口絵 7：オホーツク海サハリン沖のメタンハイドレート
Pictorial 7：Methane Hydrate off Sakhalin, the Sea of Okhotsk

オホーツク海サハリン沖では1990年代よりメタンハイドレートが発見され調査が進んでいるが，北見工業大学未利用エネルギー研究センターは2003年に新たな国際共同プロジェクトを立ち上げ，メタンガスの湧出とメタンハイドレートの集積を特徴とする構造を10カ所で発見した．これらは深部のガスチムニーに関係しているようにみえる．過去に大規模な地すべりが起こったと思われる場所にはメタンシープが集中している．

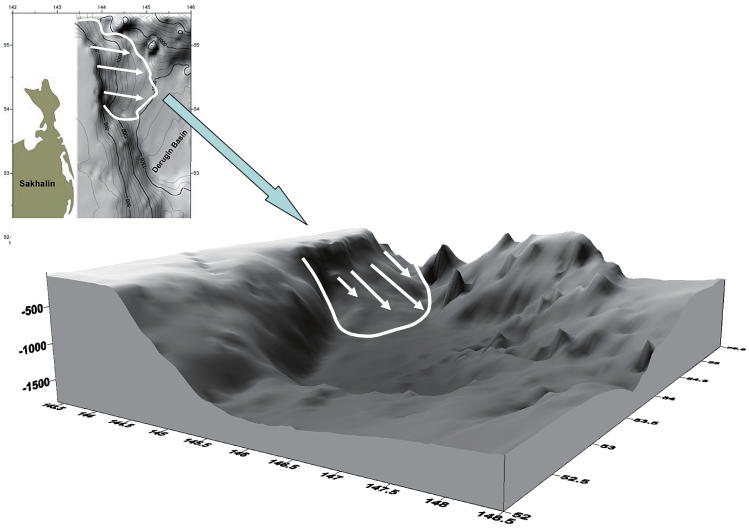

図 1　サハリン北東沖の海底の3次元表示．白い矢印の領域は，過去に大規模な海底地すべりが起こったと思われる範囲であり，ここにメタンシープが密集している．

Fig. 1　3D image of the North-Eastern Sakhalin slope. An area with white arrows represents the suggested extent of old landslide which includes the dense area of methane seeps.

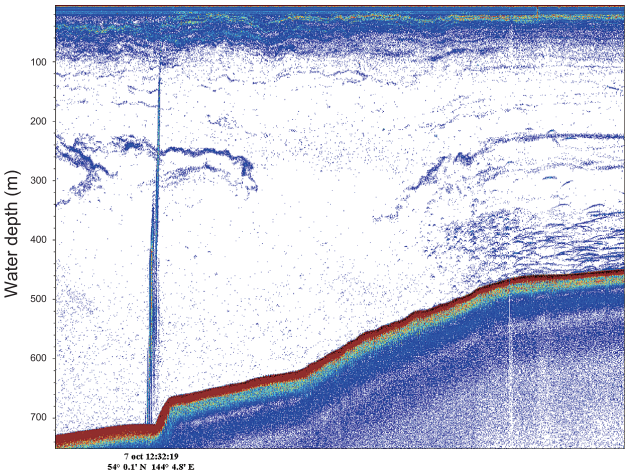

図 2　ラブレンテイエフ断層で観測されたメタンプルーム．フレアの先端は，海面下100 mに達している．(2003-10-7)

Fig. 2　Methane plume observed at Lavrentyev Fault. Top of the flare approaches 100 m below the sea surface. (2003-10-7)

図 3　ロシア地質学海洋鉱物資源研究所のソニックグループによるサイドスキャンソナー探査の準備（R/V ラブレンティエフ号）．(2008-7-2)

Fig. 3　Preparation for side-scan-sonar survey by Sonic Group of Russia Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean（R/V Lavrentyev）(2008-7-2)

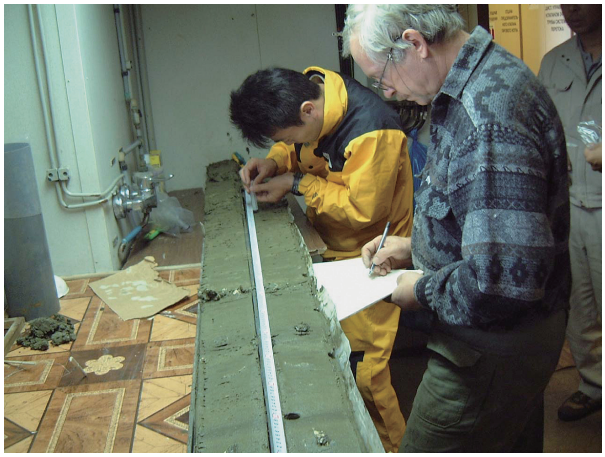

図 4　船上での堆積物コア処理（R/V ラブレンティエフ号）．(2003-10-6)

Fig. 4　Sediment core processing on board（R/V Lavrentyev）. (2003-10-6)

図 5　堆積物コア（暗緑色）中のメタンハイドレート（白色）．右下の写真は，35 cm 長のメタンハイドレート．（上図：2003-10-7，2005-6-3，2005-6-27；下図：2005-6-1，2005-6-1，2005-5-31）

Fig. 5　Methane hydrate（white）in sediment cores（olive green）. Methane hydrate at the lower right corner is 35 cm in length.（upper: 2003-10-7, 2005-6-3, 2005-6-27; bottom: 2005-6-1, 2005-6-1, 2005-5-31）

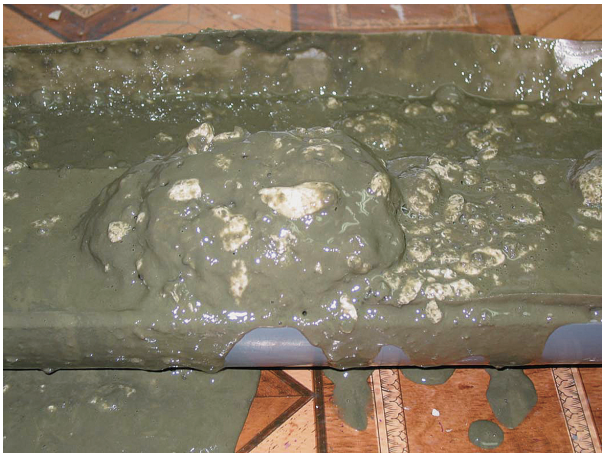

図 6　回収直後に起こるメタンハイドレートの解離のために，流動化した堆積物コア．（2003-10-8）

Fig. 6　Fluidized sediment core in the hydrate-bearing interval due to the hydrate dissociation just after core recovery.（2003-10-8）

図 7　メタンハイドレート採取．堆積物コア中には，カーボネート（右上）やシロウリガイ（左上）も含まれている．（上図：2003-8-12，2005-6-27，2005-6-27；下図：2005-5-31）

Fig. 7　Methane hydrate sampling. Carbonates and *Calyptogena* bivalve in sediment cores are also shown at upper right and left, respectively.（upper: 2003-8-12, 2005-6-27, 2005-6-27; bottom: 2005-5-31）

（庄子　仁・南　尚嗣・八久保晶弘・Young K. JIN・Anatoly OBZHIROV・Alexander SALOMATIN・Boris BARANOV）
（Hitoshi SHOJI, Hirotsugu MINAMI, Akihiro HACHIKUBO, Young K. JIN, Anatoly OBZHIROV, Alexander SALOMATIN and Boris BARANOV）

地学雑誌
Journal of Geography
118(1) 175-193 2009

オホーツク海のメタンハイドレートとプルーム

庄　子　　仁* Young K. JIN ** Anatoly OBZHIROV***
Alexander SALOMATIN*** Boris BARANOV**** Vyacheslav GLADYSH*****
八久保晶弘* 南　尚　嗣* 山　下　聡*
高　橋　信　夫*

Methane Hydrates and Plumes in the Sea of Okhotsk

Hitoshi SHOJI*, Young K. JIN**, Anatoly OBZHIROV***,
Alexander SALOMATIN***, Boris BARANOV****, Vyacheslav GLADYSH*****,
Akihiro HACHIKUBO*, Hirotsugu MINAMI*, Satoshi YAMASHITA*
and Nobuo TAKAHASHI*

Abstract

Methane hydrates exist beneath the sea bottom near cold seeps NE off the Sakhalin in the Sea of Okhotsk. Multidisciplinary field operations were performed at a study area (approximately 16 × 20 km^2) to investigate seepage characteristics and understand gas hydrate formation mechanisms. A continuous profiling survey was conducted to obtain a distribution map of seepage structures on the floor by using a deep-tow, side-scan-sonar equipment. The distribution map reveals that the dense area of seepage structures coincides with a sea-floor area of deformed sediments caused possibly by repeated sediment slumping and debris flows in the past. We speculate that this deformation may have created shallow faults that are suitable to conduits for the migration and discharge of gas and fluid.

Three seepage structures were selected to study about their fluid-seep conditions around the sea floor level. Hieroglyph seepage structure is located at the northern end of the dense area of the structures. Kitami and Chaos structures are located about 2 and 7 km respectively apart from the Hieroglyph structure within the dense area. Large plumes on echograms and higher methane contents in the water column confirm gas seepage activities at the three structures. There observed at least two and four plumes at the Hieroglyph and Chaos structures, respectively. Each gas chimney image in seismic reflection profiles was traced to connect each BSR and seepage structure. Both pull-up and disturbed structures of BSR around the gas chimney images were interpreted as to be indications of significant heat flows caused by ascending fluid at both Kitami and Chaos structures. On the other hand, almost no pull-up/disturbance of BSR

* 北見工業大学未利用エネルギー研究センター
** 韓国海洋研究開発研究所韓国極地研究所
*** ロシア科学アカデミー極東支部 V. I. イリチェフ太平洋海洋学研究所
**** ロシア科学アカデミー P. P. シルショフ海洋学研究所
***** ロシア地質学海洋鉱物資源研究所
* New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology
** Korea Polar Research Institute, Korea Ocean Research and Development Institute
*** V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS
**** P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS
***** Russia Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean

was observed at the Hieroglyph structure, suggesting little water seepage.

The seep activity may vary with time off the Sakhalin. The Hieroglyph structure is located at the edge of a dense area of the seepage structures. It might serve as an indicator for the long-term activity of the fluid seepage system off the Sakhalin.

Key words：methane hydrate, methane seep, seepage structure, gas chimney, plume
キーワード：メタンハイドレート，メタンシープ，湧出ストラクチャー，ガスチムニー，プルーム

I. はじめに

1）オホーツク海のガスハイドレート研究

ガスハイドレートは，水分子が結合してできたミクロなケージ構造の中にガス分子を包有する包接水和物の結晶である。包有されたゲスト分子がメタンの場合はメタンハイドレートと呼ばれ，低温・高圧条件を満たす永久凍土地帯や海底下に存在することが知られている（Ginsburg and Soloviev, 1998; Sloan, 1998）。

オホーツク海における表層型メタンハイドレートの研究は，エコーグラム上に現れた巨大なメタンプルームの観測に始まる。1982 年にパラムシル島北西沖で，1988 年には本研究が対象としているサハリン島北東沖で，それぞれ最初のメタンプルームが観測された。図 1 には，現在までにメタンプルームが観測されている領域が，2 つの四角（赤枠）で示されている。海底コア回収による表層型メタンハイドレートの採取は，パラムシル島沖では 1986 年に，サハリン島沖では 1991 年に成功している（Ginsburg *et al.*, 1993）。その後サハリン島沖では，1995 年からはロシアとドイツの国際共同プロジェクト「コメックス：KOMEX（Kurile Okhotsk Marine Experiment）」が海洋調査の一部にハイドレート調査を行い（Biebow and Hutten, 1999; Biebow *et al.*, 2000, 2003; Dullo *et al.*, 2004），また 2003 年からは日本，ロシア，韓国等が主導する国際共同プロジェクト「カオス：CHAOS（hydro-Carbon Hydrate Accumulations in the Okhotsk Sea）」および「SSGH（Sakhalin Slope Gas Hydrate）」がハイドレート研究を主軸として調査を行っている（Shoji *et al.*, 2005; Matveeva *et al.*, 2005; Jin *et al.*, 2006, 2007; Shoji *et al.*, 2008; Jin *et al.*, 2008）。本研究では，表層型メタンハイドレートの生成メカニズムを理解するための重要な基礎となる，海底表層付近のメタンシープの音波反射形態について報告する。メタンシープ近くの海底では非常に強い音波反射が観測されたが，そこは泥火山やポックマークではなかった。本研究では，サイドスキャンソナー探査（後述）で得られた音波反射シグナルを湧出ストラクチャー（Seepage Structure）と呼ぶことにする。

2）オホーツク海

オホーツク海（図 1）は，南北約 1,500 km，東西約 1,000 km で，四方を陸地と千島列島に囲まれた中緯度の海洋である。太平洋中層水の源として知られているが，最近 50 年間における温暖化が指摘されて注目されている（Nakanowatari *et al.*, 2007）。水深は，平均約 800 m であるが，三方の陸域から大陸棚を経て中央北部のデリューギン海盆で約 1,500 m となり，さらに南部の千島海盆（クリル海盆）では約 3,000 m となる（図 1）。凍結する海洋としては世界で最も低緯度に位置しており，冬期に最大で 85％の海面が氷で覆われる（Hays and Morley, 2004）。図 2 に，2005 年 5 月にサハリン島東沖の大陸斜面（北緯 48.0 ～ 54.6 度で，水深 286 ～ 1,317 m の範囲）で測定した合計 25 地点の水温プロファイルを示す（Jin *et al.*, 2006）。測定地点は，図 1 に●印および★印で示されている。図 2 の黒と赤の太線で示されるプロファイルは，ともに 100 m 深付近で最低値を示したあと，深くなるにつれて黒太線はほぼ単調に昇温するが，赤太線の水温

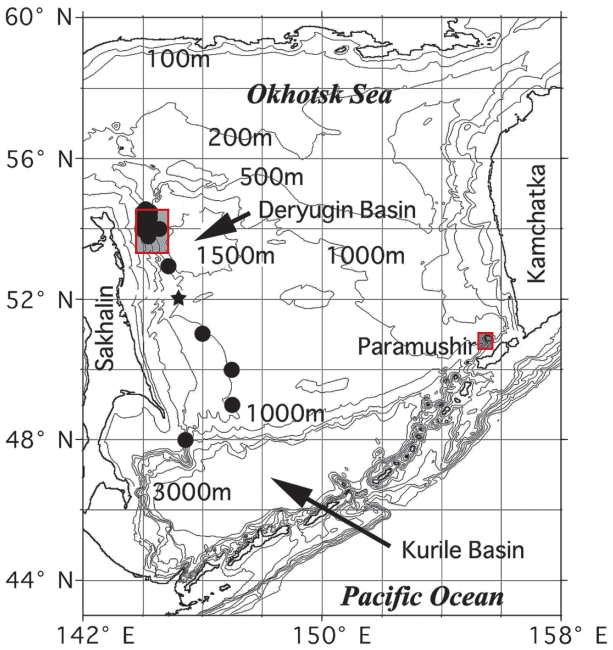

図 1　オホーツク海サハリン沖とパラムシル沖の表層型メタンハイドレート生成地域（赤色の四角）．本研究の調査域は，サハリン沖の生成地域に含まれる．●印および★印は，図 2 に示される水温プロファイルの測定場所．また，★印は参照コアの採取場所（南ほか，2009）でもある．

Fig. 1　Methane hydrate areas around the sea bottom off the Sakhalin and off Paramushir in the Sea of Okhotsk（red rectangle areas）. The survey area of this study is within the methane hydrate area off the Sakhalin. Solid circles and a star indicate survey sites for water temperature measurements. A star also shows the coring site of a reference core（Minami *et al.*, 2009）.

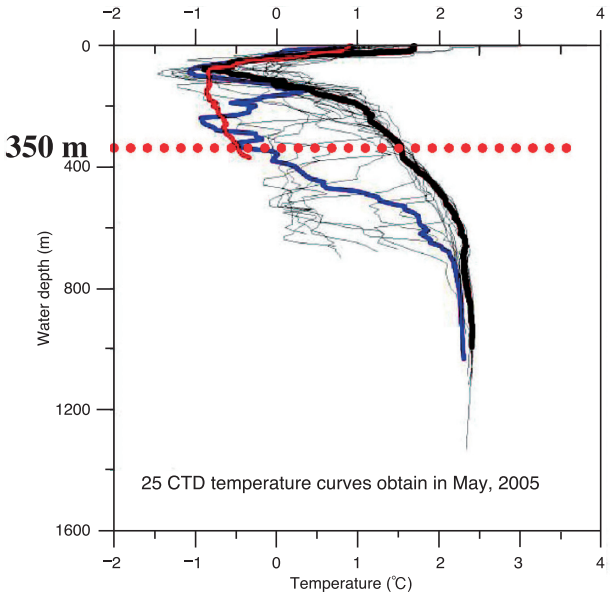

図 2　サハリン島東沖 25 地点で得られた CTD 水温プロファイル．黒と赤の太線は，ともに図 1 の四角（赤枠灰色）で示されるサハリン沖プルーム密集域内における測定結果で，水深はそれぞれ 960 m と 383 m である。赤の点線（350 m）は，水温 1℃におけるメタンハイドレート安定領域の上限．データは，2005 年 5 ～ 6 月のカオス 2 プロジェクト調査期間中に収集された（Jin *et al.*, 2006）.

Fig. 2　Twenty-five CTD temperature profiles obtained offshore NE Sakhalin in May thru June, 2005 during the CHAOS-II cruise（Jin *et al.*, 2006）. The thick black（water depth of 960 m）and red（water depth of 383 m）lines were obtained within the methane hydrate area（red rectangle area）off the Sakhalin shown in Fig. 1. The red dotted line shows the upper limit of the methane hydrate stability zone at a water temperature of 1℃.

は比較的低いままである。青太線はずっと南方の 48°00.08´N，145°25.66´E 地点（図 1 で最も南に位置する水深 1,042 m の地点）におけるプロファイルで，深さ 100 ～ 250 m の範囲に暖かい水塊が貫入しているが，100 m 深までの温度低下は上記 2 地点と類似している。オホーツク海

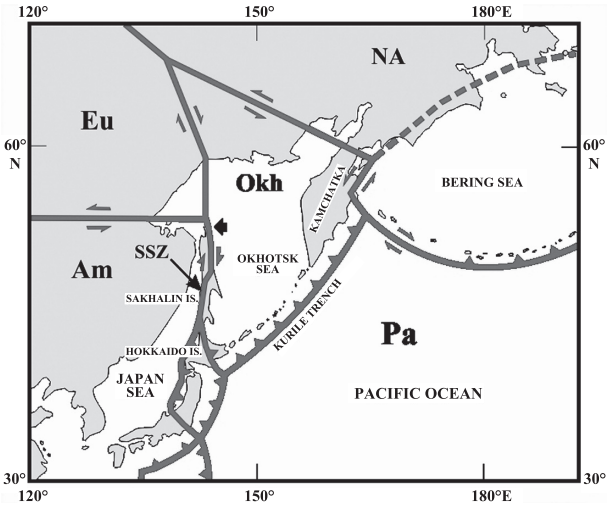

図 3　オホーツク海周辺のプレート境界と調査域（矢印）．三角のついた境界は沈み込み帯を示し，すれ違う 2 本の矢印がついた境界は横ずれ型である．破線は，推定されるプレート境界である．アムール（Am），ユーラシア（Eu），北米（NA），オホーツク（Okh）および太平洋（Pa）の各プレートが示されている．複雑に分布した断層群からなるサハリン横ずれ帯（SSZ）は，ほぼサハリン島全域に広がって観測されている．

Fig. 3　Plate boundaries around the Okhotsk Sea and location of the study area（black arrow）. Lines with triangles indicate subduction zones, lines with triangles mark strike-slip zones; dashed line marks suggested plate boundary. Plates: Am = Amur, Eu = Eurasian, NA = North America, Okh = Okhotsk, and Pa = Pacific. The Sakhalin Shear Zone（SSZ）represented by complex fault systems can be traced over the whole of Sakhalin Island.

の特徴の一つは，50 ～ 200 m 深に年間を通して低温水塊が存在することである（Shakirov *et al.*, 2005）。この低温水塊の存在と表面塩分の低さが，オホーツク海の氷結を容易にしている。本研究の調査域付近の水温プロファイルについては，海面下数 10 m 深までは季節変化が強く（表層水），水深約 50 ～ 150 m で低温域（−1.5 ～+1.5℃）に入り，水深 700 ～ 1,000 m の海底付近では 1.5 ～ 2.5℃まで昇温する。ただし，水深が浅くなり陸域に近づくか，温度の異なる水塊が混入すると，2℃程度の水温変化は起こり得る。メタンハイドレートが安定な水深については，水温変化が影響して単純ではないが，仮に水温を 1℃と仮定すると，約 350 m 以深と推定される（Sloan, 1998）。

テクトニック場（図 3）を見ると，オホーツク海プレートは，クリル・カムチャッカ沈み込み帯と 2 つの横ずれ境界に囲まれている（Savostin *et al.*, 1983; Cook *et al.*, 1986, Zonenshain *et al.*, 1990; Baranov *et al.*, 2008）。オホーツク海西縁を南北に走るプレート境界は，北海道からサハリンを通りオホーツク海の北西方向にまで伸びている。この境界は右横ずれ断層であるが，サハリン横ずれ帯（SSZ: Sakhalin Shear Zone）を含む複雑な分布の断層群からなり，かなり幅の広い境界である。このプレート境界は，過去 35 年の震央分布（図 4）に示されるように，サハリン北部では東側に，南部では西側にずれている（図 3）。サハリン北東沖の調査域は，地震活動の活発なプレート境界の直上ではないが，その東方数 10 km の大陸斜面上にある。

3）サハリン北東沖

サハリン島東側の大陸斜面はサハリン島とほぼ平行して南北に伸びている（図 4）。地殻の厚さは，デリューギン海盆の東側では 15 ～ 20 km であるが，西へゆくに従って厚くなりサハリン島東側の大陸棚では 35 km になる（Kosminskaya and Zverev, 1964）。デリューギン海盆を含むサハリン東側の基盤岩を覆う膨大な量の堆積物は，主としてアムール川の運搬・堆積作用によるものであり，その厚さは 8 km を超えると推定されている（Kharakhinov, 1998）。基盤岩の正確な深さは地震探査（マルチチャンネル）でもよくわからず，その理由である S/N 比の低下は，堆積物中のガス濃度が高いせいだと考えられている（Worrall *et al.*, 1996）。デリューギン海盆とサハリン島の間に存在する断層については多くの研究があり，斜め横ずれ逆断層（Rozhdestvenskiy, 1975），引張破壊（Zhuravlev, 1984），大陸

斜面と海盆の境界（Gnibidenko and Khvedchuk, 1982），地溝（Gnibidenko, 1990），大規模な断層（Worrall *et al.*, 1996）等々について報告され議論されているが，本調査域からは少し離れた場所の断層情報である。

Soloviev *et al.*（1994）は，サハリン北東沖の大陸斜面（本調査域付近）にはいくつもの断層が大陸斜面を横切って南北に連なる「断層域（幅数100 m）」があると考えた。しかし，現在までの我々の調査（Shoji *et al.*, 2005; Matveeva *et al.*, 2005; Shoji *et al.*, 2008）では，まだそのような「断層域」は観測されていない。これまでに確認された断層は，調査域近傍とラブレンティエフ断層域（共役断層を含む）に分布し（図4のNorthern segmant と Lavrentiev Fault Zone），ほぼ北西–南東方向と北東–南西方向の2種類が見られた。サハリンを通るプレート境界（右横ずれ断層）の応力場（Fournier *et al.*, 1994）を考慮すると，北西–南東方向のものは逆断層であり，北東–南西方向のものは正断層であると推定される。

サハリン島東縁の大陸斜面の形状は，大きな断層崖を持つラブレンティエフ断層域（53°50´N付近）を境に南北で大きく異なる。断層域の北側では，大陸棚と大陸斜面の境界が明瞭で，水深約200 m ラインに沿っている。大陸斜面の傾きは平均2.5°であるが，陸から離れるにつれて傾度は減少し，下に凸の断面を示す（凹型）。断層域の南側では，大陸斜面は大陸棚から滑らかに，水深1,100 m の海底へと続いている。斜面の傾きは平均1.5°で，陸から離れるにつれて傾度が増加する，上に凸の断面を示している（凸型）。北部の凹型は南北に約70 km 続くが，この領域はもともと南部と同じような凸型であったものが，いくどかの海底地すべりを繰り返したために凹型になったと考えられている。北部における総地すべり量は660 km^3 と試算されている（Wong *et al.*, 2003）。表層型ハイドレートが密集する調査域は，この海底地すべり域の中に位置している。本研究では，サイドスキャンソナー探査による「ガス湧出ストラクチャー」の形態・分布測定と，エコーサウンダー探査による「メタンプルーム」観測，およびスパーカー探査による「ガスチムニー・BSR」観測等の物理探査を行った。

II. 物理探査によるガス湧出とハイドレート情報

1）湧出ストラクチャー分布

サイドスキャンソナー（SSS）探査は，湧出ストラクチャー（海底下のガス・水湧出路が海底面に現れた部分：Seepage Structure）について，詳細な分布情報を与える（Shoji *et al.*, 2005）。メタンシープに起因して海底表層部に生成したカーボネートやバクテリアマット，さらにメタンハイドレートなどは，音波を強く反射することが知られている。従って，調査船で曳航した発生装置から音波を海底に向けて発射し，周辺の海底からの反射強度をマッピングすれば，メタンシープ域に関する海底分布情報を取得できる。ただし，音波反射の強度は，海底地形にも依存するので，シープ域における地形効果を考慮する必要はある。

本調査においては，ロシア科学アカデミー所属R/V ラブエンテイエフ号を用いて，SONIC-3M型 SSS 測定装置（周波数30 kHz，測定幅800 ～3,200 m）を曳航しながら SSS 測定を行った。この装置には，サブボトムプロファイラー（SBP：周波数8 kHz）も内蔵されている。曳航速度は，通常2 ～ 3 ノットであるが，海底の地形条件が許せば4ノットでも測定可能である。海底の SSS 測定範囲を曳航装置の左右約900 m に設定し，調査航路を約1海里（約1.8 km）間隔に設定すれば，広域のモザイク状データが取得できる。SBP 探査からは，測定装置直下の海底下数10 m 深までについて，断層写真的な深さ情報が得られる。

調査域（水深約630 ～ 1,070 m で，図4の灰色長方形；16 × 20 km^2）は，サハリン島とデリューギン海盆の間に位置する。調査域（図5）に，SSS 探査で得られた湧出ストラクチャーの位置を，黒丸（ヒエログリフ，北見，カオスの各湧出ストラクチャー）と中空の丸（その他の湧出ストラクチャー）でプロットした。等深度線（Dullo *et al.*, 2004）は，ほぼ南北に平行に

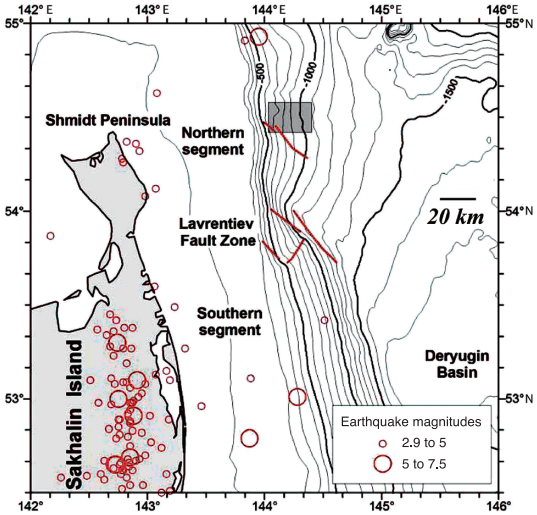

図 4　サハリン北東沖の海底と調査域（灰色の長方形）．中央部のラブレンティエフ断層域を境に，南北で大陸斜面の形状が大きく異なる（赤線は個々の断層）．地震情報について，震央とマグニチュードを赤円の位置と大きさで示す(米国地震情報センター資料 1973-2008)．灰色で囲った領域は，図 5 に示す領域．

Fig. 4　Bathymetry of the North-Eastern Sakhalin slope and location of the study area（grey rectangle）. Solid red lines show faults. Lavrentiev Fault Zone represents the boundary between northern and southern slope segments which are different from each other in their morphology. Distribution of the earthquakes（open circles）is from NEIC catalog（1973-2008）. Grey rectangular area marks location of the map shown in Fig.5.

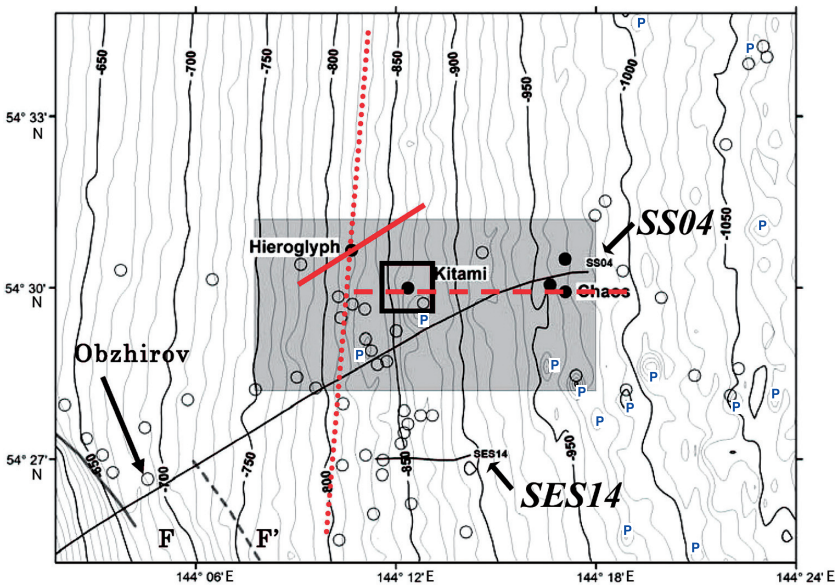

図 5　調査域の海底図（Dullo *et al.*, 2004）．灰色で囲った領域は，図 6 に示す領域．灰色領域中の中空四角は，図 9 の範囲．中空の円は，SSS 探査で観測された湧出ストラクチャー位置で，名前を付した黒丸は本研究に選ばれた湧出ストラクチャー．南西隅に断層（F）と伏在断層（F'）がある．ポックマーク位置は，青色の p 印で示している．SS04 と SES14 とつけた黒線は，それぞれ図 7 と図 8 の測線．赤実線と赤破線は，図 15 左図と同右図の測線で，赤点線は図 16 の測線．本図の位置は，図 4 に示されている．

Fig. 5　Bathymetric map of the study area（Dullo *et al.*, 2004）. Grey rectangular area marks the location of the map shown in Fig.6. The square shows the location of Fig. 9. Open circles mark seepage structures according to side-scan-sonar mapping. Named filled circles indicate the seepage structures under investigation. A solid line（F）indicates a fault, and a dashed line（F'）indicates a fault covered by sediments. The letter p in blue represents a pockmark. Numbered thick lines（SS04 and SES14）indicate survey lines for Fig. 7 and Fig. 8. Map location is shown in Fig. 4.

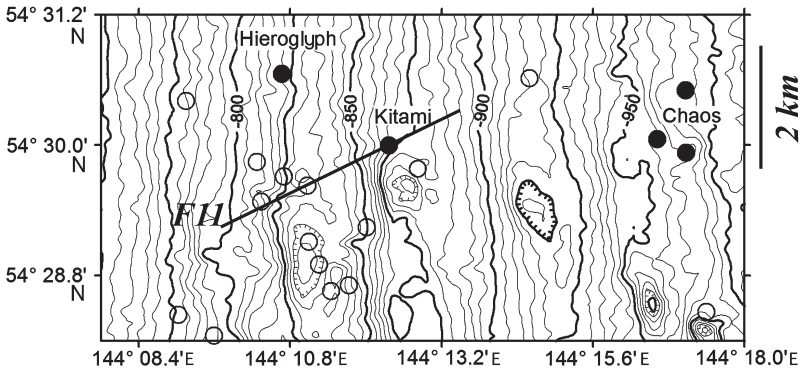

図 6　大陸斜面の細かな起伏と湧出ストラクチャーの分布．●印および○印は，図 5 に示されたものと同じ湧出ストラクチャー．F11 と付した直線は，図 11 の測線．本図の位置は図 5 に示されている．

Fig. 6　Detailed bathymetric map with locations of seepage structures. Solid and open circles show seepage structures as shown in Fig. 5. A line（F11）shows the survey line for SSS and SBP measurements shown in Fig. 11. Location of the map is shown in Fig. 5.

走っている。図 5 の南西隅には，断層崖を持つ断層 F と，伏在する断層 F' が存在している（図 4 も参照のこと）。800 m 以深の海底斜面には，直径 550 ～ 1,200 m で深さ 35 ～ 40 m 程度の窪み（p 印）が多数見られる。本論文ではこれらの窪みをすべてポックマークと呼ぶ（図 5，図 6）が，地形に現れた窪みに基づく解釈であり必ずしも地震探査等の深部情報には基づいていない。湧出ストラクチャー（○印）はポックマーク（p 印）近傍にも分布しているが，両者は一対一に対応しているわけではない。図 5 において，湧出ストラクチャー（○印）は，水深 630 ～ 1,000 m の南半分と 1,000 m 以深に分布しており，その範囲の等深度線はあまり直線的ではなく細かく振動しているのが特徴である。図 5 の中心部分を拡大した図 6 を見ると，等深度線の間隔は東西方向に小さな増減を繰り返しており，ステップ状の斜面であることがわかる。ポックマークは，このステップ状斜面に現れて，さらに小さな起伏を付加している。こうした小さな起伏に富む斜面形態は，図 5 の SS04 測線沿いの断面プロファイル（図 7）に明瞭に示されている。個々の起伏について，オブジロフストラクチャー（OS）とカオスストラクチャー（CS）については一対一に対応するが，その他の起伏についてはポックマークとステップ状形態の混成に対応する。Biebow *et al.*（2003）が，図 5 の SES14 測線沿い（水深 845 ～ 905 m）に得た音波探査プロファイル（Parametric Sediment Echosounder System SES-2000DS 使用）を見ると，海底下の堆積層は著しく変形しており（図 8），斜面上のステップ状形態が堆積層の変形によって形成されていることがわかる。図 8 の範囲内では，湧出ストラクチャーやポックマークは観測されていない。斜面の起伏分布を指標にすると，調査域内の堆積層は，西（ヒエログリフ付近）から東（カオス付近）へと，また北（ヒエログリフ以北）から南（ヒエログリフ以南）へと変形が増大しているといえる。

調査された湧出ストラクチャーとステップ状形態が分布する大陸斜面の下部は，過去に起こった海底地すべり域の先端部付近であり，大きな圧縮応力の作用した場所である。この圧縮力が原因で堆積層が変形し，斜面表面にステップ状形態ができたと考えられ，堆積層内部にはいくつもの浅い断層が形成されている可能性もある。この断層の一部がガス・水の湧出路になれば，海底表層付近にメタンハイドレートを生成したり，ポックマークを形成することも可能であろう。北見湧出スト

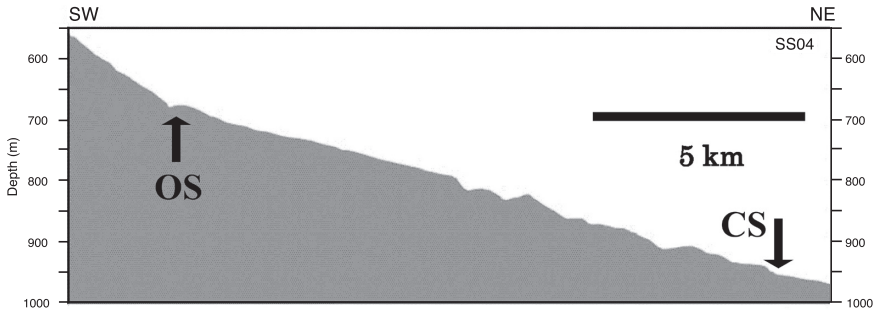

図 7　大陸斜面に見られる細かな起伏．OS と CS は，それぞれオブジロフストラクチャーとカオスストラクチャーの位置を示す．図の幅は 19.8 km．本図の位置は，図 5 に示される実線（SS04）．

Fig. 7　Bathymetric profile showing small-scale reliefs of the slope. OS and CS show the locations of Obzhirov and Chaos seepage structures, respectively. The length of the profile is 19.8 km. The location of this profile is shown by a line（SS04）in Fig. 5.

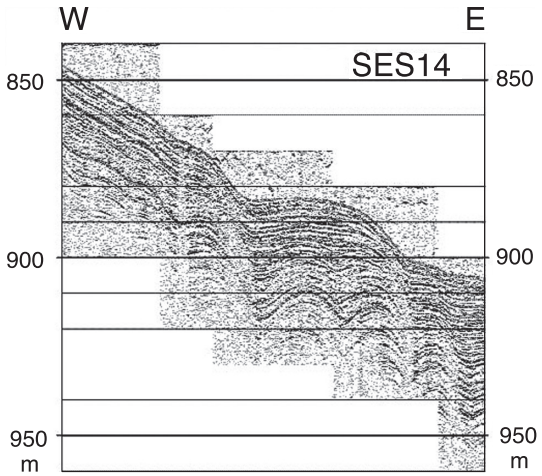

図 8　大陸斜面のステップ状形態と海底下の堆積層の変形（Biebow *et al.*, 2003）．測定場所は，図 5 に示される実線（SES14）．

Fig. 8　Subsurface deformations below the relief of the sea floor（Biebow *et al.*, 2003）. Location is shown by a line（SES14）in Fig. 5.

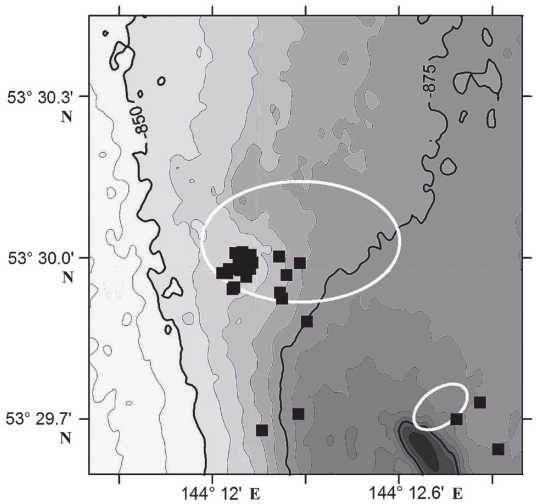

図 9　北見湧出ストラクチャー（中央部の楕円）と他の小さなストラクチャー（南東隅）．楕円の大きさは，SSS 探査で観測された湧出ストラクチャーの広がりの範囲を示す．■印は，ガスプルームの観測位置（誤差数 100 m）．等深度線の間隔は，5 m．本図の位置は，図 5 に示されている．

Fig. 9　Detailed bathymetric map of the Kitami seepage structure（an oval at the central part）and a smaller one. Two white ovals indicate structure boundaries according to side-scan-sonar image. Solid squares mark locations of gas plumes with an accuracy of several hundred meters. Contour interval is 5 meters. Location of this map is shown in Fig. 5.

ラクチャーの南東 1.5 km の位置に小さなストラクチャーがあり，それぞれ同じポックマークの縁辺部と斜面に位置している（図 9）。図 9 のプルームの位置については数 100 m の誤差を含むが，ストラクチャーとの大まかな位置関係を見ると，

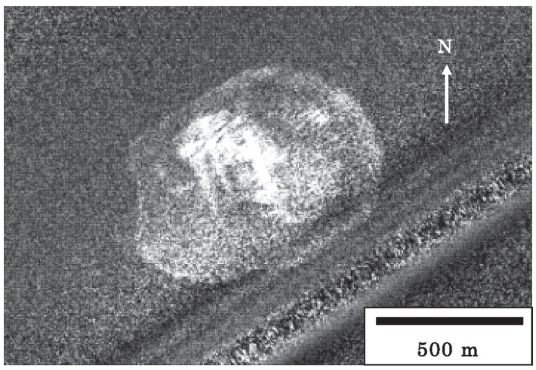

図 10　ヒエログリフ湧出ストラクチャーの SSS 探査画像.

Fig. 10　Hieroglyph seepage structure by SSS survey.

プルームのほとんどがストラクチャーから発生しているようにも思える。このポックマークと2つの湧出ストラクチャーは，深部構造が連結するといった何らかの関係を持っていると考えられる。しかし，ヒエログリフとカオスについては（図5），付近に対応するポックマークは見あたらない。ポックマークと湧出ストラクチャーの関係の詳細については，まだ不明である。

観測された湧出ストラクチャーのうち，採取コアの目視観察等によってハイドレートの存在が直接確認されたストラクチャーの数はまだ少ないが，ストラクチャー範囲内で採取した限りコア中にはいつもハイドレートが発見された。すでにハイドレートが確認されている3つのストラクチャーについて，以下に詳述する。

2）湧出ストラクチャーの形状

2-1）ヒエログリフ湧出ストラクチャー（HS）

ヒエログリフは，直径約 700 m でほぼ円形（図10）をなし，中心位置は 54°30.63′N，144°10.69′E である（図6）。ストラクチャー内部には，反射強度の高い2つの小さな円形域が見られる。北西側の小円域からは，3本の短いフレアが見える。水深情報（Dullo *et al.*, 2004）との比較から，ストラクチャーの表面は約 10 m 盛り上がっていることがわかった。

2-2）北見湧出ストラクチャー（KS）

北見は，ヒエログリフの南東約 2 km に位置し（図6），直径 650 m の東西に少し伸びた楕円形をしている（図11の上図）。反射強度はおおむね中程度で，中心部が最も強く，東端にも小さな強い反射箇所が見られる。ストラクチャーの中央部を横断した SBP 画像（図11の下図）では，深部からのガス・水湧出路が海底の地層を分断している。湧出路内部のコントラストが弱いのは，ガス充填堆積物からの反射に特徴的なものである。このガス充填堆積物領域の幅（下図）がストラクチャーのサイズ（上図）と良く一致していることから，この湧出路が非常にはっきりした境界を持つことがわかる。海底面付近では高い反射強度が得られているが，これはガスハイドレートもしくはカーボネートクラストからの反射と考えれる。湧出ストラクチャーは，SSS 探査シグナルに対して付けられた名称であるが，上記の特徴はすべてのストラクチャーに共通していると思われる。そこで湧出ストラクチャー（あるいは単にストラクチャー）という場合，上記の特徴をもったガス湧出路の海底表層付近を指すものとして用いる。

水深情報（Dullo *et al.*, 2004）との比較から，KS の表面は 10 m 程度盛り上がっており，深さ 25 m で北西–南東方向に伸びたポックマークの縁に位置している（図9）。北見の南西には，多数のストラクチャーが密集して分布している（図5）。

2-3）カオス湧出ストラクチャー（CS）

カオスは，北見の東約 5 km に位置しており（図6），3つのストラクチャーの複合形をなしている（図12）。南のストラクチャーは，直径が約 800 m で最も大きく，反射強度も強い。内部には，少なくとも4個の副次的構造が見え，それらは北東方向に互いに連結している。ストラクチャー表面は，副次的構造付近を頂点として約 10 m 盛り上がっている（Dullo *et al.*, 2004）。中央のストラクチャーは不規則な形をしており，サイズは約 500 m である。北のストラクチャーは，直径約 350 m で最も小さく，内部に直径約 100 m

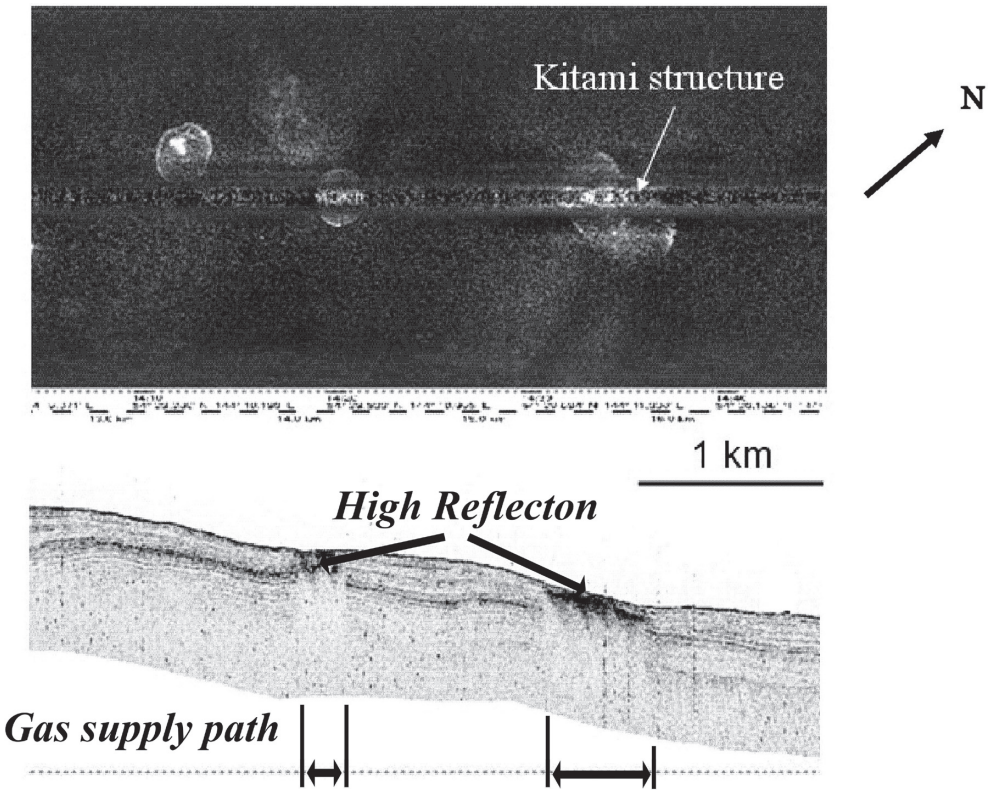

図 11　北見湧出ストラクチャーの SSS 探査画像（上図）と SBP 探査画像（下図）．SBP 探査画像には，強い反射強度を持つ海底面付近と，海底下のガス湧出路が明瞭に示されている．北見ストラクチャーの南西には，別の小さなストラクチャーが見られる．

Fig. 11　Kitami seepage structure revealed by SSS survey（upper photo）and SBP survey（lower photo）. High reflection zone around sea bottom and gas supply path below are clearly shown. A smaller structure is to be seen at southwest of Kitami structure. Location of this map is shown in Fig. 6.

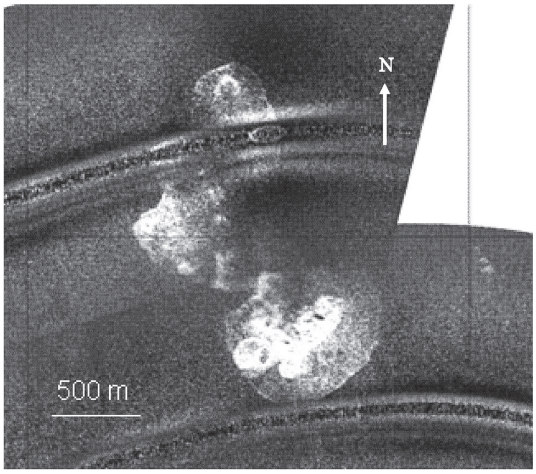

図 12　カオス湧出ストラクチャーの SSS 探査画像.

Fig. 12　Chaos seepage structure revealed by SSS survey.

の副次的構造が見える。中央および北のストラクチャーの表面は，ほぼ平坦である。

3）メタンプルームと湧出ストラクチャー

調査船に設置されたエコーサウンダー（Sargan-EM, ELAC, Sargan-GM）を用いて，多数のエコーグラムが収集された。使用周波数は，12, 19.7，135 kHz で，可能な限り航行中は常時測定を継続した。メタンプルームは，調査船直下から側方に数 100 m 離れていても観測されるが，その位置は不確かであり，すべて調査船直下にあるものとして記録された。従って，プルーム位置については数 100 m の誤差が含まれている。図 13 には，観測されたプルーム位置が，SSS マップ上にプロットされている。SSS ストラクチャーの位置は，図 6 に示されている。北見では大部分のプルームはストラクチャーに重なっているが，ヒエログリフでは 200 ～ 500 m ずれているものもあるように見える。これが有意のずれかどうかは不明である。また，プルームのプロット数は，必ずしもプルーム自体の個数ではなく，むしろ測定回数を反映している。しかしながら一般的特徴としては，多くのプルームが湧出ストラクチャー自体あるいはその周辺に分布していることは確かであり，特に過去 5 年間においてガスシープ活動は極めて活発であったといえる。

図 14 は，3 つのストラクチャーについて得られたエコーグラムである。ヒエログリフ（HS），北見（KS），カオス（CS）の水深は，それぞれ 830 m，855 m，960 m である。どのプルームも高さは約 400 ～ 500 m で，海面下約 300 m 深までの画像が観測されている。北見のプルーム数は 1 本であるが，ヒエログリフでは 2 本，カオスでは 4 本のプルームが識別できる。

4）地震探査で得られた海底下情報

スパーカーシステム SONIC-4（シングルチャンネル）を用いた地震探査を実施した。使用周波数域 200 ～ 1200 Hz，分解能 2 ～ 10 m で，海底下 50 ～ 300 m の情報が収集された。

一般に，堆積物中を伝わる地震波速度は 2,000 m/s 以下であるのに対して，メタンハイドレート中の地震波速度は約 3,500 m/s であり（例えば，青木・徳山，1994），かなり速い。従って，ガスチムニーがハイドレートで充填されていれば，地震探査プロファイルに示される BSR 深度は，周辺に比べて上昇する（速度 pull-up）。逆に堆積物中にガスが多く含まれていると地震波速度は低下するので，BSR 深度は下降する（速度 pull-down）。本調査で用いたスパーカー探査機器ではガスチムニー中の BSR 深度の変化を検出するのは極めて困難であったため，主としてガスチムニーの太さと，ガスチムニー周辺における BSR 深度の相対的変化に注目して解析を行った。以下に，各ストラクチャーについて得られた地震探査プロファイルの特徴を述べ，要約を表 1 に示す。

4-1）ヒエログリフ湧出ストラクチャー（HS）

地震探査プロファイルには，画像幅約 800 m のガスチムニーが明瞭に示されている（図 15 の左図；測線は図 5 の赤い実線）。BSR は，海底下の往復走時 220 ms の位置に観測された。この値は，Ludmann and Wong（2003）が，この地域の BSR 深度として算出した 200 ～ 250 m（往復走時で約 240 ～ 290 ms）とも調和的である。ガスチムニーと交差する付近で見られる，チムニー周辺の BSR 深度の変位は，ほんのわずか（10 ms 以内の上昇）である。図 16 に示される南北断面（測線は図 5 の赤い点線）を見ると，北東–南西断面に比べてチムニー画像幅は狭く，かつ反射強度は弱いように見える。BSR もあまり明瞭ではない。ヒエログリフ（HS）の南側にはいくつかのガスチムニーが見られる（図 16）のに対して，北側にはガスチムニーは見られない。これは，HS の南側ではガス噴出を誘起する海底堆積物の変形が顕著であるのに対して，北側ではまったく異なり，堆積層の変形が極めて小さいことに対応している。

4-2）北見湧出ストラクチャー（KS）

地震探査プロファイルに示されるガスチムニーの画像幅は，BSR 深度付近で約 1,000 m ある（図 15 右図；測線は図 5 の赤い破線）。ガスチムニー付近で BSR は大きく乱れ，周辺の BSR 深度の変位は，往復走時で約 40 ms（深さで約 35 m の上昇）程度である。

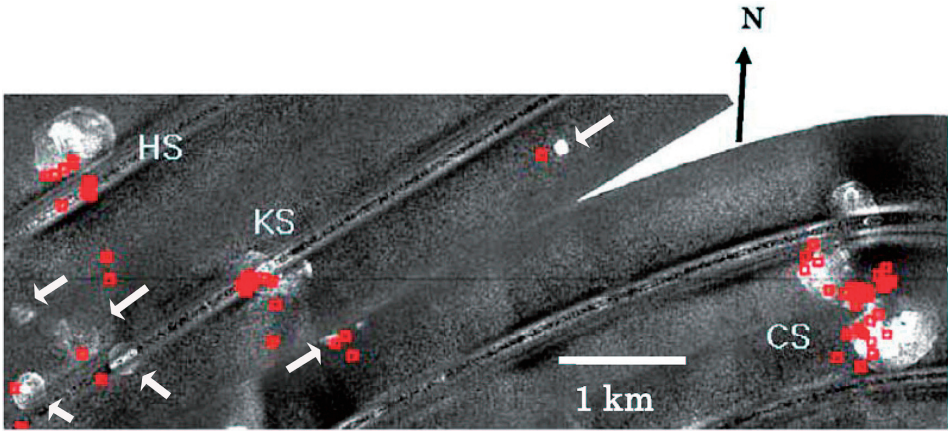

図 13　メタンプルームと湧出ストラクチャーの観測位置の比較．ヒエログリフ（HS），北見（KS），カオス（CS）以外で図 6 に示されているストラクチャーについては，矢印で示した．プルーム位置（赤四角）については，数 100 m の誤差を含むことに注意．

Fig. 13　Methane plume sites（red squares）plotted on a SSS mosaic map. Arrows indicate locations of seepage structures other than Hieroglyph (HS), Kitami (KS) and Chaos (CS) structures shown in Fig. 6. Note that plume locations might be shifted up to several hundred meters.

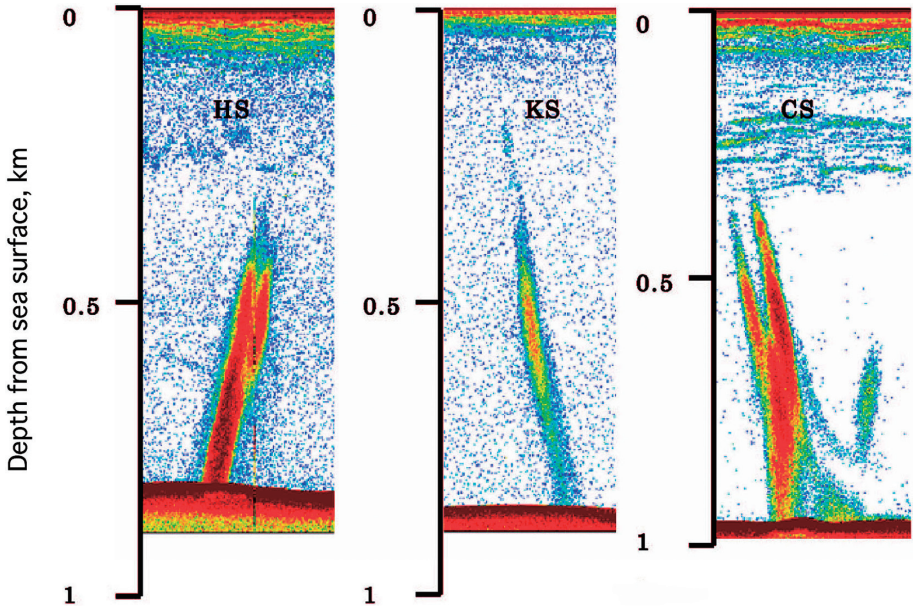

図 14　ヒエログリフ（HS），北見（KS），カオス（CS）湧出ストラクチャーで観測されたメタンプルーム．

Fig. 14　Mathane plumes observed at Hieroglyph（HS), Kitami（KS）and Chaos（CS）seepage structures.

表 1　3つの湧出ストラクチャー（HS，KS，CS）の特徴.

Table 1　Summary of characteristic features of Hieroglyph, Kitami, and Chaos structures.

Seepage Structure	Water Depth (m)	BSR Depth (ms)	BSR Shift (ms)	Chimney Width (m)	Disturbance of BSR
Hieroglyph	830	220	within 10	about 800	clear BSR
Kitami	855	200	about 40	about 1000	disturbed BSR
Chaos	960	200	over 40	over 1000	disturbed BSR

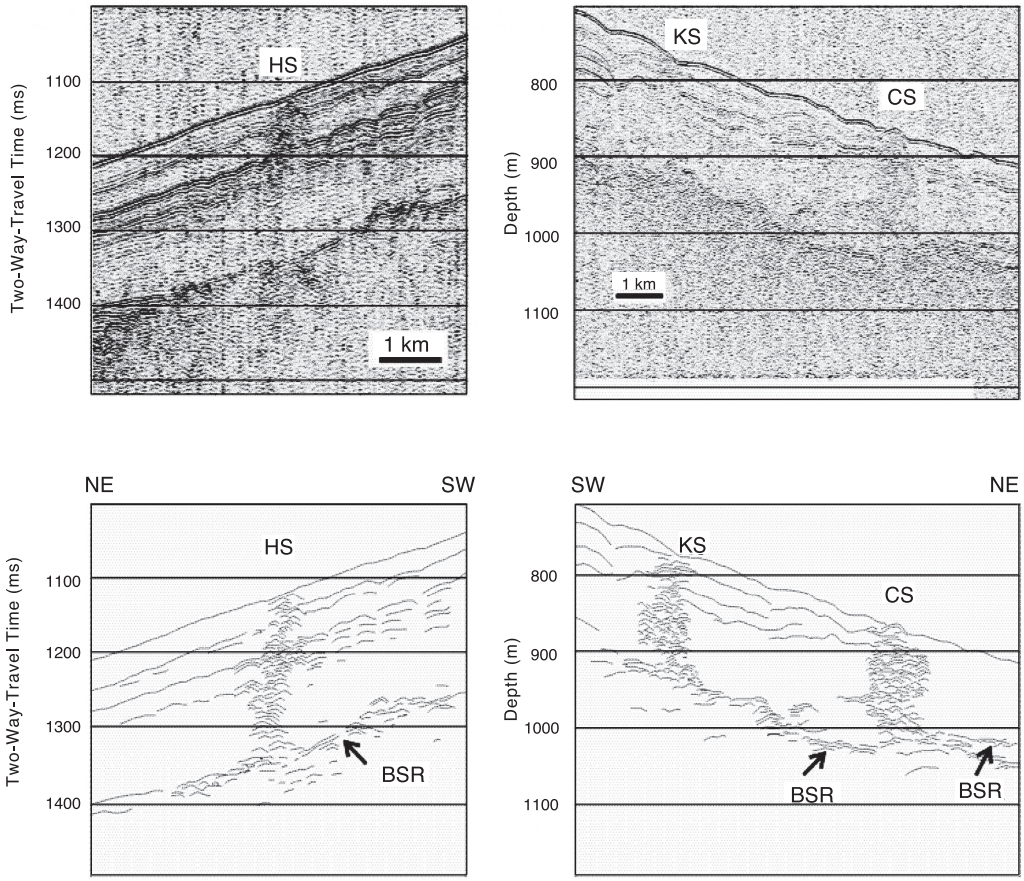

図 15　地震探査プロファイル（上図）と解釈図（下図）; ヒエログリフ（HS），北見（KS）およびカオス（CS）湧出ストラクチャー．測線は，図 5 の赤実線（HS）と赤破線（KS と CS）.

Fig. 15　Seismic profiles for Hieroglyph（HS）, Kitami（KS）and Chaos（CS）seepage structures（upper）and interpretation（lower）. Locations are shown as a red solid line（HS）and a broken line（KS and CS）in Fig. 5.

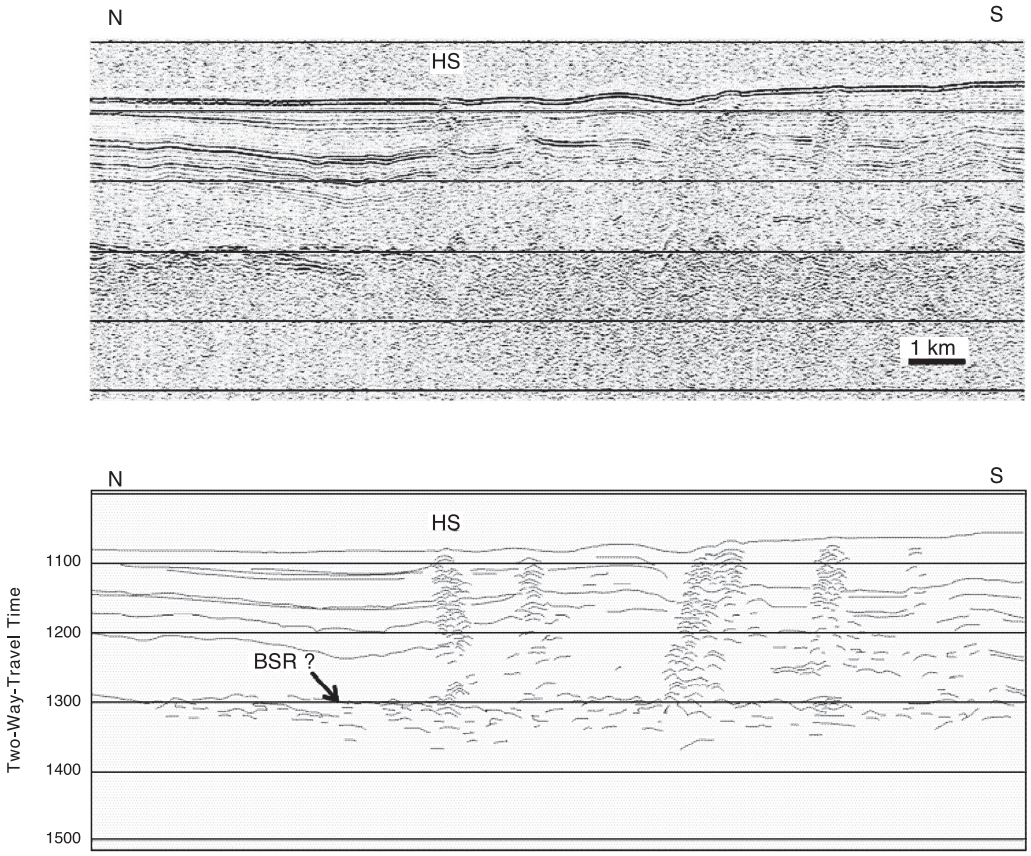

図 16　地震探査プロファイル（南北（SN）断面）；ヒエログリフ湧出ストラクチャー（HS）．測線は，図 5 の赤い点線．

Fig. 16　Seismic profile along north（N）to south（S）direction. Hieroglyph seepage structure is marked by HS. Location is shown by a red dotted line in Fig. 5.

4-3）カオス湧出ストラクチャー（CS）

複合ストラクチャーを 1 個のストラクチャーとしてみれば，3 つのストラクチャー中最大規模であり，最南のガスチムニーのサイズも最大である。BSR 深度付近におけるガスチムニーの画像幅は 1,000 m 以上あり，海底に近づくほど細くなっている（図 15 右図）。BSR は，ガスチムニー付近で大きく乱れ，周辺の BSR 深度の変位は，往復走時で 40 ms（深さで約 35 m の上昇）以上である。

ガスチムニーの周辺における BSR 深度の上昇は，ガス・水湧出に伴う熱輸送に起因すると考えられる。得られた結果からは，CS，KS，HS の順に熱輸送は小さくなり，特に HS については極めて低い熱輸送が示唆される。

III．議論および結論

1）堆積物コアのガス・水分析と海水中のメタンガス濃度

2003 年および 2005 年のカオスプロジェクト調査で 3 つのストラクチャー（HS，KS，CS）から採取された表層堆積物コアについて，間隙水化学分析とガスハイドレート包有ガスの同位体分析が行われた。ガス分析（八久保ほか，2009）

については，ハイドレートを解離して得たガスの組成とメタンの炭素・水素同位体比の結果から，3つのストラクチャーについてはいずれも，メタンはバクテリア起源（二酸化炭素還元）であることがわかった。ガス組成についてはほとんどがメタンで $C_1/(C_2 + C_3)$ の値は 1,000 ～ 100,000 であり，メタンの $\delta^{13}C$ は約 −65‰，δD は −200‰であった。

ハイドレートを含むコアの間隙水の化学分析については，コア回収中に起こるハイドレートの解離のため，解離水で希釈されて濃度低下が起こることに注意が必要である。しかし海水レベルより濃度が高い場合は，希釈の程度は低いと考えられる。Matveeva *et al.*（2003）は，オブジロフストラクチャー（図5）コアについて，深さに対する塩分濃度の増加を観測した。海底付近の海水では 0.53 M であった Cl^- 濃度はコア深さとともに増加し，海底下深度 4 m で 0.58 M の濃度になった。彼らの参照コア（約 5.5 m 長）については，深さに対して濃度は一定しており，海水レベルを少し超える値（約 0.54 M）であった。彼らは深さ方向の濃度増加を高塩分濃度（特に K^+，Mg^{2+}，Cl^-）の湧水のせいであると解釈した。南ほか（2009）は，HS，KS，CS で採取されたコアの間隙水分析を行った。KS 直上の海水中の Cl^- 濃度は，Matveeva *et al.*（2003）の海水値と同じ 0.53 M であったが，HS コア（163 cm 長）では 0.34 ～ 0.53 M，KS コア（310 cm 長）では 0.48 ～ 0.56 M，CS コア（438 cm 長）では 0.50 ～ 0.55 M という結果であった。HS コアについては明らかにハイドレート解離による希釈が起こったと解釈できるが，KS と CS の値は深さで振動し，海水値を超える高濃度箇所はあるが，深さに対する増加傾向は明瞭ではない。興味深いのは，南ほか（2009）が用いた参照コアについて，Cl^- 濃度 0.47 ～ 0.56 M の値が得られており，ストラクチャーコアの最大濃度はこの参照コアの値を超えていないことである。この参照コアのデータを採用すると HS，KS，CS の湧水については，塩素異常は認められないことになる。参照コア（315 cm 長）の採取場所は，図1に★印で示されている（水深 849 m 地点）。この参照コアが，ガスハイドレート生成域の範囲外におけるバックグラウンドレベルを代表するかどうかの検討は重要である。参照コア採取地点において，エコーグラムにプルームは観測されておらず，参照コアの解析からも湧水・湧ガスあるいはガスハイドレートの存在を顕著に示す直接的もしくは間接的データは得られていない。ただし，間隙水の Cl^- 濃度に，海水濃度を約5％超えるデータが存在しているため，コア深度の直下におけるガスハイドレート生成の可能性を否定することはできない。

ガスシープ強度が増すほど浅くなる硫酸イオンの枯渇深度（SMI: Sulfate Methane Interface）は，HS が最も浅く（40 cm），続いて KS（160 cm），CS（200 cm）の順であった。コア含水率と間隙水の水素同位体比（δD 値）については，HS と他の2つのストラクチャー（KS および CS）について結果が異なった。HS の含水率は深さとともに 50 から 80％に増加するが，他のストラクチャーでは深さに依存せずほぼ一定の値（KS で 60 ～ 70％，CH で約 70％）を示した。もし海底面直下の水分が下部に移動してハイドレート生成に使われたとすると，含水率が深さとともに増加する傾向が現れる。また，HS 間隙水の δD 値は比較的低い −3‰からかなり低い −16‰の範囲で深さに対して振動しているが，KS では深くなるにつれ −8 から +9‰へと増加し，CS でも −12 から +3‰へ増加するという顕著な深さ傾向を示した。堆積物中でハイドレートが生成すると同位体分別によって間隙水の δD 値は低下する。HS の場合は，採取コア中にハイドレートが観察されているので，間隙水組成が分別の影響を受けていることは確かである。しかし −16‰という値は海水の δD 値（−3‰）よりかなり低く，分別直後の状態が保存されたまま間隙水の移動・混合が起こっていないものと思われる。もしコア回収中にハイドレートが分解して間隙水と混合すると δD 値は変化するが，それは δD 値を高める方向に起こる。KS と CS について，δD 値が深さとともに増加することを南ほか（2009）は，深部からの湧水自体が高い δD 値を

表 2　堆積物コア解析の結果.

Table 2　Results of sediment core analysis.

Seepage Structure	Methane Origin*	SMI*** (cm)**	Pore Water Cont.(%)**	Pore Wate δD(‰)**	Seepage Type**
Hieroglyph	Microbial (CO_2 reduction)	40	50 ～ 80 (incr. w/depth)	−3 ～ −16	gas only
Kitami	Microbial (CO_2 reduction)	160	60 ～ 70 (constant)	−13 ～ +3 (incr. w/depth)	gas & water
Chaos	Microbial (CO_2 reduction)	200	70 (constant)	−8 ～ +9 (incr. w/depth)	gas & water

*Hachikubo *et al.*（2009）　** Minami *et al.*（2009）
***SMI（Sulfate Methane Interface）

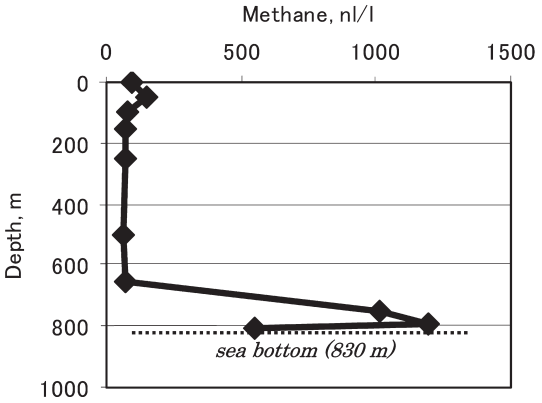

図 17　ヒエログリフ湧出ストラクチャー上部の海水中メタン濃度.

Fig. 17　Methane content in water column at Hieroglyph seepage structure.

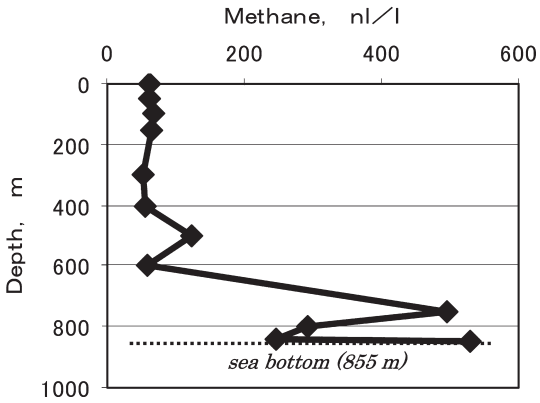

図 18　北見湧出ストラクチャー上部の海水中メタン濃度.

Fig. 18　Methane content in water column at Kitami seepage structure.

持つせいであると解釈した。また HS については，湧水が欠如してガスだけが噴出している可能性を指摘している。HS における湧水の欠如は，地震探査の結果とも海底面付近における含水率の低下とも調和する。3 つのストラクチャーコアについて得られたガス・水解析の主要な結果を，表 2 に要約した。

3 つのストラクチャーで行われた CTD/ 採水観測により，海水中のメタン濃度（海水 1 リットル中に含まれるメタンガス量を標準状態での容積（ナノリットル）で表示）が測定された。HS, KS，CS における濃度プロファイルを，それぞれ図 17，図 18，図 19 に示す。オホーツク海メタン濃度のバックグラウンド値は数 10 nl/l である（Shakirov *et al.*, 2005）が，いずれのメタンシープについても海底付近で約 500 ～ 2000 nl/l であり，ガス噴出が活発であることを明瞭に示している。

2）結論

得られた結果を総合すると，ヒエログリフ

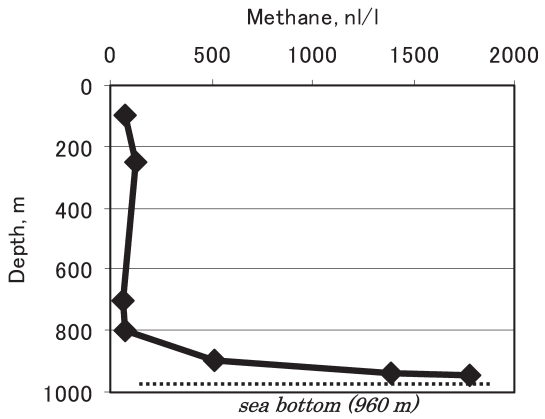

図 19　カオス湧出ストラクチャー上部の海水中メタン濃度.

Fig. 19　Methane content in water column at Chaos seepage structure.

（HS）においてガスシープ活動が活発に起こっていることは確実であるが，湧水活動は極めて低いと結論できる。調査域の SSS マップ（図 5）におけるストラクチャー分布を見ると，HS はストラクチャー密集域のほぼ北限に位置している。ストラクチャーの密集域は，大陸斜面にステップ状形態が現れる領域と一致し，それは堆積層の変形領域に対応する。この変形領域には浅い断層が数多く存在し，その一部が湧出路となってガス・水が輸送され，湧出ストラクチャーが形成されていると考えられるが，断層群の直接観察はまだない。ヒエログリフは変形領域と非変形領域の境界付近に位置し，水輸送の駆動力の低下によってガス主体のシープになっていると考えられるが，そのメカニズムの詳細は不明である。

メタンシープ活動の長期変動特性を調べる場合，広域代表性を示すストラクチャーと変動敏感性を示すストラクチャーの 2 種類に分けて考えることができよう。北見とカオスは，サハリン沖の湧出ストラクチャー密集域の代表的なストラクチャーであると考えられる。ヒエログリフは，密集域の縁辺部に位置し，湧水を伴わないストラクチャーである。もし今後，サハリン沖に広がるメタンシープ活動が変動してシープ様式や領域サイズを変えるならば，その変化は縁辺部のヒエログリフに最も早く現れる可能性があろう。従って，変動敏感な湧出ストラクチャーとしてヒエログリフを選定し長期モニタリングすることにより，サハリン沖のシープ活動を追跡できる可能性がある。

謝　辞

本研究は，カオスプロジェクトⅠ，Ⅱ，ⅢおよびSSGH プロジェクト 2007，2008 の研究成果の一部である。これらの海洋調査に参加したすべてのメンバーから受けた援助に対し心から感謝する。また，コメックスプロジェクトからは特別な協力と配慮を受けた。深くお礼を申し上げる。さらに，本稿を査読して頂いた東京大学の松本　良氏，および産業技術総合研究所の奥田義久氏には大変有益なご指摘を頂いた。記して深く謝意を表する。

本研究遂行にあたっては，文部科学省科学研究費補助金・若手研究 B19740323（八久保晶弘），および日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究（A）14254003 および同 18206099（代表：庄子　仁），基盤研究（C）15550060，同 17550069 および同 19550077（代表：南　尚嗣），および韓国国土海洋部研究費（Korean Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Grant PM08030（Y. K. Jin）），およびロシア連邦研究費（Grant RFFI 06-08-96928 および Grant Goskontract 02.515.11.5017（A. Obzhirov））等の助成を受けている。

文　献

青木　豊・徳山英一（1994）：地震探査とメタンハイドレート．月刊地球，**16**，523–532.

Baranov, B.V., Jin, Y.K., Shoji, H., Obzhirov, A., Dozorova, K.A., Salomatin, A. and Gladysh, V.（2008）: *Gas Hydrate System of the Eastern Sakhalin Slope: Geophysical Approach. Scientific Report of the Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2007*. Korea Polar Research Institute. 116p.

Biebow, N. and Hutten, E.（1999）: *Cruise Report KOMEX I and II: RV Professor Gagarinsky Cruise 22, RV Akademik Lavrentiev Cruise 28. GEOMAR Report*, **82**, GEOMAR, 188p.

Biebow, N., Lüdmann, T., Karp, B. and Kulinich, R.（2000）: *Cruise Report KOMEX V and VI: RV Professor Gagarinsky Cruise 26, MV Marshal Gelovany Cruise 1. GEOMAR Report*, **88**, GEOMAR, 296p.

Biebow, N., Kulinich, R. and Baranov, B.（2003）: *Cruise Report: RV Akademik M.A. Lavrentiev*

Cruise 29, *Leg I and Leg II. GEOMAR Report*, **110**, GEOMAR, 176p.

Cook, D. B., Fujita, K. and McMullen, C. A. (1986): Present-day plate interactions in northeastern Asia: North American, Eurasian and Okhotsk plates. *Journal Geodynamics*, **6**, 33–51.

Dullo, W.-Chr., Biebow, N. and Georgeleit, K. (2004): *Cruise Report SO178-KOMEX Cruise Report, Mass Exchange Processes and Balances in the Okhotsk Sea*. IMF-GEOMAR, 125p.

Fournier, M., Jolivet, L., Huchson, P., Sergeyev, K.F. and Oscorbin, L.S. (1994): Neogene strike-slip faulting in Sakhalin and Japan Sea, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 2701–2725.

Ginsburg, G. D. and Soloviev, V. A. (1998): *The Submarine Gas Hydrates*. Russia Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, 216p.

Ginsburg, G.D., Soloviev, V.A., Cranston, R.E., Lorenson, T.D. and Kvenvolden, K.A. (1993): Gas hydrates from the continental slope, offshore Sakhalin Island, Okhotsk Sea. *Geo-Marine Letters*, **13**, 41–48.

Gnibidenko, H.S. (1990): The rift system of the Okhotsk Sea. *Proceedings of the First International Conference on Asia Marine Geology*, *Shanghai*, China Ocean Press, 73–81.

Gnibidenko, H.S. and Khvedchuk, I.I. (1982): Main features of the Okhotsk Sea tectonics. *Geological Structure of the Okhotsk Sea Region*. Sakhalin Complex Research Institute, 3–25. (in Russian)

八久保晶弘・坂上寛敏・南　尚嗣・布川　裕・庄子仁・Mateeva, T.・Jin, Y.K.・Obzhirov, A. (2009): オホーツク海天然ガスハイドレートの同位体組成とその結晶特性. 地学雑誌, **118**, 207–221.

Hays, D. J. and Morley, J. J. (2004): The Sea of Okhotsk: A window on the Ice Age Ocean. *Deep-Sea Research I*, **51**, 593–618.

Jin, Y.K., Obzhirov, A., Shoji, H. and Mazurenko, L. (2006): *Hydro-Carbon Hydrate Accumulations in the Okhotsk Sea* (*CHAOS-II Project*). *Report of R/V. Akademik M. A. Lavrentyev Cruise 36, Vladivostok - St.Petersburg*. Russia Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, 127p.

Jin, Y.K., Obzhirov, A., Shoji, H. and Mazurenko, L. (2007): *Hydro-Carbon Hydrate Accumulations in the Okhotsk Sea* (*CHAOS-III Project*). *Report of R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 39*. Korea Polar Research Institute, 133p.

Jin, Y.K., Shoji, H., Boris, B. and Obzhirov, A. (2008): *Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2008. Report of R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 44*. Korea Polar Research Institute, 64p.

Kharakhinov, V.V. (1998): *Tectonics of the Okhotsk Sea Oil and Gas Potential Province*. Sakhalin Research and Industrial Institute for Marine Petroleum Development, 77p. (in Russian)

Kosminskaya I.P. and Zverev S.M. (1964): *Crustal Structure of the Asian Continent/Pacific Ocean Transition Zone.* Science Publishers, 306p.

Ludmann, T. and Wong, H. K. (2003): Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diaprism and gas escaping structures in the northwestern Sea of Okhotsk. *Marine Geology*, **201**, 269–286.

Matveeva, T., Soloviev, V., Wallmann, K., Obzhirov, A., Biebow, N., Poort, J., Salomatin, A. and Shoji, H. (2003): Geochemistry of gas hydrate accumulation offshore NE Sakhalin Island (the Sea of Okhotsk): Results from the KOMEX-2002 cruise. *Geo-Marine Letters*, **23**, 278–288.

Matveeva, T., Soloviev, V., Shoji, H. and Obzhirov, A. (2005): *Hydro-Carbon Hydrate Accumulations in the Okhotsk Sea* (*CHAOS Project Leg I and Leg II*). *Report of R/V Akademik M.A.Lavrentyev Cruise 31 and 32*. Russia Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, 164 p.

南　尚嗣・Krylov, A.・坂上寛敏・八久保晶弘・百武欣二・戸丸　仁・木田真人・高橋信夫・庄子　仁・Mateeva, T.・Jin, Y.K.・Obzhirov, A.・Poort, J. (2009): オホーツク海のメタンハイドレート含有層における間隙水の地球化学. 地学雑誌, **118**, 194–206.

Nakanowatari, T., Ohshima, K. I. and Wakatsuchi, M. (2007): Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originationg from the Sea of Okhotsk, 1955–2004. *Geophysical Research Letters*, **34**, L04602, doi: 10.1029/2006GL028243.

Rozhdestvenskiy, V.S. (1975): Strike-slips of the north-eastern Sakhalin Island. *Geotectonics*, **2**, 85–96. (in Russian)

Savostin, L.A., Zonenshain, L.P. and Baranov, B. V. (1983): Geology and plate tectonics of the Sea of Okhotsk. in *Geodynamics of the Western Pacific-Indonesian Region* edited by Hilde, T.W.C. and Uyeda, S., *Geodynamic Series,* AGU, 189–222.

Shakirov, R. B., Obzhirov, A. I., Salyuk, A. I., Biebow, N., Terekhova, V. E., Tsunogai, U. and Shoji, H. (2005): Calssification of anomalous methane fields in the Sea of Okhotsk. *Polar Meteorology and Glaciology*, **19**, 50–66.

Shoji, H., Soloviev, V., Matveeva, T., Mazurenko, L., Minami, H., Hachikubo, A., Sakagami, H., Hyakutake, K., Kaulio, V., Gladysh, V., Logvina, E., Obzhirov, A., Baranov, B., Khlystov, O., Biebow, N., Poort, J., Jin, Y.K. and Kim, Y. (2005): Hydrate-bearing structures in the Sea of Okhotsk. *Eos*, **86** (2), 13, 18.

Shoji, H., Jin, Y. K. and. Obzhirov, A eds. (2008): *Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2007, R/V "Akademik M. A. Lavrentyev" Cruise 43*. Kitami Institute of Technology, 39p.

Sloan, E. D. (1998): *Clathrate Hydrates of Natural*

Gases. 2nd ed. Marcel Dekker, 705p.
Soloviev, V.A., Ginsburg, G.D., Duglas, V.K., Cranston, R., Lorenson, T., Alekseev, I.A., Baranova, N.S., Ivanova, G.A., Kazazaev, V.P., Lobkov, V.A., Mashirov, Yu.G., Natorkhin, M.I., Obzhirov, A.I. and Titaev, B.F.（1994）: Gas hydrates of the Okhotsk Sea. *Otechestvennaya Geologiya*, **2**, 10–16.（in Russian）
Wong, H.K., Lüdmann, T., Baranov, B.V., Karp, B.Y. and Konerding, P.（2003）: Bottom current-controlled sedimentation and mass wasting in the north-western Sea of Okhotsk. *Marine Geology*, **201**, 287–305.
Worrall, D. M., Kruglyak, V., Kunst, F. and Kuznetsov, V.（1996）: Tertiary techtonics of the Sea of Okhotsk, Russia: Far-field effects of the India-Eurasia collision. *Techtonics*, **15**, 813–826.
Zhuravlev, A.V.（1984）: Comparative characteristic of the Deryugin and TINRO Basins, Okhotsk Sea. *Pacific Geology*. **4**, 21–27.（in Russian）
Zonenshain, P.L., Kuzmin, M. I. and Natapov, L. M.（1990）: *Plate Tectonics of the USSR Territory*. Nedra, 366p.（in Russian）

（2008 年 11 月 4 日受付，2009 年 1 月 28 日受理）