

原著論文

## 柳ヶ瀬断層の内部構造と浸透率

### Internal Structure and Permeability of the Yanagase Fault

佐藤 慶治\*・堤 昭人\*

Keiji Sato\* and Akito Tsutsumi\*

**Abstract :** We investigated the internal structure and permeability of the Yanagase Fault, an active fault in SW Japan, at two localities, Kamishimizu in Fukui Prefecture and Nakakawachi in Shiga Prefecture, through field survey and laboratory measurements. The Yanagase Fault of the studied area is developed in the Jurassic accretionary complex of the Mino-Tamba Belt. In both outcrops, the Yanagase Fault consists of 3 zones : fault gouge zone, fault breccia zone and host rock. Permeability of the core samples from the fault outcrops was measured with a gas-medium tri-axial deformation apparatus using a pore-pressure oscillation method. Test results performed at 90 MPa effective pressure indicate that the highest permeabilities are found in the fault breccia zone and the lowest permeabilities in the host rock. In the Kamishimizu outcrop, permeability is  $10^{-17}$ - $10^{-16}$  m<sup>2</sup> for the fault breccia,  $10^{-19}$ - $10^{-17}$  m<sup>2</sup> for the fault gouge and  $10^{-19}$  m<sup>2</sup> for the sandstone host rock. In the Nakakawachi outcrops, permeability is  $10^{-18}$ - $10^{-17}$  m<sup>2</sup> for the fault breccia and  $10^{-18}$  m<sup>2</sup> for the fault gouge. The permeable nature of the fault breccia zone of the Yanagase Fault is similar to the previously reported permeability structure of the fault developed within a granitic basement rock.

**Key words :** Yanagase Fault, permeability, fault rocks, active fault

#### はじめに

断層の透水性構造は、例えば高速断層運動時における間隙水圧の過渡的な変動と断層強度低下の機構との関連で重要である。摩擦発熱に伴う間隙水圧の上昇-有効応力の減少-断層強度低下という一連の断層強度の低下機構は、地震発生過程との関連で以前からその重要性が指摘されてきた (Sibson, 1973; Mase and Smith, 1987)。この機構が、地震時に有効に働くかどうかを議論する上で素過程としてポイントとなるのは、断層帶内部の発熱部と間隙水との間の熱交換の過程、および加熱直後の間隙水の断層帶内部における挙動である。断層運動時に、断層中心部で上昇した間隙水圧がある程度保持されなければ、この強度低下機構は機能しない。断層帶内部の透水性構造は、高間隙水圧の保持能力を決める重要な要素の一つである。天然

の断層帶の透水性構造については、近年多くの研究がなされている (Evans et al., 1997; Seront et al., 1998; Lockner et al., 1999; 溝口ほか, 2000)。しかしながら、個々の断層帶内部の透水性構造がどのような形であり、それが変形とともにどのように変化するのかという基本的な問題は、ほとんど体系的に調べられていない。そして、天然の断層帶の透水性データに基づいた、地震発生過程における流体挙動の定量的な議論がなされていないのが現状である。断層帶の透水性構造は、断層帶内部の岩相変化、破碎帯の幅、面構造の有無、割れ目の3次元的な分布などの様々な要素を反映して多様である。より現実的な断層モデルに基づいた地震発生機構を議論していくためには、まず、個々の断層帶の内部構造と透水性の特徴を把握し、さらに、これらの構造が地震サイクルの様々な過程における断層内部の変形とともにどのように変化するのかを、野外と室内実験によって明らかにしていかなければならない。

我々は、西南日本の主要活断層の一つである柳ヶ瀬断層について、2箇所の断層露頭で内部構造を観察、記載し、採取した試料についてガス浸透試験（透気試

2002年9月10日受付。2003年3月24日受理。

\* 京都大学大学院理学研究科惑星科学専攻  
Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

験)により浸透率を求め、それぞれの断層露頭での断層の浸透率構造を解析した。本報告ではその結果を報告する。

### 柳ヶ瀬断層の地質概要

柳ヶ瀬断層は、福井県今庄町板取から滋賀県木之本町まで、高時川と余呂川沿いに延びる全長約37kmの、東側隆起で左横ずれ成分が卓越する確実度I、活動度A級の活断層である(活断層研究会、1991)。全般的な断層の走向はNNW-SSEで、近畿三角帯の北端部付近に位置する(Fig. 1a)。柳ヶ瀬断層周辺の基盤岩は美濃-丹波帯の地層で、主として砂岩、頁岩、チャート、玄武岩などのジュラ紀付加コンプレックスからなる(栗本ほか、1999)。柳ヶ瀬断層周辺とその北方延長部の基盤岩中には、半波長数km程度で急傾斜したヒンジをもつ屈曲構造が存在し、柳ヶ瀬断層はそのヒンジの一部を利用して形成され活動している褶曲関連断層の一型であると考えられている(狩野、2002)。柳ヶ瀬断層の最新の活動時期について、これまでに行なわれたトレンチ調査結果によれば、椿坂峠の南側では、570~630年前の地層に断層活動による変位が認められ、その活動は西暦1,325年(正中2年)の地震に対応するものとされている(杉山ほか、1993)。一方、椿坂峠の北側で7,000年前の堆積物が断層による変位を受けておらず、また椿坂峠の北方、中河内付近においては34,250年以前の扇状地性堆積物に変位が認められない(武藤ほか、1981)。さらに、今回報告する栃ノ木峠北方の上清水露頭では、10万年前より古い第四紀堆積物には断層変位が認められるが、露頭の上方で断層を覆って分布する約10万年前の堆積物は断層変位を受けていないことが報告されている(福井

県、1998)。以上のように、柳ヶ瀬断層は椿坂峠の北側と南側とでは断層の活動度が異なり、椿坂峠付近にセグメント境界が存在すると考えられている(Fig. 1a、杉山ほか、1993; 吉岡ほか、1998)。今回、断層の内部構造を記載し、浸透率測定用の試料採取を行った2露頭は、共に北部セグメントに含まれる(Fig. 1b)。

### 柳ヶ瀬断層帶の内部構造

#### 1. 上清水露頭

上清水における断層露頭の写真とスケッチをFig. 2に示した。この露頭は、福井県によるトレンチ調査が行われた場所で、既に柳ヶ瀬断層の詳細な性状が記載・報告されている(福井県、1998)。露頭上部では、ジュラ紀付加コンプレックスおよびそれらを貫く岩脈を不整合に覆う10万年前より古い段丘堆積物が、断層を境にして東側の基盤岩起源の断層岩と接しており、この断層を境にして段丘堆積物の基底部に約5m以上の垂直変位が認められる。断层面の走向は約N5°Eで、この地域の柳ヶ瀬断層の一般的走向に対して時計回りに20°程度斜交する。

本断層露頭は断層ガウジ帯、および断層角礫帯より構成される。断層ガウジ帯は、断層東側部分と断層面から東に約1.5m離れた部分に認められる。断層東側に接して発達するガウジは赤味を帯びたクリーム色を呈し、その幅は数mm~数cmの範囲で上下方向に変化し一様でない。一方、断層の東側に約1.5m離れた部分で見られるガウジは、粘土化の顕著な黒色断層ガウジで、その幅は10~30cmである。このガウジには断层面にほぼ平行な面構造が発達する。また局所的に、灰色、青灰色、緑灰色などを呈する薄層状の部分が混在し、それらの層が墨流し状の複雑な流动状組織

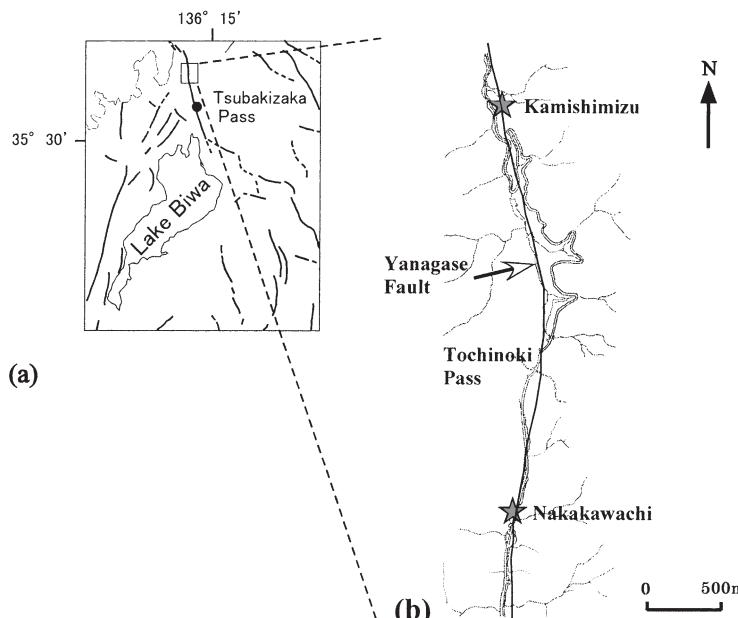


Fig. 1 (a) The distribution of active faults around the study area, SW Japan. (b) Localities of the Kamishimizu and Nakakawachi outcrops (★) along the northern part of the Yanagase Fault. Based on Sugiyama et al., (1994).

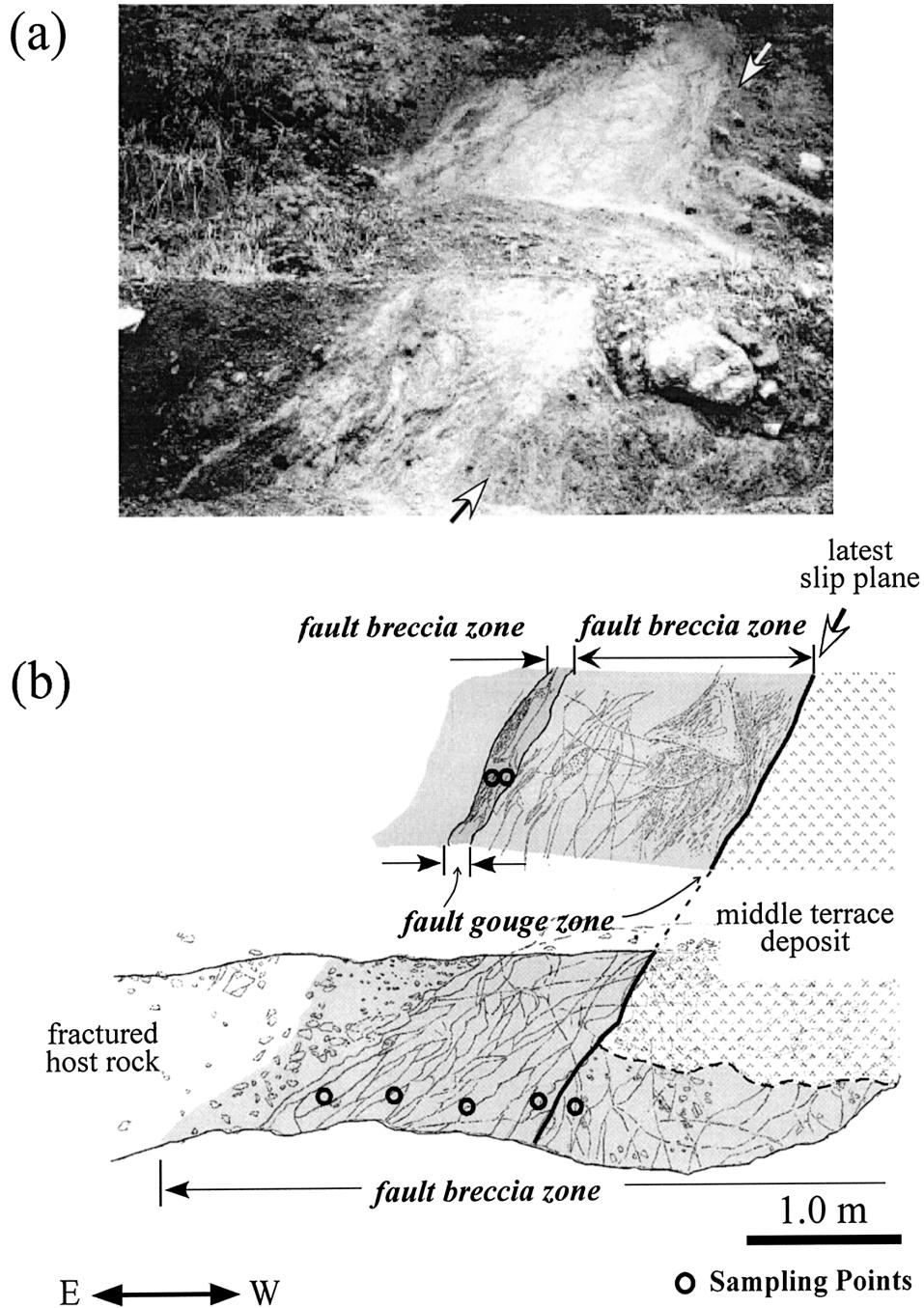


Fig. 2 A photograph (a) and a sketch (b) of the Kamishimizu outcrop. Open circles represent the sampling points for the permeability measurements.

を呈する。黒色基質中には部分的にチャート起源と思われる5 mm程度の粒径の赤褐色角礫が含まれる。この黒色断層ガウジは、本断層露頭で最も細粒化した部分である。断層角礫帶は砂岩、泥岩、チャート、岩脈(閃緑岩)を原岩とし、Fig. 2に示されていない範囲を含めるとその幅は10 m程度である。Fig. 2に示した露頭上部の断層角礫は、主として岩脈を原岩とし、全体に淡い赤肌色を呈する。内部には部分的に基質部分の色の濃淡からなる縞状の弱い面構造が発達してい

る。断層露頭下部の東側と西側に分布する基盤岩中には、破碎帶が約30 mにわたって発達するが、この破碎帶内部で、断層岩の組織は断層中心部から離れるにしたがって段階的に変化する。断層面から約10 m以内の部分では、破碎の度合いが強く、角礫化が進行している。この部分では、基質中に細かい割れ目がネットワーク状に発達し、内部では数mm程度の大きさに破碎されたレンズ状角礫の長軸方向が、割れ目にはほぼ平行に並んでいる様子が観察される。断層中心部か

ら約10m離れた部分では、角礫化がほとんど認められなくなる一方、砂岩、頁岩中には、断層面に平行な小断層あるいは割れ目が多数発達するようになる。

## 2. 中河内露頭

中河内における断層露頭の写真とスケッチをFig. 3に示す。本露頭は、高時川沿いの橋桁の工事に伴って一時的に現れた露頭である。本断層露頭では断層ガウジ帯、断層角礫帶、そして母岩（ほとんど破碎されていない赤色頁岩、赤色チャート、砂岩）という配列が認められる。断層面は走向がN15°Wでほぼ直立して

いる。断層面上には、低角度でプランジする断層条線が認められ、最近の活動時に横ずれ成分が卓越していたことを示している。断層ガウジ帯は断層面から右側に分布し、黒色の頁岩、白色～灰白色の珪質頁岩あるいはチャートを原岩とする。断層ガウジ帯の左端部分には、細粒で幅が約2～5cmの面状断層ガウジが見られ、この部分が断層ガウジ帯の中で最も細粒である。この細粒部分で最も連続性が良いのは淡い赤肌色を呈する面状ガウジである。露頭下部では、赤肌色ガウジ帯の左側に接して幅約2cmの灰色で細粒の面状断層

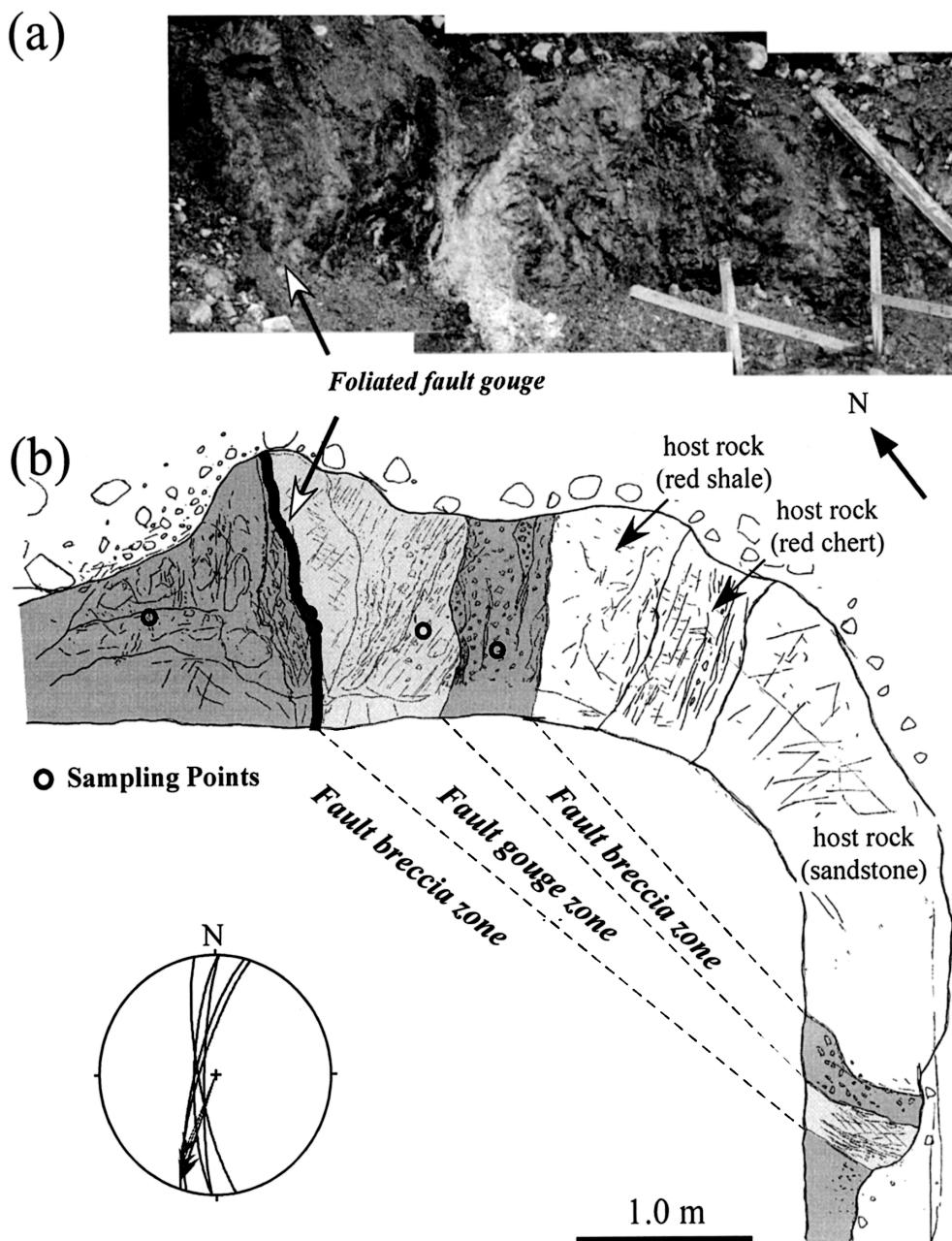


Fig. 3 A photograph (a) and a sketch (b) of the Nakakawachi outcrop. Open circles represent the sampling points for the permeability measurements. The stereogram shows equal-area, lower hemisphere projections of the fault plane (great-circles) and striations on the fault plane (arrows).

ガウジ帯が発達する。灰色面状ガウジは上方に連続せず、その面構造が赤肌色のガウジの面構造によって切られる関係にある。これらの細粒面状ガウジの右側に幅約1mの範囲で分布するガウジの大半は、面構造の認められないガウジであるが、一部に、細長いレンズ状の形態を呈する黒色部分と白色～灰白色部分の配列で規定される面構造が発達する。断層ガウジ帯の両側に分布する断層角礫帶は赤色頁岩あるいは赤色チャートを原岩とし、その幅は断層の左側で2m以上、右側で約70cmである。内部には多数の割れ目が発達し、部分的に破碎が進行して角礫化している。

### 浸透率測定実験方法

#### 1. 試料採取

浸透率測定を行なった試料の採取地点をFig. 2およびFig. 3に示す。Faulkner and Rutter (1998) の手法を参考にして、サンプリングには直径20mmの銅チューブ又は直径25mmのステンレスチューブを用いた。露頭において、これらの金属製チューブを断層面の走向に対して平行に挿入し、コア試料を採取した。実験室に持ち帰った円柱状のコア試料は、両端が円柱の軸に対して垂直な平坦面になるようにグラインダーあるいはサンドペーパー等によって注意深く整形し、その後、質量が一定になるまで、約80°Cで乾燥処理を行った。今回の実験で用いた整形後の試料の長軸方向の長さは10mm前後である。

#### 2. 浸透率測定実験

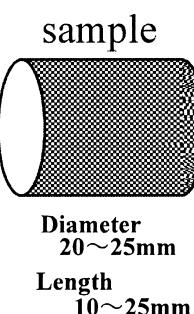
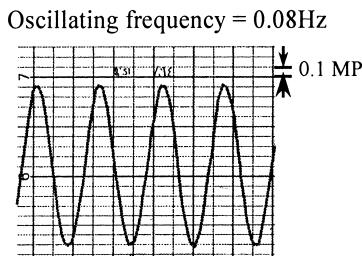
浸透率測定試験は、京都大学のガス圧式3軸変形・透水試験機を用いた。実験はすべて室温下で行い、封圧および間隙圧媒体は窒素ガスとした。乾燥空気や窒素、アルゴンなどの不活性ガスを用いた浸透率測定(透気試験)は、水に比べて流体の粘性が低いことから

測定に必要とされる時間が短縮されることが期待できる。この点が気体を使った測定の一つの利点である。浸透流の問題としては、気体を流体として用いた実験データは、水を用いた解析と同様に扱うことが可能である。乾燥気体を間隙流体として用いることのもう一つの利点は、透気試験を行なった後、同じ試料で透水試験を行なって、それぞれの結果を対比することで、例えば水分子と間隙表面との相互作用が試料の浸透率に及ぼす影響を評価することを目的とした実験が可能となる点にある。

浸透率の測定には、間隙圧振動法 (Kranz et al., 1990; Fischer and Paterson, 1992) を用いた。この方法は、試料の上流側貯留槽のガスの圧力を正弦波状に変化させたときの、下流側の貯留槽での圧力変動を測定し、両者の振幅比および位相差から浸透率、貯留係数などの水理定数を求める測定法である (Fig. 4)。この手法では、実験中に振幅比と位相差を連続的に読み取ることで、浸透率、貯留係数の変化をほぼ連続的に求めることができるとの利点がある。今回、間隙圧振動法で用いた間隙圧は全ての測定で約20MPaに設定し、試料の上流側に与える間隙圧の変動は、振幅1MPa以下、周期0.5~1000sの範囲のサイン波とした。実験中、有効圧(封圧-間隙圧)は、上清水露頭の試料に対しては最大で90MPa、中河内露頭の試料に対しては最大で180MPaまで段階的に増加させて(昇圧)、その後30MPaまで減少させることで(減圧)、浸透率に及ぼす有効封圧の影響を調べた。ここで、母岩の平均粒子密度を2.7g/cm<sup>3</sup>とし、間隙水圧に静水圧状態を仮定した場合、90MPaの有効圧は地下約5kmの深さに相当する。

試料のジャケットには、厚さ2~6mmの熱収縮性ポリオレフィンチューブを数枚重ねて使用している。この種のジャケットを用いた透水試験の場合、林ほか

#### Upstream pore pressure



#### Downstream pore pressure

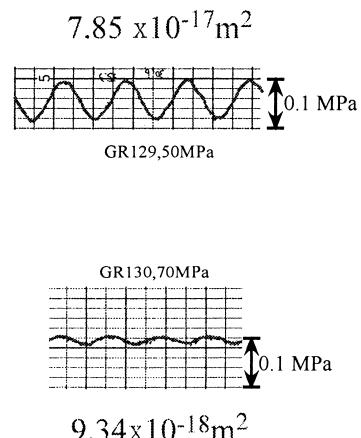


Fig. 4 Schematic illustrations showing the pore pressure oscillation method.

(1999) で指摘されているように、特に 30 MPa 程度までの低圧下では試料の側面とジャケットの間の流体移動（側方流）が発生し、測定結果に影響する場合がある。今回の解析では、後述のように、高封圧下での測定値を用いて断層の浸透率を議論しているので、この側方流の影響を考慮していない。今後、試料の整形、ジャケットの方法を含め、検討すべき課題である。

## 実験結果

### 1. 上清水露頭

上清水露頭で採取した試料の浸透率測定データを図に示す (Fig. 5 a). 有効圧の増加に伴って断層ガウジ、断層角礫（基質部）の浸透率はともに減少し、有効圧が 90 MPa の時に  $10^{-19} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$  の値まで低下した。有効封圧の減圧過程では、これらの試料の浸透率は有効圧が 30 MPa 程度までの間ではほとんど回復することなく、わずかに上昇しただけだった。すなわち、断層ガウジ、断層角礫とともに減圧過程で高圧時の浸透率をほぼ記憶しているようである。浸透率は、その後の減圧で緩やかに回復するが、実験開始時の浸透率の値まで回復することはなかった。一方、割れ目の発達していない母岩の浸透率は、有効封圧の昇圧に伴って急激に減少し、90 MPa の時にはこの露頭の測定試料中で最も低い  $10^{-19} \text{ m}^2$  の値が得られた。低下した母岩の浸透率は減圧過程でほとんど回復せず、断層ガウジ、断層角礫（基質部）の挙動と同様にヒステリシスが認められる。

### 2. 中河内露頭

中河内露頭で採取した試料の浸透率測定データを図

に示す (Fig. 5 b)。断層角礫（基質部）の試料については、有効圧の減圧過程でのデータが採取できなかったため昇圧過程の挙動のみ示している。有効圧の増加に伴って断層ガウジ、断層角礫の浸透率はともに減少し、有効圧が 90 MPa の時に浸透率が約  $10^{-17} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$  の値まで低下した。浸透率は、その後も有効圧の増加とともに減少して、最終的には、最高有効圧 180 MPa の時に約  $10^{-19} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$  の値まで減少した。有効圧の減圧過程では、ガウジの浸透率は増圧過程における浸透率の変化率よりも緩やかな傾きで回復（増加）した。特に、有効圧が約 30 MPa を切る辺りまでの範囲では、浸透率の値にほとんど変化が見られず、高圧下での浸透率を記憶していることがわかる。これらのガウジの浸透率は、その後の減圧で緩やかに回復するが、実験開始時の浸透率の値まで回復することはなかった。

### 3. 柳ヶ瀬断層の浸透率構造

上清水露頭、中河内露頭における柳ヶ瀬断層の浸透率構造を、有効封圧 90 MPa での浸透率を用いて示した (Fig. 6)。この図では、横軸に断層面に直交する方向での距離を、縦軸に浸透率をとっている。上清水露頭では、断層ガウジの浸透率が  $10^{-19} \sim 10^{-17} \text{ m}^2$ 、断層角礫帶が  $10^{-17} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$  の値を示し、断層ガウジの方がわずかながら低い浸透率を示す傾向が認められた (Fig. 6 a)。一方、ほとんど割れ目の発達していない母岩の浸透率は  $10^{-19} \text{ m}^2$  で、測定試料中で最も低い値になった。中河内の露頭では断層中心部の面状断層ガウジが  $10^{-18} \text{ m}^2$  の値を示し、その両側の断層角礫は  $10^{-18} \sim 10^{-17} \text{ m}^2$  とほぼ同程度の値を示した (Fig. 6 b)。

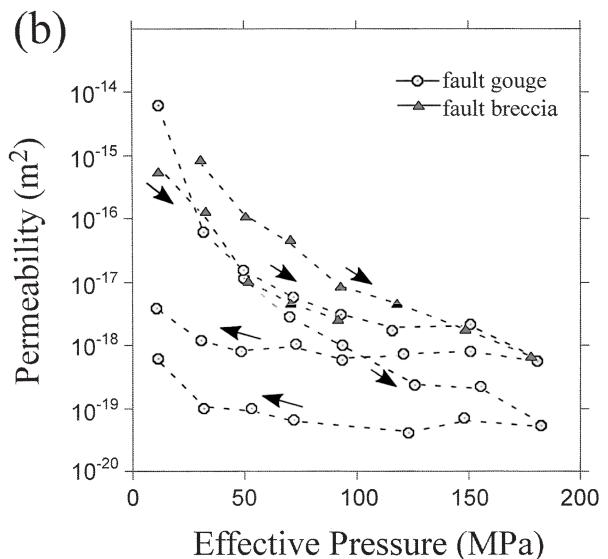
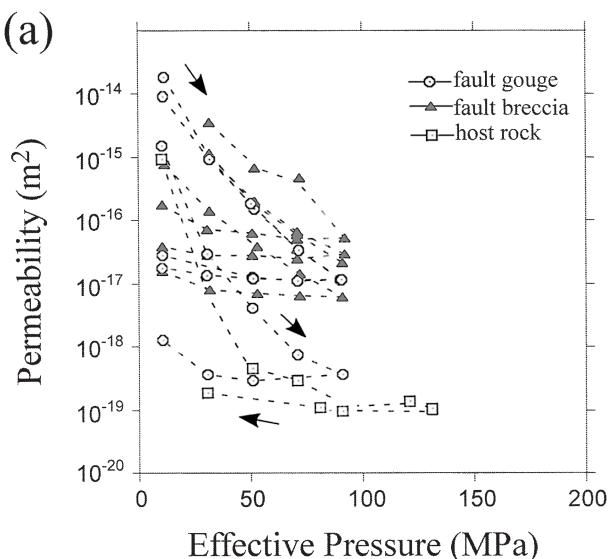


Fig. 5 Permeability of the fault rocks at the Kamishimizu (a) and the Nakakawachi outcrops (b), plotted against the effective pressure.

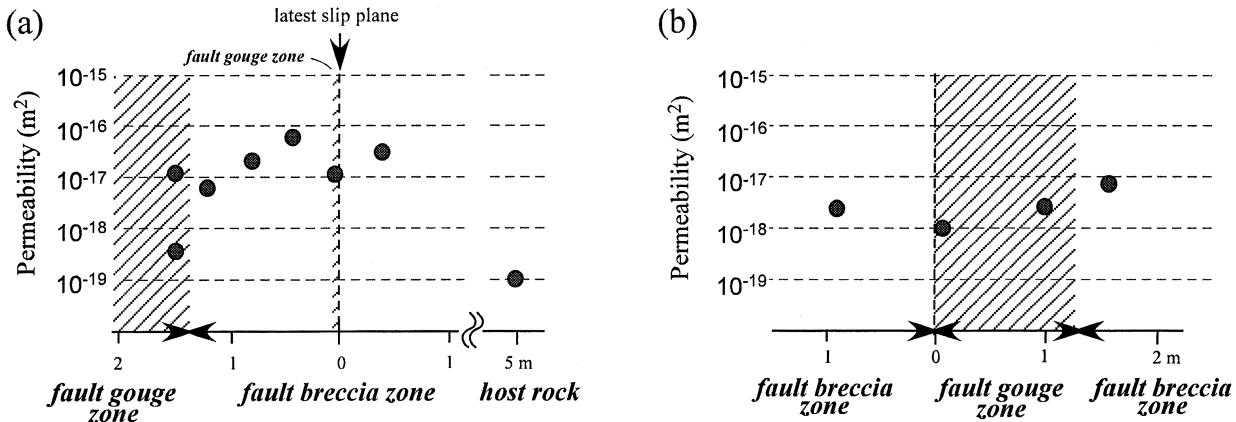


Fig. 6 Variation of permeability at the Kamishimizu (a) and the Nakakawachi outcrops (b) across the Yanagase Fault. Permeability of each sample at 90 MPa effective pressures are plotted against the distance of the sample point across the fault.

### 考 察

Evans et al. (1997) は、花崗岩地域に発達した断層を、断層ガウジ、カタクレーサイトなどで構成される断層中心部と、破碎を受け小断層や破断面の発達したダメージゾーンに分け、これらにほとんど断層変形の影響を受けていない母岩を含めた3つのゾーンに対応する浸透率構造を報告した。この浸透率構造の特徴は、断層中心部の浸透率が母岩と同程度あるいはそれ以上に低い値を示し、ダメージゾーンが周囲の母岩と断層中心部に対して2桁以上浸透率の高いゾーンとして存在するという点である。同様の浸透率構造は、野島断層の花崗岩中に発達する部分についても報告されている (Lockner et al., 1999; 溝口ほか, 2000)。今回調査した柳ヶ瀬断層露頭の内部構造、浸透率構造の特徴は、(1)ガウジ帯(断層中心部)、断層角礫帶(ダメージゾーン)、母岩の3つのゾーンを有し、(2)断層角礫帶が母岩に対して1桁~2桁流体を通し易くなっているという2点において、上述の花崗岩中の断層で見られる特徴と同様である。但し、柳ヶ瀬断層露頭の断層ガウジ帯の浸透率は、最も細粒な部分の試料でも母岩の浸透率より1桁高い値を示す。岩石の浸透性を支配するのは主に、流体の通路としての間隙や割れ目の密度、形態、連結性などの性質である。上記の花崗岩中の断層では、断層変位の増加とともに微小割れ目が形成され、それらが連結しながら成長することで、流体を通し易いダメージゾーンが形成されると考えられる。これに対して例えば、多孔質な砂質岩石中に発達する剪断帯においては、微少割れ目の形成、割れ目のネットワーク化を伴うようなダメージゾーンは形成されにくく、変形は主として空隙の変形・体積減少とともに進行するため、浸透率の高いダメージゾーンを伴わないとされている (Antonellini and Aydin, 1994)。柳ヶ瀬断層は主として付加体中の砂岩、頁岩、チャー

ト等の堆積岩を主体とする岩石、および岩脈を原岩とする。今回得られた結果より、このような間隙率が小さい堆積岩中に発達する断層の場合には、花崗岩中の断層と同様の内部構造、浸透率構造が形成されることから、断層内部では花崗岩中の断層破碎帯形成と同様の変形プロセスが支配的であったと考えられる。

### ま と め

西南日本の活断層のひとつである柳ヶ瀬断層の2箇所の露頭で採取したコア試料を用いた浸透率測定試験から、それぞれの場所での断層帶の浸透性構造を求めた。浸透率の測定には、窒素ガスを間隙流体として、間隙圧振動法を用いた。結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 上清水および中河内露頭の柳ヶ瀬断層は (a) 母岩 ; (b) 断層角礫帶 ; (c) 断層ガウジ帯より構成される
- (2) 上清水露頭においては、有効圧が 90 MPa の時の増圧過程での断層岩の浸透率として、断層角礫帶の基質部分では  $10^{-17} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ 、断層ガウジ帯では  $10^{-19} \sim 10^{-17} \text{ m}^2$  の値が得られた。また母岩の砂岩は  $10^{-19} \text{ m}^2$  と最も低い浸透率を示した。
- (3) 中河内露頭においては、有効圧が 90 MPa の時の増圧過程での断層岩の浸透率として、断層角礫帶の基質部分は  $10^{-18} \sim 10^{-17} \text{ m}^2$ 、断層ガウジ帯では  $10^{-18} \text{ m}^2$  の値が得られた。
- (4) 柳ヶ瀬断層においては、母岩部分が最も低い浸透率を示し、内側の断層角礫帶の浸透率がそれより1桁~2桁程度高くて、流体を通し易いゾーンとなっている。断層ガウジ帯の浸透率は、断層角礫帶よりも低い傾向があるが母岩の浸透率よりは1桁程度高い値を示した。

本論で示した断層岩の組織観察は露頭スケールに留まっているので今後、断層岩試料の微細組織の観察等

を通して実験で得られて浸透率の意味を明らかにしてゆきたい。ここで報告した浸透率はガスを間隙流体とした「透気係数」である。しかし、この研究は流体としての「水」の問題を念頭においているので、最終的には断層の透水性を把握する必要がある。今後は、今回測定した試料について水を間隙流体に用いた実験を行い、結果を透気試験の結果と比較することで、水と粘土鉱物の相互作用などの浸透率に与える影響を評価する必要がある。今後の課題としたい。

### 謝 辞

京都大学大学嶋本利彦教授には、本研究を始めるにあたり貴重な助言を賜った。査読者の静岡大学狩野謙一教授、東京大学清水以知子博士には有益なご指摘をいただき、小論を改善することができた。記して感謝の意を表する。

### 文 献

- Antonellini, M. and Aydin, A., 1994, Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones : petrophysical properties. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **78**, 355–377.
- Evans, J.P., Forster, C.B. and Goddard, J.V., 1997, Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zone. *Jour. Struct. Geol.*, **19**, 1393–1404.
- Faulkner, D.R. and Rutter, E.H., 1998, The gas permeability of clay-bearing fault gouge at 20°C, in Fault. In Jones, G., Fisher, Q. and Knipe, R.J., eds., *Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoir.*, Geol. Soc. Spec. Pub., 147–156.
- 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 Wong, T. -F., eds., *Fault mechanics and transport properties of rocks.*, Academic Press, 187–211.
- 福井県, 1998, 柳ヶ瀬断層帯(柳ヶ瀬断層, 山中断層, 甲楽城断層帯)に関する調査—概要報告書. 10 p.
- 狩野謙一, 2002, 美濃—丹波帯に発達する急傾斜した軸を持つ地質図規模の褶曲—基盤構造からみた柳ヶ瀬断層の起源. 地質学雑誌, **108**, 591–605.
- 活断層研究会編, 1991, 新編日本の活断層一分布図と資料. 東京大学出版会, 437 p.
- 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. Jour. Rock Mech. Miner. Sci. Geomech. Abs.*, **27**, 345–352.
- 栗本史雄・内藤一樹・杉山雄一・中江 訓, 1999, 敦賀地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 73 p.
- 林為人・高橋 学・李 小春・鈴木清史, 1999, 異なる方法で被覆した白浜砂岩供試体の透水係数測定結果の比較. 応用地質, **40**, 299–305.
- Lockner, D.A., Naka, H., Tanaka, H., Ito, H., and Ikeda, R., 1999, Permeability and strength of core samples from the Nojima fault of the 1995 Kobe earthquake. *Proceedings of the International Workshop on the Nojima Fault Core and Borehole Data Analysis, U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, 00-129, 147–157.
- Mase, C.W. and Smith, L., 1987, Effects of frictional heating on the thermal, hydrologic, and mechanical response of a fault. *Jour. Geophys. Res.*, **92**, 6249–6272.
- 溝口一生・廣瀬丈洋・嶋本利彦, 2000, 野島断層の透水性構造—兵庫県津名郡北淡町舟木露頭の解析—. 月刊地球, **31**, 58–65.
- 武藤 章・豊藏 勇・松浦一樹・池戸正之, 1981, 活断層調査の例—柳ヶ瀬断層. 応用地質, **22**, 32–51.
- Seront, S., Wong, T. -F., Caine, J.S., Forster, C.B., Bruhn, R.L. and Fredrich, J.T., 1998, Laboratory characterization of hydromechanical properties of a seismogenic normal fault system. *Jour. Struct. Geol.*, **20**, 865–881.
- Sibson, R.H., 1973, Interactions between temperature and pore-fluid pressure during earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief. *Nature*, **243**, 66–68.
- 杉山雄一・粟田泰夫・佃 栄吉・吉岡敏和, 1993, 1992年柳ヶ瀬断層(余呉町椿坂地区)トレンチ調査—日本の活断層発掘調査[53]. 活断層研究, **11**, 100–109.
- 杉山雄一・粟田泰夫・吉岡敏和, 1994, 10万分の1柳ヶ瀬—養老断層系ストリップマップ. 地質調査所.
- 吉岡敏和・杉山雄一・細矢卓志・逸見健一郎・渡辺俊一・田中英幸, 1998, 柳ヶ瀬断層の最新活動—滋賀県余呉町椿坂峠におけるトレンチ発掘調査—. 地震, **51**, 281–289.