

# プレート境界断層が海溝から地震発生深度にかけて 発達する際の流体挙動

氏家 恒太郎\* 山口 飛鳥\*\* 木村 学\*\*  
久光 敏夫\*\*\* 平 朝彦\*\*\*

## Fluid Behavior during Evolution of Plate Boundary Fault from Trench to Seismogenic Depths

Kohtaro UJIIE\*, Asuka YAMAGUCHI\*\*, Gaku KIMURA\*\*,  
Toshio HISAMITSU\*\*\* and Asahiko TAIRA\*\*\*

### Abstract

Fluid behavior during the evolution of the plate boundary fault (pbf) from a trench to seismogenic depths is the central problem when evaluating the relationship between fluids and seismicity in subduction zones. Ocean Drilling Program Legs 190 and 196 at the toe region of the Nankai accretionary margin reveal that fluid-filled dilatant fractures and underconsolidated underthrust sediments lead to an elevated fluid pressure in and below the pbf, respectively. The pbf with elevated fluid pressure extends down-dip to ~ 35 km, resulting in the absence of seismic behavior at shallow depths and mechanical decoupling between accreted and underthrust sediments. Underconsolidated underthrust sediments are primarily caused by rapid tectonic loading compared to the rate of fluid escape in underthrust sediments and secondarily by a low-permeability cap due to the compactively deformed pbf. Fluid-filled dilatant fractures represent the overconsolidate state within the pbf, which is caused by the generation of high fluid pressure after compactive deformations.

The exhumed plate boundary rocks (*i.e.*, tectonic *mélange*) in the Shimanto accretionary complex indicate that the underthrust sediments became rocks due to dewatering, pressure solution, and other diagenetic reactions, thus acquiring elastic strength. The pbf in the upper part of the seismogenic depths was weak due to elevated fluid pressure; this facilitated the downward step of the pbf and the underplating of underthrust rocks. The pbf under low effective stress was unlikely to nucleate the instability; however the fluid-related repeated deformations, which probably reflect the seismic cycle in the subduction zone, could be recorded. The coseismic deformations were attributed to hydraulic implosion breccias, injection of ultracataclasite, and fluid inclusion stretching in the pbf. Implosion breccias suggest rapid depressurization associated with the passage of the rupture through dilational jog. Other deformations represent shear heating and fluidization along the narrow ultracataclasite layer, which could enhance the propagation of instability at the pbf in the upper parts of the seismogenic depths.

---

\* 海洋研究開発機構地球内部変動研究センター

\*\* 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学

\*\*\* 海洋研究開発機構地球深部探査センター

\* Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

\*\* Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

\*\*\* Center for Deep Earth Exploration, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

**Key words** : fluid pressure, subduction zone, plate boundary fault, seismic cycle, implosion breccias, ultracataclasite, fluidization

**キーワード** : 流体圧, 沈み込み帯, プレート境界断層, 地震サイクル, 伸張性角礫岩, ウルトラカタクレサイト, 流動化

## I. はじめに

海溝から地震発生帯に至るプレート境界断層の発達過程において, 流体は重要な役割を果たしていると言われるがその実態はよく分かっていない。代表的な付加縁辺である南海トラフ (図 1a) は, プレート境界断層における流体の役割解明に向けた格好のターゲットであり, 国際深海掘削計画 (ODP) によって付加体先端部のプレート境界断層を貫通する掘削が実施されてきた。また, 南海トラフの陸上アナログである四万十付加体 (図 1a) は, 震源域の温度・深度条件にまで沈み込んだ過去のプレート境界断層が露出しており (Ikesawa *et al.*, 2005), 沈み込み帯の地震に果たす流体の役割を明らかにするうえで格好の研究フィールドである。

四万十付加体には沈み込み時のプレート境界に沿ったせん断により, 海洋プレート上の堆積物が分断化して形成されたメランジュが分布する (Kimura and Mukai, 1991; Ujiie, 2002)。このうち四国東部に分布する上部白亜系 (一部古第三系) 牟岐メランジュは, 頁岩マトリックスに玄武岩, 半遠洋性泥岩, 酸性凝灰岩, 砂岩のブロックを含むことで特徴づけられる。このメランジュは玄武岩から半遠洋性堆積物を経て海溝充填堆積物に至る海洋プレート層序を保存しており, 玄武岩に発達する断層により海洋プレート層序が繰り返す覆瓦状構造を構成している (図 1b)。この覆瓦状構造は, プレート境界断層が海洋地殻上部の玄武岩にステップダウンすることによって, メランジュが玄武岩の一部とともに底付け付加した際に発達したデュープレックス構造を反映していると考えられる (図 1c)。石英脈中の流体包有物から見積もられた牟岐メランジュの底付け付加時の温度・深度条件はそれぞれ 150–200 °C, 4–6 km

で, 南海トラフにおいて非地震性プレート境界が海洋地殻上部にステップダウンして地震性プレート境界へと変化する条件とよく一致する (Matsumura *et al.*, 2003)。これらのことから, 牟岐メランジュに発達する覆瓦状構造を構成する断層 (デュープレックス構造のランプスラストに相当) は, プレート境界断層が非地震性から地震性へと変化する過程を観察・理解するうえで格好の研究対象であるといえる。

本論文ではまず ODP で明らかになった南海トラフ付加体先端部におけるプレート境界断層の特徴を紹介する。次に四万十付加体牟岐メランジュに発達する地震発生深度のプレート境界断層における変形・変質作用と流体挙動について紹介し, プレート境界断層の発達過程に果たす流体の役割について考察する。

## II. 付加体先端部におけるプレート境界断層の特徴

南海トラフ付加体先端部の反射法地震波探査断面は, プレート境界断層上位の付加体は褶曲とスラストにより変形しているが, 下位の沈み込み堆積物は未変形で, プレート境界断層を挟んで変形様式が大きく異なっていることを示している (図 2a)。同様の特徴は掘削コア試料においても認められ, 付加体ではプレート収斂に関連したほぼ水平の最大主応力下で形成された変形バンドが発達するのに対し, 沈み込み堆積物ではそのようなコアスケールでのテクトニックな変形構造は認められない (Ujiie *et al.*, 2004)。ODP Leg 196 による掘削同時検層 (とりわけボアホールブレイクアウト) Legs 131 and 190 による掘削コア試料の解析 (とりわけ帯磁率異方性) により, 南海トラフ付加体先端部のプレート境界断層は, 応力・歪みの不連続面であることが実証された (Taira *et*

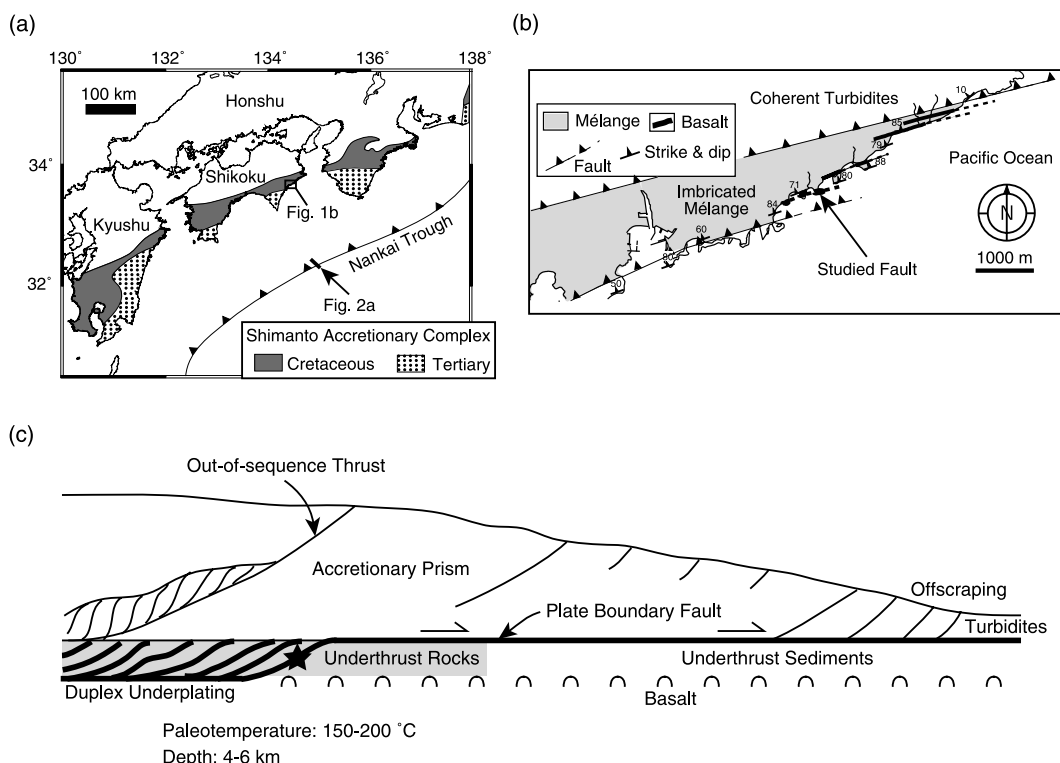


図 1 (a) 南海トラフにおける ODP 掘削トランセクトと南海トラフの陸上アナログである四万十付加体の分布図。(b) 牟岐メランジュの地質図。玄武岩に発達する断層により海洋プレート層序が繰り返す覆瓦状構造で特徴づけられる。牟岐メランジュの位置に関しては図 1a を参照。研究対象とした断層は覆瓦スラストに対応する。(c) 牟岐メランジュのテクトニックセッティング。研究対象とした断層はデュプレックス構造のランブスラスト(星印)に相当し、プレート境界断層が海洋地殻上部にステップダウンした際に形成されたと考えられる。

Fig. 1 (a) ODP drilling transect in the Nankai Trough. The Shimanto accretionary complex could represent a landward analog of the Nankai accretionary complex. (b) Geological map of the Mugi Mélange showing the imbrication of the ocean floor stratigraphy. The location of the map is shown in Fig. 1a. The studied fault corresponds to the imbricate thrust. (c) Paleotectonic setting of the Mugi Mélange. The studied fault (solid star) was formed in association with the downward step of the plate boundary fault.

*al.*, 1992; Mikada *et al.*, 2002; Ujiie *et al.*, 2003)。一例として図 2b に南海トラフ付加体先端部におけるプレート境界断層を挟んだ歪みの状態変化を示す。断層上位の付加体では側方圧縮によって帯磁率楕円体の長軸がプレート収斂方向と直交する方向に配列しているのに対し、断層下位の沈み込み堆積物では帯磁率楕円体の主軸は一軸歪みを反映した分布を示す。

付加体先端部のプレート境界断層が応力・歪みの不連続面である要因について次のように考える

ことができる。海溝充填タービダイトの堆積や付加体発達に伴う急激な上載圧増加に対して、沈み込む半遠洋性堆積物からの排水が追いつかないため、過剰間隙水圧が発生しうる (Saffer *et al.*, 2000)。また、プレート境界断層では粒子間セメンテーションの崩壊、せん断変形により周囲より圧密が進行していることから (図 2c)、断層シーリングにより下位の沈み込み堆積物からの排水が妨げられ、プレート境界断層より下位で過剰間隙水圧が発生していることが考えられる (Ujiie *et*

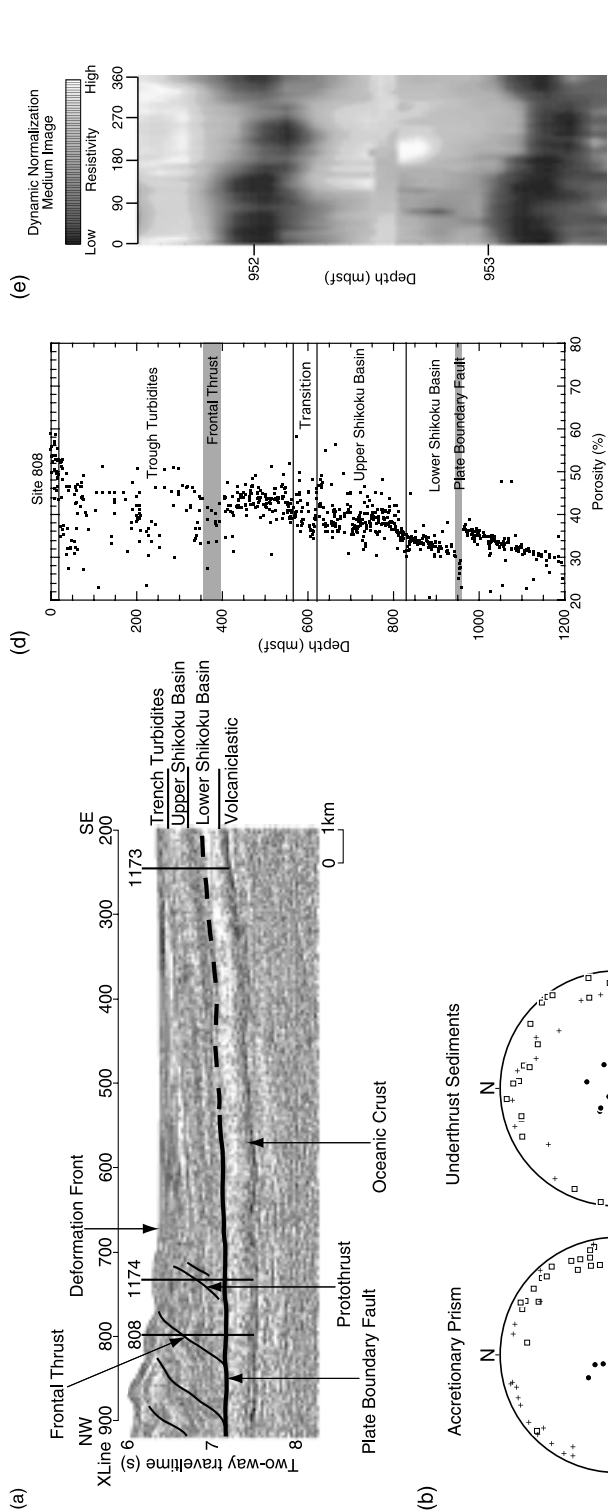


図 2 (a) 南海トラフ付加体先端部の反射法地震波探査断面、断面の位置に関しては図 1a を参照。  
 (b) 付加体と沈み込み堆積物における帯磁率楕円体の主軸の分布 (下半球等積投影) : 矢印は南海付加縁辺におけるプレート収斂方向。(c) プレート境界断層における断層角礫の走査型電子顕微鏡写真 (二次電子像)。両矢印はすべり面に沿って発達する粘土鉱物粒子の選択的定向配列。(d) Site 808 における間隙率。Site 808 の位置に関しては図 2a を参照。(e) Site 808 におけるプレート境界断層の電気比抵抗孔壁画像 (孔壁から 3 インチ外側の画像)。暗色の部分が流体で充填された割れ目に相当する。

Fig. 2 (a) Seismic reflection profile of the toe region of the Nankai accretionary margin. The location of the profile is shown in Fig. 1a. (b) Lower hemisphere equal-area projection of the principal susceptibility axes. The arrow indicates the plate convergence vector in the Nankai accretionary margin. (c) Scanning electron microscope image (secondary mode) of the brecciated fragment in the plate boundary fault. The double arrows indicate the zone of preferred orientation of clay particles along the slip surface. (d) Porosity profile at Site 808. The location of this site is shown in Fig. 2a. (e) Resistivity-at-the-bit image of the 2-m normalization interval in the plate boundary fault at Site 808, showing conductive fractures (dark sinusoidal features), which are presumably dilated due to the high fluid pressure. A 3-inch penetration from the borehole is used.

al., 2003)。この過剰間隙水圧帯の存在が、その上下での応力・歪み分布の非連続性を生じさせていると考えられる。間隙率はプレート境界断層を挟んで下位の沈み込み堆積物で26%増加するが(図2d)、これは過剰間隙水圧の発生によるものであると考えられる。

一方でプレート境界断層を挟んだ下位の沈み込み堆積物の間隙率増加の別の要因として、粒子間セメンテーションの発達による圧密の妨害があげられる。しかし、走査型電子顕微鏡による微細構造観察では、プレート境界断層より下位では粒子間セメンテーションは確認されず(Ujiie et al., 2003)、また一軸圧密試験でも粒子間セメンテーションは沈み込み堆積物では発達しないことが示された(Spinelli et al., 2004)。したがってプレート境界断層より下位での間隙率増加は、粒子間セメンテーションによるものではなく、急激に増加した上載圧と半遠洋性堆積物の低い透水性による未圧密状態に起因していると考えられる。

掘削同時検層で得られた電気比抵抗孔壁画像データは、プレート境界断層内部に流体で充填された割れ目が発達していることを示している(図2e)。これらの割れ目は、プレート境界断層の圧密が進行した後に、間隙水圧が増加して有効応力を下げることにより、断層内部が過圧密状態になり、この状態において載加されたせん断応力に対し、弾性的な挙動として亀裂性の dilatant fractures が形成されたことを反映していると考えられる(Ujiie et al., 2003)。流体で充填された割れ目の方位はランダムで活発な流体移動の証拠も認められないことから(Mikada et al., 2002)、これら割れ目に流体がトラップされ過剰間隙水圧を発生させていることが示唆される。

以上のような要因がからみあって、南海トラフ付加体先端部のプレート境界断層に沿ったもしくはその下位に過剰間隙水圧が発生していると考えられる。その量は、掘削で得られた間隙率などの物性データを用いて見積もると、静岩圧から静水圧を差し引いた値の4-5割程度である(Screaton et al., 2002)。モデリングの結果は、間隙水圧は沈み込みの進行とともに更に増加することを示し

ているが(Saffer and Bekins, 1998)、これは沈み込み堆積物の圧密の遅れに加え、鉱物の相変化に伴う脱水(例えばス멕タイトからイライト、オパールから石英への変化)が関係していると考えられる(Moore and Saffer, 2001)。過剰間隙水圧を伴うプレート境界断層は、反射法地震波探査断面では負の極性をもつ強反射面として認識され、三次元反射法地震波探査の結果はこの強反射面が付加体先端部から陸側35 km、深度にして3-4 kmにまで分布していることを示している(Bangs et al., 2004)。このようなプレート境界断層に沿った過剰間隙水圧の発生と未圧密な沈み込み堆積物の存在は、付加体の浅い深度において地震が発生しないことと調和的である。

注目すべきは、三次元反射法地震波探査で明らかになったプレート境界断層の強反射面の陸側下限が、想定されている地震発生帯上限とほぼ一致し、更にプレート境界断層がステップダウンして底付け付加が開始される地点とほぼ一致していることである。Bangs et al., (2004)はプレート境界断層からの流体の排水が地震性プレート境界の発達成因となるとしているが、それだけでは堆積物が完全に固化して力学的に弾性的性質を有するようになる(星野, 1978)とは考えづらい。他の発達成因を探るには、陸上に露出する過去のプレート境界断層を詳しく検討するのが一つの有効な手段である。

### III. 地震発生深度におけるプレート境界断層の特徴

#### 1) 断層帯の内部構造と変形・変質作用

地震発生深度におけるプレート境界断層の研究対象として、四万十付加体牟岐メランジュの覆瓦状構造を構成する断層のうち、最も露頭状況が良く、観察・分析に最適なものを選定した(図1b)。断層帯の厚さは約20 mで、玄武岩起源のウルトラカタクレーサイト・面状カタクレーサイト、メランジュ起源のカタクレーサイト、枕状・塊状玄武岩、ハイアロクラスタイトからなる(図3)。断層帯の一般走向・傾斜は東北東・ほぼ垂直で、メランジュの面構造(圧力溶解劈開)と平

行である。面状カタクレーサイトでは破碎岩片や粘土鉱物が回転・配列して逆断層センスを示す複合面構造が形成されており、破碎流動による変形が卓越する（図 4a, 図 5a）。ウルトラカタクレーサイトの厚さは 20 cm で、玄武岩とメランジュの境界に沿って局所化して発達する（図 3）。ウルトラカタクレーサイトはランダム組織を示し、注入構造や玄武岩起源のウルトラカタクレーサイトとメランジュ起源のカタクレーサイトの混合など、乱流ないし非層流下での流動化による変形を示す（図 4b, c）。ウルトラカタクレーサイトとその近傍の玄武岩は変質が進んでおり、赤～緑色の面状カタクレーサイトと比較して、粘土鉱物（ほとんどがスメクタイト・緑泥石混合層鉱物）や方解石脈及びその破碎物に富んでおり薄緑色を呈する。この変質作用により強磁性鉱物のマグネタイトとマグヘマイトが消失しており、帯磁率は面状カタクレーサイトや枕状・塊状玄武岩と比較して 2 桁ほど低下する（図 3）。これらの特徴は、ウルトラカタクレーサイトに沿った局所化したすべりと変質作用が断層帯内部で起こったことを示している。

一方、断層帯直上、直下のメランジュには厚さ数 m に渡って断層帯から伸びる鉱物脈が濃集する（図 3, 図 4d）。鉱物脈は伸張性割れ目を方解石及び濁沸石が充填したものが卓越するが、ハイブリッド（せん断変位を伴う伸張性割れ目）せん断割れ目を充填してできた鉱物脈も認められる。鉱物脈はウルトラカタクレーサイトと互いに切断関係にあり粉碎作用と鉱物脈形成が繰り返し起こったことを示している（図 4c, d）。

ウルトラカタクレーサイトと断層帯直上、直下のメランジュに濃集する鉱物脈の方位を図 5b, c に示す。ウルトラカタクレーサイトと鉱物脈の方位は互いに直交する。このことに加え、鉱物脈は伸張性割れ目起源のものが卓越することを考慮すると、鉱物脈形成時の最大主応力の方位はウルトラカタクレーサイトの傾斜方向とおおよそ平行であったことが示唆される。

## 2) 伸張性ジョグと伸張性角礫岩

断層帯最上部の傾斜は一般にほぼ垂直であるが

場所によっては北に中角度（35～50°）で傾斜し、そのような部分ではメランジュ中の圧力溶解劈開を切る（図 6a, b）。断層が中角度に傾斜する部分ではマトリックスが方解石で充填された伸張性角礫岩が、ウルトラカタクレーサイトに取り囲まれて分布する（図 6c）。伸張性角礫岩の角礫はウルトラカタクレーサイト起源のものが多く、一部変質玄武岩で、ジグソーパズル状組織を示し、摩耗の影響をほとんど受けていない（図 6d）。断層の傾斜変化に対応した伸張性角礫岩の分布と内部組織の特徴は、断層が中角度に傾斜する部分は逆断層型の破壊に伴って形成された伸張性ジョグとして機能し、伸張性角礫岩は破壊時のダイレイタンスーによって大きな間隙水圧変化が生じ、水圧破碎により周囲の岩石を取り込みつつ熱水性鉱物が間を充填して形成された hydraulic implosion breccias（Sibson, 1986）に相当すると考えられる（図 6e）。一方、ウルトラカタクレーサイトは断層の傾斜変化に関係なく認められ、断層が中角度に傾斜する部分は、ウルトラカタクレーサイト形成時には releasing bend として機能したと考えられる。

伸張性角礫間を充填する方解石から室温下で気液 2 相の初成流体包有物を選び出し均質化温度を測定した。2 つのサンプルについて、均質化温度分布をヒストグラムにしたものを図 7 に示す。均質化温度は 130～180℃ 付近にピークを持ち、かつ 180～350℃ に渡って尾を引くパターンを示す。このような極端に幅広い均質化温度分布を持つ成因として、（1）捕獲時の温度変化が大きい、（2）間隙水圧変化量が大きい、（3）沸騰流体の捕獲、（4）時間の経過及び温度低下に伴う流体包有物のネッキングダウン、（5）流体包有物形成後の温度上昇による体積増加（ストレッチング）などがあげられる。

O'Neil *et al.*（1969）によれば、水の酸素同位体比を一定とした場合、今回測定された均質化温度分布から導かれる方解石の酸素同位体比の変化幅は 8‰ 以上になるが、実際に伸張性角礫岩の方解石マトリックスから得られた酸素同位体比の変化幅は約 3‰ であることから（Yamaguchi *et al.*,

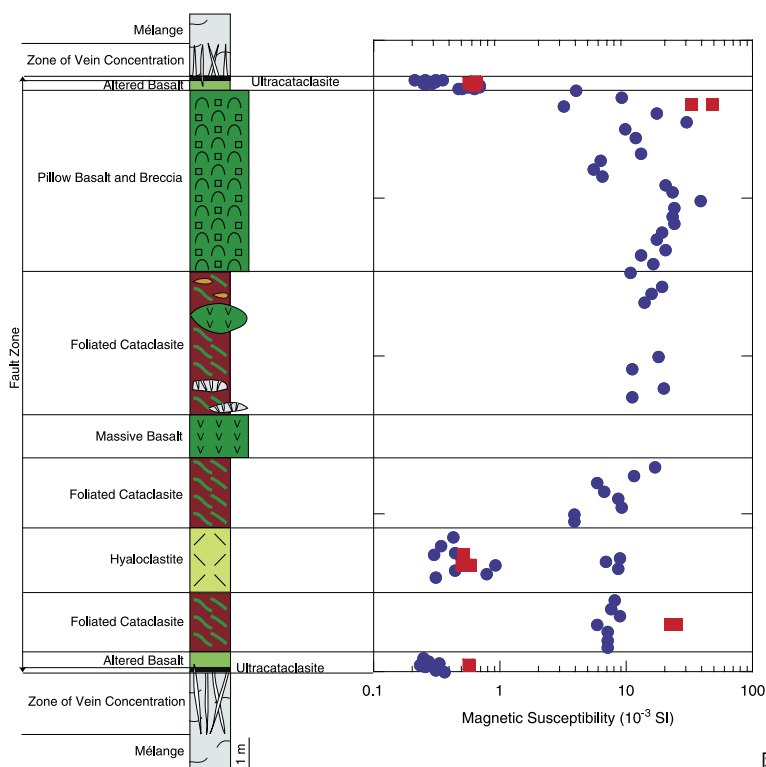


図 3 断層帯の柱状図と帯磁率の分布．帯磁率のうち、青丸はハンディタイプの帯磁率計により露頭で計測したもの、赤四角は帯磁率計で測定した体積帯磁率．

Fig. 3 Columnar section of the fault zone showing the distribution of fault rocks. Magnetic susceptibilities are also shown. Blue circles indicate the uncorrected values of magnetic susceptibility measured at outcrops. Red squares indicate the volumetric magnetic susceptibilities measured with a magnetometer.

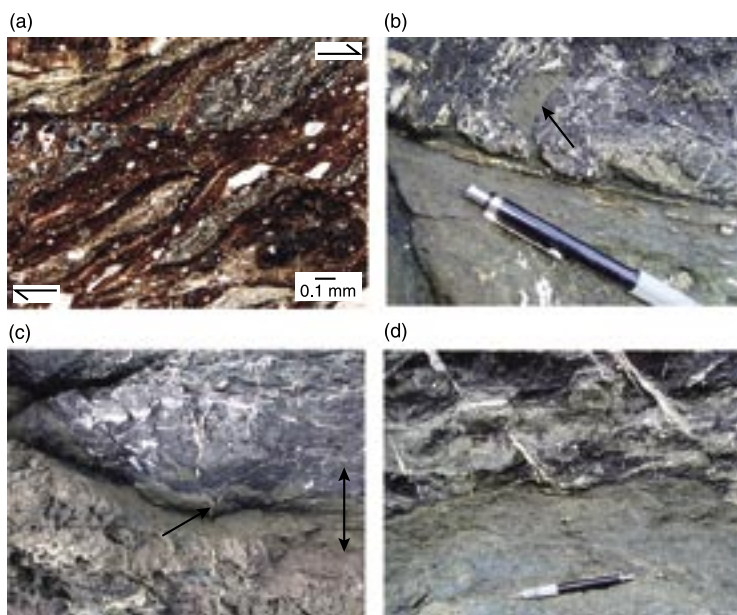


図 4 (a) 面状カタクレーサイトの微細構造（直交ニコル）．せん断センスを半矢印で示す．(b) ウルトラカタクレーサイトの注入構造（矢印）．(c) 玄武岩起源のウルトラカタクレーサイト（薄緑色）とメランジュ起源のカタクレーサイト（黒色）の混合（両矢印）．ウルトラカタクレーサイトを切る鉱物脈を矢印で示す．(d) 断層帯近傍のメランジュに濃集する鉱物脈．これらの鉱物脈は、ウルトラカタクレーサイトにシャープに切られ、断層帯からメランジュに向かって先細りする．

Fig. 4 (a) Microstructures of the foliated cataclasite (cross-polarized light). The half arrows indicate the shear sense of the foliated cataclasite. (b) Injection of ultracataclasite represented by an arrow, which shows the flow or mobilization of ultracataclasite. (c) Narrow zone (double arrows) showing the mixing of ultracataclasite derived from basalt (light green) and the cataclasite derived from mélangé (black). The arrow indicates the vein cutting through ultracataclasite. (d) Concentration of veins in the mélangé. The veins are sharply cut by the ultracataclasite and taper away from the fault zone.

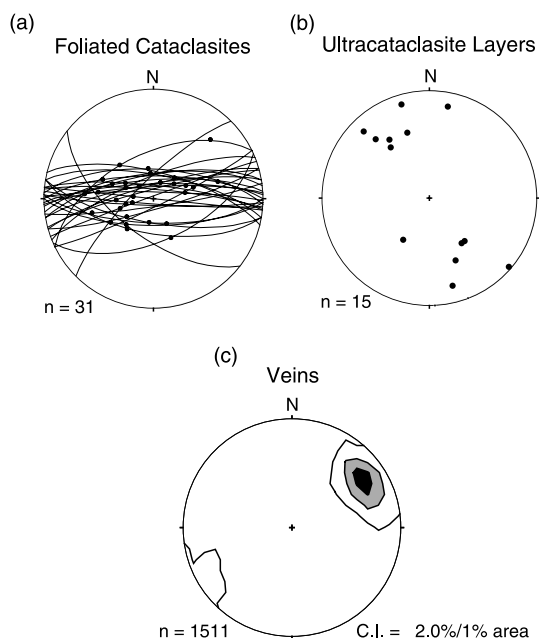


図 5 (a) 面状カタクレーサイトのスリップ方位 (下半球等積投影). (b) ウルトラカタクレーサイトと (c) 断層帯近傍のメランジュに濃集する鉱物脈の方位 (下半球等積投影).

Fig. 5 (a) Slip directions of foliated cataclasites (lower hemisphere equal-area projection). Orientations of the ultracataclasite layers (b) and veins in the mélangé immediately above and below the fault zone (c) (lower hemisphere equal-area projection).

2005) 捕獲時の温度変化は小さいと考えられる。したがって (1) は想定しづらい。流体包有物中の気相のラマン分析を行ったところ、 $\text{CH}_4$  や  $\text{CO}_2$  などは検出されず  $\text{H}_2\text{O}$  からなることが明らかになった。この場合、均質化温度の分布と等密度曲線から、捕獲温度が何度であれ間隙水圧変化量が最低でも 200 MPa を越えることになる。これは深度 4–6 km の断層における静岩圧から静水圧を差し引いた値を有意に超えることになるので (2) も想定しづらい。伸張性ジョグ形成は急激な圧力減少を伴うので (3) は 1–2 km 以浅の深度では起こりえるが (Sibson, 1987) 深度 4–6 km の断層の場合、静水圧よりはるかに減圧する必要があり非現実的である。(4) に関しては、細心の注意を払って初成流体包有物を選定したの

で、均質化温度分布に与える影響は極めて少ないと考えられる。これらに対して (5) は最も有力である。なぜなら方解石中の流体包有物は温度上昇に伴う内圧の変化によりストレッチングが起こりやすく、そのため密度が低下して均質化温度が上がり、捕獲時の温度は改変され最高被熱時の温度を記録しがちであるからである (Goldstein, 1986; Prezbindowski and Larese, 1987; Barker and Goldstein, 1990)。

温度上昇に伴う流体包有物のストレッチングの一因として熱水の流入が考えられる。熱水変質で形成された粘土鉱物のほとんどがスメクタイト・緑泥石混合層鉱物であること、及び断層帯からメランジュに向かって伸びる鉱物脈中に濁沸石が認められることから、熱水の温度は 130–150 °C であると考えられる。この場合、熱水の温度は断層周囲の最高被熱温度と同程度であり、150 °C を大きく越えて 300 °C 以上にまで達する均質化温度について説明できない。

伸張性角礫岩がウルトラカタクレーサイトに取り囲まれていること (図 6c)、伸張性ジョグ内に限らずウルトラカタクレーサイト中の方解石破砕物には気液比の大きい流体包有物が特徴的に認められること (図 8a, b) を考慮すると、摩擦熱による温度上昇が流体包有物のストレッチングの有力な候補としてあげられる。方解石の場合、流体包有物のストレッチングは、均質化温度より 50 °C 以上オーバーヒーティングさせると瞬時に生じることが実験で証明されている (Prezbindowski and Larese, 1987; 高木ほか, 2001)。我々の方解石を用いた実験でも 100 °C または 125 °C オーバーヒーティングさせると均質化温度が大幅に上昇し、図 7 に示されたような高温側の均質化温度分布を説明しうることが実証された (図 8c, d)。一方、高木ほか (2001) も指摘しているように 150 °C 以上オーバーヒーティングさせると、方解石中の流体包有物のほとんどがデクレビテーションまたは流体のリークを起こした。

以上のことから極端に幅広い均質化温度分布を持つ成因として、摩擦熱による温度上昇に伴って流体包有物がストレッチングを起こしたことがあ

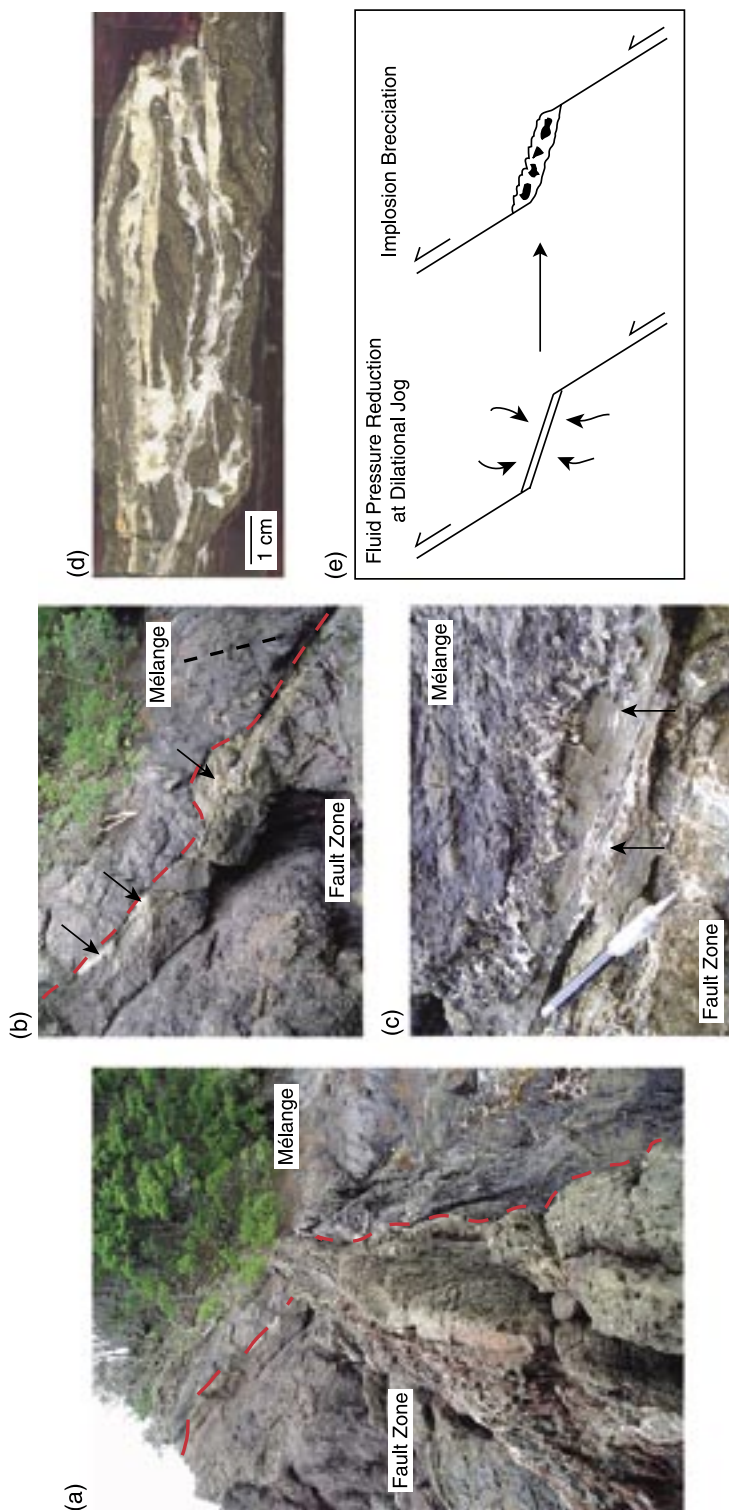


図 6 (a) 断層面の傾斜角変化。赤破線は断層帯とメランジュの境界で、傾斜角が  $40^{\circ}$  以上変化する。(b) 中角度で傾斜する断層のクローズアップ写真。赤破線は断層帯とメランジュの境界。矢印はマトリックスに取り囲まれた伸張性角礫岩（矢印）。(c) 伸張性角礫岩の内部組織。ウルトラカタクレーサイトの方向。(d) ウルトラカタクレーサイトに取り込まれた伸張性角礫岩（矢印）。(e) 伸張性角礫岩の内部組織。ウルトラカタクレーサイトに取り込まれた産状を呈しており、すべりが同じ場所でも伸張性角礫岩に取り込まれたことを示している。(e) スラストにおける伸張性ジョグと implosion brecciation の発達を示した模式図。現在の断層の傾斜はほぼ垂直であるが、もともとは図 1c に示してあるように中角度であったと考えられ、伸張性ジョグはほぼ水平であったと考えられる。

Fig. 6 (a) Changes in dips of the fault surface from subvertical to moderate dipping. Red dashed lines indicate the boundary between the fault zone and mélange. (b) Close-up view of the moderately dipping fault. Red dashed line indicates the boundary between the fault zone and mélange. Black dashed line indicates the orientation of foliation ( pressure solution cleavage ) in the mélange. Arrows indicate the dilation breccias of angular fragments included in the calcite matrix. (c) Dilation breccias ( arrows ) suspended in the ultrataclasite. (d) Internal texture of the dilation breccia. The angular fragments in the calcite matrix were made of the ultrataclasite that surrounds the dilation breccia, demonstrating the repetition of attrition and implosion brecciations. (e) Schematic diagram showing the appearance of dilatational jog and implosion brecciation in a thrust fault system. The original attitude of the fault was not vertical, but dipped moderately ( Fig. 1c ), thus, the dilatational jog was subhorizontal.

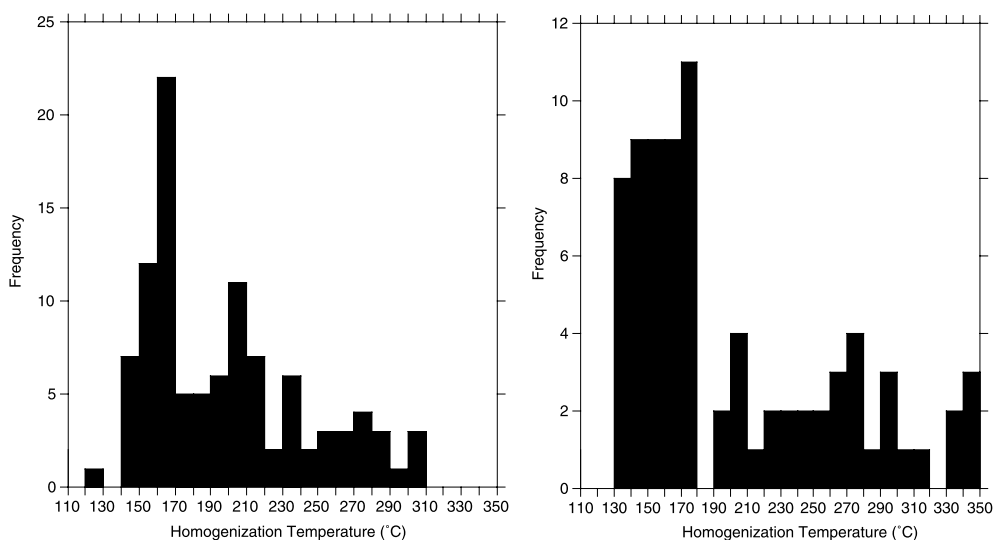


図 7 伸張性角礫岩の方解石マトリックスにおける流体包有物の均質化温度分布. 2つの例を示す.

Fig. 7 Representative histograms of homogenization temperatures of aqueous fluid inclusions from the calcite matrix of dilation breccias. Two examples are shown.

げられ、その際の温度上昇量は 50 150 °C であったと考えられる。

#### IV. 過去のプレート境界断層に記録された地震サイクル

断層帯最上部と最下部では、断層帯からメランジュに向かって伸びる鉱物脈とウルトラカタクレーサイトが互いに切断関係にあり（図 4c, d）、伸張性ジョグではウルトラカタクレーサイトが角礫として伸張性角礫岩中に取り込まれ、更に伸張性角礫岩がウルトラカタクレーサイト中に取り込まれた産状を示す（図 6c, d）。この鉱物脈、ウルトラカタクレーサイト、伸張性角礫岩が示す繰り返し変形は何を意味するのであろうか？

鉱物脈は伸張性割れ目起源のものが卓越し、断層帯からメランジュに向かって先細りする幾何学的形態を示すこと、及び断層帯最上部と最下部のウルトラカタクレーサイト沿いに変質が進んでいることから（図 3）、断層帯最上部と最下部で高間隙水圧が発生し、それにより断層帯直上、直下のメランジュが水圧破碎したと考えられる。ただし、ウルトラカタクレーサイトと鉱物脈の方位は

互いに直交することから（図 5b, c）、その際の最大主応力の方位は、ウルトラカタクレーサイトの傾斜方向とほぼ平行であったと考えられる。

一方、ウルトラカタクレーサイトの分布が示す局所化したすべり（図 3）、伸張性ジョグ形成に伴う implosion breccias の形成（図 6）、ウルトラカタクレーサイトの注入構造や玄武岩起源のウルトラカタクレーサイトとメランジュ起源のカタクレーサイトの混合などの流動化による変形（図 4b, c）は、地震時に特有のものであると考えられている（Sibson, 1987; Marone, 1998; Chester and Chester, 1998）。これらのことから断層帯で見出された繰り返し変形は、沈み込み帯における地震サイクルを反映していると解釈され、地震間では断層帯で高間隙水圧が発生していたと考えられる。

Implosion breccias の存在やウルトラカタクレーサイトの流動化は地震時に流体が存在したことを示しているが、破壊時の役割は大きく異なる。Implosion breccias は伸張性ジョグにおいて破壊時にダイレイタンスが生じて間隙水圧が大きく減少することで形成されるため、破壊伝播を

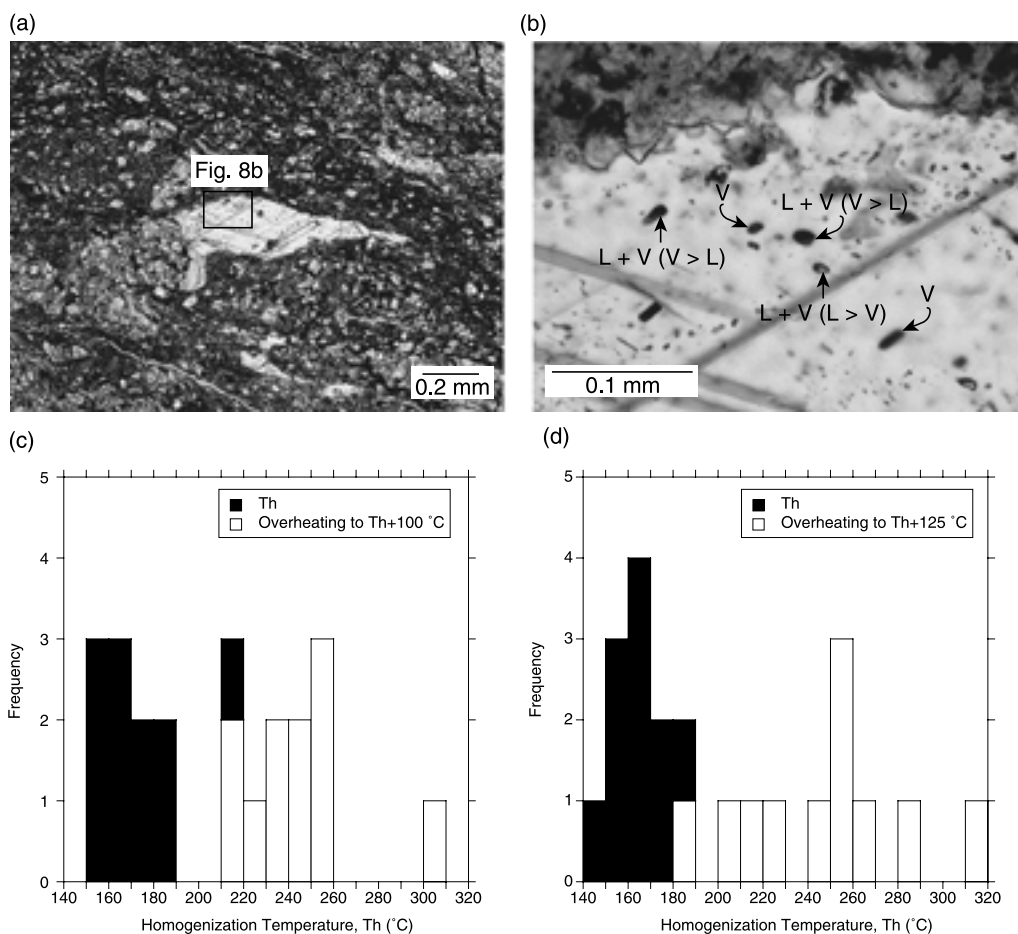


図 8 (a) ウルトラカタクレーサイト中の方解石破砕物。(b) 方解石破砕物中の流体包有物。気相のみの包有物、気相に富む包有物、液相に富む包有物が共存する。写真の撮影場所については図 8a を参照。(c) 方解石中の流体包有物を 100 °C オーバーヒートさせた前後での均質化温度の比較。(d) 125 °C オーバーヒートさせた前後での均質化温度の比較。

Fig. 8 (a) Calcite fragment in the ultracataclasite. (b) Fluid inclusions in the calcite fragment showing widely varying vapor/liquid ratios. The location of this microphotograph is shown in Fig. 8a. (c) and (d) Comparison of the homogenization temperatures before and after the overheating experiments.

抑制・停止させると考えられる (Sibson, 1985)。しかし、破壊は小さいステップを乗り越え、大きなステップで停止する傾向にあること (Wesnousky, 1988; Harris and Day, 1999) 及び今回見出された断層のステップ幅はただか数 10 m のオーダーであることを考慮すると、今回見出された implosion breccias が破壊伝播の抑制・停止に貢献したか評価することは難しい。少なくとも

破壊時に急激な間隙水圧減少があったことは言及できるのであろう。

一方、ウルトラカタクレーサイトの流動化による変形は断層の傾斜変化に関係なく認められ、ウルトラカタクレーサイトに含有される方解石の流体包有物の一部は摩擦熱による 50–150 °C の温度上昇に伴ってストレッチングしていると考えられる (図 7, 図 8)。ウルトラカタクレーサイト中に

流体が存在していたとすると、これらの特徴は地震時のせん断によってウルトラカタクレーサイト化する際に、摩擦熱の発生に伴う温度上昇によって間隙水圧が増加し、それによりウルトラカタクレーサイトが流動化して断層の強度低下を引き起こし、断層の傾斜変化に関係なく破壊伝播を促進させたことを示唆する。断層における摩擦熱による間隙水圧上昇は透水率が  $10^{-18} \text{ m}^2$  以下の場合有効に機能するとされている (Lachenbruch, 1980; Mase and Smith, 1987)。Kato *et al.* (2004) によれば、地震発生帯条件下での四万十付加体における断層帯の透水率は  $10^{-18} \text{ m}^2$  以下で、また断層帯周囲の割れ目も破壊時には方解石や濁沸石などの鉱物によりシールされていたと考えられることから、摩擦熱による間隙水圧上昇は十分起こり得るであろう。

ウルトラカタクレーサイトとは対照的に面状カタクレーサイトは局所化した分布を示しておらず、断層帯において最も厚く発達する (図 3)。面状カタクレーサイトでは破碎流動によって破碎岩片や粘土鉱物が回転・配列し、複合面構造に沿ってせん断が分配されている (図 4a)。面状カタクレーサイトとウルトラカタクレーサイト、鉱物脈との切断関係は明らかではないが、面状カタクレーサイトが示す分配したせん断変形は安定すべりの挙動を示唆しており (Ruina, 1983; Marone, 1998)、地震間の変形に対応していると解釈される。

#### V. 付加体先端部から地震発生深度にかけてのプレート境界断層の発達プロセス

南海トラフにおける ODP 掘削とモデリング結果に基づくと、付加体先端部から地震発生帯上限にかけてのプレート境界断層では、未圧密な沈み込み堆積物と含水鉱物からの脱水に起因して過剰間隙水圧が発生していると考えられ、非地震性プレート境界を構成していると考えられる。三次元反射法地震波探査結果は、過剰間隙水圧の消散が地震性プレート境界への変化とプレート境界断層のステップダウンをもたらすとしている (Bangs *et al.*, 2004)。しかし、四万十付加体における過

去のプレート境界域の観察結果は、地震性プレート境界への変化がそう単純ではないことを示している。沈み込みに伴って発達したメランジュは、間隙水の排水後プレート境界断層がステップダウンする以前に、圧力溶解による変形を受けて完全に固化した状態の岩石に変化している。これによりプレート境界断層周辺の岩石は弾性歪みエネルギーを蓄えることが可能になるであろう。つまり、過剰間隙水圧の消散だけでなく圧力溶解による岩石化の進行が地震性プレート境界への変化に不可欠であると考えられる。また本論文では触れなかったが、プレート境界域の岩石に頻繁に認められる方解石や石英などによるセメント作用 (Sample, 1990; Moore and Saffer, 2001) も沈み込み物質を固化させ弾性歪みエネルギーを蓄えるうえで不可欠であろう。

四万十付加体における過去のプレート境界断層の研究により、地震発生帯上部に相当する温度・深度条件においても流体はプレート境界に沿って存在し、高間隙水圧を発生させて断層強度を下げていたことが示された。これはプレート境界断層がステップダウンしてデュープレックス構造を形成して沈み込み物質を底付け付加させるのに適していたであろう。つまり必ずしも過剰間隙水圧の消散がプレート境界断層のステップダウンをもたらすわけではない。断層帯の厚さは 20 m ほどであり、実際に流体をトラップしている部分の厚さは更に薄いと考えられるので、反射法地震波探査でイメージされず流体が流失して間隙水圧が消散したと解釈される可能性がある。

高間隙水圧により有効圧が低下した断層は速度強化の挙動を示す傾向にあることを考慮すると (Marone and Scholz, 1988)、今回四万十付加体で見出された高間隙水圧プレート境界断層における地震発生ポテンシャルは低いと考えられる。しかし、一方で地震サイクルに相当すると解釈される繰り返し変形を記録しており、地震時の特徴として伸張性ジョグ形成時のダイレイタンスに伴う間隙水圧減少や摩擦熱による間隙水圧上昇に伴う破壊域拡大が示唆された。これらのことから、地震発生帯上部に相当する温度・深度での高間隙

水圧プレート境界断層は、不安定性の発生には適さないが、不安定性の伝播は及んでいたと考えられる。

## VI. ま と め

本論文では、ODP による南海トラフ付加体先端部の掘削と四万十付加体における断層岩研究をもとに、プレート境界断層が海溝から地震発生深度にかけて発達する際の流体挙動について述べた。付加体先端部では、流体で充填された dilatant fractures と未圧密な沈み込み堆積物によりそれぞれプレート境界断層内部と下位で過剰間隙水圧が発生している。流体で充填された dilatant fractures は、プレート境界断層の圧密を伴った変形後に、間隙水圧が増加して断層内部が過圧密状態になった際のせん断に対応して形成されたと考えられる。一方、沈み込み堆積物の未圧密状態は、海溝充填タービダイトの堆積や付加体発達により急激に増加した上載圧と半遠洋性堆積物の低い透水性に起因しており、これにプレート境界断層の圧密を伴った変形による断層シール効果が加わっていると考えられる。過剰間隙水圧状態のプレート境界断層は、付加体と沈み込み堆積物の間の応力・歪みの不連続面として陸側 35 km、深度 3 4 km にまで追跡することができ、非地震性プレート境界を構成している。

四万十付加体における過去のプレート境界域の観察結果に基づく、沈み込み堆積物は、間隙水の排水後、圧力溶解や続成作用に伴うセメント作用によって岩石化が進行しており、これによりはじめて弾性歪みエネルギーを蓄えることが可能になると考えられる。一方で、流体は地震発生深度上部においてもプレート境界断層に沿って局所化して存在しており、高間隙水圧を発生させて断層強度を下げていたことが示唆される。これはプレート境界断層のステップダウンとそれに伴う沈み込み物質の底付け付加を促進させるであろう。高間隙水圧プレート境界断層では、地震サイクルを反映していると考えられる繰り返し変形が記録されており、地震時の変形を示す候補として、implosion breccias, ウルトラカタクレサイト

の流動化、流体包有物のストレッチングが挙げられる。このうち前者は伸張性ジョグ形成時のダイレイタンスーによる間隙水圧低下を示すのに対し、後 2 者は摩擦熱による間隙水圧上昇に伴う断層の動的弱化を示唆しており、海溝側への破壊域拡大を反映している可能性がある。

## 謝 辞

本研究は、平成 17 年度科学研究費補助金 基盤研究 B (課題番号: 17340152) によって行った。福岡大学の田口幸洋教授、海洋研究開発機構の堀 高嶺博士には有益な議論をして頂いた。2 名の査読者には有益なコメントを頂いた。記して感謝致します。

## 文 献

- Bangs, N.L., Shipley, T.H., Gulick, S.P.S., Moore, G.F., Kuramoto, S. and Nakamura, Y. (2004) Evolution of the Nankai Trough décollement from the trench into the seismogenic zone: Inferences from three-dimensional seismic reflection imaging. *Geology*, **32**, 273–276.
- Barker, C.L. and Goldstein, R.H. (1990) Fluid-inclusion technique for determining maximum temperature in calcite and its comparison to the vitrinite reflectance geothermometer. *Geology*, **18**, 1003–1006.
- Chester, F.M. and Chester, J.S. (1998) Ultracataclastic structure and friction processes of the Punchbowl fault, San Andreas system, California. *Tectonophysics*, **295**, 199–221.
- Goldstein, R.H. (1986) Reequilibration of fluid inclusions in low-temperature calcium-carbonate cement. *Geology*, **14**, 792–795.
- Harris, R.A. and Day, S.M. (1999) Dynamic 3D simulations of earthquakes on en echelon faults. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2089–2092.
- 星野一男 (1978): 圧密の進行と機構について. 地質学論集, **15**, 15–34.
- Ikesawa, E., Kimura, G., Sato, K., Ohmori-Ikehara, K., Kitamura, Y., Yamaguchi, A., Ujiie, K. and Hashimoto, Y. (2005) Tectonic incorporation of the upper part of oceanic crust to overriding plate of a convergent margin: An example from the Cretaceous-early Tertiary Mugé Mélange, the Shimanto Belt, Japan. *Tectonophysics*, **401**, 217–230.
- Kato A., Sakaguchi, A., Yoshida, S., Yamaguchi, H. and Kaneda, Y. (2004) Permeability structure around an ancient exhumed subduction-zone fault. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06602, doi:10.1029/2003GL019183.
- Kimura, G. and Mukai, A. (1991) Underplated units in an accretionary complex: Melange of the Shi-

- manto Belt of eastern Shikoku, southwest Japan. *Tectonics*, **10**, 31–50.
- Lachenbruch, A.H. (1980) Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion. *J. Geophys. Res.*, **85**, 6097–6112.
- Marone, C. (1998) Laboratory-derived friction constitutive laws and their application to seismic faulting. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **26**, 643–696.
- Marone, C.J. and Scholz, C.H. (1988) The depth of seismic faulting and upper transition from stable to unstable slip regimes. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 621–624.
- Mase, C.W. and Smith, L. (1987) Effects of frictional heating on the thermal, hydrologic, and mechanical response of a fault. *J. Geophys. Res.*, **92**, 6249–6272.
- Matsumura, M., Hashimoto, Y., Kimura, G., Ohmori-Ikehara, K., Enjohji, M. and Ikesawa, E. (2003) Depth of oceanic-crust underplating in a subduction zone: Inferences from fluid-inclusion analyses of crack-seal veins. *Geology*, **31**, 1005–1008.
- Mikada, H., Becker, K., Moore, J.C., Klaus, A., et al. (2002) *Proc. ODP, Init. Repts.*, **196** [CD-ROM] Ocean Drilling Program, Texas A&M Univ., College Station, Tx.
- Moore, J.C. and Saffer, D.M. (2001) Updip limit of the seismogenic zone beneath the accretionary prism of southwest Japan: An effect of diagenetic to low-grade metamorphic processes and increasing effective stress. *Geology*, **29**, 183–186.
- O'Neil, J.R., Clayton, R.N. and Mayeda, T.K. (1969) Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *J. Chem. Phys.*, **51**, 5547–5558.
- Prezbindowski, D.R. and Larese, R.E. (1987) Experimental stretching of fluid inclusions in calcite: Implications for diagenetic studies. *Geology*, **15**, 333–336.
- Ruina, A.L. (1983) Slip instability and state variable friction laws. *J. Geophys. Res.*, **88**, 10359–10370.
- Saffer, D.M. and Bekins, B.A. (1998) Episodic fluid flow in the Nankai accretionary complex: Timescale, geochemistry, flow rates, and fluid budget. *J. Geophys. Res.*, **103**, 30351–30370.
- Saffer, D.M., Silver, E.A., Fisher, A.T., Tobin, H. and Moran, K. (2000) Inferred pore pressures at the Costa Rica subduction zone: Implication for dewatering. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **177**, 193–207.
- Sample, J.S. (1990) The effect of carbonate cementation of underthrust sediments on deformation styles during underplating. *J. Geophys. Res.*, **95**, 9111–9121.
- Screaton, E., Saffer, D., Henry, P., Hunze, S. and Ocean Drilling Program Leg 190 Shipboard Science Party (2002) Porosity loss within the underthrust sediments of the Nankai accretionary complex: Implications for overpressures. *Geology*, **20**, 19–22.
- Sibson, R.H. (1985) Stopping of earthquake ruptures at dilational fault jogs. *Nature*, **316**, 248–251.
- Sibson, R.H. (1986) Brecciation processes in fault zones. *Pure Appl. Geophys.*, **124**, 159–175.
- Sibson, R.H. (1987) Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. *Geology*, **15**, 701–704.
- Spinelli, G.A., Mozley, P., Underwood, M. and Tobin, H. (2004) Opal diagenesis and sediments properties in the Nankai Trough, Japan. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **85**, 1256.
- Taira, A., Hill, I., Firth, J., et al. (1992) Sediment deformation and hydrogeology of the Nankai Trough accretionary prism: Synthesis of shipboard results of ODP Leg 131. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **109**, 431–450.
- 高木 博・前田俊一・藤野敏雄・真田和之・林 正雄・田口幸洋・堀越孝昌・村岡洋文 (2001) 流体包有物均質化温度のオーバーヒーティングに関する実験的研究. 日本地熱学会誌, **23**, 263–272.
- Ujiie, K. (2002) Evolution and kinematics of an ancient décollement zone, mélange in the Shimanto accretionary complex of Okinawa Island, Ryukyu Arc. *J. Struct. Geol.*, **24**, 937–952.
- Ujiie, K., Hisamitsu, T. and Taira, A. (2003) Deformation and fluid pressure variation during initiation and evolution of the plate boundary décollement zone in the Nankai accretionary prism. *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2002JB002314.
- Ujiie, K., Maltman, A.J. and Sánchez-Gómez, M. (2004) Origin of deformation bands in argillaceous sediments at the toe of the Nankai accretionary prism, southwest Japan. *J. Struct. Geol.*, **26**, 221–231.
- Wesnousky, S.G. (1988) Seismological and structural evolution of strike-slip faults. *Nature*, **335**, 340–343.
- Yamaguchi, A., Ujiie, K. and Kimura, G. (2005) Variations in fluid pressure and fluid source near the updip limit of the seismogenic zone: An example from the Shimanto accretionary complex, southwest Japan. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **86**, 1420.

(2006年1月6日受付, 2006年4月3日受理)