

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

藤倉 克則^{*1} 藤原 義弘^{*1} 石橋純一郎^{*2} 片岡 聡^{*2} 小松 徹史^{*1}
前澤 優子^{*3} 牧 陽之助^{*4} 宮崎 淳一^{*5} 三宅 裕志^{*1} 岡本 和洋^{*2}
土田 真二^{*1} Laszlo G. TOTH^{*6} 大越 健嗣^{*7} 山口 寿之^{*8} 山本 啓之^{*9}
山中 寿朗^{*5} 渡部 元^{*1} 渡部 裕美^{*8} Susanne ZIELINSKI^{*1} 加藤 憲二^{*10}

2001年5月15日から5月31日にかけて、「しんかい2000」システムによって沖縄トラフ南西部に位置する第4与那国海丘と鳩間海丘の熱水噴出域で地球化学・微生物学・動物学調査を実施した。この調査では、

- ・熱水環境の地球化学解析
- ・物理環境の測定
- ・熱水生態系のエネルギー源の推定
- ・細菌およびベントスの生物多様性の把握
- ・細菌およびベントスの現存量の把握
- ・細菌およびベントスの生産量の把握
- ・細菌量とベントス量の相関
- ・第4与那国海丘と鳩間海丘の2地点間の比較
- ・熱水噴出孔生物の生理と発生

を解明するためのデータ・サンプルを取得すること目的とした。ほとんどのデータ・サンプルは現在解析中であり、本論では調査の概略を述べた。

キーワード: 熱水生態系, 第4与那国海丘, 鳩間海丘, 地球化学解析, 細菌, ベントス

-
- *1 海洋科学技術センター
 - *2 九州大学
 - *3 日本海洋事業
 - *4 岩手大学
 - *5 筑波大学
 - *6 Balaton Limnological Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences
 - *7 石巻専修大学
 - *8 千葉大学
 - *9 聖マリアンナ医科大学
 - *10 静岡大学
 - *11 Japan Marine Science and Technology Center
 - *12 Kyushu University
 - *13 Nippon Marine Enterprise
 - *14 Iwate University
 - *15 University of Tsukuba
 - *16 Ishinomaki Senshu University
 - *17 Chiba University
 - *18 Shizuoka University

Report on investigation of hydrothermal vent ecosystems by the crewed submersible 'Shinkai 2000' on the Dai-yon (No. 4) Yonaguni Knoll and the Hatoma Knoll, the Okinawa Trough

Katsunori FUJIKURA*¹¹ Yoshihiro FUJIWARA*¹¹ Jun-ichiro ISHIBASHI*¹² Satoshi KATAYAMA*¹²
Tetsushi KOMATSU*¹¹ Yuko MAEZAWA*¹³ Yonosuke MAKI*¹⁴ Jun-Ichi MIYAZAKI*¹⁵
Hiroshi MIYAKE*¹¹ Kazuhiro OKAMOTO*¹² Kenji OKOSHI*¹⁶ Laszlo G. TOTH*⁶
Shinji TSUCHIDA*¹¹ Toshiyuki YAMAGUCHI*¹⁷ Toshiro YAMANAKA*¹⁵
Hajime WATABE*¹¹ Hiromi WATANABE*¹⁷ Susanne ZIELINSKI*¹¹ Kenji KATO*¹⁸

Geochemical, microbiological and zoological investigations were conducted using the submersible 'Shinkai 2000' at two hydrothermal vent fields, the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll and the Hatoma Knoll in the Okinawa Trough. The purpose of this investigation included;

- 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) comparisons between the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll and the Hatoma Knoll,
- 9) physiological and embryological studies of vent benthic species.

Collected data and samples from during the investigation are being analyzed, now. In this paper, we present an outline of the investigation.

Keywords : Hydrothermal vent ecosystem, Dai-yon (No. 4) Yonaguni Knoll, Hatoma Knoll, geochemical analysis, bacteria, benthic species

1. はじめに

熱水生態系は、海底火山活動から放出される化学物質細菌の化学合成生産 ベントスなどの動物による消費 というおおまかな連鎖構造になっている。この生態系は消費者であるベントスだけで $10\text{kg}/\text{m}^2$ を越す莫大なバイオマスを有していることが知られている(藤倉ほか, 1995; Sarrazin & Juniper, 1999)。莫大なバイオマスを維持するためには、化学合成細菌の生産のみならずベントスの生産も大きいことが推測される。熱水生態系の連鎖構造を定量化するためには、無機的環境(特に熱水成分)、生産者(細菌)、消費者(主にベントス)の多様性、現存量、生産量を把握しなければならないが、これまでこれらを系統的に解析した例はない。

日本周辺において沖縄トラフは、小笠原諸島海域とならぶ熱水生態系の宝庫である。沖縄トラフでは、南奄西海丘・伊平屋海丘・北部伊平屋海丘・伊是名海穴などで熱水生態系が発見され(太田, 1990; Hashimoto *et al.*, 1995; 木村ほか, 1990; 藤倉ほか, 1995; Yamamoto *et al.*, 1999)、さらに近年、鳩間海丘と第4与那国海丘で新たに熱水噴出現象が発見された(渡辺, 1999; 土田ほか, 2000; 中野ほか, 2001; 木下ほか, 2001)。南奄西海丘については生物群集構造・現存量

が報告され(Hashimoto *et al.*, 1995; 藤倉ほか, 1995)、北部伊平屋海丘の生物群集についても、群集構造及び生産量に関する研究が進められている(Yamamoto *et al.*, 1999)。また、北部伊平屋海丘の熱水性細菌については、培養法及び分子系統学的手法を用いて、その細菌群集の多様性が研究されてきている(Takai & Horikoshi 1999; 2000; 高井・掘越 2000)。したがって、第4与那国海丘と鳩間海丘の熱水生態系の連鎖構造に関するデータが得られれば、沖縄トラフ全体の熱水生態系を構成する生物の多様性・現存量・生産量の評価に貢献できる。そこで本研究は、第4与那国海丘と鳩間海丘の熱水生態系において、細菌およびベントスの多様性・分布様式・現存量・生産量と地球化学的環境を定量的に解析することを目的に実施した。

2. 調査方法

2.1. 潜航調査

「しんかい2000」による潜航調査は、沖縄トラフ南西部に位置する第4与那国海丘と鳩間海丘で実施した(Fig. 1)。調査期間は2001年5月15日から5月31日で、「しんかい2000」の潜航は第4与那国海丘で6回、鳩間海丘で4回行った(Table 1)。

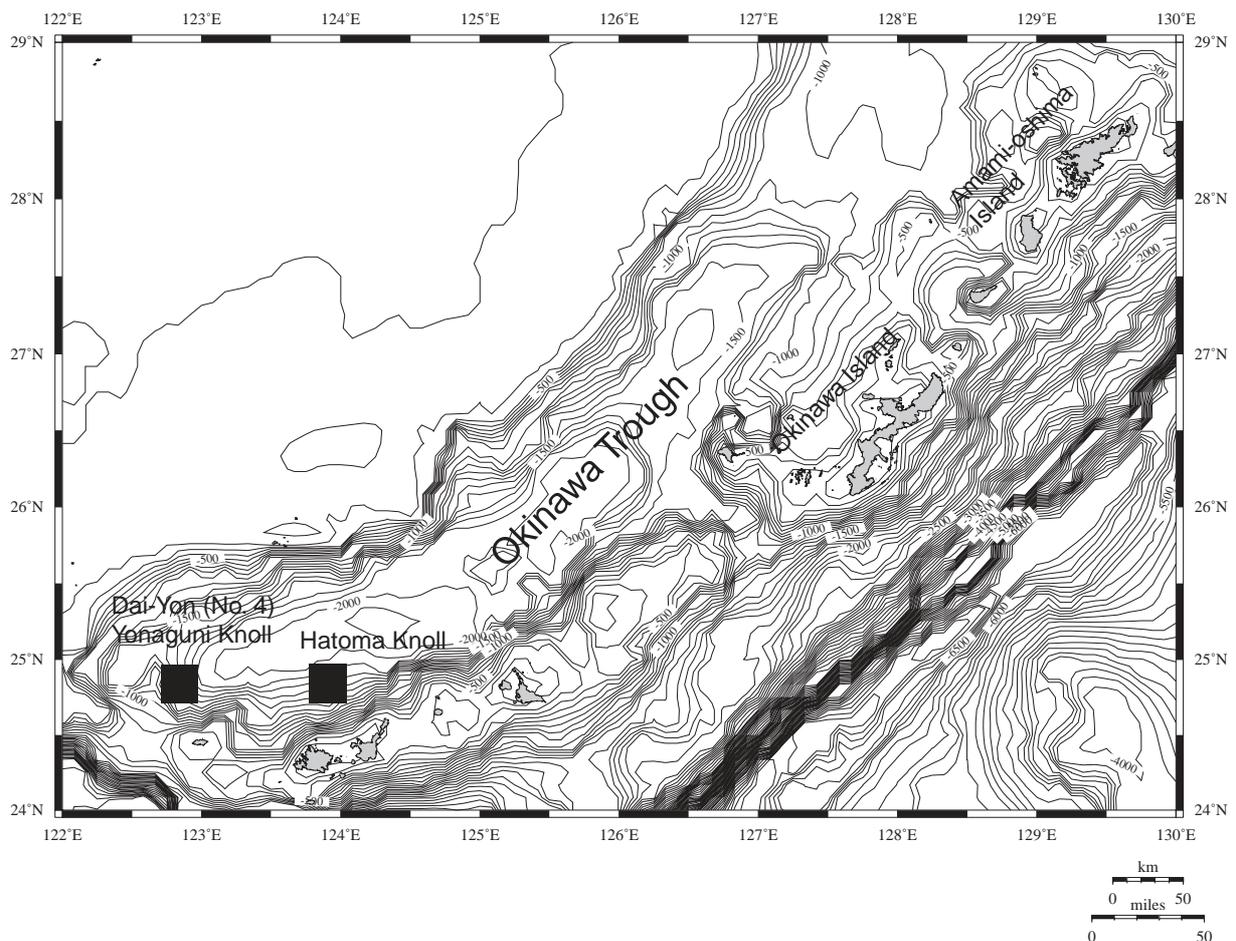


図1 本研究で調査した第四与那国海丘と鳩間海丘の位置図。

Fig. 1 Index map of the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll and the Hatoma Knoll in the Okinawa Trough.

表1 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」の潜航調査リスト

Table 1 Data relevant to ten dives by "Shinkai 2000" in the Dai-yon Yonaguni Knoll and the Hatoma Knoll, the Okinawa Trough

Dive No.	Date	Scientist	Pilot Co-pilot	Area	Start point		
					Lat.	Long.	
1267	2001.5.16	K. Fujikura	Y. Ohno Y. Mizui	Dai-Yon Yonaguni Knoll	24° 122°	50.6°N 42.0°E	1373m
1268	2001.5.17	T. Yamanaka	K. Matsumoto Y. Chida	Dai-Yon Yonaguni Knoll	24° 122°	50.9°N 41.9°E	1369m
1269	2001.5.18	J. Ishibashi	H. Ueki K. Chiba	Hatoma Knoll	24° 123°	51.6°N 50.5°E	1528m
1270	2001.5.20	S. Tsuchida	Y. Ohno Y. Mizui	Hatoma Knoll	24° 123°	51.4°N 50.4°E	1484m
1271	2001.5.21	Y. Fujiwara	K. Matsumoto Y. Chida	Dai-Yon Yonaguni Knoll	24° 122°	50.9°N 41.9°E	1371m
1272	2001.5.22	T. Komatsu	H. Ueki K. Chiba	Hatoma Knoll	24° 123°	51.5°N 50.5°E	1472m
1273	2001.5.24	T. Yamaguchi	H. Ueki Y. Ohno	Dai-Yon Yonaguni Knoll	24° 122°	50.9°N 41.9°E	1370m
1274	2001.5.25	K. Okoshi	K. Matsumoto K. Mitsufuji	Dai-Yon Yonaguni Knoll	24° 122°	50.8°N 41.9°E	1370m
1275	2001.5.26	S. Tsuchida	H. Ueki Y. Ohno	Hatoma Knoll	24° 123°	51.7°N 50.5°E	1421m
1276	2001.5.28	K. Fujikura	K. Matsumoto K. Mitsufuji	Dai-Yon Yonaguni Knoll	24° 122°	50.6°N 42.0°E	1383m

2.2. 研究項目および方法

2.2.1. 熱水環境の地球化学解析

化学合成細菌のエネルギー源となる硫化水素・メタンなどの化学物質の濃度は、場所によって違いが大きく、熱水化学組成の違いが生産者である細菌の多様性・生産量と関係するかどうか、この影響がベントスの多様性・生産量にまで影響するかどうかを調べるため熱水試料の化学成分の分析を行なっている。また、熱水性沈殿物についても化学成分の分析を行なった。熱水試料の採取は多連回転バルブ式ポンプ採水器により行った(酒井ほか, 1990)。チタン製の採水管の先端部には白金抵抗測温体が接しており採水している試料の温度を船内でもモニターできるようになっている。新たな試料採取器具として微量熱水採水器の開発を進めている。この採水器は、市販の滅菌注射器に試料を導入するものである。得られた熱水試料は、主要成分 Na, Mg, Ca, K, Cl, SO₄, Si)・メタン・二酸化炭素・ヘリウム同位体・溶存有機物・微量金属の測定に供された。海底から噴出する液泡はM式採泥器で採取した。採取された気体の一部は船上で、直ちに火山ガスの分析法にならった予察的分析を行った(Ishibashi *et al.*, 1995)。また、Rガスについてはガスクロマトグラフなどにより分析している。液泡だけでなく、熱水試料から試料回収中に発泡した気体成分についても同様な分析を行っている。熱水性沈殿物は、鉱物組成・化学組成を顕微鏡観察、EPMA分析、X線回折などの手法による分析を行っている。

2.2.2. 物理環境の測定

熱水噴出域は、噴出孔からの距離によって物理的な環境が変化に富んでいる。そこで、環境要因として温度・塩分濃度・水圧・溶存酸素濃度を測定した。定常的な温度・塩分濃度・水圧・溶存酸素濃度は、潜水調査船に装備されているCTD/DOプロファイラー(SBE-19)で測定した。局所的な温度測定には、RMT温度計(白金抵抗式, 0-400℃)、ミニRMT温度計(白金抵抗式, 0-50℃)、多連熱水採水器付属の温度計(白金抵抗式, 0-400℃)を用いた。

2.2.3. エネルギー源の推定

熱水生態系のエネルギーの根幹である硫化水素やメタンは、火山活動や微生物活動によって生成されるため、それらの起源の違いを把握する必要がある。そこで、化学的には熱水・堆積物・生物体の硫黄・炭素・水素同位体測定から硫化水素やメタンの起源を把握することを試みている。生物学的には細菌の系統解析から細菌のタイプを推定し、生産者である細菌が硫化水素とメタンのどちらをエネルギー源としているのかを検討している。

2.2.4. 生物多様性の把握

細菌に関しては、付着性細菌を捕集する微生物増殖測定用トラップ、熱水中の細菌を採集するISCS(*in-situ* cultivation system)、ベントス共生細菌、熱水と周辺の海水、ベントス体表などのサンプルを得て遺伝子解析を行っている。また、堆

積物・チムニーは脂肪酸、ベントス共生細菌は脂肪酸・キノンといったバイオマーカーを指標に系統解析を試みている。ベントスに関しては、形態分類学的・分子生物学的手法により系統解析を行っている。そして、他の化学合成生態系の構成生物との遺伝的関係を調べ、沖縄トラフの熱水生態系の生物地理学的な起源を考察する。

2.2.5. 現存量の把握

熱水生態系の規模を見積もるためには、生物の現存量を評価する必要がある。熱水・周辺海水中の細菌の現存量は、フィルター捕集法と蛍光顕微鏡観察により推定している。ベントス共生細菌のバイオマスは、バイオマーカー(脂肪酸とキノン)解析より評価している。堆積物・チムニーに生息する細菌のバイオマスは、脂肪酸解析より評価している。ベントスの現存量は、サンプルの重量と分布面積から推定している。

2.2.6. 生産量の把握

生態系の基礎生産者である細菌の増殖量を評価するため、熱水環境水のフリーリビング細菌増殖量をDiffusion chamber法、付着性細菌をスライドグラスを固着面とした微生物増殖用トラップによって測定している。ベントスの生産量推定は、優占種であるヘイトウシンカイヒバリガイの成長速度を化学物質(カルセインと塩化ストロンチウム)標識放流法と数字ナンバリングによる標識放流法によって測定している。

2.2.7. 細菌量とベントス量の相関

シンカイヒバリガイ類は共生細菌からの栄養摂取のみならずfilter feedingもしている。したがって、細菌の生産量・現存量の大きさがシンカイヒバリガイ類の生産量・現存量にどのような影響があるかを評価する予定である。

2.2.8. 2地点間の比較

鳩間海丘と第四与那国海丘の熱水生態系について、上述のような項目を比較研究する。

2.2.9. 熱水噴出孔生物の生理と発生

熱水噴出孔生物は、水温・酸素濃度・硫化物濃度が変化しやすい環境に生息している。そこで、これらの環境要因の変化に対し、熱水噴出孔生物の代謝がどのように変化するかを解析する。また、ハオリムシ類の発生については、変態ステージ・共生細菌の取り込み過程など不明な点が多い。そこで、ハオリムシ類の発生を詳しく観察している。

3. 各潜航調査の概要

3.1. 第四与那国海丘

今回の調査では、第四与那国海丘において大小合わせて、20カ所以上で熱水噴出域を発見することができた。第四与那国海丘の熱水噴出域は谷状地形の中に分布しており、熱水噴出域以外は泥質の堆積物に覆われていた。潜航調査による観察事項や作業をマッピングした図をFig. 2に示した。

3.1.1. 第1267潜航

海底は堆積物で覆われ、ソーナーに反応するものは、活動的な熱水域もしくはデッドチムニーであった。Site 1Yでは2000年に「しんかい16500」で設置したマーカーブイ(No.17)と小規模な熱水噴出孔(最高温度93℃)を確認した。Site 2Yでは、白色沈殿物が細いライン上に分布しており、このラインは数本平行に数10m以上にわたっていた(Photo 1)。また白色沈殿物が50m×50mぐらいに広がっていた。時折、薄い白色の板があり、冷湧水域のコンクリューションに類似していた。これらの場所にはハイクブリニナ類 *Provanna* sp. が高密度に分布していた。Site 3Yには数10本のデッドチムニーと活動的なチムニーが林立していた。Site 4Yでは、岩の割れ目から熱水および液泡がわき出ており、ゴエモンコシオリエビ *Shinkaia crosnieri*、細いハオリムシ、エンスイカサガイ類 *Bathyaecmaea* sp.、ハイクブリニナ類 *Provanna* sp. などが分布していた。Site 7Yは、第四与那国海丘で最も広範囲に熱水噴出孔生物群集が広がっており、ゴエモンコシオリエビ、ヘイトウシンカイヒバリガイ *Bathymodiolus platifrons*、オハラエビ類 *Alvinocaris* sp.、エンスイカサガイ類 *Bathyaecmaea* sp.、ハイクブリニナ類、フネカサガイ類 *Lepetodrilus* sp. が優占的であった(Photo 2)。ゴエモンコシオリエビは、噴出孔至近になると高密度に分布する傾向があった。Site 7Yでは、ヘイトウシンカイヒバリガイ集団内と熱水噴出孔から環境水を多連式採水器により採水した。噴出水の最高温度は68℃であった。また、斜面を登ると、高さ7-8mほどのブラックスマーカーを発見した。

3.1.2. 第1268潜航

Site 7Y付近では、海底面を占める礫の割合が半分を超えたあたりでゴエモンコシオリエビが点在するようになり、その後、白色変色域、炭酸塩クラストが見られると同時に一面をコシオリエビが覆う熱水噴出孔生物群集域を視認した。尾根と谷を繰り返す複雑な地形を横断し、複数の熱水噴出孔生物群集域を視認したが、熱水噴出孔生物群集域は尾根上に現れることが多かった。周辺海水は、ブラックスマーカーのブルームによる濁りが認められた(Photo 3)。尾根はブラックスマーカーの方向へ延びているように思われた。ブラックスマーカーの南東にも生物群集が広がり、ハオリムシとゴエモンコシオリエビが優占していた。また、熱水のゆらぎと液泡が認められ、多連式採水器により熱水採水と温度計測を行った。最高温度は195.4℃であった。この後、ブラックスマーカーのブルームの中でニスキン採水を行った。このブラックスマーカーの南約100m離れたSite 9Yにも新たなブラックスマーカーを視認し、すぐ脇の泥質部において柱状採泥を行った。ミニRMTを使って温度計測を行ったところ最高温度は38℃であった。この後、湧出する液泡をM式採泥器で採集した。Site 10Yでも熱水噴出孔生物群集を見つけ、この地点に成長速度測定用シンカイヒバリガイ放流ネット・Diffusion chamber・微生物増殖用トラップを設置した。設置後、ニスキン採水を行った。

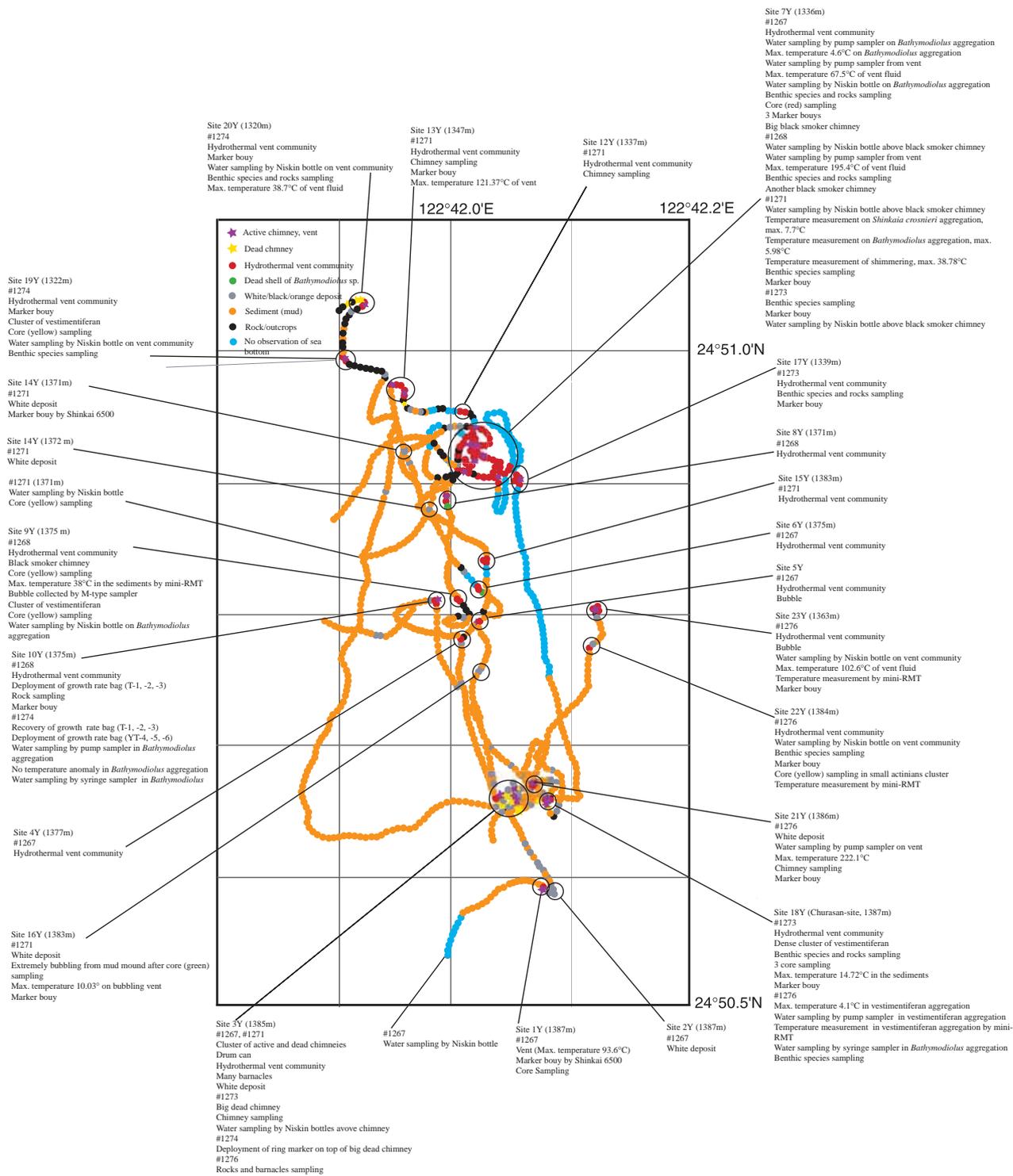


図2 沖縄トラフ第四と那国海丘における熱水噴出孔生物群集、底質、サンプリングポイントの分布図。
 Fig. 2 Distribution map of vent communities, bottom texture and sampling sites at the Dai-yon (No. 4) Yonaguni Knoll in the Okinawa Trough.

3.1.3. 第1271潜航

着底直前にニスキン採水を行い、着底直後に熱水噴出の影響が少ない地点でコア採泥を行った。Site 11Yには白変沈殿物が点在し、それより北部には非常に活動的な熱水噴出孔が数多く分布していた。Site 7Yでは比高5m以上のブラックスマーカーが少なくとも2本以上は存在したが、透明度が著しく低下しており周囲の観察を行うことが出来なかった。またこの周囲には起伏の激しい露頭が多く、ところどころでは大きな岩盤の新鮮な破断面を観察した。露頭間の底泥上には白変沈殿物が分布し、液胞の湧出を伴うものもあった。透明度の高い熱水噴出孔周辺では熱水極近傍にハオリムシとゴエモンコシオリエビ、それより若干熱水から距離を置いてヘイトウシンカイヒバリガイが多数分布していた。また熱水付近の露頭にはシンカイハナカゴ *Neoverruca* sp. が多く付着している場合もあった。ゴエモンコシオリエビとヘイトウシンカイヒバリガイの生息地点の水温計測を実施した結果、コシオリエビ地点では最高7.70℃、シンカイヒバリガイ地点では最高5.98℃、海底は4.8℃であった。また、ゆらぎの最高水温は38.78℃であった。熱水噴出域の周辺にはゲンゲ類やクサウオ類であった。Site 13Yにも熱水噴出孔生物群集が分布しており、活動的な熱水噴出孔も認められた。この噴出液は最高で121.37℃であった。Site 15Yは泥でできたマウンドがあり、そこには白色沈殿物が点在した。このマウンドで柱状採泥を行ったところ、コアサンプラーを海底に突きさした直後から海底より大量の液胞(主成分:二酸化炭素?)が噴出した(Photo 4)。採泥跡の液胞噴出地点の最高温度は10.3℃であった。Site 3Yでは、ドラム缶を視認した。

3.1.4. 第1273潜航

本潜航でシンカイハナカゴは200個体以上採集できた。しかしシンカイエボシガイ *Neolepas* sp. はハオリムシに付着した2個体を観察しただけだった。その他の熱水噴出孔生物群集の構成種は概ね採集できた。ハオリムシは小型で高密度の群集を形成するものが1種(多数個体)とシンカイエボシガイを付着させていたより大型で単体性のものが1種視認された。Site 7Yの南東側のSite 17Yにも熱水噴出孔生物群集が数10mにわたって分布していた。Site 18Y(ちゅらさんサイト)では、比高3mほどの活動的チムニーの周りにハオリムシが高密度で見つかった(Photo 5)。その周辺は堆積物が比較的厚く、活動的チムニーからの距離を変えて3地点でコア採集を行った。Site 3Yでは、デッドチムニーと活動的チムニーが林立し、中には比高15mほどの巨大なデッドチムニーも認められた。この地点でニスキン採水器による採水と活動的チムニーの採集を行った。

3.1.5. 第1274潜航

Site 10Yにおいて、成長速度測定用シンカイヒバリガイ放流ネットを設置した。その後、第1268潜航で設置した成長速度測定用シンカイヒバリガイ放流ネットを回収し、岩石を1個採集した。ヘイトウシンカイヒバリガイ集団直上で多連式採水器によって5本、集団の縁辺部で4本、集団中心部で微小

量採水器による採水を行った(Photo 6)。Site 3Yでは、高さ約15mの巨大なデッドチムニーの先端にリングマーカーを設置した。さらに、未探査の西側領域を航走し、新たにSite 19Y、20Yにおいて熱水噴出孔生物群集を発見した。Site 19Yには熱水噴出孔は複数存在し、ハオリムシ・ゴエモンコシオリエビ・ヘイトウシンカイヒバリガイが優占した。Site 20Yでは、これらの他にヘイトウシンカイヒバリガイ集団上にオハラエビとジゴクモエビが多数見られた。本潜航では、さらにシンカイヒバリガイ類の足系の付着状況、貝殻の開殻状況と外套膜の観察、個体群の分布状況、死貝や殻皮の分布について留意しながら観察を行った。

3.1.6. 第1276潜航

Site 21Yには白色変色域が広がり、ところどころに熱水噴出孔が見られた。この地点で最高221.1℃の熱水を採水した。採水した熱水は、多少灰色を帯びていた。白色変色域には小型のウロコムシ、イトエラゴカイ類 *Paralvinella* sp., ハイカブリナ類、ニシキウズガイ類 *Itheyaspira* sp. が多数分布していた。Site 18Yの分布種を詳しく観察したところ、ここにはハオリムシ、ヘイトウシンカイヒバリガイ、ハイカブリナ類、シンカイハナカゴ、エンスイカサガイ類、オハラエビ類が優占的に生息していた。チムニーの壁には、ニシキウズガイ類とイトエラゴカイ類が密集していた。シンカイヒバリガイ類を詳しく観察すると、熱水の影響をより強く受けるところに生息している個体は外套膜で顕著な水管を形成しており、これはシンカイヒバリガイと思われた(Photo 7)。また、ハオリムシ集団内とヘイトウシンカイヒバリガイ集団内で採水した。Site 3Yでは、ドラム缶周辺にあるチムニーのひとつが全てシンカイハナカゴに覆われていた(Photo 8)。Site 22Yには、活動的なチムニーや噴出孔は認められないが、ヘイトウシンカイヒバリガイの集団が見つかった。すぐ脇の堆積物上に1cmほどの触手を広げたイソギンチャクのような生物の密集域が1m四方に広がっていた。Site 23Yでは、チムニーが3-4本あり、液胞の湧きだしをともなった噴出孔も多数見られた。これらの噴出孔を中心に第四与那国海丘の熱水生態系構成種が一同に集結したような生物群集が分布していた。

3.2. 鳩間海丘

今回の調査では、鳩間海丘において大小合わせて、15カ所で熱水噴出域を発見することができた。鳩間海丘の熱水噴出域は海丘頂上部の起伏に富んだ地形の中に分布しており、第四与那国海丘に比べると堆積物は少なかった。潜航調査による観察事項や作業をマッピングした図をFig. 3に示した。

3.2.1. 第1269潜航

Site 2HのNo.1ビッグチムニーに向かう途中Site 1Hでゴエモンコシオリエビとヘイトウシンカイヒバリガイが優占する熱水噴出孔生物群集を視認した。Site 2HのNo.1ビッグチムニーは高さ10mを優に越えており下のほうは幅も広く壁のように見えた。この壁一面はコシオリエビ類などで覆われ白く

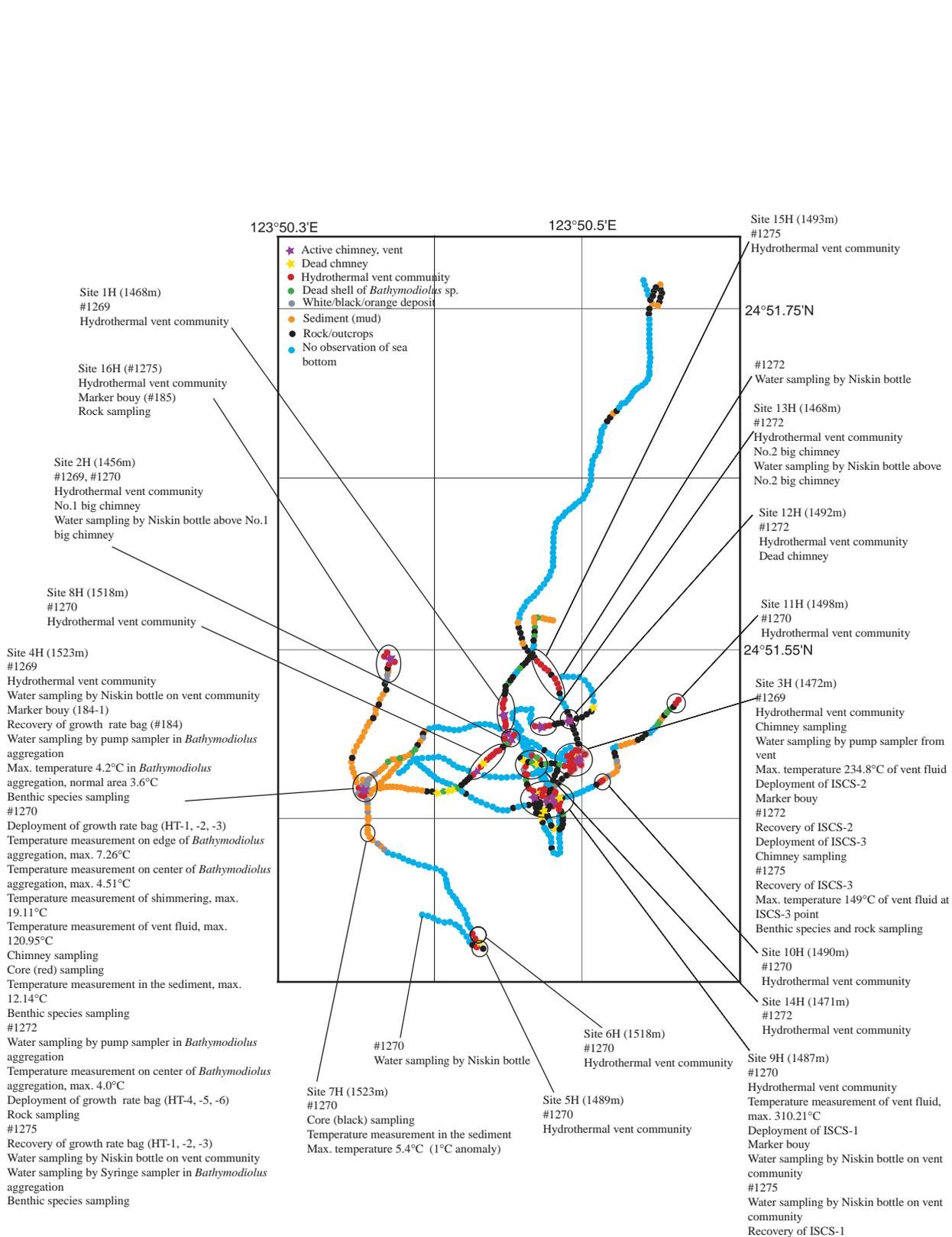


図3 沖縄トラフ鳩間海丘における熱水噴出孔生物群集、底質、サンプリングポイントの分布図。

Fig. 3 Distribution map of vent communities, bottom texture and sampling sites at the Hatoma Knoll in the Okinawa Trough.

見え 先端部ではさかんに熱水噴出が観察された(Photo 9)。熱水ブルームに内でニスキン採水を行った結果、この試料はかなり熱水成分を含んでいたことがわかった。Site 3Hで活動的な熱水マウンドを視認した。マウンドにはゴエモンコシオリエビが密集しており、その頂上には熱水を噴出する数10cmのチムニーが見られた。また、この地点で温度計測と熱水試料を採取した。計測された最高温度は261℃であった。その後ISCS-2を噴出孔の上に横たえて設置した。Site 4Hの中央には高さ数mのチムニーがあり周囲をゴエモンコシオリエビとヘイトウシンカイヒバリガイが優占する熱水噴出孔生物群集が囲んでいた。その後、昨年設置したシンカイヒバリガイ類成長速度測定ネット#184を回収し、ヘイトウシンカイヒバリガイ集団内から熱水試料を採取した。

3.2.2. 第1270潜航

Site 5Hに着底したところ、シンカイヒバリガイ類、ゴエモンコシオリエビ、オハラエビが点在するとともに、わずかなゆらぎも確認された。Site 4Hは、白色のチムニーの周りにゴエモンコシオリエビが、その外側にはヘイトウシンカイヒバリガイベッドが同心円状に存在した(Photo 10)。この地点で、生物群集の観察を行った後、化学薬品で標識したヘイトウシンカイヒバリガイを入れた放流ネット(Diffusion chamber、微生物増殖用トラップ付き)を設置した。スラップガンでは、チムニーからヘイトウシンカイヒバリガイベッドまでの線上をすべて取り尽くすよう試みた。その後、白色のチムニーからゆらいでいる熱水の温度計測、ヘイトウシンカイヒバリガイベッド外側の砂地で柱状採泥を行った。この地点で、多数のヘイトウシンカイヒバリガイに混じりシンカイヒバリガイ *B. japonicus* が1個体だけ採集することができた。鳩間海丘でシンカイヒバリガイが採集できたのは今回が初めての記録となる。Site 2HのNo.1ビッグチムニーには多数のゴエモンコシオリエビやシンカイヒバリガイ類が観察できた。高度計から、No.1ビッグチムニーの高さは約20m程度あった。このチムニーには昨年の調査でリングマーカーを設置したが、今回はマーカーは確認できなかった。Site 9Hは、熱水が勢いよく噴出しており最高水温は310℃であった。この地点にISCS-1の設置を行った。Site 9Hより北東にはSite 10HやSite 11Hで熱水噴出孔生物群集を視認した。

3.2.3. 第1272潜航

着底前の高度20m地点でニスキン採水器による採水を実施した。Site 12Hではデッドチムニーとその周辺に熱水噴出孔生物群集を認めた。Site 13HでNo.2ビッグチムニー(高さ15m)を視認し、直上にてニスキン採水器によって採水した。その後Site 3Hを再訪し、ISCS-2を回収した後ISCS-3を設置した(Photo 11)。Site 4Hでは、まず、放流がご近傍において多連式採水器による採水(計9本: 3地点x3本)を行った。さらに、ヘイトウシンカイヒバリガイの成長速度測定実験用の放流ネットを設置した。この後、生物及びチムニーを採集し、さらに周辺の白色変色域において柱状採泥を試みたが、海底泥は回収できなかった。

3.2.4. 第1275潜航

Site 3Hには多数のチムニーが林立していた(Photo 12)。この地点でISCS-3の回収を試みたが、ISCS-3は4日前に設置したにも関わらず、すでにチムニーに覆われていた。そのチムニー片を採取したのち、ISCS-3を回収した。回収後の熱水の温度を計測したところ、最高で149℃であった。この地点の岩盤には多数のシンカイハナカゴが付着していた。Site 9Hでは、ニスキン採水を行った後着底し、ISCS-1を回収した。次にSite 4Hにおいて、#1270潜航で設置したヘイトウシンカイヒバリガイ成長実験用ネットを回収した。その後、ヘイトウシンカイヒバリガイベッド直上で、微量採水器による採水を行い生物サンプルを採集した。熱水がゆらいでいる白色チムニーに、1個体だけヘイトウシンカイヒバリガイ類ベッドと離れてシンカイヒバリガイが生息していた。斜面を登りきったところにあるSite 16Hにもチムニーやゆらぎに伴った熱水噴出孔生物群集を視認し、ゴエモンコシオリエビやシンカイヒバリガイ類が優占していた。

4. 結果の概要

今回の調査航海において得られたサンプル・データのうち、現在までに解析できた結果について以下に示す。ほとんどのサンプル・データは現在解析中であり、ここではごくわずかな結果しか示すことはできなかった。

4.1. 熱水環境の地球化学

Fig. 4(a)はMg濃度とSi濃度の関係、Fig. 4(b)はMg濃度とNH₄濃度の関係を示したものである。今回の潜航調査で得られた試料はMg濃度が海水の半分より少ないものはなく、純度の高い試料は得られなかったが、純粋な熱水端成分の化学組成を推定するには十分な試料が得られた。Fig. 4(a)推算される鳩間海丘の熱水端成分のSi濃度は、昨年の報告(中野ほか、2001)とほとんど変化がないものであった。この濃度はT=300℃、P=160barにおける飽和溶解度である12.0mM/kgにほぼ一致する値となっており、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を示唆している。Fig. 4(b)から推算される鳩間海丘の熱水端成分のNH₄濃度も、昨年のものでほとんど変化がないものであった。他の成分についても、熱水端成分の化学組成が変動したことを示す兆候は見られなかった。Fig. 4(a)において、第四与那国海丘のプロットが鳩間海丘とほぼ同じ直線のまわりに集まっていることは興味深い。このことは、第四与那国海丘においても、300℃近い高温の熱水が存在していることを強く示唆する。Fig. 4(b)においては、第四与那国海丘のプロットは鳩間海丘のプロットよりも上側にある。これは、第四与那国海丘の熱水のほうがNH₄に富んでいることを意味しており、堆積物中の有機物との熱水反応がより大きな貢献をしていることを示唆している。第四与那国海丘に噴出していた液泡の組成は、アルカリ吸収法による分析の結果、主成分は二酸化炭素でありその含有量は80-85%であることがわかった。またその他の成分としては、硫化水素が数%含まれており、メタンや窒素などの不活性ガスの総和(Rガス)が約15%で

◆ Dai-Yon (No.4) Yonaguni Knoll

● Hatoma Knoll

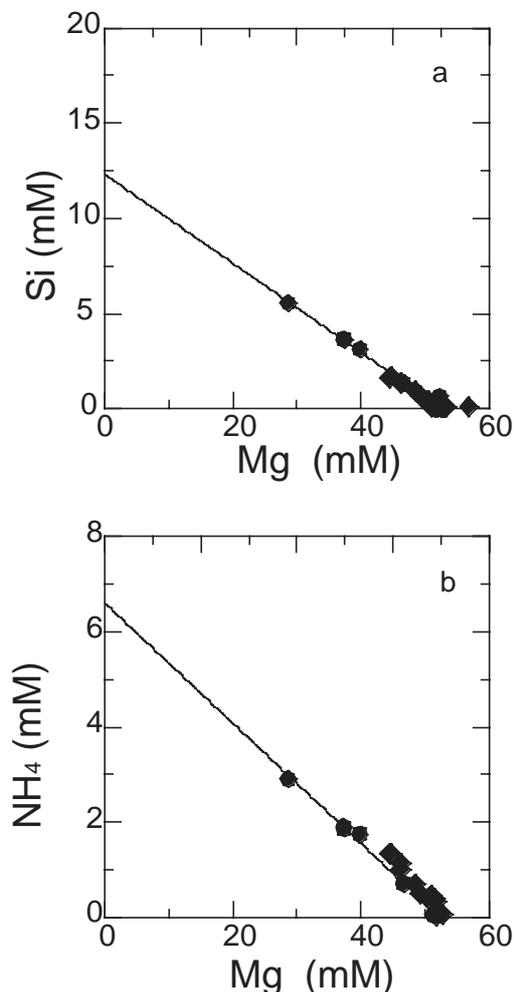


図4 第四与那国海丘と鳩間海丘から採水された熱水のマグネシウム濃度に対するシリカ濃度 (a) とアンモニア濃度 (b) の関係。

Fig. 4 (a) Relationship between silica (Si) concentration and magnesium (Mg) concentration of vent fluid collected from the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll and the Hatoma Knoll. (b) Relationship between ammonia (NH₄) concentration and magnesium (Mg) concentration of vent fluid collected from the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll and the Hatoma Knoll.

あった。この結果は、以前より沖縄トラフで見られている液泡の化学組成とほぼ一致しており、マグマ由来の揮発性成分であることを示唆する。ただし第四与那国海丘で見られた液泡現象は、これまでに観察されたどれよりも噴出量が多く、その堆積層内への蓄積過程は興味深い。

4.2. 物理環境

CTD/DOプロファイラーによると、第四与那国海丘の海底では温度が4.1℃、塩分濃度が34.46、溶存酸素濃度は1.51ml/l、鳩間海丘の海底では温度が3.8℃、塩分濃度が

34.47、溶存酸素濃度は1.51ml/l前後の値となった。局所的な熱水の温度は、第四与那国海丘では最高で222.1℃、鳩間海丘では最高で310.21℃を記録した。生物群集内でも生物分布と対応づけるために細かく温度測定をしているが結果は解析中である。

4.3. エネルギー源の推定

硫黄・炭素・水素同位体の測定のための生物・岩石・熱水サンプルは得られた。生物では、第四与那国海丘ではヘイトウシカイヒバリガイ・ゴエモンシカイヒバリガイ・オハラエビ・ハオリムシ、鳩間海丘ではこれらに加えゴカクイバラガニなどについて分析している。共生細菌の系統からのエネルギー源推定については、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、化学合成細菌を細胞内共生者とする可能性のあるものは、シカイヒバリガイ *Bathymodiolus japonicus* (第四与那国海丘、鳩間海丘)・ヘイトウシカイヒバリガイ (第四与那国海丘、鳩間海丘)・ハオリムシの1種 (第四与那国海丘) であった。このうちシカイヒバリガイ類については、同じ沖縄トラフに位置する伊平屋海丘北部海域より採集して共生細菌の分子系統解析を実施済みである。これらのシカイヒバリガイ類はメタン酸化細菌を共生者としていることから、本海域のシカイヒバリガイ類も同様の共生細菌を有すると推定している。一方、沖縄トラフ産ハオリムシ類の共生細菌の系統についてはこれまで全く情報が得られていないが、既に報告されている他の海域のハオリムシ類共生細菌との類推から、硫黄細菌を共生者とするものと推定している。

4.4. 生物多様性の把握

フリーリビング性の細菌相は、熱水の影響を強く受けない環境水、熱水噴出孔生物群集内の水、熱水噴出孔生物群集直上の水、チムニーのブルーム水を合計で46サンプル得られた。付着性の細菌相は、微生物増殖用トラップやゴエモンシカイヒバリガイに付着しているサンプルが得られた。これらのサンプルから優占的な種について遺伝子解析により多様性が求められる予定である。熱水中の細菌は、鳩間海丘で各種ビーズ状担体を固着面として内蔵した現場培養装置 (ISCS) を噴出孔内に設置し、数日以内に回収した。動物の共生細菌相は、エネルギー源の推定解析によってデータが得られる。また、バイオマーカー (脂肪酸・キノン) による細菌の多様性を解析するための生物・岩石・堆積物サンプルも得ることができた。脂肪酸解析用には、共生細菌保有動物のほか、11本の柱状採泥試料および20個の岩石試料が採集され、これら試料から全脂肪酸の抽出を行い、特に真正細菌の構成が検討される。キノンについては、ヘイトウシカイヒバリガイを鰓・足・外套膜・その他の部分に分けてキノプロファイル法による分析が行われている。ヘイトウシカイヒバリガイの鰓の中には、細菌が共生しているため異なった分子種が得られるはずである。その分子種から微生物の系統を推定でき、遺伝子を用いた共生微生物の系統も解析されることになっているので、それらの結果と比較を行うことに

より、より正確な共生微生物の系統が明らかになる。

ベントスについては少なくとも、海綿動物から1種、刺胞動物から1種、環形動物からハオリムシを含む10種、軟体動物から11種、節足動物から8種、脊椎動物から3種が熱水噴出域に出現した。これらは熱水噴出孔生物群集でしか生存できない固有種と周辺の深海域から入り込んでいるゲスト種がいると思われるが区別はしていない。これらのサンプルは、各分類群の専門家により形態分類学的な研究が進められている。また、共生細菌保有動物であるシンカイヒバリガイ類やハオリムシ類は、遺伝子による系統解析が実施されている。

4.5. 現存量の把握

細菌の現存量解析用サンプルは、多様性解析と同じものが用いられる。

ベントスの現存量について定性的に述べると、第四与那国海丘・鳩間海丘ともに熱水系生物群集を構成する優占種は、ゴエモンコシオリエビ、ヘイトウシンカイヒバリガイ、ハオリムシ、ハイカブリニナ類、エンスイカサガイ類、オハラエビ、シンカイハナカゴ、ヘイトウシンカイヒバリガイに寄生するウロコムシ類と思われる。これに続くのがジゴクモエビ類 *Lebbeus* sp.、フネカサガイ類、シンカイシタダミ類 *Margarites* sp.、イトエラゴカイ類 *Paralvinella* sp. と思われる。また、シンカイヒバリガイとシンカイエボシガイの個体群は小さいと思われる。これらのうち最も高い個体群密度を示すのは、ゴエモンコシオリエビ、ヘイトウシンカイヒバリガイ、ハイカブリニナ類のいずれかと思われる。また、バイオマスはゴエモンコシオリエビもしくはヘイトウシンカイヒバリガイが最も高くなるであろう。

4.6. 生産量の把握

フリーリビング細菌増殖量を評価するDiffusion chamberと、附着性細菌増殖量を評価する微生物増殖用トラップともに設置・回収に成功した。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昨年度の潜航調査時に放流したヘイトウシンカイヒバリガイは、全て死亡しており実験データとしては有効ではないと思われる。今回も昨年度よりネットに収容する個体数を減らして数字ナンバリングによる標識放流を両海域で試みた。化学物質(カルセインと塩化ストロンチウム)標識放流法では、第四与那国海丘では8日間、鳩間海丘では6日間放流したのち回収した。この間の成長速度から生産量が見積もられると期待される。

4.7. 熱水噴出孔生物の生理と発生

水温・酸素濃度・硫化物濃度の変化に伴った熱水噴出孔生物の代謝変化を測定するために、生きたままの状態ではハイカブリニナ類、エンスイカサガイ類、フネカサガイ類を研究室まで持ち帰ることができた。また、ハオリムシの発生段階を研究室で観察しているが、少なくとも鹿児島湾のサツマハオリムシ *Lamelligruchia satuma* より発生速度が速いことがわかった。

5. おわりに

今回の調査は、熱水生態系の規模を可能な限り定量的に把握しようとして実施したものである。そのために、地球化学・微生物学・動物学の研究者が組織的に調査に取り組み、ほぼ目標通りのデータ・サンプルを得ることができた。データ・サンプルのほとんどはまだ解析中であるが、多くの成果を期待したい。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、情報業務課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) 藤倉克則, 橋本惇, 藤原義弘, 奥谷喬司(1995) 相模湾初島沖化学合成生物群集の群集生態. JAMSTEC深海研究第12号: 227-241.
- 2) Hashimoto, J., S. Ohta, K. Fujikura, & T. Miura (1995) Microdistribution Pattern and Biogeography of the Hydrothermal Vent Communities of the Minami-Ensei Knoll in the Mid-Okinawa Trough, Western Pacific. *Deep-Sea Research* 42 (4) : 577-598.
- 3) Ishibashi, J., Y. Sano, H. Wakita, T. Gamo, M. Tsutsumi, and H. Sakai. (1995) Helium and carbon geochemistry of hydrothermal fluids from the Mid-Okinawa Trough Back Arc Basin, southwest of Japan. *Chemical Geology* 122 : 1-15
- 4) 木村政昭, 大森保, 井澤英二, 加藤祐三, 小野典明, 田中武男, 小池隆之, 西岡聖児(1990) 沖縄トラフ伊是名海穴で新たに発見されたベントシステム及び熱水性鉱床. 第7回「しんかい2000」研究シンポジウム報告書: 87-98.
- 5) 木下正高, 加賀谷一茶, 館川恵子, J. C. Sibuet, C. S. Lee, 松本剛, YK00-06 Leg 2航海乗船研究者一同(2001) 沖縄トラフ石垣第四与那国海丘北方域の熱水地帯マッピング. 第17回しんかい2000研究シンポジウム予稿集: 103-104.
- 6) 中野綾子, 松村美奈子, 石橋純一郎(2001) 南部沖縄トラフ・鳩間海丘における熱水の化学組成. JAMSTEC深海研究18号: 139-144.
- 7) 太田秀(1990) 沖縄海盆伊平屋海凹の熱水性生物群集. 第7回「しんかい2000」研究シンポジウム報告書: 145-156.
- 8) 酒井均, 山野誠, 田中武男, 蒲生俊敬, 金銀 石橋純一郎, 下島公紀, 松本剛, 大森保, 柳沢文孝, 堤眞(1990) 「しんかい2000」による伊是名海穴熱水系の地球化学的研究. 第6回しんかい2000研究シンポジウム特集号: 69-85.
- 9) Sarrazin, J., and S. K. Juniper (1999) Biological characteristics of a hydrothermal edifice mosaic community. *Marine Ecology Progress Series* 185, 1-19.
- 10) Takai, K. and K. Horikoshi (1999) Genetic diversity of

archaea in deep-sea hydrothermal vent environments. *Genetics*. 152 : 1285-1297.

- 11) Takai, K. and K. Horikoshi (2000) *Thermosipho japonicus*, sp. nov., a barophilic extremely thermophilic bacterium isolated from a black smoker chimney of a deep-sea hydrothermal vent. *Extremophiles* 4 : 9-17.
- 12) 高井研 , 堀越弘毅(1999) 深海底熱水孔環境における微生物の多様性 - 地下生物圏への窓 - .月刊海洋 . 19:190-196 .
- 13) 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 .
- 14) Yamamoto T., T. Kobayashi, K. Nakasone and S. Nakao (1999) Chemosynthetic community at North Knoll, Iheya Ridge, Okinawa Trough. *JAMSTEC J. Deep Sea Res.*, No.15 : 19-24
- 15) 渡辺一樹(1999) 沖縄トラフ南部 , 鳩間海丘の海底熱水活動 . 第16回しんかいシンポジウム予稿集 .29-30 .

(原稿受理 : 平成13年7月30日)



写真1 第四与那国海丘のSite 2Yで見られた白色沈殿物。
Photo 1 White deposit at Site 2Y on the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll.



写真2 第四与那国海丘のSite 7Yの熱水噴出孔生物群集。ヘイトウシンカイヒバリガイ *Bathymodiolus platifrons* , オハラエビ類 *Alvinocaris* sp. が集団形成。
Photo 2 Dense clusters of the deep-sea mussel, *Bathymodiolus platifrons*, and shrimp, *Alvinocaris* sp. at Site 7Y on the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll.



写真3 第四与那国海丘のSite 7Yにあるブラックスモーカー。
Photo 3 Black smoker chimney at Site 7Y on the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll.

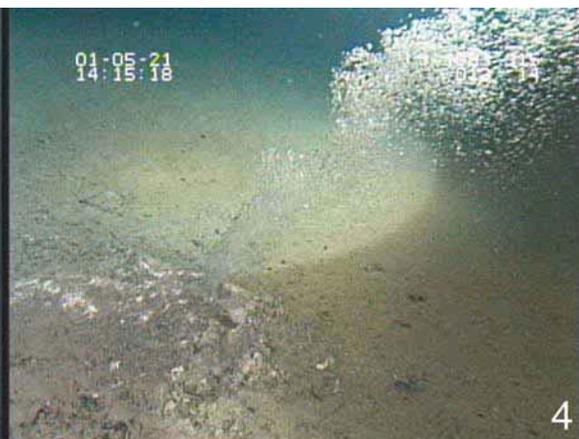


写真4 柱状採泥の後に噴き出したガスハイドレート。第四与那国海丘のSite 15Y。
Photo 4 Gas hydrate from the sediments after sampling a core at Site 15Y on the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll.



写真5 第四与那国海丘のSite 18Yにあるハオリムシの集団。
Photo 5 Dense cluster of vestimentiferan tube worms at Site 18Y in the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll.



写真6 微量採水器による採水。第四与那国海丘Site 10Y。
Photo 6 Water sampling by the Syringe sampler at a *Bathymodiolus* aggregation at Site 10Y on the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll.



写真7 外套膜を広げるシンカイヒバリガイ類。これがシ
ンカイヒバリガイ *Bathymodiolus japonicus* であろうと
思われる。第四与那国海丘Site 18Y。

Photo 7 Extended mantle of *Bathymodiolus* mussels at Site 18Y on the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll. This species is probably *Bathymodiolus japonicus*.

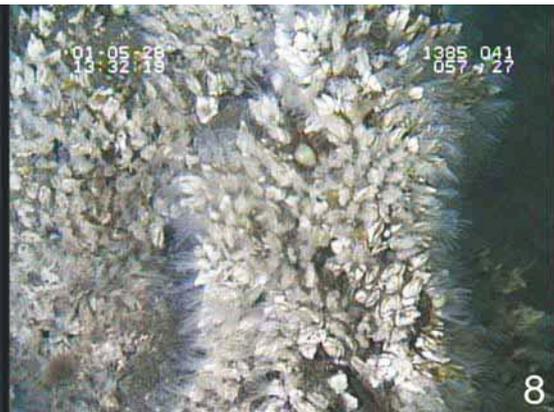


写真8 第四与那国海丘のSite 18Yにあるシンカイハ
ナカゴ *Neoverruca* sp.の集団。

Photo 8 Dense cluster of the barnacle, *Neoverruca* sp., at Site 18Y on the Dai-Yon (No. 4) Yonaguni Knoll.



写真9 鳩間海丘のSite 2HにあるNo.1ビッグチムニー。
Photo 9 No. 1 active big chimney at Site 2H on the Hatoma Knoll.

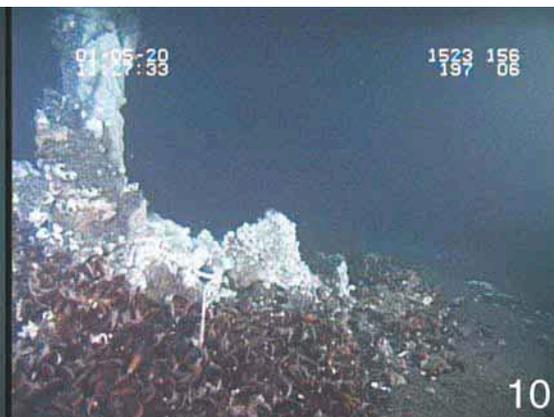


写真10 チムニーの周りに形成されたヘイトウシ
ンカイヒバリガイ *Bathymodiolus platifrons* の集団。
鳩間海丘Site 4H。

Photo 10 Dense cluster of the deep-sea mussel, *Bathymodiolus platifrons*, around active chimneys at Site 4H on the Hatoma Knoll.



写真11 熱水噴出孔に設置した熱水中の細菌を採集する
ISCS (in-situ cultivation system) 鳩間海丘Site 3H。
Photo 11 Recovery of an ISCS (in-situ cultivation system).
The ISCS enabled collection of bacteria from the
vent fluids.

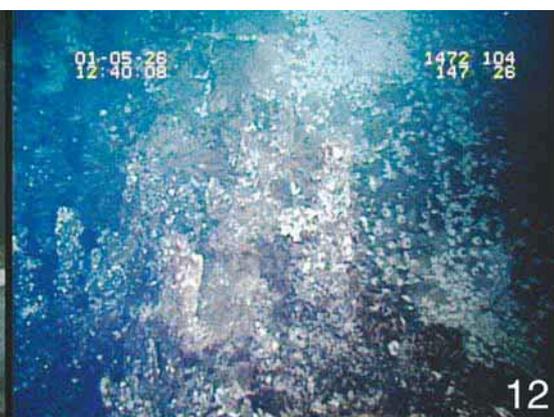


写真12 鳩間海丘のSite 3Hにあるチムニー群。
Photo 12 Many chimneys at Site 3H on the Hatoma Knoll.