

日本海東縁，奥尻海嶺および周辺の大地震と海底変動

竹内 章^{*1} 岡村 行信^{*2} 加藤 幸弘^{*3}
池原 研^{*2} 張 勁^{*1} 佐竹 健治^{*2}
長尾 哲史^{*1} 平野 真人^{*1} 渡辺 真人^{*2}

1993年北海道南西沖地震(M7.8; 42°47'N-139°12'E)は日本海東縁の中部奥尻海嶺直下で発生した。ODP796掘削地点を含む震源域とその周辺海域において、1999年6月、有人潜水船「しんかい16500」による7回の潜航調査を行った。

同地震の震源域(=津波波源域)となった中部奥尻海嶺では、とくにODP796掘削地点の平坦面では著しい表層自破砕が生じており、一部の開口割れ目にはバクテリアマットも確認された。

一方、19世紀以降、日本海東縁で大地震の空白域となっている松前海台付近では、新鮮な自破砕物は認められず、コアで採取した表層堆積物のテフラ年代から活断層の最新活動は10世紀以前に遡ると推定された。震源域周辺については、後志トラフの渡島半島側斜面で、近傍の地震により繰り返し海底デブリフローを起こしていること、また寿都海底谷は後志トラフで確認されている1993年の地震性タービダイトの通過経路になったことなどが明らかになった。

このほか、海底環境に関しては、第485潜航により茂津多沖陸棚斜面で巨大バクテリアマット群が、また第480潜航により松前海台西南の活断層でチムニー群が発見され、バクテリアのサンプルが採集された。

従前の潜航結果と今回の調査から、津波を生起する地震動であっても、その衝撃による未固結堆積層の高速破壊現象(自破砕)が広範囲に起こり、またそれが地震時海底地変の特徴であることが明確になった。意外なことに、同地震余震域外(第485潜航:松前海台西北の伏在活断層圧縮バルジ)でも新鮮な自破砕部が観察され、1993地震で副次的に活動した可能性が考えられる。地震後6年の経年変化として、懸濁物の沈殿による開口割れ目の埋積や、バクテリアマットの衰弱があげられる。

キーワード:北海道南西沖地震,海底活断層,バクテリアマット,テフラ,地震性堆積物

Large earthquakes and bottom disturbances in the Okushiri ridge along the eastern margin of Japan Sea

Akira TAKEUCHI^{*4} Yukinobu OKAMURA^{*6}
Yukihiro KATO^{*3} Ken IKEHARA^{*5}
Jin ZHANG^{*4} Kenji SATAKE^{*5}
Tetsufumi NAGAO^{*4} Masato HIRANO^{*4}
Mahito WATANABE^{*5}

The 1993 Off-Southwestern Hokkaido earthquake (M7.8, 42°47'N-139°12'E) occurred beneath the central Okushiri Ridge along the eastern margin of Japan Sea. In 1999, we conducted seven dives using manned submersible vehicle 'SHINKAI 6500' in order to investigate co-seismic responses of sea-bottom in and around the epicenter area, including ODP site 796. The results are as follows:

* 1 富山大学理学部
* 2 地質調査所
* 3 海上保安庁水路部
* 4 Toyama University
* 5 Geological Survey of Japan
* 6 Maritime Safety Agency

Integrating with the previous studies, our submersible observations elucidated that a strong shock of tsunamigenic earthquake would cause quick brecciation of unconsolidated surface sediments as a common coseismic response of sea-bottom. Spending six years since the 1993 earthquake, suspended mud filled narrow fissures and thin film of dusty deposits covered rubble fields, prostrating bacteria mats. Unexpectedly, dive #486 observed such disturbance on a gentle pressure ridge in the southern extension of the western Okushiri Ridge. Further south to the southwest of Matsuma'e Plateau, no fresh disturbance but carbonate chimneys were observed along a young active fault, whose latest activity was estimated before 10th century according to tephro-chronology of the core-samples of sedimentary cover.

Outside of the epicenter area, three dives examined co-seismic source and transportation process of turbidites and debris flows on the eastern wall of Shiribeshi Trough, where dive #485 found wide-spreading bacteria mats ecologically indicating a unique condition.

Key words : Hokkaido Nansei-oki earthquake, submarine active faults, bacteria mats, tephra, earthquake sediments

1. はじめに

日本海東縁部ではマグニチュードが7.5を超える大地震が系統的に発生してきた(図1)。19世紀以降に発生したものを北から順に挙げると、1940年積丹半島沖地震(M 7.5), 1993年北海道南西沖地震(M 7.8), 1983年北海道南西沖地震(M 7.7), 1833年庄内沖地震(M 7 1/2), 1964年新潟地震(M 7.5)となる。また、1971年にはサハリン沖でM_s 6.9の地震が発生している。これらの地震の破壊領域を地図上に示すと、それぞれの震源域が完全には重ならず、空白域が残されている(図1; Ohtake, 1995)。北海道南西沖地震と日本海中部地震との間にも空白域の一つが残されている。

地質構造からも日本海東縁には多くの活断層の分布が知られ、大部分の大きな地震はこれらの活断層に沿って発生している(岡村ほか, 1998)。北海道南西沖地震及び日本海中部地震の震源域は、日本海東縁でも最も顕著な活断層帯である奥尻海嶺の西側に沿って分布するが、2つの震源域の間には松前海台とその上に形成された第四紀火山の渡島大島があって、この間に奥尻海嶺は南に向かって尖滅する傾向になる。これとは相補的に、奥尻海嶺の西側で、松前海台の松前海台の西縁から北北東及び南南西方向の日本海盆に伸びる顕著な活断層が認められる。

日本海盆の東縁を画する奥尻海嶺の地球科学的調査研究は、1983年初頭に日本海東縁新生プレート境界説(中村, 1983; 小林, 1983)が発表され、5月に日本海中部地震が発生し同説による予測が的中したことによって刺激されて本格化した。有人潜水船を用いた一連の潜航調査は、国際深海掘削計画(ODP)により実施された同海嶺中部の試錐(Site 796: 1989年6月, 掘削長465m)を契機に、主として日本海の形成過程の解明と日本海東縁新生プレート境界説の検証を目的として、これまで10年余にわたり実施されてきている。この間、やはり上記仮説による予測通り1993年に北海道南西沖地震が発生し、震源域内にある奥尻島では地震津波や火災による甚大な被害を出した。このため、地震直後から震源域を中心とした海域において、関係諸研究機関の協力体制による多方面からの

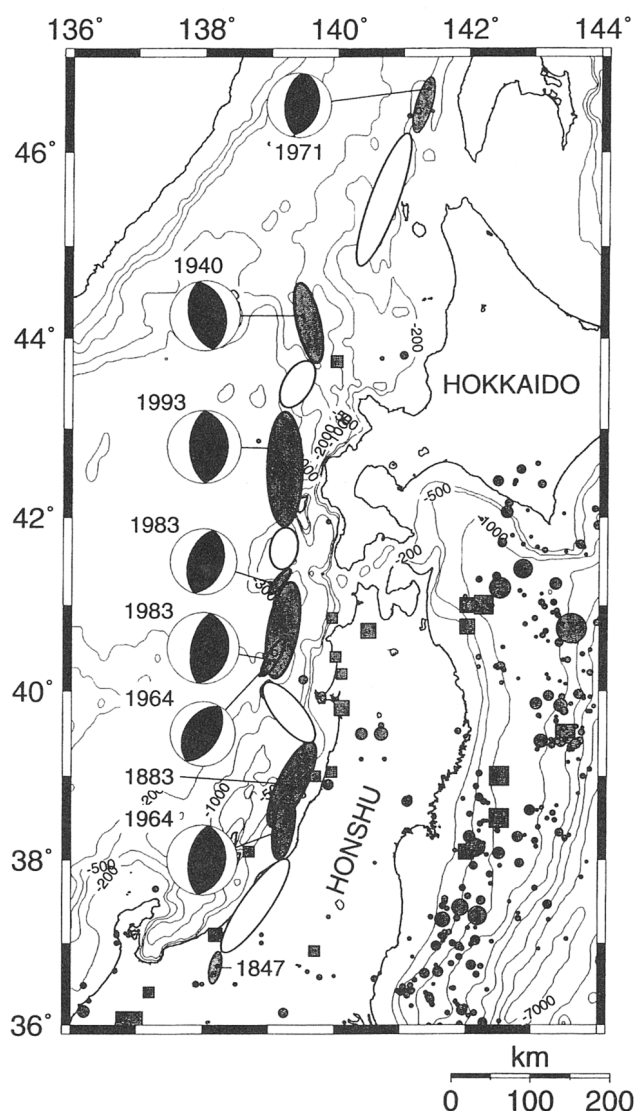


図1 日本海東縁に発生した19世紀以降の主要な地震の震源域及びメカニズム

Fig.1 Source area and mechanism of major earthquakes along the eastern margin of Japan Sea in 19th and 20th centuries.

調査研究が集中的に実施され、種々の新しい知見とともに基本的データの蓄積が行われた。

このような位置づけのもとに、「よこすか/しんかい6500」第99-5次航海第2, 3 節(日本海行動: 1999年6月13日函館出港, 同年6月28日函館入港)は, 日本海東縁北海道南西沖日本海において, 奥尻海嶺東斜面・後志トラフ・松前海台西方などの海域を含む有人潜水調査船「しんかい6500」により一連の潜航調査(#480~#486の7潜航)を実施するとともに, マルチビーム測深による広域地形調査を行った。調査海域の範囲は, 北緯41度00分および43度30分, 東経138度30分および140度00分で囲まれる北海道南西沖日本海であり, さらに地形地質から以下のように3海域に分けられ, 「しんかい6500」第480潜航から第486潜航までの7潜航が実施された(図2)。

松前海台西方 松前海台の西縁から奥尻海嶺西斜面にかけて, 北北東方向に断続的に約70 kmにわたって延びる逆断層が存在する。この断層は, 1983年日本海中部地震と1993年北海道南西沖地震の震源域の間に位置し, 両震源域間の地震空白域を埋める地震を起こす可能性がある。第480潜航(岡村行信)は, 松前海台南西近傍の地域を

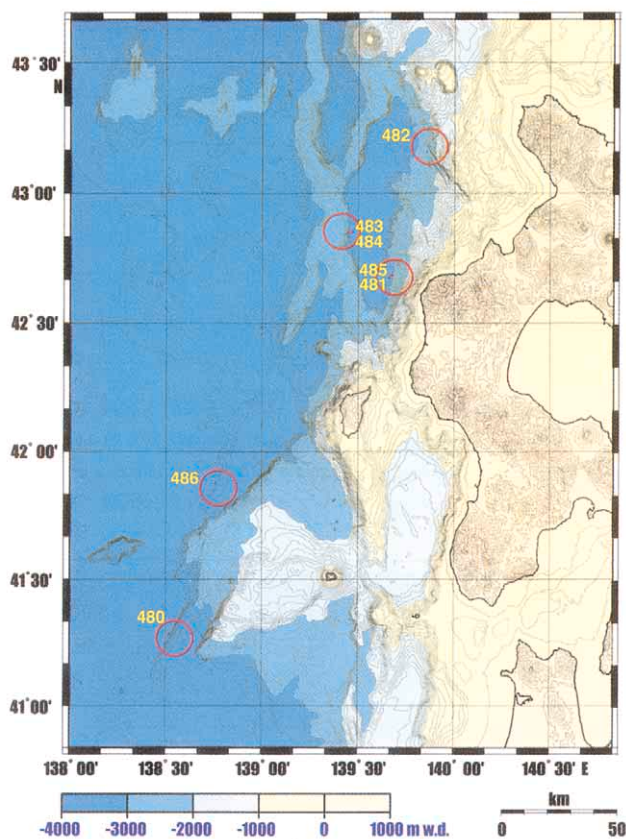


図2 調査海域位置図

航調査地点を水路部による海底地形図上に示す。航海中の広域調査で得られた海底地形データも表示した。

Fig. 2 Index map of SHINKAI6500 dive sites. New bathymetric data by Legs 2 and 3 of SHINKAI/YOKOSUKA Cruise 99-05 are also displayed in the HDJ bathymetric map.

調査し, この断層の活動性と1741年寛保の津波を起こした可能性について検討した。また第486潜航(佐竹健治)は, 松前海台北西方において, この逆断層に関係すると見られる構造性丘陵を調査した。

渡島半島沖 第481, 485潜航(加藤幸弘)は, 1993年北海道南西沖地震の際, 茂津多岬で発生した斜面崩壊による堆積物の海底流下過程について, 陸棚斜面下部において崩落斜面とその基部の微細表層地形を観察した。第482潜航(池原 研)も同地震で発生した後志トラフに堆積したことが判明しているタービダイトの供給過程について, 寿都海底谷出口にある海底扇状地上のロープと考えられる微高地から海底谷底を横断後, 海底谷右岸側壁に沿って上昇する調査を行った。

奥尻海嶺東斜面 1993年北海道南西沖地震の震源域においては, 震源域中部および南部において潜航調査が密に実施され, 起震断層が海底に到達したことによる海底地変が発見・観察されている。第483潜航(竹内 章)と第484潜航(張 勁)は, 同震源域北部で本震の震央直近東方に位置する奥尻海嶺東斜面において, ODP796地点を通過するルートで2潜航の連続調査により, 地震性地盤変状を観察した。

以上の各潜航は, 共通して斜面崩壊や変動地形・新期堆積物の詳細な目視観測・映像記録, 地質標本のサンプリング, 泥中温度計測, 採水, 放射線計測などを行った。本航海を通じて, 乗船研究者全員が協力して潜航調査の支援や広域海底地形調査, サンプル処理などを行う体勢をとった。このため, 本稿によりこれらの成果の概要を一括して報告する。

2. 松前海台西方海域(日本海盆東縁)

渡島半島の西方では, 1741年に寛保の津波と呼ばれる大きな津波災害が知られている。この津波は, 渡島大島の大規模な崩壊によって生じたという考えと松前海台の西側に沿った地震という説がある。後者の説では, 松前海台の西縁に沿った津波波源域が推定されているが, その位置は松前海台の西側の活断層にほぼ一致する。これらの断層が最近も活動したかどうか, 或いは1741年の寛保の津波の原因と考えて良いかどうかを確認するために, 松前海台の北側と南側の2カ所で, 「しんかい6500」による潜航調査を実施した。

2.1 日本海盆東縁松前海台西南の活断層

第480潜航

実施日: 6月14日10:00 - 17:00

着底点: 41°17.119'N-138°30.508'E 水深3647m

離底点: 41°16.621'N-138°31.758'E 水深3297m

潜航研究者: 岡村行信(地質調査所海洋地質部)

パイロット: 鈴木晋一 コパイロット: 飯嶋一樹

第480潜航地点は、松前海台の西縁から南南西に伸びる1 - 2列の西落ちの逆断層群の一つで、その音波探査断面を図3に示す。この測線上には2つの断層が認められ、その累積変位量は西側のものが0.2-0.3秒、東側のものは約1.0秒に達し、地形にも明瞭に現れる(図4)。断層の東側には松前海台西縁の急斜面が認められるが、基盤の段差であってそれを覆う堆積物には最近の断層運動を示す変形は認められない。おそらく日本海が拡大した中新世に形成された断層崖であると推定される。

断層は日本海盆の基盤を覆う厚さ1.2秒以上の堆積物を切っており、断層両側の地層も反射面の特徴からほぼ対比できる(図3)。潜航地点は変位量の大きい東側の断層に伴う崖で、断層西側の平坦面から断層崖の中腹まで達した。音波探査断面では断層崖の下部は緩やかな斜面で、斜面途中から急に傾斜が大きくなる。そこには日本海盆を覆う堆積物が露出しているように見える。

潜航結果：断層崖の西側の平坦な海底に着底し、断層運動によって形成された斜面を東に上昇しながら、海底の観察及び試料の採取を行った。観察結果も含めた潜航ルートの平面図を図5に、断面図を図6に示す。断層崖

は緩やかな傾斜の下部斜面、緩やかな高まりと凹地が繰り返す中段テラス及び急傾斜する上部斜面に区分できる。

着底点は泥に覆われた平坦面で、柱状の堆積物試料(C1, 青)を得た。その基底には約3cmの厚さのテフラとその上に1cmに泥をはさんで厚さ約3cmのタービダイトが含まれている。テフラの年代は今のところ不明なので、タービダイトの年代も確定できない。着定点から斜面までは泥に覆われた平坦面である。斜面の手前で斜面の走向にほぼ平行な溝状の小規模な割れ目が断続的に2 - 3列観察されたが(図7)、ほとんど泥に覆われた状態で、地震によって形成された割れ目なのかどうかははっきりしない。

斜面の直前で岩石の破片などが散在するようになり、その直後に緩やかな下部斜面にさしかかった。下部斜面には泥岩が広く露出し、その表面には何らかの流れによって形成されたと考えられる斜面の傾斜方向の浅い侵食跡が多数認められた(図8)。泥岩露出域で、泥岩(R1)、採水及び柱状堆積物試料(C2, 緑)の採取を行った。比高にして約100m上昇した水深3550m付近で、緩やかな起伏を持った中段テラスに達した。

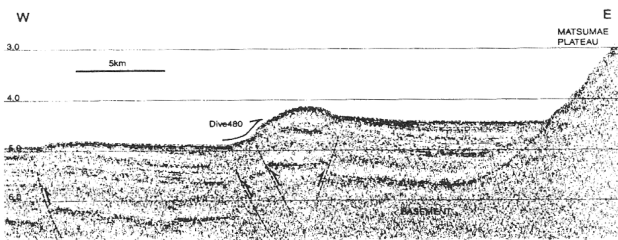


図3 第480潜航地点付近の北緯41°17'を東西に横断する音波探査プロフィール。
Fig. 3 Single channel migrated seismic profile along latitude 41°17' N near the dive location #480.

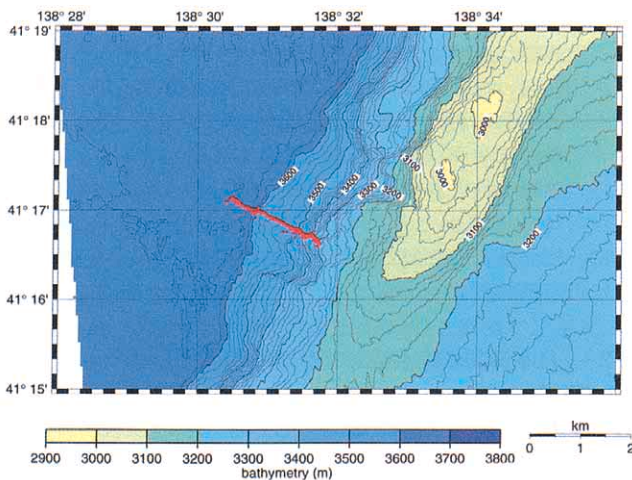


図4 シービーム調査による第480潜航地点付近の海底地形図。
Fig. 4 Bathymetric contour map around dive site #480 by SeaBeam survey.

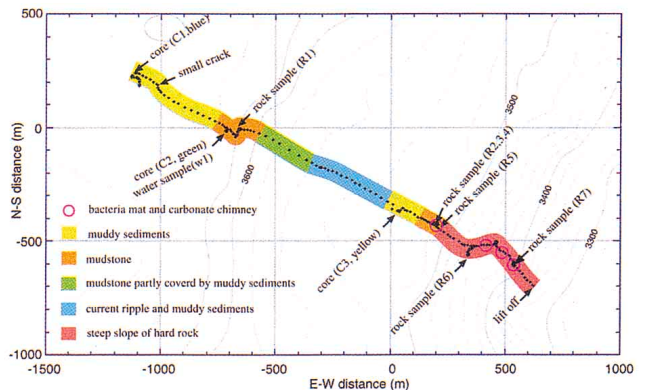


図5 第480潜航の航跡と観察結果
Fig. 5 Route map of dive #480.

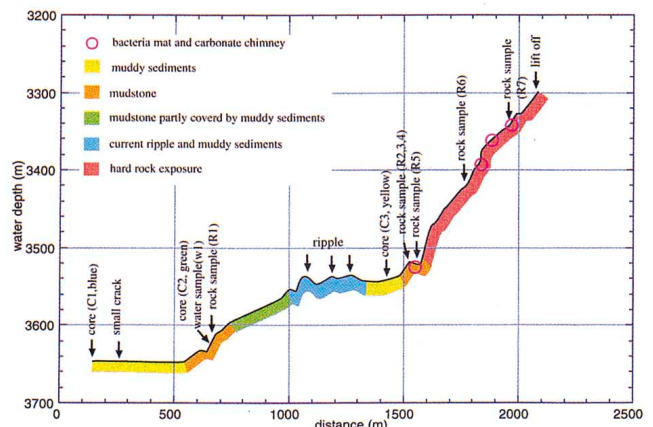


図6 第480潜航地点の地形断面と観察結果
Fig. 6 Cross section along the dive route #480.

少なくとも3つの高まりが認められ、その山頂付近ではカレントリップルが広く発達している(図9)。高まりの間は泥に覆われた凹地で、最も東側の泥質堆積物に覆



図7 斜面手前の平坦部で観察された小割れ目
Fig.7 Small crack observed on the flat seabottom in front of fault scarp.



図8 斜面下部の泥岩露頭。泥の覆いがなく、斜面傾斜方向に侵食された痕跡が認められる。
Fig.8 Mudstone exposure on the lower part of the scarp. Shallow gullies are observed of the mudstone.



図9 斜面途中の緩傾斜部に認められるカレントリップル
Fig.9 Current ripple on the crest of the swell in the mid-terrace.

われたやや広い平坦面で採取した柱状堆積物試料(C3,黄)には、2層準に泥岩片を含む礫層が認められた。残念ながら、年代を推定するてがかりとなるテフラが含まれて



図10 上部斜面の基部に散在するバクテリアマットと炭酸塩チムニー
Fig.10 Bacteria mats and carbonate chimneys at the base of the upper slope.

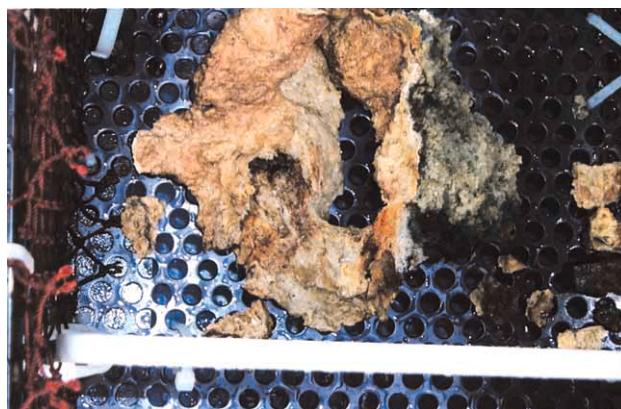


図11 チムニーのサンプル。
Fig.11 Photograph of a chimney sample.

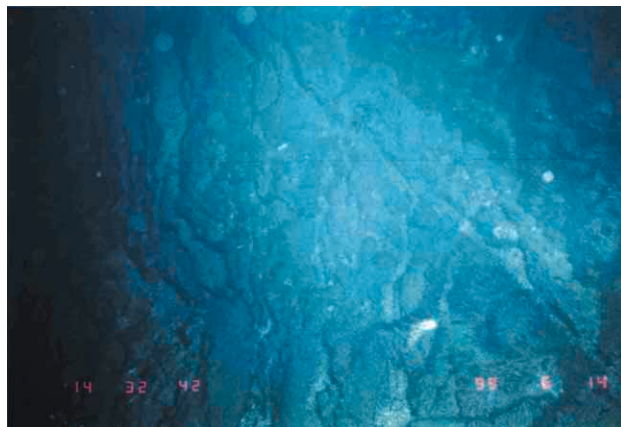


図12 上部斜面の露岩帯。
Fig.12 Rock exposure of upper slope.

いない。その東側で緩やかな斜面が現れ、泥岩が広く露出するようになる。そこには数10cm~2mの広がりを持つバクテリアマットが散在し、それに付随するように小規模な炭酸塩チムニーが形成されているのが観察された(図10)。バクテリアマットが付着している岩石をはがすと、その内部は真っ黒であったことから、還元的な環境であることが推定される。採取されたチムニー(図11)多孔質で海底に露出している部分は白いが、海底下の部分は黒っぽくなっている。また、試料からは硫化水素臭が感じられた。この地点より東側には急斜面が連続する。バクテリアマットは一旦観察されなくなったが、約100m上昇した水深3390m付近より上部でわずかながら認められるようになってきた。斜面に露出する岩石は、黒っぽく斜面下部に露出する泥岩より固そうな見かけを呈する(図12)。その表面は大規模な崩落があったような割れ方をし、苔状の付着物とわずかな泥が広く覆っており、最近崩壊した可能性は低いと考えられる。斜面が緩やかになったテラス上で散在する転石の一つを採取したが、それは花崗岩質の火成岩であった。水深3350m付近ではバクテリアマットとチムニーの数がまた増加し、そこでチムニーの試料採取を行った後に調査を終了した。

考察：以上のような観察事実から、松前海台の南西側に連続する逆断層は活断層であることは間違いないが、最近の活動時期は必ずしも明瞭でない。斜面手前の平坦面で認められる溝状の割れ目や、斜面下部の泥岩露頭に認められる小規模な浸食谷状の地形は、最近の変動を示唆している。また、2カ所の柱状堆積物試料には、タービダイトあるいは礫層が含まれており、この断層崖が最近崩壊したことを示している。試料中に含まれているテフラの年代が明らかになれば、古地震との対比が可能になると考えられる。さらに、この断層崖周辺の堆積速度が明らかになれば、割れ目や浸食谷がどのくらい保存されるかが推定できると考えられる。一方、斜面上部の大規模な崩落崖には最近崩壊したような形跡は認められなかった。

上部斜面で数多く認められたバクテリアマット及び炭酸塩チムニーは、南海トラフなどでも見つかっており、そこでは冷湧水及びメタンとの関連が指摘されていることから、それらとの共通性、違いなどの比較研究が今後必要である。

上部斜面では火成岩が採取されたが、音波探査プロフィールからはそれが現地性のものとは考えにくい。松前海台からは花崗岩質の岩石が採取されたことがあるので、それからもたらされた可能性は考えられるが、どのような作用でここまで運ばれたのか不明である。

2.2 日本海盆東縁の圧縮性丘陵(バルジ)

第486潜航

実施日：1999年6月26日 10:00 - 17:06

実施地点：松前海台西北方

着底点：41°52.643'N-138°45.098'E 水深3664m
 離底点：41°51.809'N-138°47.747'E 水深3455m
 潜航研究者：佐竹健治(地質調査所地震地質部)
 パイロット：鈴木晋一 コパイロット：樋口陽彦

松前海台の西縁から後志トラフ西側の奥尻海嶺へかけて、北北東方向に断続的に約70 kmにわたって延びる逆断層が存在する(図13)。この断層は、東側が隆起する東傾斜の逆断層で、最大構造落差は500 mに達する(図14)。松前海台の北西方では、水深約3600 mの日本海盆から比高100~160m程度のリッジが北北東方向に延び、その西側斜面基部にそって断層が存在すると考えられるが、最近の活動度は不明である。

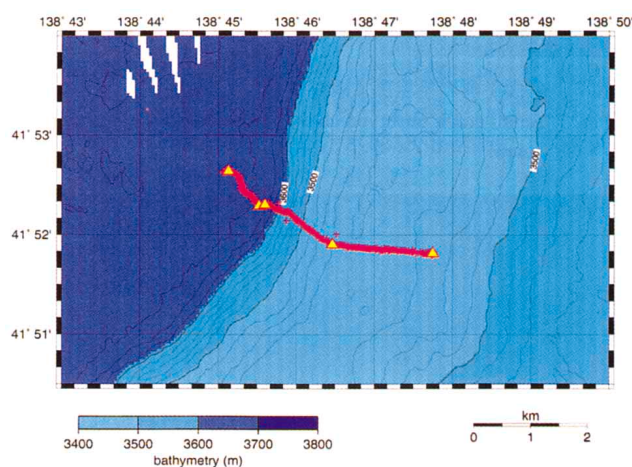


図13 第486潜航地点付近の海底地形図。海底地形は潜航前のSeaBeamサーベイで得られたもの。潜航ルートを示す赤い線、サンプル(柱状採泥)地点を示す黄色の三角形で示す。

Fig.13 Regional bathymetry map around the dive 486 site. The bathymetric data were obtained by SeaBeam 2100 survey just before the dive. Red shows the dive route and yellow triangles are the sampling locations of cores.

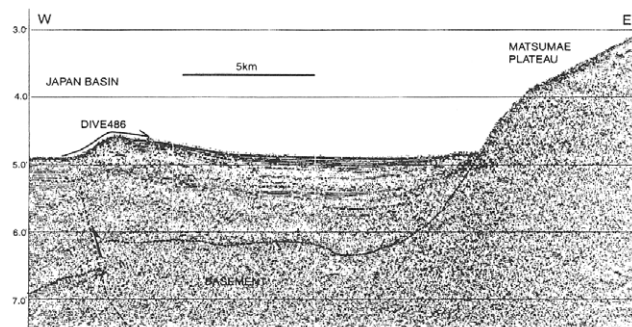


図14 第486潜航地点付近における(北緯41度54分に沿った東西測線沿い)シングルチャネル反射断面。

Fig.14 Seismic profile (E-W direction along 41°54' N) Near the dive 486 site.

この断層は、1983年日本海中部地震と1993年北海道南西沖地震の震源域の中間に位置し、これらの間の空白域を埋める地震を起こす可能性もある。この付近では、1741年に津波(寛保の津波と呼ばれる)が北海道の松前藩を中心に被害を起こしたことが知られているが、その発生源として、当時噴火していた渡島大島の山体崩壊が原因という考えと、松前海台の西縁付近を震源域とする断層運動があったとする考えがある。

もし、寛保の津波が断層運動に起因するのであれば、この断層が運動した可能性がある。そこで、この断層の最近の活動度・活動履歴を明らかにするとともに、この断層が1741年の津波を起こした可能性を考察する目的で潜航を行った。

潜航調査は、目的とする断層西側の平坦な海底に着底し、断層運動によって形成されたと考えられる斜面を東に上昇し、頂上部を越え、東側の緩やかな斜面を少し下った点で離底した(図15)。潜航ルートは、斜面西側の平坦面(水深3660 m程度)、斜面(水深3660-3420 m程度)、斜面上部(東側)の平坦部(水深3410-3450 m程度)とに分かれる。さらに、斜面は3500m付近の平坦部を境に上部と下部とに分けることができる(図16)。着底点から斜面直下までの平坦部は底質は泥で地形の起伏はほとん

どない。ところどころで黒っぽい粒状や塊(1~2m程度の大きさ)が観察された。着底点付近(41°52.6404'N, 138°45.1302'E)で柱状採泥(C1, 黒)を行った。このコア(全長21cm)には、起源未確認のテフラとうすいタービダイト層が確認された(付図1上)。

斜面基部(水深3660m)付近において、斜面と平行(ほぼ南北方向)のうねりが出現し始め、そのすぐ上部で泥に覆われた地割れが観察された。地割れは20°方向(ほぼ斜面に平行)に伸びている。この地割れの中(41°52.2905'N, 138°45.5249'E)で柱状採泥(C2, 青)を行った。このコア(全長18.5cm)には、B-Tmと同定されるテフラをタービダイト層が覆っている様子、また、タービダイト層が割れている様子が観察された(付図1上、付図2左)。この付近から、白っぽい崩壊堆積物が泥の海底の上に点在し始め、また、ほぼ南北方向に伸びる泥に覆われた地割れが数本認められた。水深3650m付近からは、やや新鮮な地割れ、崩壊堆積物、その崩壊跡がほぼ連続的に観察された。東西方向に伸びる、やや新鮮な大きな地割れ(図17)のそば(41°52.3034'N, 138°45.6000'E)に着底し、泥塊のサンプリングと柱状採泥(C3: ストライプ)を行った。このコア(全長23cm)では、地表から11cm辺りにB-Tmと同定されるテフラがあり、その上をタービダイト層が覆っている(付図1上、付図2左)。

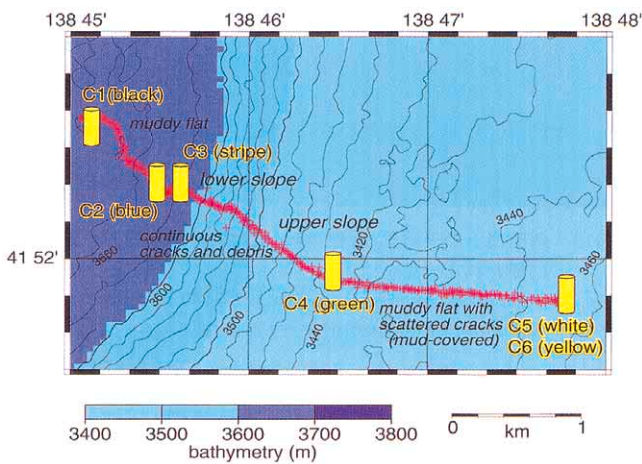


図15 第486潜航の航跡図。柱状採泥地点も示す。
Fig.15 Survey track of dive 486. Sampling locations of cores are also shown.



図17 下部斜面(水深3640m, C3サンプル地点付近)の開口地割れ。
Fig.17 Open crack at the 3640 m depth (C3 core sample location) on the lower slope.

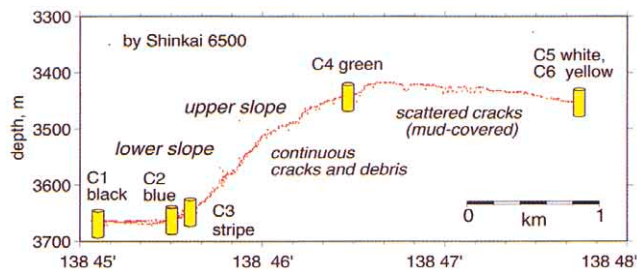


図16 第486潜航の断面図。
Fig.16 Cross-section of dive 486 track.

この後、やや平坦な場所ではうねり、急な斜面ではほぼ斜面方向に伸びるカレント・リップル(図18)、それとほぼ直交する地割れ、及び崩壊堆積物が(図19)、下部斜面全域(約900m)にわたってほぼ連続的に繰り返しているのが観察された。崩壊堆積物を詳しくみると、泥に覆われた堆積物の上に、新しい崩壊物がある様子が観察できる(図20)。下部斜面の上部(3540m付近)では、ほとんど泥に覆われていない新鮮な地割れ(図21)やその場で崩壊した(自破碎)堆積物も観察された。

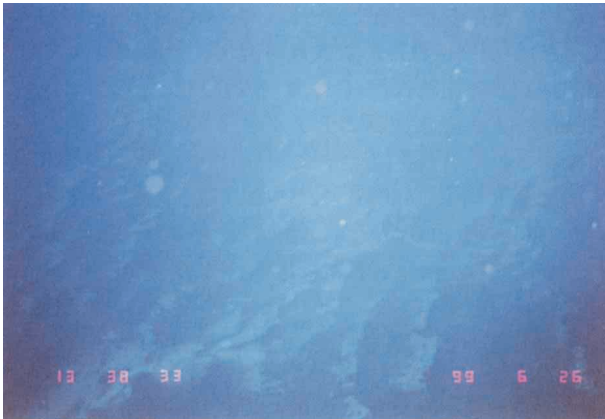


図18 下部斜面のカレント・リップル
Fig.18 Current ripples on the lower slope.



図21 斜面中央部付近(水深3540 m)の崩壊跡。崩壊発生は最近のように見える。

Fig.21 Coseismic rubble at the depth of 3540 m in the middle of slope. Little mud cover suggests a recent failure event.

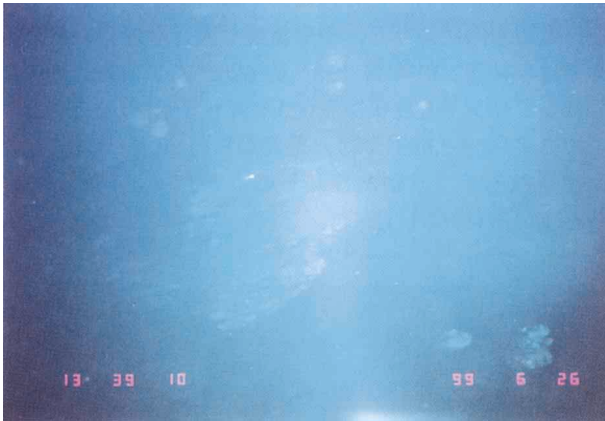


図19 下部斜面の地震性崩壊堆積物。孤立していることから「自破碎」堆積物と考えられる。

Fig.19 Coseismic rubble observed on the lower slope. Because it is isolated, it is probably from auto-brecciation.



図22 斜面頂上の平坦部(水深3440 m)における開口割れ目。泥に覆われている。

Fig.22 Open crack covered by mud at the 3440 m depth on a flat part above the slope.

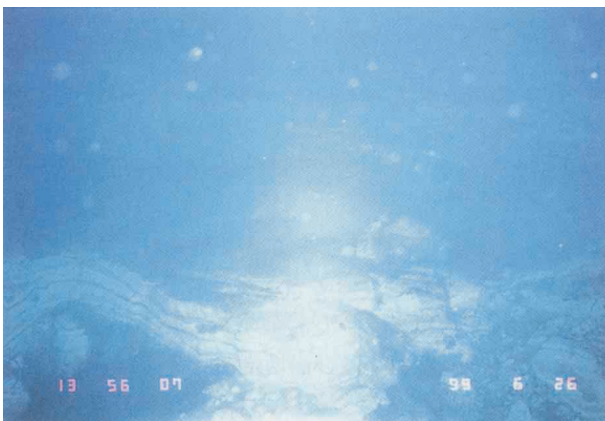


図20 下部斜面(水深3590 m)の崩壊堆積物。泥の覆い方から、斜面崩壊が複数回発生したように見える。

Fig.20 Coseismic rubble observed at the depth of 3590 m on the lower slope. Difference of mud-cover suggests multiple failures of the slope.

上部斜面(3500m以浅)でも同様に、カレント・リップル、地割れ、崩壊堆積物が交互に出現したが、下部斜面ほどには連続的でなく、また、泥に覆われているものが多い。斜面頂上部付近(41°51.8993' N, 138°46.4665' E)で柱状採泥(C4.緑)を行った。このコア(全長11.5cm)では、海底から7cm以下にB-Tmと同定されるテフラが厚く堆積しているのが観察された。ところで泥に覆われた小さな地割れのあとが観察された(図22)。離底前に柱状採泥を2本行った(41°51.8085' N, 138°47.7474' E)。C5(白)は失敗したが、C&(黄)のコア(全長6cm)には海底下5.5cm付近にB-Tmと同定されるテフラが確認された。

以上のような観察事実から、本潜航地点では、最近の地震による強い震動によって、地割れや斜面の崩壊が発生したと考えられる。斜面上部の平坦部でも地割れが観察されたことから、地すべりなどの斜面不安定によるも

のとは考えにくい。また、堆積物の覆い方や柱状試料のコアから、特に下部斜面は複数回の地震の痕跡を残していると推測される。比較的新しい地割れや自破砕堆積物は、483潜航や484潜航で観察されたものとよく似ており、1993年北海道南西沖地震の痕跡である可能性が高い。今回の潜航地点は震源域からやや離れており、このことは、震源域以外でも強震動、海底の条件によっては崩壊が発生することを示している。古い地震の発生時期を特定するのは困難であるが、その手がかりとなる、コア内のタービダイトについては、B-Tmの直上で堆積していることから、1741年寛保の津波よりは古そうである。

3. 渡島半島沖海域

3.1 後志トラフ南部陸側斜面

北海道西方の日本海東縁部の後志トラフでは、北海道南西沖地震を原因としたタービダイトが広く堆積している(池原・井内, 1998)。この日本周辺で最も新しい地震性タービダイトの発生域については、場所を確定するデータは存在しない。しかし、深海用サイドスキャンソナー「イザナギ」による海底音響画像で、茂津多岬沖の後志トラフにいたる斜面は、反射強度が強かつ構造がほとんど認められないこと、また、斜面の基部には、新しいロープ状の地形も確認されていることから、比較的最近、斜面崩壊が発生し、海盆に堆積物をもたらしていると画像上解釈され、地震性タービダイトの発生域の有力な候補の1つであることが判明している。しんかい16500の第481, 485潜航では、この茂津多岬沖斜面を対象に、地震性堆積物の発生域の堆積、地形形成過程を解明することを目的として潜航調査を実施した。

潜航調査は、茂津多岬沖斜面基部の水深3235mから、斜面下部の水深2645mまでの斜面を、2回の潜航に分けて実施した。第481潜航では、斜面基部の崖錘斜面から斜面下部までを、第485潜航は、第481潜航に引き続き斜面下部の観察を行った。いずれの潜航調査でも、斜面の最大傾斜方向に航走し、海底の観察および試料の採取を行った(図23, 24)。

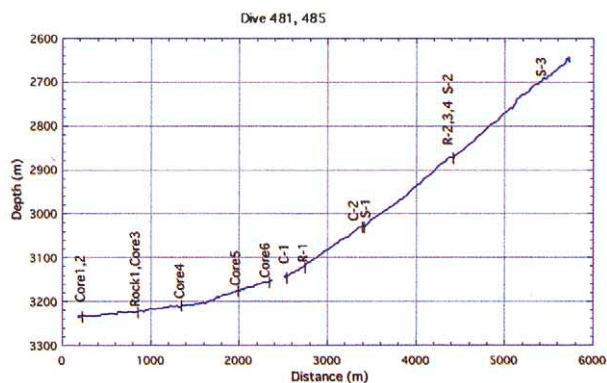


図24 第481・485潜航の断面図
Fig.24 Cross-section of Dive 481 and 485 track.

第481潜航

実施日：1999年 6月15日 10:00-17:00
潜航地点：茂津多岬沖(その1)
着定点：42°41.18'N-139°38.87'E 水深3235m
離底点：42°41.81'N-139°40.23'E 水深3156m
潜航者：加藤幸弘(海上保安庁水路部企画課)
パイロット：小倉 訓 コパイロット：牧 哲司

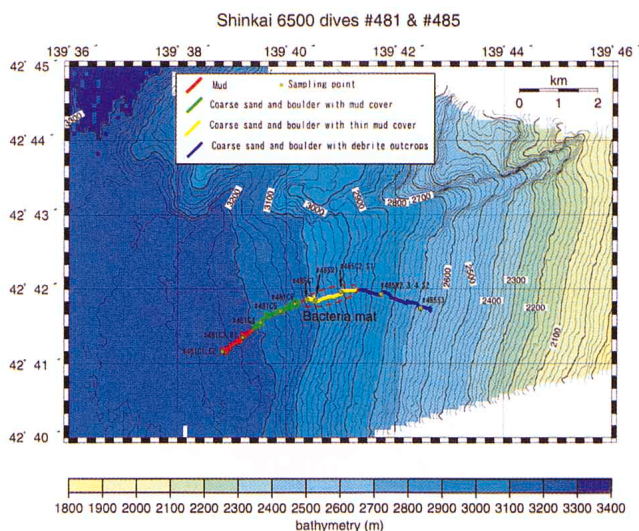


図23 第481潜航および第485潜航地点付近の海底地形図と観察概要。緑四角：試料採取地点。
Fig.23 Survey route map of Dive 481 and 485 with bathymetry around the dive site. green quadrangle: sampling site by core sampler, sediment and rock.

本潜航調査で観察した水深3235～3156mの海底は、水深3208m(潜水船の水深：以下同様)以深の起伏のほとんどない平滑な緩傾斜の崖錘斜面と、崖錘斜面よりは傾斜が急であり西側に凹な水深3208m以浅の斜面に分けることができる。崖錘斜面は、底質が泥であり、堆積構造が認められない平滑な海底で構成されているが、一部には、ハンモッキー状の海底面も認められる。ハンモッキー状の海底では、柔らかい泥岩の転石に泥が覆い被さり、マウンドを形成する。泥岩の転石には一部層理面が認められる平板状の形態を有するものも存在する。崖錘斜面の最上部の下部斜面境界近傍では、数個の固結した火山岩の円礫が孤立して分布する。円礫の周辺には、斜面の最大傾斜方向に浅い溝が付随する。

下部斜面には、最大径が数十cmから5mまでの円～亜円礫が、多数分布する。礫種としては、火山岩が9割以上を占め、その他に礫岩が認められた。また、礫は、30cm～1.5mまでの大きさのものが最も多く、それ以外の大きさ特に10cm以下の礫はほとんど海底面では認められなかった。礫は、斜面の最大傾斜方向の溝に、数個配列

する場合が多く、この一列に並ぶ礫は、斜面の上方に向かって傾き、一部には重なり合っている場合もある。礫の上に泥が厚く堆積しており、全て覆われてしまった礫も存在する。また、礫周辺の溝には、黒色の粗粒砂が分布する。礫があまり分布しない場所では、底質は泥であるが、柱状採泥の結果から、一部では、泥の下には黒色の粗粒砂が分布することが判明した。

第485潜航：

実施日：1999年6月23日 9:58-17:07
 潜航地点：茂津多岬沖(その2)
 着底点：42°41.18'N-139°40.23'E 水深3145m
 離底点：42°41.72'N-139°42.65'E 水深2645m
 潜航者：加藤幸弘
 パイロット：吉梅 剛 コパイロット：川間 格

第485潜航は、第481潜航の離底地点の上方、水深3145mの地点に着底後、斜面の最大傾斜方向に沿って、斜面の観察および試料の採取を行った。観察した水深3145～2645mの海底は、水深2972m以深のバクテリアマットと大きな円～亜円礫の分布で特徴づけられる西側に凹な斜面と、水深2972m以浅の円～亜円礫以外に角礫が認められ、バクテリアマットが分布しない斜面に分けることができる。

水深2972m以深の斜面は、海底面が泥で覆われている。しかし、泥の層は薄く、その下に、黒色の砂あるいは砂礫の未固結な堆積層が分布する。そして海底には、第481潜航で観察した礫と同様の長径が10cm～5mの円～亜円礫が多数分布する。礫は斜面の傾斜方向に直線的に配列する傾向が認められ、礫が多く集積する近傍の海底面は、ハンモッキー状の形態をなしている。

着底地点である水深3145mの海底には、今回観察した海底で最も面積の大きい広さ20×20m程度のバクテリア

マットが存在した(図25)。バクテリアマットは濃淡があるものの全体として白色を呈し、その上に灰褐色の2～3cmの藻状物質が多数分布する。また、黒色の砂も表層に認められた。ここで採取したコアは、硫化水素の臭いがした。また表層は黒色の細流物質であり、それ以下は黒色の砂礫であった。バクテリアマットは、水深2972mまで、分布するが、それ以浅の斜面には認められない。

水深2972m以浅では、底質が泥ないし砂の海底面の上に、それ以深の斜面で認められた円～亜円礫の他に、長径が20cm以下の角礫が多数点在する斜面に変化する。礫種としては、玄武岩、安山岩などである。堆積物の採取したところ、泥は海底面にごく薄く表層にしか存在せず、泥の下には粗粒砂ないし礫で構成されることが判明した。なお、水深2741-2728mと2656-2645mの地点で、最大1.5mの角～亜円礫から構成されるデブリスフローの露頭が認められた。特に水深2656-2645mでは、比高8mの崖をなしデブリスフローが露出していた、そこではデブリスフローの下位および上位に泥岩層が認められた。

以上のような観察から、茂津多岬から後志トラフにいたる斜面の下部は、沿岸部から供給された巨礫を含むデブリスフローが流下していることが判明した。ただし、このデブリスフローは、沿岸部から一度に海盆底まで流れ下るのではなく、斜面の途中でトラップされ、そしてトラップされた堆積物が地震動などによって再度崩落し、斜面に堆積物を供給する。このような過程を繰り返すことによって最終的に海盆底に堆積物がもたらされる。つまり斜面は、堆積物の単なる通過する場所ではなく、堆積物をトラップする場であることが判明した。このことは斜面が全体として上に凸な形態を取ることと調和的である。

また、水深3145～2972mに分布するバクテリアマットの存在は、斜面最下部の傾斜が緩くなる海底で地下から

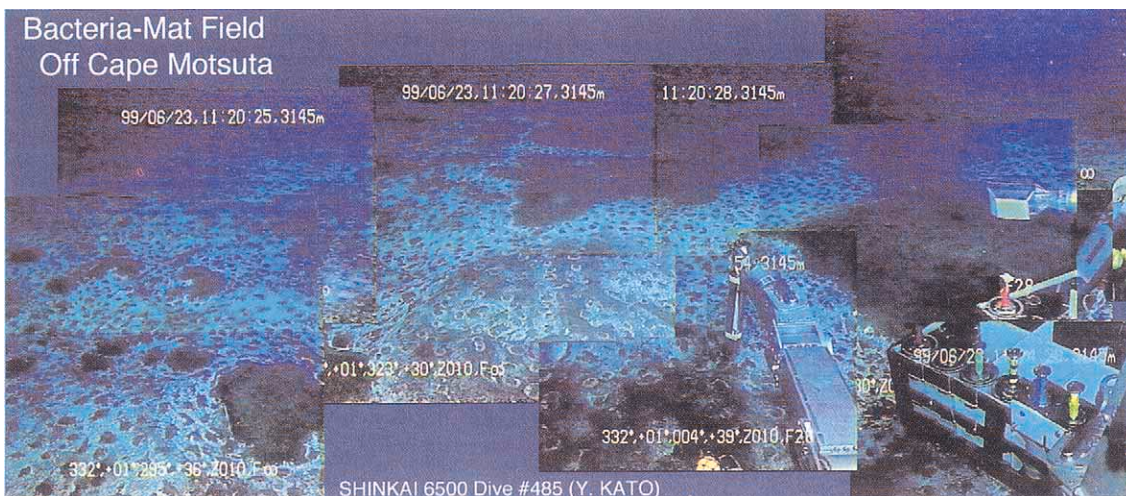


図25 下部斜面のバクテリアマット(第485潜航, 水深3145m)
 Fig.25 Bacteria mat on lower slope (dive 485 at 3145 mwd)

の湧水の存在を示している。観察した斜面の大部分は、表層が未固結な砂礫で構成されており、バクテリアマットの分布する場所とそうでない場所との違いは認められない。したがって、バクテリアマットが特定の場所のみに認められる原因は、より深部の堆積物の構成、地質構造である可能性がある。湧水の起源を含め、このバクテリアマットの成因については、今後さらなる調査が必要である。

3.2 後志トラフ北部陸側斜面

第482潜航

実施日：1999年6月17日 11:13-15:52

潜航地点：寿都海底谷先端部

着底点：43°10.071'N-139°50.905'E 水深2761m

離底点：43°10.452'N-139°52.039'E 水深2542m

潜航研究者：池原 研(地質調査所海洋地質部)

パイロット：吉梅 剛 コパイロット：川間 格

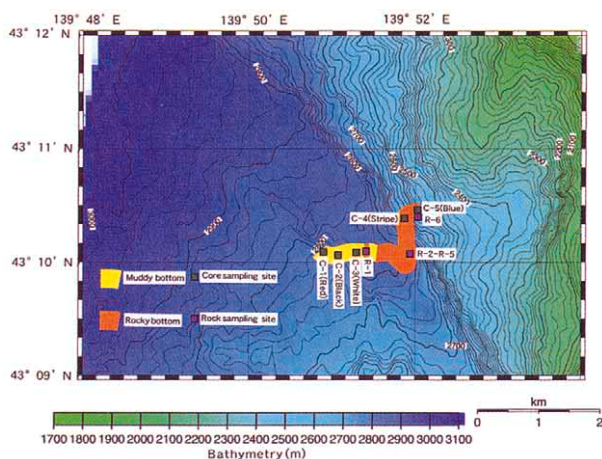


図26 第482潜航地点付近の海底地形図と観察結果の概要。黄色：泥底を主体とし、シルト岩の露出が付随する地域、オレンジ色：シルト岩の露出やシルト岩ブロックが卓越し、泥底が付随する地域、緑四角：柱状試料採取地点、紫四角：岩石採取地点。

Fig.26 Survey route map of Dive 482 with bathymetry around the dive site. Yellow area: muddy bottom with small outcrops, orange area: siltstone outcrop and/or siltstone blocks with small mud cover, green quadranglar: sampling site by core sampler, violet quadranglar: sampling site of rock.

後志トラフには、1993年北海道南西沖地震の海底崩壊によるタービダイトが広く堆積している(池原・井内, 1998)。しかし、この地震性タービダイトの堆積構造の示す古流向は単純でなく、複数の斜面が崩壊した可能性がある。海底堆積物中の地震性タービダイトから過去の地震履歴を解読するためにはその場所における海底斜面の地震への応答をできる限り精度よく求めておくことが必要である。後志トラフ北端部に開口する寿都海底谷はトラフ底に達する最も顕著な海底谷であり、海底地形図で

も明瞭な海底扇状地を形成している(図26)。本潜航調査では寿都海底谷出口付近に潜航し、海底谷及び海底扇状地上の微地形・堆積物を観察するとともに、堆積物柱状試料を定方位にて採取し、地震性タービダイトの挟在状況から地震発生履歴と堆積構造から地震性タービダイトの供給方向の解析を行うことを主な目的とした。また、海底谷側壁の観察と堆積物・岩石採取を行い、海底谷の形成過程についての基礎資料を得ることも目的の一つである。

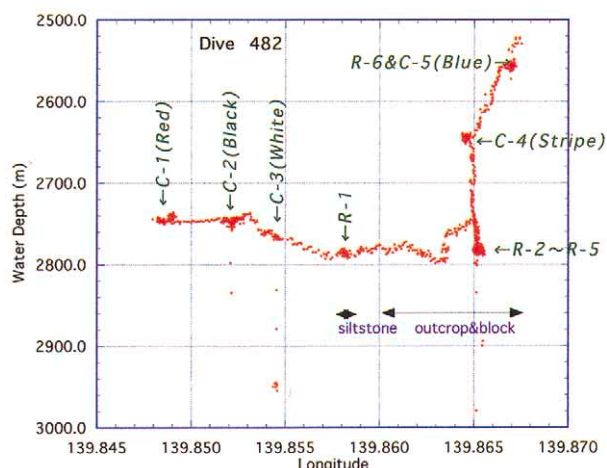


図27 第482潜航の断面図
Fig.27 Cross-section of Dive 482 track.

潜航調査では、上部海底扇状地のロープと考えられる微高地に着底し、ロープを横断して海底谷底に達し、その後海底谷側壁に沿って上昇して、各場所の海底の観察及び試料採取を行った(図26, 27)。この間、5本の柱状試料(C-1~C-5)と6個の岩石試料(R-1~R-6)を採取した。結果として、寿都海底谷に沿っては北海道南西沖地震時に浅海域からの土砂が輸送されているが、その量はそれほど大きくないことが分かった。このことは、後志トラフのほぼ全域を覆う北海道南西沖地震のタービダイトの主な起源がこの海底谷ではないことを示している。

着底点付近では海底谷の方向に平行からやや斜交する微高地が続き、海底扇状地上のロープと考えられる。堆積物はシルト岩片や小礫、植物片を含む泥質堆積物であるが、着底点及び海底谷内で採取した柱状試料には5mm程度のシルト質粘土の下に極細粒砂~砂質シルトからなる層厚5mm~2cm程度のタービダイト層が認められる(付図1中, 付図2右)。この厚さはトラフ底のタービダイト層(池原・井内, 1998)に比べて薄い。海底谷底ではシルト岩の露岩やブロック、シルト岩片を含む泥質堆積物が分布する。シルト岩ブロックは角礫がほとんどで、露岩の近傍に多く認められるので近傍の露岩域から供給されたものと推定される。また、一部のブロックは谷の上流側に傾くインプリケーションが認められ、谷を流下する流れによって再移動されたものと推定される。シルト岩ブロックの周囲には溝状地形が存在し、ブロック堆積後

の谷軸にほぼ平行な流れの存在を指示している。海底谷底のシルト岩の崖は南北からわずかに東にふれた向きに伸びており、ほぼ海底谷に直交する。

海底谷の北側の壁はシルト岩から構成されている。側壁はその基部では壁から崩壊してきたシルト岩ブロックが堆積している。シルト岩のなす壁は海底谷の方向に平行な北北西 - 南南東から北西 - 南東方向に延びている。シルト岩の壁にはほぼ水平な層界面が認められるところがある。側壁の下部では比高10-20m程度のシルト岩の崖と泥質堆積物が薄く覆う小さなテラスから構成されている。個々の崖の下部では比較的新しい断面がみられることもあるが、中部から上部では薄い泥に覆われており、崖の崩壊の大半が最近のものでないことを物語っている。側壁の上部では比高数-10m程度のシルト岩の崖と泥質堆積物に覆われるやや広いテラスから構成され、全体としてステップ状の地形を示す。シルト岩の崖は、泥にほとんどの部分で泥に覆われていること、生物が付着していること、シルト岩の角が丸まっていること、から新しいものではないことが分かる。シルト岩にみられる層界面はほぼ水平である。

以上の観察結果から、今回の潜航地点の地形・地質は以下のようにまとめられる。(1)寿都海底谷出口付近では、海底谷内・ロープ上ともシルト岩の露頭が観察され、全体として大きな堆積域とはなっていない、(2)ロープ上では、堆積と侵食の両方が起こっているが、やや堆積が勝る場にある、(3)海底谷内では海底谷の伸びに平行な方向、ロープ上ではロープの伸びに平行な方向に堆積物が輸送されている、(4)海底谷内及びロープ上では1993年北海道南西沖地震時のタービダイトが採取されたが、その厚さは薄く、地震時に大量の物質が寿都海底谷を通じてトラフ底に供給された可能性は低い、(5)寿都海底谷側壁は柔らかいシルト岩からなり、見掛け上は海底谷底に露出するシルト岩と変わらない。

海底谷底と側壁から採取されたシルト岩試料の珪藻分析の結果(表1)とYanagisawa and Akiba(1998)の区分に基づく年代は以下のようにまとめられる。海底谷底の3つの試料(水深2803mの地点から採取されたR-1と、水深2796mの同じ地点から採取されたR-2とR-3)は*Neodenticula kamtschatica*を多産し、*Nitzschia rolandii*、*Thalassiosira oestrupii*、*Thalassiosira jacksonii* (plicate)を伴う群集からなり、*N. kamtschatica*帯*T. oestrupii*垂帯(NPD7Bb)下部の*T. jacksonii* (plicate)の初産出と終産出の間の層準に対比され、その年代は5.2-4.8Maを示す。海底谷側壁の水深2574mから採取された1つの試料(R-6d)は*N. kamtschatica*を多産するとともに*Neodenticula koizumii*も付随する群集からなり、*N. kamtschatica*-*N. koizumii*帯(NPD8)に対比され、3.9~3.5-2.7~2.6Maの年代を示す。海底谷底と側壁の試料採取地点の水深差はおよそ230mであり、珪藻化石の示す年代差はおよそ1.8-2Maである。もしこの水深差が単純に水平に堆積する堆積層の層準の違いによるとすると、この付近での当時の堆積速度は11.5-

12.8cm/1000年と計算できる。後期第四紀における日本海の堆積速度は5-25cm/1000年程度であるので、堆積物の圧密も考慮すれば、この水深差は単純に堆積年代の違いだけで説明可能である。寿都海底谷の成因については必ずしも明らかとなっていないが、その直線性や海底谷延長部での明瞭なりニエーションの存在から構造的な谷である可能性がある。しかし、今回得られた年代値は谷を挟んだ鉛直方向の変動は少ないことを示している。横ずれ方向の変動については今回の結果のみからは評価できないが、海底谷の成因に対する制約条件を得られたことになる。

4. 奥尻海嶺東斜面

4.1 震源域北部(ODP796地点周辺)

第483潜航

実施日: 1999年6月21日 10:00~17:00

調査地点: 奥尻海嶺東斜面中部

着底点: 42°50.747'N-139°26.172'E 水深3033m

離底点: 42°50.719'N-139°24.969'E 水深2606m

潜航研究者: 竹内 章(富山大学理学部)

パイロット: 鈴木晋一 コパイロット: 牧 哲司

第483潜航は、1993年北海道南西沖地震の震源域北端部に位置するODPサイト796地点付近で、奥尻海嶺東斜面の上部を横断する潜航調査を行った。調査目的は、本震震央域(津波波源域)近傍における1993年地震時の海底地盤変状、地震後6年の経時変化、地震時の海底地盤応答における人工構造物(掘削井)の効果、などである。この斜面下半部については、この潜航に引き続く第484潜航によって調査が行われた(図2, 図28参照)。

1993年地震時の海底地盤変状

着底点付近(水深3033~2950m)は、ベンチ状緩斜面の上端にあたり、上方から飛来した泥岩片が散点する。調査ルート前半を占める10度以上の傾斜地は薄い浮泥(極細粒な沈殿物)層が覆っているものの、ほぼ全面露頭である。過去に地震性の粗大碎屑物が流下した際の侵食によるとみられる大小・無数のガリが修飾している。一方、調査ルート後半の平坦地は、本来、幅約1kmの地滑り地(流れ盤上部)であるが、地震時の土石流などに伴う懸濁物と見られる浮泥層(厚さ3~4cm)が覆い、露岩はほとんど見られない(図29および図30を参照)。

この平坦~緩傾斜地(水深2695~2583m)では、斜面にほぼ平行な開口地割れ(走向200°)が多数観察された。その一部には、最大で1m程度の上下変位が認められ、新鮮な断面が露出する。連続性のよい地割れには、山側が陥没する逆向きセンスの上下変位が認められ、落下側ブロックは浮泥に覆われている。こうした新鮮な地割れは比高2~3mの崖地形に沿って分布することから、地滑りは一過性ではないと考えられる。

水深2693m付近、2685m付近、2598-2593m付近で

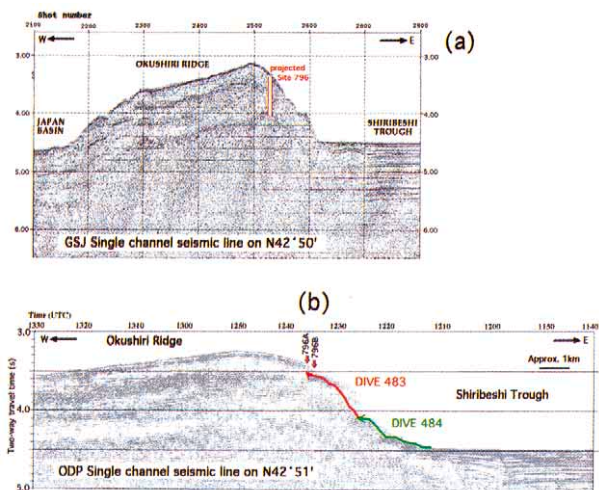


図28 第483, 48D潜航ルート付近の音波探査断面図
 a. 北緯42度50分を東西に横断する音波探査プロファイル(地質調査所).
 b. 北緯42度51分を東西に横断する音波探査プロファイル(Tamaki *et al.*, 1990).
 Fig.28 Single channel migrated seismic profile near the dive location #483-#484.
 (a) atitude 42° 50' N profile by Geological Survey of Japan,
 (b) atitude 42° 51' N profile during ODP Leg127 (Tamaki *et al.*, 1990).

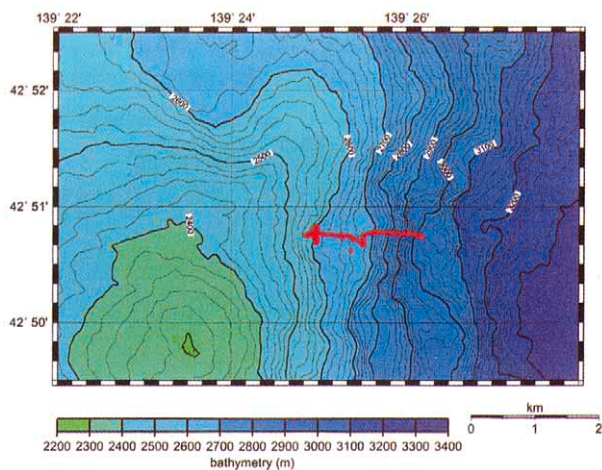


図29 シービーム調査による第483潜航地点付近の海底地形図と潜航調査の航跡.
 Fig.29 Bathymetric contour map around Dive site #483 by SeaBeam survey and dive track of SHINKAI 6500.

は、斜面表層に破断性の高速変形(現場自破碎)による顕著な地盤変状が認められた。未固結堆積物や半固結の軟岩が角礫~瓦礫状に破碎し、糞の河原を呈する状況は、地震から2年後、本地域南方のしんかい16500による潜航調査で観察された同地震による衝撃性地盤変状に酷似する(図31)。

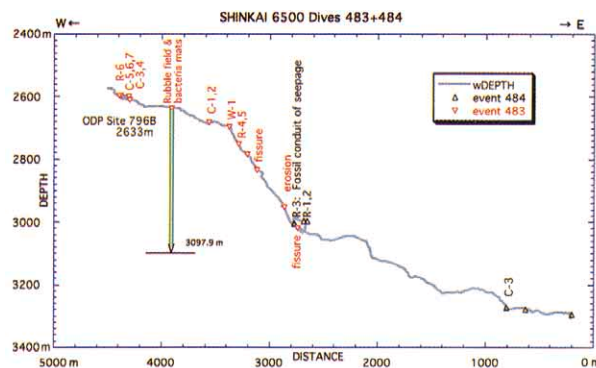


図30 第483・484潜航の断面図
 Fig.30 Cross-section of Dive 483 and 484 track.



図31 地震動の衝撃による表層堆積物の現場自破碎の例(水深2692m)
 Fig.31 An example of in-situ autobrecciation of unconsolidated sediments by earthquake shock. Video recorded at 2692m water depth.

地震後6年の経時変化

調査ルート前半の斜面は、やや粗い砂質のラブルフローを除けば、真新しい斜面崩壊は見られない。平坦~緩傾斜地では、新鮮な開口クラックやその痕跡が見られた。クラック痕は開口割れ目を周囲よりも暗色を呈する浮泥が充填し狭い溝となっている。これらのクラックやその痕跡沿いには黄褐色のゲル状水酸化鉄様の不定形沈殿物が線状に配列するものが少ない。ルート最上部の平坦地(ODP掘削地点)では、とくに大きく開口した大略放射状の地割れ見られ、この場所に限って局所的に分布するバクテリアマットが観察された。バクテリアマットは、斜面に平行な主要地割れに斜交する亀裂に沿って線状配列を示し、現在も湧水が継続していることを示す(図32)。また、地割れには極めて新鮮なものが含まれることから、地すべりは現在も継続中と見られる。
 ただし、顕著な地盤変動は周期的な大地震を契機に生じ、平常時の進行は微々たるものと考えられるから、現在の変動は余効的なものであろう。



図32 新鮮な開口地割れとバクテリアマット(水深2595m)
Fig.32 Fresh open-gashes and bacteria mat along an oblique fissure at 2595m w. d.

掘削井の存在と地震時の海底地盤応答

上述のとおり、ルート最上部の平坦地では、水深2598mおよび2593m付近の2箇所で見られる「現場自破碎」が観察された。目視された円形の陥没やマウンドは、いわゆるポックマーク(流体圧による大規模噴砂痕)に相当する(図33)。上記バクテリアマットから北北西に約110mの場所では、比高約2mの階段状断層末端部には直径数十cm程度の陥没孔が見られ、また断層沿いに海綿や附着性ホタテ貝、ヨコエビ類などが密集する。地すべり性断層以外の地変は、調査ルート後半では、これら2箇所だけに例外的に生じており、同一の地割れ帯上に位置している。



図33 新鮮な地割れ群と小円孔。遠景は自破碎した部分。(水深2595m)
Fig.33 Fresh open-gashes and bacteria mat along an oblique fissure at 2595m w. d.

このことから、旧地すべりブロック最上部に掘削されたODP試錐井の存在と、今回観察された海底の高速破壊現象には、容易に因果関係が想定される。とくに、継

続的な地下水滲出の指標となるバクテリアマットの存在が、1993年北海道南西沖地震震源域北部に位置する奥尻海嶺東斜面を登攀した第483、第484の2潜航を通じて、唯一、ODP掘削地点付近で確認されたことは、地下水の通路がこの掘削井である可能性を強く示唆する。

ルート最上部の平坦地では、Hole 796B掘削(wash)時の残滓に同定しうる「礫層」がみられ(岩石試料R-6採取地点付近の段差部、水深2598m)、また水深2627mにはルート上に短いパイプ状プラスチック片が落ちていた。しかし、ODP掘削孔自体は、地震直後におこなわれた深海カメラ曳航調査によっても、また今回の潜航調査でも発見されなかった。現時点では、地震時の海底地変のために海底面上の掘削孔は壊滅した可能性が高く、ことに掘削地点付近は周囲と比べてもより激しく地盤状況が変化したと考えておく。796Aと796Bの2つの掘削井は地盤の力学的弱点となって、両者を結ぶ方向に地割れ帯を形成したのかもしれない。

4.2 震源域北端部の活断層近傍

第484潜航

実施日: 1999年6月22日 10:00 - 17:00

実施地点: 奥尻海嶺東斜面下部

着底点: 42°50.687'N-139°27.584'E 水深3293m

離底点: 42°51.026'N-139°26.189'E 水深2994m

潜航研究者: 張 勁(富山大学理学部)

パイロット: 小倉 訓 コパイロット: 飯島一樹

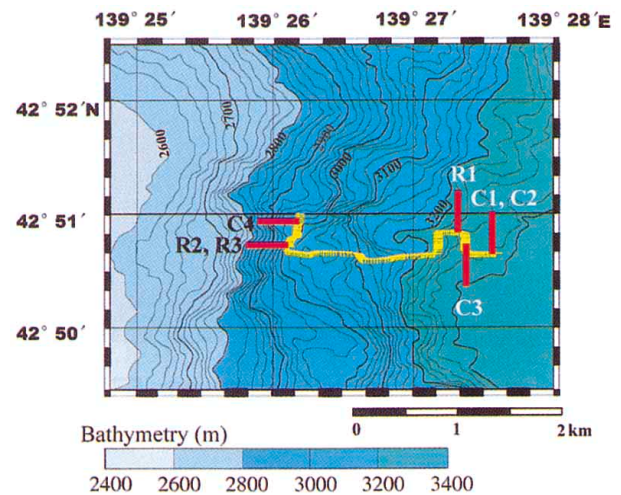


図34 第484潜航の海底地形図およびサンプル採取地点
Fig.34 Bathymetric contour map around dive-site #484 by SeaBeam survey. Dive route and sample locations in dive #484 are also shown.

第484潜航は、1993年北海道南西沖地震の震源域北部に位置し、第483潜航(竹内)のルート延長線上で奥尻海嶺東斜面下部を横断する調査であった(図30および図34、水深3293m~2994m)。1995年、しんかい16500を用いた潜航調査では広範囲にわたりバクテリアマットが発見され(竹内

ら, 1996), 本潜航は地震後6年を経過した震源域の海底異変調査とともに, 断層, 地割れに伴う湧水域・バクテリアマットの探索, NISKIN採水および柱状採泥などの作業を行った。なお, 本航海の各潜航地点における湧出水の定性, 定量およびそれによる物質の拡散を明らかにし, 海底表層堆積物の初期続成作用における地球化学的特徴を解明する目的で室内作業を行っており, 結果は別途報告する予定である。

本潜航調査では, 目的とする奥尻海嶺東斜面下部の平坦な海底に着底し, 東斜面の急崖まで緩やかな斜面を登りながら海底の観察および試料採取を行った。その概要は以下のとおりである。

着底点から離底するまで, ほとんど傾斜度の変化の少ない海底が続く。海底の底質は泥であり, 所々にシルト岩や泥岩の露頭が観察された。着底点近くで柱状採泥(C-1・赤色, C-2・黒色)を実施し, その後, 堆積物試料の観察および分析の結果, 黒雲母を特徴的に含む細粒の軽石質の火山灰を挟在することが分かった(後述)。

斜面の東部の海底は泥質堆積物で覆われ, 底層水は懸濁物が多いように見える。所々堆積物で覆われた割れ目(方位220° ぐらいのものが大半)が認められ, それに沿って埋れているバクテリアマットの跡も確認できる(図35)。堆積物で覆われた地割れの近く, 水深3278mの観測点(42°50.7725' N, 139°27.3523' E)で柱状採泥(C-3・白色, 長さ13cm)を実施した。採泥後の穴から底質を覗いてみたところ, 薄らと泥を被っている灰色粘土が観察できる。また, 採取された柱状堆積物は硫化水素臭がなかったが, 灰色粘土層の表面に黒く染められているものが残されていた。

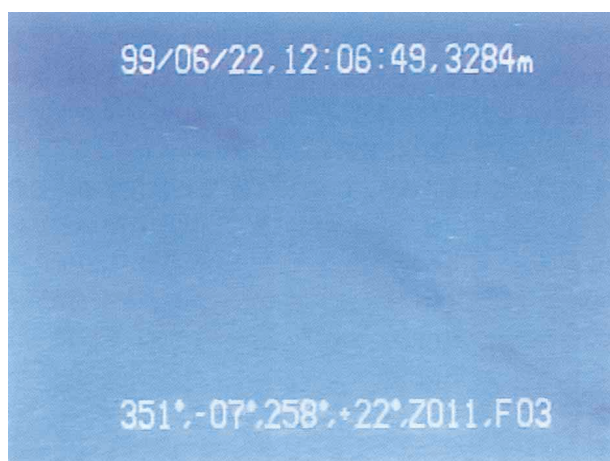


図35 割れ目(220°, 水深3284m)に沿ったバクテリアの痕跡
Fig.35 A linear trace of bacteria mats along buried fissure in a 220° trend (3284m w.d.)

斜面の中央部へ進むにつれ, 海底からシルト岩が露出しはじめ, 層理不明瞭なシルト岩崖も観察できる。水深3267mのシルト岩露頭域(42°50.8745' N, 139°27.3178'

E)で岩石の採取を試みたが(R-1), 非常にもろく原形をとどめていなかった。

平坦な海底が約600m続いた後, 崖の登りとなった。この間に地割れは10列(方向210°前後)観察されたが, そのうち7列は堆積物で覆われていた。水深3267m(42°50.6674' N, 139°26.9413' E)で層理面の確認できる比較的新鮮な弧状地割れ(方向210°, 図36)が観察された。バクテリアマットの追跡調査を試みたが, 円弧状に伸びる地割れは数十メートルで終わってしまい特筆できるものはなかった。

東斜面急崖の麓近くでは, 数ヶ所畑一面の衰えたバクテリアマットの痕跡が広がり, また, 斜面方向に平行して, 砂利混じりの泥流や土石流の跡も分布している(図37)。

さらに登り傾斜になると泥岩の露頭やカレント・リップルが多く認められるようになり, 水深3050m付近の崖の入り口には斜面の崩壊による転石や重力流堆積物(砂~中礫サイズ)が海底を覆っているのが2カ所確認できた。



図36 下部斜面(水深3267m)の新鮮な地割れ・層理が明瞭に観察される。

Fig.36 A fresh, open gash exposing deformed stratification of apron deposits.



図37 東斜面にある砂利混じりの小規模土石流(水深2987m)
Fig.37 A videophoto of rubble flow on steep slope at 2987m w.d.

これらはほとんど泥に覆われておらず、斜面崩壊が発生したのは比較的最近のことであると考えられる。

水深3004 m (42°50.7139' N, 139°26.0956' E)で斜面に散在する礫から生物の付着した円礫(R-2)と炭酸塩でコンクリーションされた円礫(R-3)を採取した。

最後離底点付近で、付着性ホタテ貝の群集生息域(水深2997m, 42°50.8407' N, 139°26.1651' E)が見つけれられ、柱状採泥(C-4・緑色)を試みたが、硬すぎてプッシュコアラが刺さらず試料採取はできなかった

結果：本潜航では、1995年この海域でディープトウカメラで撮影された高濁度の底層水塊は観察されず、また、第480潜航、483潜航および485潜航で観察されたようなバクテリアマットの分布もなく、活動性の衰えた茶褐色痕跡がパッチ状に散在している。バクテリアマットの栄養源は定常的な堆積物中でおこる続成作用や陸から流入する地下水などではなく、地震などの異常現象に伴う断層、地割れによるものの可能性が大きいと推測できる。本潜航から得られた堆積物試料(C-3・白色)中の間隙水の主元素濃度を分析した結果、メタンが還元剤と思われる硫酸濃度の著しい低下が見られた。現在、メタン同位体および固体試料の微量元素濃度や²¹⁰Pbなどの分析を急いでいる。

5. 堆積物試料の観察と分析結果

第480潜航から第486潜航で採取された21本の柱状試料について肉眼観察を、うち18本についてX線CT装置による断面観察を行った。また、肉眼上火山灰層あるいは火山灰質と考えられる15本18層準について試料を分取し、64μmのふるい上で水洗して泥分を除去し、砂粒子と火山ガラスの特徴を観察した。

観察を行った21本の試料のうち、11本にはタービダイトや水中土石流堆積物といった重力流堆積物が認められる。松前海台西方(第480潜航)や北西方(第486潜航)では着底点付近の斜面基部でタービダイトの挟在が観察される(付図1, 2)。また、第480潜航のC-3コア(黄色)では細礫や炭酸塩チムニーの破片と考えられる炭酸塩が挟在している(付図1上)。第486潜航のC-2コア(青)では、火山灰-タービダイト-地割れによると考えられるカオティックな堆積物、という積み重なりが観察される(付図1上, 2左)。このタービダイトは表層から連続する割れ目によって切られている。このことは、火山灰層堆積後にタービダイトを堆積させるイベントが起こり、さらにその後地割れを発生させたイベントがあったことを示している。奥尻海嶺(第483及び484潜航)の試料でも火山灰層とタービダイトの挟在が認められる(付図1中, 付図2左)。特に、第483潜航のC-5コア(黒)は上部がマッドクラストからなる明瞭な水中土石流堆積物であるが、下部も火山灰をパッチ状や斜交するラミナ状に挟んでおり、水中土石流堆積物の可能性が高い。茂津多岬沖(第481潜航)や寿都海底谷出口(第482潜航)の試料中にもタービダイト

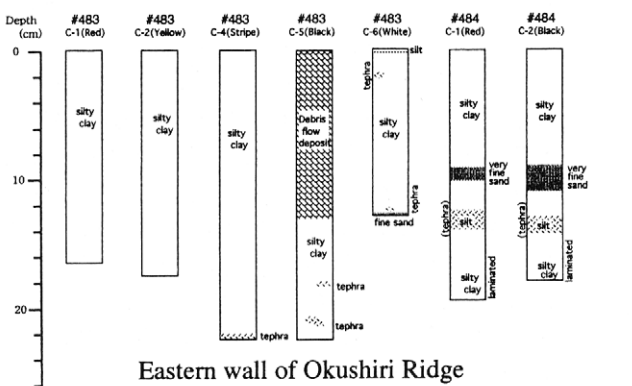
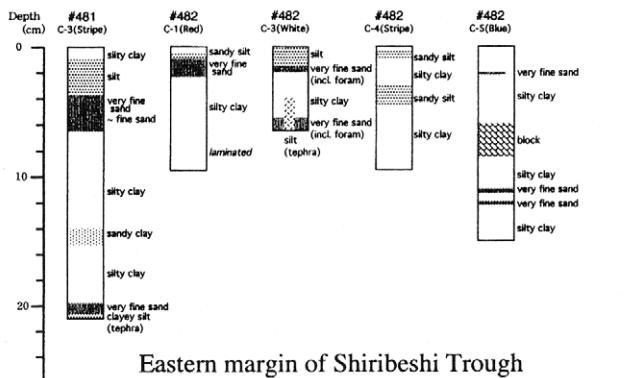
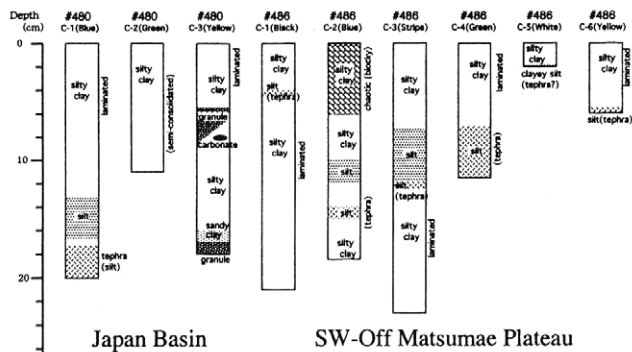
が確認される。特に、第481潜航のC-1コア(ストライプ)や第482潜航のC-1コア(赤)、C-3コア(白)には最表層部にタービダイトが観察され、1993年北海道南西沖地震時の地震性タービダイトと考えられる。その厚さは、第481潜航のC-1コアで約6cmであるが、第482潜航の2本の試料では薄く、2-2.5cmに過ぎない。これらの厚さは後志トラフの表層を広く覆うタービダイト(池原・井内, 1998)よりもやや薄い。これらの重力流堆積物の中には石灰質微化石を含有しているものがある。完新世の日本海は低温で溶存酸素に富む底層水である日本海固有水の存在のため炭酸塩補償深度(CCD)が浅く、水深1000m程度以深では石灰質微化石の保存状態が極端に悪くなることが知られている(Ichikura and Ujiie, 1976; Ikehara, 1991)。今回の試料採取地点はすべて、通常状態では石灰質微化石は保存されない場にある。にもかかわらず、重力流堆積物中に石灰質微化石が残されているということは、1) これらが浅海域から供給されたものであること、2) 堆積が急激に起こり石灰質粒子と海水との接触が素早く断られた、ことを示している。現在、石灰質微化石のうち、底生有孔虫を用いて重力流堆積物の供給場を特定する作業を進めており、結果については別報にて後日報告することとしたい。

これらの重力流堆積物の堆積年代を推定するために、火山灰分析を行った。分析は現在進行中であり、正確な対比を行うに至っていないが、その火山ガラスの形態や組成から、4つのグループに区分できる。一つは、黒雲母を特徴的に含む細粒の軽石質の火山灰で、第480潜航のC-1コア(青)と第484潜航のC-1コア(赤)とC-2コア(黒)に挟在する。2つ目は黒雲母を含まない軽石質の細粒火山灰で、第482潜航のC-3コア(白)、第483潜航のC-4コア(ストライプ)、第486潜航のC-1コア(黒)に認められる。3つ目は中粒砂程度の粗粒な軽石を含むもので、第483潜航のC-5コア(黒)とC-6コア(白)にみられる。4つ目はやや褐色を帯びたパブルウォール型の火山ガラスを主体とするテフラで、第486潜航のC-2コア(青)、C-3コア(ストライプ)、C-4コア(緑)、C-6コア(黄色)に挟在する。これらのうち、4つ目の火山灰層はその肉眼的特徴から、約1000年前に噴出した白頭山-苦小牧火山灰(B-Tm)である可能性が高い。もしこの対比が正しければ、第486潜航地点付近では、約1000年前以降にタービダイトを堆積させるイベントと地割れを発生させるイベントの2回のイベントが起きたことになる。これらを含めて、堆積物による地震発生イベントの認定については、今後の課題である。

6. まとめ

1993年北海道南西沖地震の震源域(津波波源域)および周辺海域で「しんかい16500」による潜航調査を実施した。その結果、以下のような新しい知見が得られた。

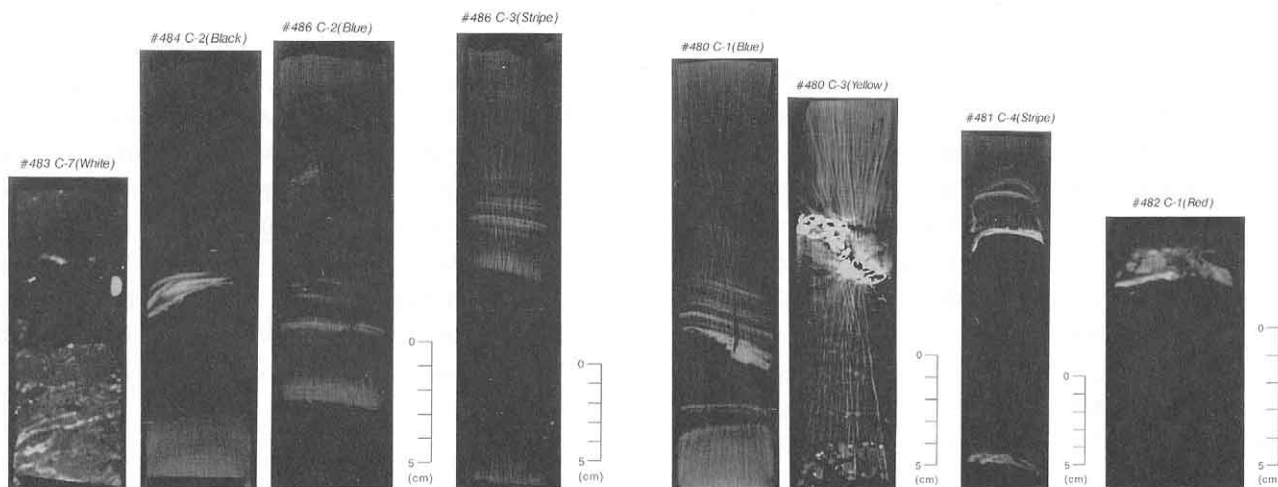
(1) 1993年地震の震源域では、地震性地変として地震動(衝撃)による未固結堆積層の自破砕が普遍的に観察さ



付図1 採取された堆積物試料の柱状図
App. fig. 1 Columnar section of cored sediments

表1 シルト岩の珪藻分析結果
Table 1 Result of diatom analysis

	482 R-001	482 R-002	482 R-003	482 R-006d
<i>Actinocyclus ochotensis</i>		1		
<i>Actinoptychus senarius</i>	1			
<i>Cocconeis costata</i>		*	*	2
<i>C. scutellum</i>	*	*		
<i>C. vitrea</i>				*
<i>Coscinodiscus marginatus</i>	2	1	2	13
<i>Grammatophora spp.</i>			*	
<i>Hemidiscus cuneiformis</i>				1
<i>Neodenticula kamschatcica</i>	56	50	60	50
<i>N. koizumii</i>				8
<i>Nitzschia rolandii</i>	5	12	10	*
<i>Paralia sulcata</i>	*			
<i>Proboscia barboi</i>	*	1		
<i>Rhizosolenia styliformis</i>	2			
<i>Stephanopyxis spp.</i>	2			
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	22	24	19	16
<i>Thalassiosira antiqua</i>	*	1		
<i>T. eccentrica</i>	1			1
<i>T. jacksonii</i>	1	1	1	
<i>T. jacksonii (plicate)</i>	*	*	1	
<i>T. leptopus</i>		*	1	
<i>T. marujamica</i>	2	1	1	
<i>T. oestrupii</i>	*	2	*	2
<i>T. zabelinae</i>	*	2		2
<i>T. spp.</i>	6	4	4	4
<i>Thalassiothrix longissima</i>		*	1	1
Total	100	100	100	100



付図2 いくつかの柱状試料のX線CTによる断面像
App. fig. 2 X-ray CT images for selected core samples

れる。地震後6年の経年変化を示す現象としては、とくに懸濁物の沈殿による開口割れ目の埋積や、バクテリアマットの衰弱があげられる。

(2)末固結堆積物の高速破壊現象は海底での地震性地変の特徴として一般的である。1993年地震の震源域外にある松前海台西北のバルジ状丘陵(第486潜航地点)でも、瓦礫状の破断が観察された。瓦礫状破砕物を覆う浮泥の厚さの目視観測と表層堆積物中のテフラにより、新旧複数回の破断イベントが判別される。とくに、この丘陵における最新イベント(表層堆積物の自破砕)は上記1)に酷似していることから1993年地震で生じた可能性が指摘される。その場合、震源断層となった西傾斜の主断層に対して、副次的なすべり(バックスラスト)を生じたと理解される。

(3)茂津多岬沖斜面では、奥尻海嶺直下で繰り返す大地震で発生する海底デブリフローによってリサイクル的な堆積過程が繰り返されている状況が判明した。また寿都海底谷は後志トラフで確認されている1993年の地震性タービダイトの通過経路になったことが明らかになった。

(4)今回、茂津多沖の陸棚斜面で巨大バクテリアマット群が、また松前海台西南の活断層上盤でチムニー群が発見された。それぞれの産状から、関係する湧水の起源やメカニズムは異なるようである。

(5)1993年地震の震源域の北端にあたる奥尻海嶺東斜面では、著しい表層自破砕やバクテリアマットを伴う開口割れ目は、ODP掘削地点周辺でのみ観察された。この事実は、掘削孔という人工構造の存在と地盤の破壊との因果関係を示唆する。

(6)詳細には述べなかったが、今航海による日本海盆側の広域地形調査の結果、奥尻海嶺西方にある2つの海山の形態が明らかになり、また、松前海台西方でも新しい基盤岩の高まりが発見された。これらは、日本海盆と東北日本弧の発達過程とアクティブテクトニクスの包括的理解にとって試金石となるであろう。われわれの見解は稿を改めて報告する予定であり、調査資料は海上保安庁水路部のデータセンターを通じて順次公表される。

新千年紀を迎える今日、この15年間に蓄積された貴重な資料を解析し、日本海東縁の変動地形及び地震地質に関するモデルに総合する段階が到来している。今航海は、所属省庁や専門分野の異なる研究者や学生が協力することによって大きな成果を挙げることができた。著者らは、今後もこうした連携を強めつつ、日本海固有の生態系やテクトニクスの全体的実相の解明と社会への還元而努力して行く所存である。

1999年度の「よこすか/しんかい16500」日本海行動にあたって、田中等船長以下「よこすか」乗組員の皆様、今井義司司令はじめ「しんかい16500」運行チームの方々には、

潜航調査および夜間の広域調査から船内生活にいたるまでお世話になりつつ、調査研究内容に深い理解と力強い御支援をいただきました。乗船研究者一同、心から感謝いたします。

引用文献

- 1) Ichikura, M. and Ujiie, H., "Lithology and planktonic foraminifera of the Sea of Japan piston cores", *Bull. Natl. Sci. Mus., Tokyo*, ser.C, 2, 151-178(1976)
- 2) Ikehara, K., "Modern sedimentation off San'in district in the southern Japan Sea" In *Takano, K. ed., Oceanography of Asian Marginal Seas*, Elsevier, Amsterdam, 143-161(1991)
- 3) 池原 研・井内美郎, "深海底タービダイトからみた北海道西方日本海東縁の地震発生間隔", *月刊地球*, 20, 470-475(1998)
- 3) 小林 洋二(1983): プレート "沈み込み" のはじまり. *月刊地球*, 5, 510-514.
- 4) 中村一明(1983): 日本海東縁新生海溝の可能性. *地震研究所彙報*, 58, 711-722.
- 5) Ohtake, M., "A seismic gap in the eastern margin of the Sea of Japan as inferred from the time-space distribution of past seismicity", *The Island Arc*, 4, 156-165(1995)
- 6) 岡村行信, 倉本真一, 佐藤幹夫, "日本海東縁海域の活構造およびその地震との関係", *地質調査所月報*, 49, 1-18(1998)
- 7) 竹内章・藤岡換太郎・藤倉克則・加藤幸弘・長沼毅・倉本真一・岡村行信・岡野肇・青木美澄・小寺透, "津波地震による海底地盤変動 - 1993年北海道南西沖地震震源域潜航調査 -", *JAMSTEC深海研究*, 12, 65-81(1996)
- 8) Takeuchi, A. and Shipboard Scientific Party of R/V Yokosuka, Japan Sea Cruise, "Bottom response to a tsumami earthquake: Submersible observations in the epicenter area of the 1993 earthquake off southwestern Hokkaido, Sea of Japan", *Jour. Geophys. Res.*, 103(B10), 24109-24125(1998)
- 9) Tamaki, K., K. Pisciotto, J. Allan, and Shipboard Scientific Party, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 127, 844 pp. (Ocean Drill. Program, College Station, Tex., 1990)
- 10) Yanagisawa, Y. and Akiba, F., "Refined Neogene diatom biostratigraphy for the northwest Pacific around Japan, with an introduction of code numbers for selected diatom biohorizons", *Jour. Geol. Soc. Japan*, 104, 395-414(1998)

(原稿受理: 2000年1月11日)