

「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)

○藤倉 克則*¹ 青木 美澄*² 藤原 義弘*¹ 一林 信亮*³ 今村 牧子*² 石橋純一郎*⁴
岩瀬 良一*¹ 加藤 憲二*⁵ 小坂 紋子*³ 町山 栄章*¹ 三宅 裕志*¹ 宮崎 淳一*⁶
溝田 智俊*⁷ 森本 祐介*⁴ 長沼 毅*⁸ 中山 典子*³ 岡本 和洋*⁴ 大越 健嗣*⁹
大越 和加*¹⁰ 奥谷 喬司*¹ 佐藤 知子*⁹ Laszlo G. Toth*¹¹ 土田 真二*¹
角皆 潤*³ 若松 弥記*⁹ 渡部 裕美*¹² 山中 寿朗*⁴ 山本 啓之*¹

2001年に引き続き、南西諸島海域の化学合成生態系において、生態系を構成する生物群集構造を定量的に把握すること、生物群集をとりまく化学環境を定量的に把握することを目的に、「しんかい2000」システムによる潜航調査を実施した。2002年の調査は、沖縄トラフの鳩間海丘と第四与那国海丘の熱水生態系、八重山諸島沖にある黒島海丘のメタン湧水生態系を対象に実施予定であった。しかしながら、表層の潮流が早く、第四与那国海丘の潜航は実施できなかった。本報告では、2002年に実施した鳩間海丘と黒島海丘における調査航海の概略について述べる。

キーワード：化学合成生態系，熱水噴出，メタン湧水，黒島海丘，鳩間海丘，底生動物，地球化学，バクテリア

-
- * 1 海洋科学技術センター
 - * 2 日本海洋事業
 - * 3 北海道大学
 - * 4 九州大学
 - * 5 静岡大学
 - * 6 筑波大学
 - * 7 岩手大学
 - * 8 広島大学
 - * 9 石巻専修大学
 - *10 東北大学
 - *11 Balaton Limnological Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences
 - *12 東京大学海洋研究所
 - *13 Japan Marine Science and Technology Center
 - *14 Nippon Marine Enterprises, Ltd.
 - *15 Hokkaido University
 - *16 Kyushu University
 - *17 Shizuoka University
 - *18 University of Tsukuba
 - *19 Iwate University
 - *20 Hiroshima University
 - *21 Ishinomaki Senshu University
 - *22 Tohoku University
 - *23 ORI, University of Tokyo

Report on investigation of vent and methane seep ecosystems by the crewed submersible 'Shinkai 2000' and the ROV 'Dolphin 3K' on the Hatoma and the Kuroshima Knolls, the Nansei-shoto area

Katsunori FUJIKURA*¹³ Misumi AOKI*¹⁴ Yoshihiro FUJIWARA*¹³ Shinsuke ICHIBAYASHI*¹⁵
Makiko IMAMURA*¹⁴ Jun-ichiro ISHIBASHI*¹⁶ Ryoichi IWASE*¹³ Kenji KATO*¹⁷
Ayako KOSAKA*¹⁵ Hideaki MACHIYAMA*¹³ Hiroshi MIYAKE*¹³ Jun-ichi MIYAZAKI*¹⁸
Chitoshi MIZOTA*¹⁹ Yusuke MORIMOTO*¹⁶ Takeshi NAGANUMA*²⁰ Noriko NAKAYAMA*¹⁵
Kazuhiro OKAMOTO*¹⁶ Kenji OKOSHI*²¹ Waka SATO-OKOSHI*²² Takashi OKUTANI*¹³
Tomoko SATOH*²¹ Laszlo G. TOTH*¹¹ Shinji TSUCHIDA*¹³ Mitsuki WAKAMATSU*²¹
Hiromi WATANABE*²³ Toshiro YAMANAKA*¹⁶ Hiroyuki YAMAMOTO*¹³

Since 2001, ecological and geochemical investigations were conducted using the submersible 'Shinkai 2000' and the 'Dolphin 3K' at two hydrothermal vent fields (the Hatoma and the Dai-yon Yonaguni Knolls) and a methane seep field (Kuroshima Knoll) in the Nansei-shoto area. The purpose of this investigation was quantitative estimation for deep-sea chemosynthesis-based ecosystems. To accomplish for this purpose, we have some objectives including;

- 1) geochemical analysis of water at vent communities and vent fluids,
- 2) physical environmental factor analysis at vent communities and vent fluids,
- 3) estimation of energy sources for vent ecosystems,
- 4) biodiversity of vent communities,
- 5) estimation of biomass of vent communities,
- 6) estimation of productivity of vent communities,
- 7) relationships of biomass and productivity between microbial communities and benthic communities,
- 8) embryological study of vent benthic species.

Unfortunately, we could not investigate at the Dai-yon Yonaguni Knoll, because water current was too rapid for submersible diving survey. In this paper, we present an outline of the investigation.

Keywords : chemosynthesis-based ecosystem, hydrothermal vent, methane seep, Kuroshima Knoll, Hatoma Knoll, benthic species, geochemical analysis, bacteria

1. はじめに

化学合成生態系は、地球内部から噴き出す硫化物やメタンをエネルギー源として細菌が生産者となりベントスが消費者となった系である。系内におけるエネルギー・物質移動を通じて、とりわけメガベントスの生物量は20-30kg/m²を越す莫大なものになっている。これまで、化学合成生態系を支える熱水や冷湧水の化学物質濃度と細菌現存量・増殖量の関係(例えばKarl et al., 1980; Baross et al., 1984; Naganuma et al., 1989), 化学物質濃度とメガベントスの現存量の関係については研究例がある(例えばHenry et al., 1992; Hashimoto et al., 1995; Olu et al., 1996; 1997; Sarrazin et al., 1999; Gebruk et al., 2000)。しかしながら、化学合成生態系において一次生産者の生産力と消費者の生産力の相関を統合した研究はない。地球生物圏は光合成と化学合成(地下生物生態系も含む)を基点とした物質循

環系で支えられていることが分かりつつある現状を踏まえ、深海化学合成生態系をモデルとして生態系の物質生産力を評価することは、地球上の生態系の機能を理解する上で有意義である。このような視点から、「化学合成生態系における生物生産力の定量化研究」を提案し、2001, 2002年に「しんかい2000」システムによる調査を実施した。2001年には沖縄トラフの第四与那国海丘および鳩間海丘の潜航調査を実施し、2002年は2001年の成果を踏まえ、得られなかったデータ・サンプルの取得、近傍にある八重山諸島沖の黒島海丘のメタン湧水生態系においても調査研究を実施する予定であったが、第四与那国海丘では表層の潮流が早く潜航できなかった。

本報告では鳩間海丘の熱水生態系、黒島海丘のメタン湧水生態系を対象として、化学物質濃度、生産者の現存量・生産量、消費者の現存量・生産量を定量化し熱水生態系と

冷湧水生態系間で比較することを目的に調査を行った。そして、以下のような課題を主体に調査研究を進めた。

【生態系のエネルギー流に関する研究】

- 化学物質の組成・濃度はどれくらいか
- 生態系のエネルギー源となる主な化学物質は何か(メタン/硫化物)
- メタンおよび硫化物の起源はどこか(地球内部/海水/微生物生産)

【生産者に関する研究】

- 浮遊性細菌の現存量・生産量はどれくらいか
- 共生細菌を保有するホストの共生細菌現存量はどれくらいか
- 付着性細菌の現存量・生産量はどれくらいか

【消費者に関する研究】

- シンカイヒバリガイ類の現存量・生産量はどれくらいか。

調査結果は現在解析中のものがほとんどであるため、本報告では潜航調査結果の概略を報告する。

2. 潜航調査

2002年5月21日と22日の2日間に、黒島海丘において「しんかい2000」の事前調査を目的に「ドルフィン-3K」で5回偵察潜航を行った(Table 1)。偵察潜航の妨げにならない範囲で、測定機器の設置、サンプル採集、観察を行った。2002年5月27日から7月1日にかけては、「しんかい2000」を用いて鳩間海丘で9回、黒島海丘で5回の潜航調査を実施した(Table 2)。うち鳩間海丘の2回(第1353・1361潜航)は、深海版「ミラーの実験」に用いるメンブレンフィルターの現場試験(提案者:藤原義弘)が主目的であった。

3. 研究項目と方法

3.1. 生態系のエネルギー流に関する研究

3.1.1. 地質学的背景・化学物質の組成と濃度

鳩間海丘における熱水活動の特徴を明らかにするため、海底地形、露頭の観察と、岩石および熱水性沈殿物試料の

採取を行った。また、黒島海丘のメタン湧水活動と地質背景を解明するため、海底面直下に生成している炭酸塩クラスト、ガス、湧水、堆積物、岩石のサンプリングを行った。コア試料からは還元層の発達状態や間隙水の化学組成および化学合成生物のエネルギー源となる硫化水素やメタンの起源を解析する。

3.1.1.1. 保圧式採水器による試料の採取

湧水域における溶存ガス濃度は一般に高いが、従来のポンプ式採水法やニスキン採水器を用いた採水法ではガス成分が脱け損失している。従来法の問題点を克服し、より高度な時空間的変動の解析を可能にする保圧式採水器を活用した。この装置は、揮発性成分を多量に含んだ海水試料を採取し、あるいは揮発性成分そのものを損失のない試料保圧容器に保存し、回収することができる。採取された試料は全金属製の保圧容器内に海底における条件のまま保持されるため、船上で回収されるまで揮発成分の散逸は起きないようにしている。保圧式採水に加えて、ニスキン採水器を用いたその周辺の海水、堆積物中の間隙水の採取も行った。

試料の同位体比は、真空ライン中で開放し脱ガスさせ、その一部を研究室に持ち帰り連続フロー型質量分析法(Tsunogai et al., 1998)により測定する。この方法により低濃度試料や他成分混合試料の同位体定量が可能になる。

3.1.1.2. 熱水試料の化学分析

熱水試料は各種化学分析に供するが、保存がきかない成分(pH, alk., NH_4 , H_2S , SiO_2)については、ガラス電極を用いてpH、電位差滴定法によってアルカリ度、比色法(蒲生・ギースケス, 1992)によってシリカ、アンモニア濃度を船上で分析した。主成分については、ICP発光分光分析・原子吸光分光分析・イオンクロマトグラフィーなどで分析を行う。

3.1.1.3. 温度計測

保圧式採水器の試料吸入口には白金抵抗測温体のプローブが埋め込まれており、採取する熱水の温度を毎秒測定した。鳩間海丘におけるヘイトウシンカイヒバリガイ成長速

表1 黒島海丘における無人探査機「ドルフィン-3K」の潜航リスト

Table 1 Data relevant to 5 dives by ROV "Dolphin-3K" in the Kuroshima Knoll, the Nansei-shoto area

| Dive No. | Data | Start point | | End point | |
|----------|-----------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| | | Lat. Long. | Depth | Lat. Long. | Depth |
| D3K #554 | 2002.5.21 | 24-07.849'N 124-12.068'E | 686m | 24-07.823'N 124-11.538'E | 642m |
| D3K #555 | 2002.5.21 | 24-07.827'N 124-11.584'E | 642m | 24-07.816'N 124-11.154'E | 646m |
| D3K #556 | 2002.5.21 | 24-07.945'N 124-11.564'E | 661m | 24-07.795'N 124-11.538'E | 642m |
| D3K #557 | 2002.5.22 | 24-07.735'N 124-11.802'E | 662m | 24-07.804'N 124-11.542'E | 642m |
| D3K #558 | 2002.5.22 | 24-07.786'N 124-11.600'E | 647m | 24-07.812'N 124-11.366'E | 644m |

表2 鳩間海丘および黒島海丘における「しんかい2000」の潜航リスト

Table 2 Data relevant to 12 dives by "Shinkai 2000" in the Hatoma and Kuroshima Knolls, the Nansei-shoto area

| Dive No. | Date | Scientist | Pilot Co-pilot | Start point | | End point | |
|-----------------|-----------|---------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| | | | | Lat. Long. | Depth | Lat. Long. | Depth |
| Hatoma Knoll | | | | | | | |
| 2K #1352 | 2002.5.27 | Tsuchida, S. | Chiba, Kazu Mitsufuji, K. | 27-47.540'N 126-53.863'E | 1520m | 27-47.406'N 126-53.958'E | 1467m |
| 2K #1353 | 2002.5.28 | Fujiwara, Y. | Ueki, H. Chida, Y. | 24-51.470'N 123-50.395'E | 1523m | 24-51.455'N 123-50.477'E | 1488m |
| 2K #1354 | 2002.5.29 | Kato, K. | Mitsufuji, K. Mizui, Y. | 24-51.470'N 123-50.395'E | 1523m | 24-51.452'N 123-50.479'E | 1470m |
| 2K #1358 | 2002.6.5 | Fujikura, K. | Ueki, H. Chida, Y. | 24-51.495'N 123-50.378'E | 1524m | 24-51.580'N 123-50.389'E | 1492m |
| 2K #1359 | 2002.6.6 | Yamanaka, T. | Chiba, Kazu Mizui, Y. | 24-51.461'N 123-50.405'E | 1522m | 24-51.448'N 123-50.485'E | 1480m |
| 2K #1361 | 2002.6.9 | Fujiwara, Y. | Chiba, Kazu Mizui, Y. | 24-51.453'N 123-50.472'E | 1492m | 24-51.591'N 123-50.388'E | 1472m |
| 2K #1362 | 2002.6.10 | Toth, L. G. | Ueki, H. Chida, Y. | 24-51.547'N 123-50.478'E | 1485m | 24-51.579'N 123-50.404'E | 1512m |
| 2K #1369 | 2002.6.28 | Yamamoto, H. | Chiba, Kazu Chida, Y. | 24-51.534'N 123-50.427'E | 1509m | 24-51.581'N 123-50.427'E | 1515m |
| 2K #1371 | 2002.7.1 | Ishibashi, J. | Matsumoto, K. Chida, Y. | 24-51.574'N 123-50.432'E | 1522m | 24-51.612'N 123-50.369'E | 1456m |
| Kuroshima Knoll | | | | | | | |
| 2K #1355 | 2002.6.1 | Fujikura, K. | Chiba, Kazu Mizui, Y. | 24-07.728'N 124-11.618'E | 652m | 24-07.813'N 124-11.755'E | 648m |
| 2K #1356 | 2002.6.2 | Mizota, C. | Ueki, H. Chida, Y. | 24-07.737'N 124-11.577'E | 645m | 24-07.826'N 124-11.561'E | 636m |
| 2K #1357 | 2002.6.3 | Okoshi, K. | Mitsufuji, K. Chiba, Katsu | 24-07.745'N 124-11.508'E | 644m | 24-07.805'N 124-11.567'E | 640m |
| 2K #1360 | 2002.6.7 | Nakayama, N. | Mitsufuji, K. Chiba, Katsu | 24-07.763'N 124-11.463'E | 642m | 24-07.814'N 124-11.150'E | 640m |
| 2K #1370 | 2002.6.30 | Miyazaki, J. | Ueki, H. Chiba, Katsu | 24-07.813'N 124-11.558'E | 641m | 24-07.816'N 124-11.375'E | 640m |

度測定用放流ネットには自己記録式温度計を一緒に設置して係留中の温度データを計測した。この温度計はアレック電子製MDS MARK5である。データ取得は1分ごとに行った。

3.1.2. 生態系のエネルギー源

化学合成生態系の生産者は細菌である。よって、細菌が利用する化学物質が生態系のエネルギー源となる。そこで細菌の分子系統解析から細菌の特性を推定する。具体的には、シンカイヒバリガイ類やハオリムシ類などの共生細菌や、堆積物中の細菌を対象に、16SリボゾームRNA遺伝子解析、脂肪酸などバイオマーカー解析や安定同位体組成から、細菌が利用する化学物質を推定する。

3.1.3. 食物連鎖

化学合成生態系の環境水において、メタンおよび硫化水素の取り込み過程の分別効果は無いとされているから、硫黄ないし炭素源となる湧水中のメタンと硫化水素の安定硫黄同位体比はそのまま生物体に持ち込まれる。このことを利用して食物連鎖解析を行う。生物試料は、いくつかの主

要な組織に分け、炭素-窒素同位体組成をDELTA plus質量分析計で測定する。硫黄安定同位体の34S/32S比はSIRA 10質量分析計を用いて行う。

ゴエモンコシオリエビ *Shinkaia crosnieri* の腹側剛毛には、糸状バクテリアマットの付着が認められ、それをゴエモンコシオリエビが摂餌している可能性がある。そこで、ゴエモンコシオリエビの胃内容物と腹側剛毛に付着する細菌のDNAを比較し、腹側剛毛に付着する細菌を摂食しているかどうか明らかにする。

3.2. 生産者に関する研究

3.2.1. 浮遊性・付着性細菌の細菌相・現存量・生産量

浮遊性細菌の現存量・細菌相に関しては、ニスキン採水器により熱水域、シンカイヒバリガイ類生息域、コントロール域などから採水した試料を基に、DNA解析、細胞数計数から評価する。生産量は、現場海水をfilter試水とnon-filter試水に分けdiffusion chamberに入れて *in-situ* で培養し両者の差

から推定する(Toth et al., 2000)。付着性細菌の増殖量は、スライドガラスを付着基質にしたトラップを熱水域、シンカイヒバリガイ類生息域に設置し付着する細菌数から評価する。

3.2.2. 共生細菌の細菌相・現存量

シンカイヒバリガイ類やハオリムシ類の共生細菌の組成・現存量を推定するために、脂肪酸やキノンといったバイオマーカー(生物指標性有機化合物)の解析を行う。生物が生産する有機化合物は、その多様性に基づいた生理代謝機能の違いを反映し生産する有機化合物も多様である。特に細胞膜などの膜組織の主要構成成分である脂肪酸は微生物種ごとに明確な違いがあり、バイオマーカーとして有効である。ただし、古細菌は脂肪酸を生産しないため、その膜組織に特徴的であるイソプレノイド炭化水素について分析を行う。キノンについては、最近の研究でキノン量から微生物量の評価に有効であることがわかり(Yamamoto et al., 2002)、本研究でも活用する。共生細菌の細菌相については、生態系のエネルギー源を推定する際に行う遺伝子解析から情報が得られる。

3.3. 消費者に関する研究

3.3.1. メガベントスの現存量・増殖量・動物相に関する研究

メガベントスは、マニピュレータにより直接捕獲またはサクシオンサンプラーを用いて採集した。また、30×30cmの方形枠もしくは50cmのスケールバーを設置し、その枠内の生物を採集もしくは写真撮影し、定量採集として現存量分析に供した。これらのサンプルは、個体数、湿重量、乾燥重量、炭素量の測定に供せられる。

優占的に生息するベントスについて、成長速度の見積もるためにin-situでストロンチウムマーキング法による標識放流実験(mark-release-recapture)を実施した。対象としたベントスは、黒島海丘の*Bathymodiolus short-type*と*Bathymodiolus long-type*、鳩間海丘のヘイトウシンカイヒバリガイ*Bathymodiolus platifrons*とした。標識放流実験は、現場より採取した実験個体の貝殻にストロンチウムでマーキングし、その個体を現場に再放流、数日から数十日後に再捕獲する方法とした。また、シンカイヒバリガイ類の成長過程における貝殻構造や形成特性を把握するために、貝殻各部を走査型電子顕微鏡で観察し貝殻構造を決定する。

3.3.2. その他のメガベントス研究

ハオリムシ*Vestimentifera*の初期生活史を明らかにするために、初期発生の経時的变化および着生、変態過程を追跡することを試みた。採集されたハオリムシの一部を解剖し、卵囊の中に詰まっている卵を採り、発生段階を観察した。

鳩間海丘に優占的に生息するオハラエビ*Alvinocaris longirostris*、ゴエモンコシオリエビ、シンカイヒバリガイ類などの遺伝子配列を決定する。これまでに得られている試料と比較し、沖縄トラフ内の熱水域に生息する種の遺伝的変異、西太平洋の近縁種とも比較し、種分化や生物地理学的特性について考察する。

4. 結果概要

4.1. 生態系のエネルギー流

4.1.1. 地質学的背景・化学物質の組成と濃度

4.1.1.1. 鳩間海丘

カルデラ状凹地内は安山岩質溶岩によって複雑な地形を呈し、角礫化した溶岩の急崖が随所に認められた。熱水活動は溶岩からなる崖の上方にあることが多く、大きな硫化物マウンドを形成しているように思われる。昨年(2001年)の航海では硫化物からなるチムニーはほとんど回収されていないが、本航海では黒鉱様硫化物が多く回収された。カルデラ底東側の熱水域は巨大なチムニー群があり、最大比高は約40mであった。ところどころから二酸化炭素と思われる泡が湧出し、この泡はオーバーハングしている岩の下にたまることがあり、



写真1. 岩の隙間に蓄積している二酸化炭素ハイドレート?.

Photo 1. Accumulation of CO₂ hydrate?.

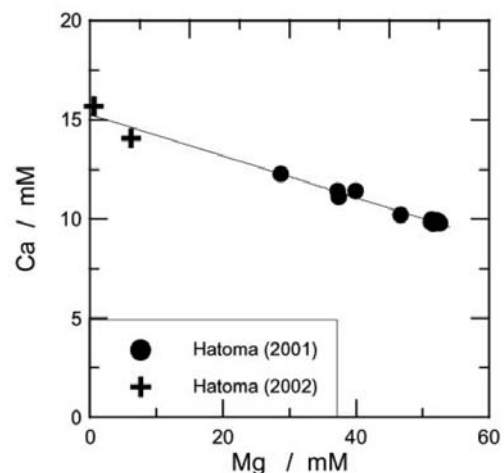


図1. 鳩間海丘の熱水試料のMg濃度とCa濃度の関係。●: 2001年に得られた試料の分析結果, +: 2002年に得られた試料の分析結果。

Fig.1. Relationship between magnesium (Mg) concentration and Calcium (Ca) concentration of vent fluid collected from the Hatoma Knoll. ●: Data in 2001 investigation, +: Data in present investigation.

粘性の高い泡(ハイドレート?)が集まっていた(写真1)。また別の熱水域で比高約20-30mのチムニーがあり、二酸化炭素ハイドレートがストロー状の筒からわき出す様子も観察できた。カルデラ底南側では活発に噴出する熱水を視認し、水温の計測を行ったところ最高で297°Cであった。

熱水試料のマグネシウム濃度とカルシウム濃度の関係をFig.1に示した。マグネシウムは熱水成分の指標物質であり、純粋な高温熱水中の濃度が0であることを利用して試料中の海水混入比を推定するものである。保圧で採取された試料はマグネシウム濃度が0に近いもので純度の高い試料が得られたことがわかる。またすべての試料の分析結果は、図中に示した混合直線のまわりにプロットされていることから、鳩間海丘の高温熱水の化学組成は主成分については一つのエンドメンバーで代表されるものであることが示唆される。また高温熱水の組成は調査が始まった1999年以来ほとんど変動が見られない。またシリカ濃度からは、海底直下

での熱水岩石反応が平衡状態になっていることが示唆されている。熱水噴出孔に採水口を挿入して採水した試料については、塩分が約22前後と低かった(2K #1359 W-3, 2K #1361 W-1,2,3) (Table 3)。また、その時のpHも約5.6と低い値であった。アルカリ度(Alk)は、海水中へ火山性ガスが溶入したことを示すほどには低い値ではなかった。

4.1.1.2. 黒島海丘

海底は一見平坦に見えるが、石灰岩のpavementが海底直下に厚く発達しており、それが複数の亀裂により分割され正断層のようにずれるなどしているためか、非常にでこぼこした海底面をなしていた。エンセイシロウリガイ*Calypptogena solidissima* 死殻分布域およびシンカイヒバリガイ類の分布域にはメタンの発泡現象が見られた。海底表面は僅かに泥質物が堆積しているのみで、その下は貝の死に殻からなる碎屑物が数cm~十数cm被っており柱状採泥器による堆積物の採取は困難であった。

化学環境測定用の海水は、*Bathymodiolus short-type*,

表3 鳩間海丘の熱水域および黒島海丘のメタン湧水域から採水したサンプルの船上分析結果。N: ニスキン採水器, W: 保圧採水器。

Table 3 Results of onboard chemical analysis for water sample from the Hatoma (vent) and the Kuroshima (methane seep) Knolls. N: Niskin water bottle, W: Water and Hydrothermal-fluid Atsuryoku Tight Sampler.

| Hatoma Knoll | | | | | Kuroshima Knoll | | | | | |
|--------------|--------|-------|------|-----------|-----------------|----------|-------|-------|-----------|------|
| Dive No. | Sample | Sali. | pH | Alk. (mM) | Dive No. | Sample | Sali. | pH | Alk. (mM) | |
| 2K #1352 | N-1 | 35 | 7.69 | 2.50 | 2K #1355 | N-1 | 33 | 7.38 | 2.40 | |
| | N-2 | 35 | 7.67 | 2.44 | | N-2 | 33 | 7.39 | 2.35 | |
| | N-3 | 35 | 7.65 | 2.45 | | W-1 | 32 | 7.40 | 2.28 | |
| 2K #1353 | N-1 | 34 | 5.75 | 2.47 | 2K #1356 | W-3 | 32 | 7.36 | - | |
| | N-2 | 34 | 7.51 | 2.46 | | N-1 | 32 | 7.34 | 2.35 | |
| | N-3 | 34 | 6.74 | 2.47 | | W-1 | 32 | 7.34 | 2.27 | |
| 2K #1354 | N-1 | 32 | 7.29 | 2.41 | 2K #1357 | W-3 | 32 | 7.26 | - | |
| | N-2 | 32 | 6.06 | 2.36 | | N-1 | 33 | 7.40 | 2.22 | |
| 2K #1358 | N-1 | 34 | 7.23 | 2.62 | 2K #1360 | W-2 | 31 | 7.37 | 2.38 | |
| | N-2 | 34 | 7.14 | 2.53 | | W-3 | 32 | 7.62 | - | |
| | W-3 | 30 | 5.37 | 2.15 | | W-4 | 33 | 7.60 | - | |
| 2K #1359 | N-1 | 32 | 6.81 | 2.51 | 2K #1362 | N-1 | 32 | 7.38 | 2.51 | |
| | N-2 | 33 | 7.06 | 2.33 | | N-2 | 32 | 7.37 | 2.39 | |
| | W-1 | 32 | 6.51 | 2.37 | | W-1 | 31 | 7.37 | 2.40 | |
| | W-3 | 22 | 5.79 | - | | W-2 | 31 | 7.32 | 2.29 | |
| 2K #1361 | N-1 | 32 | 7.12 | 2.32 | 2K #1363 | N-1 | 32 | 6.27 | 2.06 | |
| | N-2 | 32 | 6.88 | 2.48 | | N-2 | 33 | 6.23 | 2.15 | |
| | W-1 | 21 | 5.59 | 2.40 | | 2K #1364 | N-1 | 35 | 7.34 | 2.16 |
| | W-2 | 21 | 5.59 | 2.44 | | | N-2 | 34 | 7.37 | 2.09 |
| | W-3 | 22 | 5.58 | 2.17 | | | W-1 | 34 | 7.34 | 2.16 |
| 2K #1366 | W-1 | 35 | 7.37 | 2.22 | W-3 | 35 | 7.33 | 2.30 | | |
| | W-2 | 35 | 7.36 | - | 2K #1367 | W-1 | 32 | 7.322 | 2.67 | |
| 2K #1369 | N-1 | 35 | 6.38 | 2.37 | 2K #1367 | W-3 | 32 | 7.35 | 2.36 | |
| | N-2 | 35 | 7.29 | 2.34 | | W-1 | 35 | 7.37 | 2.24 | |
| | W-3 | 33 | 5.54 | 2.67 | | W-2 | 35 | 7.36 | 2.20 | |

Bathymodiolus long-type, エンセイシロウリガイの各集団上、ガス噴出域など多様な地点で保圧採水器やニスキン採水器により採水した。ガス噴出域ではアルカリ度が高かった (Table 3)。これは、海底または海底下で炭酸カルシウムが溶解したことによるものと推定される。

4.1.2. 食物連鎖解析

生物群集中の環境水からメタンの炭素同位体組成の変動が解析される。これらのデータと、同時に採取したベントス軟組織の炭素・窒素同位体組成との関連を解析することによって、化学合成生態系内のエネルギーの流れが解析できる。また、鳩間および黒島海丘の3種のシンカイヒバリガイ類から成長段階が異なる試料が得られ、成長に伴う栄養摂取様式の変動が解析できる。ゴエモンコシオリエビも採集でき、腹側剛毛の糸状バクテリアマットと胃内容物に含まれる細菌のDNAが比較される。

4.2. 生産者に関する研究

4.2.1. 浮遊性・付着性細菌・共生細菌の細菌相・現存量・増殖量

4.2.1.1. バイオマーカーによる微生物構成とバイオマスの推定

今航海では、昨年は得られなかった黒島海丘の堆積物および岩石と、鳩間海丘の硫化物チムニーをサンプリングすることができたので、これらについて有機成分の抽出を行い、微生物構成およびバイオマスの推定を行う。

Diffusion chamberを用いた浮遊性細菌およびスライドガラスを用いた付着性細菌の増殖量評価のための*in-situ*実験は、それぞれ回収されたサンプルを解析中である。予察的な観察では、浮遊性細菌の増殖量はとても早いことが示唆された。

本航海において採集した底生生物のうち、先行研究からの類推および船上での解剖の結果、化学合成細菌を共生者する可能性のあるものは以下の通りである。

- ・ヘイトウシンカイヒバリガイ(鳩間海丘)
- ・*Bathymodiolus short-type*(黒島海丘)
- ・*Bathymodiolus long-type*(黒島海丘)
- ・エンセイシロウリガイ(黒島海丘)
- ・オトヒメハマグリ類Vesicomiyidae gen. sp.(黒島海丘)
- ・ハオリムシ類(黒島海丘)

このうちシンカイヒバリガイ類3種については、2001年の調査で採集した試料を用いて分子系統解析を実施済みであり、共にメタン酸化細菌を共生者としてすることが示唆されている。黒島海丘に生息するエンセイシロウリガイの共生細菌に関する情報は皆無であるが、これまで知られるシロウリガイ類と同様に鰓が乳白色で肥大していること、これまで分子系統の報告されたシロウリガイ類は全て硫黄細菌を共生者としてすることから、この海域に生息するシロウリガイ類も同様に硫黄細菌が細胞内共生すると推定する。黒島海丘に生息するハオリムシ類の共生細菌に関する情報も皆無であるが、これまで分子系統解析結果が報告されたハオリムシ類は全て硫黄細菌を共生者としてすることから、この海域に生息するハオリムシ類も同様に硫黄細菌が細胞内に共生すると推定する。上記試料については航海終了後、電子顕微鏡観察、分子系統解析および*in-situ*ハイブリダイゼーションを行い、共生細菌

の有無や特徴を明らかにする予定である。また、共生細菌の現存量を推定するために、これらの動物の一部はバイオマーカー(脂肪酸・キノン)分析に供される。

4.3. 消費者に関する研究

4.3.1. メガベントス動物相

4.3.1.1. 黒島海丘

海丘頂部には、ガス噴出がある生物量の非常に多い地域site Aと、炭酸塩チムニーやエンセイシロウリガイの死殻が散乱する生物量の少ない地域site B (site Aの西側約400m)の2タイプの海底環境が確認された。site Bには、白色のバクテリアマットらしき変色域が数箇所認められた。site Aの豊かな生物群集は、*Bathymodiolus short-type*が優占するものと(写真2)、*Bathymodiolus long-type*が優占するもの(写真3)に分けられた。ここのシンカイヒバリガイ類の集団は日本周



写真2. 黒島海丘メタン湧水域における*Bathymodiolus short-type*が優占する生物群集。

Photo 2. *Bathymodiolus short-type* dominated community associated with methane seep in the Hatoma Knoll.



写真3. 黒島海丘メタン湧水域における*Bathymodiolus long-type*が優占する生物群集。

Photo 3. *Bathymodiolus long-type* dominated community associated with methane seep in the Hatoma Knoll.



写真4. 黒島海丘メタン湧水域におけるエンセイシロウリガイ。
Photo 4. *Calyptogena solidissima* associated with methane seep in the Hatoma Knoll.

辺では最大規模と思われる。

(1) site Aのうち*Bathymodiolus* short-typeが優占する群集

(軟体動物Mollusca) 得られたサンプルには*Bathymodiolus* long-typeもわずかに混獲されており、両種は同所的に生息していると思われる。ただし*Bathymodiolus* short-typeは、露頭など基質に付着しているが、*Bathymodiolus* long-typeは堆積物中に殻の後端部を埋没させることが多い。エンセイシロウリガイの死殻も多く、わずかに生貝が分布する(写真4)。生貝および死殻で形成される複雑な間隙を形成する構築物は、他の生物に棲み場所を提供しており、例えば多毛類のものと思われる白色石灰質? 棲管や小型で白色のヒザラガイの付着も認められた。エンセイシロウリガイは底質に刺さったような状態で生息しており、小型の個体ほど底質に埋まっている部分が多い傾向があった。その他には、ツキガイ類Lucinidae gen. sp.の死殻、オトヒメハマグリ類Vesicomyidae gen. sp., ワタゾコシロアミガサガイモドキ*Bathyaema* sp., サガミハイカブリナ*Provanna* sp., エゾバイ類Buccinidae gen. sp., シンカイサンショウガイ*Cantreina jamsteci*, ワタゾコシタダミ類Skeneidae gen. sp.が出現した。エゾバイ類は、通常化学合成生物群集にはゲスト種であるが、この群集以外の通常海底からは見つからなかった。

(甲殻類Crustacea) 一見するとユノハナガニ類Bythograeidaeに類似したカニが認められたが、採集された個体はエンコウガニ類Goneplacidaeと思われた。カニを採取するために持ち込んだ餌に、ヨコエビ類Amphipodaが蝟集してきた。

(多毛類Polychaeta) *Bathymodiolus* short-typeの約半分には外套腔に多毛類が寄生していた。ほかにも複数種出現した。

(有鬚動物Pogonophora) ハオリムシは、活発にガスが噴出しシンカイヒバリガイ類が卓越する地域には生息せず、その周囲の泥質の地域に生息していた。また、確認されたハオリムシは相模湾の*Lamellibrachia* sp.に比べ、いずれも大型個体ばかりで棲管長は1.5m以上になる(写真5)。現在のところ日本最大かもしれない。



写真5. 黒島海丘から得られたハオリムシ。「なつしま」第3ラボラトリーにて撮影。

Photo 5. Vestimentiferan tubeworm from the methane seep area in the Hatoma Knoll.

(棘皮動物Echinodermata) クモヒトデ類Ophiuroidea, フクロウニ類Echinothuriidae (オーストンフクロウニ*Araeosoma owstoni*を含む)が出現した。特に、フクロウニ類は個体数も多く、またサイズも15-20cmぐらいと大型であった。

(星口動物Sipuncula) 炭酸塩岩の孔などに生息しており個体数も多かった。

(脊椎動物Vertebrate) メクラウナギ類Myxiniformes, エイ類Rajiformes, アカグツ類Ogcocephalidaeが散見された。

(2) site Aのうち*Bathymodiolus* long-typeが優占する群集

(軟体動物Mollusca) *Bathymodiolus* long-typeは、殻の後端部を埋没させ生息している場合と、露頭の基部などに付着しながら生息している場合があった。いずれも、*Bathymodiolus* long-typeだけでパッチを形成していた。周辺には*Bathymodiolus* short-typeも生息しているが、*Bathymodiolus* long-typeのパッチに*Bathymodiolus* short-typeが混在することはないように見えた。*Bathymodiolus* long-typeは、生殖腺がよく発達していること、鰓が赤いことが特徴的である。エンセイシロウリガイの死殻も多く、ワタゾコシロアミガサガイモドキも散見できた。サンプルには小型の白色のエゾバイ類もしくはクダマキガイ類Turridaeも多量に含まれていた。

(多毛類Polychaeta) *Bathymodiolus* long-typeの外套腔からは寄生多毛類は認められなかった。

(星口動物Sipuncula) 第1357潜航のサンプルに多量に含まれていた。

4.3.1.2. 鳩間海丘

鳩間海丘の動物相についてはすでに報告されている(土田ほか, 2000; 藤倉ほか, 2001)ので本報告では詳しく述べ

ない。ヘイトウシンカイヒバリガイの成長速度を測定するために昨年設置した3つの放流ネットは、設置点から1~5m離れており、すでにヘイトウシンカイヒバリガイ群集上にはなく砂泥底上に点在していた。この周辺には、大型のゴカクエゾイバラガニ *Paralomis verrilli* が数個体生息していたことから、これらに放流ネットが運ばれてしまったのかもしれない。熱水域の周辺には、ヘイトウシンカイヒバリガイ、ゴエモンコシオリエビ、オハラエビ、フネカサガイ類 *Lepetodrilus sp.* などを優占種とした生物群集が高密度に分布していた(写真6)。熱水域に接するように分布するヘイトウシンカイヒバリガイ表面には多数のフネカサガイ類が付着していた。ゴエモンコシオリエビの体表にはフネカサガイ類に加え多毛類も付着していた。これまでに、鳩間海丘からは20種以上のメガベントスが出現しており(土田ほか, 2000; 藤倉ほか, 2001)、今回初めて採集した種としては、ウメケムシ類 *Euphrosinidae gen. sp.*、ニシキウズ類 *Trochidae gen. sp.*、星口動物が出現した。

4.3.2. 現存量・生産量

化学合成生物群集域内で30×30cmの定量枠内のステレオカメラ撮影を行い、密度・バイオマスを算出するデータを取得できた。シンカイヒバリガイ類を対象とし、ストロンチウムマーキング法により成長速度の測定実験を試みたが、鳩間海丘より黒島海丘のほうが再捕時の生残率が高かった。実験に供した個体は、走査型電子顕微鏡で観察し放流期間の成長量を見積もる予定である。

シンカイヒバリガイ類の成長過程における貝殻構造に関する研究では、鳩間海丘のヘイトウシンカイヒバリガイ、黒島海丘の *Bathymodiolus short-type* と *Bathymodiolus long-type* では殻皮の剥離状況が異なっていた。ヘイトウシンカイヒバリガイの殻皮剥離(欠損)が殻長50mm前後からはじまるのに対し、*Bathymodiolus short-type* と *Bathymodiolus long-type* では50mm以下でも欠損のある個体が見られ、貝殻の溶解が成長の早い時期からみられることが示唆された。最大個体の殻長は3種とも110-120mm前後で、*Bathymodiolus long-*



写真6. 鳩間海丘の熱水噴出域周辺に分布するヘイトウシンカイヒバリガイとオハラエビの集団。

Photo 6. Dense clusters of the deep-sea mussel, *Bathymodiolus platifrons*, and shrimp, *Alvinocaris sp.*

typeは成長途中から腹縁部にくびれが見られるようになっていた。貝殻の厚さはヘイトウシンカイヒバリガイが薄く、他2種は厚い傾向があった。足糸はヘイトウシンカイヒバリガイと *Bathymodiolus short-type* は細く容易に切断されるが、*Bathymodiolus long-type* は太いうえ量も多く付着力も強い傾向にあった。

4.3.3. ハオリムシの初期生活史

黒島海丘においてハオリムシが1個体採集された。解剖により多数の卵が得られたが、未受精卵であったため発生が進まなかった。

5. おわりに

本報告は、2002年度に実施した「しんかい2000」システムによる調査航海クルーズレポートを基に作成した。この航海で得られた成果は、順次専門雑誌や学会に報告されるが、一部については既に学会等で発表されている(小坂ほか, 2002; 溝田ほか, 2002; 大越健嗣ほか, 2002; 大越和加ほか, 2002; 山中ほか, 2002; Yamanaka et al., 2002など)。最後に、本調査研究は、「しんかい2000」運航チーム並びに「なつしま」乗組員の多大なご協力により成り立った。また、海洋科学技術センター研究業務部の方々、海洋生態・環境研究部の方々、日本海洋事業(株)の方々からもご支援をいただいた。ここに心より深謝する。

引用文献

- 1) Baross, J. A., J. W. Deming and R. R. Becker (1984). Evidence for microbial growth in high pressure, high temperature environments. In M. J. Klug and C. A. Reddy, eds. Current perspectives in microbial ecology. American Society of Microbiology (Publication), Washington, D. C., pp. 186-195.
- 2) 藤倉克則・藤原義弘・石橋純一郎・片岡聡・小松徹史・前澤優子・牧陽之助・宮崎淳一・三宅裕志・岡本和洋・土田真二・Laszlo G. TOTH・大越健嗣・山口寿之・山本啓之・山中寿朗・渡部元・渡部裕美・Susanne ZIELINSKI・加藤憲二(2001). 沖縄トラフ第四与那国海丘と鳩間海丘における「しんかい2000」システムによる熱水生態系調査報告. JAMSTEC深海研究19号: 141-154.
- 3) 蒲生俊敬・ヨリス・ギースケス(1992). 国際深海掘削計画(ODP)第131航海における堆積物間隙水の船上化学分析. 地球化学, 26: 1-15.
- 4) Gebruk, A. V., P. Chevaldonné, T. Shank, R. A. Lutz and R. C. Vrijenhoek (2000). Deep-sea hydrothermal vent communities of the Logatchev area (14°45'N, Mid-Atlantic Ridge): diverse biotopes and high biomass. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 80: 383-393.
- 5) Hashimoto, J., S. Ohta, K. Fujikura, Y., Fujiwara and S. Sukizaki (1995). Life habit of vesicomid clam, *Calyptogena soyoae*, and hydrogen sulfide concentration in interstitial waters in Sagami Bay, Japan. Journal of

- Oceanography, 51: 341-350.
- 6) Henry, P., J. P. Foucher, X. Le Pichon, M. Sibuet, K. Kobayashi, P. Tarits, N. Chamot-Rooke, T. Furuta and P. Schultheiss (1992). Interpretation of temperature measurements from the Kaiko-Nankai cruise: Modeling of fluid flow in clam colonies. *Earth and Planetary Science Letters*, 109: 355-371.
 - 7) 小坂紋子・中山典子・角皆潤・蒲生俊敬・藤倉克則・町山栄章 (2002). 八重山諸島南方黒島海丘における冷湧水の化学組成と湧出ガスの起源. 日本地球化学会第49回年会, 鹿児島大学.
 - 8) 溝田智俊・山中寿朗・牧陽之助・藤倉克則・藤原義弘・土田真二・堤裕昭・町山栄章 (2002). 南部沖縄熱水および冷湧水生物群集の炭素-窒素-硫黄同位体組成. 日本地球化学会第49回年会, 鹿児島大学.
 - 9) Naganuma, T., A. Otsuki and H. Seki (1989) Abundance and growth rate of bacterioplankton community in hydrothermal vent plumes of the North Fuji Basin. *Deep-Sea Research*, 36 (9): 1379-1390.
 - 10) Karl, D. M., C. O. Wirsen, and H. W. Jannasch (1980) Deep-sea primary production at the Galapagos hydrothermal vents. *Science*, 207: 1345-1347.
 - 11) 大越健嗣・大越和加・藤倉克則 (2002). 沖縄トラフに生息するシンカイヒバリガイ類の分布, 貝殻構造, 成長特性. 日本ベントス学会第16回大会要旨集13.
 - 12) 大越和加・大越健嗣・藤倉克則・藤原義弘 (2002). 深海性二枚貝の外殻腔に寄生する多毛類. 日本ベントス学会第16回大会要旨集35.
 - 13) Olu, K., M. Sibuet, F. Harmegnies, J. P. Foucher and A. Fiala-Medioni (1996). Spatial distribution of diverse cold seep communities living on various diapiric structures of the southern Barbados prism. *Progress in Oceanography*, 38: 347-376.
 - 14) Olu, K., M. Lance, S. Sibuet, P. Henry, A. Fiala-Médioni and A. Dinet (1997). Cold seep communities as indicators of fluid expulsion patterns through mud volcanoes seaward of the Barbados accretionary prism. *Deep-Sea Research I*, 44: 811-841.
 - 15) Sarrazin, J., and S. K. Juniper (1999). Biological characteristics of a hydrothermal edifice mosaic community. *Marine Ecology Progress Series* 185, 1-19.
 - 16) Toth, G. L., K. Kato and K. Fujikura (2001). Density, biomass and production of the bacterioplankton in the Yonaguni-, and Hatoma deep-sea hydrothermal vent areas, Okinawa Trough, Japan. 18th Shinkai Symposium Abstracts: 20-21.
 - 17) 土田真二・渡辺一樹・石橋純一郎・三宅裕志・渡部元・山口寿之・北島富美雄・中野綾子・松村美奈子・渡部裕美 (2000). 鳩間海丘および水納海丘における熱水噴出現象に関する生物, 地質, 地球科学的調査概要報告. JAMSTEC深海研究17号: 35-42.
 - 18) Tsunogai, U., J. Ishibashi, H. Wakita and T. Gamo (1998). Methane-rich plumes in Suruga Trough (Japan) and their carbon isotopic characterization. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 97-105.
 - 19) Yamamoto, H., K. Fujikura, A. Hiraishi, K. Kato, and Y. Maki (2002) Quinone profiles and 16S rRNA phylogeny of bacterial endosymbionts associated with invertebrates dwelling hydrothermal vent and cold seep area. *Marine Ecology Progress Series*, 245: 47-59.
 - 20) 山中寿朗・石橋純一郎・岡本和洋・森本祐介・溝田智俊・藤倉克則 (2002). 沖縄トラフ南部海底熱水系の地球化学的研究. 日本地球化学会第49回年会, 鹿児島大学.
 - 21) Yamanaka, T., C. Mizota, J. Ishibashi, N. Nakayama, Y. Morimoto, K. Okamoto, A. Kosaka, Y. Maki, U. Tsunogai, K. Fujikura, S. Tsuchida and Y. Fujiwara (2002). Carbon, nitrogen and sulfur isotopic characterization of biological samples from chemo-synthetic communities in southern Okinawa, Japan. American Geophysical Union Fall Meeting 2002.

(原稿受理:平成14年12月25日)