四万十帯牟岐メランジュにみる沈み込み帯地震発生帯の変形と流体移動*

Deformation and fluid flow in seismogenic subduction zone: The Mugi Mélange in the Shimanto Belt

山口飛鳥¹ 柴田伊廣²

氏家恒太郎³ 木村 学⁴

*Asuka Yamaguchi¹, Tadahiro Shibata²,
Kohtaro Ujiie³ and Gaku Kimura⁴*

受付: 2009年 5月19日

受理: 2009年 8月 1日

*日本地質学会第116年学術大会 (2009年・岡山) 見
学旅行 (B班) 案内書

1. 高知大学海洋コア総合研究センター
Center for Advanced Marine Core Research, Kochi
University
B200 Monobe, Nankoku, Kochi 783-8502, Japan
2. 神奈川県立生命の星地球博物館
Kanagawa Prefectural Museum of natural History
499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan
3. 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域
Institute for Research on Earth Evolution, Japan
Agency for Marine-Earth Science and Technology
3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama,
Kanagawa 236-0001, Japan
4. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
Department of Earth and Planetary Science, Graduate
School of Science, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Corresponding author: A. Yamaguchi

E-mail: jm-asukay@kochi-u.ac.jp

概 要

1970年代後半～80年代の層序・年代学的研究, 1980年代後半～90年代の構造地質学的研究・熱履歴解析を経て, 四万十帯のテクトニックメランジュは地震発生帯の化石であるとの認識がなされた. 本巡検では四国東部の牟岐地域において, 非対称剪断組織をもつテクトニックメランジュ, 海洋地殻の底付け付加に伴う断層帯とその周辺に密集する鉱物脈, さらにシュードタキライトやウルトラカタクレーサイトなどの断層岩を観察し, 沈み込み帯地震発生帯浅部の変形・流体移動像について議論を行う.

Key Words

付加体, 沈み込み帯, 地震発生帯, メランジュ, シュードタキライト, ウルトラカタクレーサイト, 鉱物脈

accretionary complex, subduction zone, seismogenic zone, mélange, pseudotachylite, ultracataclasite, mineral vein

地形図

1 : 25,000 「牟岐」「山河内」「日和佐」

見学コース

[1日目] 8:00 岡山駅西口集合→牟岐メランジュ上部セクション→美波町 (泊)

[2日目] 9:00 宿出発→牟岐メランジュ下部セクション→17:30 徳島駅・18:00 徳島空港

見学地点

Stop 1 (33° 41' 04"~05" N, 134° 28' 41" E) メランジュ／整然層境界断層 (南阿波断層; シュードタキライト産出断層)

Stop 2 (33° 40' 21" N, 134° 27' 10"~11" E) メランジュ内部の変形

Stop 3 (33° 40' 15"~17" N, 134° 27' 05"~09" E) 底付け付加に伴う断層帯

はじめに

四万十帯の名を一躍世界に轟かせたのは、1970年代後半から1980年代前半にかけての、高知大学グループによる一連の研究である（平ほか、1980a, b; Taira et al., 1982; Taira et al., 1988）。当時、平朝彦・岡村真・田代正之らは、放散虫や石灰質ナノプランクトンを用いて、時代未詳とされていた四国四万十帯の各岩相の堆積年代を決定し、それらは大局的にみて北ほど古く南ほど新しい帯状配列をとること、混在岩相（メランジュ）ではチャート、多色／赤色頁岩、泥岩、砂岩の順に年代が新しくなることを明らかにした。この傾向は南からのプレート沈み込みに伴う付加モデルによって説明され、プレートテクトニクスの地質学的証明として大きな反響を呼んだ。そして、ほぼ同時期に進展したジュラ紀付加体の研究とともに、日本列島構造発達史の解明に大きく貢献した（平、1990; 磯崎・丸山、1991）。

この時点で、四万十帯に産するメランジュ（第1図）の成因に関しては、オリストストローム説が優勢であったが（平ほか、1980a; 酒井、1988）、変形組織の認定が進むにつれ、それらのかなりの部分が、おそらくプレート境界での剪断運動によって形成されたテクトニックメランジュであることが明らかにされた（Needham, 1987; Kano et al., 1991; Kimura and Mukai, 1991; Onishi and Kimura, 1995; Hashimoto and Kimura, 1999; Ujiie et al., 2000; Onishi et al., 2001, Ujiie, 2002）。80年代に米国アラスカ州のコディアク付加体では、ODPのバルバドス付加体の掘削成果とも相まって、J. Casey MooreやT. Byrneらがデコルマの下方伝播に伴うメランジュの歪硬化モデルを提唱していたが（Moore and Byrne, 1987; Byrne and Fisher, 1990）、この結果も四万十帯のメランジュ成因論を刺激した。

また90年代には、構造地質学的研究と並行して、ビトリナイト反射率やイライト結晶度、鉱物脈中の流体包有物を地質温度計として用いた熱構造の解析も進んだ（Sakaguchi, 1996, 1999; Ohmori et al., 1997; Lewis and Byrne, 2000, 2003; Hashimoto et al., 2002, 2003; Matsumura et al., 2003）。現世の沈み込み帯地震発生帯が150～350℃の領域に位置することは熱流量計算から明らかにされており（Hyndman and Wang, 1993; Hyndman et al., 1997）、それとの比較から、四万十帯のメランジュの大部分が地震発生深度を経験していることが明らかにされた。すなわち、テクトニックメランジュこそがプレート境界地震発生帯の化石であるとの知見が得られた。

この間、四万十帯の眼前に横たわる南海トラフでは、1975年と1982年に足摺沖で掘削が行われた後（DSDP Leg 31, 87）、舞台を室戸沖に移し、1990年・2000年・2001年に再度掘削が行われた（ODP Leg 131, 190, 196）。808, 1174掘削地点ではデコルマを貫通し、デコルマを挟んだ間隙率の逆転や、歪・応力の不連続など大きな成果が得られた（Taira et al., 1992; Moore et al., 2001; Ujiie et al., 2003）。そして、2003年から開始された統合国際深海掘削計画（IODP）では、主要なターゲットの1つとして地震発生帯掘削が挙げられ、南海トラフ熊野沖において地球深部探査船「ちきゅう」を用いた大深度掘削が行われることとなった（NanTroSEIZE：南海トラフ地震発生帯掘削計画）。1944年東南海地震の震源域に位置するプレート境界からの分岐断層、および海底下6 kmのプレート境界断層そのものを掘削し、コアを回収・計測機器を設置し、地震発生場の実態を明らかにしようとする壮大な計画である。

このような状況のもと、四万十帯を、南海トラフと類似する、若いプレートの沈み込みに伴う付加体としてもう一度見

第1図 四国四万十帯におけるメランジュの分布と牟岐メランジュの位置。Taira et al. (1988) を改変。

直し、掘削目標である地震発生帯物質の陸上アナログとして、メランジュの変形過程を詳細に解析しようとする機運が生まれた(木村ほか, 2002)。その結果、摩擦熔融物が固化して出来たシュードタキライト(Ikesawa et al., 2003; Kitamura et al., 2005; Mukoyoshi et al., 2006; Okamoto et al., 2006; Ujiie et al., 2007b)や粉碎物の流動化(fluidization)を記録したウルトラカタクレーサイト(Ujiie et al., 2007a)が続々と発見・報告され、付加体物質の摩擦熔融時の剪断特性(Ujiie et al., 2009)、ウルトラカタクレーサイトの摩擦発熱履歴(Ujiie et al., 2008)、付加体断層岩の水理特性(Kato et al., 2003)、弾性波速度(Tsuji et al., 2006)、付加体のウェッジ形状・マスバランス・年代(Kimura et al., 2007; Shibata et al., 2008)、地球化学および岩石-流体反応(Kawabata et al., 2007; Hashimoto et al., 2006; 2008; Yamaguchi et al., 2005)などの多様な研究が進展しつつある。今や四万十帯のメランジュは世界の付加体研究の教科書的存在であると言っても過言ではなく、その中でも牟岐メランジュは特に詳細な調査・研究がなされている(木村・木下編, 2009)。

現在、南海トラフ地震発生帯掘削計画ステージ1の3航海(Expedition 314/315/316)は終了し、まさにステージ2の航海(Expedition 319/322)が行われているところである。この機に四万十帯牟岐メランジュを再訪し、そこに見られる沈み込み帯の変形・流体移動そして地震痕跡について議論を行うことが本巡検の目的である。

地質概説

四国東部における四万十帯の地帯・層序区分は、公文

(1981)、柳井(1983)、君波ほか(1992)、Onishi and Kimura(1995)などによりなされているが、十分な見解の一致をみておらず、ここではOnishi and Kimura(1995)を基に牟岐メランジュとその周辺地域に限定して紹介する。

徳島県において、四万十北帯の最南部は構造的上位に位置するコヒーレントの日和佐層と、その下位の牟岐メランジュに分けられる(第2図)。南帯最北部には海南層が分布するが、北帯/南帯境界である安芸構造線の位置は海岸近くでは明確ではない。

1. 日和佐層

塊状砂岩を主体とし、礫岩・砂岩頁岩互層・頁岩を含む。東北東-西南西走向で北に中～高角に傾斜するが、一部では南傾斜の箇所もある。見かけの層厚は約6000mである。砂岩は岩片に富む組成をもち、礫岩は酸性火山岩礫を多く含む(公文, 1981)。堆積年代は、放散虫化石から後期白亜紀カンパニアン期～前期マーストリヒアン期とされている(君波ほか, 1992)。堆積性ジルコンのU-Pb年代測定の最若値は $67.8 \pm 2.3 \sim 71.3 \pm 3.2$ Maであり(Shibata et al., 2008)、化石年代と整合的である。高知県では野々川層に連続し、また、堆積年代および砂岩組成から、三波川帯中の大歩危ユニットとの対比がなされている(Kiminami et al., 1999; Aoki et al., 2007)。構造的な下位の牟岐メランジュとは、高角の逆断層で接する。

2. 牟岐メランジュ

砂岩ブロックを含む変形した黒色頁岩を主体とし、一部に

第2図 牟岐メランジュの(a)断面図・(b)地質図と(c)各ユニットの模式柱状図。Shibata et al. (2008)を加筆・修正。

連続性のよい緑色岩・赤色頁岩・少量のチャート・凝灰岩を含む（公文，1981；君波ほか，1992；Onishi and Kimura 1995）。黒色頁岩は剥離性を示す葉片状面構造をもち，その方位は東北東－西南西走向・垂直から北に急傾斜する。見かけの層厚は約1500mである。堆積年代は，アンモナイト・放射虫化石から後期白亜紀カンパニアン期～前期マーストリヒアン期とされてきたが（君波ほか，1992），近年のジルコンU-Pb年代測定によって，一部に暁新世の堆積年代をもつユニットを含むことが明らかになった（Shibata et al., 2008）。

牟岐メランジュは上部セクションと下部セクションに分けられ，両者はそれぞれ異なる堆積年代・最高被熱温度をもつ（第2図）。凝灰岩および砂岩中のジルコンのU-Pb年代測定の最も若い年代値は，上部セクションは白亜紀末期 $66.2 \pm 3.5 \sim 73.2 \pm 3.6$ Maの年代であり，下部セクションは古第三紀初頭 $58.3 \pm 3.4 \sim 63.8 \pm 2.2$ Maの年代を示す（第3図；Shibata et al., 2008）。また，ビトリナイト反射率による古地温構造の解析によれば，上部セクションは最高被熱温度 $180 \sim 200^\circ\text{C}$ である

のに対し，下部セクションは最高被熱温度 $130 \sim 150^\circ\text{C}$ である（第4図；Ikesawa et al., 2005）。上部セクション・下部セクションとも，Kimura and Mukai (1991) が日和佐層の北方に位置する赤松川流域において報告したものと同じく，その内部に玄武岩を基底とする海洋プレート層序の繰り返し認められ，それぞれ3枚のユニット（上部セクション：ユニット4-6；下部セクション：ユニット1-3）からなり（第2図），デュープレックス構造をなすとみなされている（第5図；Ikesawa et al., 2005）。上部セクションと下部セクションの境界には水落（みぞおち）断層と呼ばれる高角の逆断層があり，熱構造を切ることから，付加体の基本構造が形成された後に活動した順序外断層（out-of-sequence thrust；OOST）であると考えられている（Kitamura et al., 2005）。

牟岐メランジュは，年代と岩相から，高知県の興津メランジュ（平ほか，1980a；Ikesawa et al., 2003）の東方延長と考えられている。構造的低位に位置する海南層との境界はよくわかっていない。

第3図 牟岐メランジュおよび日和佐層のジルコンU-Pb年代測定結果。砂岩のデータは最若のコンコーディアおよびその測定誤差(2σ)，凝灰岩のデータは加重平均およびその測定誤差(2σ)を示す。Shibata et al. (2008)を改変。

第4図 ビトリナイト反射率(R_o)から求められた牟岐メランジュおよび日和佐層の古地温構造。最高被熱温度の換算はSweeney and Burnham (1990)の手法による。Ikesawa et al. (2005)を改変。

第5図 南海トラフ熊野沖の地震反射断面解釈図(Park et al., 2002; 温度推定はWang et al., 1995による)と，牟岐メランジュの形成場に関するモデル。Ikesawa et al. (2005)を改変。

3. 海南層

タービタイトの砂岩頁岩互層からなり、緑色岩・遠洋性堆積物・酸性凝灰岩を含まないことで牟岐メランジュと区別される。東北東－西南西走向で、北に中～高角に傾斜するが一部南傾斜の箇所もある。見かけの層厚は2000m以下である(Onishi and Kimura, 1995)。黒色頁岩中の放散虫化石から堆積年代は始新世とされている(須鎗・山崎, 1987)。タービタイトは、単層が分断された、いわゆるブローケンフォーメーションをなす。

見学地点

牟岐メランジュは牟岐町～美波町(旧日和佐町)にかけての海岸沿いに極めて良好な露出が見られる。今回の巡検では、見学箇所を3露頭に厳選し、時間をかけてそれぞれの露頭を観察する予定である。

Stop 1 メランジュ／整然層境界断層(南阿波断層；シュードタキライト産出断層)

[地形図] 1:25,000「山河内」

[位置] 33°41'04"~05"N, 134°28'41"E. 牟岐町水落集落から東北東に約1km先の海岸沿い。

[解説] 牟岐メランジュ上部セクション(ユニット5)と日和佐層との境界断層で、南側の黒色頁岩中に砂岩ブロックを含むメランジュと、北側の塊状砂岩とを境する。断層面は東北東－西南西走向で、北に急傾斜する(第6a図)。Kitamura et al. (2005)によって記載・命名され、Ujii et al. (2007b)によりシュードタキライトの詳細な記載が行われた。この断層は、その両側で全く岩相が異なるにもかかわらず、顕著な温度ギャップを持たないことから、等温線にほぼ平行に活動したものであり、興津メランジュ北縁断層と同様のデュープレックスのルーフスラスト、ないし沈み込みプレート境界に相当すると考えられている(Kitamura et al., 2005; Ujii et al., 2007b)。

断層帯は厚さ約1-2mで、主としてメランジュ起源の面状カタクレーサイトと暗色脈からなり(第6a, 6b図)、灰白色の凝灰質頁岩、石英・濁沸石を主体とする鉱物脈を挟在する。シュードタキライトは暗色脈中に産出する。

面状カタクレーサイトでは砂岩や鉱物脈の破碎岩片が回転・配列してS-Cファブリックを呈した複合面構造が形成されている(第6c図)。剪断面上に発達する条線及び複合面構造から求めた剪断方位・センスは、左横ずれ成分を伴った南向き逆断層センスで(第6d図)、後期白亜紀の推定プレート収斂方向(Onishi and Kimura, 1995)と調和的である。光学顕微鏡下において面状カタクレーサイトは、粉碎マトリックス中に粘土鉱物が定向配列することで特徴づけられ(S面)、これを剪断面(C面)が低～中角度で切る(第6e図)。

暗色脈は厚さ数mm以下で、シュードタキライト、ウルトラカタクレーサイトで構成される(第7a図)。暗色脈は断層帯境界に平行ないし斜交して発達し、面状カタクレーサイトをシャープに切る。露頭スケールにおいて暗色脈は破碎岩片を稀にしか伴わず、場所によってシュードタキライトに特徴

的な断層脈とそこから派生する注入脈の産状を示す(第7b図)。

光学顕微鏡、電子顕微鏡下において暗色脈はランダム(第7c図)と面状の双方の組織を呈しており、ウルトラカタクレーサイトマトリックス中にはより古いウルトラカタクレーサイトからなる岩片が認められる(第7d図)。シュードタキライトはオープンニコル下では、透明感のある破碎岩片としてウルトラカタクレーサイトマトリックス中に含有されている(第7e, 7f図)。

これらの産状は、厚さ数mm以下のゾーンに局所化したすべりが複数回起こったことを示しており、シュードタキライトの存在は地震すべりが厚さ数mm以下の暗色層に局所化していたことを示している。

本断層におけるシュードタキライトの産状、微細構造、化学組成は、興津メランジュ北縁断層中に産出するシュードタキライトと同様で、以下の特徴を示している(Ujii et al., 2007b)。

- シュードタキライトマトリックスは、クロスニコル化では暗色で光学的に等方である。
- 反射電子像においてシュードタキライトは、均質なガラス質マトリックス中に不規則で湾入した外縁部を持つ石英、曹長石、正長石粒子及び気泡を含有することで特徴づけられる(第8a, 8b図)。
- 透過型電子顕微鏡像および回折像において、シュードタキライトは、アモルファスマトリックス中にイライト四面体部の熱分解に由来したムライト結晶を含有することで特徴づけられる(第8c, 8d図)。
- シュードタキライトマトリックスの化学組成はイライトの化学組成と類似する(表1)。

上記の特徴は、シュードタキライト源岩(黒色頁岩)を用いた高速剪断摩擦実験でも再現されており(Ujii et al., 2009)、外縁部の熔融により湾入した粒子の分解温度(斜長石: 1100℃, カリ長石: 1150℃, 含水時の石英: 1100℃)、イライトの熔融温度、ムライトの存在(結晶化温度: 1100℃以上)から、摩擦熔融時の到達温度は1100℃に及ぶことが明らかになっている。

Stop 2 メランジュ内部の変形

[地形図] 1:25,000「山河内」

[位置] 33°40'21"N, 134°27'10"~11"E. 牟岐町灘と水落の中間地点、大梅建築前の小道を海岸に下り、浜から西南西に100m進んだ地点。

[解説] 黒色頁岩中に砂岩・珪質泥岩・凝灰岩のブロックを含む、約10m四方の海食台上の露頭である(第9図)。メランジュが剪断により形成されたことを示す典型的な露頭であり、複合面構造および砂岩の膨縮構造・非対称ブーディングが発達する。剪断センスは、この露頭では水平面上で見かけ右ずれである。ブーディングのネッキング部には石英・方解石を主体とする鉱物脈が見られる。砂岩中のウェブストラクチャーの形成は砂岩のセメンテーションに先行することがHashimoto et al. (2006)により示されているが、この露頭で

第6図 (a) メランジュ／整然層境界断層(南阿波断層；シュードタキライト産出断層)の露頭写真。シュードタキライトを伴う厚さ約1~2mの断層が、上位のコヒーレントな砂岩(日和佐層)と下位のメランジュとを境している。(b) 非対称剪断組織を持つ面状カタクレーサイト。矢印：連続性の良い暗色脈。(c) 面状カタクレーサイトの拡大写真。矢印：幅数mm以下の暗色脈。(d) 剪断面(大円)とスリッケンライン(黒丸)の方位。下半球等積投影。(e) 面状カタクレーサイトの薄片写真(オープンニコル)。カタクレーサイトのマトリックス中のS面が、矢印で示したシアバンドに切断されている。

第7図 (a) 暗色脈(矢印)の拡大図。(b) 暗色脈を含む断層岩の研磨片写真。(c) ウルトラカタクレサイトの産状を示す暗色脈(両矢印間)の薄片写真。面状カタクレサイトは暗色脈に切られる。(d) ウルトラカタクレサイトの走査型電子顕微鏡写真(反射電子像)。古いウルトラカタクレサイト(明灰色部)のリワーキングが見られる。構成鉱物は主にイライトからなり、鉄・チタンに富む微粒子(明色)を含む。(e) 暗色脈(両矢印)中に見られる、透明な破碎岩片(白矢印)。オープンニコル。(f) 透明な破碎岩片の拡大写真。亜円形～亜角形の粒子と暗色微細粒子が透明なマトリックス中に見られる(オープンニコル)。

第8図 (a), (b) シュードタキライトの走査型電子顕微鏡写真(反射電子像). 均質なマトリックス中に気泡(矢印)と湾入した粒子を含むことで特徴づけられる. (a) 不規則で湾入した外縁部を呈する石英(Qz)・曹長石(Ab)粒子. (b) 外縁部が湾入したカリ長石(Kf)粒子. (c), (d) シュードタキライトの透過型電子顕微鏡写真(明視野像). (c) シュードタキライトの均質なガラス質マトリックス. 右上: 非晶質物質を示す電子線回折パターン. (d) マトリックス中の自形の微小結晶. 右上: 微小結晶の電子線回折パターン.

表1 EPMA(JXA-8900RL)分析によるシュードタキライト基質部, およびウルトラカタクレーサイト基質部の化学組成. Mg-1~Mg-4はサンプル番号であり, ビーム径1mmでn点分析したものの平均を示す. 右端はイライトの化学組成の文献値(Deer et al., 1992).

	Ultracataclasite		Pseudotachylyte matrix				Illite	
	matrix	Mg-1	Mg-2	Mg-3	Mg-4		(Deer et al., 1992)	
<i>n</i>	18	11	6	13	5			
SiO ₂	50.91±0.81	52.55±0.85	51.80±1.50	52.79±0.31	51.65±1.24	SiO ₂	51.25	
TiO ₂	1.00±0.68	0.27±0.08	0.16±0.11	0.08±0.01	0.13±0.03	TiO ₂	0.17	
Al ₂ O ₃	27.76±0.91	30.22±0.65	27.88±1.15	27.97±0.00	27.03±0.58	Al ₂ O ₃	23.53	
FeO	4.62±0.94	2.55±0.48	4.68±1.88	3.72±0.12	5.35±0.39	Fe ₂ O ₃	2.02	
MnO	0.13±0.04	0.21±0.29	0.16±0.04	0.13±0.01	0.19±0.02	FeO	0.33	
MgO	1.88±0.18	1.63±0.08	1.96±0.29	1.60±0.08	2.15±0.15	MnO	—	
CaO	1.23±0.61	0.55±0.08	0.66±0.10	0.94±0.49	0.57±0.02	MgO	3.32	
Na ₂ O	0.38±0.21	0.13±0.02	0.13±0.01	0.11±0.03	0.15±0.01	CaO	0.59	
K ₂ O	7.78±0.40	7.82±0.35	6.92±0.51	6.97±0.08	6.88±0.14	Na ₂ O	0.05	
Total	95.68	95.93	94.34	94.30	94.11	K ₂ O	7.61	
Missing mass	4.32	4.07	5.66	5.7	5.89	H ₂ O ⁺	5.87	
						H ₂ O ⁻	5.26	
						Total	100	

n, numbers of analyses

はブーディン化した砂岩内部に, セメントや鉱物脈を切って暗色物質が形成されている (第10図). この暗色物質内部の粒子は角ばった稜を持ち, その粒径分布はフラクタルをなす

ことから, カタクラスティックなものであると考えられる (北條ほか, 2007).

切断関係から, メランジュ中の砂岩の続成・変形プロセス

第9図 右横ずれの非対称剪断組織をもつメランジュの露頭スケッチ（北條愛氏による私信）。砂岩層は初生的な層序を保持しつつもブーディン化されている。

第10図 砂岩ブーディン中に見られる脈状の暗色物質

は第11図のようにまとめられる。すなわち、(a) 砂岩が海溝に堆積し、(b) 最大圧密を迎えた後、(c) web structureが発達し、その後 (d) 石英・方解石によるセメンテーションが行われる。さらに、(e) ブーディンのネッキング部での鉱物脈の形成、(f) 暗色物質の形成を伴うブーディン内部での砂岩のブロック化が進展する。砂岩のブーディン化は (e) (f) のステージを通して進行し、最終的には (g) 流動変形した周囲の泥も固結する。

また、この地点では厚さ約10 mの非円筒状・鞘状褶曲が発達したゾーンがメランジュ内部に認められる。これらの褶曲は珪質頁岩（第12a図）及び膨縮・ブーディン化した砂岩・

頁岩層中（第12b図）に発達しており、褶曲の規模は砂岩の含有量が少ないほど小さい。これらの特徴は地震発生深度に至るメランジュ形成時において、層平行伸張による膨縮・ブーディン構造形成後、不均質剪断変形により非円筒状・鞘状褶曲が形成されたことを示している。

Stop 3 底付け付加に伴う断層帯

〔地形図〕 1 : 25,000 「山河内」「牟岐」

〔位置〕 33° 40' 15~17° N, 134° 27' 05~09° E. Stop 2から150m東南。牟岐少年自然の家から数えて4つ目の鼻。

〔解説〕 厚さ約20mの主として玄武岩類からなる断層帯で、東北東-西南西~東西走向で、北および一部南に急傾斜する。第13図はこの断層帯のスケッチおよび断面図で、第14図は断層岩の分布を示した柱状図である。玄武岩類は枕状玄武岩、塊状玄武岩、ドレライト、ピローブレッチャ、ハイアロクラスタイトからなり、緑色および赤色を呈する。また、一部にチャート、石灰岩、赤色頁岩を含む。チャートは玄武岩の噴出時クラックを埋め、放散虫化石を含まないことから熱水起源と推定される。君波ほか（1995）および藤永ほか（1999）は、玄武岩に伴う赤色頁岩の微量元素を測定し、それらが熱水から沈殿したものであることを示した。

君波ほか（1992）は、玄武岩類と周囲の堆積岩の関係が整合的であること、玄武岩がN-MORBの組成を持つことから、この玄武岩類はin-situすなわち現地性で、クラーク太平洋海嶺の沈み込みに由来するものと考えた。しかし、その後Onishi and Kimura（1995）は君波ほか（1992）が整合的であると

第11図 砂岩の続成・変形過程の模式図(北條愛氏による私信). 説明は本文参照.

第12図 (a)珪質な黒色頁岩中に発達する鞘状褶曲. (b)膨縮・ブーディン化した砂岩・頁岩層中に発達する鞘状褶曲.

したすべての箇所について両者の境界を検討し、玄武岩類は構造的に位置されたものであるとした。Ikesawa et al. (2005) は、玄武岩類からなる断層帯によって海洋プレート層序を保存したメランジュが繰り返していることから（第2図）、沈み込みプレート境界が海洋地殻上部にステップダウンすることによって、メランジュが海洋地殻の一部とともにデュープレックス構造を形成しながら底付け付加したと解釈した（第5図）。つまり主として玄武岩類からなる断層帯は、底付け付加に伴う断層帯であると考えられる。

断層帯の大部分は玄武岩類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からなり、一部でメランジュ起源のカタクレーサイトを伴う。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S-CないしS-C-C'ファブリックを呈した複合面構造が形成されている（第15a図）。剪断面上に発達する条線及び複合面構造から求めた剪断センスはすべて北側に南に衝上する逆断層センスである（第15b図）。光学顕微鏡下においてS面は斜長石や単斜輝石の破碎岩片の配列によって特徴づけられ、C面やC'面を構成する剪断面に切られている（第15c図）。プレッシャーシャドーや圧力溶解に伴う黒色薄層はほとんど認められず、破碎流動による変形が卓越する。

ウルトラカタクレーサイトは、厚さ数cmで、断層帯最上部の玄武岩類／メランジュ境界に沿って分布しており（第14図）、走向方向に約700m追跡することができる。ウルトラカタクレーサイトはランダム組織を呈している。ウルトラカタクレーサイトとその直下の玄武岩類は変質が進んでおり、マグネタイト、マグヘタイトの消失により、帯磁率が最大で2桁ほど減少する（第14図）。また、変質の結果、赤～緑色の玄武岩類及び面状カタクレーサイトと比較してウルトラカタクレーサイトとその直下の玄武岩類はスメクタイトー緑泥石混合層、緑泥石、方解石に富んでおり、薄緑色を呈する。ウ

第13図 底付け付加に伴う、主として玄武岩類からなる断層帯の露頭スケッチおよび断面図。(a)露頭の位置図。(b)露頭のスケッチ。玄武岩類の最上部、および下部のハイアロクラスタイト・ピロープレッチャからなる部分に変形が集中している。(c) A-A'での断面図。

第14図 断層岩の分布を示した柱状図(Ujii et al., 2007a). 矢印: メランジュの断片. 帯磁率の値も付記. 白丸: 露頭での簡易測定値; 黒四角: 円柱形コアを用いた室内での測定値.

ルトラカタクレーサイトは粉碎物の流動化 (fluidization) を記録していると考えられ、以下の特徴を有する (Ujiie et al., 2007a).

- (a) 玄武岩類起源の粉碎物が上盤のメランジュ中に注入する構造が頻繁に認められる (第16a図).
- (b) 一部において、玄武岩類起源の粉碎物とメランジュ起源

の粉碎物が剪断面を伴わずに混合している (第16b図).
 (c) 鏡下において (第16c図), 粒径10-100 μ mにおける粉碎粒子の破片対の発見確率 (Monzawa and Otsuki, 2003) が0-14%と低い (第16d図).

Ujiie et al. (2008) は、流動化を記録したウルトラカタクレーサイト及びその直上直下の方解石中に含まれる流体包有物

第15図 (a) S-Cファブリックを持つ面状カタクレーサイト. 熱水性チャートのブロックを含む. (b) 面状カタクレーサイトのC面上に見られる剪断方位. 下半球等積投影. (c) S-C-C'ファブリックを持つ面状カタクレーサイトの薄片写真(オープンニコル). いずれも, Ujiie et al. (2007a)による.

第16図 (a) 上位のメランジュと下位の玄武岩との境界に発達するウルトラカタクレーサイト(両矢印). 注入構造が見られる(片矢印). (b) 玄武岩起源の粉碎物とメランジュ起源の粉碎物が混合している箇所(両矢印). (c) ウルトラカタクレーサイトの薄片写真. (d) ウルトラカタクレーサイト中の注入構造における粉碎粒子の破片対発見確率 (P). 灰色: Monzawa and Otsuki(2003)による, 流動化していないカタクレーサイトでのPの値の範囲.

第17図 方解石中の流体包有物の均質化温度(T_h)のヒストグラム．(a) メランジュ中の鉱物脈．(b) ウルトラカタクレーサイト中の鉱物脈の断片．(c) 玄武岩中の鉱物脈．ウルトラカタクレーサイトの直上直下のものが狭い T_h の範囲(130-180°C)をとるのに対し、ウルトラカタクレーサイト中のものは高温側に尾を引く分布を示し、流体包有物の体積増加(ストレッチング)によるものと考えられる。

の均質化温度を多数測定し、ウルトラカタクレーサイトのみ均質化温度の分布が高温側に尾を引くパターンを示すことを見出した(第17図)。これは、摩擦発熱による温度上昇に伴う流体包有物の体積増加(ストレッチング)を反映していると考えられ、急速加熱実験との比較から、摩擦発熱時の温度上昇量は50-150°Cと推定された。このことから、流動化の成因として摩擦発熱による流体圧上昇(thermal pressurization)が示唆されている(Ujii et al., 2007a; 2008)。

断層帯直上・直下のメランジュ中には、石英・方解石・濁沸石からなる鉱物脈の濃集帯が認められる(第18図)。これらの鉱物脈の大部分は剪断面により切られるが、一部に断層岩を切るものもある。このことから、脈形成と断層運動が繰り返したことが示唆される。鉱物脈は断層帯に直交するものと、剪断面を充填するものがあり、前者は脈をはさんで変位が認められない伸張性割れ目であるのに対して、後者は剪断割れ目である。前者の H_2O - CH_4 包有物の加熱冷却実験より得られた温度・圧力は、135-245°C、107-149MPaである

第18図 断層帯下盤のメランジュ中に見られる鉱物脈濃集帯の露頭写真。

(Matsumura et al., 2003).

鉱物脈が濃集したメランジュは分断・破片化してしばしば玄武岩類起源の面状カタクレサイト中に破碎岩片として取り込まれている (第13, 14図). 破碎岩片の大きさは数cm~数十mで, 破碎流動に伴ってブーディン化, 所によって褶曲している. 断層帯最下部の玄武岩類/メランジュ境界に沿って玄武岩類起源のウルトラカタクレサイトが認められることがあるが, 破碎流動に伴ったメランジュの分断・破片化により側方に著しく不連続である.

また, これらの鉱物脈を構成する方解石の炭素・酸素同位体比測定の結果は, 変形に伴う鉱物脈の起源流体が, 玄武岩中のそれとは明らかに異なることを示している (第19図). すなわち, 玄武岩中の方解石が約0‰の炭素同位体比を持ち, 海水起源を示唆するのに対し, 変形に伴う方解石の炭素同位体比は-8~-18‰で, 頁岩からの有機炭素の熱分解を示唆する. 一方, 酸素同位体比は+16~+22‰で, 160~170℃で脈が形成されたとして同位体平衡を仮定すると, 方解石を沈殿させた水の酸素同位体比は+5~+10‰となり, 鉱物脈を形成した流体は海水や天水ではなく, 鉱物からの脱水によりもたらされたものであることを示唆する.

第19図 断層帯およびその周辺の鉱物脈中の方解石の酸素・炭素同位体比(Yamaguchi et al., 2005を改変). Intra-basalt: 玄武岩内の鉱物脈; Boudin neck: メランジュ中の砂岩ブーディンのネッキング部の鉱物脈; Network: 断層帯直上および直下に密集して産する鉱物脈; Fault fill: ウルトラカタクレサイトを伴う断層面を充填する鉱物脈.

謝 辞

北條 愛氏には東京大学修士論文の未公表データを提供していただいた. 北村有迅博士, 山口はるか博士, 佐藤活志博士, Hugues Raimbourg博士, 岡本伸也氏, 北條 愛氏との共同調査の際の議論は大変有益であった. 正観寺の堀江明徳住職, および牟岐町灘の大梅謙治氏には調査に際して宿泊の便宜を図っていただいた. 査読者の清川昌一博士, 橋本善孝博士, および編集委員の小松俊文博士のコメントにより本稿は大幅に改善された. 以上の方に記して感謝申し上げる. な

お本研究は, JAMSTEC地球内部変動センターの研究の一部として実施した.

文 献

- Aoki, K., Iizuka, T., Hirata, T., Maruyama, S. and Terabayashi, M., 2007, Tectonic boundary between the Sanbagawa belt and the Shimanto belt in central Shikoku, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **113**, 171-183.
- Byrne, T., and Fisher, D., 1990, Evidence for a weak and overpressured decollement beneath sediment-dominated accretionary prisms. *Jour. Geophys. Res.*, **95**, 9081-9097.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992, *An Introduction to the Rockforming Minerals*, second ed. Green and Co. Ltd., London, Longmans, 712p.
- 藤永公一郎・加藤泰浩・君波和雄・三浦健一郎・中村謙太郎, 1999, 四国四万十帯北帯の牟岐累層に含まれる赤色頁岩の地球化学. 地質学論集, no. 52, 205-216.
- Hashimoto, Y., Enjoji, M., Sakaguchi, A. and Kimura, G., 2002, P-T conditions of cataclastic deformation associated with underplating: An example from the Cretaceous Shimanto complex, Kii Peninsula, SW Japan. *Earth Planets Space*, **54**, 1133-1138.
- Hashimoto, Y., Enjoji, M., Sakaguchi, A. and Kimura, G., 2003, In situ pressure-temperature conditions of a tectonic melange: Constraints from fluid inclusion analysis of syn-melange veins. *Island Arc*, **12**, 357-365.
- Hashimoto, Y. and Kimura, G., 1999, Underplating process from melange formation to duplexing: example from the Cretaceous Shimanto Subbelt, Kii Peninsula, SW Japan. *Tectonics*, **18**, 92-107.
- Hashimoto, Y., Nakaya, T., Ito, M. and Kimura, G., 2006, Tectono-lithification of sandstone prior to the onset of seismogenic subduction zone: evidence from tectonic melange of the Shimanto Belt, Japan. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **7**, Q06013, doi:10.1029/2005GC001062.
- Hashimoto, Y., Nikaizo, A. and Kimura, G., 2008, A geochemical estimation of fluid flux and permeability for a fault zone in Mugi melange, the Cretaceous Shimanto Belt, SW Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **31**, 208-214.
- 北條 愛・木村 学・山口飛鳥・柴田伊廣・北村有迅, 2007, 付加体中メランジュの砂岩にみられる破碎流動. 日本地質学会第114年学術大会講演要旨, 131.
- Hyndman, R. D., Yamano M. and Oleskevich, D. A., 1997, The seismogenic zone of subduction thrust faults. *Island Arc*, **6**, 244-260.
- Hyndman, R. D. and Wang, K., 1993, Thermal Constraints on the Zone of Major Thrust Earthquake Failure: The Cascadia Subduction Zone. *Jour. Geophys. Res.*, **98**, 2039-2060.
- Ikesawa, E., 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.
- Ikesawa, E., Kimura, G., Sato, K., Ikehara-Ohmori, 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 Mugi Melange, the Shimanto Belt, Japan. *Tectonophysics*, **401**, 217-230.
- 磯崎行雄・丸山茂徳, 1991, 日本におけるプレート造山論の歴史と日本列島の新しい地体構造区分. 地学雑誌, **100**, 697-761.
- Kano K., Nakaji, M. and Takeuchi, S., 1991, Asymmetrical melange fabrics as possible indicators of convergent direction of plates: A case study from the Shimanto Belt of the Akaishi Mountains, Central Japan. *Tectonophysics*, **185**, 375-388.
- Kato, A., Sakaguchi, A., Yoshida, S., Yamaguchi, H. and Kaneda, Y., 2004, Permeability structure around an ancient exhumed subductionzone fault. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi:10.1029/2003GL19183.
- Kawabata, K., Tanaka, H. and Kimura, G., 2007, Mass transfer and pressure solution in deformed shale of accretionary complex: Examples from the Shimanto Belt, southwestern Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **29**, 697-711.

- Kiminami, K., Hamasaki, A. and Matsuura, T., 1999, Geochemical contrast between the Sanbagawa psammitic schists (Oboke unit) and the Cretaceous Shimanto sandstones in Shikoku, South-west Japan and its geologic significance. *Island Arc*, **8**, 373-382.
- 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. 地質雑, **98**, 867-883.
- 君波和雄・久保田美穂・沢井長雄, 1995, 現地性緑色岩と共存する赤色頁岩の起源: 四万十累層群牟岐累層を例として. 地球科学, **49**, 143-156.
- 君波和雄・松浦卓史・岩田尊夫・三浦健一郎, 1998, 四国東部に分布する白亜系四万十累層群の砂岩組成と白亜紀火山活動との関連. 地質雑, **104**, 314-326.
- 木村 学・木下正高編, 2009, 付加体と巨大地震発生帯. 東京大学出版会, 印刷中.
- Kimura, G., Kitamura, Y., Hashimoto, Y., Yamaguchi, A., Shibata, T., Ujiie, K. and Okamoto, S., 2007, Transition of accretionary wedge structures around the up-dip limit of the seismogenic subduction zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **255**, 471-484.
- 木村 学・三ヶ田均・小平秀一・金田義行・末広 潔・平 朝彦, 2002, 四万十付加体・南海付加体リンク研究の総合戦略と地震発生帯掘削. 月刊地球号外, **36**, 22-27.
- Kimura, G. and Mukai, A., 1991, Underplated units in an accretionary complex: Melange of the Shimanto Belt of eastern Shikoku, south-west Japan. *Tectonics*, **10**, 31-50.
- Kitamura, Y., Sato, K., Ikesawa, E., Ikehara-Ohmori, K., Kimura, G., Kondo, H., Ujiie, K., Onishi, C. T., Kawabata, K., Hashimoto, Y., Mukoyoshi, H. and Masago, H., 2005, Melange and its seismogenic roof decollement: A plate boundary fault rock in the subduction zone - An example from the Shimanto Belt, Japan. *Tectonics*, **24**, TC5012. doi:10.1029/2004TC001635.
- 公文富士夫, 1981, 徳島県南部の四万十累帯白亜系. 地質雑, **87**, 277-295.
- Lewis, J. C. and Byrne, T. B., 2003, History of metamorphic fluids along outcrop-scale faults in a Paleogene accretionary prism, SW Japan: Implications for prism-scale hydrology. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, Art. No. 9007, doi:10.1029/2002GC000359.
- Lewis, J. C., Byrne, T. B., Pasteris, J. D., London, D. and Morgan, G. B., 2000, Early Tertiary fluid flow and pressure-temperature conditions in the Shimanto accretionary complex of south-west Japan: constraints from fluid inclusions. *Jour. Metamorphic Geol.*, **18**, 319-333.
- 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.
- Monzawa, N. and Otsuki, K., 2003, Commintion and fluidization of granular fault materials: implications for fault slip behavior. *Tectonophysics*, **367**, 127-143.
- Moore, G. F., Taira, A., Klaus, A. Becker, L., Boeckel, B., Cragg, A., Dean, A., Fergusson, C. L., Henry, P., Hirano, S., Hisamitsu, T., Hunze, S., Kastner, M., Maltman, A. J., Morgan, J. K., Murakami, Y., Saffer, D. M., Sanchez-Gomez, M., Sreaton, E. J., Smith, D. C., Spivack, A. J., Steurer, J., Tobin, H. J., Ujiie, K., Underwood, M. B. and Wilson, M., 2001, New insight into deformation and fluid flow processes in the Nankai Trough accretionary prism; results of Ocean Drilling Program Leg 190. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **2**, Art. No. 2001GC000166.
- Moore, J. C. and Byrne, T., 1987, Thickening of Fault Zones - A Mechanism of Melange Formation in Accreting Sediments. *Geology*, **15**, 1040-1043.
- 中村謙太郎・藤永公一郎・加藤泰浩, 2000, 四万十帯北帯に分布する現地性玄武岩の希土類元素組成とその起源に関する示唆. 岩石鉱物科学, **29**, 175-190.
- Needham, D. T., 1987, Asymmetric extensional structures and their implications for the generation of melanges. *Geol. Mag.*, **124**, 311-318.
- Okamoto, S., Kimura, G., Takizawa, S. and Yamaguchi, H., 2006, Earthquake fault rock indicating a coupled lubrication mechanism. *e-Earth*, **1**, 23-28.
- 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.
- Onishi, C. T. and Kimura, G., 1995, Change in fabric of melange in the Shimanto Belt, Japan: Change in relative convergence? *Tectonics*, **14**, 1273-1289.
- Onishi, C. T., Kimura, G., Hashimoto, Y., Ikehara-Ohmori, K. and Watanabe, T., 2001, Deformation history of tectonic melange and its relationship to the underplating process and relative plate motion: An example from the deeply buried Shimanto Belt, SW Japan. *Tectonics*, **20**, 376-393.
- Park, J.-O., Tsuru, T., Kodaira, S., Cummins, P. and Kaneda, Y., 2002, Splay fault branching along the Nankai subduction zone. *Science*, **297**, 1157-1160.
- Sakaguchi, A., 1996, High paleo-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.
- 酒井治孝, 1988, 岬オリストストローム帯の成因と高千穂変動の再検討. 地質雑, **94**, 945-961.
- Shibata, T., Orihashi, Y., Kimura, G. and Hashimoto, Y., 2008, Underplating of mélangé evidenced by the depositional ages: U-Pb dating of zircons from the Shimanto accretionary complex, southwest Japan. *Island Arc*, **17**, 376-393.
- Sweeney, J. J. and Burnham, A. K., 1990, Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, **74**, 1559-1570.
- 須鎗和巳・山崎哲司, 1987, 徳島県四万十帯北帯と南帯の境界—安芸構造線の再検討—. 徳島大教養部紀要 (自然科学), **20**, 37-46.
- 平 朝彦, 1990, 日本列島の誕生. 岩波新書, 226p.
- Taira, A., Hill, I., Firth, J., Berner, U., Brückmann, W., Byrne, T., Chabernaud, T., Fisher, A., Foucher, J.-P., Gamo, T., Gieskes, J., Hyndman, R., Karig, D., Kastner, M., Kato, Y., Lallemand, S., Lu, R., Maltman, A., Moore, G., Moran, K., Olafsson, G., Owens, W., Pickering, K., Siena, F., Taylor, E., Underwood, M., Wilkinson, C., Yamano, M. and Zhang, J., 1992, Sediment deformation and hydrogeology of the Nankai Trough accretionary prism: Synthesis of ship-board results of ODP Leg 131. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **109**, 431-450.
- 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 Geol.*, **12**, 5-46.
- Taira, A., Okada, H., Whitaker, J. H. McD. and Smith, A. J., 1982, The Shimanto Belt of Japan: Cretaceous-lower Miocene active margin sedimentation. In Legett, J. K., ed., *Trench-forearc geology*, Geol. Soc. Spec. Publ., no. 10, 5-26.
- 平 朝彦・岡村 真・甲藤次郎・田代正之・斎藤藤二・小玉一人・橋本光男・千葉とき子・青木隆弘, 1980a, 高知県四万十帯北帯 (白亜系) における「メランジュ」の岩相と時代. 四万十帯の地質学と古生物学—甲藤次郎教授還暦記念論文集—, 林野弘済会高知支部, 179-214.
- 平 朝彦・田代正之・岡村 真・甲藤次郎, 1980b, 高知県四万十帯の地質とその起源. 四万十帯の地質学と古生物学—甲藤次郎教授還暦記念論文集—, 林野弘済会高知支部, 319-389.
- Tsuji, T., Kimura, G., Okamoto, S., Kono, F., Mochinaga, H., Sacki, T. and Tokuyama H., 2006, Modern and ancient seismogenic out-of-sequence thrusts in the Nankai accretionary prism: Comparison of laboratory-derived physical properties and seismic reflection data. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18309, doi:10.1029/2006GL027025.

- Ujii, K., 2002, Evolution and kinematics of an ancient decollement zone, melange in the Shimanto accretionary complex of Okinawa Island, Ryukyu Arc. *Jour. Struct. Geol.*, **24**, 937-952.
- Ujii, K., Hisamitsu, T. and Soh, W., 2000, Magnetic and structural fabrics of the melange in the Shimanto accretionary complex, Okinawa Island: Implication for strain history during decollement-related deformation. *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 25729-25741.
- Ujii, K., Hisamitsu, T. and Taira, A., 2003, Deformation and fluid pressure variation during initiation and evolution of the plate boundary decollement zone in the Nankai accretionary prism. *Jour. Geophys. Res.*, **108**, 2398, doi:10.1029/2002JB002314.
- Ujii K., Tsutsumi, A., Fialko, Y. and Yamaguchi, H., 2009, Experimental investigation of frictional melting of argillite at high slip rates: Implications for seismic slip in subduction-accretion complexes. *Jour. Geophys. Res.*, **114**, B04308, doi:10.1029/2008JB006165.
- Ujii, K., Yamaguchi, A., Kimura, G., Toh, S., 2007a, Fluidization of granular material in a subduction thrust at seismogenic depths. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **259**, 307-318.
- Ujii, K., Yamaguchi, A., Taguchi, S., 2008, Stretching of fluid inclusions in calcite as an indicator of frictional heating on faults. *Geology*, **36**, 111-114.
- Ujii, K., Yamaguchi, H., Sakaguchi, A., Toh, S., 2007b, Pseudotachylytes in an ancient accretionary complex and implications for melt lubrication during subduction zone earthquakes. *Jour. Struct. Geol.*, **29**, 599-613.
- Wang, K., Hyndman, R.D. and Yamano, M., 1995, Thermal regime of the southwest Japan subduction zone: effects of age history of the subducting plate. *Tectonophysics*, **248**, 53-69.
- Yamaguchi, A., Ujii, 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.
- 柳井修一, 1983, 四万十地向斜の古地理－四国東部地域を例として. 地質雑, **89**, 575-593.