンマーである。(c) F3 断層より R1 方向に派生した断層の拡大写真およびスケッチ。断層面に頁岩スミアが取り込まれている。スケールはノギスである。ORL は有機物に富む頁岩層をさす。

Fig. 2 (a) Root map of Airport Road outcrop (Suzuki, 2002). Faults indicated by bold lines are used to study shale smear continuity. Scale is a hammer. (b) Photographs and a sketch of F3-fault. (c) Details of a Riedel fault (R1). Scale is a caliper. ORL means organic rich shale layer.

SSF の値が大きくなるほど、断層のシール能力は減少する傾向を示す (図 3c)。その他に shale gouge ratio (SGR) と呼ばれる無次元量があり

(図 3b), SGR は様々な厚さ・様々な泥質部の含有量を持つ複数の泥岩層を断層運動により滑らせたときを想定しており、断層面上の各点における

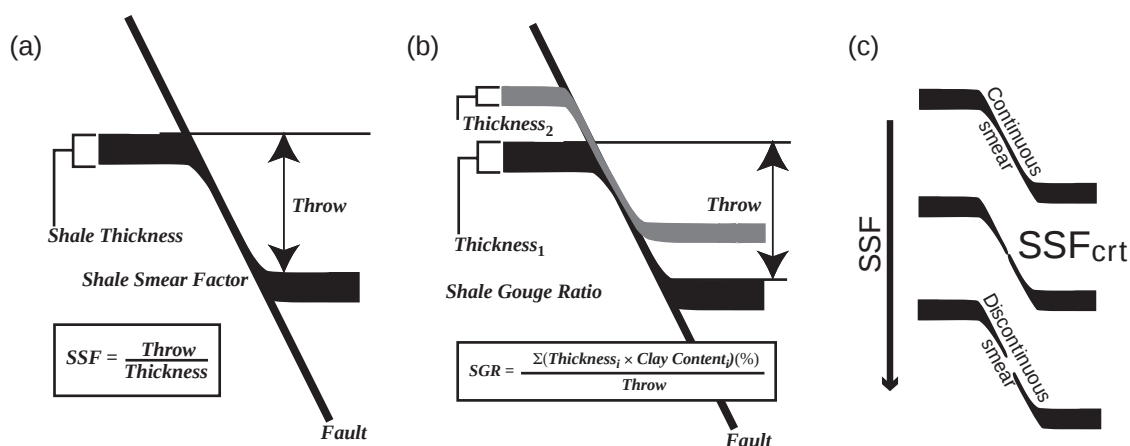


図 3 (a) shale smear factor (SSF) の定義。(b) shale gouge ratio (SGR) の定義。(c) 断層変位量の増加 (SSF の増加) に伴い、断層面を連続的に覆っていた頁岩スミアが連続性を失っていく。連続性を保ちうる SSF の最大値を SSF_{crit} と定義。

Fig. 3 Definitions of (a) shale smear factor (SSF) and (b) shale gouge ratio (SGR). (c) Here defines maximum SSF, which maintains continuous smear on the fault surface as SSF_{crit} .

SGR 値はそれぞれ異なる。SGR は任意の断層面上の点において、その点を通じた総層厚中に含まれる泥質の割合 (%) を示したものである。また断層の中に砂質部を全く含まない頁岩層が一枚しか存在しなければ $SSF = 100/SGR$ に相当する。

スミア供給源の頁岩層の厚さと断層垂直変位量のデータを収集し、スミアの連続性について記載する。ここで、頁岩スミアが露頭表面 (2 次元断面) にて連続した線として確認できるものを “Continuous smear” と、一個所でも連続性を失っていることが確認されたものを “Discontinuous smear” と定義し、スミアの連続性が失われる SSF を SSF_{crit} とそれぞれ定義する (図 3c)。 SSF_{crit} が大きいほど大きい変位量を受けても断層はその面上に連続したスミアを持つことを示す。測定は主断層に切られた頁岩層のみではなく、周辺の Riedel 剪断面の一つ一つについて変位を受けた頁岩層全てを対象とする。例えば図 2b の露頭写真およびスケッチにあるように、主断層 F3 の周辺に、主断層から分岐する形で小断層が Riedel 剪断面の R1 と R2 の方向に発達している。図 2c は主断層 F3 に対し R1 方向に発達した Riedel 剪断面の拡大である。この剪断面によって

切られている 3 枚の頁岩層についてそれぞれ層厚と垂直変位量を計測し、ルーペにて露頭表面を観察しスミアの連続性を判定する。

ここで、全ての計測データからスミアの連続性が失われる SSF 値、つまり SSF_{crit} を求める。縦軸に断層の垂直変位量を取り、横軸に頁岩層の厚さをとった図が図 4 である。Continuous smear は図の下方に分布し、Discontinuous smear は図の上方に位置している。Continuous smear と Discontinuous smear の分布の境界を原点から引いた直線の傾きが SSF_{crit} である。図 2 に示した断層全てについてそれぞれ SSF_{crit} を求めると、Airport Road outcrop における SSF_{crit} は 8 付近にあることがわかる。この数値は Lindsay *et al.* (1993) が炭田の露頭にてスミアの連続性を調べ $SSF_{crit} = 7$ を推定、Yielding *et al.* (1997) が Niger Delta の油田を形成するシール能力を持つ断層の変位量と頁岩層の厚さから $SSF_{crit} = 4$ を推定、Takahashi (2003) が実験にて $SSF_{crit} = 4.9$ (断層面に働く有効垂直応力が 30 MPa 以下のとき) および $SSF_{crit} = 6.6$ (断層面に働く有効垂直応力が 40 MPa のとき) などに比べて大きい。つまり Miri 油田地域は頁岩スミアが発達しやすい条件で

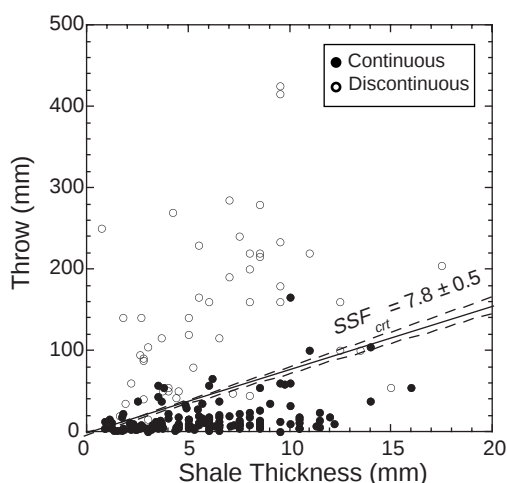


図 4 Airport Road outcrop における頁岩スミアの連続性． SSF_{crt} は約 8 となった．

Fig. 4 Summary of shale smear continuity of 7 normal faults observed at Airport Road outcrop. SSF_{crt} obtained is as approximately 8.

の断層運動を受け、他に比べて大きい SSF 値まで高いシール能力を持っていると言える。

IV．頁岩スミアの再現実験

砂泥互層を模倣したサンプルに断層変位を与え、断層面上に頁岩スミアを形成させる実験を最初に行ったのは Mandl *et al.* (1977) であり、それ以降 Weber *et al.* (1978), Sperrevik *et al.* (2000), Clausen and Gabrielsen (2002), Karakouzian and Hudyma (2002), van der Zee (2002) 等がリング剪断試験機や直接剪断試験機を用い頁岩スミア再現実験を試みている。これらの実験結果は (1) 天然の頁岩スミアの形態を再現すること、(2) 変形条件。使用する泥質層の柔らかさや湿潤度がスミアの形態に及ぼす影響を調べることに、ついてある程度の成功を収めてきた。しかしながら、スミアが形成され断層のシール能力が増す過程や、さらなる変形によってスミアの厚さが薄くなる過程におけるシール能力の変化を定量的に評価してはいない。Takahashi (2003) は斜め 30° にプレカットした円柱砂岩の中心を端面に平行に

カットし、その間に薄いシルト層を挟むことで断層面（プレカット面）を持つ砂泥互層を試料として用意することができた（図 5a）。この断層面を滑らせることによって頁岩スミアを断層面内に再現することに成功している。また変形の進行とともに間隙圧オシレーション法（Kranz *et al.* 1990; Fischer, 1992; Fischer and Paterson, 1992; Faulkner and Rutter, 2000; 高橋・金子 2003 等）による浸透率測定を行い、頁岩スミアの発達と浸透率変化との関係を見いだしている。それによると変形に伴い浸透率の変化に 3 つの領域（Regime）があることが見いだされた（図 5c）。変形が始まり降伏点（図 5b 中の yield point）に達するまでシルト層のコンパクションが断層面の滑りに先んじて起こり（図 5a を参照）、それに伴う浸透率の約 1 オーダーの低下（Regime 1）が現れ、スミアの発達により低浸透率の保持される領域（Regime 2）とさらなる変形の進行によりスミアが削剥を受け浸透率が緩やかに回復する領域（Regime 3）が現れる。Regime 2 が断層変位の増加に関わらず確実に高い断層シール能力を持ちうる範囲であることから、この範囲を定量評価することで断層シール能力を予測することが可能である。つまり Takahashi (2003) の示した一連の実験によって、頁岩スミアによる断層シール能力を予測することができる。

Takahashi (2003) の手法を天然試料に応用すべく、Airport Road outcrop より採取した砂泥互層について同じようにスミアの発達と浸透率の測定を行った。ここではその結果について報告する。

1) 実験方法

Takahashi (2003) では、プレカット面を入れた砂岩にシルト岩の薄層を挟んだ（図 5a）。ここではシルト層の代わりに上部 Miri 層より採取した円柱の砂泥互層を挟むこととする。直径 40 mm、長さ約 95 mm の円柱砂岩（Berea 砂岩）を円柱軸に対し斜め 30° にカットするところまでは Takahashi (2003) に同じである。斜め 30° の角度は砂岩の破壊角に近いので、滑りをこの面のみに集中させることができる。プレカット面を合わせ、円柱中央部を砂泥互層の厚さ分切り取り、砂

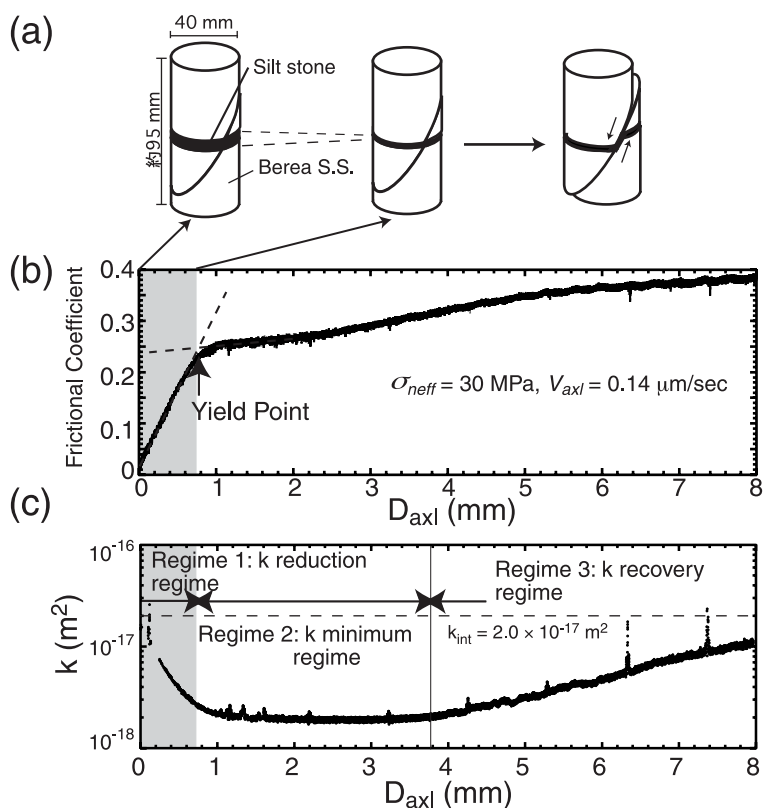


図 5 Takahashi (2003) の実験例 .

(a) 実験サンプルアセンブリと変形様式 . (b) 変形に伴う摩擦係数の変化と (c) 浸透率の変化を軸変位量について表したもの . 変形の進行に伴い浸透率の変化には 3 つの領域が現れる .

Fig. 5 One of the experimental results of Takahashi (2003).

(a) Specimen assembly and deformation feature. Development of (b) frictional coefficient and (c) permeability during deformation.

泥互層を挟む (図 6, 図 7a, 図 8a, 口絵 3-写真 1, 3)。Berea 砂岩中に入れてあるプレカット面は断層変位をもたらすガイドとしての役割を担っている。実験前の砂泥互層の厚さが 9.1 ~ 16.6 mm と Takahashi (2003) が用いた薄いシルト層 (1.5 ~ 3.5 mm) より厚いため、砂泥互層に形成される破壊面は Takahashi (2003) でシルト層中に観察される断層面よりも天然に近い形で砂泥互層中に伝播すると期待される。

実験に用いた試験機は石油公団・石油開発技術センター所有の高温・高圧岩石変形試験機である (Takahashi 2003)。変形中、30 °のプレカット面にかかる垂直応力を 25, 50, 75 MPa に保つよ

う封圧を制御した。変形速度は軸変位にして 0.28 $\mu\text{m/sec}$ である。間隙圧媒体は蒸留水で、間隙水圧は 5, 10, 20 MPa である。変形中の浸透率は間隙圧オシレーション法で計測した。実験は合計 6 回行い、そのうち浸透率の計測に成功したのは 4 回である。実験条件と浸透率の測定結果について表 1 に示す。

2) 実験結果

得られた浸透率は Berea 砂岩を含めたサンプルアセンブリ全体の浸透率である。変形が始まる前の浸透率については、プレカット面を持つ Berea 砂岩の浸透性が極めて高いことから、変形前のバルクの浸透率 k_{int} とサンプル全体の長さ L_0 、砂泥

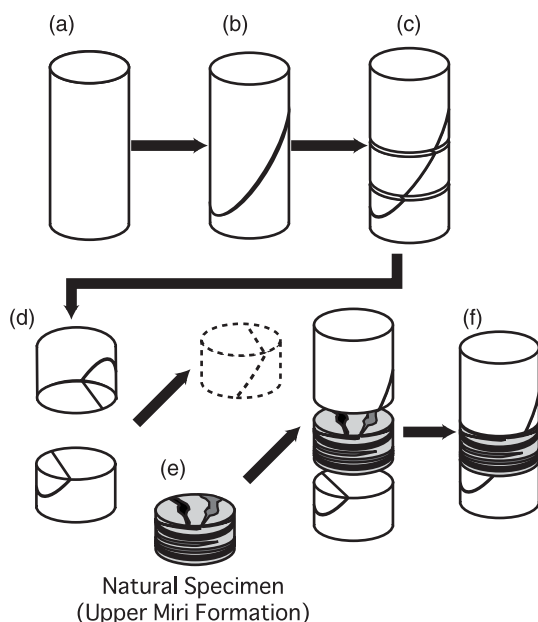


図 6 上部 Miri 層より採取した砂泥互層を挟んだサンプルアセンブリ。

(a) 円柱状 Berea 砂岩を (b) 斜め 30° に半割し、その面を合わせる。(c) 円柱中心部分を (d) 挟む砂泥互層 (e) の厚さ分切り取り、各端面を整形後、(f) のように重ね合わせて完成する。

Fig. 6 Specimen assembly using natural sand-shale interbedded rock sampled from Upper Miri Formation.

互層の変形前の厚さ H_{int} を用いて砂泥互層の浸透率 $k_{Miri-int}$ を $k_{int} \cdot H_{int} / L_0$ として見積もることができる (Takahashi, 2003)。 $k_{Miri-int}$ はサンプルによって $0.1 \sim 3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ の広範囲の値を持っている (表 1b)。砂泥互層中の泥質部の割合が少ないほど浸透率が上がる傾向がある (泥質部の割合の算出方法は、次節 3) 観察結果において述べる)。変形後はサンプルの形状が複雑になるため砂泥互層部とバルクの浸透率を分離することができない。よって、以下の議論はバルクの浸透率を比較したものである。実験結果の 2 例として図 7 (Miri1-test030606) と図 8 (Miri5-test030425) をあげる。両者の実験前の砂泥互層の厚さはほぼ等しいが、Miri1-test030606 (図 7) に占める泥質部の割合は 49% であるのに対し、Miri5-test030425

(図 8) の泥質部の割合は 29% と少ない。

変形が進行するにつれ浸透率は、Takahashi (2003) の結果と同様に、降伏点に達するまでの砂泥互層のコンパクションによる浸透率の約 1 オーダーの低下 (Regime 1, k_{int} から k_{min} への変化)、低浸透率の保持される領域 (Regime 2) と変形の進行による浸透率の回復域 (Regime 3) が現れることがわかる (図 7b, c および図 8b, c)。Takahashi (2003) の結果と異なる点は Regime 1 から Regime 2 へ移行したあたりで浸透率の急激な増加が見られることである (図 7c)。この現象は砂質部の多いサンプル (test030507, 図 8) を除く 3 回の実験結果に表れた (表 1b)。test030507 を除く 3 サンプルについて、 k_{int} , k_{min} , k_{Reg2} をそれぞれ比較する。 k_{min} から k_{Reg2} への浸透率の半オーダー以上の回復によって変形前の浸透率 k_{int} と Regime 2 における浸透率 k_{Reg2} の差は半オーダー程度となっている。

3) 観察結果

実験後サンプルを円柱端面の中心を通り、断層面に対し垂直な断面について薄片を作成し (図 7d, 図 8d, 口絵 3-写真 2, 4), スケッチをとった (図 7e, 図 8e, 口絵 3-図 1, 2)。砂泥互層にはプレカット面から進展した主断層とその周辺に Riedel 剪断面の発達が見られた。R1 方向の断層が階段状に主断層周辺に見られ、泥岩層をブロックとして断層内に取り込んでいる。また主に Berea 砂岩と砂泥互層が接する角の部分で R2 方向の断層が見られた。実験と天然の変形条件は異なると思われるが、実験で得られた断層構造は、特に R1 の剪断面について、Miri の Airport Road outcrop にて観察された主断層 F3 とその周辺に発達した R1 の構造に類似している。

次に断層変位とスミアの発達の関係を探るために先に述べた指標を用いて定量化を試みたい。サンプルは複数の泥層からなっているので、SSF (図 3a) より SGR (図 3b) を用いるのが適切と思われる。SGR を求めるには各層の砂泥比を求めなければならない。薄片の画像より砂泥比を以下の方法によって推定した。まず、薄片の画像をスキャナー (RGB, 600 dpi) で取り込む。泥質部

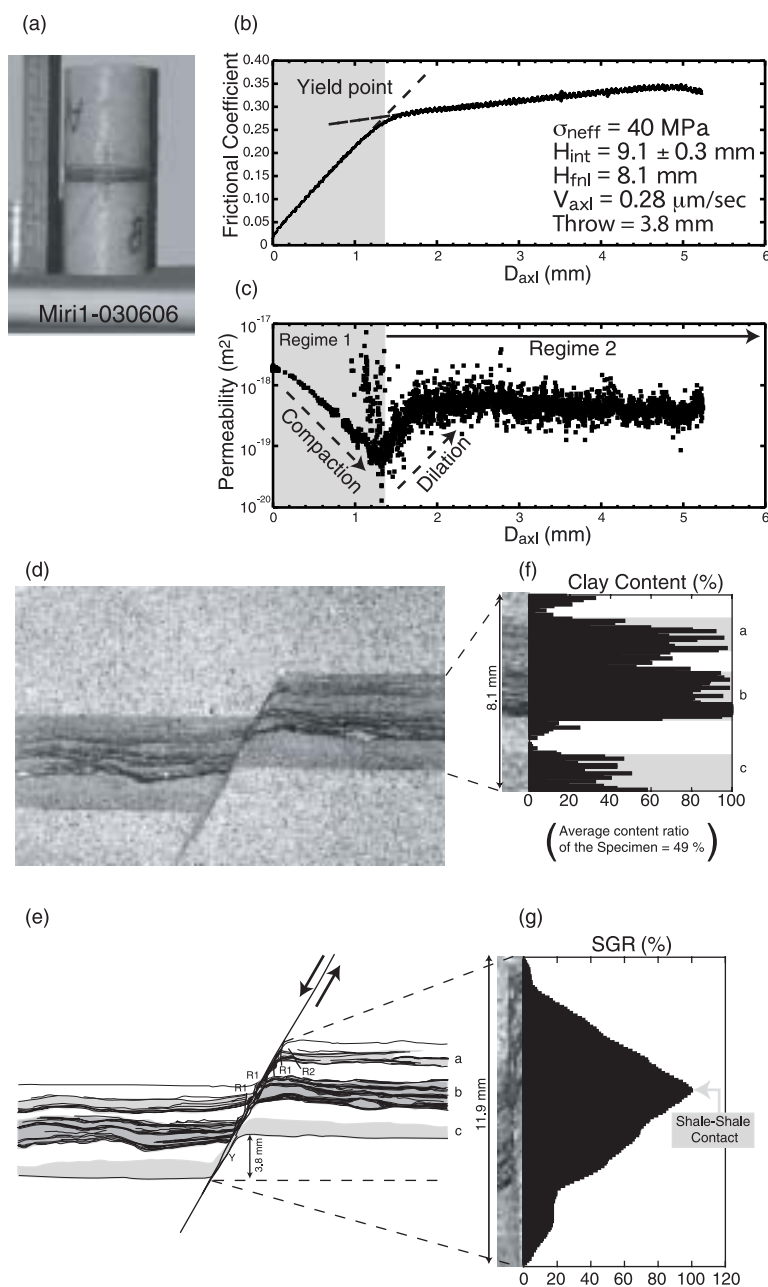


図 7 上部 Miri 層をサンプルに用いた頁岩スミア再現実験の結果．実験 No. test030606 の例．
 (a) 実験前の写真．軸変位量の増加に対する (b) 摩擦係数と (c) 浸透率の変化．実験後の (d) 薄片写真と (e) そのスケッチ．(f) 各砂泥互層が含む泥質部の割合と (g) 断層面の各点における SGR．

Fig. 7 Experimental result of test030606 using muddy sand-shale interbedded specimen from Upper Miri Formation.

(a) Photograph of starting material. (b) Frictional coefficient and (c) permeability change plotted against axial displacement. (d) Photograph and (e) sketch of experimental product (thin section, open Nicol). (f) Clay content (%) of each sand and shale layer and (g) SGR along the fault surface.

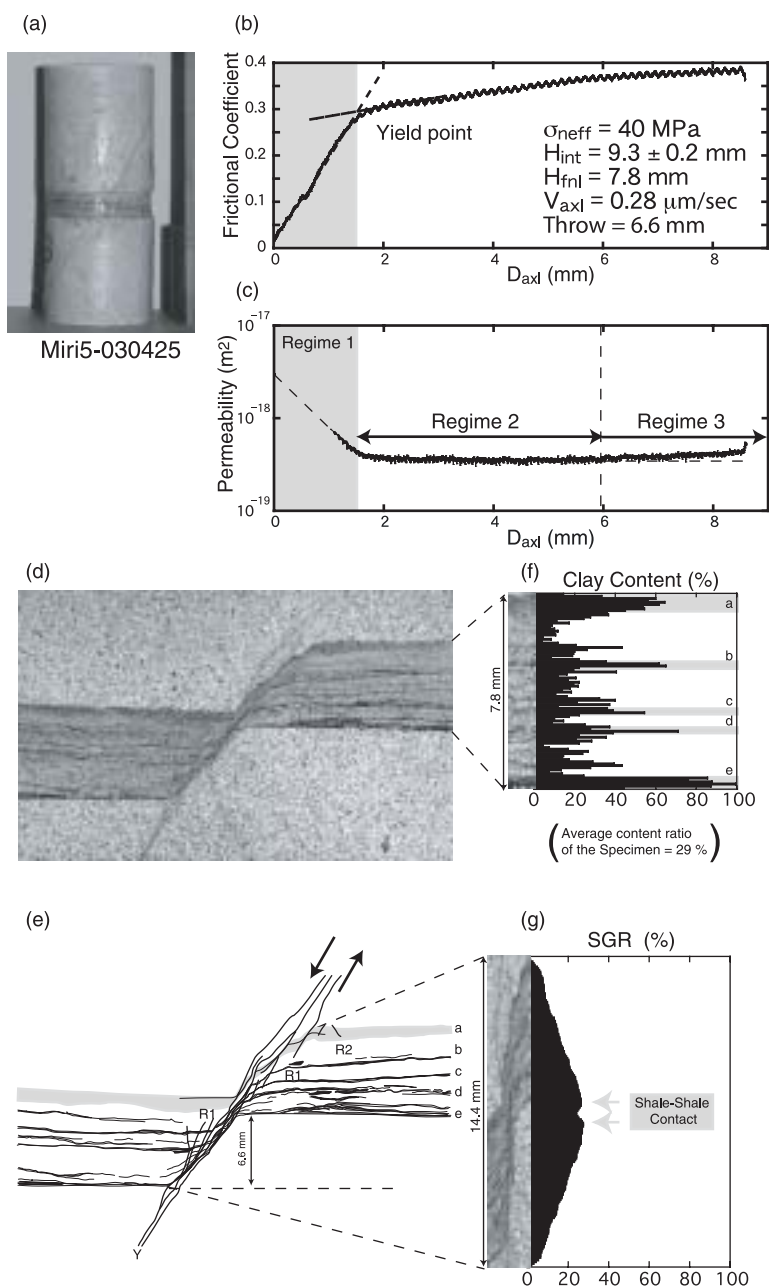


図 8 上部 Miri 層をサンプルに用いた頁岩スミア再現実験の結果．実験 No. test030425 の例．
 (a) 実験前の写真．軸変位量の増加に対する (b) 摩擦係数と (c) 浸透率の変化．実験後の (d) 薄片写真と (e) そのスケッチ．(f) 各砂泥互層が含む泥質部の割合と (g) 断層面の各点における SGR．

Fig. 8 Experimental result of test030606 using sandy sand-shale interbedded specimen from Upper Miri Formation.

(a) Photograph of starting material. (b) Frictional coefficient and (c) permeability change plotted against axial displacement. (d) Photograph and (e) sketch of experimental product (thin section, open Nicol). (f) Clay content (%) of each sand and shale layer and (g) SGR along the fault surface.

表 1a 実験条件 .

Table 1a Experimental Conditions.

Sample No.	Run No.	L_0 (mm)	H_{int} (mm)	σ_n (MPa)	P_p (MPa)	σ_{neff} (MPa)	V_{axl} (mm)	H_{fnt} (mm)	D_{axl} (mm)	Throw (mm)	Clay Content (%)
1	test030606	98.3	9.1 ± 0.3	50	10	40	0.28	8.1	5.24	3.8	49
2	test030501	96.5	16.6 ± 0.6	25	5	20	0.28	14.7	10.55	8.6	44
3	test030424	98.1	12.2 ± 1.6	50	20	30	0.28	9.8	4.55	2.2	53
4	test030320	94.1	9.6 ± 0.6	75	15	60	0.28	7.5	—	5.8	41
5	test030425	94.0	9.3 ± 0.3	50	10	40	0.28	7.8	8.05	6.6	29
6	test030507	97.4	12.3 ± 0.7	75	15	60	0.28	10.6	4.15	2.5	36

 L_0 : Initial total length H_{int} : Initial thickness of Miri specimen σ_n : Normal stress on pre-cut surface P_p : Pore pressure σ_{neff} : Effective normal stress V_{axl} : Axial shortening velocity H_{fnt} : Thickness of Miri specimen after a run D_{axl} : Axial displacement of an experimental run

Throw: Fault throw measured from an experimental product

表 1b 実験結果 (浸透率) .

Table 1b Results of Permeability Measurement.

Sample No.	Run No.	k_{int} (10^{-18}m^2)	$k_{Miri-int}$ (10^{-19}m^2)	k_{min} (10^{-19}m^2)	k_{Reg2} (10^{-19}m^2)	SGR_{total}	Remarks
1	test030606	1.85 ± 0.07	1.71 ± 0.06	2.48 ± 4.73	4.76 ± 1.93	104	* Fig. 7
2	test030501	0.19 ± 0.03	0.11 ± 0.02	0.81 ± 1.55	2.27 ± 0.92	74	*
3	test030424	—	—	—	—	236	failed
4	test030320	—	—	—	—	53	failed
5	test030425	2.99 ± 0.04	2.98 ± 0.04	3.57 ± 0.14	3.57 ± 0.14	34	Fig. 8
6	test030507	1.28 ± 0.04	1.52 ± 0.05	1.59 ± 1.90	3.74 ± 1.42	151	*

 k_{int} : Initial bulk permeability $k_{Miri-int}$: Initial permeability of Miri specimen k_{min} : Minimum permeability k_{Reg2} : Permeability in regime 2

*: Permeability rebounds after Regime 1

failed: Failed to measure the permeability

 SGR_{total} : $H_{fnt} \cdot \text{Clay Content} (\%) / \text{Throw}$

には赤の色彩が多いことを利用し, Adobe Photoshop を用いて赤の色彩情報のみ抽出する。断層近傍ではあるが変形を受けていない砂泥互層を, 断層上盤側と下盤側の二箇所について柱状に切り取り, 2 つを乗算した柱状図を作る。砂岩層に相当する層を選択し, 赤の色彩の輝度分布から, その平均値と標準偏差を調べる。平均値から暗色側の標準偏差を引いた値を砂岩と泥岩の境界と定義し 2 値化を行う。つまり砂岩と泥岩の境界と定義した赤の色彩の輝度より明るいものは砂質部, 暗いものは泥質部と仮定する。柱状図に含まれる暗色の赤のピクセル数を数え, 全体に対する比を

泥質部の含有量とする。全体に対する泥質部の割合を表 1a に, 実験に用いた砂泥互層の厚さの 1/100 ごとに計測した泥質部の割合についての例を図 7f, 図 8f に示す。図 7f, 図 8f より, 目視による砂岩層と泥岩層の区別とほぼ一致している。また, 砂泥互層を均質な泥質部の割合を持つ一枚の頁岩層とし, それが断層変位を受けた場合の SGR を $SGR_{total} = H_{fnt} \cdot \text{Clay Content} (\%) / \text{Throw}$ と定義する (表 1b)。Miri1-test030606 (図 7) と Miri5-test030425 (図 8) の SGR_{total} はそれぞれ 104% と 34% であり, Miri1-test030606 (図 7) の方が Miri5-test030425 (図 8) より頁岩ス

ミアの発達が可能である。この方法は比較的簡便に泥岩層の認識、層ごとの泥岩の割合および平均的な SGR 値(SGR_{total})を求めることができる。しかしながら 2 値化する上での基準が明確でないこともあり、砂泥比の目安としてとらえられたい。

推定された泥岩比を用いて、断層により、食い違いを生じた部分について断層面上の各点における SGR を求めた結果が図 7g, 図 8g である。より多くの泥岩層が通過した図 7g, 図 8g の中央部ほど SGR の値が高く、スミアの発達が顕著であることを示唆している。また、Miri1-test030606 (図 7g) の方が Miri5-test030425 (図 8g) より SGR の中央部の値が高くなっていることから Miri1-test030606 の方がスミアの発達が顕著であると言える。また、 SGR 値に所々現れるピークは断層を境に泥岩と泥岩が接している部分に相当している (図 7g, 図 8g の矢印)。

V. まとめと考察

1) 頁岩スミアの発達と浸透率の関係

図 7, 8 にあるように、上部 Miri 層より採取した砂泥互層をサンプルに用いたスミア再現実験でも、Takahashi (2003) 同様の浸透率のパターンを示した。しかしながら、Miri1-test030425 を除く、泥岩の割合が 3 割を超えるサンプルは Regime 2 に入って浸透率の半オーダー以上の急激な回復が見られた。この理由として、Regime 1 において上部 Miri 層より採取した砂泥互層は過圧密を受けているとが挙げられる。Regime 1 ではプレカット面での滑りに先んじてサンプルのコンパクションが起きていることが Takahashi (2003) より示されている上、実験前の砂泥互層の厚さと実験後の砂泥互層の厚さの差が Regime 1 の変位量にほぼ等しいこと (表 1b, 図 7b, 図 8b) から Regime 1 での浸透率の低下は圧密によるものと断定できる。Regime 1 における軸応力の増加がサンプルにとって過圧密となると、断層を互層内に進展させる際にはダイレーションを必要とすると考えられ、それが Regime 1-Regime 2 への移行時における浸透率の急激な回復として現れていると推測できる。

泥岩の割合が多いものほど Regime 1 を過ぎての浸透率の急激な回復の傾向が顕著であったため、この領域における浸透率の変化に大きく影響を与えているのは泥岩の圧密であると言える。また、Takahashi (2003) がシルト層の薄層をサンプルに用いたのに比較すると今回の実験は厚い砂泥互層中に断層を進展させることになり、断層の発達の仕方はより天然に近いと期待される。よって、実際の砂泥互層中に断層が入る際は、(1) 圧密による浸透率の低下 → (2) 断層の進展に伴うダイレーションによる浸透率の回復 → (3) 頁岩スミアの発達による低浸透の保持 → (4) スミアの削剥による浸透率の緩やかな回復のパターンとなる可能性がある。しかしながら試料サイズの制約上、厚い砂泥互層サンプルに「(4) スミアの削剥による浸透率の緩やかな回復」を観察できるほどの大変位を与えることができなかった。

2) 頁岩スミアの連続性・形態

露頭の観察によると、Airport Road outcrop における上部 Miri 層に発達する頁岩スミアの連続性に関する指標 SSF_{crit} は約 8 であり、これは他の研究例に比較して大きい。Airport Road outcrop にて観察された断層周辺の形態 (図 2b) と実験後のサンプル断面の両方について、主断層周辺に R1, R2 の Riedel 剪断面の発達が見られた。天然での変形条件が不明にもかかわらず、その形態は類似していた。このことは一連の実験がスミアのメカニズムをふまえたスケールモデルとしても有用であることを示している。

3) 今後の課題

Takahashi (2003) の実験を天然に応用させる上で、天然のサンプルを用いた今回の実験は重要な手がかりとなりうる。最終的には露頭にて求められた頁岩スミアの連続性についての指標 SSF_{crit} と実験後の観察によって求められる SSF_{crit} と低浸透率の保持される範囲 (Regime 2) やスミアの削剥による浸透率の回復 (Regime 3) との関係を明らかにしたい。

厚い砂泥互層を用いて Regime 3 の領域を観測するにはさらなる変位量が必要であり、三軸式試験機の制約上困難である。用いる試験機を直接剪

断試験機やロータリー剪断試験機にすれば大変位を稼ぐことができる。しかしながら大変位をまかなえる試験機は一般的に高い圧力の制御や浸透率の測定には不向きであり、工夫が必要である。また今回の実験ではそれぞれの薄片サンプルから頁岩スミアの連続性について SSF_{crit} を求めることはできなかった。一枚一枚の頁岩層について連続性を判断するために SEM 等での観察が必要と思われる。

謝 辞

本研究は、本著者が石油公団・石油開発技術センター・地質探査研究室において平成9年度から14年度にかけて行った研究結果の一部である。マレーシアにおける露頭調査に当たり同センターの辻 喜弘氏、出光オイルアンドガス(株)の長谷川修太郎氏には様々なご助力をいただいた。鈴木清史氏にはフィールド調査のみならず画像処理方法についても多大なるご協力をいただいた。露頭におけるサンプリングの許可を Petronas の Ali Md. Shariff 氏のご協力をへて Geological Survey Department, Malaysia よりいただいた。査読者の藤本光一郎氏、西澤 修氏には初稿の不備をご指摘いただいた。記して謝辞とする。

文 献

- Clausen, J.A. and Gabrielsen, R.H. (2002) Parameters that control the development of clay smear at low stress states: An experimental study using ring-shear apparatus. *J. Struct. Geol.*, **24**, 1569–1586.
- Faulkner, D.R. and Rutter, E.H. (2000) Comparisons of water and argon permeability in natural clay-bearing fault gouge under high pressure at 20 °C. *J. Geophys. Res.*, **105**, 16415–16426.
- Fischer, G.J. (1992) The determination of permeability and storage capacity: Pore pressure oscillation method. In Evans, B. and Wang, T.-F. eds.: *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*. Academic Press., 187–211.
- Fischer, G.J. and Paterson, M.S. (1992) Measurement of permeability and storage capacity in rocks during deformation at high temperature and pressure. In Evans, B. and Wang, T.-F. eds.: *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*. Academic Press, 213–252.
- Karakouzian, M. and Hudyma, N. (2002) A new apparatus for analog modeling of clay smears. *J. Struct. Geol.*, **24**, 905–912.
- Knipe, R.J. (1992) Faulting processes and fault seal. In Larsen, R.M., Brekke, H.B., Larsen, T. and Talleraas, E. eds.: *Structural and Tectonic Modeling and its Application to Petroleum Geology*. NPF Spec. Publ., **1**, 325–324.
- Kranz, R.L., Saltzman, J.S. and Blacic, J.D. (1990) Hydraulic diffusivity measurements on laboratory rock samples using an oscillating pore pressure method. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **27**, 345–352.
- Lindsay, N.G., Murphy, F.C., Walsh, J.J. and Watterson, J. (1993) Outcrop studies of shale smear on fault surface. *Int. Assoc. Sedimentologists, Spec. Publ.*, **15**, 113–123.
- Madon, M.B.H. (1999a) Geological setting of Sarawak. In Petroliaam Nasional Berhad (PETRONAS) ed.: *The Petroleum Geology and Resources of Malaysia*. 275–290.
- Madon, M.B.H. (1999b) Plate tectonic elements and evolution of Southeast Asia. In Petroliaam Nasional Berhad (PETRONAS) ed.: *The Petroleum Geology and Resources of Malaysia*. 61–76.
- Mandl, G., de Jong, L.N.J. and Maltha, A. (1977) Shear zone in granular material. An experimental study of their structure and mechanical genesis. *Rock Mech.*, **9**, 95–144.
- Peacock, D.C.P., Knipe, R.J. and Sanderson, D.J. (2000) Glossary of normal faults. *J. Struct. Geol.*, **22**, 291–305.
- 鈴木清史(2002) 砕屑成堆積岩中の断層におけるシール獲得過程について．平成13年度石油開発技術センター年報，146–149．
- Sperrevik, S., Faerseth, R.B. and Gabrielsen, R.H. (2000) Experiments on clay smear formation along faults. *Petrol. Geosci.*, **6**, 113–123.
- Takahashi, M. (2003) Permeability change during experimental fault smearing. *J. Geophys. Res.*, **108**, ECV1 1–15.
- 高橋美紀・金子貴信(2003) 間隙圧オシレーション法による浸透率・比貯留率測定方法と岩石の変形試料に対する適用例．資源と素材，**119**，501–507．
- Tan, D.N.K., Rahaman, A.H.B.A., Anuar, A., Bait, B. and Tho, C.K. (1999) West Baram Delta. In Petroliaam Nasional Berhad (PETRONAS) ed.: *The Petroleum Geology and Resources of Malaysia*. 293–341.
- Yielding, G., Freeman, B. and Needham, T. (1997) Quantitative fault seal prediction. *AAPG Bull.*, **81**, 897–917.
- Weber, K.J., Mandl, G., Pilaar, W.F., Lehner, F. and Precious, R.G. (1978) The role of faults in hydrocarbon migration and rapping in Nigerian growth fault structures. *Offshore Conference, Houston, Texas, Paper OTC 356*, 2643–2647.
- van der Zee, W. (2002) *Dynamics of Fault Gouge Development in Layered Sand-clay Sequences*. Lehr- und Forschungsgebiet für Geologie - Endogene Dynamik der RWTH Aachen.

(2003年8月27日受付，2003年10月27日受理)