

日本海東縁奥尻海嶺におけるバック・スラスト

徳山英一*¹ 竹内 章*² 徐 垣*³ 石井次郎*⁴
嵯峨山積*⁵ 菅 和哉*⁵ 宮下純夫*⁶ 倉本真一*¹

奥尻海嶺は日本海と武蔵海盆にはさまれて存在し、その両境界はフェルゲンツの異なる逆断層により仕切られている。今回の潜航調査は奥尻海嶺と武蔵海盆の境界部を横切る測線で行なわれた。その結果、奥尻海嶺東縁の斜面では、武蔵海盆のタービダイトの下位に対比される地層が露出しており、そこから採取された岩石の化石年代は5.1-3.7Maであった。従って、日本海東縁における収束テクトニクスは奥尻海嶺域では3.7Ma以降に開始されたものと考えられる。

また、本潜航調査において計6か所で地温測定が行なわれた。この測定値から計算された熱流計は境界部で167mW/m²と周辺域で求められた値の約1.6倍に達する高い値を示した。また、この境界部では生物が他地域と比較して密集している。以上のことから、バック・スラストは活断層であり、そこで冷湧水が存在するものと推測される。この冷湧水は南海トラフ等で報告されているような大部分が付加体堆積物から絞り出されたものと異なり、地下深部からもたらされた可能性がある。

Back Thrust in the Okushiri Ridge, Eastern Margin of the Japan Sea.

Hidekazu TOKUYAMA*⁷ Akira TAKEUCHI*⁸ Wonn SOH*⁹
Jiro ISHII*¹⁰, Tsumoru SAGAYAMO*¹¹ Kazuya SUGA*¹¹
Sumio MIYASHITA*¹² and Shinichi KURAMOTO*⁷

The Okushiri Ridge, located between the Japan Basin and the Musashi Basin, is demarcated by an east-dipping main boundary thrust on the west and a west-dipping back-thrust on the east. A submersible dive by "Shinkai 2000" revealed overthrust strata on the eastern slope of the Okushiri Ridge. The strata are correlated with the sedimentary sequence underlying

-
- * 1 東京大学海洋研究所
 - * 2 富山大学教養部
 - * 3 静岡大学理学部
 - * 4 北海道東海大学
 - * 5 北海道立地下資源調査所
 - * 6 新潟大学理学部
 - * 7 Ocean Research Institute, University of Tokyo
 - * 8 Faculty of Education, Toyama University
 - * 9 Institute of Geosciences, Shizuoka University
 - * 10 Hokkaido Tokai University science and Engineering
 - * 11 Geological Survey of Hokkaido
 - * 12 Geological Institute, Niigata University

thick turbiditic deposits in the Musashi Basin based on seismic data. Collected rocks from the strata were determined to be 3.7–5.1 Ma by paleontological method. This indicates that convergent tectonics occurred along the eastern margin of the Japan Sea has started since 3.7 Ma at the Okushiri Ridge region.

A heat flow survey was performed on a diving transect from the Okushiri Ridge to the Musashi Basin.

The highest heat flow value (167 mW/m^2) is measured at the foot of the eastern slope. This is approximately 1.6 times higher than heat flow values obtained from the surrounding area. A biological community, however very small extent, is recognized at the same site. This is assumed to be a consequence of a cold seepage associated with the back-thrust. Seepage reported from the Nankai Trough and other subduction zones are characterized by containing biogenic methane derived from accreted sediments. But sediments offscrape and accretion are not recognized at the eastern boundary of the Okushiri Ridge. The seepage in the Okushiri Ridge might contain considerable amounts of methane derived from a deeper part of the lithosphere.

1. はじめに

北海道西方沖から新潟沖にいたる日本海東縁は活褶曲および活断層が発達する変動帯である。奥尻海嶺はその北端に位置しており、雁行状に配列した幾つかのブロックから構成されている（図1）。本海嶺の西縁は西フェルゲントの低角逆断層により日本海盆と境されており、その断層崖において1988年および1989年の2年間で計7回の潜航調査が行なわれた。その結果、奥尻海嶺は日本海を形成する海洋地殻が衝突したものであることが判明した（徳山他1989、宮下他1989）。一方、海嶺の東縁は東フェルゲントのバック・スラストにより武蔵海盆と境されている。一般にマントルないし地殻の断片が隆起し、地表で見られるものをオフィオライトと呼ぶが、このオフィオライトの地表への搬入（emplacement）プロセスにおいて、バック・スラスト（back-thrust）が地殻および上部マントルの剥ぎ取りに極めて重要な役割を演ずるものと考えられる（徳山他1989）。従って、バックスラストの発達史を明らかにする目的で、1990年度はバック・スラストを東西に横断する測線で潜航調査が行なわれた。本論の目的は今回の潜航調査で新しく得られた地層年代データと地熱データ、さらに事前調査で得られた奥尻海嶺周辺海域のマルチナロービーム地形図および日本

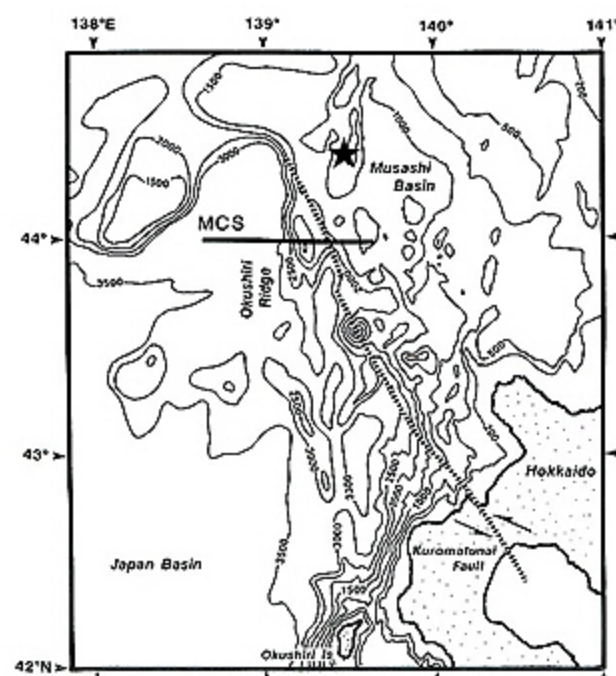


図1 奥尻海嶺周辺の海底地形図。太い実線はマルチ・チャンネルプロファイラーの測線図、破線は黒松内断層、また星印は1940年積丹沖地震の震源地（Fukao and Furumoto, 1976）を示す。

Fig. 1 Index map around the Okushiri Ridge. A solid line, a broken line and a star indicate a line track of multichannel seismic profile, Kuromatunai Fault, and an epicenter of Shokotan-oki earthquake, respectively.

海盆から武蔵海盆に達する奥尻海嶺のマルチ・チャンネル反射地震記録断面に基づき、バック・スラストを含む奥尻海嶺のテクニクスを明らかにすることである。

2. 奥尻海嶺域の地形及び地殻構造

本調査海域における奥尻海嶺の構造は、マルチナロービーム地形図(図2)と音波探査記録(図3)から次のように特徴づけられる。海嶺の西縁は複数の西フェルゲンツの逆断層により境されて

いる。一方、海嶺の東縁は東フェルゲンツの逆断層により境されている。西縁の断層は、その走向は大局的には南北であるが、地形の影響を受けて変化することから、それらの傾斜はあまり急なものではないと考えられる。音波探査記録では断層面も明確にとらえることは出来ないが、重力測定の結果からは、低角の逆断層を支持している。

東縁の逆断層は隣接する武蔵海盆の堆積物の変形から判断すると、リストラック断層と考えられる。

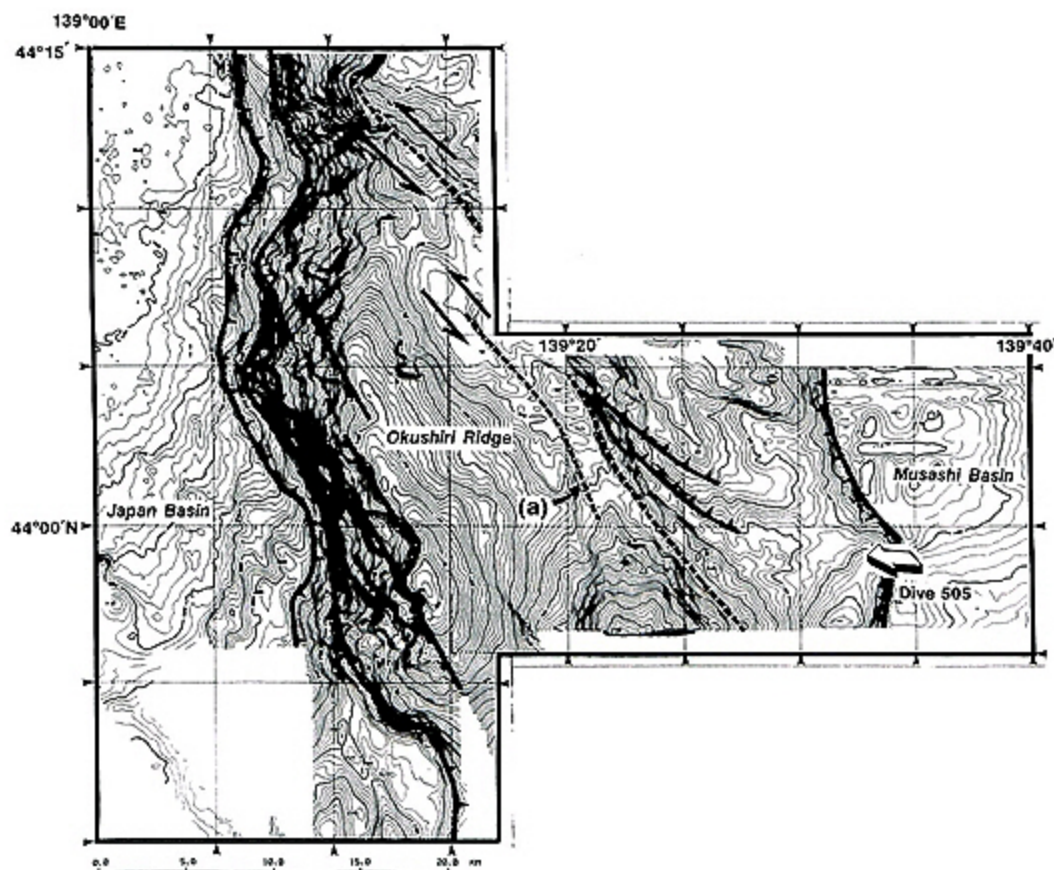


図2 奥尻海嶺潜航点近傍のマルチナロービームを用いた精密地形図および構造図(地形図は海洋科学技術センターの観測船「かいよう」により測量されたもの)。太矢印は第505潜航測線を示す。実線と三角形を組合わせた模様は逆断層を、実線と半円を組合わせた模様は正断層を示す。三角形および半円は断層面の傾斜する方向を示している。また、破線は横ずれ断層を示す。矢印(a)は本文参照。

Fig. 2 SeaBeam bathymetric map with structural interpretation in the Okushiri ridge region (bathymetric data were obtained by R/V Kaiyo, JAMSTEC).

An arrow indicates the site of dive 505.

▲ : Thrust fault (triangle shows a dipping direction of fault plane)

◐ : Normal fault (half hemisphere shows a dipping direction of fault plane)

--- : Strike-slip fault

(a) is explained in a text

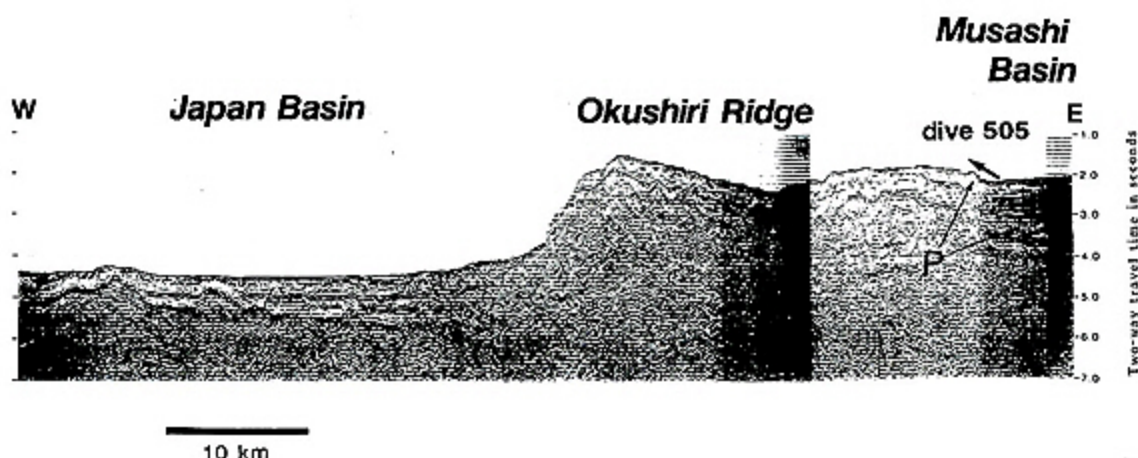


図3 奥尻海嶺を東西に切る北緯44°線上のマルチ・チャンネルプロファイラー。
Pは武蔵海盆と奥尻海嶺で対比される年代が3.70~5.10Maの地層。

Fig. 3 Multichannel seismic profile running across the Okushiri Ridge along lat. 44°N.
P indicates an acoustic sequence with an age of 3.7~5.1Ma which is identified both in the Musashi Basin and the Okushiri Ridge.

海嶺のほぼ中央には $N35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ の直線的な走向を持つ断層が発達している。この断層の1つは(図2矢印の)地形的境界になっており、北部では断層をはさんで西側(左側)のブロックが水深が深いのに対し、南部では、東側(右側)の水深が深い。以上の地形的特徴から、この断層は左横ずれ断層と考えられる。音波探査記録ではこの断層はスプレー状の形態を示すことから、横ずれ断層と推定され、地形から得られた結果と調和的である。一方、この断層を南方に追跡すると、後志海山から寿都海底谷、さらに西南北海道黒松内断層に連続するよう見える(図1)。(山岸他1981)はこの黒松内断層をやや圧縮成分を持った左横ずれの活断層と報告している。このことも奥尻海嶺中央に発達する断層が左横ずれ断層であることを強く支持している。この左横ずれ断層の東側には、走向がほぼ $N55^{\circ}\sim 60^{\circ}W$ の断層が発達している。この断層は、上述の左横ずれ断層に伴う2次的な逆断層と推測することが出来る。

また、奥尻海嶺西縁の急崖の上段には、ほぼ直線的な構造が認められる。この線構造は水深の変化にほとんど影響をうけない。音波探査記録からは急崖の特に上段において地回りによると考えられる浸食地形が認められる。以上から、この線構造は衝上したブロックの最先端が、重力的不安定により大規模に滑落した際の回り面、つまり高角

の正断層と推定される。この滑落面には、馬蹄型の輪郭を示す地回り地形を伴うこともある。

3. 観察結果

1990年の潜航調査はオフィオライトの地表への搬入プロセスにおいて重要な役割をなうと推定されるバック・スラストのテクトニクスを理解する目的で、奥尻海嶺と武蔵海盆の境界で実施された。潜航地点は音波探査測線のある $N44^{\circ}$ からあまり離れていない場所で、しかもマルチナロービームによる測深図から急斜面が期待される場所が選ばれた。着底点は武蔵海盆の西縁をほぼ南北に走るチャンネルを東側に越えた平坦部であり、そこから斜面(断層崖)に向うコースがとられた(図4)。

武蔵海盆域では細粒の灰色をした未固結堆積物が一面に海底面をおおっている。一部に数cmの規模の海底面のもりあがりが見られる。そのもりあがりの色は他の海底面に比較してやや白い色を呈していた。礫はほとんど観察されなかった。斜面に近づくにつれて海綿がふえる傾向があり、斜面のふもとでは海綿が非常に多く生息していた。また、そこでは堆積岩と推定される転石が分布していた。斜面では未固結の堆積物が薄くおっているが所々で下位の地層が露出している(図5)。この地層は白色をしており、見かけは斜面のふも

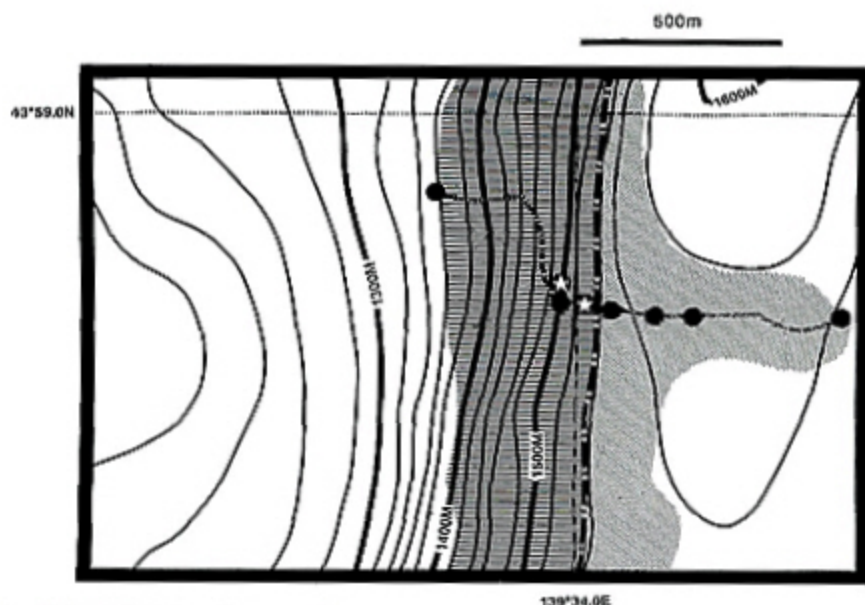


図4 第505潜航のルート・マップ

破線は潜航の測線を示し、着底点は東端また離底点は西端である。黒地に白ぬきの星印は海綿および端脚類が多数生息している地点を示す。また、この地点では巻貝の死骸も認められた。大きな黒丸は地温測定した地点を示す。点模様で表す地域は細粒の灰色をした未固結堆積物が一面に海底面をおおっていると推測される海域を、また横線模様で表す地域は未固結の堆積物が薄くおおっているが、所々で下位の地層が露出していると推測される海域を示す。一点破線は両者の境界を示す。

(写真) 奥尻海嶺東縁斜面の海底写真。

水深は1450m。未固結の堆積物が薄くおおっているが、所々で下位の地層（白色）が露出している。

Fig. 4 A route map of dive 505.

- : A track line of dive 505.
- ★ : A point where living sponges and amphipods, and fossil shells of gastropods were observed.
- : A point where a geothermal measurement was performed.
- [点模様] : An area where a seabed is characterized by fine grained soft sediments with gray colour.
- [横線模様] : An area where strata overlain by soft sediments were recognized here and there.
- .-.-.- : A boundary between two types of seabed.

とで見られた堆積岩の転石と類似している。本地層の傾斜は、ほぼ斜面に平行と考えられ、地層面が低角で海底面と交わる箇所で露出しているものと推定される。

水深が1493mの地点で本地層から岩石が採取された。この岩石はシルト質のタービダイトであり、生物擾乱が進んでいるがオリジナルな堆積構造が識別される。このタービダイトには珪藻化石が大量に含まれている部分がある。この珪藻化石の分析結果によると *Neodenticula kamtschatica* が多産し、しかも *Thalassiosira oestrupii* が共産す

ることから *T. oestrupii* 帯 (3.70~5.10Ma) に分類される。

本潜航では6地点で地温が計測された計測器機は(木村他1987)に述べられたものを使用した。計測点は武蔵海盆内で3点、奥尻海嶺との境界部で1点、そして奥尻海嶺の斜面で2点である(図6)。ここで熱伝導率を0.8W/mc°とすれば、各計測点における熱流量を求めることが出来る(図6)。武蔵海盆から奥尻海嶺に至る熱流量のプロファイルから次のことが判明した。境界部から500m東方の武蔵海盆内では熱流量の値は

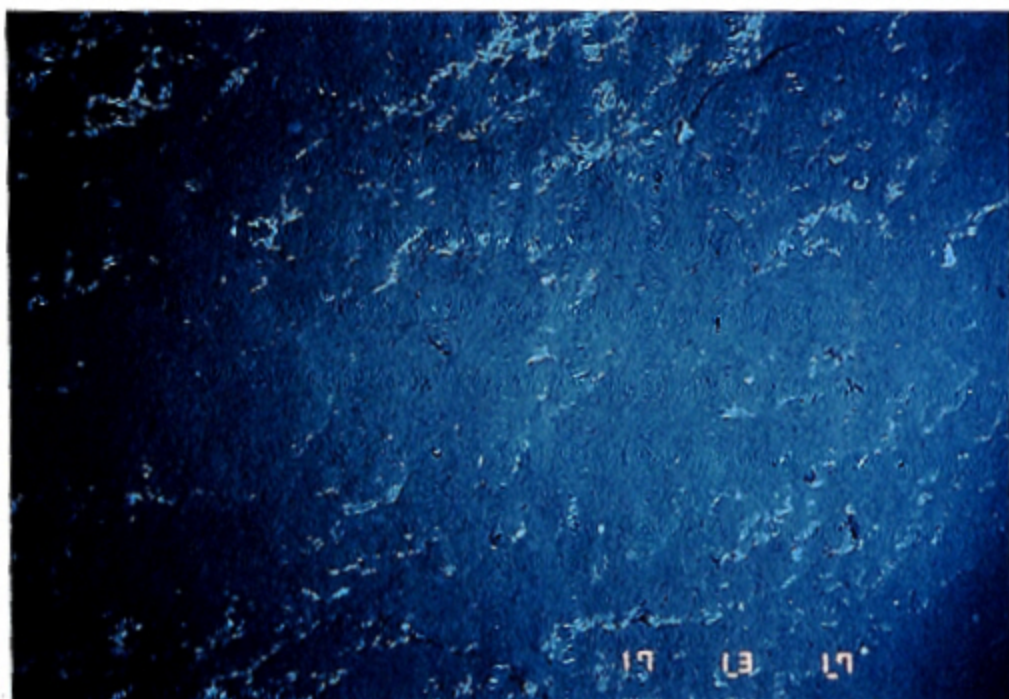


写真1 水深は1450m。未固結の堆積物が薄くおおっているが、所々で下位の地層（白色）が露出している。

Photo.1 Photo taken from the eastern slope of the Okushiri Ridge (Depth: 1450m). White coloured strata thinly covered by soft sediments were recognized here and there.

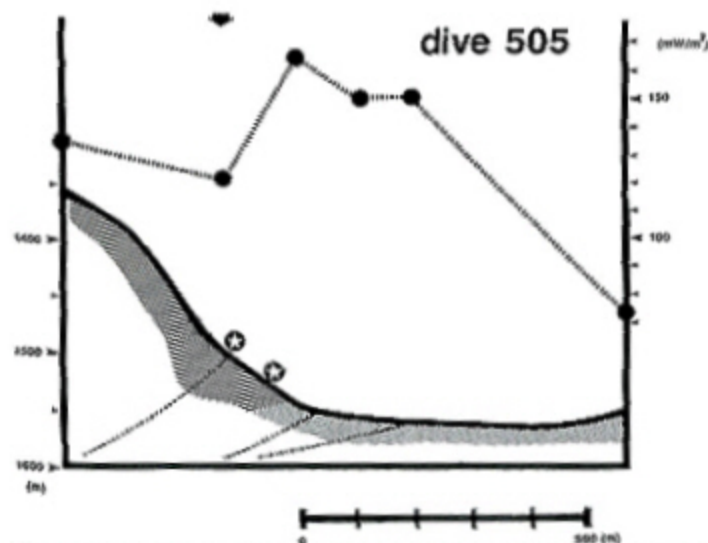


図5 第505潜航調査の結果得られた地層断面図と熱流量測定値。黒丸および黒丸に白ぬきの星印は図4と同じである。矢印は潜航測線が東西から南北に変化した地点を示す。また、地質断面図中の破線は推定断層を示す。

Fig. 5 A geological cross section with heat flow values based on results of dive 505.

★ : Same as Fig. 4

● : Same as Fig. 4

→ : A point where a dive track changes from E-W to N-S.

Dotted lines in the cross section indicate assumed faults.

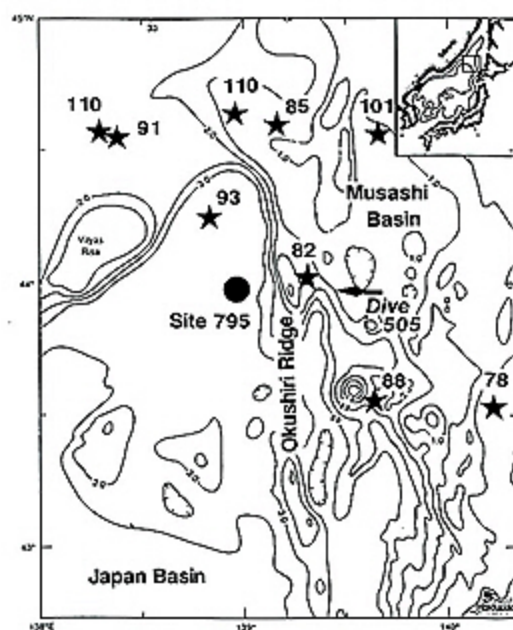


図6 奥尻海嶺周辺海域の熱流量観測値。(Tamaki et al., 1990)

Fig. 6 Heat flow distribution map around the Okushiri Ridge (Tamaki et al., 1990).

76mW/m²であるが境界部付近ではその値を増し、斜面の下部では最大の167mW/m²を示した。この最大の熱流量が計測された地点では、多数の海綿および端脚類が生息しており、さらに、巻貝の死骸が観察された。奥尻海嶺周辺の日本海盆および武蔵海盆の熱流量（船上からワイヤーでおろすプローブ方式で計測されたもの）は最大で110mW/m²、最小で78mW/m²である（図7）（Tamaki et al., 1990）。従って、今回の潜航で得られた熱流量は奥尻海嶺と武蔵海盆の境界部で明らかに高い値を示す。

考 察

奥尻海嶺と武蔵海盆の境界は東フェルゲンツの逆断層により仕切られている。この逆断層は奥尻海嶺と日本海盆の境界に発達する西フェルゲンツの逆断層のバック・スラストにあたると考えられる（徳山他, 1989）。これらの逆断層は日本海拡大時に伸張場で形成された正断層群の一部が、その後、広域応力場が伸張場から圧縮場に移行することにより、変化したものと推測される（徳山他, 1989）。武蔵海盆はいわば西フェルゲンツの主ス

ラストの背後に発達する前弧海盆である。

音波探査記録によれば、武蔵海盆において往復走時で3秒から3.5秒に見られる地層が衝上し、ほぼ地表と調和的な褶曲構造を伴い、奥尻海嶺の東縁で露出していると考えられる（図3、P層）。今回の潜航で、奥尻海嶺の東縁の斜面において露岩と判断される岩石が採取された。この岩石に含まれている珪藻化石からP層の年代は3.70～5.10Ma前と見積られる。武蔵海盆においてはP層の直上の地層は、成層した明瞭な音響的反射面を持つことからタービダイトと推測される。このタービダイトは奥尻海嶺上では識別されず、恐らく東フェルゲンツのバック・スラストが発達し地形的に奥尻海嶺が明瞭になった以降に堆積したものと考えられる。以上から、日本海東縁の収束テクトニクスは3.70Ma以降に開始したものと考えられる。

今回の潜航では奥尻海嶺と武蔵海盆の境界を横切る測線上で計6点の地温測定が行われた。その結果によれば斜面のふもとから500m東方で計測された熱流量値は76mW/m²であり、本海域で報告されている熱流量値の最小値とほぼ等しい値を示す（図7）。しかし、斜面のふもとでは167mW/m²と、本海域の現在まで報告されている最大値110mW/m²の約1.5倍に達する極めて高い値を示す。また、この地点では、多数の海綿および端脚類が生息し、さらに死骸であるが巻貝も認められた。端脚類、巻貝ともに一般的には腐肉食であり、湧水に特徴的な種とは見なされていず、また海綿についても同様である。しかし、日本海の海底で一般的な生物生息の密度と比較して著しく高い（1～2桁弱位）ことから、何らかの要因で誘因されて密集しているものと推定される。ところで、音波探査断面と地形図によれば、斜面下部の生物密集地は、バック・スラストが地表に表われる地点と考えられ、また、その地点における熱流量値は明らかに高い値を示す。これらの事実は、このバック・スラストが現在活動的であり、その断層面に沿った冷湧水の可能性を示唆している。収束境界の断層面に沿った湧水現象は南海トラフ等のトラフ・海溝内側斜面で報告されているが（Le Pichon et al., 1987）、それらに比較し生物密集度は極めて低い。この理由としては南

海トラフ等ではトラフ・海溝軸の海溝堆積物が剥ぎ取られ海溝内側斜面に付加するが、それに伴い大量の水が絞り出されデコルマンに沿って湧水するものと考えられるが(例えば Moore et al., 1988), 奥尻海嶺東縁では武蔵海盆に多量のタービダイトは存在するものの剥ぎ取り, そして付加作用は見られないことから, 未固結の堆積物から大量の水が定常的に供給されることはない。従って湧水の絶対量は南海トラフ等と比較して著しく少なく, その大部分は地下深部, つまり地殻下部またはマントル上部から供給された可能性がある。潜水地点の数10km 北方を震源とする1940年の積丹沖地震(図1)はその断層面が日本海のリソスフェアを完全に断ち切るものとされているが(Fukao and Furumoto 1975), このことは断層面の傾斜は東西逆であるが, バック・スラストもリソスフェアを断ち切るに十分に深部まで発達しており, 湧水が地下深部からもたらされる可能性を支持する。地下深部から供給されるこの湧水はメタン発酵した生物起源のメタンガスが大部分を占める南海トラフ型(Sakai et al., 1991)の冷湧水とは異なり, マントル起源のメタンガスに富むと考えられる。多数の生物が生息している地域における第一次生産者は恐らくこのメタンガスを栄養源とする生物と推測される。

謝 辞

本研究を行うにあたり, 海洋科学技術センターの堀田宏・深海研究部部長および東京大学海洋研究所の小林和男教授には「しんかい2000」に乗船の機会を与えていただいた。

また, 日本海洋科学技術センターの門馬大和氏, 田中武男氏, 松本剛諸氏にはマルチナロービーム地形図作成に関して, データの取得および処理をしていただいた。さらに, 深海生物については東京大学海洋研究所の太田秀教授そして, 地温測定および熱流量評価には東京大学地震研究所の山野誠氏にご指導いただいた。

以上の方々に深く感謝する。

参考文献

Fukao Y., Furumoto M., 1975, *Tectonophys.*, 26, 247-266.

木村政昭, 加藤祐三, 田中武男, 仲 二郎, 蒲生俊敬, 山野 誠, 安藤雅孝, 上田誠也, 酒井均, 大森 保, 井沢英二, 兼 永勝, 小野朋典, 押田 淳, 1987, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第3回「しんかい2000」研究シンポジウム, 165-196。

Le Pichon X., Iiyama, T., Boulegue J., Charvet J., Faure M., Kano k., Lallemant S., Okada H., Rangin C., Taira A., Urabe T. and Uyeda S., 1987, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 83, 285-299.

宮下純夫, 田中武男, 門馬大和, 徳山英一, 徐垣, 倉本真一, 石井次郎, 1989, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム, 85-100。

Moore J. C., Mascle A., et al., 1988, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 1578-1593.

Sakai H., Gamo T., Ogawa Y. and Boulegue J., 1991, Submitted to *Earth Planet. Sci. Lett.*

Tamaki K., Pisciotto K., Allan J., et al., 1990, *Proc. ODP, Init. Repts.*, 127: College Station, TX (Ocean Drilling Program).

徳山英一, 倉本真一, 徐垣, 宮下純夫, 竹内章, 門馬大和, 田中武男, 1989, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム, 101-110。

山岸宏光, 木村 学, 1981, *地球科学*, 35, 94-97。