

「しんかい2000」黒島海丘潜航調査(NT02-07&08地質系潜航調査)と 海底長期計測の概要

町山 栄章*¹ 岩瀬 良一*¹ Kevin M. Brown*² 松本 良*³ 牧 陽之助*⁴ 中山 典子*⁵
小坂 紋子*⁵ 藤倉 克則*⁶ 三宅 裕志*⁶ 奥谷 喬司*⁶ 長沼 毅*⁷ 渡部 裕美*⁸
荻原 成騎*³ 武内 里香*³ ロバート・ジェンキンス*³ 陳 毅風*³ 青木 美澄*⁹
今村 牧子*⁹ 徐 垣*¹

「なつしま」NT02-07航海およびNT02-08航海において、「しんかい2000」・「ドルフィン-3K」を使用した黒島海丘の潜航調査が実施された。本調査では、

- 1) 半年にわたる湧水量の長期モニタリングを実施する目的で、冷湧水域3サイトにCAT meter 6台ならびに地中温度計4台を設置するとともに、ガス噴出サイトに流向流速計・CTDを設置した、
- 2) 海底直下・直上の地球化学的特徴や炭酸塩岩類形成に関与した流体の特性を明らかにする目的で、炭酸塩岩類・冷湧水現象等のマッピングを実施するとともに、冷湧水域・ガス噴出口での採水・採ガスや採泥を実施した、
- 3) メタン濃度等やガス噴出の連続観測のため、メタン／CTDプローブならびにビデオカメラシステムによる短期モニタリングを実施した、
- 4) 冷湧水域の海底下の温度構造を明らかにする目的で、短期および長期の熱流量測定を実施した。

キーワード：黒島海丘，冷湧水炭酸塩岩，ガスハイドレート，化学合成生物群集，長期計測

* 1 海洋科学技術センター深海研究部
* 2 カリフォルニア大学スクリpps海洋研究所
* 3 東京大学大学院理学系研究科
* 4 岩手大学人文社会科学部
* 5 北海道大学大学院理学研究科
* 6 海洋科学技術センター海洋生態環境研究部
* 7 広島大学生物生産学部
* 8 東京大学海洋研究所
* 9 日本海洋事業株式会社海洋科学部
* 10 Deep Sea Research Department, JAMSTEC
* 11 Scripps Institution of Oceanography, UCSD
* 12 Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo
* 13 Faculty of Humanities and Social Sciences, Iwate University
* 14 Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, Hokkaido University
* 15 Marine Ecosystems Research Department, JAMSTEC
* 16 Faculty of Applied Biological Sciences, Hiroshima University
* 17 Ocean Research Institute, University of Tokyo
* 18 Marine Science Department, Nippon Marine Enterprise, Ltd.

Outline of "Shinkai 2000" dive surveys and long-term monitoring on the Kuroshima Knoll, off Ishigaki Island - Preliminary report of the NT02-07 & 08 Cruise -

Hideaki MACHIYAMA*¹⁰ Ryoich IWASE*¹⁰ Kevin M. BROWN*¹¹ Ryo MATSUMOTO*¹²
Yonosuke MAKI*¹³ Noriko NAKAYAMA*¹⁴ Ayako KOSAKA*¹⁴ Katsunori FUJIKURA*¹⁵
Hiroshi MIYAKE*¹⁵ Takashi OKUTANI*¹⁵ Takeshi NAGANUMA*¹⁶ Hiromi WATANABE*¹⁷
Shigenori OGIHARA*¹² Rika TAKEUCHI*¹² Robert Gwyn JENKINS*¹² Yifen CHEN*¹²
Misumi AOKI*¹⁸ Makiko IMAMURA*¹⁸ Wonn SOH*¹⁰

In the NT02-07 and NT02-08 Cruises, the geological surveys using manned submersible "Shinkai 2000" and ROV "Dolphin-3K" were carried out on the top of the Kuroshima Knoll, off Yaeyama Islands in the southern part of the Ryukyu Arc. In this survey, the following operations were carried out:

- 1) for the long-term monitoring of seep flux, six CAT meters and four geothermometers were deployed at three cold seep sites, and a current meter and CTD probe were also deployed at gas venting site,
- 2) to clarify fluid characteristics, gas, water, rock, and sediment sampling and detailed mapping were carried out around cold seep sites,
- 3) short-term monitoring using a methane/CTD probe system and a video camera system were carried out at the gas venting site,
- 4) to clarify the sub-seafloor thermal structure, short- and long-term measurement using geothermometer were carried out.

Keywords : Kuroshima Knoll, cold seep carbonates, gas hydrate, chemosynthetic community, long-term monitoring

1. はじめに

水と主にメタンガスとから構成される氷状固体結晶であるガスハイドレートは、海洋の溶存炭素量の1/4以上を固定していると推定されている(松本, 1995)。このガスハイドレートは、自身の体積の約170倍ものメタンを保持し、かつ温度・圧力変化に敏感に応答し容易に分解することから、不安定な炭素リザーバーとして環境変動や炭素サイクル等の地球システムに多大な影響を与えていると考えられている(例えば, 松本, 1995; Kennet *et al.*, 2000など)。したがって、ガスハイドレートの生成・分解諸現象の解明は、地球表層環境変動の理解に重要な意義を持つ。

近年、南西諸島西部、八重山諸島の石垣島南方沖約26kmに位置する黒島海丘頂部において(図1)、1771年に発生した八重山地震津波に関連する調査の過程で、化学合成生物群集と冷湧水によって形成されたとみられる炭酸塩岩類等が発見された(松本ほか, 1997, 1999など)。これまでの一連の調査航海によって、頂部平坦面北側での化学合成生物群集やチムニー等の炭酸塩岩類の分布が明らかにされてきている(町山ほか2001a; 新城ほか, 2001)。特に、冷湧水炭酸塩岩類は日本周辺海域においては最大規模の分布を示しており、平成13年度の潜航調査において、大規模な

未記載種のシンカイヒバリガイコロニー(以下、シンカイヒバリガイコロニー)を伴う、現在もアクティブなメタンガス噴出口が複数(15ヶ所程度)発見された(町山ほか, 2001b)。一方、これら炭酸塩岩類の炭素・酸素同位体比の検討の結果、ガスハイドレートの分解水が冷湧水形成に関与した事が示唆されている(武内ほか, 2001; Takeuchi *et al.*, 2001など)。また、現生のエンセイシロウリガイコロニーやシンカイヒバリガイコロニーが頂部に存在することなどの、冷湧水に関わる諸現象が明らかとなりつつある。とりわけ当該域は、ガスハイドレートの安定性(温度・圧力条件)が非常にセンシティブな場であるため、ハイドレートの分解現象解明には最適のフィールドである。

本報告では、黒島海丘頂部において、平成14年5月19日～24日にかけて実施された「ドルフィン-3K」を使用した事前潜航調査5潜航(「なつしま」NT02-07航海)、ならびに6月12日～15日に実施された「しんかい2000」の2潜航調査(「なつしま」NT02-07航海)、および6月20日～25日にかけて実施された「しんかい2000」の4潜航調査(「なつしま」NT02-08航海)の概要を述べる。本調査では、これまでに地質マッピングが行われ、冷湧水・ガス噴出の存在が判明している黒島海丘頂部において、

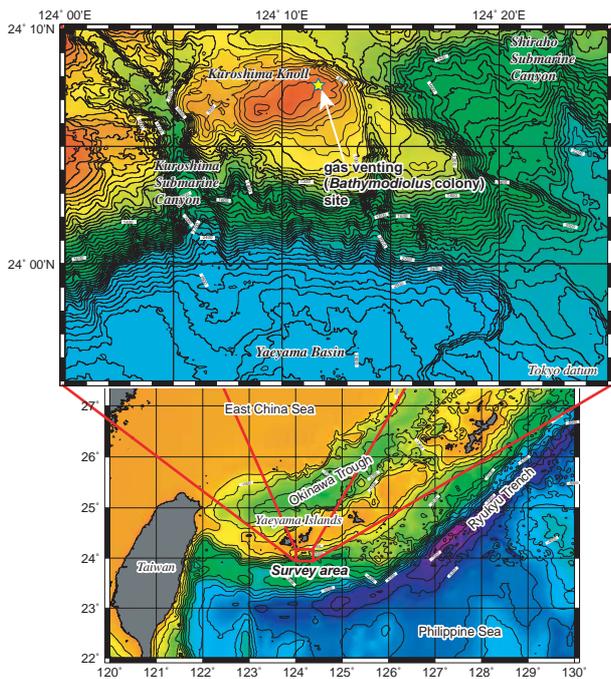


図1 調査海域図および黒島海丘頂部のガス噴出(シンカイヒバリガイコロニー)サイト位置図。

Fig. 1 Location map of the Kuroshima Knoll and the gas venting (Bathymodiolus colony) site.

- 1) 冷湧水域にCAT meter等を設置し、湧水量ならびに冷湧水の化学組成を長期モニタリングし、冷湧水の時系列変動を明らかにする、
- 2) 炭酸塩岩類・冷湧水等のガスハイドレート分解に伴った諸現象のマッピングを実施するとともに、冷湧水域・ガス噴出口での採水・採ガスや採泥を行い、その同位体等各種地球化学分析から海底直下・直上の化学的特徴や炭酸塩岩類形成に関与した流体の特性を明らかにする、
- 3) メタン濃度等のモニタリングを目指した試作器を設置して短期モニタリングを実施し、その時系列変動を明らかにする、
- 4) 熱流量測定を実施し、冷湧水域の海底下の温度構造を明らかにする、事を目的とした。

2. 潜航調査結果概要

黒島海丘は、頂部の水深は約630m、南側は比較的平坦な八重山海盆に連続しており、東・西・北側はそれぞれ白保海底谷・黒島海底谷によって境される、島棚から孤立した小海丘となっている(図1)。この海丘頂部の事前調査潜航として5潜航(第554～558潜航)が実施され、また地球科学的目的を主とした「しんかい2000」調査潜航として6潜航(第1363～1368潜航)が実施された。以下に各潜航の結果概要を記述する。

2.1 「ドルフィン-3K」事前調査潜航

黒島海丘頂部のガス噴出孔を伴うシンカイヒバリガイコロニーサイトを中心とした東西測線を設け、「ドルフィン-3K」を使用した事前潜航を実施した。この際、事前調査を妨げない範囲で、計測機器の設置、試料採取、ならびに観察を行った。

(1) 第554潜航(図2)

海丘頂部の東側よりガス噴出サイトに至る測線を設けて実施した。着底地付近は細～中礫を含む砂質泥底であり、直立した炭酸塩岩チムニーが散見される。またエンセイシロウリガイ死貝が散在する。地点2までの間は炭酸塩岩の礫(まれに塊状炭酸塩岩も認められる)やエンセイシロウリガイ死貝が散在する産状を呈する。地点3から4に至る間は黒褐色化したエンセイシロウリガイ死貝殻片が密集している。地点4の西側には、島尻層群と推定される砂岩泥岩互層が露出する(東西走向で南傾斜を示す)。地点5付近には、生きたシンカイヒバリガイ属の個体が視認され、白色のエンセイシロウリガイ死貝や生きているチューブワームも観察された。ガス噴出サイトには広大なシンカイヒバリガイコロニーが認められ、この付近一帯はpavement状の炭酸塩岩が海底面に露出しており縁辺部には亀甲状の割目が発達し、一部からはガスの噴出が観察された。なお、5地点において地中温度計測を、着底時にガンマ線計測を行った。

(2) 第555潜航(図2)

海丘頂部のガス噴出サイトより西側に至る東西測線を設けて実施した。ガス噴出サイトの地点8に長期計測用の流向流速計を設置した。ガス噴出サイトの西側縁辺部にはエンセイシロウリガイ死貝の密集部が認められる。地点11に至る間は、細～大礫が散在する砂礫底であり、リップルマークの発達が観察される。またこの間に散在する貝殻片は少ない。地点11には生きたエンセイシロウリガイ・シンカイヒバリガイ属二枚貝の小コロニーが分布する。地点12から13に至る間には、灰白色の小さいバクテリアマットを伴うエンセイシロウリガイ死貝・塊状炭酸塩岩が散点的に認められた。地点13には生きているエンセイシロウリガイ数個体が、バクテリアマットとともに小コロニーを形成している。なお、2地点において地中温度計測を、着底時にガンマ線計測を行った。

(3) 第556潜航(図2)

頂部のガス噴出サイトを南北に横切る測線を設けて実施した。ガス噴出サイトの北側の砂礫底上には塊状炭酸塩岩が散在し、またその縁辺部には亀甲上割れ目の発達する炭酸塩岩pavementが発達する。ガス噴出サイトのシンカイヒバリガイコロニー中(2m程度の円形の砂質底)に長期計測用のCTDを設置した。本サイトの南縁部にはエンセイシロウリガイ死貝の密集部が認められる。

(4) 第557潜航(図3)

東南東より頂部のガス噴出サイト(シンカイヒバリガイコロニー)に至る測線を設けて実施した。着底地付近はチムニーやノジュール状炭酸塩岩礫が分布する砂礫底である。地点3から4に至る間に、島尻層群と推定される東西走向で南傾斜を示す砂岩泥岩互層が露出する。なお、地点4には

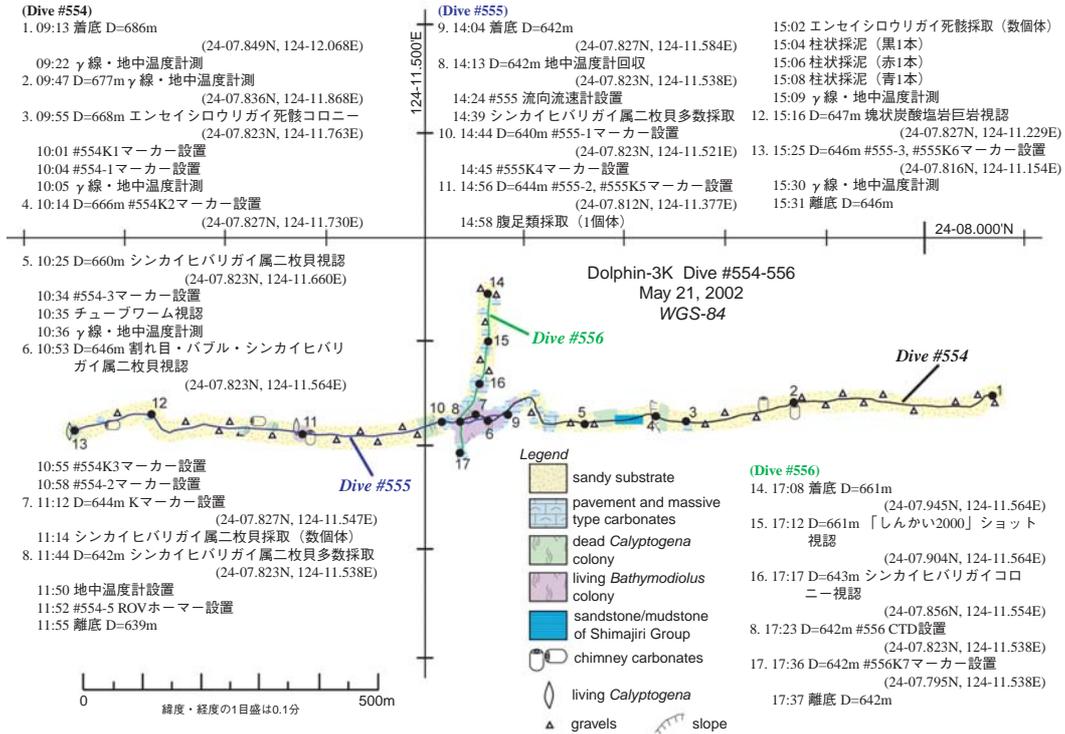


図2 ドルフィン-3K第554~556潜航調査ルートマップ。
Fig. 2 Route map of ROV "Dolphin-3K" 505 to 556 Dives.

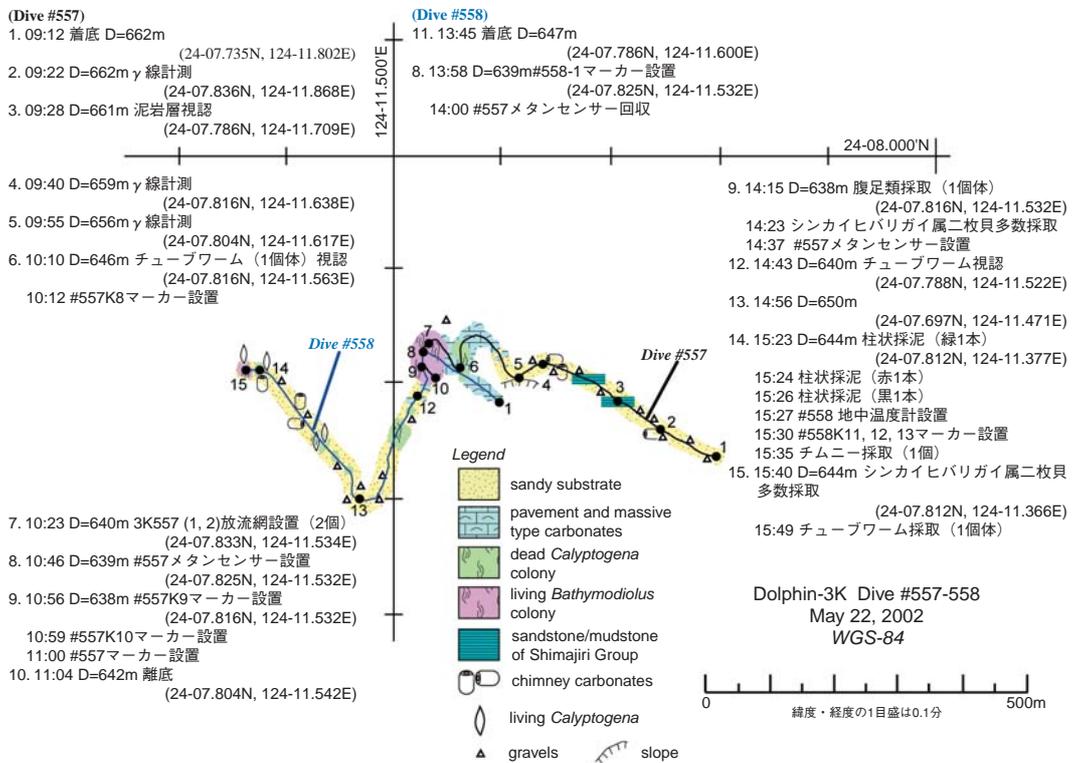


図3 ドルフィン-3K第557~558潜航調査ルートマップ。
Fig. 3 Route map of ROV "Dolphin-3K" 557 and 558 Dives.

直立したチムニーが散在していた。地点5から6に至る間の、炭酸塩岩pavement発達域の凹地(砂底)上にバクテリアマットが一部認められた(割れ目に沿うものも観察される)。また地点6においてチューブワーム1個体の生息が確認された。ガス噴出サイト内の地点8にメタン/CTDプローブの設置を行った(なお、第558潜航にて設置地点を移動した)。なお、着底時にガンマ線計測を行った。

(5) 第558潜航(図3)

海丘頂部のガス噴出サイトより南部を経由して西側に至る測線を設けて実施した。着底地付近より地点8に至る間の、ガス噴出サイトの南東縁辺には亀甲状割れ目の発達する炭酸塩岩pavementが露出する。またこの付近には白色を呈する新期のエンセイシロウリガイ死貝が認められた。地点9にて、第557潜航にて設置したメタン/CTDプローブの再設置を実施した。地点12付近にはエンセイシロウリガイ死貝の密集が認められ、ここにチューブワーム1個体の生息が確認された。ガス噴出サイトの南部(地点13付近)は、細～中礫を含む砂礫底から構成されている。地点14に至る途上に、白色のエンセイシロウリガイ死貝コロニーが分布しており、一部の個体は生きていたことがわかった。地点14・15にはエンセイシロウリガイ死貝を含む小コロニーが散在しており、地点15にはシンカイヒバリガイ属二枚貝が現生していることが確認された。なお、地点14に長期計測用の地中温度計を1台設置した。

2.2 「しんかい2000」調査潜航

NT02-07航海における2潜航(第1363～1364潜航)では、黒島海丘頂部のガス噴出サイトを中心とした東西での試料採取ならびに観察を主目的とした調査を、NT02-08航海における4潜航(第1365～1368潜航)においてはCAT meterや地中温度計等の長期計測機器の設置を主目的とした調査をそれぞれ実施した。

(1) 第1363潜航(図4)

着底地付近(地点1)は砂質底でありエンセイシロウリガイ死貝が多数認められた。ここから北西への緩い上り斜面となっており、死貝に混じって長さ10～20cm程度の脆いチムニー破片が含まれている(地点2)。地点2から3にかけては泥質な底質であり、ノジュール状炭酸塩岩が認められた。また、チムニーの破片が増加する一方でエンセイシロウリガイの破片は少なくなる。地点3から4においてはpavement状炭酸塩岩が露出する。厚さは30～50cm程度で、固結していない海底とは段差をつくり斜面に突き出したノッチ状の地形を形成する。また、地形的な下位には、最大数m規模の不定形岩塊(塊状炭酸塩岩)が多数分布する。頂部のガス噴出サイトでは、pavement状炭酸塩岩上にシンカイヒバリガイ属二枚貝の群集が発達している。地点4・5にて保圧採水、真空採水等の試料採取を実施した。

ガス噴出サイト西方の地点6に至る間では、砂質底になりエンセイシロウリガイ死貝が認められるようになる。また大型の炭酸塩岩チムニーの転倒した破片や塊状炭酸塩岩が視認される。地点7・8付近には直立した大型チムニーが分布

しており、白色を呈するエンセイシロウリガイ死貝のコロニーが散在する(一部に生貝も認められた)。地点9に至る間はシルト質底で、チムニー破片やエンセイシロウリガイ死貝が散在する産状である。地点9付近にはエンセイシロウリガイコロニー(生貝を含む)が認められるとともに、白～青灰色の変色域(バクテリアマット)が分布する。バクテリアマットは3ヶ所に認められ、全体の大きさはいずれも1×2m程度である。クマデにより10～20cm掘り込むとガスバブルが複数立ち上る。

地点10までは緩い上り斜面となっており、大型チムニーの破片や直立したものが分布し、次第に塊状炭酸塩岩が多くなる傾向がある。地点11に至る間は、大小の岩塊からなる炭酸塩岩礫が分布し、次第にエンセイシロウリガイ死貝の散在する海底になる。

(2) 第1364潜航(図4)

地点1から2にかけては、礫を含む砂質底から構成される。着底地(地点4)はpavement状炭酸塩岩が露出しており、そこに発達する割れ目を埋めるようにしてシンカイヒバリガイ属二枚貝からなるコロニーが直線状に発達しているのが観察される。シンカイヒバリガイコロニーからはバブルの発生が認められたが、潜水船の着底等の刺激に呼応して間欠的に発生するようである。この付近にて採ガス・保圧採水等の試料採取を実施した。

ガス噴出サイト西方の地点6付近にはエンセイシロウリガイ死貝が密集する産状が、また地点7付近には新期と推定される白色を呈するエンセイシロウリガイ死貝コロニーが分布する。途中の地点7・8・10において地中温度計測を実施した。地点11付近にはバクテリアマットが所々に視認された。地点14においてクマデによる採泥およびハナシガイ科二枚貝の採集を実施した。その後地点12に戻り、エンセイシロウリガイ死貝コロニーで柱状採泥や保圧採水を行った。

(3) 第1365潜航(図5)

着底地付近の、頂部のガス噴出サイト東縁～麓部分における目視観察の結果、カメラ映像から予想されるより斜面勾配があることがわかり、付近は厚い(約50～80cm)pavement炭酸塩岩が露出している(地点1～3)。それらは全般に亀甲上割れ目が発達しており、割れ目に沿ってシンカイヒバリガイコロニーが認められる(所々でガスバブルの噴出が認められた)。砂質底の露出域は少なく、産状としては比較的固くしまった底質であり、新期と推定される白色を呈するエンセイシロウリガイ殻片が散在している。ガス噴出サイトに群生するシンカイヒバリガイコロニー内に位置する、「ドルフィン-3K」第558潜航で設置したメタン/CTDプローブの地点に、ビデオカメラシステムを設置し、メタン/CTDプローブを回収した(地点4)。

メタン湧水サイト南西縁～西方では、炭酸塩岩角礫(チムニー片・ノジュール片など)やエンセイシロウリガイ死貝が頻繁に認められる。全体的に凹地様の地形的特徴を示す地点6では、新期の白色を呈するエンセイシロウリガイ死貝コロニー(規模は数10cm～2m程度)が散在しており、まれではあるものの10個体以上の生貝が生息している箇所も認められた。地点7において、「ドルフィン-3K」第558潜航で設置した地中温度計を回収した。本地点には白色を呈するエンセイ

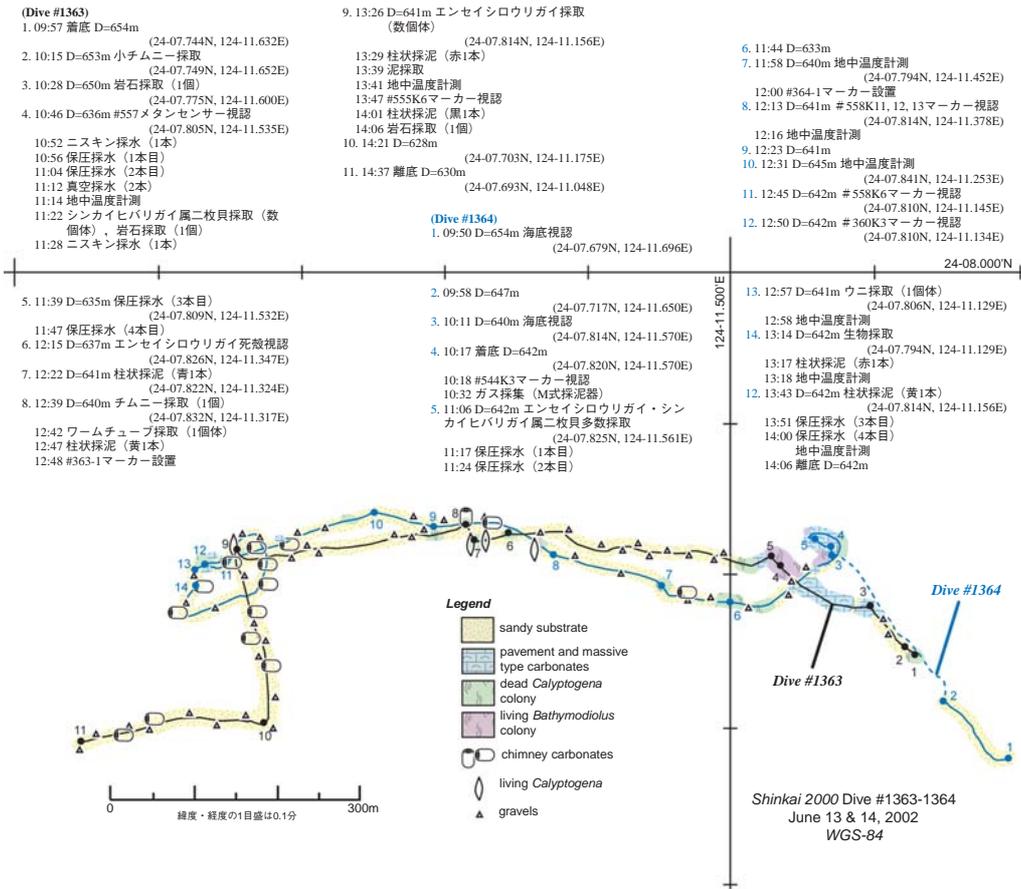


図4 「しんかい2000」第1363~1364潜航調査ルートマップ。
 Fig. 4 Route map of "Shinkai 2000" 1363 and 1364 Dives.

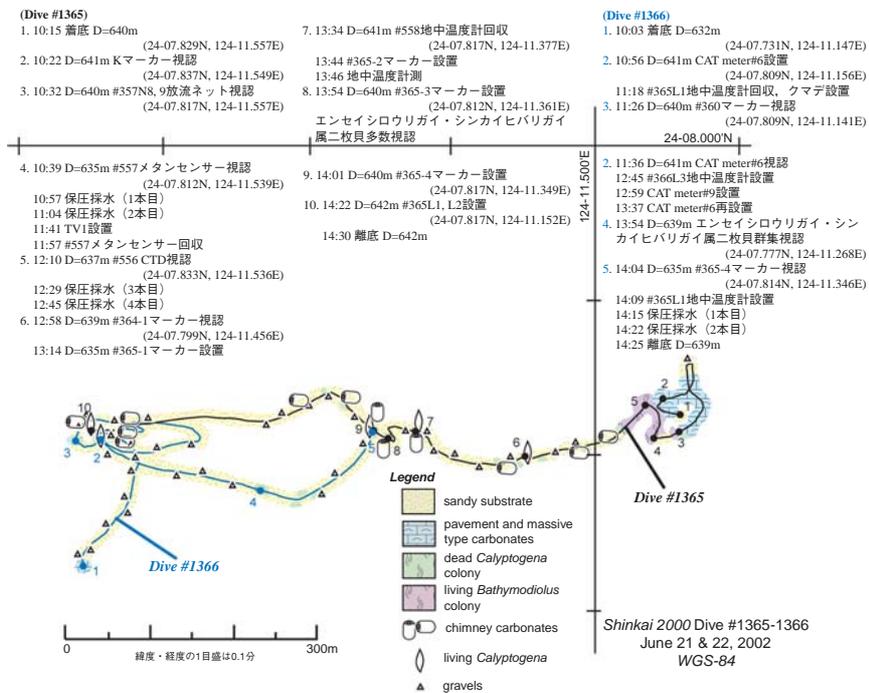


図5 「しんかい2000」第1365~1366潜航調査ルートマップ。
 Fig. 5 Route map of "Shinkai 2000" 1365 and 1366 Dives.

シロウリガイ死貝コロニーが分布する。地点8では、生貝を含むエンセイシロウリガイコロニー、シカイヒバリガイ属二枚貝、ならびにバクテリアマットが認められる。また本地点において、弱いものの複数箇所にてガス噴出が認められた。本地点の西側(地点9)にも、同様な構成生物からなるコロニーが分布する。

地点9より10に至るルートでは、固くしまった砂質底が分布しており、チムニー型炭酸塩岩をはじめとする、塊状・ノジュール状等の炭酸塩岩角礫が所々に密集する産状で産出する。地点10付近には、エンセイシロウリガイ死貝コロニーが散在しており、付近にはバクテリアマットも認められている。

(4) 第1366潜航(図5)

着底点付近(地点1)はpavement炭酸塩岩が分布しており、大小の炭酸塩岩礫も認められる。これらは地点2に至る間に次第に減少する。なお、着底時(水深632m)の流向流速は230度、0.4ノットであった。地点2付近は砂泥で覆われた直径数10mの凹地上の地形を呈しており、その中にパッチ状のエンセイシロウリガイコロニー(ほとんどは死貝であるが生貝も数個体認められる)が散在する。CAT meter #6をそのエンセイシロウリガイコロニー傍のやや傾斜した平坦面(砂泥)上に設置し、その北西(320度方向)約8mの小さな白色変色域(バクテリアマット)にCAT meter #9および地中温度計を設置した。地点3付近には塊状炭酸塩岩やエンセイシロウリガイ死貝コロニーが認められる。またこの北方には径数10mのポックマーク様凹地形が存在する。

地点2から5にかけては比較的硬くしまった砂礫底であり、所々に炭酸塩岩チムニーが散在する。地点4付近には、径数mのエンセイシロウリガイ死貝コロニーが認められた。この内部には生きているシカイヒバリガイ属二枚貝の小コロニー

も存在する。地点5には、エンセイシロウリガイ(ほとんどが死貝であるが、生貝も数個体含む)およびシカイヒバリガイ属二枚貝(生貝多数)からなるコロニーが分布する。このコロニー内および近傍よりガスバブルの噴出が確認された。本地点にて保圧採水2本を行った。

(5) 第1367潜航(図6)

着底地付近は固くしまった砂礫底より構成されている。地点2南東付近にはチムニー片等の炭酸塩岩礫が散在する。地点2にはエンセイシロウリガイ・バクテリアマット小コロニーが分布しており、このバクテリアマット上(径10~30cm)にCAT meter #7・地中温度計を設置した。

地点2より地点4に向かうルートは、固くしまった砂礫底から構成されている。地点3付近~東方には、白色を呈する新期のエンセイシロウリガイ死貝が散在しており、一部には生きているものも認められた。このような産状は地点4まで連続的に観察される。地点4には、シカイヒバリガイコロニー(エンセイシロウリガイ含む)が分布しており、縁辺部にバクテリアマットが発達する。コロニー内には腹足類やチューブワームが認められた。このコロニー内にCAT meter #23・地中温度計を設置した。この地点より50m東方付近にはエンセイシロウリガイ死貝コロニーが認められた。

地点5に向かうルート上では、特にメタンガス噴出サイトに近づくにつれ炭酸塩岩礫が多数認められるようになる。ガス噴出サイト縁辺部にはpavement型炭酸塩岩の発達があり、シカイヒバリガイ類の死貝が多数認められる。地点5において第1365潜航で設置したビデオカメラシステムを回収した。

ガス噴出サイト東方にはpavement型炭酸塩岩が良好に発達する。地点7付近において、褐色~黒色を呈する古期のエンセイシロウリガイ死貝コロニーが観察された(この南50m付

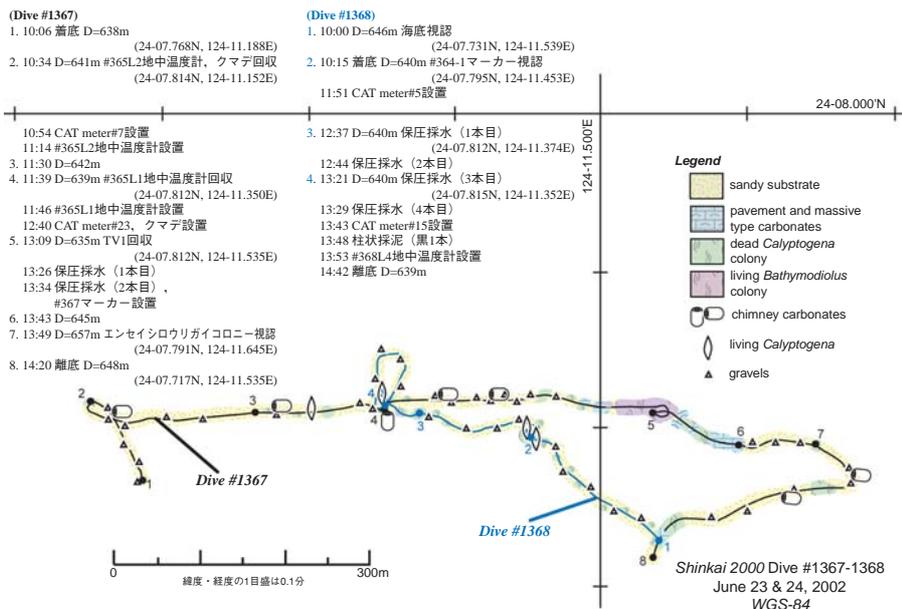


図6 「しんかい2000」第1367~1368潜航調査ルートマップ。

Fig. 6 Route map of "Shinkai 2000" 1367 and 1368 Dives.

近においても古期のエンセイシロウリガイ死貝密集が確認される)。この東方における底質は礫質な砂底であった。地点8の北東50m付近には緩やかな凹地が認められ、その底部には新期の白色を呈するエンセイシロウリガイ死貝コロニーが観察される。周縁部にはややステップ状の地形(岩塊状炭酸塩岩・pavement型炭酸塩岩や礫が散在)があり、褐色～黒色を呈するエンセイシロウリガイ死貝が密集している。

(6) 第1368潜航(図6)

地点1における海底視認以降、地点2に至る部分は、砂質底から構成されており、褐色～黒色を呈する古期のエンセイシロウリガイ死貝が散在する。また部分的に礫が散在する産状が観察された。地点2内の、マーカー364-1付近には新期の白色を呈するエンセイシロウリガイ死貝コロニーが存在する(底質は砂質泥～砂)。このコロニー内には腹足類が頻繁に認められたが、エンセイシロウリガイのほとんどは死貝であった。同一地点内の西部(マーカー365-1)付近のコロニーに生きたエンセイシロウリガイが10個体弱認められており、本地点にCAT meter #5を設置した。なお、本地点においてシンカイヒバリガイ属二枚貝2個体を視認した。

地点3に至る海底面は堅くしまった砂質底より構成されており、細～中礫が散在する。本地点のマーカー365-2付近にはシンカイヒバリガイ属二枚貝の小コロニーが認められる。本コロニー内には、新期の白色を呈するエンセイシロウリガイ死貝も産する。またわずかではあるが、2ヶ所より継続的なガスバブルが観察された。地点4に至る間のマーカー365-

3付近には、シンカイヒバリガイ属二枚貝生貝が密集する小コロニー(新期のエンセイシロウリガイ死貝を含む)が散在している。地点4(CAT meter #23設置点)にはシンカイヒバリガイコロニー(エンセイシロウリガイ含む)が分布しており、縁辺部にはバクテリアマットが発達する。このマット上にCAT meter #15ならびに地中温度計1台を設置した。しかしながらCAT meter #15については、潮流の影響により反対側の設置状況を確認することができなかった。

3. 海底長期計測概要および考察

3.1 ガス噴出サイト西方における冷湧水現象

今回の一連の調査により、ガス噴出サイト西方の冷湧水諸現象が次第に明らかになりつつある。今回CAT meter等の長期計測機器を設置した3地点(サイトA, サイトB, サイトC)には、現在も生きているエンセイシロウリガイやシンカイヒバリガイ属二枚貝、ならびにバクテリアマットが発見された(図7)。

サイトA:ガス噴出サイト西方約140m付近。全体的に凹地様の地形的特徴を示す。白色を呈する新期のエンセイシロウリガイ死貝コロニー(規模は数10cm～2m程度)が数10mの範囲に散在しており、まれではあるが10個体以上の生貝が生息している箇所も認められる(バクテリアマットも散見される)。また、シンカイヒバリガイ属二枚貝の生貝もわずかではあるが認められ、継続的ではないがガスバブルも観察された。

サイトB:ガス噴出サイト西方約300m付近。現在も生きているエンセイシロウリガイ、シンカイヒバリガイ属二枚貝、なら

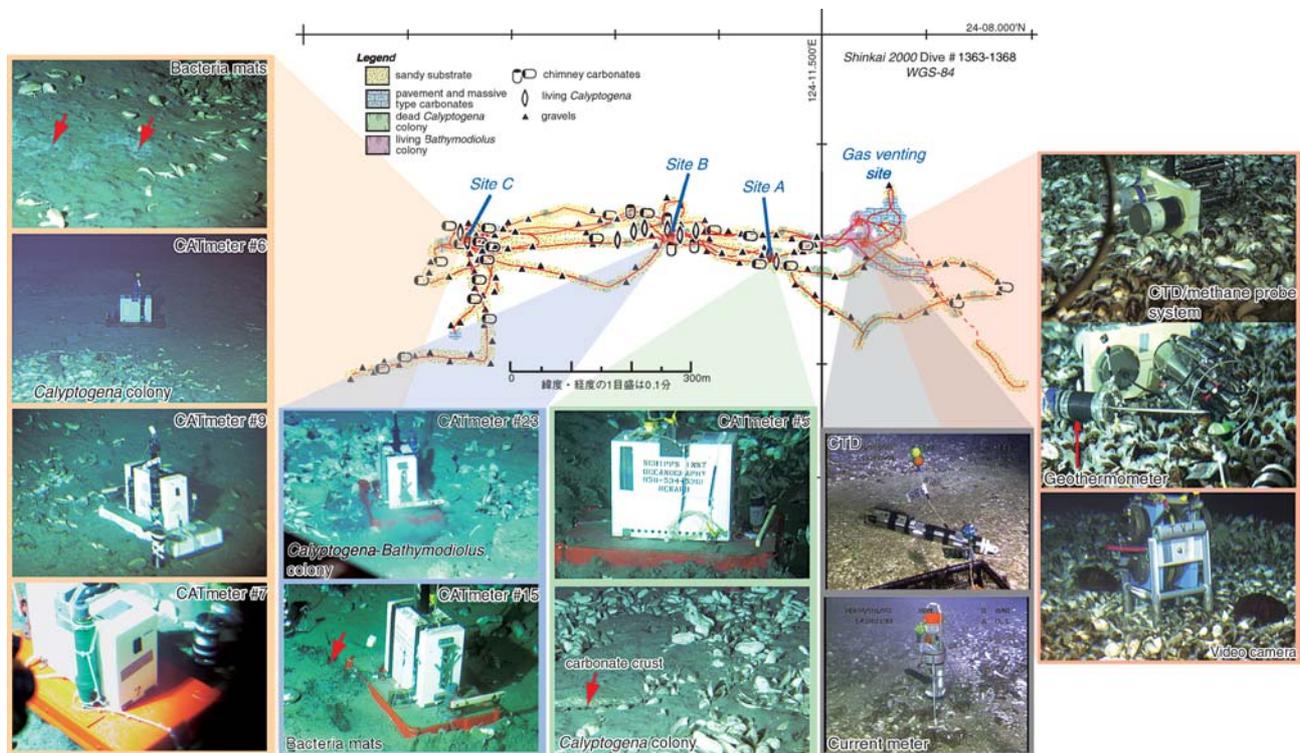


図7 海底長期計測機器設置地点および概況。

Fig. 7 Route map and photographs of the installation point of each long-term monitoring system.

びにバクテリアマット(縁辺部)からコロニー(2~3m規模)が構成されている。また、弱いものの複数箇所にガス噴出が認められた。このサイトB付近にはしばしば生きているコロニー群が分布する。本サイトの西側にも、同様な構成生物からなるコロニーが分布する。また東側の2ヶ所においてシンカイヒバリガイ属二枚貝の小コロニーの存在が確認された。このうち1ヶ所では、わずかではあるが2地点より継続的なガスバブルが観察された。

サイトC:ガス噴出サイト西方約650m付近。本サイトは径数10mの凹地上の地形を呈しており、その中にパッチ状のエンセイシロウリガイコロニー(生貝を含む)が散在する。また、白~青灰色の変色域(バクテリアマット)が分布する。このバクテリアマットは3ヶ所に認められ、全体の大きさが1×2m程度に達するものもある。また採泥の際にガスバブルの噴出が視認されている。

上記のサイトはほぼ東西に直線状に分布しており、町山ほか(2001a, 2001b)等でこれまでに指摘されてきているように、東西方向に延びる断層等の構造線を想定するのが最も妥当と考えられる。この推定はROVや潜水船によるガンマ線測定によっても支持される(服部・岡野, 2001)。

上記の新たな発見とは別に、海丘頂部のガス噴出サイトにおいては平成13年度の潜航調査時の観察とはいささか異なる結果を得た。それはガス噴出量の相異である。平成13年5月における観察では、離れた位置から見渡す範囲7~8mで5~6本のガス噴出(バブル)を確認できたが、今回の「ドルフィン-3K」ならびに「しんかい2000」の調査時においては5~6mも離れると判然としない程度に減少している。年々低下しつつあるのか、それとも一時的な現象なのかは現時点では不明である。今後繰り返し観察する必要がある。

3.2 海底長期計測機器設置概要

海底下における流体の挙動を把握する上で、その境界条件として、海底面を介して出入りする流体の流量およびその分布を把握することが必要である。しかしながら、従来は断層などの地形的な特徴やエンセイシロウリガイなどの化学合成生物群集の存在などを基に、定性的な議論はなされているものの、時間的な変化を含めた流量の直接計測による定量的な把握は非常に少ない。また湧水流量を測定する流量計がいくつか開発されているが、流量の測定レンジが狭い、あるいは流量計が有する与圧により流れが流量計を避けて通り、正確な流量が計測できない等の欠点があった。Brownらにより開発されたCAT meter (Chemical and Aqueous Transport meter) と呼称される流量計は、これらの欠点に対処しつつ数ヶ月~1年にわたる長期計測を可能とするものである(Tryon et al., 2001; 図7)。既にアメリカ西海岸沖Cascadia MarginのHydrate Ridgeにおける計測実験が試みられており(Tryon et al., 1999; Tryon and Brown, 2001)、数10m四方の中でも湧水量の空間分布に顕著な不均質が存在し、冷湧水の指標とみなされるエンセイシロウリガイコロニーでは流量が比較的小さく、場合によっては逆に海水を吸入する事もある一方で、それに隣接したバクテリアマット域

で大きくなる傾向がある事などが明らかにされている。

本調査では、黒島海丘頂部における冷湧水の湧水量・組成の長期変動を把握する目的で、メタンガス噴出サイト西方の3地点(サイトA, サイトB, サイトC)に位置する各コロニーに、以下の通り、計6台のCAT meterと4台の地中温度計を設置した(図7)。

- ・サイトA(エンセイシロウリガイ小コロニー)・・・CAT #5 (エンセイシロウリガイコロニー上)
- ・サイトB(エンセイシロウリガイ・シンカイヒバリガイ属二枚貝・バクテリアマット小コロニー)・・・CAT #23+地中温度計(エンセイシロウリガイコロニー上), CAT #15+地中温度計(バクテリアマット上)
- ・サイトC(エンセイシロウリガイ・バクテリアマット小コロニー)・・・CAT #6(バックグラウンド:通常の砂質底), CAT #9+地中温度計(バクテリアマット上), CAT #7+地中温度計(バクテリアマット上)

メタンガス噴出サイトに設置した流向流速計ならびにCTDの観測とあわせ、半年にわたる長期計測を実施している。これらにより、推定される構造線(断層)沿いにおける湧水量・組成の不均質性、および同一地点内(サイトC)でのバクテリアマット間の比較、2地点間の相違(サイトB-Cでのバクテリアマット, サイトA-Bでのエンセイシロウリガイコロニー)が出るものと期待される。

なお、平成14年12月に「ハイバードルフィン」(母船「かいよう」)を用いて設置機器の回収を試みたが、ケーブルの不調により潜航中止を余儀なくされ、本稿執筆時点において、CAT meter 2台と流向流速計が未回収となっている。

3.3 海底環境の短期計測概要

(1) 地中温度計測

本調査潜航時に、数地点において地中温度計測を実施している。以下にその結果のいくつかを示す。

「ドルフィン3K」第554~555潜航において、以下の6地点で地中温度計測を行った。

第554潜航	09:22:50 24-07.849N, 124-12.068E, 686m
	09:48:40 24-07.836N, 124-11.868E, 667m
	10:05:10 24-07.823N, 124-11.763E, 668m
	10:35:30 24-07.823N, 124-11.660E, 660m
第555潜航	15:08:30 24-07.812N, 124-11.377E, 644m
	15:29:50 24-07.816N, 124-11.154E, 646m

サンプリング間隔は10秒、各地点での計測時間は5分以上とした。各サーミスタ間のオフセット補正には、上記2潜航間で海底面上に設置されて海水温を計測していた時間(12:20~13:00)の平均温度差を用いた。全記録を図8Aに示す。いずれの計測地点でも海底下の温度が水温より低い結果となった。これは海底直上の水温変動が大きいことを示している。航走中の水温を見ても、第554潜航での着底直後の9:15頃には6.5°C程度であったのが時間と共に上昇し、11時頃には約8°Cとなり1.5°C程度の変化を示している。すなわち、潜航前の一定時間に水温が6.5°C程度の相対的に低い状態にあり海底面下もそれに近い温度で平衡状態に

あったが、潜航後に水温が上昇し、これに伴って熱伝導により海底面の浅い方から徐々に温度が上昇したものと推測される。図8Bにサーミスタ深度と温度との関係を示す。着底直後の計測では正の温度勾配を有しているが、計測時刻が遅いものは負の温度勾配となっており、海水温の上昇が時間と共に海底下に伝達されていることがわかる。

図9Aに「しんかい2000」第1364潜航における結果を示す。計測値の全体的な傾向は、「ドルフィン3K」での調査時と同様、水温変動の影響を強く受けた結果となった。以上のことから、地中温度計で検出可能な地温勾配が水温変動に比べて小さいことがわかる。このため、水温変動を除去する目的で、以下の地点にて1ヶ月にわたる計測を実施した(図9B)。

第558潜航 15:27 24-07.812N, 124-11.377E, 644m

本温度計は、水温変動を除去する目的でサンプリング間隔を5分とした。暫定値として、全期間(1ヶ月)を通しての平均値から得られた温度勾配は良い線型性が得られたものの、約-0.3°C/mと負の温度勾配(海底下の方が“冷たい”)を

示している。なお、この結果は計測期間後半の温度差にして1°C近くの比較的大きな長周期の水温上昇の影響は考慮していない。またCAT meterとともに地中温度計を4点に設置しており、上記の結果と併せて温度勾配ならびに本調査地域の温度構造を今後検討する予定である。

(2) メタン濃度計測

メタン濃度の連続モニタリングを目的とした測器による計測をガス噴出サイト内のバブル噴出口近傍に設置し(設置位置:24-07.816N, 124-11.532E;水深:638m),約10日間にわたる計測を実施した。システムは、SST社(Sea & Sun Technology GmbH)のCTD110Mをベースに、圧力センサー(Paroscientific社製8BT2000-I)およびメタンセンサー2台(CAPSUM社製:CAPSUM Technologie GmbH;測定レンジ:10nmol~4 μmol, 1 μmol~100 μmol)を取り付け、外部供給電源としてリチウム電池(13.5V, 90Ah)を使用した。

着底後ガス噴出サイトに近づくにつれ、高感度メタンセンサーは検出値が大きく上昇しており検出限界の上限に至っ

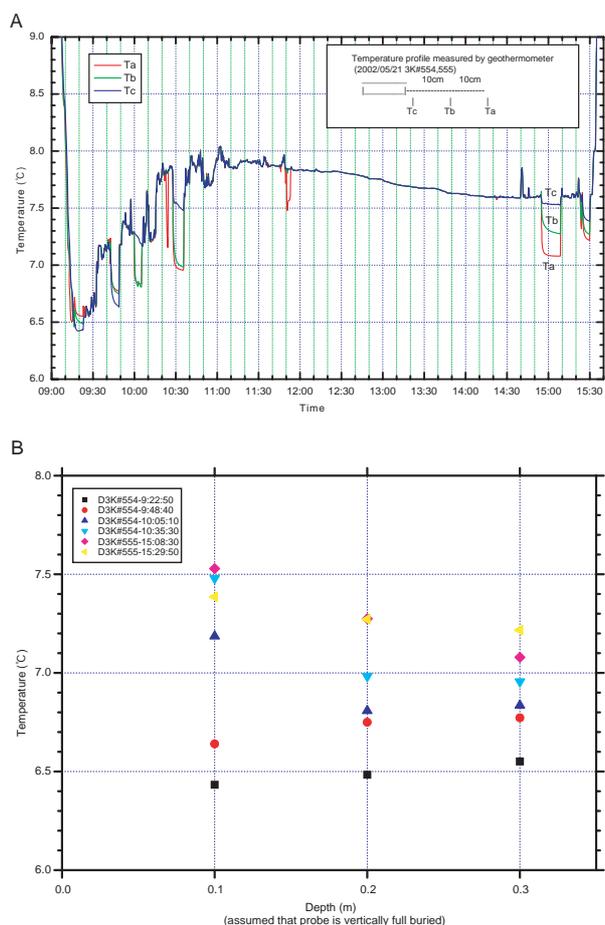


図8 「ドルフィン3K」第554・555潜航における地中温度計測結果。A. 地中温度計記録。B. 地中温度計測結果の海底下深度-温度関係。

Fig. 8 Result of heat flow measurement in "Dolphin-3K" 554 and 555 dives. A. Geothermometer record. B. temperature-depth profile.

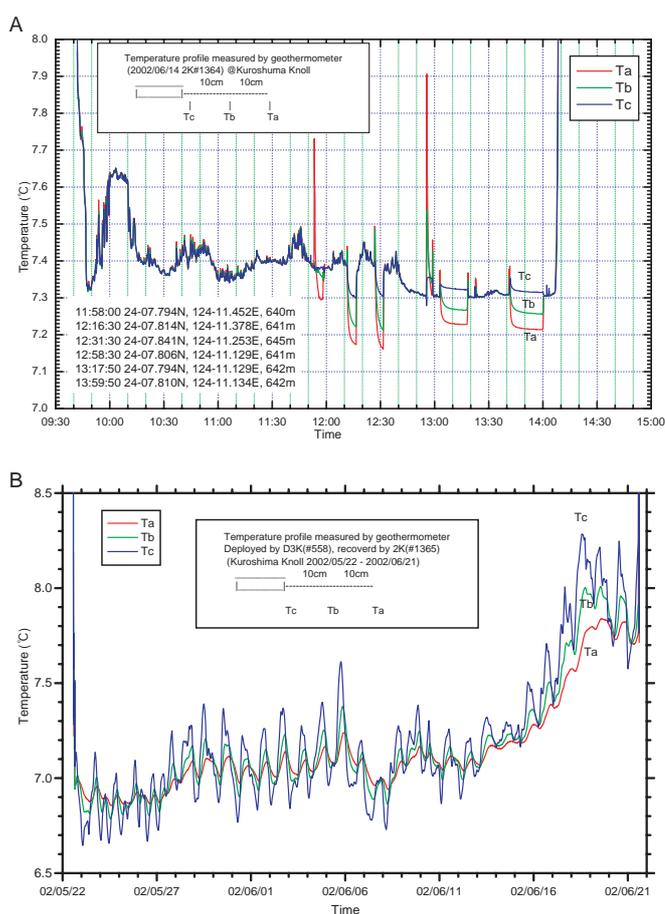


図9 「しんかい2000」第1364潜航と1ヶ月間の地中温度計測結果。A. 第1364潜航時における地中温度計記録。B. 1ヶ月間の長期計測結果。

Fig. 9 Result of heat flow measurement in "Shinkai 2000" 1364 dive and one month monitoring. A. Geothermometer record in 1364 dive. B. one month profile.

たとえられる。一方、低感度センサーは設置直後に検出値が急増しているが、ピーク値 $26 \mu\text{mol/l}$ の後漸減しており、検出範囲内に治まっている。第558潜航で移設後(14時過ぎ) $12 \mu\text{mol/l}$ の値をとり、その後17時過ぎになって急増し検出限界の上限 $100 \mu\text{mol/l}$ を越えている(図10A)。高感度メタンセンサーは、移設後も検出限界を超えた飽和状態にあり正常に動作していないと考えられる。低感度メタンセンサーについては、設置から上限値を上回るまでに3時間程度を要しており、常にメタン濃度が上限値を上回る高濃度の状態ではなく、ある程度の濃度の時間変化があったと考えてもおかしくはない。この仮定の上に、電気伝導度との関係として以下の説明が可能かもしれない。

電気伝導度は水温変化に追従して変動するが、海底設置中の水温変化($6\sim 8^\circ\text{C}$)の範囲ではほぼ線型に変化する。この対応から、電気伝導度変動のうち水温変化による変動分を除去するため、水温から電気伝導度を計算し電気伝導度の計測値との差分をとったものを図10Bに示す。前述のメタン濃度変動のうち、後半の3イベントについてはメタン濃度の増加に $30\sim 50$ 分先行して電気伝導度の低下が発生している。また、この電気伝導度の低下は潮汐の下げ止まり時

前後に発生する日周変化となっている。すなわち、潮汐の下げ止まり時、電気伝導度の低い流体が湧出した $30\sim 50$ 分後、メタンが湧出したのかもしれない。一方、これ以前の3つのメタン濃度変化のイベントについては電気伝導度の変動が伴っていない。設置後の擾乱によるものか、潮汐もしくは他の環境要因に依存するものか検討を要する。いずれにしても当海域のメタン湧出ダイナミクスを解明する上で極めて重要な現象である。

(3) 映像観測

海丘頂部のガス噴出サイトにおいて、ROVや潜水船により連続的なガス噴出が認められている噴出孔について、2日間にわたるビデオ映像観察試験を行った。これは30分間隔で30秒間の撮影を実施したものである。その結果、連続的と考えられていたメタンガス噴出が断続的であることがわかった。潮汐変動との関連の可能性もあり、現在検討を行っている(機会を改めて報告の予定である)。

4. おわりに

本報告は、平成14年度に実施された「しんかい2000」による調査航海のクルーズレポートを基に作成したものである。

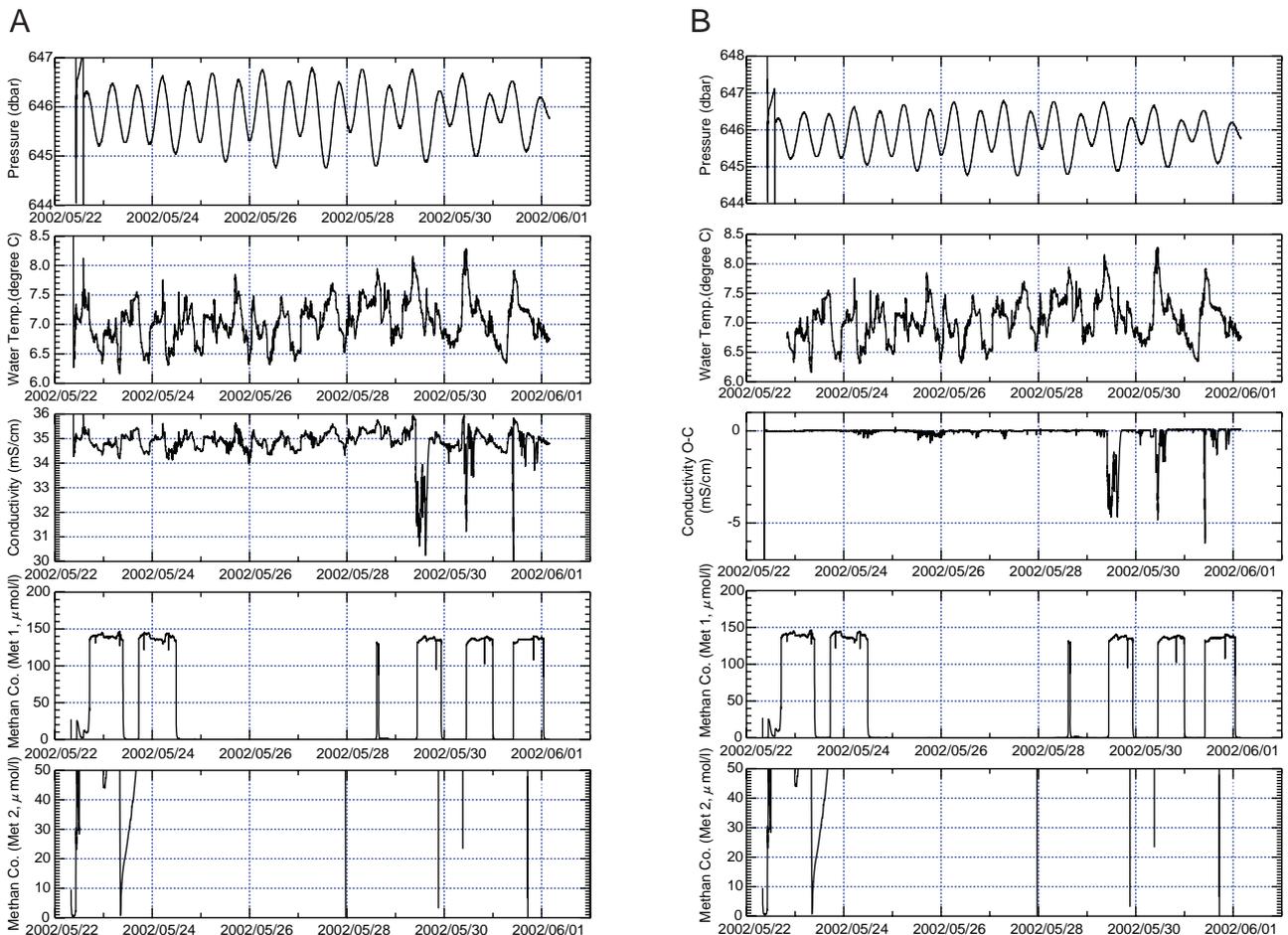


図10 メタン/CTDプローブによる10日間の計測結果。

Fig.10 Result of 10 days measurement by methane/CTD probe system.

黒島海丘の生物学的調査は別途報告される(藤倉ほか, 2003: 本号掲載)。本調査航海で得られた各成果については, 専門の雑誌や学会等に順次報告される予定であるが, 一部については既に学会やシンポジウム等で発表がなされている。

謝辞

本調査航海を実施するにあたり, 依田司令・柴田司令をはじめとする「ドルフィン3K」ならびに「しんかい2000」運航チームの皆様, 母船「なつしま」の斎藤船長以下乗組員の皆様には, 調査行動全般にわたってご尽力を賜った。また, 本航海は関係各位のご支援なくしてはなしえなかった。研究者一同ここに記して謝意を表する次第である。

引用文献

- 1) 藤倉克則・青木美澄・藤原義弘・一林信亮・今村牧子・石橋純一郎・岩瀬良一・加藤憲二・小坂紋子・町山栄章・三宅裕志・宮崎淳一・溝田智俊・森本祐介・長沼毅・中山典子・岡本和洋・大越健嗣・大越和加・奥谷喬司・佐藤知子・Laszlo G. Toth・土田真二・角皆 潤・若松弥記・渡部裕美・山中寿朗・山本啓之, 「しんかい2000システム」による南西諸島海域鳩間海丘・黒島海丘の化学合成生態系調査(生物・地球化学統合調査), JAMSTEC深海研究, 22, (2003).
- 2) 服部陸男・岡野真治, “海洋放射線測定最近の成果”, JAMSTEC深海研究, 18, 1-13 (2001).
- 3) Kennet, J.P., Cannariato, K.G., Hendy, I.L., and Behl, R.J., Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials, *Science*, 288, 128-133 (2000).
- 4) 町山栄章・新城竜一・服部陸男・岡野真治・松本 剛・木村政昭・中村 衛・當山元進・岡田卓也, “Dolphin-3K南沖繩トラフ・黒島海丘潜航調査(NT00-05航海)の概要”, JAMSTEC深海研究, 18, 15-30 (2001a).
- 5) 町山栄章・松本 剛・松本 良・服部陸男・岡野真治・岩瀬良一・戸丸 仁, しんかい2000黒島海丘潜航調査(NT01-05 Leg 1航海)の概要。JAMSTEC深海研究, 19, 45-60 (2001b).
- 6) 松本 良, 炭酸塩の $\delta^{13}\text{C}$ 異常の要因と新しいパラダイム「ガスハイドレート仮説」, 地質学雑誌, 101, 902-924 (1995).
- 7) 松本 剛・木村政昭・西田史朗・中村俊夫・小野朋典, “八重山南岸沖の黒島海丘で発見された化学合成生物群集と海底表面の破碎について(NT97-14次航海)”, JAMSTEC深海研究, 14, 477-491 (1999).
- 8) 松本 剛・上地千春・木村政昭, “南西諸島宮古・八重山沖海域精密調査より求められた1771八重山地震津波波源での変動現象”, JAMSTEC深海研究, 13, 535-561 (1997).
- 9) 新城竜一・町山栄章・牧 陽之助・本山 功・當山元進・外窪周子・鍾 孫霖, 沖繩トラフ西端部と黒島海丘での潜航調査概要—「しんかい2000」NT00-06 Leg 1航海—, JAMSTEC深海研究, 19, 109-121(2001).
- 10) 武内里香・町山栄章・松本 良, メタンハイドレートの分解に起因する炭酸塩類形成—黒島海丘における冷湧水炭酸塩類を例として—。堆積学研究, 53, 77-80, 2001.
- 11) Takeuchi, R., Machiyama, H., and Matsumoto, R., The formation process of the cold seep carbonates at the Kuroshima Knoll, *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, 19, 61-75 (2001).
- 12) Tryon, M.D. and Brown, K.M., Complex flow pattern through Hydrate Ridge and their impact on seep biota, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2863-2866 (2001).
- 13) Tryon, M. D., Brown, K. M., Dorman, L., and Sauter, A., A new benthic aqueous flux meter for very low to moderate discharge rates, *Deep-Sea Research I*, 48, 2121-2146 (2001).
- 14) Tryon, M. D., Brown, K. M., Torres, M. E., Trehu, A. M., McManus, J., and Collier, R. W., Measurements of transience and downward fluid flow near episodic methane gas vents, Hydrate Ridge, Cascadia, *Geology*, 27, 1075-1078 (1999).

(原稿受理:平成15年1月20日)