

## 西南日本内帯先白亜系のナップ境界断層帯の内部構造と透水性—丹波帯-超丹波帯境界における解析例—

Internal and permeability structures of Pre-Cretaceous nappe boundaries in the Inner Zone of Southwest Japan

### Abstract

廣瀬丈洋\* 早坂康隆\*\*

Takehiro Hirose\*  
and Yasutaka Hayasaka\*\*

2005年2月8日受付.

2005年3月23日受理.

\* 京都大学大学院理学研究科地質学鉱物学教室  
Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

\*\* 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻  
Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate school of Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan

Corresponding author: T.Hirose

We determined the internal and permeability structures of the nappe boundary between the Tamba and the Ultra-Tamba belt in the Inner Zone of Southwest Japan. Protolith of hanging wall is Permian sandstone and that of footwall is Jurassic pelitic breccia. These are stuck tightly with cataclasite zone of 3 m in width. Permeability data and structural observations of the fault zone suggest the following; (1) cataclasite is distributed in the fault zone, but most deformation is localized in 0.5 to 3 cm width foliated cataclasite zones in the hanging wall, (2) experiments at effective pressures,  $P_e$ , of 40 to 100 MPa show that permeability of the hanging wall is low ( $10^{-20}$  m<sup>2</sup> at  $P_e > 80$  MPa), while it is higher by 1-3 orders of magnitude in the footwall and the fault zone. The permeability structure implies that high pore fluid pressure could be sustained within the fault zone, which could have promoted the thrust movement.

Key words: nappe boundary, fault, permeability, cataclasite

### はじめに

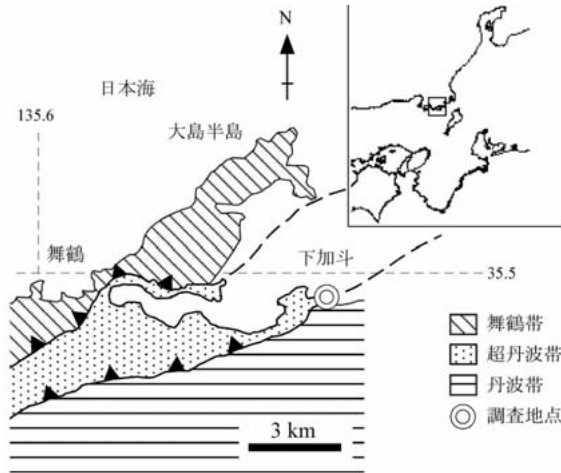
断層帯の透水性構造は、間隙水圧の上昇に伴う断層の強度低下機構を論じる上できわめて重要である。例えば、Sibson (1973) は、断層沿いの摩擦発熱が間隙圧を上昇させ、その結果有効応力が低下し、著しい断層の強度低下を引き起こすというモデルを提唱している。しかし、断層の強度低下が起こるためには、上昇した間隙圧が断層帯内部に保持されなければならない。つまり、強度低下を引き起こすかどうかは、断層帯の透水性構造に強く依存しているのである。このような観点から、天然の断層帯の透水性構造を決定する研究が、近年数多くなされるようになってきた (Evans et al., 1997; Seront et al., 1998; 溝口ほか, 2000; Wibbery and Shimamoto, 2003; Tsutsumi et al., 2004)。これらの研究によると、断層帯の透水性構造は、断層帯内部の岩相変化、面構造や割れ目などの構造要素の変化、断層形成場のテクトニックセッティングの違いなどを反映して非常に多様であることがわかってきた。より現実的な断層モデルを構築して、例えば間隙水圧の上昇に伴う地震発生機構を議論していくためには、様々なタイプの断層帯の内部構造と透水性の特徴を把握する必要がある。そこで本研究では、これまで透水性構造が報告されていない低角衝上断層の透水性を調べるため、西南日本内帯に広く認められる先白亜系ナップ境界断層に注目した。

西南日本内帯には、数多くのナップ境界が露出している

(例えば、上村ほか, 1979; 早坂, 1987; 木村ほか, 1989)。しかし、多くの境界が後世の高角断層運動によって切断されている。ナップ運動時の断層帯内部の現象を探るためには、ナップの初生運動の痕跡を残していると考えられる境界を見つけ出す必要がある。早坂・廣瀬 (2002) は、現在のナップの構造関係を地質調査によって検討して、ナップ運動の痕跡を残していると考えられる断層をいくつか報告している。本研究ではその中でも特に露出が良好であり、ナップ境界のタイプとなりうる丹波帯と超丹波帯の境界において断層帯の内部構造の記載を行い、その透水性を室内実験によって測定した。

### 地質概説

京都府北部から福井県西部地域には構造的低位から丹波帯、超丹波帯、舞鶴帯がパイルナップ構造をなしている (第1図)。本研究では、丹波帯と超丹波帯の境界断層が露出している福井県小浜市下加斗片江鼻地域<sup>しちかよかたえはな</sup>で調査を行った。この境界では丹波帯Ⅱ型地層群の上に氷上層が衝上している (Ishiga, 1986)。上盤の超丹波帯の氷上層はペルム紀中・後期の緑色の砂岩・頁岩およびメランジュであり、下盤の丹波帯は主にペルム紀の塩基性火山岩類、チャートをブロックとして含むジュラ紀中期のメランジュである。断層の変位は正確にはわからないが、超丹波帯と丹波帯Ⅱ型地層群の広がりから判断して、数十 km のオーダーと推測される。また、両帯に白亜紀後期の花崗岩が貫入しており、ナップ境界延長上にあたる花崗岩岩体中に明瞭な断層が認められないことか



第1図. 舞鶴-小浜地域の地質図 (Ishiga, 1986 を一部改変).

ら、ナップ運動は白亜紀前期までには終了していたと考えられている (大藤ほか, 1989).

断層帯の記載

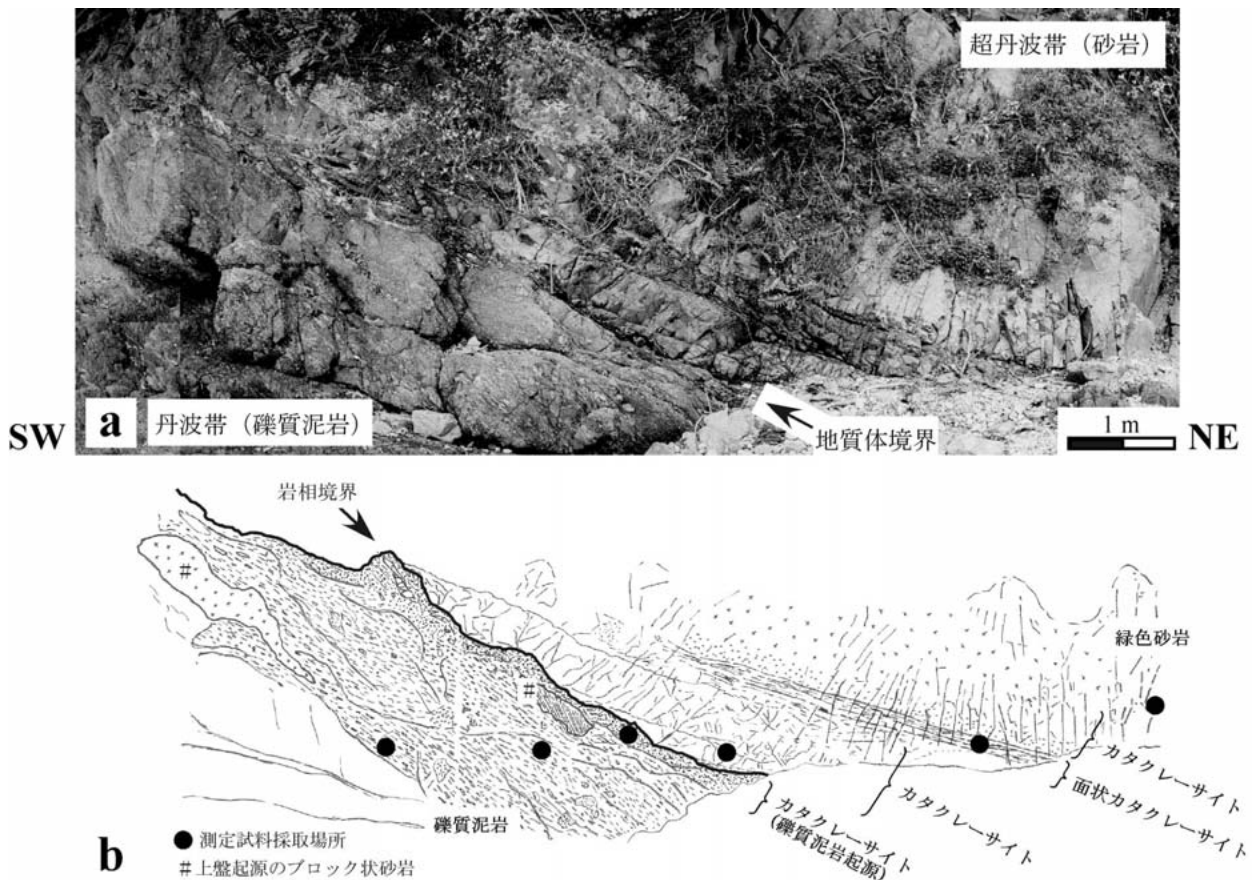
断層露頭の写真とスケッチを第2図に示した。露頭では地

質体境界を約 8 m 追跡することができる。境界面は波打っているものの北東走向で北に約 30° 傾斜している (第3図 a)。境界は完全に固着して接しており、粘土質断層ガウジや液状化跡などが認められないことから、少なくとも第四紀の再活動は生じていないものと考えられる。よって、本断層露頭はナップの運動に関与した断層運動の痕跡を残している可能性が高いと考えた。

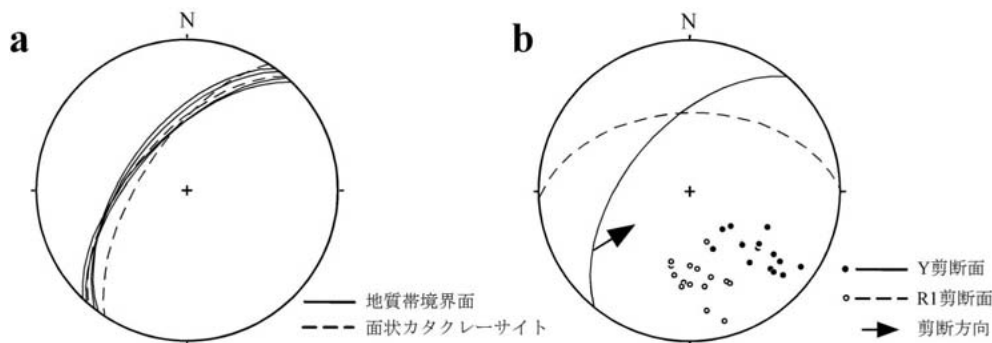
1. 超丹波帯 (上盤)

地質体境界から上盤方向には、砂岩起源の塊状カタクレーサイト (幅約 1 m)、面構造の発達したカタクレーサイト (幅約 30 cm)、塊状カタクレーサイト (幅約 60 cm)、そして非変形緑色砂岩が分布している (第2.b図)。断層運動に伴う変形は面状カタクレーサイト帯に集中している (第4.a図)。断層上部において、この面状カタクレーサイト帯が岩相境界に収束していることから、境界直上の連続性の悪い砂岩の塊状カタクレーサイトは、断層運動によって取り込まれたブロックであると考えられる。また、上盤方向約 4 m の範囲にのみ、境界面に垂直な方向に節理が顕著に認められた。

カタクレーサイトの原岩である非変形砂岩は圧密が進み、基質部は細粒な石英や方解石、層状珪酸塩鉱物で埋められている。砂粒 (平均粒径 0.5 mm) は主に石英と長石から構成



第2図. 福井県小浜市下加斗片江鼻地域における、丹波帯と超丹波帯のナップ境界の露頭写真 (a) とそのスケッチ (b)。



第3図. 下半球投影 $\pi$ ダイアグラム. (a) 地質体境界面と面状カタクレーサイトの面構造. (b) 下盤の礫質泥岩中に認められる剪断面とその平均方向を示す大円. 2つの剪断面の関係から推測される剪断方向を矢印で示している.

されており、石英粒には圧力溶解の痕跡である窪みが特徴的に観察される(第4.d図). 一方、カタクレーサイト帯では破碎によって細粒基質の量が顕著に増加し、層状珪酸塩鉱物に囲まれた角張った破碎粒が認められる(第4.e図). カタクラスティックな変形度は面状カタクレーサイト帯に近づくほど増加し、中心付近では著しく細粒化した幅0.2~3 cmの剪断帯が形成されている。破碎粒である石英や長石には塑性変形の痕跡は認められないが、破碎流動と圧力溶解によって脈や砂岩のクラストが流動的な組織を示している(第4.f図). 面状カタクレーサイト帯に認められる面構造は、層状珪酸塩鉱物のほか、炭質物や不透明鉱物の配列によって形成されている。層状珪酸塩鉱物は、X線回折によって緑泥石とイライトであることが確認された。また、面状カタクレーサイト中には、面構造を切る石英・方解石脈のほか、面構造にほぼ平行なりモナイト脈が顕著に観察された。

## 2. 丹波帯(下盤)

下盤の丹波帯には構造的上位から、境界直下20 cmまでの範囲に分布する面構造の弱いカタクレーサイト帯(第4.b図)と、強い面構造が発達している礫質泥岩(第4.c図)が分布している。面構造の方向は、地質体境界と調和的である。境界直下のカタクレーサイト帯では角礫のアスペクト比が最大で2.7であり、緑泥石とイライトからなる細粒基質部が40%以上に達する場所もある。また地質体境界直下数10 cmの範囲にのみ、断層運動によって下盤側に取り込まれたと考えられる上盤由来の面構造の発達した砂岩ブロックが認められる。一方、下位の礫質泥岩では礫の平均アスペクト比が3.8であり、基質部の占める割合は15~30%程度である。礫種は主にチャートと砂岩である。本露頭で観察される礫質泥岩と同じような岩相は丹波帯内部にも広く認められる。また、礫質泥岩中に発達するY, R<sub>1</sub>剪断面(Rutter et al., 1986)から推測される剪断方向は(第3.b図)、丹波帯内部の剪断方向(Otoh and Yanai, 1989)とよい一致を示している。

鏡下において、カタクレーサイトには間隙を埋める方解石や、方解石脈のクラストが顕著に観察される。また、不透明鉱物で埋められた網目状の割れ目に沿って、緑泥石とイライトが生成している(第4.g図)。礫質泥岩中の面構造は、緑泥石とイライトなどの層状珪酸塩鉱物の定向配列のほか、炭質物の濃集層によって特徴づけられる。また、面構造を高角

で切る石英脈が、圧力溶解によって劈開面に沿って溶解し、鋸歯のような形態を示す構造が特徴的に認められた(第4.h図)。

## 浸透率測定実験

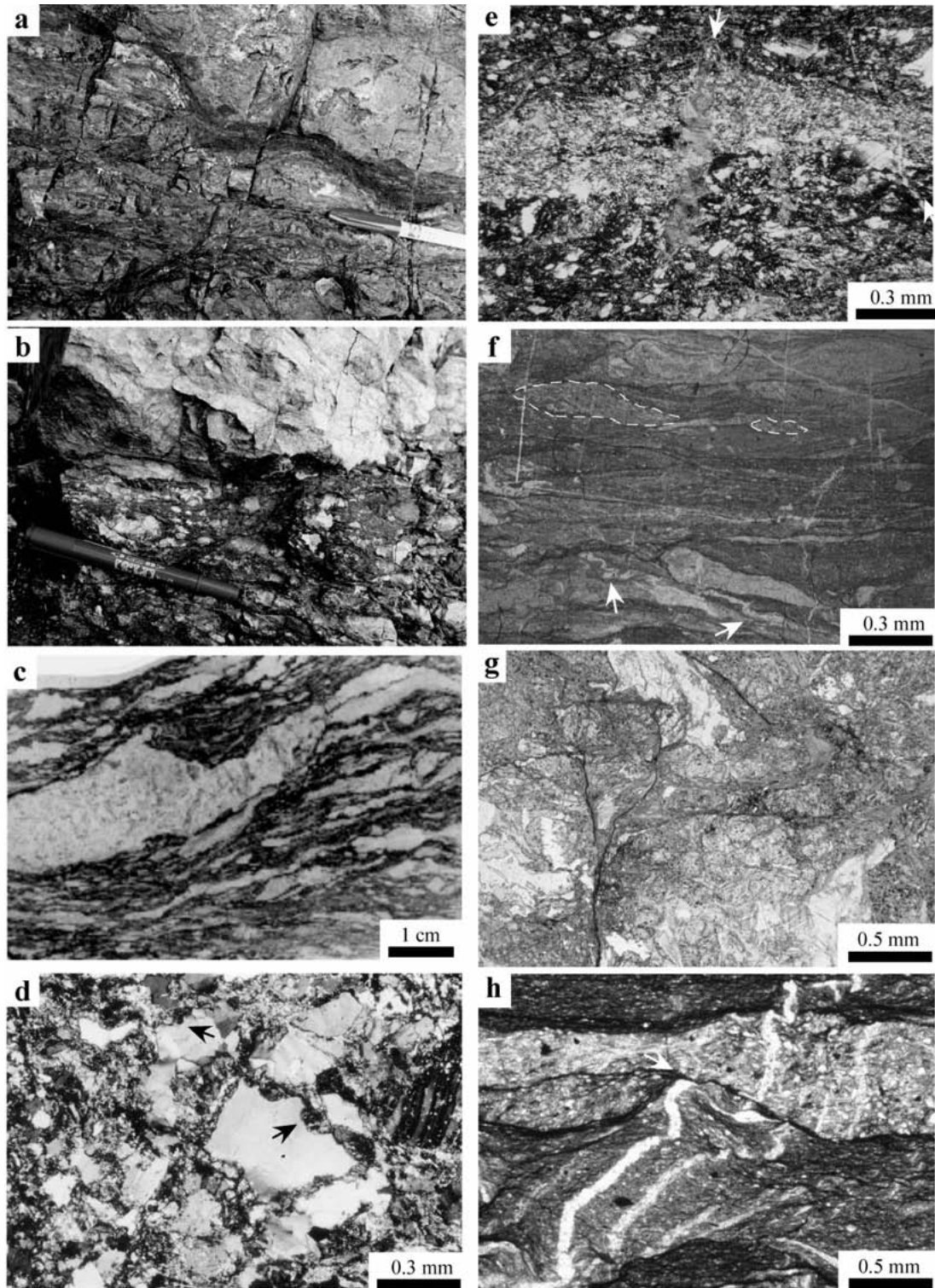
### 1. 試料準備

浸透率測定試料は、第2.b図中の丸印地点で採取した岩石ブロックから、直径20 mm、長さ7~25 mmの円柱形試料を抜き出して用いた。上盤の砂岩および断層岩は断層面に対して垂直な試料を、下盤の礫質泥岩は面構造に垂直な試料と平行な試料を準備した(第1表)。また礫質泥岩は、測定試料の中に5 mm以上の礫を含まないように注意して抜き出した。実験では間隙媒体に窒素ガスを用いるため、整形した試料は80℃のオーブンの中で3日以上乾燥させ、試料の質量が一定になるのを確認した。その後、円柱型試料をポラスパーサーで挟み、試料コラム全体をジャケット(ポリオレフィン製の熱収縮チューブ)で覆った。

### 2. 実験条件

透水性の測定には、京都大学のガス圧式高温高压変形・透水試験機を使用した(試験機の概要についてはWibberly and Shimamoto, 2003を参照)。間隙・封圧媒体は窒素ガスを用いた。よって厳密には測定した値は窒素ガスに対する測定結果であり、以後測定値は透水性ではなく浸透率として表記する。間隙媒体に水を用いた粘土の透水実験の場合、ガスを用いて測定した透水係数よりも約1桁小さくなるという結果が報告されている。これは、間隙表面に電荷している結晶が存在する場合、分極した水分子の移動が妨げられ、透水係数が小さくなるためである(Faulkner and Rutter, 2000)。本研究では、水に比べて粘性の低いガスを間隙媒体として用いることによって測定時間の短縮化をはかった。

実験では室温下で間隙圧を20 MPaに保ち、封圧を30 MPaから最大200 MPaに段階的に昇圧、そして減圧させながら浸透率を測定した(第1表)。浸透率測定には間隙圧振動法(Krantz et al, 1990; Fisher and Paterson, 1992)を用いた。この方法は、試料の片側で間隙圧を正弦波関数状に振動させ(振動幅は1.0 MPa以内)、もう片側で間隙圧の変化を測定して振幅の減衰比と位相差から浸透率係数を求める方法である。この方法の利点は、温度変化や微少なガス漏れなどによる間隙圧の変動の影響をフーリエ変換によって補正で



第4図. 断層岩の典型的な構造と顕微鏡写真. (a) 変形が集中している上盤の面状カタクレーサイト. (b) 地質体境界直下の礫質泥岩起源のカタクレーサイト. 礫がほとんど伸びておらず, 面構造の発達度合いも弱い. (c) 下盤の剪断構造の発達した礫質泥岩のスラブ写真. (d) 上盤の非変形砂岩の薄片写真 (直交ポーラー). 砂粒は主に石英と斜長石からなり, 粒間を細粒の方解石と層状珪酸塩鉱物が埋めている. 石英の粒界は圧力溶解によって特徴的な窪みができている (矢印). (e) 上盤のカタクレーサイトの薄片写真 (単ポーラー). 砂岩の粒径が減少し, 写真の長軸方向に雲母類の定向配列によって弱い面構造ができている. 方解石脈が面構造によって切られている (矢印). (f) 上盤の面状カタクレーサイトの薄片写真 (単ポーラー). 層状珪酸塩鉱物と不透明鉱物によって面構造が形成されている. また, 石英脈が圧力溶解によって面構造沿いに沿って溶解している (矢印). 点線枠は, カタクレーサイトのクラストを示している. (g) 下盤のカタクレーサイト (単ポーラー). 不透明鉱物で埋められた網目状の割れ目に沿って, 層状珪酸塩鉱物が晶出している. (h) 礫質泥岩 (単ポーラー). 石英脈が劈開面に沿って溶解し鋸歯状になっている (矢印).

第1表. ガス浸透率測定の実験条件と結果.

試料番号	実験番号	岩相	試料* 方向	断層面からの 垂直距離 [m]	封圧 [MPa]	間隙圧 [MPa]	浸透率#			
							Pe: 40 MPa [m <sup>2</sup> ]	60 MPa [m <sup>2</sup> ]	80 MPa [m <sup>2</sup> ]	100 MPa [m <sup>2</sup> ]
KT2101	GR044	塊状砂岩	⊥	3.2	30 → 150 → 30	20	1.7x10 <sup>-18</sup>	2.5x10 <sup>-19</sup>	6.1x10 <sup>-20</sup>	2.0x10 <sup>-20</sup>
上盤	KT2103	面状カタクレーサイト	⊥	1	31 → 203 → 29	20	7.2x10 <sup>-17</sup>	1.1x10 <sup>-17</sup>	2.6x10 <sup>-18</sup>	8.0x10 <sup>-19</sup>
	KT2104	カタクレーサイト	⊥	0.3	25 → 105 → 25	20	4.2x10 <sup>-18</sup>	6.4x10 <sup>-19</sup>	1.6x10 <sup>-19</sup>	5.5x10 <sup>-20</sup>
	KT2107	カタクレーサイト	⊥	0.1	32 → 191 → 30	20	1.2x10 <sup>-16</sup>	8.1x10 <sup>-17</sup>	5.7x10 <sup>-17</sup>	4.1x10 <sup>-17</sup>
下盤	KT2108	礫質泥岩	⊥	1.2	30 → 200 → 30	20	1.2x10 <sup>-17</sup>	4.7x10 <sup>-18</sup>	2.5x10 <sup>-18</sup>	1.6x10 <sup>-18</sup>
	KT2109	礫質泥岩	//	2	31 → 171	20	6.6x10 <sup>-17</sup>	2.6x10 <sup>-17</sup>	1.4x10 <sup>-17</sup>	8.5x10 <sup>-18</sup>

\* 地質体境界面に対する方向. ⊥: 垂直, //: 平行

# 昇圧時における浸透率.

きることである. この手法を用いることによって, 測定時間が長く, 温度変化とガス漏れの影響を受けやすい低浸透率試料 ( $< 10^{-19} \text{ m}^2$ ) を精度よく測定することができた.

### 3. 実験結果

第5図は縦軸に浸透率, 横軸に有効圧 (封圧-間隙圧) をとって, 浸透率の測定結果を示した. 浸透率は有効圧の増加とともに減少するが, 上盤と下盤ではその減少傾向に大きな差がある. 上盤の岩石は昇圧とともに4~5桁顕著に減少し, 有効圧85 MPaにおいてカタクレーサイトからは $10^{-20} \text{ m}^2$  オーダー, また非変形砂岩からは試験機の測定限界 ( $10^{-20} \text{ m}^2$ ) 以下の非常に低い浸透率が得られた. それに対して, 面状カタクレーサイトでは, 昇圧時に有効圧98 MPaで2桁大きい $10^{-18} \text{ m}^2$  オーダーの値が得られた.

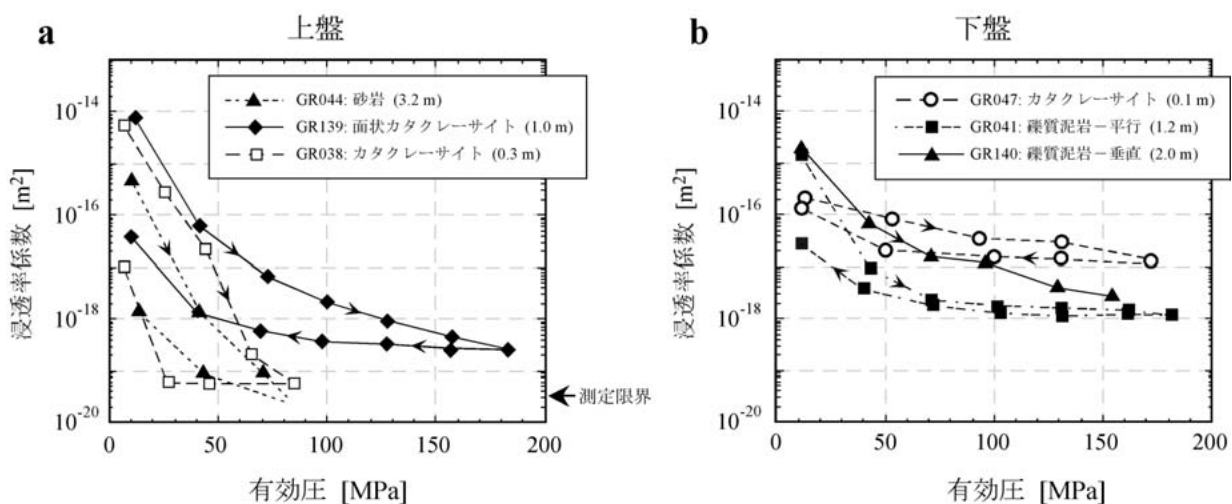
一方, 下盤の岩石の昇圧時における浸透率の減少は小さく2~3桁程度である. 境界直下の礫質泥岩起源のカタクレーサイトからは有効圧90~100 MPaにおいて $10^{-17} \text{ m}^2$  オーダー, 礫質泥岩からは $10^{-16} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$  オーダーという, 上盤に比べて2~3桁高い浸透率が得られた. また礫質泥岩の浸透率異方性を調べるため, 面構造に対して平行と垂直な試料で

測定を行った. 低封圧下 ( $< 100 \text{ MPa}$ ) では垂直に抜き出した試料の方が約1桁大きな値を示すのに対し, 封圧が大きくなるにつれてその差が小さくなる傾向が認められた (第5.b図). Evans et al. (1997) は, 粘土質面状カタクレーサイトの透水率異方性を調べて, 面構造に垂直な試料は面構造に平行な試料に比べて1~3桁小さい透水率を示すことを報告している. しかし, 本研究ではこのような傾向は認められなかった.

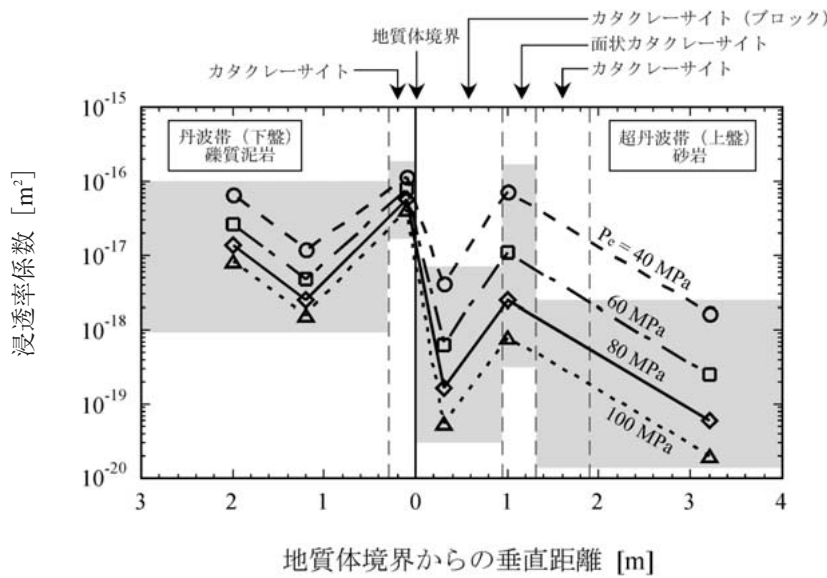
### 4. ナップ境界の浸透率構造

実験では減圧時にも浸透率を測定している. 第5図からもわかるように, 減圧時の浸透率は昇圧時に比べて小さくなる傾向があり, 有効圧約50 MPaまでほとんど回復することがない. つまり, 減圧時の浸透率は, 最高有効圧下での浸透率を記憶する傾向がある. よって測定結果を比較する際は, 昇圧時の浸透率を用いて比較を行った.

有効圧40, 60, 80, 100 MPaにおける昇圧時の浸透率の値を, 横軸に地質体境界からの距離をとってプロットした図 (断層帯の浸透率構造) を第6図に示す. 有効圧が30 MPa以下になると, 熱圧縮チューブと試料の間の側面流の影響で



第5図. ガス浸透率と有効圧 (封圧と間隙圧の差) の関係図. (a) 上盤. (b) 下盤. 間隙圧は20 MPaで一定. 凡例中に示している数字は地質体境界からの距離. 矢印は封圧の変遷を示している



第6図. ナップ境界の浸透率構造.

浸透率を過大評価してしまう恐れがあり (林ほか, 1999), また上盤の砂岩では有効圧約 100 MPa 以上で試験機の測定限界に達してしまう。よって本研究では, 有効圧 40 ~ 100 MPa における浸透率を用いて, ナップ境界の浸透率構造とした。それぞれの有効圧における浸透率は, 次の経験式を用いて第5図の昇圧時のデータを回帰することによって求めた。

$$\log k = a - b \log (P_e + c)$$

ここで,  $k$  は浸透率,  $P_e$  は有効圧,  $a, b, c$  は定数である。有効圧 80, 100 MPa においては, 上盤の母岩およびカタクレーサイトは, 花崗岩や粘土に匹敵する低い浸透率 ( $10^{-20} \text{ m}^2$ ) を示した。それに対して, 同じ封圧下で下盤の岩石はそれより 1 ~ 3 桁高い浸透率を示し, 断層帯の中心部 (面状カタクレーサイト) ではそれらの中間的な浸透率を示した。また, 有効圧 40, 60 MPa では, 断層帯中心部と下盤の浸透率がほぼ同じオーダーになる傾向が認められた。

### 考 察

これまでいくつか測定されている横ずれ断層沿いの浸透率は, 断層帯の中心と母岩で低く, その間の破碎帯で高い値を示すことが報告されている。例えば, Evans et al. (1997) は, 花崗岩地域に発達した断層帯を, ガウジとカタクレーサイトから構成される断層中心部, 破断面の発達したダメージゾーン, 断層変形の影響を受けていない母岩の3つに分類して, その透水性構造を報告している。その特徴は, 断層中心部と母岩では低い浸透率を示すのに対し, ダメージゾーンではそれらに比べて2桁ほど高い浸透率を示すことである。同様の浸透率構造は, 花崗岩を母岩とする野島断層についても報告されている (Lockner et al., 2000; 溝口ほか, 2000)。また, 泥質岩を母岩とする横ずれ断層についても, Evans et al. (1997) とよく似た浸透率構造が報告されている (Wiberly and Shimamoto, 2003; 佐藤・堤, 2003; Tsutsumi et

al., 2004)。しかしながら, 今回解析を行ったナップ境界 (低角逆断層) では, (1) 典型的な断層ガウジと, ダメージゾーンと呼ばれる小断層や破断面が卓越するゾーンがないこと, (2) 上盤に低浸透率層, 下盤および断層帯ではそれより 1 ~ 3 桁高い浸透率を示す高浸透率層が認められ, これまでとは違った内部構造と透水性構造が明らかとなった。ダメージゾーンが形成されないのは, (1) 母岩が十分に圧密を受けておらず多孔質岩石であったために, 変形が破断面の形成によって進行するより, むしろ空隙の体積減少として賄われたため (Antonellini and Aydin, 1994), もしくは, (2) 下盤の泥質部がインコンピート層として振る舞い, そこに変形が集中したためであろう。横ずれ断層と透水性構造が大きく異なるのは, 1つは上記の理由で浸透率の高いダメージゾーンが形成されなかったこと, もう1つは母岩の浸透率を規定する構造が上盤と下盤で大きく異なるためであろう。つまり, 上盤と比べて下盤と断層帯で面構造がより顕著に発達しているため, それらが流体の通り道となり, 第6図のような透水性構造が形成されたと考えられる。

本研究では, 採取場所は異なるが岩相がよく似ている礫質泥岩を用いて浸透率の異方性を調べた。その結果, 面構造に対して垂直方向の試料が平行な試料より約1桁大きな浸透率を示すことがわかった (第5.b図)。前述したように, 一般に面構造の発達した岩石では, 構造に垂直な方向は構造に対して平行な試料よりも約1~3桁小さい浸透率を示すとされている (Evans et al., 1997)。従来の報告とは逆の傾向が得られたのは, 礫質泥岩には面構造を切る  $R_1, R_2$  剪断面が発達しているため, それらの剪断面が流体の通り道となって, 一般的な浸透率異方性が得られなかったのかもしれない。また, 構造に対して試料サイズが小さいため浸透率異方性を評価しきれていないことも考えられる。クラストを含む断層角礫においては, 本実験で得られたような低封圧下で構造に垂直な試料の方が大きい浸透率を示すことも報告されている

第2表. 西南日本内帯先白亜系ナップ境界における岩相の比較.

地域	福井県小浜市 下加斗	京都府綾部市 西原町	鳥取県八東町 志谷北西	岡山県北房町 笹原北方	福井県高浜町 和田	山口県周南市 須万上奥畑
北緯	35° 29' 20"	35° 17' 13"	35° 22' 55"	35° 59' 30"	35° 29' 39"	34° 12' 20"
東経	135° 40' 18"	135° 17' 15"	134° 21' 36"	133° 40' 7"	135° 35' 48"	131° 53' 1"
上盤	超丹波帯 (氷上層)	超丹波帯	三郡蓮華帯 (大江山オフィオライト)	三郡蓮華帯 (大江山オフィオライト)	舞鶴帯 (夜久野オフィオライト)	秋吉帯 (錦層群)
岩相	塊状砂岩	塊状砂岩	蛇紋岩	ハンレイ岩	塊状蛇紋岩	砂岩-凝灰岩
下盤	丹波帯	丹波帯	三郡蓮華帯 (高压型変成帯)	秋吉帯	超丹波帯	周防変成帯
岩相	礫質泥岩	スレート	結晶片岩	スレート	スレート	結晶片岩

(Seront et al., 1998). 今後、圧力がかかった状態で流体の通り道を可視化する手法を開発して、面構造や剪断面沿いに流体の移動が可能であったのかを確認すること、大きな試料を用いて浸透率の異方性を調べることが課題である。

第2表は、西南日本内帯で観察されるナップ境界の岩相を示している。他のナップ境界においても相対的に上盤には塊状で緻密な岩石、下盤にはスレートや片理の発達している岩石が分布している傾向がある。岩相から浸透率を推測することは容易ではないが、下盤には流体の移動経路となっていたと考えられる劈開面をもつ変形岩が特徴的に分布することから、推測される浸透率構造は今回の解析結果と似ている可能性がある。断層面が非常に低角であり、かつこのような浸透率構造を持つとすれば、堆積物の圧密や含水鉱物の脱水反応によって付加体深部から供給される流体が断層帯でトラップされ、断層帯内部に高い間隙水圧を保持することが可能となるであろう。Hubbert and Rubey (1959) が指摘しているように、ナップの低角衝上運動は、このような断層帯内部における高間隙水圧の存在によって促進されたのかもしれない。

本研究では、付加体中の低角断層の一例として西南日本内帯のナップ境界に注目した。今後、より多くの前弧域で活動した低角断層帯の内部構造と浸透率構造を調べてその対応関係を明らかにすること、ナップ断層運動の挙動を支配している可能性のある面状カタクレーサイトを実験室で再現してそのレオロジーを確立すること、これらによってより現実的な付加体内部の断層モデルを構築することが可能となるであろう。

## ま と め

1. ナップ境界断層帯の変形集中域には、幅 0.2 ~ 3 cm の面構造の発達したカタクレーサイトが形成されている。ナップ運動の挙動はこの面状カタクレーサイトによって支配されている可能性がある。

2. 断層帯では、石英・方解石・リモナイト脈、炭質物の濃集層のほか、緑泥石やイライトが面構造を形成しており、水を媒介とした活発な物質移動があったことを示している。

3. 有効圧 40 ~ 100 MPa において、上盤の砂岩からは  $10^{-18}$  ~  $10^{-20}$  m<sup>2</sup> の浸透率が得られ、下盤の礫質泥岩と断層帯のカタクレーサイトからはそれより 1 ~ 3 桁高い浸透率が得られた。このような浸透率構造によって、断層帯内部に高間

隙水圧が保持され、ナップの大規模な衝上運動が可能になったと考えられる。

## 謝 辞

京都大学の嶋本利彦教授にはナップ境界断層の重要性を指摘していただいた。上原真一博士、Christopher Wibberley 博士、溝口一生博士、堤 昭人博士には実験結果について議論していただいた。また、高橋 学博士、高木秀雄教授、匿名の査読者の方々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。

## 引用文献

- Antonellini, M. and Aydin, A., 1994, Effect of faulting on fluid flow in porous sandstone: petro-physical 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 zones. *Jour. Struct. Geol.*, **19**, 1393-1404.
- 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 degrees C. *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 16,415-16,426.
- Fischer, G. J. and Paterson, M.S., 1992, Measurement of permeability and storage capacity in rocks during deformation at high temperature and pressure. In B. Evans and T.-F. Wong, eds., *Fault mechanics and transport properties of rocks*, Academic Press Ltd. 213-252.
- 早坂康隆, 1987, 西南日本内帯西部地域における中・古生代造構作用の研究. 広島大地研報, no.27, 119-204.
- 早坂康隆・廣瀬丈洋, 2002, ナップ境界の現象論—西南日本内帯を例に—. 月刊地球号外, 沈み込み帯地震発生帯—その物質科学と深海掘削—, **36**, 75-81.
- Hubbert, M.K. and Rubey, W.W., 1959, Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **70**, 115-166.
- 木村克己・牧本博・吉岡敏和, 1989, 綾部地域の地質. 地域地質研究報告, 5 万分の 1 地質図幅, 地質調査所.
- Ishiga, H., 1986, Ultra-Tamba Zone of Southwest Japan. *Jour. Geosci., Osaka City Univ.*, **29**, 45-88.
- 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. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **27**, 345-352.
- 林 為人・高橋 学・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., Naka, H., Tanaka, H. and Ikeda, R., 2000, Permeability and strength of core samples from 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, 147-152.
- 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—. 月刊地球号外, 活断層研究—そのフロンティア—, **31**, 58-65.
- Otoh, S. and Yanai, S., 1989, Eastward overthrusting in the Tamba and Ultra - Tamba Zone of Southwest Japan. *Jour. Geol. Soc., Japan*, **95**, 781-784.
- 大藤 茂・柳井修一・山北 聡, 1989, ジュラ紀後期～白亜紀前期の延性衝上帯とプレート運動像; 丹波帯, 超丹波帯を例として. 構造地質, **34**, 75-84.
- Rutter, E.H., Maddock, R.H., Hall, S.H. and White, S.H. 1986, Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *Pure Appl. Geophys.*, **124**, 3-30.
- 佐藤慶治・堤 昭人, 2003, 柳ヶ瀬断層の内部構造と浸透率. 構造地質, **47**, 49-56.
- Seront, B., Wong, T.-F., Caine, J.S., Forster, C.B., and Bruhn, R.L., 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.
- Tsutsumi A., Nishino S., Mizoguchi K., Hirose T., Uehara S., Sato K., Tanikawa, W. and Shimamoto T., 2004, Internal and permeability structures of the Neodani fault, Nobi active fault system, central Japan. *Tectonophysics*, **379**, 93-108.
- 上村不二雄・坂本 享・山田直利, 1979, 若狭地域の地質. 地域地質研究報告, 5 万分の 1 地質図幅, 地質調査所.
- Wibberley, C.A.J. and Shimamoto, T., 2003, Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: the Median Tectonic Line in Mie Prefecture, Southwest Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **25**, 59-78.

## (要 旨)

廣瀬丈洋・早坂康隆, 2005, 西南日本内帯先白亜系のナップ境界断層帯の内部構造と透水性—丹波帯-超丹波帯境界における解析例—. 地質雑, **111**, 300-307. (Hirose, T. and Hayasaka, Y., 2005, Internal and permeability structures of Pre-Cretaceous nappe boundaries in the Inner Zone of Southwest Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **111**, 300-307)

福井県小浜市下加斗片地域に露出している丹波帯と超丹波帯のナップ境界断層帯の内部構造と浸透率構造を調べた。その結果、(1) 両地質体は約 3 m のカタクレサイト帯を介して完全に固着して接しており、変形は幅 0.2 ~ 3 cm の面状カタクレサイトに集中していること、(2) 断層帯では、石英や方解石、リモナイト脈、炭質物の濃集層のほか、多量の層状珪酸塩鉱物が晶出しており、流体を媒介とした活発な物質移動があったこと、(3) 本ナップ境界では、上盤に低い浸透率を示す砂岩層、下盤および断層帯ではそれより 1 ~ 3 桁高い浸透率を示す礫質泥岩層およびカタクレサイト帯が分布していることがわかった。このような浸透率構造によって、断層帯内部に高間隙水圧が保持され、ナップの大規模な衝上運動が可能になったと考えられる。