

北海道西方沖の地震震源域周辺における活断層の潜航調査

岡村 行信^{*1} 佐竹 健治^{*1} 荒井 晃作^{*1}
池原 研^{*1} 長尾 哲史^{*2} 桧物 豊成^{*2}

北海道西方沖に分布する海底活断層の活動度を明らかにするため、「しんかい2000」及び「ドルフィン3K」を用いた潜航調査を行った。調査地点は、忍路海山北西斜面、後志海山東方の小海嶺、積丹半島北方沖の神威海嶺である。前者2カ所は1940年に発生した積丹半島沖地震震央の北側と南側の活断層に沿った斜面で、同地震の震源域を推定することが主要な目的である。忍路海山北西斜面では顕著な斜面崩壊が広範囲に観察された。また、斜面直下の平坦面で採取した柱状試料には3枚の崩壊堆積物が含まれており、頻繁に地震が発生していることが明らかになった。最近の地震は1940年であると推定されるが、その以前の地震発生年代は不明である。後志海山東方の小海嶺では、小規模な露頭に斜面崩壊の痕跡が認められたが、それらは薄く泥に覆われていた。斜面直下で得た柱状堆積物には2回の斜面崩壊を示唆する粗粒堆積物が含まれており、そのうち上部の堆積物は1940年に形成された可能性が高い。神威海嶺でも泥に覆われた斜面崩壊が観察され、斜面直下では崩壊堆積物が2層準で認められた。いずれの地点でも堆積速度が明らかでないため、地震発生間隔を推定することはできない。今後、潜水調査以外の調査・研究も含めて、活断層周辺の堆積速度を明らかにすることによって、海域活断層の活動履歴を明らかにできる可能性が高まる。

キーワード：1940年積丹半島沖地震、海域活断層、斜面崩壊、日本海

Dive surveys of active faults around a seismic source area to the west of Hokkaido

Yukinobu OKAMURA^{*3} Kenji SATAKE^{*3} Kohsaku ARAI^{*3}
Ken IKEHARA^{*3} Tetsufumi NAGAO^{*4} Toyonari HIMONO^{*4}

Dive surveys by the submersible "Shinkai 2000" and "Dolphin 3K" were carried out to investigate an activity of sea-bottom faults to the west of Hokkaido. Surveyed sites are a northwestern slope of the Oshoro seamount, a small ridge to the east of the Shiribeshi seamount and the Kamui Ridge to the north of the Shakotan Peninsula. The former two sites are located to the north and south of the epicenter of 1940 Shakotan-oki earthquake, and one of the major objects of the dives is to clarify the source area of the earthquake. At the northwestern slope of the Oshoro seamount, large-scale collapses were widely observed. Sediment core samples collected from the base of the slope include three turbidites or gravity driven sediments, suggesting that the slope has been frequently attacked by earthquakes. The last earthquake was inferred to be the 1940 Shakotan-oki earthquake, but the ages of the other slope collapses are not known. At a small ridge to the east of the Shiribeshi seamount, small-scale collapses of outcrops covered by a thin mud cover were observed. A sediment core obtained from the base of the slope suggests that two events of slope collapses and the upper event is presumably correlative to the 1940 Shakotan-oki earthquake. At the Kamui Ridge, the slope is widely collapsed and covered by thin muddy sediments. Two collapse events were presumed from the sedi-

* 1 地質調査所
* 2 富山大学理学部
* 3 Geological Survey of Japan
* 4 Toyama University

ment core. Because the rates of sedimentation is not known at the three sites, the ages and recurrence intervals of earthquakes can not be inferred. It is necessary to study the sedimentation rate near the active faults by multi-disciplinary study for the estimation of the activity of the faults.

Keywords : 1940 Shakotan-oki earthquake, offshore active fault, slope failure, Japan Sea

1. はじめに

日本海東縁海域では、20世紀に4つの大地震が発生している(第1図)。それらは北から順に、1940年積丹半島沖地震(M7.5)、1993年北海道南西沖地震(M7.8)、1983年日本海中部地震(M7.7)、1964年新潟地震(M7.5)である。また、1971年にはサハリン沖でM6.9の地震が発生している。それらの地震震源域を地図上にプロットすると、地震が発生していない空白域が震源域の間に残っており、将来地震が発生する可能性の高い領域であると考えられている(Ohtake, 1995)。

上記の地震の中で最も古い1940年の積丹半島沖地震については、奥尻海嶺北端に位置する忍路海山付近を震央とすることはわかっているものの、震源断層の広がりには確定していない。Hatori(1969)は、津波観測データと当時の海底地形図を用いて、長さ170km、幅70kmという波源域を求めた。一方、Satake(1986)は検潮記録に残された津波波形と津波の数値計算との比較などから、断層の長さは100km、幅35kmで、その南端は北緯43°45'付近とHatori(1969)の波源域南端より50km以上も北にあると結論した(第2図)。

1993年の北海道南西沖地震は渡島半島の西側で発生したが、震源域が精度よく明らかにされている。Satake(1986)の求めた積丹半島沖地震の震源域が正しいとすると、1993年北海道南西沖地震の震源域との間に約30°すなわち50km程度の空白域が存在することになる(Ohtake, 1995)。一方、Hatori(1969)による波源域の南端が正しいとすると、北海道南西沖地震との間には、空白域は存在しない。この積丹半島西方沖の地震空白域が存在するかどうかを明らかにするためには、1940年積丹半島沖地震の震源域を確定する必要がある。

1998年には「しんかい2000」による潜航調査を忍路海山とその南方の海山で実施し、忍路海山が積丹半島沖地震の震源域であったことと、Hatori(1969)で推定されたほどその震源域は南に広がっていないことが推定された(岡村ほか, 1999)。2000年には、1998年の調査結果をさらに裏付けるために、忍路海山の周辺で潜航調査を行った。調査地点は、忍路海山の北西側斜面、後志海山東方の小規模な海山及び石狩海盆の西縁に位置する神威海嶺で、「ドルフィン3K」による3回の潜航と、「しんかい2000」による3回の潜航を実施した(第2図)。

「ドルフィン3K」による調査は、7月27日に忍路海山の北西側斜面で、7月28日には神威海嶺東側斜面で2回実施した。その後、8月23日から25日の3日間にわたって、「しんかい

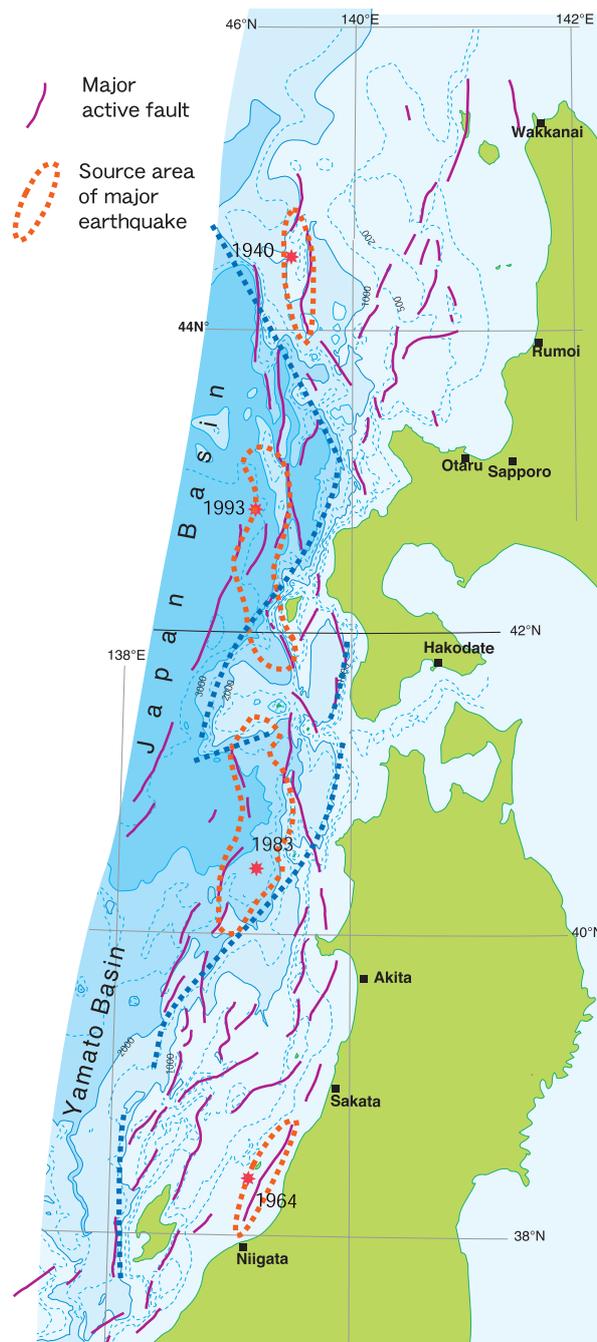


図1 日本海東縁の主な活断層と20世紀に発生した主要な地震震源域。

Fig. 1 Major active faults and source areas of earthquakes during the 20th century.

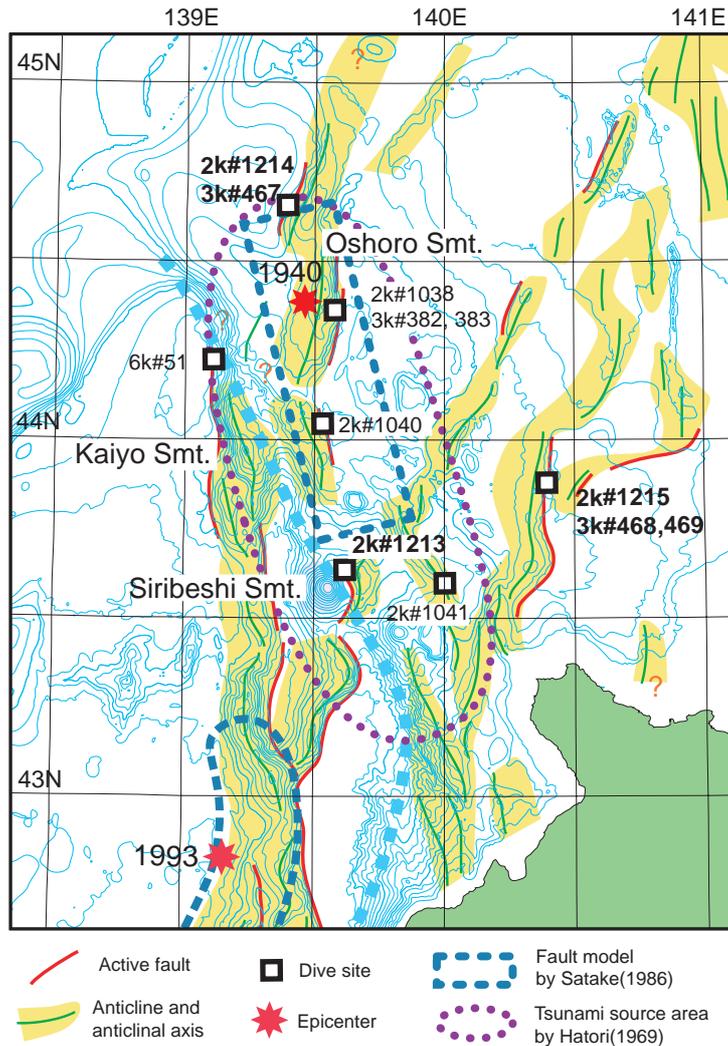


図2 北海道西方の海底地形,地質構造及び地震震源域。

Fig.2 Bathymetric contour, geologic structure and source areas of earthquakes of the Japan Sea, west of Hokkaido.

2000」による3カ所の潜航調査を行った。

今までに数多く行われた潜航調査で,活断層そのものを直接観察されたことはほとんどないため,今回の一連の潜航では,斜面の崩壊状況の観察や崩壊堆積物の採取(表1)に重点を置いた。今のところ,地震によって生じた斜面崩壊堆積物を得ることが,海域における地震の発生頻度を推定する最も有効な方法であると考えているためである。

本報告は3地点の調査の概要を述べたものである。これらの潜航では,地震によって生じたと考えられる斜面崩壊堆積物が得られた。今後,観察された斜面崩壊の状況や,崩壊堆積物を解析し,今までに行われた活断層の潜航調査で得られたデータと比較検討することによって,忍路海山とその周辺の活断層の活動度が明らかにされると期待される。

2. 忍路海山北部における潜航調査

2.1. 背景

積丹半島沖地震の震源域と考えられる忍路海山は,地形的に南部と北部に分けることができる。南部は東側が急傾斜し,西側が緩傾斜の背斜構造であるのに対して,北部は西側が急傾斜する。Hatori(1969)及びSatake(1986)のいずれの震源モデルも,忍路海山の南部のみを含み,北部は震源域に含まれていないが,震源域の北限を制限するデータは少ない。今回の調査地点はその忍路海山北部の南縁に位置する。

地質調査所によって得られた潜航地点を東西に横断する音波探査プロファイルは,忍路海山北部では西側斜面が急傾斜することを示し,その基部に活断層が存在することを示唆している(図3下)。この急斜面で積丹半島沖地震に伴う斜面変動が認められるかどうか,或いはそれ以外の地震の証拠が存在するかどうかを確認する目的で,潜航調査を実施した。

表1 北海道西方沖の潜航調査で得られた海底試料の一覧表

Table 1 List of sea-bottom samples collected by dive surveys to the west of Hokkaido.

	Dive#	Sample No.	Date	Time	Lat.(N)		Lon.(E)		Depth	Description	Size(cm)
					deg	min	deg	min			
後志 海山 東方	S2K 1213	R-1	2000.9.23	11:12	43	38.067	139	37.203	1632	volcanic rock (basaltic)	10 x 11 x 9
	S2K 1213	R-2	2000.9.23	12:34	43	38.004	139	37.772	1548	igneous rock (granitic)	24 x 20 x 16
	S2K 1213	R-3	2000.9.23	12:38	43	38.004	139	37.772	1548	brownish gray mudstone	12 x 8 x 6 ; 9 x 7 x 6
	S2K 1213	R-4	2000.9.23	12:53	43	38.014	139	37.792	1539	gray mudstone	21 x 15 x 15
	S2K 1213	R-5	2000.9.23	13:20	43	38.01	139	37.951	1493	brownish gray mudstone, turbidite	34 x 21 x 9
	S2K 1213	C-1 (black)	2000.9.23	10:38	43	38.068	139	37.022	1649	Head 200	
	S2K 1213	C-2 (yellow)	2000.9.23	11:33	43	38.023	139	37.236	1614	Head 125	
	S2K 1213	C-3 (red)	2000.9.23	13:51	43	38.007	139	38.206	1421	Head 114	
忍路 海山 北西 斜面	S2K 1213	C-4 (green)	2000.9.23	14:25	43	38.009	139	37.762	1549	Head 143	
	D3K 467	R-1	2000.7.27	10:13	44	39.519	139	24.414	1225	?	10 x 6 x 6
	D3K 467	R-2	2000.7.27	12:41	44	38.638	139	25.770	519	light brown mudstone	15 x 9 x 9
	D3K 467	C-1 (green)	2000.7.27	9:30	44	39.714	139	24.119	1347	head 130 °	
	D3K 467	C-2 (red)	2000.7.27	10:50	44	39.283	139	24.720	1082	head 123 °	
	S2K 1214	R-1	2000.8.24	12:22	44	39.515	139	24.415	1222	gray mudstone	10 x 6 x 5
	S2K 1214	R-2	2000.8.24	12:35	44	39.495	139	24.390	1220	gray hard shale	27 x 15 x 18
	S2K 1214	R-3	2000.8.24	14:36	44	39.147	139	25.016	875	greenish gray mudstone	9 x 5 x 3
神威 海嶺	S2K 1214	R-4	2000.8.24	14:36	44	39.147	139	25.016	875	dark brown mudstone	20 x 7 x 6.5
	S2K 1214	C-1 (black)	2000.8.24	10:29	44	39.934	139	23.971	1383	head 180 ° ; 1/3	
	S2K 1214	C-2 (red)	2000.8.24	10:31	44	39.934	139	23.971	1383	head 180 ° ; almost full	
	S2K 1214	C-3 (yellow)	2000.8.24	13:08	44	39.401	139	24.511	1165	head 200 ° ; inside of a crack at 160 °	
	S2K 1214	C-4 (green)	2000.8.24	14:57	44	39.148	139	25.089	817	head 150 °	
	D3K-468	C-1(Green)	2000.7.28	9:14	43	49.164	140	22.471	802	head 280	
	D3K-468	C-2(Red)	2000.7.28	10:45	43	49.168	140	21.448	531	head 220	
	D3K-469	R-1	2000.7.28	14:49	43	49.666	140	21.917	598	light gray hard shale	20 x 18 x 11
神威 海嶺	D3K-469	C-1(Green)	2000.7.28	13:49	43	49.648	140	22.613	802	head 270	
	S2K 1215	R1	2000.8.25	11:52	43	49.2	140	22.126	757	gray hard shale	15 x 18 x 15
	S2K 1215	R2	2000.8.25	12:36	43	49.279	140	22	696	volcanic rock (basaltic)	22 x 15 x 12.5
	S2K 1215	R3	2000.8.25	13:13	43	49.279	140	21.775	634	gray hard shale	15 x 12 x 9 ; 11 x 8 x 7
	S2K 1215	C-1 (black)	2000.8.25	10:02	43	49.01	140	22.547	797	head 251	
	S2K 1215	C-2 (yellow)	2000.8.25	10:54	43	49.143	140	22.311	796	head 334	
	S2K 1215	C-3 (red)	2000.8.25	12:48	43	49.256	140	21.934	682	head 251	

2.2. ドルフィン3K 第467潜航

日時：2000年7月27日 8：34 - 13：22

潜航地点：忍路海山北方

着底点：北緯44° 39.714 ' 東経139° 24.119 ' 水深1347 m

離底点：北緯44° 38.620 ' 東経139° 25.838 ' 水深 451 m

「しんかい2000」潜航ルートの安全確認を目的とした潜航調査を行った。本調査地点周辺では、マルチナロービームに基づく精密海底地形データは得られていない。そこで、まず北西 - 南東方向の約3マイルにわたってPDR測深を行い、斜面の勾配を調べた。その結果、水深1450m程度の平坦面と水深220m程度の海山ピークとの間に総高低差1200mを越す急斜面が存在すること、さらにその斜面の勾配が一様でないことを確認した上で、水深1350mから450m付近まで、水平距離で3km強、比高約900mのルートを設定した(図3上)。

着底点(水深1347m)付近は砂礫混じりの泥の斜面であった。そこで柱状採泥(#467-C1, 緑)を行ったあと、南東方向へ斜面を上昇した。底質は泥だが、粗い砂礫に覆われている部分が多い。また、斜面と平行(ほぼ200°方向)に伸びる溝状の小起伏が数条観察された。溝は泥で埋まっているように見える。部分的に泥のみの海底を通過し、再

び砂礫に覆われ、水深1279mで小規模な露岩が現れた。その後も、砂礫あるいは粗い礫に覆われた海底が続く、溝状の起伏も多数観察された。

水深1230m付近から底質は泥となり、水深1225mの高まりへ到着した。高まりには薄く泥をかぶった小礫が多数分布している。ここで岩石サンプル(#467-R1)を採取したが、後の航走中にバスケットに入り込んだ岩石と混ざってしまい、確認できなかった。この高まりから南西へ約50m程進んだ地点(水深1222m)において、大礫が多数集まって高まりを作っているのが観察された。そのすぐ南側の泥に覆われた海底には、やや幅の広い溝が南北方向に数条伸びている。その後、斜面の勾配が増すに従い、底質が砂礫質となり、転石(大礫や巨礫)が増え始めた。また、所々で南北に伸びる溝が観察された。途中で底質は一時的に泥に変わったが、再び砂礫混じりとなり、水深1130m付近からは礫の転石が現われ、底質も礫となった。再び底質が砂礫質となった水深1082m付近において柱状採泥(#467-C2, 赤)を行った。その後、水深1053m付近において、比高数mの露頭が観察された。その上部には、砂礫~礫で覆われた斜面が続くが、再度溝状の小起伏が水深970m付近までほぼ連続して観察された。底質は次第に粗い礫となり、急崖露頭の基部に達した。

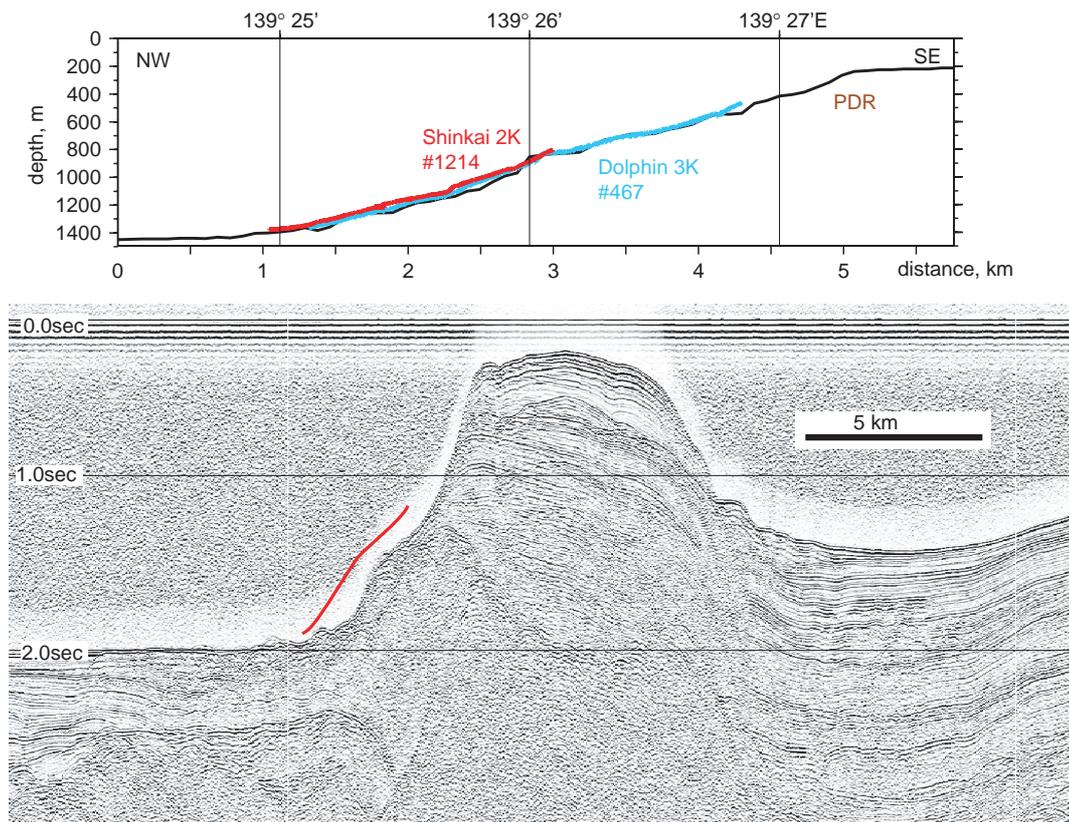


図3 忍路海山北部の断面。(上)PDR,ドルフィン3K,しんかい2000による北西-南東断面。(下)地質調査所による反射断面。44°40'沿いの東西方向。

Fig. 3 Cross-section of northern Oshoro Seamount. (top) The NW-SE cross-section by PDR, Dolphin 3K and Shinkai 2000. (bottom) Seismic profile by Geological Survey of Japan. The direction is E-W along 44°40' N.

水深850m付近から始まる急崖の比高は約40mで、入り組んだ地形をしている。露頭には水平な割れ目が観察された。急崖の上部では水深800m付近まで、泥に覆われたゆるやかな斜面となり、溝状の小起伏が認められた。その後、斜面の傾斜が増したが、底質は泥で、たまに小規模な露頭や転石が散らばる程度であった。水深660m付近で再び溝状の起伏が2本観察された。水深650m付近から所々で転石が見られるようになり、水深640m付近には小規模な露頭が観察された。その後も所々で転石がみられる泥の海底が続く、水深570m付近からは転石が増え始めた。水深520m付近から斜面の傾斜が増し、転石が非常に多くなるとともに、小規模な露頭も認められた。水深519mで岩石サンプル(#467-R2)を採取した。すぐ上部の水深510m付近から薄く泥に覆われた露頭が始まり、急崖となって水深450m付近まで続いた。この付近の海面には漁具を固定するボンデンがいくつか設置されており、それらを回る漁船も確認されたため、その手前の急崖頂部と考えられる451m地点で離底した。

2.3. しんかい2000 第1214潜航

日時:2000年8月24日 9:00 - 15:58

観察者:佐竹 健治

パイロット:大野 芳生,コパイロット:植木 博文

潜航地点:忍路海山北方

着底点:北緯44°39.934'東経139°23.971'水深1383m

離底点:北緯44°39.148'東経139°25.089'水深816m

本潜航の目的は、忍路海山北方西側斜面で海底観察を行い、1940年積丹半島沖地震の震源域の北側への広がりを確認することである。前節で述べたドルフィン3Kによる事前調査結果に基づき、斜面基部を中心に観察を行った。ルートマップを図4に、断面図を図5に示す。ドルフィン3K着底点付近の海底(1347m)は砂礫に覆われていたため、さらに斜面下部の水深1383mに着底した。この付近は一面泥のなだらかな海底であり、砂礫はまったく見当たらない。ここで、柱状採泥を2本(#1214-C1黒,C2赤)を行った後、ソナーの反応を確認するため数十m航走したが、生物による起伏しか確認できなかった。途中、泥に埋もれかけた溝状の小起伏が数本観察された。

水深1380m付近から緩やかな上り斜面となり、転石が増え始め、底質も砂礫で覆われはじめた。ほぼ南北方向にのびる溝状の小起伏がほぼ連続して観察された。これらの起伏を詳細に観察すると、溝の内部は砂礫に覆われておらず、泥のみが堆積している(図6)。水深1305m付近から斜

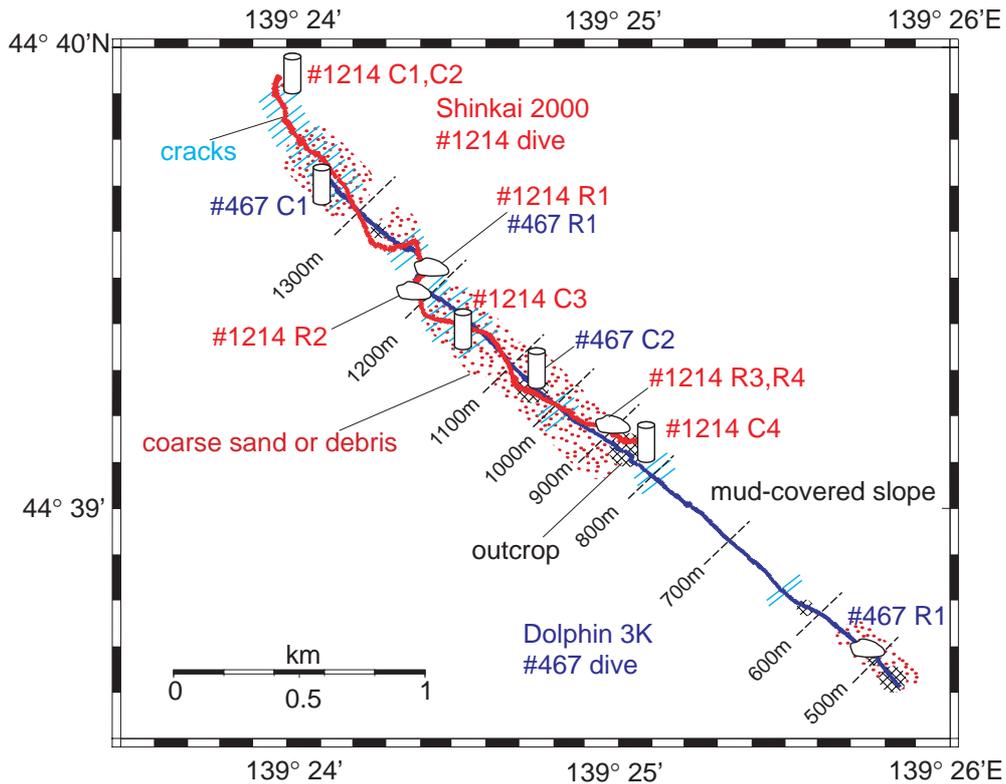


図4 ドルフィン3K第467潜航,しんかい12000第1214潜航のルートマップ。試料採集地点及び底質を示す。
 Fig. 4 Route map of Dolphin 3K dive #467 and Shinkai 2000 dive #1214. Sampling locations and bottom geology are shown.

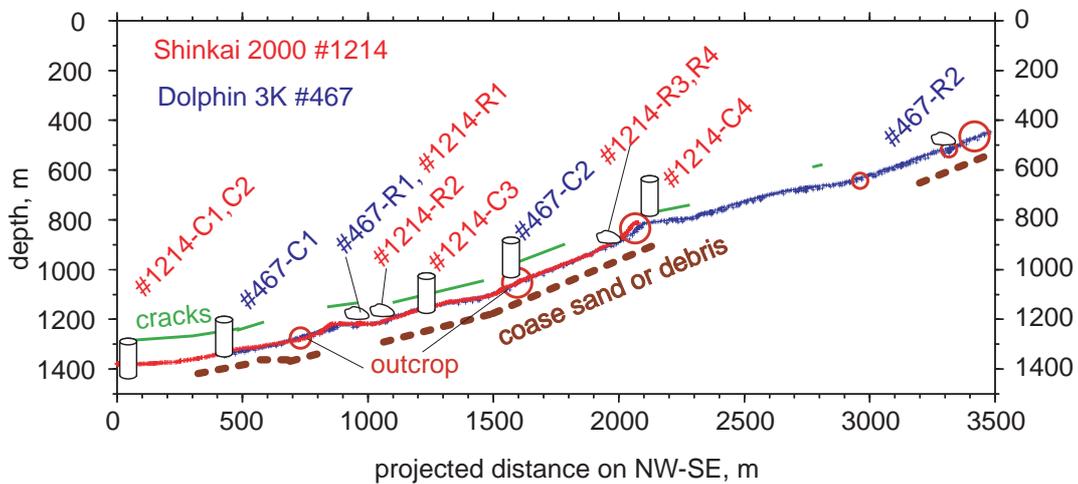


図5 ドルフィン3K第467潜航,しんかい12000第1214潜航の観察結果の断面表示。
 Fig. 5 Cross-sectional view of observations by Dolphin 3K dive #467 and Shinkai 2000 dive #1214. Sampling locations and bottom geology are shown.

面がややゆるくなり,海底を覆う砂礫や溝状の起伏は観察されなくなった。水深1260m付近からは底質が再び砂礫混じりとなり,溝状の小起伏も再び観察された。水深1220m付近からコースを南向きに変えたところ,海底は再び泥となった。

ドルフィン3Kで確認した高まり(水深1222m)において,岩石サンプル(#1214-R1)を採取した。ソナーの反応に従って,ドルフィン3Kと同じコースをたどり,巨礫が集まっている別の高まりへ到達した(図7)。ここでも岩石サンプル(#1214-R2)を行った。その後,溝状の起伏のある泥の海

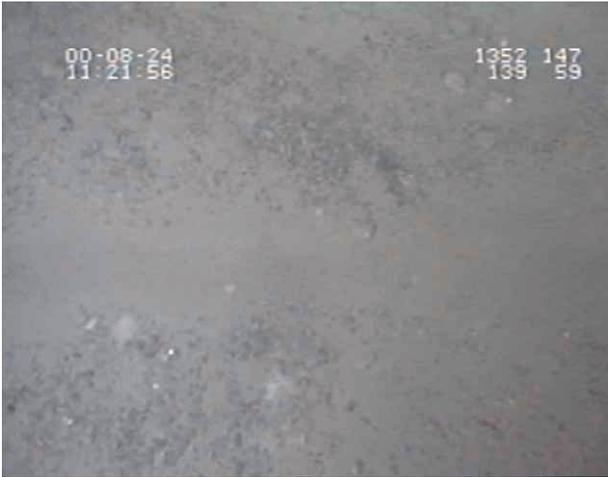


図6 直上から見た溝状のうねり。水深1350m地点。溝の内部には泥が堆積しているように見える。

Fig. 6 Photograph of a undulation taken from directly above. Water depth 1350 m. The inside of crack seems to be buried by mud.



図8 斜面と平行して走る溝状のうねり。水深1200m地点。

Fig. 8 Buried undulation parallel to the slope. Water depth 1200 m.



図7 水深1220 m地点の高まり。崩壊堆積物とみられる巨礫が多数観察される。

Fig. 7 A small peak at 1220 m depth. Many boulders, probably collapse origin, are observed.



図9 水深835 m付近の急崖露頭。

Fig. 9 Outcrop on the steep slope at water depth of 835 m.

底が続き、数ヶ所で巨礫が観察されたが、巨礫の周囲には礫も見られた。水深1200m付近から底質はやや砂礫混じりとなり、溝が数本観察された。水深1165m地点において、やや泥に埋もれた溝の中で柱状採泥(#1214-C3黄)を行った。この後も溝は所々で観察され、底質は砂礫が次第に増えていった。水深1120m付近から底質は礫となり、斜面の勾配も急になった。水深1086m付近に比高10m程度の急崖露頭が現われた。急崖の上でも、底質は砂礫混じりの泥底で、溝が観察された(図8)。その後、水深1060m付近から露岩と転石が連続する急斜面が続き、水深1048m付近に再び露岩の段差(数m程度)が見られた。その上部では、砂礫に覆われた斜面が続き、溝状の起伏も水深960m付近まで所々に見られた。底質は次第に粗く礫質となり、874mで

急崖露頭の基部に達した。露頭基部で、露頭から崩壊した堆積岩を3個(#1214-R3,R4)採取した。急崖は比高約50mであるが、露頭は連続しておらず、上部には崩壊跡やそれを泥が覆っている様子が観察された(図9)。急崖頂上の泥の部分で柱状採泥(#1214-C4緑)を行い、離底した。図10にこの柱状コアのCTスキャン写真を示す。粗粒のタービダイト層が、表面付近を含めて全部で3枚確認された。

2.4. 両潜航のまとめと地震との関連

忍路海山北部における「ドルフィン3K」と「しんかい2000」の潜航の結果、斜面と平行な小起伏、急崖露頭からの崩壊堆積物など、最近の地震動によると考えられる斜面崩壊の変動地形が観察された。また、柱状コア内には3枚のター

Shinkai 2000 dive 1214 C4 green
at 817 m depth on the western slope of
Oshoro Seamount

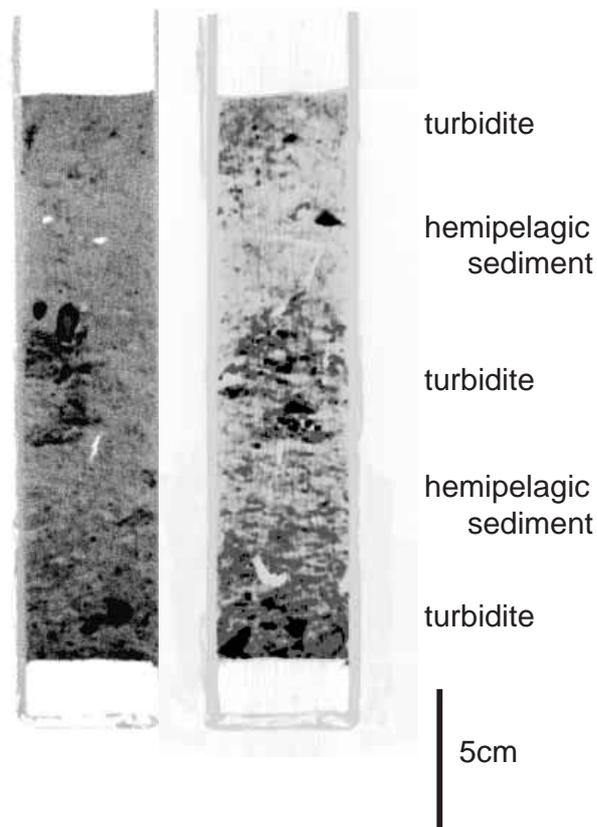


図10 しんかい2000第1214潜航で得られた柱状コア(C4緑)のX線CTイメージ。撮影方向が異なる2枚の像を示す。地表付近を含めた3枚のタービダイト層が確認される。

Fig. 10 X-ray CT images of sediment core (C4 Green) collected during dive #1214. Two images show different directions of projection. Three turbidite layers including one near the surface are seen.

ビダイト層が確認された。これらの特徴は、約30km南で1998年に行われた「しんかい2000」第1038潜航(岡村ほか, 1999)での観察結果と良く似ている。第1038潜航は1940年積丹半島沖地震の震央付近で行われ、その際には忍路海山の東側斜面で急崖露頭やそこからの崩壊堆積物が観察された。

これらの観察結果を総合すると、忍路海山は1940年積丹半島沖地震の震源域内であり、激しい震動によって急崖露頭の崩落が生じたと推定される。1940年積丹半島沖地震はいわゆる津波地震ではなく、激しい震動を伴う通常地震であったと推定される。また、柱状コアに複数枚のタービダイト層が確認されたことから、忍路海山では過去にも複数回の地震が発生したと推定されるが、火山灰層などは発見されていないことから年代決定は困難であり、過去の地震の発生時期は不明である。

3. 後志海山東方

3.1. 背景

後志海山は第四紀に形成されたと考えられる火山で、1940年の積丹半島沖地震と1993年の北海道南西沖地震の2つ地震震源域の間に位置する。その海山の東方には、音波探査プロファイルに基づいて2-3列の活断層が認定されている。それらは、Satake(1986)が推定した積丹半島沖地震の震源断層の外側に位置するが、Hatori(1969)の波源域には含まれる(図2)。1998年には、そのうち後志海山東方の神威海盆西縁に発達する逆断層に伴う背斜構造を「しんかい2000」で潜航調査したが、過去の断層運動を示唆するような変動地形・構造は見いだせなかった。

今回潜航調査を行ったのは、1998年に調査した背斜構造のさらに西側に位置する背斜構造である。潜航地点を東西に横断するプロファイルを第11図に示す。そこに示されるように、西側斜面が急傾斜し、東側斜面が緩傾斜する非対称な背斜構造が形成されており、西側斜面の基底に東傾斜の逆断層が伏在していると推定される。背斜構造の規模としては、必ずしも大きいとはいえないが、背斜構造の西側に分布する堆積層の最上部まで変形が及んでいるように見えることから、現在も活動的な断層である可能性が高い。しかしながら、プロファイルの垂直分解能は40-50mであることから、最近の地震活動や1940年に活動したかどうかは不明である。そこで、この活断層の最近の活動履歴を解明するために、潜航調査を実施した。

3.2. しんかい2000 第1213潜航

2000年8月23日 9:04 - 16:47

観察者: 岡村 行信

パイロット: 光藤 数也, コパイロット: 千葉 和宏

潜航海域: 北海道西方沖日本海, 後志海山東方

着底点: 43° 38.068' N, 139° 37.022' E 水深1649 m

離底点: 43° 37.815' N, 139° 38.168' E 水深1427 m

潜航地点は背斜構造の西側斜面である。海底に断層が直接露出していることは期待できないので、斜面崩壊した痕跡あるか、あればそれが1940年に生じたものかを明らかにするために、斜面の崩壊状況を観察することと、斜面直下の平坦面で柱状採泥試料を採取することを主な目的とした。

海上保安庁水路部のマルチナロービーム測深機の調査データに基づいた詳細な海底地形図より最も傾斜の急な場所を選んだ。ただし、潜航直前に実施したPDRによる調査では、等深線が500m以上東にずれていることが明らかになったため、当初予定していた潜航地点より、着底点を約650m西にずらすことにした。潜航ルートの航跡平面図を第12図に、断面図を第13図に示す。

当日は風がやや強かったが、予定通り午前9時すぎに潜航を開始し、午前10時38分に水深1649mの海底に着底した。着底点は斜面西側の平坦面で、断層の変形が及んでいないと考えられる場所である。まずそこで、過去の地震による斜面崩壊堆積物が存在するかどうかを調べるため、

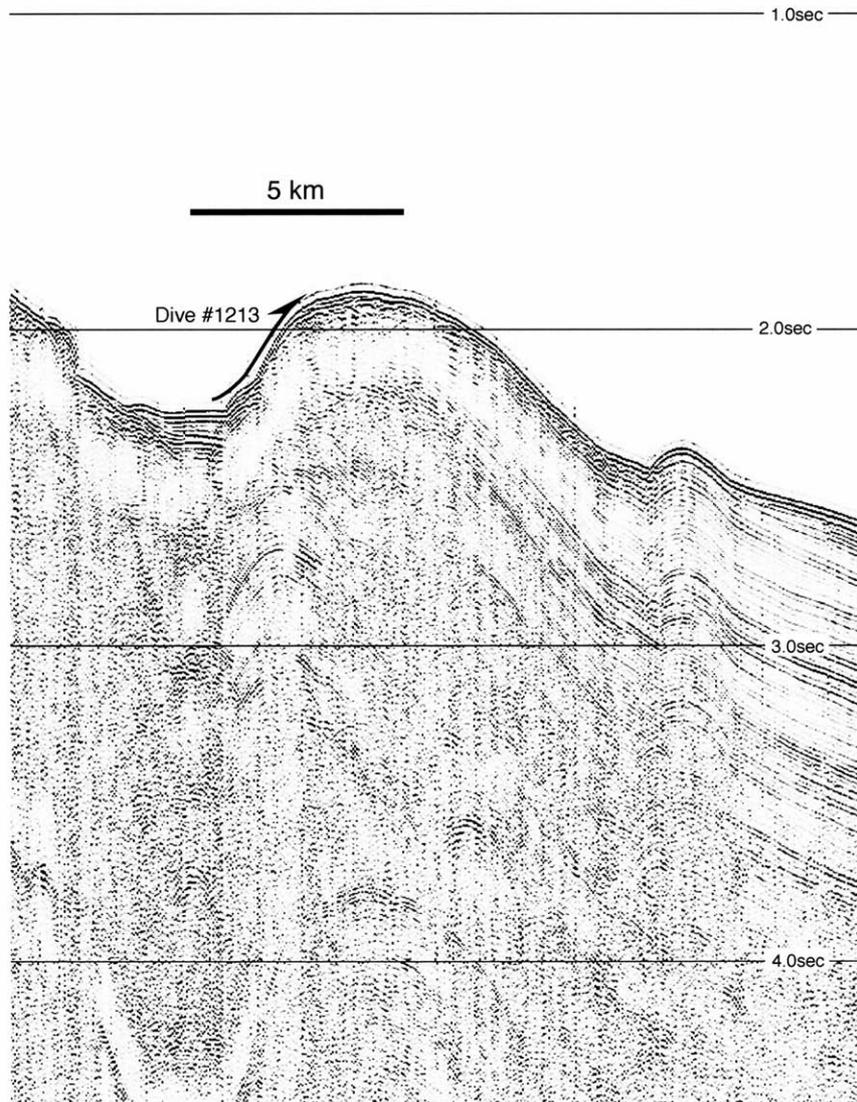


図11 「しんかい2000」第1213潜航で調査した背斜構造を横切る反射断面。
Fig. 11 Seismic profile across an anticline surveyed by "Shinkai 2000" dive 1213.

黒色の柱状採泥(C-1)を実施した。その後斜面を目指して東に進むと、斜面の基底で緩やかなうねりが2-3回繰り返すのが観察された。うねりは約180度方向に延びている。うねりの近くでは転石や崩れかけた泥塊が散在している。そこで、黒っぽい岩石1個(R-1)採取し、うねりに沿って南下したが、不明瞭になったため、再びコースを90度として斜面に向かった。

斜面を登り始めるとすぐに黄色の柱状採泥(C-2)を行った。その周辺の海底に蟹カゴを引きずって形成されたと考えられる、幅数十cm、深さ数cmの直線的な溝が数十m間隔で観察された。その周辺には泥の固まりが散在しているが、人為的に形成された可能性が高い。その上側では600m以上にわたって、泥に覆われた緩やかな斜面が連続する。

着底点より約1000m東側で転石が増え、緩やかな盛り上がり観察された後、泥岩が露出する急斜面が出現した。斜面には黒っぽい転石と白っぽい転石、さらに泥に薄く覆

われた泥岩露頭が観察された(第14図)。その斜面で、黒っぽい転石(R2)、泥に覆われた柔らかい泥岩(R3)及び白っぽい転石(R4)を1個ずつ採取した。この急斜面が数十m連続した後、その上で泥質堆積物に覆われ、転石の存在する緩やかな斜面になる。さらに上の斜面にも幅数十mの急斜面が2カ所あり、それぞれ泥に薄く覆われた泥岩露頭が観察された。いずれの場所でも、斜面にほぼ平行に傾斜した泥岩層が崩落し、高さ数十cmの段差を形成し、その下には崩れた泥岩の破片が散在している。それらの急斜面を越え、傾斜が緩やかになった斜面で(着底点の約1600m東側)赤色の柱状採泥(C-3)を行った後、海底より高度をとって、最初の露頭の西側まで引き返した。

最初の露頭があった斜面直下まで引き返して再着底した。そこで緑色の柱状コア(C-4)を採取し、その後、南東方向に再び斜面を上昇した。そこでも、はじめに上昇した斜面と同じように、泥質堆積物に覆われた斜面上の3箇所幅

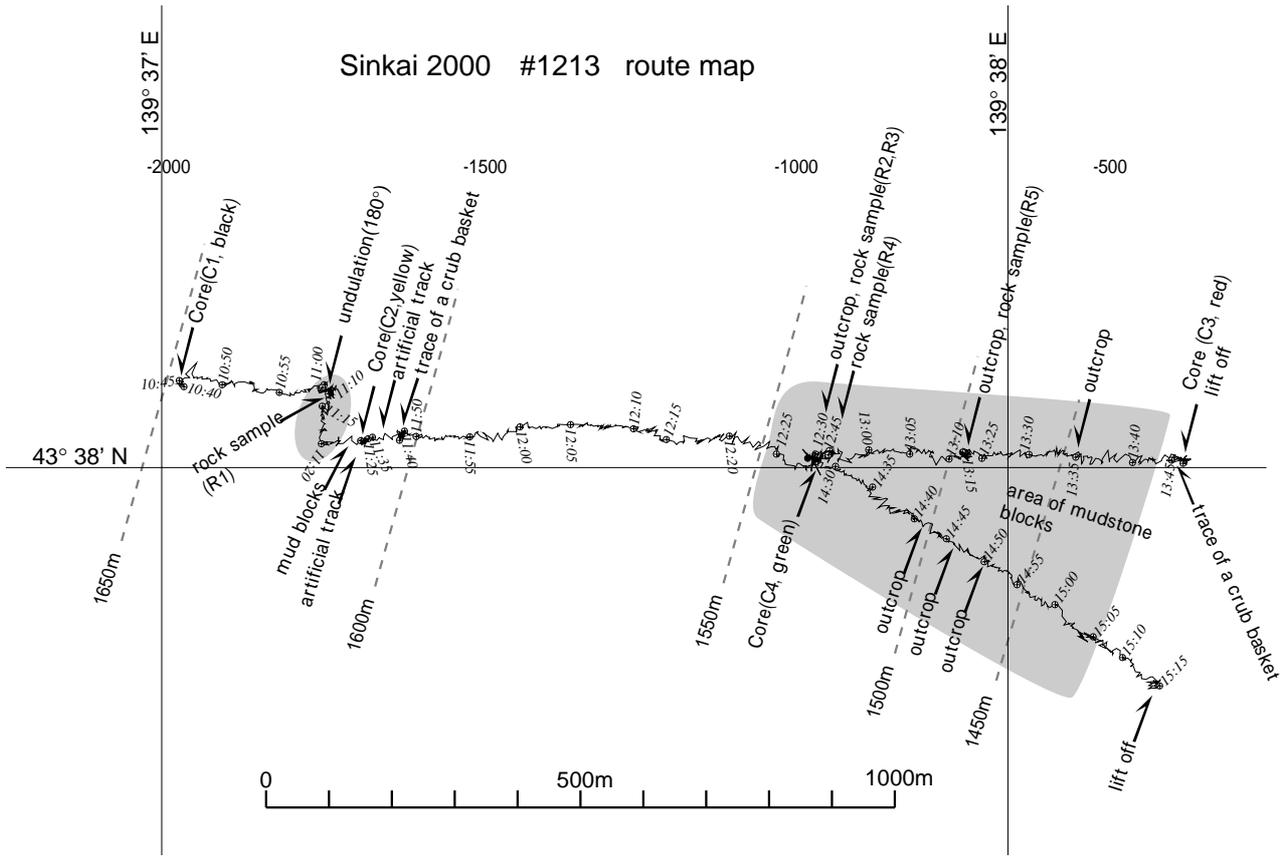


図12 「しんかい2000」第1213潜航のルートマップ。採泥点及び主要な観察結果も示す。

Fig. 12 Route map of submersible "Shinkai 2000" dive 1213. Sample locations and observations are shown in the map.

Shinkai 2000 #1213

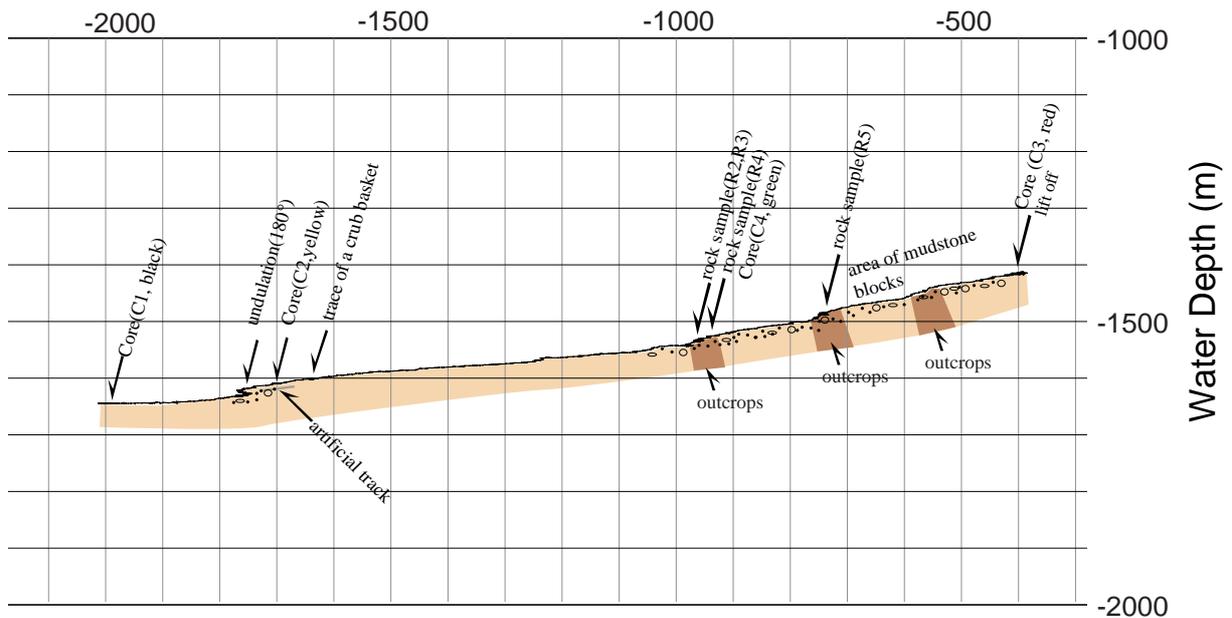


図13 「しんかい2000」第1213潜航地点の地形断面及び底質。

Fig. 13 Seabottom profile and bottom characters of the location of dive 1213 by submersible "Shinkai 2000".



図14 泥岩露頭の写真。泥岩が薄く泥に覆われている。
Fig. 14 Photograph of a mudstone outcrop. The outcrops are covered by thin mud sediments.

数十mの急斜面が現れ、一部崩壊した泥岩露頭が観察された。その斜面をほぼ昇りきったところで離底し、浮上した。

3.3. 第1213潜航のまとめ

一連の観察の中で、泥岩の露頭が一部崩壊していることから、この斜面かその近傍で過去に地震が発生したことはほぼ間違いないと考えられる。崩壊した泥岩片は泥に覆われていることから、その地震が発生してから、ある程度の時間が経過していることがわかる。斜面の直下で採取した柱状採泥試料(C-4)には、表層の1-2cmと深さ12cm以下のところにやや粗粒な堆積物が多く含まれている(第15図)。このことから、2回の斜面崩壊のイベントがこの地点で発生したと推定される。海底付近の粗粒堆積物は1940年の積丹沖地震で形成された可能性が高いが、下位の粗粒堆積物に比較して粒径が小さく、量も少ないことから、この斜面自身で発生した地震ではない可能性が高い。それに対して、深さ12cm以下粗粒堆積物は粒径が大きく量も多いことから、より強い地震動を示しているかもしれない。この斜面の堆積速度は不明であるので、年代についての考察はできないが、今後、この斜面での堆積速度が明らかになれば、地震発生頻度を明らかにできる可能性がある。

4. 神威海嶺

4.1. 背景

神威海嶺は積丹半島から北に連続する構造性的な海嶺で、海嶺の地形は東斜面が急傾斜で、西斜面は緩傾斜の非対称な断面を持つ(図16)。音波探査プロファイルは神威海嶺が非対称な断面を持つ背斜構造からなることを示し、東側斜面の基部に逆断層が存在すると解釈される。海嶺の東側には厚さ1.1秒(往復走時)以上の新しい堆積物に覆われる石狩海盆が広がる。神威海嶺との境界に近い海盆表層の地層が変形しているように見えることは、断層が活



図15 柱状試料(C4)のソフトX写真。最上部と下部に粗粒堆積物が含まれている。
Fig. 15 Soft X-ray photograph of sediment core (C4). Coarse grains are included in the uppermost part and a lower part of the core.

動的であることを示唆している。海嶺を構成する成層構造を示す堆積物は、1秒以上の厚さを持つが、海嶺頂部付近では堆積物が削剥あるいは、堆積していないように見える。

本潜航調査では、断層の最近の活動履歴解明するために、東斜面を東から西に向かって航走した。なお、潜航前に「ドルフィン3K」による2回の事前調査を実施したので(第468潜航、第469潜航)、その概要もあわせてここに報告する。図17にその全航跡を示すが、斜面を合計4回にわたり上って観察した。潜航にあたっては、地震性堆積物の採取と、地形的な割れ目やうねり(起伏)の有無の観察に重点をおいた。

4.2. ドルフィン3K第468潜航

日時: 2000年7月28日 8:32 - 12:11

潜航地点: 神威海嶺東側斜面

着底点: 北緯43° 49.164' 東経140° 22.471' 水深 802 m

離底点: 北緯43° 49.159' 東経140° 20.698' 水深 427 m

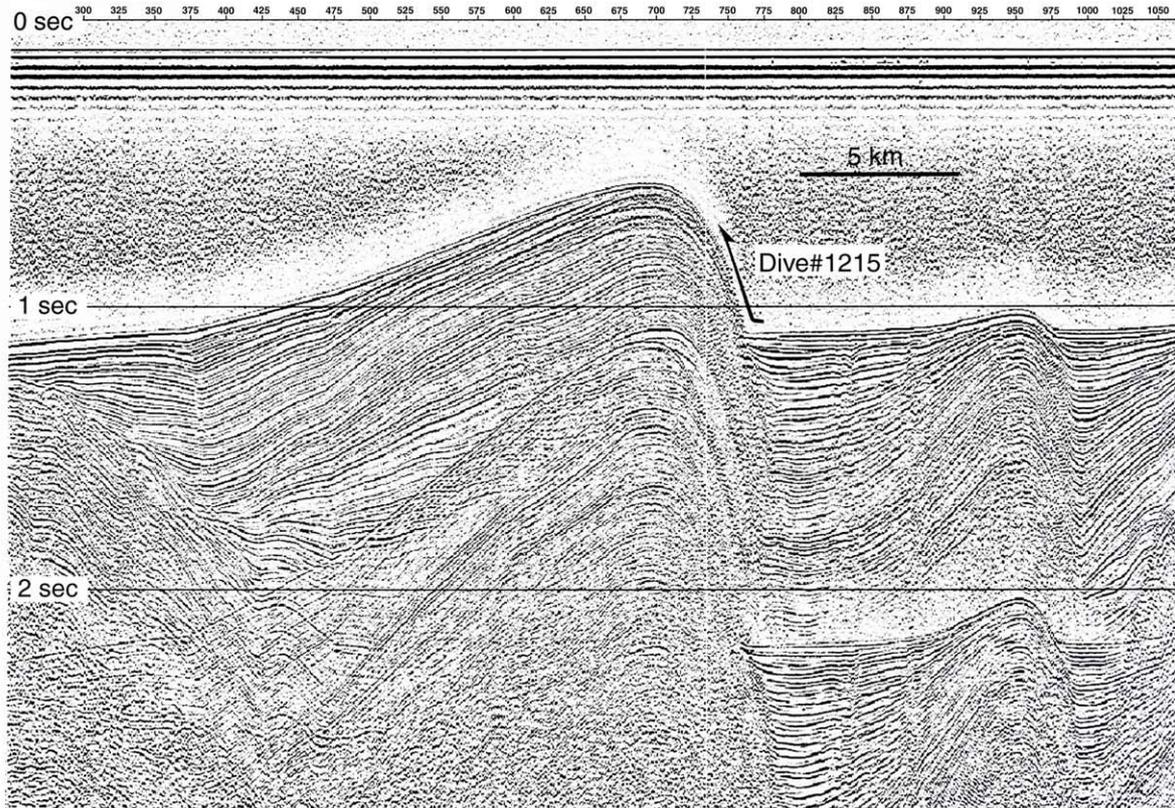


図16 「しんかい2000」第1215潜航地点を横切る神威海嶺の反射断面
 Fig. 16 Seismic profile of the Kamui ridge acrossing the location of dive # 1215 by "Shinkai 2000".

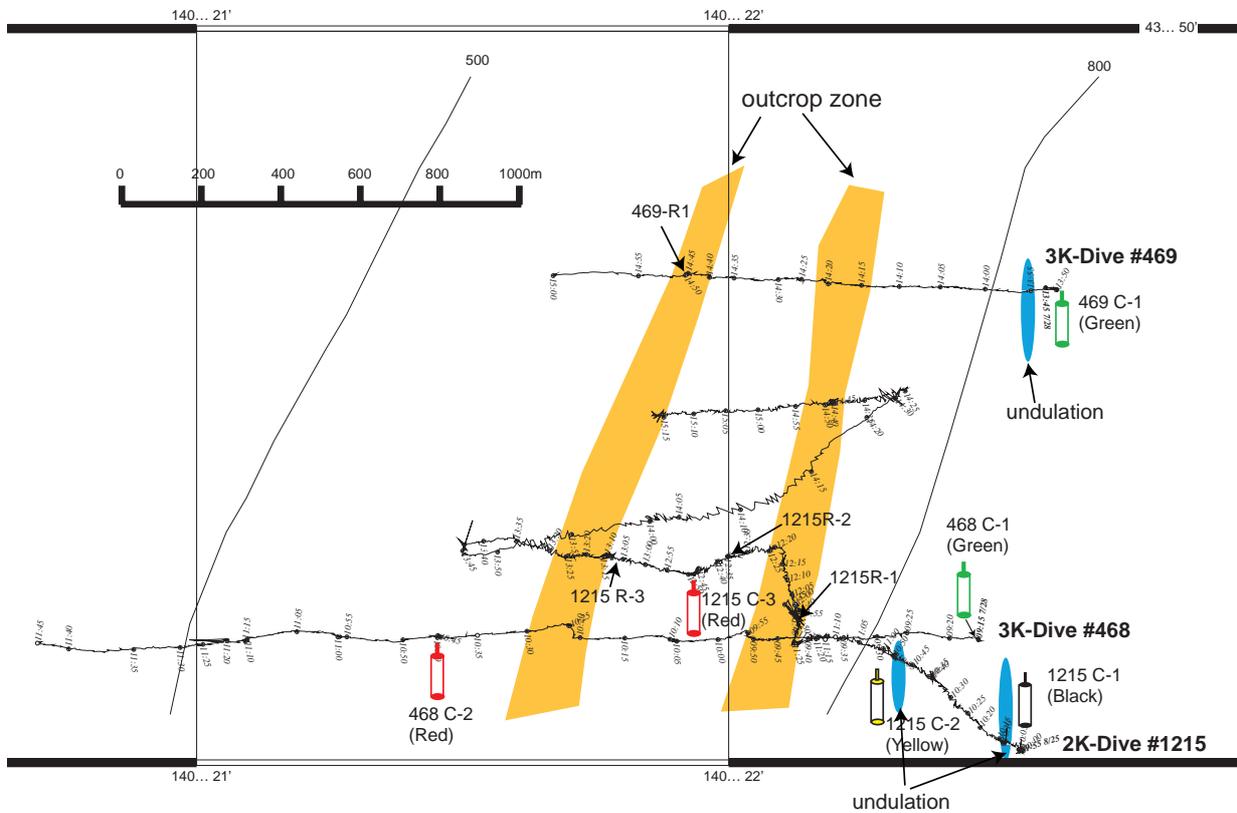


図17 「しんかい2000」第1215潜航、「ドルフィン3K」第468,469潜航の航跡。5分おきの時間を示す。
 Fig. 17 Survey tracks of dive # 1215 by "Shinkai 2000" and dives # 468 and # 469 by "Dolphin 3K".

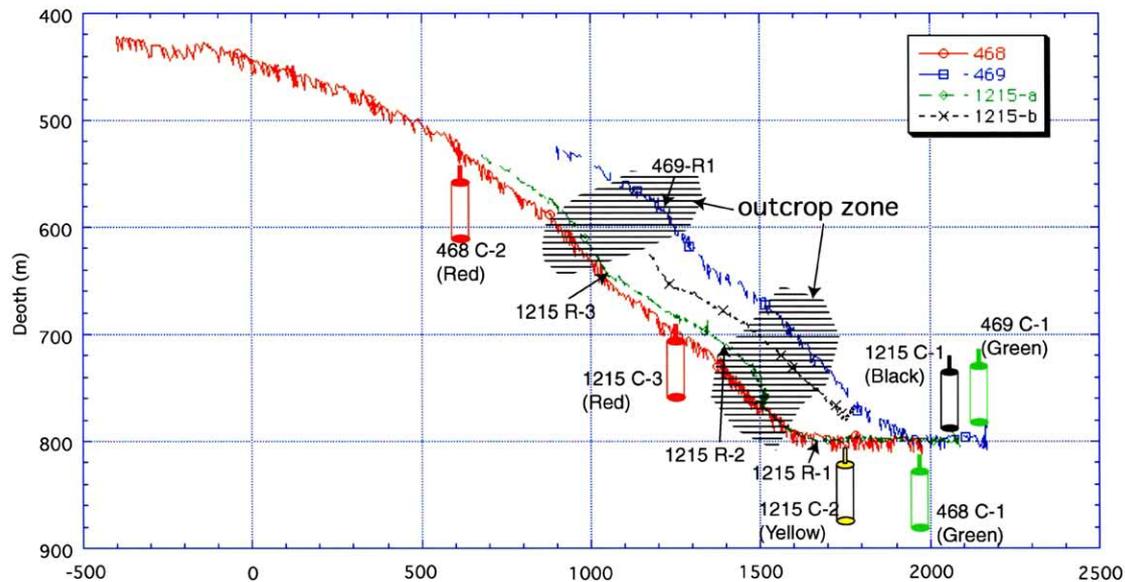


図18 「しんかい2000」第1215潜航、「ドルフィン3K」第468,469潜航の観察結果の断面表示。

Fig. 18 Observations during dive # 1215 by "Shinkai 2000" and dives # 468 and # 469 by "Dolphin 3K" shown on a cross section.

第468潜航では、神威海嶺の海盆側の $43^{\circ}49.164'N$ 、 $140^{\circ}22.471'E$ 、水深802m地点に着底し、その地点で緑色の柱状採泥(#468, C-1)を行った。その後、西に向かって斜面を上昇した。斜面が急になり始める水深780m付近より、礫が多数観察されるようになり、水深774m付近から730m付近は斜面が急で、数箇所露岩が観察された。露頭はほぼ南北方向に列状に配列しており、白色の岩石が追跡された。その後、水深約644mまでは、底質が泥になり、礫がほとんど観察できなかった。水深約644mで再び、岩石が多数観察され始めた。さらに斜面を上がり、水深約621mの地点で露頭が視認された。この露頭も斜面下部の露頭と同様に南北方向に連続している。水深570m付近にも同様な列状の岩石が視認された。その後、底質は泥になり、水深531m付近で赤色の柱状採泥(#468, C-2)を行った。水深500m以浅でも転石は見られ、堆積物の粒度もやや粗いことがわかった。 $43^{\circ}49.159'N$ 、 $140^{\circ}20.698'E$ 、水深427mの地点まで観察した後、離底した。

4.3. ドルフィン3K第469潜航

日時： 2000年7月28日 13:13 - 15:30

潜航地点：神威海嶺東側斜面

着底点：北緯 $43^{\circ}49.648'$ 東経 $140^{\circ}22.613'$ 水深 802 m

離底点：北緯 $43^{\circ}49.666'$ 東経 $140^{\circ}21.673'$ 水深 530 m

第469潜航では、第468潜航ルート約950m北側をほぼ平行に航走した。着底地点は、 $43^{\circ}49.648'N$ 、 $140^{\circ}22.613'E$ 、802m地点で、第468潜航と同様に海盆のほぼ平らな地点に着底した。底質は泥で、巣穴が多数観察された。着底地点で緑色の柱状採泥(#469, C-1)を行った。その後、西に向かって斜面を上昇した。調査開始直後より、南北方向

に伸びる小さな起伏を複数視認した。水深約740m付近から転石が多くなり、水深710mの地点で列状に配列した露頭が視認された。さらに、水深約695mにも列状の露頭があり、その後は転石が減少し、水深約650mまでは泥で覆われ、転石もほとんど認められなかった。水深650m以浅になると、急に転石が増え、転石のサイズも大きくなり、水深640m以浅になると巨大な岩石が多数認められた。水深598mで、岩石(#469-R1)を1個採取した。その直後には、露頭が視認された。ここの露頭も南北に列状に続いていた。水深588m付近まで、露頭が観察され、その後は、底質が泥になり、礫がほとんど認められなくなった。 $43^{\circ}49.666'N$ 、 $140^{\circ}21.673'E$ 、水深530m地点まで航走し、離底した。図18の潜航結果の断面で明らかであるが、斜面には比較的急な部分が2箇所存在し、各々に露頭が存在する。この露頭は、南北方向に伸び、少なくとも2つの潜航ルートの間は連続すると考えられる。

4.4. しんかい2000第1215潜航

実施日：2000年8月25日 9:00 - 16:10

観察者：荒井 晃作

パイロット：光藤 数也、植木 博文

潜航地点：積丹岬北方

着底点： $43^{\circ}49.010'N$ 、 $140^{\circ}22.547'E$ 水深 797 m

離底点： $43^{\circ}49.475'N$ 、 $140^{\circ}21.887'E$ 水深 629 m

上記の2回の事前調査に基づき、第1215潜航では、 $43^{\circ}49.010'N$ 、 $140^{\circ}22.547'E$ 、水深797mに着底した。底質は泥で巣穴が多数観察された。柱状採泥(C-1, 黒)を行った後、斜面に向かって航走を開始した。水深797m、10:07から海底にうねり(小さな起伏)が観察された。うねりは 350° 方向



図19 泥質堆積物中に散在する生物に覆われた硬質頁岩のブロック

Fig. 19 Hard shale blocks are encrusted with biota within the muddy sediment.

にほぼ平行に伸び、起伏が数十cmで、幅が約1mである。外側は泥に覆われ、うねりの中も(窪地も)泥が埋積しており、近づくと見えにくくなる。10:17を過ぎるとうねりが無くなり、ほぼ平らな泥質の海底となった。水深796m, 10:49から再びうねりが観察されたため、うねりの中で柱状採泥(C-2, 黄)を行った。その後斜面になり、水深790m付近から堆積物がやや粗粒になり、転石も徐々に増加した。観察されるほとんどの礫は白色を呈し、生物に覆われていた。

転石が多産し、露頭近くへ到着したと思われる地点で、コースを北に向けて、露頭に向かった(図17)。水深759mの地点より露頭が認められた。大きな岩石は全体が生物に覆われており、白色に見える(図19)。一部の露頭では薄層が板状に突出しており、そのまわりを泥が覆っている(図20)。このような露頭は、南北に長く連続しており、成層構造を成した堆積物の一部のみが削剥されずに、残っているものと考えられる。固い岩石は生物に覆いつくされておられ、露出してから時間が経過していると考えられる。水深757m地点で岩石(R-1)を採取した。水深749m付近の露頭では20cm程度の層厚の板状の巨大転石が多数点在している。水深737mでは再び板状の岩石が泥に覆われて、筋状に見えた。おそらく、大規模に露出していた部分が、ゆっくりと泥に覆われてきたものと考えられる。

その後、270°に進路を取り観察を続けた(図17)。水深716m地点で小さな段差が確認されたが、薄い層状の岩石が泥に埋められてきたものと思われる。水深700m付近では露頭は観察できなかったが、小さな礫が多数存在していた。水深696mの地点で岩石(R-2)を採取し、水深693mの地点には大きな転石が認められた。斜面上部での露頭の存在がドルフィン3Kの事前潜航から明らかであったため、その下側で赤色の柱状採泥(C-3)を行った(水深682m地点)。水深656m付近から、転石が増え始め、水深637mでは堆積物の粒度も粗く、大きな岩石が認められるようになった。水深634m地点で岩石採取(R-3)を行った。水深608m



図20 層状を呈する露頭写真

Fig. 20 Hard shale layers within the muddy sediment.

の地点から割れ目状に見える、泥に覆われた板状の岩石が観察された。水深594m地点より上では転石はほとんど観察できなくなったので、水深532mの地点で離底し、高度をとって43°49.504 N, 140°22.314 E, 水深777m地点に戻った(図17)。そこから西に向かって斜面を上昇し、水深742mの地点で大きな岩石を視認した。水深733m地点に露頭が認められ、観察を行った。露頭は生物が覆っており、白色を呈していた。この地点には、大きな岩石が多数露出しており、泥から突き出ているような板状の岩石が3層準観察された。

4.5. 神威海嶺での潜航のまとめ

本潜航によって、神威海嶺の東側急斜面に2段の急斜面と露頭の存在が確認でき、それらは少なくとも1kmは南北に連続していることが明らかになった。露頭を形成している岩石は薄い層状の岩石が含まれ、削剥されにくい部分が突出しているように見える。また、岩石は生物に覆われており、白色に見える。露頭の下には巨礫が多く点在していた。それ以外の部分は広く泥に覆われる。このような観察結果から、過去の断層活動によって斜面が崩壊したと考えられるが、忍路海山での観察結果などと比べると、活動時期は古いと考えられる。

図21に「しんかい2000」第1215潜航で採取された柱状試料のX線CTイメージ画像を示す。図左の黒の柱状コアは着底地点で採取されたもので、下部に粗い堆積物が多く、上位に向かって徐々に細粒の堆積物になっていると考えられる。最上位には粗い粒子が認められない。このことから、最新の活動はやや古いと考えられるが、正確な堆積速度が不明なため、年代は推定できない。また、黄の柱状試料では中間付近に黒色で示される粗粒堆積物が認められる。この粗粒堆積物の間には図21で白色に見える部分が存在し、2つの層準に分かれているように見える。赤の柱状採泥は上位の露頭の直下で採取したが、黒色に見える粗い粒子が柱状試料の下の方と上の方に明瞭に分かれており、その間は、細かい堆積物であると考えられる。このことは、

C-T scan image

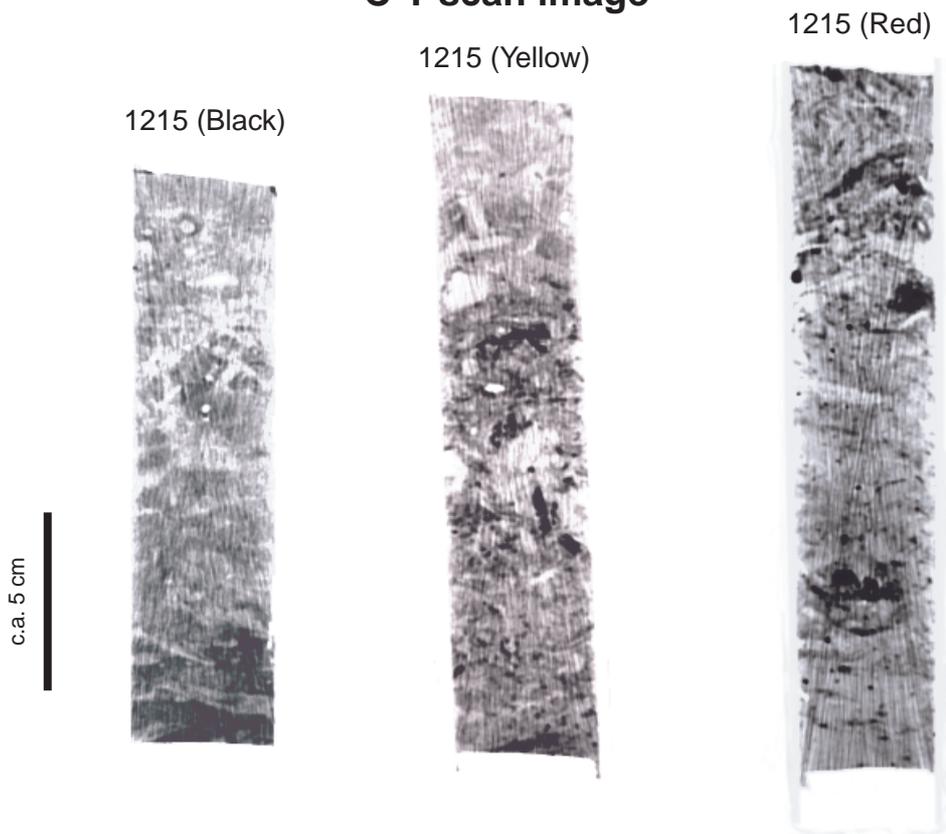


図21 「しんかい 2000」第1215潜航によって得られた柱状堆積物のX線CTイメージ
Fig. 21 X ray CT images of sediment cores collected by dive # 1215 of "Shinkai 2000".

柱状試料の堆積した期間の中で2回の斜面崩壊による粗粒堆積物の流れ込むイベントがあった可能性を示す。今後、柱状試料の精度の良い年代が決定できれば、断層活動の時期を決められることが期待される。

5. 考察

今回の3地点の潜航では、それぞれの地点で斜面崩壊が観察され、崩壊堆積物も得られていることから、過去に地震が発生したことはほぼ間違いないと考えられる。しかしながら、観察された海底の状況はそれぞれの場所で異なっていて、過去の地震発生時期を推定するためには、解決しなければいけない課題も多い。そのような異なる海底の状況を理解するには、1) 斜面がどのように崩れたかと、2) 崩れた状況がどの程度保存されているか、を考慮する必要がある。

斜面がどのように崩れたかは、地震動の影響もあるが斜面を構成する物質の性質に負うところが大きいと考えられる。固結度の高い岩石からなる斜面では、斜面は急崖となり、そこから岩石が大小さまざまなブロックや砂礫に破壊され、崖の下側に広がる。一方、固結度の弱い泥質堆積物からなる斜面は、破碎されることもあるが、比較的緩斜面をなし、斜面上に割れ目が形成されることが多い(岡村, ; 竹

内ほか, 2000)。

一方、崩れた状況が保存されるかどうかは、地震の頻度や最近の地震からの経過時間及び現在の堆積速度が重要である。特に堆積速度は地震後の変動地形や斜面崩壊を覆い隠す速度と言い換えることができる。その値は場所によって大きく異なるため、精度よく推定することが、過去の地震の発生時期を明らかにするためには欠かせない。日本海の中でも日本列島に近い堆積盆地では千年で数十cmの堆積速度が知られているが、海嶺に隔てられた海盆地では堆積速度が10分の1以下になる。従って、数十cm程度のれきや溝などが堆積物によって覆い隠される時間は、千年程度の場所もあり、数万年の場所もあることになる。

今回の潜航地点はいずれもかなり固結した堆積岩類からなると考えられ、斜面直下には、その破碎された粒子が堆積している。堆積速度については現在検討中であるが、明瞭なテフラは見いだせなかったことから、直接年代を決定することは困難であると考えられる。今後、潜航地点周辺で得られた柱状堆積物に基づいた堆積速度や、その他の地質学的データの解析を参考に、堆積速度を推定することによって、地震発生年代や頻度を明らかにできる可能性が開ける。

謝 辞

本調査は、しんかい2000運行チーム、なつしまの乗組員、海洋科学技術センターの関係者の方々の御協力により予定通り実施することができた。深く感謝いたします。

引用文献

- Fukao, Y. and Furumoto, M., 1975, Mechanism of large earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea, *Tectonophysics*, 26, 247-266.
- Hatori, T., 1969, A study of the wave source of tsunami generated off west Hokkaido on Aug.2, 1940, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 47, 1063-1072.
- Ohtake, M., 1995, 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.

- 岡村行信(1997)日本海東縁の活断層の潜航調査 - 奥尻海嶺と佐渡海嶺との比較検討 - , *JAMSTEC深海研究*, 13, 591-601。
- 岡村行信・佐竹健治・荒井晃作・池原 研(1999)北海道西方沖の地震震源域及び空白域の潜航調査。 *JAMSTEC深海研究*, 15, 109-122。
- Satake, K. 1986, Re-examination of the 1940 Shakotan-oki earthquake and the fault parameters of the earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 43, 137-147.
- 竹内 章・岡村行信・加藤幸弘・池原 研・張 勁・佐竹健治・長尾哲史・平野真人・渡辺真人(2000)日本海東縁, 奥尻海嶺及びその周辺の大地震と海底変動。 *JAMSTEC深海研究*, 16, 29-46。

(原稿受理：2001年1月15日)