四万十付加体興津メランジュの震源断層の特徴と 流体移動に伴うセメンテーションによる 固着すべりのアナログ実験

坂 口 有 人*

Observation of the Seismogenic Fault in the Okitsu Melange, Shimanto Accretionary Complex and Stick Slip of Mineral Cementation of Shear Experiment

Arito SAKAGUCHI *

Abstract

The seismogenic fault in the Okitsu Melange, Shimanto accretionary complex, Shikoku is characterized by repeated rapid slips with a pseudotachylite formation and a concentration of vein minerals. The Okitsu Melange is composed of duplex structure of imbricated oceanic stratigraphic sequence, and the seismogenic fault is emplaced at the roof thrust of the duplex structure. Comparable fault along the seismogenic roof thrust of the duplex structure was found at the present Nankai trough, and vein mineral precipitation is expected from the fluid flow along the fault.

Some of the clasts of cataclacite were supported by a vein mineral matrix of euhedral ankerite and quartz crystals. This occurrence of vein minerals may indicate rapid precipitation due to fluid flow of super saturation with vein minerals along the fault zone. The shear strengthening with time and the stick slips were recognized by the block-slider analogue experiments which consisted of the chilled slid with ice and hot water saturated with alum on the shear surface. The result of the experiment indicates that the vein mineral precipitation make stick slip the fault.

Key words : subduction zone, pseudotachylite, alum, stick slip

キーワード: 沈み込み帯, シュードタキライト, ミョウバン, 固着すべり

I. はじめに

巨大地震の多くがプレート沈み込み帯で発生しているにもかかわらず (Sholtz, 1990; ショルツ, 1993), 海溝型震源断層の断層岩の地質学的分析

がほとんどなされてこなかったのは, その陸上露頭が未発見であったことに起因してきた。近年になり, 現世の南海トラフの地殻熱流量は非常に高いこと (Yamano *et al.*, 1984; Ashi and Taira, 1993 など), 南海, 東南海地震の震源領域の温度

* 海洋科学技術センター固体地球統合フロンティア研究システム

* IFREE, Japan Marine Science & Technology Center

条件がおおよそ 150 ~ 300℃ であることが示されるようになった (Hyndman *et al.*, 1993)。一方で、南海付加体の陸上延長である四万十帯の温度圧力条件の定量化も進められ (Sakaguchi, 1996, 1999; Ohmori *et al.*, 1997), 低い場所でも被熱温度は 150℃ に達することが明らかになってきた。そのため過去の海溝型震源断層が四万十帯のどこかに存在することが指摘されるようになり (木村, 1997; 狩野, 1999), 四国西部の興津メランジュでプレート沈み込み作用に伴うシュードタキライトが世界で初めて報告されるに至った (Ikesawa *et al.*, 2003)。本論では、この興津メランジュに産する震源断層の特徴を述べるとともに、この断層露頭から推定される断層の固着メカニズムと簡単なアナログ実験を紹介する。

II. 地質概要

西南日本外帯に位置する四万十帯は、その年代、構造、温度圧力条件などが世界でも最も詳細に調査されている付加体の一つである。四万十帯は北を仏像構造線でジュラ系付加体の秩父帯と接しており、北から白亜系ユニットと第三系ユニットから構成されている。秩父帯南部から含めて、全体的に北から南へと若くなる年代特性を持ち、四国西部では白亜系ユニットは北から下部白亜系の新莊川層群と上部白亜系の大正層群。第三系ユニットも同じく北から始新統の幡多層群と中新統の菜生層群から構成される。四万十帯の大半は砂岩泥岩互層からなるタービダイトの海溝充填堆積体であるが、その一部に、浅海性の被覆堆積体や地質図スケールの剪断帯であるメランジュが挟み込まれるように分布し、そこには海洋地殻の破片がブロック状に産する。四国西部の大正層群には横波、久礼、興津の 3 帯のメランジュ層が分布し、いずれも剪断された黒色頁岩中に玄武岩、チャート、多色頁岩、陸源性碎屑岩の岩体をブロック状に含むことで特徴づけられ、それぞれのメランジュ毎に微化石年代に基づいて付加当時の海洋底層序が復元されている (Taira *et al.*, 1988)。これに基づく玄武岩の噴出から海溝に到達するまでの時間は、秩父帯から四万十帯の南端にかけて徐々に短

くなっていき、チャートに乏しい興津メランジュが付加する頃には 10 Ma 以下にまで小さくなったと指摘されている (Taira *et al.*, 1988)。また、興津メランジュと同じゾーンのメランジュである四国東部の牟岐メランジュおよび九州東部の横峰層の玄武岩体の微量元素分析は、これが典型的な海嶺起源の玄武岩であることを示しており (君波ほか, 1992), 白亜紀最後期の四万十帯には、日本列島に海嶺が近づき、きわめて若いプレートが沈み込んでいたことを示している (Taira *et al.*, 1988; 君波ほか, 1992)。

四国四万十帯の熱構造は、ジルコンやアパタイトのフィッシュトラック法、石炭の熟成度指標の一つであるビトリナイト反射率、イライトの結晶度、鉱物脈中の流体包有物分析などによって報告されている (坂口ほか, 1992; Hasebe *et al.*, 1993; Tagami *et al.*, 1995; Ohmori *et al.*, 1997)。その結果、低温の部分でさえ約 150℃ 以上あり、一般にメランジュ相と海溝充填堆積体および被覆堆積体といった岩相による違いはあまり反映されない。例えばフィッシュトラック熟年代法分析でも、白亜紀前期から後期までのユニット全体が約 70 Ma のジルコン FT 年代を示し、第三紀のユニットも約 10 Ma のアパタイト FT 年代が岩相や年代の違いを越える特有の傾向として報告されている (Hasebe *et al.*, 1993; Tagami *et al.*, 1995)。またビトリナイト反射率による熱構造解析では、岩相や付加年代差を超えて、北から南への単純な増加と特定の断層によって急低下するという鋸の刃のような傾向を繰り返すことで特徴づけられ、浅海堆積体でさえ 150 ~ 200℃ という高い温度を受けていることが示された (坂口ほか, 1992)。地質構造に依存せず、しかも浅海堆積物までが高温であったという特徴から、熱構造は付加体定置後の熱的イベントによって形成されたのではないかと解釈された。加えて鉱物脈中の流体包有物の分析がなされ、包有物中の流体の密度とビトリナイト反射率による母岩の最高被熱温度との間に相関関係があることが示された。流体密度は温度と圧力の関数で表現されることから、ビトリナイト反射率による母岩の最高温度を流体温

度の上限とすることで流体圧が求められ、当時の地温勾配が約 50 °C/km 以上であったと推測された。そして高地温勾配の原因としては、白亜紀最後期から始新世にかけての若いプレートの沈み込みによるものではないかと提案された (Sakaguchi, 1996; Sakaguchi, 1999)。

一般にメランジュと周辺層との間に顕著な温度差は認められないが、若いプレートの沈み込みに伴って形成された興津メランジュのみは、周辺層よりもとりわけ高い温度を受けたことを示している。ビトリナイト反射率に基づく分析では、興津メランジュを挟む南北のユニットである野々川層と中村層がそれぞれ約 230 ($\pm$ 30) °C とほぼ同程度の温度を受けたのに対して、その間の興津メランジュのみが約 270 ($\pm$ 30) °C と高温であったことが示されている (Sakaguchi, 1996)。そして、興津メランジュの中でもとりわけ北の境界断層付近においてイライト結晶度が最も高いことが認められている (Sakaguchi *et al.*, submitted)。詳細は後述するが、この断層付近は鉱物脈の濃集帯が卓越しており、特に断層沿いに一段と高温の熱水が存在していた可能性が高い。そしてこの断層帯にはシュードタキライトが産し、付加体における最初の発見として報告された (Ikesawa *et al.*, 2003)。上記のように、この断層が形成された当時の地殻熱流量は非常に高かったと推測され (Sakaguchi, 1996)、それは若い四国海盆の沈み込みの影響で、トラフ底で 110 ~ 130 mW/m² もの高熱流量が観測されている現世南海トラフ (Yamano *et al.*, 1984; Taira *et al.*, 1991) と類似の温度環境であるため、南海トラフ震源断層と対比可能な断層帯と考えられる。

III. テクトニックセッティング

興津メランジュは白亜系四万十帯の他のメランジュと比較して黒色頁岩と玄武岩が卓越し、チャートなど遠洋性岩が乏しいことで特徴づけられる。黒色頁岩には若干の凝灰岩層や砂岩層がレンズ状に含まれるが、地層は一般に分断されて連続性が良くない。しかしながら地質図スケールでは、玄武岩層や黒色頁岩優勢の部層は側方に連続

的に追跡可能である。これは、もとの層序は分断され一見破壊されているが、大局的には沈み込む以前の海洋底層序の順番を保存しており、メランジュの内部構造を推定する上での重要な鍵層となりうる。

詳細な地質構造調査によると、玄武岩層は側方に連続しており、これを元にメランジュ内部の地質構造を描くと、厚さ数 10 m ~ 数 100 m の海洋底層序が少なくとも 5 回覆瓦状に繰り返される様子が描き出される (図 1) (Sakaguchi *et al.*, 2003)。これはいわゆるデュープレックス構造であり、底付けされた付加体で典型的に見られる (村田, 1991; Hashimoto and Kimura, 1999 など)。そして衝上断層に囲まれたそれぞれの海洋底層序の層はデュープレックス構造のホースと呼ばれ (Bopyer and Elliott, 1982)、その位置関係から覆瓦状構造の上下を成すルーフおよびフロア衝上断層の変位量とセンスをある程度推定することができる。このメランジュのデュープレックス構造の場合、その形態から断層の変位量はホースの長さよりも短い後背地傾斜デュープレックス (Bopyer and Elliott, 1982; 狩野・村田, 1998) と分類することができ、地質図上で左横ずれセンスを示す (図 1)。

興津メランジュの北の境界断層である、デュープレックス構造のルーフ衝上断層には多くのスリッケンラインや S-C 構造状の変形構造が数多く見られ、それらから求められた剪断面の平均方位は N55E80N とメランジュの面構造の平均方位 N55E70N とほぼ平行であり、運動センスは 20E40N のやや東プランジの衝上センスを示す (図 1)。メランジュの剪断センスと断層帯のそれが矛盾しないことから、この断層帯が沈み込み作用に伴って形成されたものであると解釈できる。デュープレックス構造が地質図上で左横ずれセンスに見えることは、剪断センスが若干の東プランジであることから、地質体全体がメランジュおよび断層形成後の隆起過程においてやや西に横倒しになって露出しているためであると説明しうる (Sakaguchi *et al.*, 2003)。すなわちシュードタキライトを含む震源断層は、付加体の底付け作用

図 2 (a) 震源断層の露頭写真。断層は下盤の興津メランジュと上盤の野々川層との間に発達しており、シュードタキライトと鉱物脈が濃集することで特徴づけられる。鉱物脈は石英とアンケライトから成る。アンケライトがより多く発達する部分は、風化作用によって露頭が赤茶けて見える。
 (b) 鉱物脈およびシュードタキライト脈 (ps) は圧力溶解変形を被り、S-C 状構造が発達している。
 (c) 古いシュードタキライトは鉱物脈と共にインターサイスマットの圧力溶解変形を受けており、それを新しいシュードタキライト注入脈が切る。断層の高速剪断が繰り返し生じていたことを示す。
 (d) S-C 状構造を成す鉱物脈には、スタイロライトフォリエーションが発達しており、圧力溶解作用で変形を受けたことを示している。

Fig. 2 The seismogenic fault occurred between the hanging wall of the Nonokawa Formation and the foot wall of the Okitsu Melanges.

The fault zone is characterized by the concentration of pseudotachylyte and vein minerals of quartz and ankerites (a). Vein minerals and pseudotachylytes (ps) suffered interseismic deformation with S-C fabrics (b). Older pseudotachylytes are cut by newer ones, meaning faulting repeated (c). Stylolite foliation and amoeboidal shape of grains indicate the development of pressure solution creeping during interseismic period to make the S-C fabric (d).

図 1 興津メランジュの地質図。

海洋底層序が覆瓦状に重なりあうデュープレックス構造を成している。地質図スケールのデュープレックス構造は付加体の底付けユニットに特徴的な構造であり、震源断層はそのルーフ衝上断層に位置する。メランジュの劈開面とルーフ衝上断層の剪断面はほぼ平行である。断層帯中のS-C状構造の複合面組織による剪断センスと断層面上のスリッケンラインの方向はほとんど同じ方向を示し、若干の東ブランチだが、ほぼ傾斜方向の衝上断層である。

Fig. 1 Geologic map of the Okitsu Melange composed of a duplex structure of a imbricated oceanic stratigraphic sequences.

The seismogenic fault is placed along the roof thrust of the duplex structure. Asymmetric deformation fabric analysis shows that the sense of shear of the fault zone is similar to the sense of the fabric within the melange unit. Faulting was probably concurrent with the stage of duplexing of the Okitsu Melange.

に伴うデュープレックス構造のルーフ衝上断層に発達したと結論づけられる。

IV. 震源断層の特徴

シュードタキライトを含む震源断層は、調査地域東端の海岸に幅 5 ～ 6 m 長さ 30 m にわたって非常に良い露出を示す。断層帯はデュープレックス構造のルーフ衝上断層の玄武岩層沿いに発達しており、石英やアンケライト脈が多産する。特に鉄・マンガンに富むドロマイトであるアンケライト脈の風化のために露頭全体が赤茶けた様相を呈する (図 2a)。断層帯中には幅約 20 ～ 30 cm 程度の特に強く剪断され (図 2b)、かつ鉱物脈が濃集している強変形帯が少なくとも 4 層は発達しており、互いに分岐・融合して産し、全体としては幅 5 ～ 6 m になる。そういった強変形帯にシュードタキライトは産し、古いシュードタキライトや鉱物脈は、相対的に新しいシュードタキライトに切られている (図 2d)。断層帯の変形は全体的には上位に向かって徐々に弱くなる片翼状の非対称構造を示し、シュードタキライトは最下位の変形集中帯に産する (図 3)。これら変形集中帯が稠密に産する断層帯の上位の野々川層内にも数本の破碎帯が発達しており、これらの断層群まで含めて震源断層のダメージゾーンとすると、その厚さは約 30 m になる (図 4)。

断層中の強変形帯は、濃集した鉱物脈と岩片およびシュードタキライトが S-C 状構造を持つことで特徴付けられる。S-C 状に変形した岩石は鏡下では個々の粒子境界が互いに食い込み、粒界拡散現象の進行に伴って不溶性物質が縫合線状に濃集するスタイロライトフォリエーションがいたる所に見られ、圧力溶解機構による変形を受けたことがわかる (図 2d)。一方で圧力溶解変形から免れていた鉱物脈も産し (図 5a)、シュードタキライト形成と交互に鉱物脈の沈澱が生じたことがわかる (図 5b)。一部の石英結晶の成長面上には、微小なアンケライト結晶が含まれており (図 5c)、石英結晶の成長表面に石英と共にアンケライトが析出したことを示している。一方ではアンケライトが自形を持ち、その間隙に石英が析出した部分もあり

(図 5d)、両者が共沈したことを示す。溶解度が全く異なる鉱物が共沈した原因としては、流体の温度・圧力が急激に低下し、両鉱物に対する溶解能力が共に急低下したとすると考えやすい。

また一部には水圧破碎を示す産状や破碎後に脈鉱物によってセメントされたと考えられる鉱物脈も見られ (図 5a)、一部にはシュードタキライト脈の岩片がジグソーパズルテクスチャーを持ち、岩片はアンケライトによって支持されている産状を示すものもある (図 5b)。これはシュードタキライトが冷却固結後に水圧破碎され、岩片が流体によって運搬沈澱するよりも早くアンケライトおよび石英が沈澱して岩片が支持されたもので、鉱物脈の高速沈澱の証拠ではないかと解釈される。

以上のように、断層帯はイライト結晶度が高く、鉱物脈が多産することで特徴づけられる。そしてそこでは溶解度の異なる鉱物が共沈し、破碎物が脈結晶基質によって支持されている。これらの産状は、沈み込み帯深部から流体が上昇してきたと考えれば説明可能である。つまりシュードタキライト脈も水圧破碎を受けていることから、断層の高速運動とシュードタキライトの冷却後に断層破碎帯沿いに流体が十分に速い速度で深部から移動してきたとすると、母岩との間に熱平衡に達せず高温の熱水が断層浅部に存在しうるし、溶解度の異なる鉱物の共沈現象と多量の鉱物脈の形成も引き起こすことが可能であろう。

本断層のような底付けユニットのルーフ衝上断層における流体の存在は、南海トラフにおけるマルチチャンネル音波探査によっても報告されている。南海トラフの震源領域における詳細なイメージング結果によると、1946 年の南海地震の震源領域では、南海トラフ付加体のデコルマ帯がステップダウンするとともに底付け作用が始まっている。そしてデコルマ帯上位の底付けユニットのルーフ衝上断層に強い音響反斜面が認められており、Deep Strong Reflector (DSR) と呼ばれている (Park *et al.*, 2002)。この DSR は音響特性が負であり、走向方向にも不連続でパッチ状に分布する特徴を持つ。これはルーフ衝上断層沿いの所々に音波速度が低速な領域、すなわち流体が存在して

図 3 断層露頭付近のルートマップ。

鉱物脈やシュードタキライトしている強剪断帯が幾重にも枝分かれしながら発達するゾーンが幅約 5-6 m あり、その上位には幅 10 数 cm 程度の破砕帯が何層か発達し、全体としては 30 m 程度の断層帯となる。変形は下位ほど強く、最下部にシュードタキライトが良く発達する。

Fig. 3 Route map along the fault zone.

The fault zone, 30 m in thickness, is composed of a lower unit of high shear bands and an upper unit of weak deformation with some of breccia zones.

図 4 断層帯の柱状図。

Fig. 4 Column section of the fault zone.

いるためであると解釈されている (Park *et al.*, 2002)。これは震源領域における底付けユニットのルーフ衝上断層沿いに流体が存在しているという点で興津メランジュ震源断層の特徴と一致する。

V. 断層の固着モデルと簡単なアナログ実験

本論の興津メランジュの断層や南海トラフの DSR に限らず、断層沿いには流体が存在し、それによってインターサイズミックにおける破砕帯の固着が生じることは数多く報告されている (Evans and Chester, 1995; Wintch *et al.*, 1995; 藤本, 2002 など)。それは断層破砕帯が単に固結するという意味ばかりでなく、固着すべりを引き起こすか否かという、すべり挙動そのものにとっても重要な意味を持つであろうことが推測できる。

摩擦は接触表面上の微小な突起としてのアスペリティが互いに接触することによって生じ、摩擦強度は各接触エリアの剪断強度の総和によると説明されている (Borden and Tabor, 1950)。そしてこういった部分接触エリアの総面積が時間と共に増加すると仮定すれば、断層の強度回復を説明することができる。これは逆に言えば、高速で動いている場合には接触時間が短くなるため、摩擦

- 図 5 (a) 一部の鉱物脈濃集層は圧力溶解変形から免れており、水圧破碎組織が保持されている。鉱物脈はアンケライトと石英からなる。
- (b) 写真下部のシュードタキライト脈は、写真中央で水圧破碎によるジグソーパズル組織を有し、破碎されたシュードタキライトの岩片はアンケライト結晶によって支持されている。破碎岩片が運搬堆積するよりも早い速度で鉱物脈が析出したと考えられる。
- (c) 写真 b 左上の石英 (QZ) の拡大写真。石英の成長線に沿ってアンケライト (Ank) が取り込まれている。これは石英結晶の成長表面に石英と同時にアンケライトが析出していたと考えられる。取り込まれていたアンケライト結晶のサイズは石英外側ほど大きくなり、写真上部ではアンケライト優勢となっている。
- (d) 中には逆にアンケライトが自形をとり、その隙間に石英が析出している場合もある。これらのように石英とアンケライトは同時析出したことを示す。

Fig. 5 Some of the vein mineral preserves the fabric of hydrofracturing (a), and the pseudotachylyte of the black layer has a jigsaw puzzle texture (b).

The fragments are supported by matrix vein minerals, which perhaps indicates rapid precipitation of the vein mineral before fragments drop (b). Some of the ankerites are precipitated along the growth line of the quartz grain (c) and some of the quartz is precipitated between the ankerite grains (d). The quartz and ankerites are co-precipitated, although they differ in saturation ratio. This can be explained by the rapid fluid flow from deep along the fault rupture, which maintains the super saturation condition of the fluid.

強度の低下、すなわち速度弱化が生じる。そのため、このようなアスペリティが時間と共に増加することは、固着すべりを実現する上での必要条件

の一つである。そのような接触エリアの増加の機構としては、地下深部であるならばアスペリティの結晶塑性機構でイメージすることができ、部分

図 6 セメンテーションによる固着すべりのアナログ実験の模式図。

ブロックスライダモデルのすべり面に鉱物が沈澱するようにしたもの。ソリ、スプリング、糸巻きと水槽から構成される。水槽には溶液平衡状態のミョウバン溶液の温水を入れる。ソリには重りと氷水を入れ、剪断中にソリの下面にミョウバン結晶を沈澱させる。それによって固着時間による剪断強度の増加と固着すべり現象を観察することができる。

Fig. 6 The concept of the analogue experiment with a blockslider model with cementation mechanism. The slider and the springs are placed into hot saturated water with alum, and the saturation ratio changes with temperature. The alum is precipitated along the shear surface of the chilled slider. Cementation due to alum precipitation causes stick slip and strengthening with time.

的に接触しているアスペリティのみが徐々に変形し、互いに噛み合っていくので、接触エリアの総和を時間と共に増加させることができる。しかし、本断層の場合は結晶塑性機構が卓越するような温度領域を経験しておらず、鏡下においても断層岩が結晶塑性変形した痕跡は認められない。そのため結晶塑性機構で説明することはできない。ところが、塑性変形でなくとも圧力溶解作用（中谷, 2003 など）や部分的なセメンテーションでも同等の働きを期待することができる。断層沿いにおける鉱物脈の沈澱とそれに伴う部分的なセメンテーションが時間と共に進行し、セメンテーションエリアが増加するならば、剪断強度は時間と共に増加するであろう。脈結晶が沈澱して破碎帯をセメントして固着させるという現象は、断層帯の岩石化が進行することを意味するし、それが降伏強度を越えて破壊すれば剪断強度は大きく低下すると期待される。これは大きな速度弱化をもたらすということであると同時に、時間と共に強度回復を実現しうる。

剪断面上に脈鉱物が沈澱することによって、剪断強度が時間依存性を持つであろうこと、そして固着すべりを引き起こす様子は、例えば簡単なアナログ実験で観察することができる。実験装置は、いわゆるブロックスライダの実験装置を水槽内にセットして、水槽には溶液平衡状態のミョウバン溶液の温水をはり、一方のソリは水で冷やす構成からなる（図 6）。ミョウバンの溶解度は温度によって大きく変化し、とりわけ約 100°C から 30°C にかけては温度に対する溶解度の変化が特に大きい。冷却されたソリと水槽の底との間でミョウバン結晶が沈澱するので、これが断層帯に鉱物脈が沈澱して剪断面をセメントさせる過程に対比させることができる。実験ではソリに熱伝導度の高い材料としてアルミを用い、中に氷と水を入れてあるので底面において温度むらは少ないと考えられる。そして剪断面における沈澱と破碎の様子を観察できるように水槽底は透明アクリルにし、その下には鏡を設置してある（図 7a）。飽和ミョウバン水溶液の温度は約 $70 \sim 90^\circ\text{C}$ 、ソリの底面は

図 7 セメンテーションによる固着すべりのアナログ実験の写真。

- (a) ソリの底面にミョウバン結晶が沈澱する様子を観察できるように、水槽の下に鏡が設置してある。
- (b) 冷却されたソリが溶液平衡状態のミョウバン水溶液に浸されると同時にソリは固着し、次第にバネが伸びる。加速する寸前に臨界すべりを起こすこともある（矢印）。
- (c) ソリが加速すべりを引き起こし、バネの歪みは解消される。
- (d) 再びソリの底面にミョウバンが沈澱し、ソリを固着させた。水溶液の温度も低下してきており、それに従って水槽の各所でミョウバンが沈澱して白い結晶が観察される。
- (e) 2 回目の加速すべり。
- (f) ソリの底面にはミョウバン結晶と、その表面にスリッケンラインが観察される。ソリの中央左側（すべり方向の後方）は結晶が剥離しているが、これは 2 回目の加速すべりの時に破碎した。この部分がより強く固着していた、いわゆるアスぺリティだったのかもしれない。

Fig. 7 Photograph of the experiment.

The occurrence of precipitation along the shear surface can be observed with a mirror under a transparent experiment box (a). Chilled slider has cementation of alum adhelng. Arrow shows the critical slip (b) and rapid slips (c). The slick slips are repeated (d, e), and the striation are developed on the slip surface (f).

50 mm × 50 mm で、重りと氷と水が約 180 g が入れてあり、バネ定数 20 g/mm のバネを用いて実験した。

上記の条件で一定のレートで応力をかけた場合のすべり実験と、ソリを停止させてそれから保持時間を変えて剪断応力の測定を行った。その結果、一定のレートで応力をかけた場合は固着すべりを生じた。冷却したソリを温ミョウバン水溶液に浸すとすぐに底面には白くミョウバン結晶が沈澱し(図 7b)、ソリは固着する。ソリは水槽のサイズの関係で長い距離を滑らすことはできないが、少なくとも 2 回、固着と加速すべりが生じさせることができた(図 7c, d, e)。時には加速すべりの前に緩やかな臨界すべりを観察できることもある(図 7b の矢印)。実験後にソリ底面を観察すると、ミョウバンの結晶が底面に一面に発達して、スリッペンサイドも形成された(図 7f)。またホールディング試験では、剪断応力は停止時間によって増加することとも認められ(図 6)、剪断面がミョウバンの沈澱に伴って強度回復したことを示している。また結果的には実験では固着すべりが生じているので、この現象が速度弱化性を有することも意味する。ちなみに、水槽にミョウバン水溶液を入れない場合には固着すべりや保持時間による摩擦強度の上昇は認められないので、上記の現象はミョウバン結晶の沈澱によって生じているものと考えられる。このような結晶沈澱現象による固着すべりを断層岩に当てはめるならば、鉱物脈の沈澱は、破碎物が単にインターサイズミックに膠結させられるということにとどまらず、摩擦の時間依存性を担う、すなわち固着すべりを能動的に起こす能力を有していることを意味する。

VI. ま と め

四万十帯の興津メランジュの震源断層は、付加プリズムの底付けユニットのルーフ衝上断層で発達し、そこはシュードタキライトや破碎岩片が含まれ、鉱物脈が濃集することで特徴づけられる。脈鉱物は断層の破碎帯をセメントしており、一部の破碎岩片は基質の鉱物脈によってサポートされていることは、脈鉱物が破碎物の沈澱よりも急速

に沈澱したことを示している。これが地震サイクルよりも十分に短い時間で断層を固着させたものと解釈される。

鉱物脈の沈澱、そしてそれに伴う断層強度増加が時間と共に進行するならば、摩擦の時間依存性の条件を満足させることができる。これは単にインターサイズミックに断層岩が固結したということではなく、鉱物脈によるセメンテーションが断層のアスペリティのメカニズムになりうるということの意味する。剪断面における鉱物脈の沈澱が、摩擦強度の時間依存性を満足し固着すべりを引き起こせるのかは、簡単なアナログ実験でも観察することができる。

謝 辞

地球惑星関連学会 2003 年合同大会において断層帯のレオロジーと地震の発生過程セッションに参加された多くの方々からたいへん有意義な助言をいただいた。海洋科学技術センターの加藤愛太郎博士に摩擦理論に関してたいへん有益な指摘を頂いた。また、このような特集に発表させて頂く機会を与えて頂いたことに深く謝意を表す。

文 献

- Ashi, J. and Taira, A. (1993): Thermal structure of the Nankai accretionary prism as inferred from the distribution of gas hydrate BSRs. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **273**, 137-149.
- Bopyer, E.L. and Elliott, D. (1982): Thrust systems. *AAPG Bull.*, **66**, 1196-1230.
- Borden, F.P. and Tabor, D. (1950): *The Friction and Lubrication of Solids*. Clarendon Press Oxford.
- Evans, J. and Chester, F.M. (1995): Fluid-rock interaction in fault of the San Andreas system: Inferences from San Gabriel fault rock geochemistry and microstructure. *J. Geophys. Res.*, **100**, 13007-13020.
- 藤本光一郎 (2002): 地震発生帯における流体の性状. 月刊地球, 号外, **36** (沈み込み帯地震発生帯—その物質科学と深海掘削—), 53-59.
- Hashimoto, Y. and Kimura, G. (1999): Underplating process from melange formation to duplexing: Example from the Cretaceous Shimanto Belt, Kii Peninsula, southwest Japan. *Tectonics*, **18**, 92-107.
- Hasebe, N., Tagami, T. and Nisimura, N. (1993): Evolution of the Shimanto accretionary complex. A fission-track thermochronologic study. In Underwood, M.B. ed.: *Thermal Evolution of the*

- Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan: An Example of Ridge-Trench Interaction*. Geological Society of America Special Paper, **273**, 121-136.
- Hyndman, R.D., Wang, K.J., Yuan, T. and Spence, G.D. (1993): Tectonic sediment thickening, fluid expulsion, and the thermal regime of subduction zone accretionary prisms the Cascadia margin off Vancouverisland. *J. Geophys. Res.*, **98**, 21865-21876.
- Ikesawa, A., Sakaguchi, A. and Kimura, G. (2003): Pseudotachylite from an ancient accretionary complex: Evidence for melt generation during seismic slip along a master decollement? *Geology*, **31**, 637-640.
- 狩野謙一 (1999): 付加体における震源域物質科学. 月刊地球, **21**, 38-44.
- 狩野謙一・村田明広 (1998): 構造地質. 朝倉書店.
- 君波和雄・柏木庸孝・宮下純夫 (1992): 上部白亜系牟岐累層 (四国東部) 中の *in-situ* 緑色岩類の産状とその意義. 地質学雑誌, **98**, 867-883.
- 木村 学 (1997): プレート沈み込み帯における Mass Flux と Seismogenic Zone—OD21 に期待する科学目標—. 月刊地球, 号外, **19** (21 世紀の深海掘削への展望—ODP から OD21 へ—), 227-232.
- 村田明広 (1991): 九州四万十帯, 内ノ八重層の作るデュプレックス構造と内ノ八重クリッペ. 地学雑誌, **97**, 39-52.
- 中谷正夫 (2003): Vel. dependence of friction due to sol.-transfer healing of quartz gouge @200C and its upper cutoff velocity as low as 1E-6 m/s. 地球惑星関連合同大会講演集, I019-014.
- Ohmori, K., Taira, A., Tokuyama, H., Sakaguchi, A., Okamura, M. and Aihara, A. (1997): Paleothermal structure of the Shimanto accretionary prism, Shikoku, Japan: Role of an out-of-sequence thrust. *Geology*, **25**, 327-330.
- Park, J., Tsuru, T., Takahashi, N., Takane, T., Kodaira, S., Nakanishi, A., Miura, S. and Kaneda, Y. (2002): A deep strong reflector in the Nankai accretionary wedge from multichannel seismic data: Implications for underplating and interseismic shear stress release. *J. Geophys. Res.*, **107**, B4.
- Sakaguchi, A. (1996): High geothermal gradient with ridge subduction beneath Cretaceous Shimanto accretionary prism, southwest Japan. *Geology*, **24**, 795-798.
- Sakaguchi, A. (1999): Thermal maturity in the Shimanto accretionary prism, southwest Japan with the thermal change of the subducting slab: Fluid inclusion and vitrinite reflectance study. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **173**, 61-74.
- 坂口有人・大森琴絵・山本浩士・相原安津夫・岡村 真 (1992): 輝炭反射率から見た四国四万十帯北帯の熱構造—高知県西部域を例にして—. 高知大学学術研究報告, **41**, 29-47.
- Sakaguchi, A., Takami, R., Ikesawa, E. and Kanaya, T. (submitted): Tectonic setting of seismogenic fault in the ancient subduction zone, Okitsu Melange, Shimanto accretionary complex, SW Japan. *Tectonics*.
- シヨルツ, C.H. 著, 柳谷 俊訳 (1993): 地震と断層の力学. 古今書院.
- Sholtz, C.H. (1990): *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press.
- Tagami, T., Hasebe, N. and Shimanda, C. (1995): Episodic exhumation of accretionary complexes: Fission-track thermochronologic evidence from the Shimanto Belt and its vicinities, southwest Japan. *The Island Arc*, **4**, 209-230.
- Taira, A., Katto, J., Tashiro, M., Okamura, M. and Kodama, K. (1988): The Shimanto Belt in Shikoku, Japan - Evolution of Cretaceous to Miocene accretionary prism. *Modern Geology*, **12**, 5-46.
- Taira, A., Hill, I., Fish, J. and others (1991): *Proc. ODP, Init. Repts.*, **131**, 71-269.
- Wintch, R.P., Christoffersen, R. and Kronenberg, A.K. (1995): Fluid-rock reaction weakening of fault gouge. *J. Geophys. Res.*, **100**, 13021-13032.
- Yamano, M., Honda, S. and Uyeda, S. (1984): Nankai Trough: A hot trench? *Marine Geophys. Res.*, **6**, 187-203.

(2003 年 10 月 17 日受付, 2003 年 12 月 5 日受理)