

熊野沖南海トラフ付加プリズムの地質構造と冷湧水 — YK01-04 Leg 2 熊野沖調査概要 —

芦 寿一郎*¹ 倉本 真一*² 森田 澄人*³ 角皆 潤*⁴ 後藤 秀作*⁵
小島 茂明*¹ 岡本 拓土*⁶ 石村 豊穂*⁴ 井尻 暁*⁴
土岐 知弘*⁴ 工藤 新吾*⁴ 浅井 聡子*⁷ 内海 真生*⁸

熊野沖の南海トラフ付加プリズムの成長と流体を中心とする物質循環の解明のため「しんかい6500」を用いた潜航調査を行った。潜航地点は、付加プリズム斜面にある3つの主要な断層崖(水深約2500m, 3500m, 4000m)で、いずれの地点においても、断層崖の基部から中腹にかけて化学合成生物群集が発見され、断層に沿って湧出する流体の存在が示唆された。斜面に露出する岩石は、主にシルト岩で、砂岩との互層や白色の凝灰岩の挟在が認められた。これらの堆積岩層は南海トラフの海溝充填堆積物がオフスクレーピングによって付加したものと解釈される。潜航地点の近くを通る反射法地震波探査断面では、デコルマ自身が前縁断層となり海底面に達する構造を示す。付加プリズム先端部で採取されたシルト岩は比較的良好に固結している。圧密された堆積層がデコルマの変位により露出しているものと考えられる。

キーワード：南海トラフ, 冷湧水, 付加プリズム, 化学合成生物群集, 活断層

Structure and cold seep of the Nankai accretionary prism off Kumano - Outline of the off Kumano survey during YK01-04 Leg 2 Cruise-

Juichiro ASHI*¹ Shin'ichi KURAMOTO*² Sumito MORITA*³ Urumu TSUNOGAI*⁴
Shusaku GOTO*⁵ Shigeaki KOJIMA*¹ Takuji OKAMOTO*⁶ Toyoho ISHIMURA*⁴
Akira IJIRI*⁴ Tomohiro TOKI*⁴ Shingo KUDO*⁴ Satoko ASAI*⁷ Motoo UTSUMI*⁸

Seafloor survey using submersible "Shinkai 6500" was conducted to understand relationship between fluid circulation and prism growth. Chemosynthetic biological communities were observed along three major fault scarps suggesting

* 1 東京大学海洋研究所
* 2 産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門
* 3 石油公団石油開発技術センター
* 4 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学科
* 5 東京大学地震研究所
* 6 広島大学生物圏科学研究科
* 7 東海大学海洋学部
* 8 筑波大学農林工学系
* 9 Ocean Research Institute, University of Tokyo (ORI)
* 10 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
* 11 Technology Research Center, Japan National Oil Corporation (JNOC, TRC)
* 12 Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University
* 13 Earthquake Research Institute, University of Tokyo (ERI)
* 14 Hiroshima University
* 15 School of Marine Science and Technology, Tokai University
* 16 Agricultural and Forest Engineering, Tsukuba University

fluid expulsion along the fault planes. The exposures of the scarp are mainly composed of highly tilted alternations of sandstone and siltstone with light-colored tuff. These sequences are regarded as accreted trench-fill sediments by off-scraping. A seismic reflection profile beside our survey area indicates that the decollement plane is exposed at the trough floor as a first thrust. Siltstones collected from the prism toe are relatively consolidated. Exposure of consolidated rocks suggest considerable amount of displacement along the first thrust.

Keywords : Nankai Trough, Cold seep, Accretionary prism, Chemosynthetic biological community, Active fault

1. はじめに

南海トラフ付加プリズムは、沈み込む海洋プレートの起伏や堆積層の違いなどによってデコルマの発達が異なり、場所ごとに様々な形態を示す。それらは南海トラフにおける巨大地震の震源断層域として提唱されている5つのドメインに対応しており、地震発生と付加プリズムの構造の密接な関係を示唆している。また、近年、沈み込み帯における流体の役割が注目され、流体の起源と排出経路の解明は、付加プリズムの成長プロセス、物質循環、さらには地震発生プロセスを議論する上で非常に重要である。

YK01-04航海では、Leg 1の伊豆小笠原航海とLeg 2の駿河湾・南海トラフ航海が行われ、さらにLeg 2(2001年5月29日～6月11日)は熊野沖、室戸沖、駿河湾の各潜航調査に分

かれている。熊野沖の潜航調査の目的としては、1)付加プリズムを構成する岩石の年代より、その成長プロセスを明らかにする、2)化学合成生物群集を目印とした冷湧水の発見とその地点における湧水の採取・化学分析・地温測定により、流体の起源とフラックスを明らかにする、3)湧水地点およびその周辺の貝、チューブワーム、微生物、有孔虫の研究により、その地理的分布を求め、流体の化学組成、水深、底質、テクトニクスとの関係を明らかにする、が挙げられる。小論では、熊野沖の「しんかい6500」による潜航調査の概要と付加プリズムの成長に関する地質学的な議論を行うにとどめる。なお、生物・微生物学的な研究の内容については、予察的な報告(小島ほか, 2001; 石村ほか, 2001; 岡本ほか, 2001)を参照されたい。

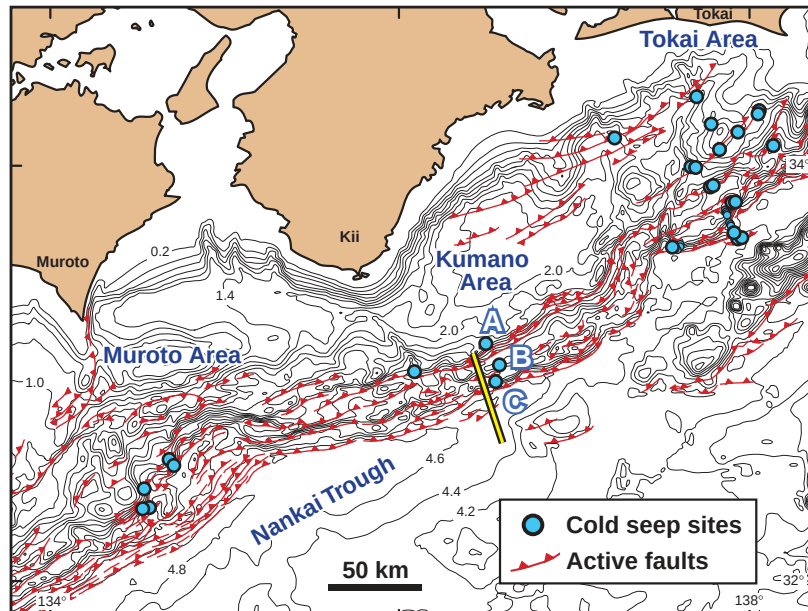


図1 南海トラフの海底地形図。熊野沖の付加プリズム斜面においては、A, B, Cで示す3点で化学合成生物群集が見つかった。これまでに分かっている冷湧水と活断層の分布を合わせて示す。東海沖と室戸沖の冷湧水の詳細については、それぞれ東海沖海底活断層研究会(1999), Kuramoto et al. (2001)を参照。海底活断層の分布は、芦ほか(1999)による。

Fig. 1 Bathymetry of the Nankai Trough. Chemosynthetic biological communities were observed at the slope indicated by "A", "B" and "C". Distributions of cold seeps and active faults are also shown. See details of cold seeps off Tokai (The Research Group for Active Submarine Faults off Tokai, 1999) and Muroto (Kuramoto et al., 2001). Distributions of active faults in the Nankai Trough are modified from Ashi et al. (1999).

2. 調査海域

熊野灘沖海域の付加プリズムの地形的な特徴としては、水深4300mのトラフ底より、水深2000mの前弧海盆域まで、比較的狭い範囲(幅約30km)に付加プリズム斜面が分布することである(図1)。このため、前弧海盆である熊野舟状海盆がトラフ軸側に広く張り出す形態を示す。沈み込むフィリ

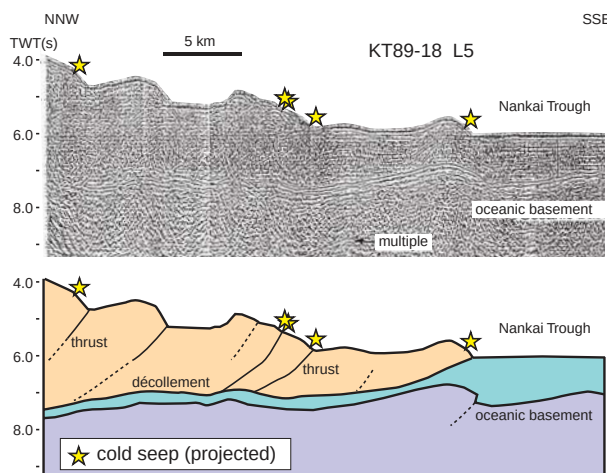


図2 潜航調査地点西方の反射法地震波探査断面(Yusuf, 1991)。冷湧水の分布を投影して示す。

Fig. 2 Seismic reflection profile west of the diving survey transect (Yusuf, 1991). Distributions of cold seeps are projected.

ピン海プレート地形は、銭洲海嶺の続きとみられる小さな高まり(海底からの比高400m程度)は存在するものの、比高1000mを越える東海沖ほどの大きな高まりは存在しない。付加プリズム斜面に分布する海底活断層は下部、中部、上部の大きく3帯に分かれて分布する。前弧海盆域にも東北東-西南西方向の活断層が見られ、それに沿った泥火山には潜航調査によって化学合成生物群集の分布が明らかとなっている(Kuramoto et al., 2001)。

熊野沖海域は、東海沖や室戸沖に比べて、これまでに行われた地質・地球物理探査の数は限られている。調査海域近くの反射法地震探査断面(加藤ほか, 1983; Yusuf, 1991)を見ると、デコルマから派生するスラストによって付加プリズムが発達している様子が認められる(図2)。付加プリズム先端部の形態をみると、四国沖から報告されているようにデコルマがトラフ底に伸びずに、その先端部がスラストとして海底面に達する特徴を有する。また、最近の海洋科学技術センターによる反射法地震探査では、デコルマから派生したOOST(アウト・オブ・シーケンス・スラスト, 序列外スラスト)が付加プリズム全体を切って、大きな断層崖を形成していることが明らかになった(朴ほか, 2001)。1944年の東南海地震では、地震動を起こす高速破壊がこの海域北方で生じていることが分かっている(Kanamori, 1972)。この海域の付加プリズム斜面には、4つの大きな断層崖の発達が発見された(図1)。潜航地点は、前弧海盆からトラフ軸に向かって、水深

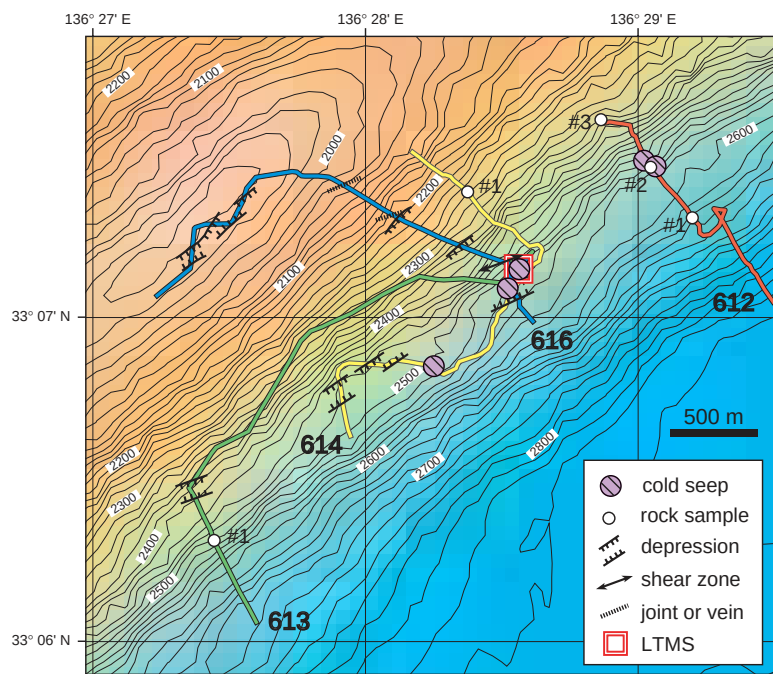


図3 断層崖A地点の潜水調査の航跡図。崖途中にある平坦面(テラス)に化学合成生物群集が発見された。長期温度計測装置(LTMS)は、流体の湧出量およびその変動を明らかにするためにバクテリアマット分布域に設置した。

Fig. 3 Ship tracks at the fault scarp A. Chemosynthetic biological communities were observed at the terrace of the middle slope. LTMS (Long-term Temperature Monitoring System) is recording budget and variation of up-dip fluid flow at the bacterial mat area.

約2500m, 3500m, 4000mの断層崖(以下ではそれぞれA, B, C地点と呼ぶ)である。

3. 潜航調査結果

3.1. 断層崖A地点

熊野沖A地点: 付加プリズムの上部斜面の水深2500m付近の断層崖において, 4回の潜航(第612, 613, 614, 616潜航)を行った(図3)。断層崖は, 上下2段の急崖に分けられ, 間には平坦もしくは緩斜面(以下, テラス)が分布する。テラスの深度は北東部で水深2580m, 南西部で水深2450mである。

崖下の平坦面と下段の崖は, シルト岩の露頭がテラス直下に見られる以外は全体が泥質堆積物で覆われている。

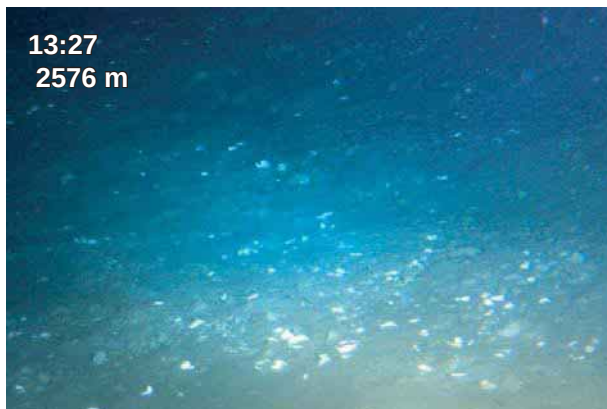


図4 断層崖A地点のテラスに広く分布する貝殻片。周辺には生きたチューブワーム, バクテリアマットが分布する。第612潜航, 水深2576m。

Fig. 4 Shell fragments at the terrace of the fault scarp A. Living tube worms and bacterial mats are also distributed. Dive #612, Water depth is 2576m.



図5 海側に急傾斜する砂泥互層。断層による変形が認められる。第612潜航, 水深2450m。

Fig. 5 Alternation of sandstone and mudstone. Strata are partly deformed by faulting. Dive #612, Water depth is 2450 m.

所々に露出しているシルト岩の一部は崖錐性のブロックと考えられる。また, 下段の崖斜面には, しばしば2枚貝の貝殻が認められた。テラスは泥で覆われており, 北西側に緩く傾斜する。第613, 614, 616潜航ルートでは, 北東-南西方向に伸びる比高数メートルの地溝状のへこみがテラスにおいて見られた。調査域のテラス中央部では, バクテリアマットとみられる白色の変色域とシロウリガイの小コロニーが認められた。

第612潜航ルート上のテラスでは, 生きた化学合成生物群集は認められず, シロウリガイとみられる貝殻が散在する。このルートでは, テラスを少し登った地点で, バクテリアマット, 生きたチューブワーム, 貝の這い跡, シロウリガイの貝殻が見られた(図4)。この地点は, 急峻な崖の基部に位置し, 海底面は崖錐堆積物で覆われている。貝殻は様々なサイズの礫を含む泥と混在化しており, コロニー状の貝殻の密集は認められない。貝殻片の混じった泥の分布は潜水艇から確認できる範囲(約10m)において連続して分布する。上段の崖は急峻で, 侵食谷の壁面には砂泥互層が露出する(図5)。地層は海側に高角度で傾斜している。砂泥互層の上位には生物, あるいは底層流によって表面に穴が沢山空いた半固結の泥岩層が露出する。

この地点の断層崖の上部は北東-南西方向のリッジを形成しており, 第616潜航では頂部までの観察が行われた。上段の斜面には, 所々に剪断によるとみられる変形, および脈状の構造による東北東-西南西方向のリニアメントが認められた。頂上部は泥に覆われた平坦な面を成しており, その海側の縁には高まりの伸びの方向とほぼ平行な地溝状のへこみの連続が認められた。

3.2. 断層崖B地点

水深3500m付近の比高約500mの断層崖において第615潜航が行われた(図6)。着底点は崖南方150mの地点で, 平坦な泥の海底面からなる。崖下は, 崖錐性の泥質堆積物からなり, その上端部において変色域が認められた。崖錐堆積物より上は, 露岩とそれを薄く覆う堆積物が水深3260m付近まで連続する。露頭はシルト岩および砂岩からなる。水深3250m付近から上部の斜面は, 露岩の間の堆積物が次第に厚くなり, バクテリアマット, チューブワームが認められるようになる。さらに上部斜面では, シロウリガイからなる小コロニー(図7), バクテリアマット, チューブワームが点在する。斜面上の転石の側面, 特に下側は, しばしばバクテリアの付着によって白色~黄色に変色している。貝のコロニーは, 一定の角度で傾斜する斜面ではなく, 小さな窪みにおいて露岩や転石に寄り添うように分布することが多い。コロニーにおける貝の数は10個体を越えることは少ない。また, 貝の這跡はほとんど認められない。これらの冷湧水の存在を示す生物群集は, 水深3100m以浅になると認められなくなる。

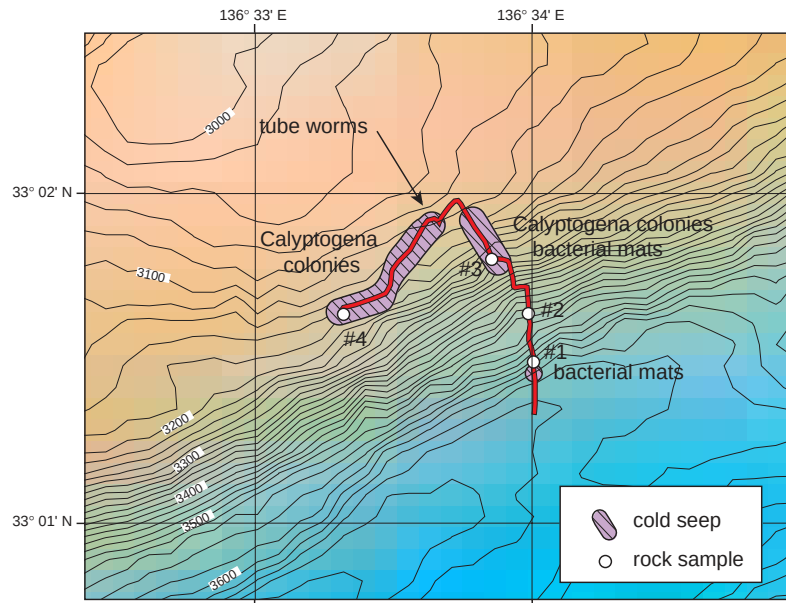


図6 断層崖B地点の潜水調査の航跡図。断層崖の基部にバクテリアマット、上部斜面には広くバクテリアマット、シロウリガイコロニー、チューブワームが認められた。

Fig. 6 Ship tracks at the fault scarp B. Bacterial mats were observed at the base of the fault scarp. Bacterial mats, Calyptogenia colonies and tube worms were distributed at the upper slope.

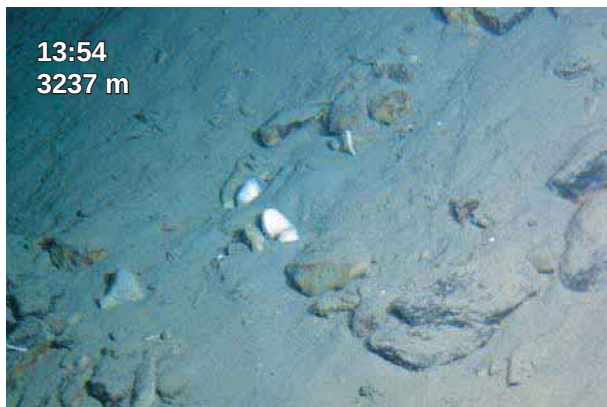


図7 断層崖B地点の斜面に見られるシロウリガイの小コロニー。生きた貝は斜面の小さな凹みに堆積した泥質層に認められる。第615潜航、水深3237m。

Fig. 7 Small Calyptogenia colony at the fault scarp B. Living shells are observed at the muddy sediment filled on the small depression on the slope. Dive #615, Water depth is 3237 m.

3.3. 断層崖C地点

水深4000m付近の比高約700mの断層崖において第618潜航が行われた(図8)。着底点は平坦なトラフ底で底質は泥からなる。潜航ルートに沿ってトラフ底には2つの島状の高まりがあり、いずれも固結したシルト岩からなる。崖の下部は巨礫を含む崖錐堆積物からなる。水深約4380m以浅では、固結したシルト岩の露頭が連続し(図9)、切り立った崖と陸側に緩く傾斜斜面堆積盆地が繰り返す。地層は、白

色の凝灰岩層をしばしば含む。所々に斜面に平行な畝状の地形が認められ、地すべりに伴う変形と考えられる。地すべりによる円弧状の滑落崖も多数発達する。水深3870mでは、泥からなる平坦面上に白色のバクテリアマットとシロウリガイとみられる貝が認められた。水深3840mでは崖に二枚貝の合弁した貝殻が見られ、その上の平坦面で、バクテリアマットによる白色のスポット状の変色域が数ヶ所見られた。しかし、貝殻の分布は非常に狭い範囲に限られる。

4. 長期温度計測装置の設置

海底からの流体湧出の長期的な変動を明らかにするため、本調査では冷湧水地点に長期温度計測装置の設置を行った。設置場所は、第613および第614潜航において確認されたバクテリアマットで、第616潜航によって長期温度計測装置を設置した(後藤ほか, 2001)。装置は2本のプローブを有し、一方を直径約40cmのバクテリアマットの中央部に、他方を約3m離れたバクテリアマットのない地点に配置した。計測間隔は10分で、データは最大2年まで記録される。

5. 岩石の間隙率分布

海底の露岩から採取した堆積岩の間隙率を測定した。測定は陸上においてヘリウム圧入式ピクノメーターおよび電子天秤を用いた。結果を潜航域の断面地形図上の位置に対応させて示す(図10)。付加プリズム表層の間隙率は前縁部において最も小さく、陸側に向けて徐々に増加する傾向が下部から中部斜面にかけて認められる。

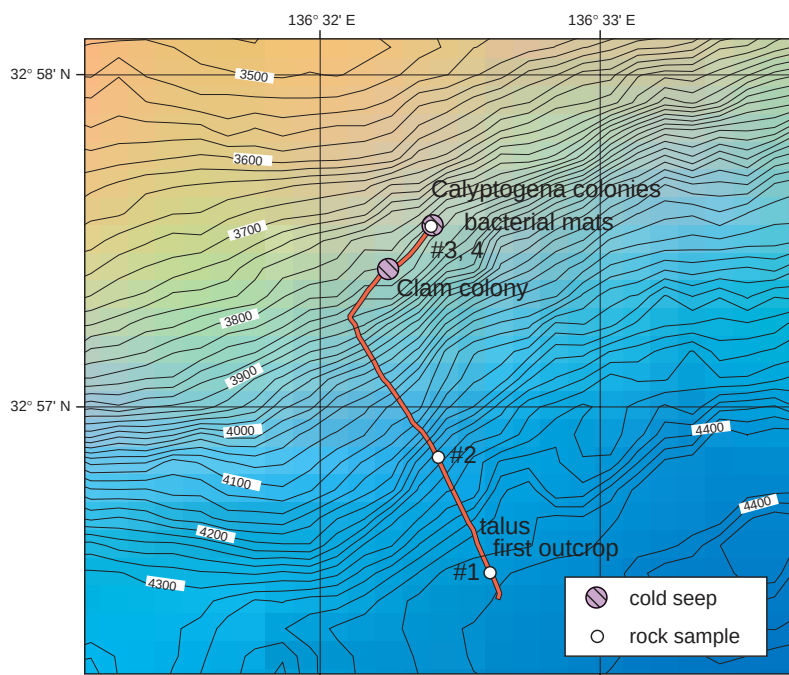


図8 断層崖C地点の潜水調査の航跡図。トラフ底は泥質堆積物で覆われた平坦面で、斜面の基部には固結したシルト岩の露頭が認められた。

Fig. 8 Ship tracks at the fault scarp C. The trough floor is smooth and covered by muddy sediments. Siltstone outcrops are exposed at the base of the fault scarp.

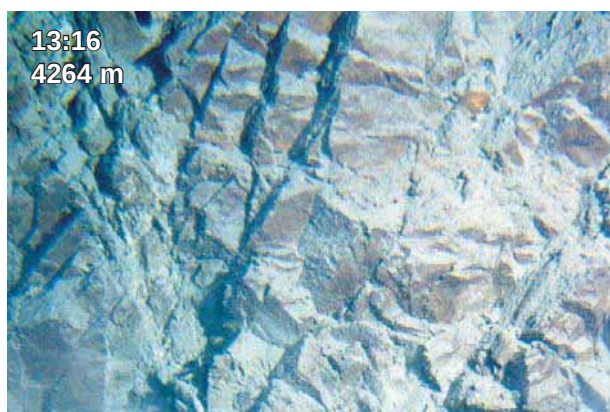


図9 断層崖C地点の下部斜面に露出するシルト岩の露頭。第618潜航、水深4264m。

Fig. 9 Siltstone outcrop exposed at the lower slope of the fault scarp. Dive #618, Water depth is 4264m.

6. 考察

6.1. 冷湧水の分布

熊野沖の付加プリズムにおいて3つの主要な断層崖で潜水調査を行った結果、いずれの崖においても冷湧水の存在を示す化学合成生物群集が発見された。

断層崖A地点では、4回の潜航によって崖の途中に存在するテラス周辺で化学合成生物群集が見いだされた。「しんかい6500」に装備されたγ線スペクトル測定装置の解析によると、いずれの潜航においても湧水点においてガンマ

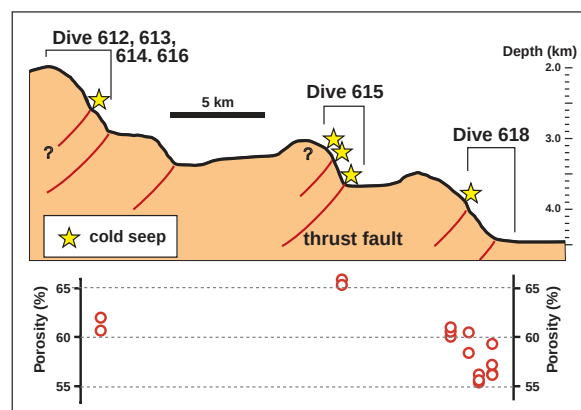


図10 付加プリズム斜面の地形断面と露頭から採取したシルト岩の間隙率の分布。潜水調査の範囲と冷湧水の分布も合わせて示す。

Fig. 10 Topographic cross section of the accretionary prism and porosity data of the siltstones collected from the outcrops. Diving survey areas and distribution of cold seeps are also shown on the cross section.

線強度の著しい増加、トリウム・ウラン系列の物質の急激な増加が認められた(服部ほか, 2001)。特に第612潜航と第613潜航によって見いだされた湧水は約1km離れているが、共に南海トラフ域ではこれまでで最高のガンマ線強度を示し、両地点が一連の湧水帯であることを示唆する。この地点の約50km西方の潮岬海底谷では、シロウリガイコロニーが発見されており(安間ほか, 2001)、同一の断層の西方延

長部と推定される。

流体の化学組成に関する研究としては、柱状試料の間隙水の抽出と時系列採水器による海水の採取が行われている。予察的な分析によると、湧水地点では高濃度のメタンガスが検出され、メタンガスの炭素の安定同位体比は生物過程による比較的浅所からのガスの供給が指摘されている(角皆ほか, 2001)。

断層崖B地点は、急峻な斜面が連続するため、化学合成生物群集の分布はかなり海底地微細地形に影響を受けている。すなわち、斜面の凹地には泥質堆積物がしばしば溜まっているが、この部分にシロウリガイの小コロニーが発達していることが多い。化学合成生物群集の見られない斜面においても湧水活動が行われている可能性は高い。

断層崖C地点では、化学合成生物群集が斜面の上部にわずかに認められるだけある。また、断層崖AおよびBに多数分布する貝殻片もほとんど見られないことから、湧水活動はあまり活発でないと言える。

6.2. 付加プリズムの構造

熊野沖の付加プリズム先端の岩石は56%という低い間隙率を示す。同じ付加プリズム先端で掘削された室戸岬沖の深海掘削孔Site 808では、この値は深度100~200mに存在する岩石に相当する(図11)。トラフ底に堆積直後の地層が付加するプリズム先端の表層部にしては、熊野沖の間隙率の値は低いと言える。東海沖などの湧水域においては、しばしば炭酸塩クラストが認められるが、熊野沖では炭酸塩のセメント作用は顕著ではない。したがって、低い間隙率は圧密による岩石化を示しており、一度埋没され圧密を受けた岩石が、前縁部の逆断層の活動によって露出している可能性が高い。付加プリズム前縁部での固結岩の露出は、天竜海底谷が南海トラフに合流する地点においても報告されている(川村ほか, 1999)。本調査トランセクトに隣接する反射法地震波探査断面では、デコルマ自身が前縁断層となり海底面に達する構造を示している(図2)。デコルマに沿った大きな変位によって固結岩が露出した可能性が高い。

付加プリズム上部斜面に分布する砂泥互層は、もともとトラフ底に堆積したタービダイトとみられる。それが、付加・隆起して現在の深度に露出したのであろう。現在ナノ化石を用いた年代の推定に基づき付加プリズムの成長過程の検討を行っており、結果は別途報告する予定である。

謝辞

本研究航海を行うにあたり、今井司令をはじめとする「しんかい6500」運航チーム、ならびに湯川船長をはじめとする母船「よこすか」乗組員の皆さまには、調査行動の全般にわたり御尽力を賜った。日本海洋事業(株)の青木美澄氏、今村牧子氏には、観測技術員として、船内での研究支援・データの整理等多岐にわたり大変お世話になった。研究者一同心より感謝します。

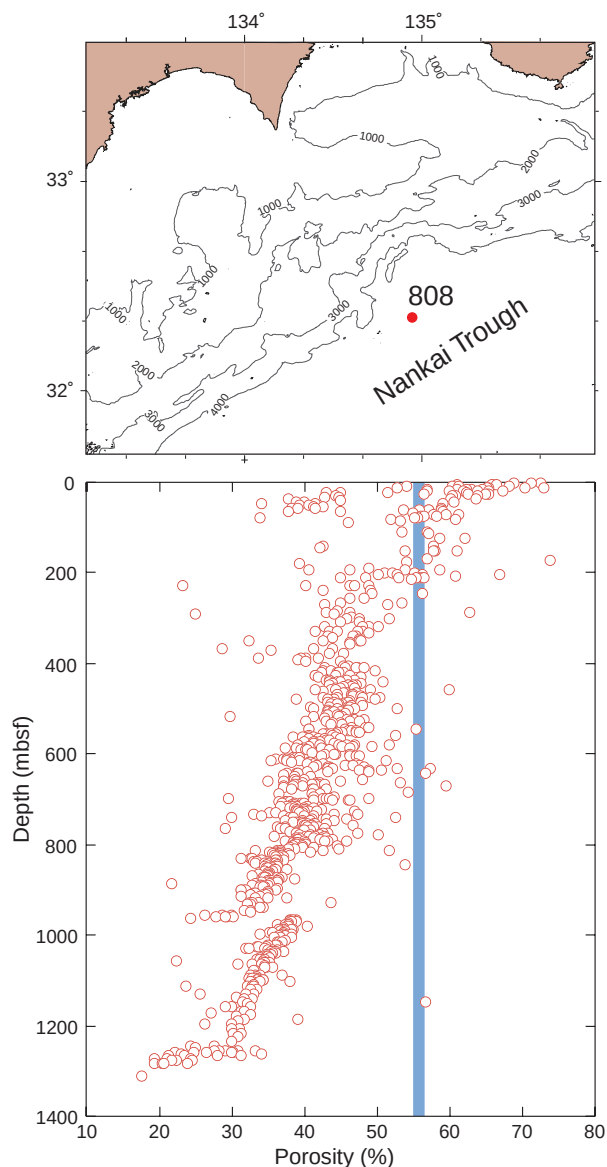


図11 国際深海掘削計画第131節航海のSite 808における間隙率の深度変化(Taira, Hill, Firth et al., 1991)。

Fig. 11 Depth distributions of porosities at ODP Site 808 (Taira, Hill, Firth et al., 1991).

引用文献

- 1) 芦 寿一郎・岡村行信・倉本真一・徳山英一, "南海トラフとその陸側斜面の地質構造—付加プリズム・前弧海盆の構造発達—". 地質ニュース, 541, 17-24 (1999).
- 2) 安間了・川上俊介・山本由弦, "潮岬海底谷沿いの構造と白ウリ貝コロニーの産状", 第18回しんかいシンポジウム予稿集, 94-95 (2001).
- 3) 石村豊穂・角皆潤・蒲生俊敬・長谷川四郎, "南海トラフ冷湧水域における底生有孔虫の特性", 第18回しんかいシンポジウム予稿集, 102 (2001).
- 4) 岡本拓土・長沼毅・角皆潤・倉本真一, "南海トラフにおける広塩菌の分子系統学的解析", 第18回しんかいシンポジウム予稿集, 103 (2001).

- 5) 加藤 茂・佐藤任弘・桜井 操, "南海・駿河・相模トラフのマルチチャンネル反射法音波探査", 水路部研究報告, 18, 1-23 (1983).
- 6) Kanamori, H., "Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes", *Phys. Earth Planet Inter.* 5, 129 (1972).
- 7) 川村喜一郎・小川勇二郎・藤倉克則・服部陸男・町山栄章・山本智子・岩井雅夫・広野哲朗, "「かいこう」が見た天竜海底谷出口付近の南海付加体最前縁部の地形及び地質構造", *JAMSTEC深海研究*, 14, 379-388 (1999).
- 8) Kuramoto, S., Ashi, J., Greinert, J., Gulick, S., Ishimura, T., Morita, S., Nakamura, K., Okada, M., Okamoto, T., Rickert, D., Saito, S., Suess, E., Tsunogai, U., and Tomosugi, T., "Surface Observations of Subduction Related Mud Volcanoes and Large Thrust Sheets in the Nankai Subduction Margin; Report on YK00-10 and YK01-04 Cruises", *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, 19, 131-139 (2001).
- 9) 小島茂明・太田秀・山本智子・三浦知之・山口寿之・藤原義弘・藤倉克則・橋本惇, "ミトコンドリアDNA塩基配列に基づくハオリムシ類の進化過程の研究", 第18回しんかいシンポジウム予稿集, 80-81 (2001).
- 10) 後藤秀作・芦寿一郎・倉本真一・森田澄人・浅井聡子・山野誠, "熊野沖南海トラフ付加体での長期温度計測装置の設置", 第18回しんかいシンポジウム予稿集, 96-97 (2001).
- 11) 東海沖海底活断層研究会 "東海沖の海底活断層", 東京大学出版会 (1999) 174.
- 12) 角皆潤・土岐知弘・井尻暁・石村豊穂・工藤新吾・蒲生俊敬・内海真生・芦寿一郎・倉本真一・森田澄人・YK01-01航海乗船研究者一同, "「よこすか」「しんかい6500」YK01-04次航海における地球化学的冷湧水研究の結果", 第18回しんかいシンポジウム予稿集, 183 (2001).
- 13) 服部陸男・芦寿一郎・岡野眞治, "南海トラフの地質構造と海底 γ 線解析結果の解釈", 第18回しんかいシンポジウム予稿集, 100-101 (2001).
- 14) 朴 進午・鶴哲郎・小平秀一・金田義行, "Splay thrust fault in the eastern Nankai Trough margin: Result of KAIREI multichannel seismic survey (KR01-08)", 第18回しんかいシンポジウム予稿集, 21-22 (2001).
- 16) Taira, A., Hill, I., Firth, J. and ODP Leg 131 shipboard scientists. "Proc. ODP, Init. Rept. 131", Ocean Drilling Program, Collage Station, TX (1991).
- 15) Yusuf Surachman Djajadihardja, "Multichannel Seismic Reflection Study of the Central Nankai Trough", Master thesis, the University of Tokyo (1991).

(原稿受理:平成13年12月29日)