

中部沖縄トラフ海底熱水活動の地球化学的研究： 「しんかい2000」第416回潜航報告および熱水の 主要化学成分濃度からみた熱水活動の特徴

蒲生俊敬^{*1} 酒井 均^{*1} 金 銀洙^{*1} 下島公紀^{*1} 柳澤文孝^{*1}
石橋純一郎^{*2} 大森 保^{*3} 山野 誠^{*4} 野尻幸宏^{*5}
田中武男^{*6} 松本 剛^{*6} 満澤巨彦^{*6} 長沼 毅^{*6}

1988年の調査で海底熱水活動の発見された、沖縄トラフ中軸部・伊平屋凹地（通称 CLAM Site, 27°33'N, 126°58'E）を、「しんかい2000」第416回潜航によって調査し、熱水が活発に湧出している2箇所のベントより、熱水・底生生物および岩石試料を採取した。熱水の最高温度は、昨年同海域で観測された220℃とほぼ等しい216℃であった。

熱水活動の化学的特徴を明らかにするために、CLAM Site では本潜航を含めて3回、また伊是名海穴（通称 JADE Site, 27°16'N, 127°04'E）では6回の潜航で熱水の採取が行われ、合計約30の熱水試料を採取した。JADE Site のブラックスモーカー試料（320℃）は、Mg と SO₄ 濃度がいずれもゼロの熱水エンドメンバーであることが解った。このエンドメンバーは、他の中央海嶺の熱水に比べて K と Li に富み、かつ高濃度の NH₃ を含むことから、熱水循環の過程で島弧の安山岩一流紋岩質マグマと相互作用を行い、かつ海底堆積物中の有機物分解の影響を受けたことが示唆される。また、CLAM Site の熱水は JADE Site に比べて、pH・アルカリニティー・NH₃ および Li の値が明らかに高い。これは熱水循環の起こり方が両熱水活動域で異なっているためとみられる。

Geochemical studies on the hydrothermal activity of the Mid-Okinawa Trough : A report on dive 416 of the "SHINKAI 2000" and characterization of hydrothermal fluids from concentrations of major chemical components

Toshitaka GAMO^{*7} Hitoshi SAKAI^{*7} Eun-Soo KIM^{*7}

- *1 東京大学海洋研究所
- *2 東京大学理学部
- *3 琉球大学理学部
- *4 東京大学地震研究所
- *5 国立環境研究所
- *6 海洋科学技術センター
- *7 Ocean Research Institute, University of Tokyo
- *8 Faculty of Science, University of Tokyo
- *9 Faculty of Science, University of the Ryukyus
- *10 Earthquake Research Institute, University of Tokyo
- *11 National Institute of Environmental Science
- *12 Japan Marine Science and Technology Center

Kiminori SHITASHIMA^{*7} Fumitaka YANAGISAWA^{*7}
 Jun-ichiro ISHIBASHI^{*8} Tamotsu OOMORI^{*9}
 Makoto YAMANO^{*10} Yukihiro NOJIRI^{*11}
 Takeo TANAKA^{*12} Takeshi MATSUMOTO^{*12}
 Kyohiko MITSUZAWA^{*12} and Takeshi NAGANUMA^{*12}

Dive 416 of the "SHINKAI 2000" was dedicated to investigate the CLAM Site (27°33'N, 126°58'E) at the eastern foot of the Iheya Ridge in the mid-Okinawa Trough, where submarine hydrothermal activity was discovered in 1988. Hydrothermal fluids, biological and rock samples were taken from two active vents in the CLAM Site. Maximum temperature of the fluids was 216°C, being almost equal to the maximum value of 220°C recorded in 1988.

In order to elucidate chemical characteristics of hydrothermal fluids in the Mid-Okinawa Trough as a sediment hosted ridge, about 30 fluid samples from the JADE Site on the eastern wall of the Izena Cauldron (27°16'N, 127°04'E) as well as the CLAM Site were analyzed for dissolved major and minor components. A black smoker sample from the JADE Site was identified as a hydrothermal endmember because of null concentration of Mg and SO₄. The JADE endmember was found to be richer in K and Li than those of the mid-oceanic ridges so far observed, suggesting a contribution from island-arc type andesitic to rhyolitic magma. NH₃ concentration (5mM) was significantly high, reflecting decomposition of organic material in sediments. In addition, it was found that the CLAM Site fluids have higher pH, NH₃, Li and alkalinity than those in the JADE Site, showing that the mechanism of hydrothermal circulation might differ between the JADE and the CLAM sites.

1. はじめに

沖縄トラフは琉球海溝の背弧海盆で、熱水活動を伴う海底拡大の初期段階にあると考えられてきた。1988年に行われた「ゾンネ号」(西ドイツ) SO-56航海、「かいよう」(海洋科学技術センター)によるディープトウ観測、さらに「しんかい2000」(海洋科学技術センター)による潜航調査によって、沖縄トラフ中軸部の伊是名海穴(通称 JADE Site, 27°16'N, 127°04'E)と伊平屋凹地(通称 CLAM Site, 27°33'N, 126°58'E)に、それぞれ生物群集を含むかなり大規模な熱水活動が発見された(Halbach et al., 1989; 門馬ほか, 1989; 中村ほか, 1989; 木村ほか, 1989; 田中ほか, 1989)。沖縄トラフは、世界的にも例の少ない、表面を堆積物で覆われたいわゆる「堆積海嶺(Sediment hosted ridge)」であることから、その熱水活動の化学的性質の解明がことに重要視されている。

1989年6月から7月の「しんかい2000」潜航調査によって、両サイトの海底熱水系がさらに詳しく調査され、日本近海としては初めての高温のブラックスモーカーがJADE Siteで発見された(中村, 1989)。熱水の地球化学的特徴を明らかにするために、ブラックスモーカーを含め、両サイトの多数のベントより、約30に達する熱水試料が採取・回収された。試料の採取方法および熱水の温度測定については、本誌・酒井ほか(1990)を参照されたい。表1に熱水試料採取の行われた潜航の一覧を示す。このように本格的な海底熱水試料が多数採取されたのは、当海域では勿論のこと日本の近海でも初めてのことである。

ここでは、まず著者のひとり(蒲生)が潜航した第416回潜航(CLAM Site)の概要と、海底の観察結果について報告する。さらに表1の潜航調査を通じて得られたすべての熱水試料の主要化学

表1 熱水の採取が行われた1989年度「しんかい2000」沖縄トラフ潜航リスト
Table. 1 Lists of 1989 "SHINKAI 2000" dives during which hydrothermal fluids samples were taken.

Dive No.	Date	Site	Observer
413	6.16	JADE	酒井 均
414	6.18	JADE	松本 剛
415	6.20	JADE	山野 誠
416	6.22	CLAM	蒲生俊敬
422	7.12	JADE	田中武男
423	7.13	JADE	田中武男
424	7.14	JADE	田中武男
426	7.21	CLAM	溝沢巨彦
427	7.22	CLAM	長沼 毅

成分濃度をもとに、沖縄トラフ海底熱水活動の地球化学的特徴を明らかにしたい。

2. 第416回潜航の概要

本潜航は1989年6月22日に、沖縄トラフ中軸部 CLAM Site で行われた。同海域は1988年の「しんかい2000」潜航366-368で初めて潜航調査が行われ、水温220℃に達する透明な熱水の湧出が確認されている(田中ほか, 1989)。第416回潜航は、熱水試料ならびに熱水湧出域周辺の生物試料を採取することを主目的として、以下のメンバーで行われた。

潜水船船長：桜井利明
潜航士：赤澤克文
オブザーバー：蒲生俊敬

また、「しんかい2000」の外装備は以下の通りであった。

- ① 回転バルブ式 Ti 多筒採水器(左舷側に固定、船内に電源部、酒井ほか(1990)参照)
- ② アルビン型採水器(マニピュレーターで保持、電動グラブ用の電源使用、Von Damm et al. (1985a) 参照)
- ③ 400℃温度計(離合社、ベンチタイプ温度計、多筒採水器用吸入口と先端を揃えて括り合わせたものを、サンプルバスケット外側のホルダーに収納)

- ④ 塩化ビニール製生物試料保存容器(サンプルバスケット内に固定)
- ⑤ 生物トラップ×2(生物試料保存容器内に収納)
- ⑥ アクリル製 M 式採泥器×2(サンプルバスケット外側のホルダーに収納)

3. 潜航記録

潜航海域の海底地形図と「しんかい2000」の航跡を図1に示す。

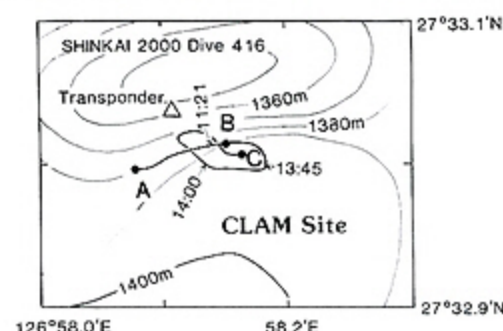


図1 「しんかい2000」潜航416の航跡。A, B, Cはそれぞれ着底点、第1地点、及び第2地点を指す。矢印付きの数字は時刻である

Fig. 1 "SHINKAI 2000" Dive 416 transect and bathymetry map of the CLAM Site. A, B and C stand for the landing point, the first sampling site, and the second sampling site, respectively. Four digit numbers with arrows indicate time.

以下、潜航中の観察・作業記録を抄録した。現場の映像は、海洋科学技術センター保管のステール写真及びビデオテープに記録されている。

時刻	観察・作業記録
09:21	ハッチ閉鎖
09:41	潜航開始
10:39	400℃ 温度計データの記録開始 (D=1300m)
10:51	海底面見える (D=1372m), 泥をかぶった露岩のところどころに白い海綿が付着している
11:05	海底は礫混じりの泥, 所々に海綿の付着した露岩あり (D=1390m) 流速: 約180度方向より0.3ノット (図1のA点)
11:19	海綿の生息密度が増加 (D=1386m)
11:21	白色変色帯に到達, 直径1m程度の大きさで海底一面にべったりと白色を呈した場所と, 海底面のひび割れに沿ってのみ白色の帯が走る場所あり, その他の海底面も白色物質が点在, 熱水の湧出による海水のゆらぎを確認
11:24	比較的規模の大きい熱水活動域に接近する, コシオリエビ多数生息
11:25	大きな割れ目から透明の熱水湧出, エビ・ハオリムシ・イガイも多数生息 割れ目はさらに四方に延び, 割れ目に沿って白色物質が付着し, 割れ目の所々から熱水のゆらぎが見える, 着底 ここを第1地点 (図1のB点) とする (D=1395mm) (第1地点で作業, 13:24まで)
11:48	多筒式採水器による1本目の採水 (11:54まで), 写真1参照
11:56	2本目の採水 (12:05まで)
12:10	生物トラップ (2台) 設置
12:13	採水を行った熱水湧出口より, 岩石に付着したハオリムシとイガイを岩石ごと採取
12:20	3本目の採水 (12:24まで)
12:21	温度計が瞬間的に100.1℃を記録

(第1地点の最高温度)

12:49	M式採泥器によって, 海底面の白色物質をそぎ取ろうと試みるが, 表面が堅いため採取できず
13:04	生物トラップを回収 (写真2)
13:14	アルビン型採水器による採水 (13:16まで) (写真3参照)
13:24	熱水活動から約10m 離れ, 褐色の海底面を斑点状に覆う白色のもやもやした物質を, M式採泥器でこそぎ取ろうとしたが, 白色物質はほとんど入らず, 採泥器の蓋を閉じ, 採取された海底直上水を熱水のバックグラウンド試料とする
13:37	コシオリエビに覆われた傾いたチムニー (全体からゆらぎあり) を観察
13:38	コシオリエビとハオリムシに覆われた高まり (わずかにゆらぎあり) を観察
13:39	まばらに海綿の付着した露岩が散在している (うすく堆積物におおわれている) 海底面の白いすじもまだ所々に見られる
13:41	シロウリガイの死殻あり
13:42	露岩の大規模な高まり, コース150度とする
13:44	露岩の上にハオリムシの大群集 (わずかにゆらぎあり, コシオリエビ散見)
13:45	平坦な海底面にシロウリガイの死殻多数 (D=1394m)
14:00	海綿の付着した露岩散見。露岩の急斜面を上昇 (D=1370m)
14:11	海底面に白い物質が散在
14:11	白色変色帯 (熱水活動域) に突入 (D=1393m)
14:12	海底の特徴は第1地点と類似, ひび割れが無数に走り, その隙間から熱水のゆらぎあり, コシオリエビと普通のエビ多数, 白いすじがすべて割れ目なのかどうかははっきりしない, 割れ目になりかけた場所にまず白い筋が出来るのかもしれない, 割れ目によって海底面は無数の平板状の岩石に分割されている, ひび割れが進行すると, 隣合った岩石 (厚み10~20cm) に段差ができたり, 陥没したり盛り上がったたりするようである, 平板状

の岩石の下に空洞の見える場所もある(写真4参照)。ワイマス海盆で観察されるバゴタ型チムニーのように、熱水噴出孔が底状に横方向に成長するために、その下側に空洞が出来るとも考えられる、このような熱水活動域の回りを、海綿に覆われた露岩がとり囲んでいる

- 14:23 「しんかい2000」の「おでこ」と同じくらいの高さの高まりのふもとに着底、第2地点とする(図1のC点)、第1地点に比べて地形の凹凸が激しい、また海底面の色が第1地点に比べるとやや黒っぽい、高まりの斜面にはコシオリエビと普通のエビが無数に取りついている、イガイも散見(D=1394m)
(第2地点で作業、14:43まで)
- 14:29 4本目の採水(14:31まで)
- 14:30 水温216℃を記録(第2地点での最高温度)
- 14:33 5本目の採水(14:37まで)
- 14:37 6本目の採水(14:41まで)
- 14:43 熱水湧出部の岩石を採取
- 14:46 離底開始
- 15:47 海面に浮上
- 16:11 ハッチ開放

4. 熱水の化学分析

採取された熱水試料は、「しんかい2000」の揚収後ただちに「なつしま」船上で処理を行った。外部圧力の降下によって気液分離を起こしている試料は、気体と液体に分けて回収した。以下では、主として液体部分の化学分析結果について考察する。なお気体成分については別の報告がある(酒井ほか, 1990;石橋ほか, 1990)。

試料の採取後ただちに船上において、pH・アルカリニティー・ケイ酸およびアンモニアの分析を行った。pHとアルカリニティーの測定には、ポータブルpHメータ(横河, Model PH82)と自動ピストンビュレット(Metrohm, 665 Dosimat)を用い、測定中は試料と空気が接触しないようにした。アルカリニティーの計算はグラン・プロット法によった。またケイ酸とアンモニアはそれぞれ常法によって比色分析し、定量に

は光電比色計(東京光電, ANA-18)を用いた。

さらに溶存気体・主要陽イオン・主要陰イオン・安定同位体比・微量重金属などの陸上分析のために、熱水試料を分取・保存して持ち帰った。原子吸光法により、Mg, Ca, K, Li, Srなどの主要陽イオンと、Fe, Co, Cd, Mnなどの微量成分を、またイオンクロマトグラフィーによってClおよびSO₄を測定した。

すでに分析結果の一部は公表されている(Gamo and Sakai, 1989;Sakai et al., 1990;Gamo et al., 1990)が、以下ではこれらを取りまとめ、現時点までに明らかとなった沖縄トラフ海底熱水の化学的特徴について考察する。

3. 沖縄トラフ熱水の地球化学

3.1 MgおよびSO₄濃度

一般に海底熱水系では、熱水の温度が150~200℃以上になると、マグネシウム(Mg)と硫酸(SO₄)の濃度はほとんどゼロになることが、室内実験からも現場の実測データからも知られている。これは海底下にしみこんだ海水がマグマによって加熱されるにつれて、Mgは生成する変質鉱物物に取り込まれ、またSO₄はCaSO₄となって沈積するためと考えられている(例えばEdmond and Von Damm, 1983)。

沖縄トラフの熱水の場合も、JADE Site(伊是名)のブラックスモーカーから採取された熱水試料(温度:320℃)は、Mg:1.0 mmol kg⁻¹、SO₄:0 mmol kg⁻¹(通常の海水中の濃度は、それぞれ53および28 mmol kg⁻¹)で、両成分ともほとんど濃度ゼロとみなしてよく、これまでに観測された中央海嶺の熱水系の熱水エンドメンバーと同じ性質を持つことが解った。

熱水試料のMgとSO₄濃度を、すべてX-Y軸上にプロットすると図2のようになり、通常の海水(ambient seawater)と原点(エンドメンバー)とを結ぶ直線が得られる。このことは、今回採取された熱水試料は熱水のエンドメンバー(Mg濃度0)が海底上に噴出した際に、周囲の通常海水(Mg:53)によっていろいろな割合に希釈されたものであり、Mg濃度がその希釈率に対応することを示している。

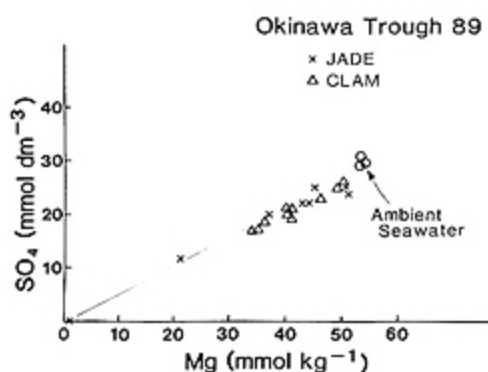


図2 1989年度に沖縄トラフから採取された熱水試料のMg-SO₄関係

Fig. 2 Mg-SO₄ relationship for the hydrothermal fluid samples from the Okinawa Trough in 1989.

3. 2 Cl濃度

熱水の沸点は、図3に示したように水圧の増加

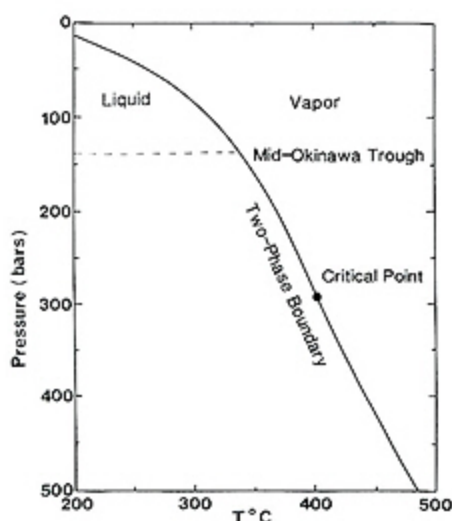


図3 海水の圧力-沸点関係 (Bischoff and Rosenbauer, 1984)

Fig. 3 Two-phase boundary of seawater as a function of temperature and pressure (from Bischoff and Rosenbauer, 1984).

とともに上昇する。JADE Siteは水深約1400mなので、沸点は330℃程度である。したがって、東太平洋海嶺で観測されたような350℃の熱水がもし沖縄トラフの海底で生成されると、この熱水は海底に噴出する前に一部沸騰して気相と液相とに分離してしまう。JADE Siteで発見されたブラックスモーカーの温度は、320±10℃ (酒井は

か, 1990)で、わずかに上記の沸点よりは低い。しかし、この測定値が熱水の最高温度であるとは限らないので、もっと高温の熱水が海底にあれば、そこでは沸騰が起こり得る。

熱水が沸騰したかどうかは、熱水の主要化学成分、特に塩素量(Cl濃度)に反映される。気相と液相との分離がおこれば、気相にはガス成分などの揮発性物質が移動すると同時に、液相の塩素濃度は増加する。もし、熱水エンドメンバーの塩素量が、通常の海水に比べて高かったりあるいは低かったりすれば、その熱水は相分離を起こした液相あるいは気相を含んでいる可能性がある。例えば、ファン・デ・フカ海嶺 (Massoth et al., 1989) や、北フィジー海盆 (Grimaud et al., 1989) では、海水と大きくかけ離れたCl濃度を持つ熱水エンドメンバーが得られ、海底下での熱水の沸騰が示唆されている。

沖縄トラフの熱水の場合は、図4(a)に示したように、Mg濃度に伴うClの変化はほとんど認められない。したがって、海底下での沸騰はほとんど起こっていないと考えられる。ブラックスモーカーで計測された温度が、ほぼ熱水エンドメンバーの温度を示していると考えてよさそうである。沸点到極めて近いことから、活動が1989年の状態よりも僅かでも強まれば沸点到達するきわどい温度である。

なお、図4(a)に示した熱水試料のCl濃度が、Ambient Seawaterに比べてわずかに低いのは次の理由による。今回用いた回転バルブ式熱水採水器には、採水口から採水筒までの間に採水量の数%程度のDead Volumeがあり、そこには予め蒸留水を満たした (酒井ほか, 1990参照)。このため熱水試料はこの蒸留水によってわずかに薄められ、熱水試料の塩素濃度は減少した。一方バックグラウンド試料 (○印) は、このようなDead Volumeのない水密性のM式採泥器を用いて採取したので、現場の海水のCl濃度を正しく示している。

本研究で得られた熱水試料の化学成分濃度は、Clの測定値を用いて、蒸留水 (Cl=0) による希積分を補正したものである。熱水のCl濃度がバックグラウンド海水と同じ (550 mmol l⁻¹) と仮定し、この値とClの実測値から、蒸留水と熱

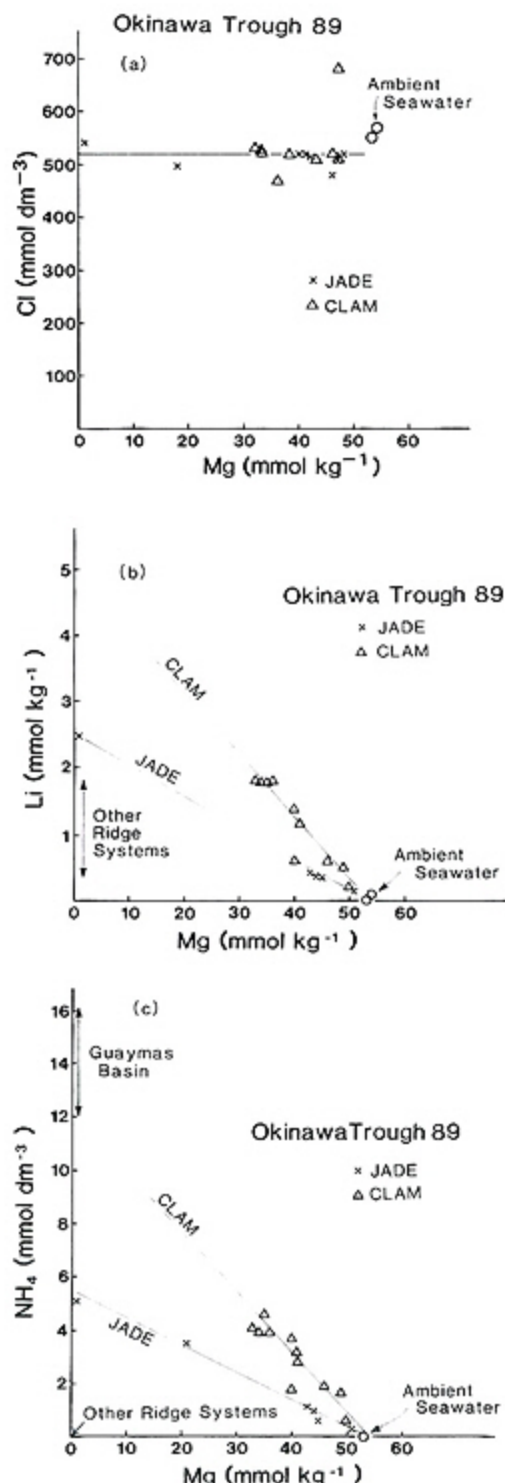


図4 1989年度に沖縄トラフから採取された熱水試料の(a) Mg-Cl, (b) Mg-Li, および(c) Mg-NH₄ 関係

Fig. 4 (a) Mg-Cl, (b) Mg-Li and (c) Mg-NH₄ relationships for the hydrothermal fluid samples from the Okinawa Trough in 1989.

水との混合比を求めた。他の化学成分について、それぞれの実測値をこの混合比を用いて補正し、蒸留水の影響を除いた真の値を計算した。

3. 3 中央海嶺系の熱水と比較

表2は、微量重金属データも含めた JADE Site の熱水エンドメンバー（ブラックスモーカー試料）の化学組成を、これまでに報告例のある中央海嶺の拡大軸の熱水と比較したものである。ここで中央海嶺とは、東太平洋の11-21°N, ワイマス海盆・南ファンデフカ海嶺および大西洋中央海嶺である。これらのうちでワイマス海盆のみが「埋積海嶺」で、それ以外の熱水系は堆積物をほとんど伴わない Sediment starved ridge である。なお CLAM Site については、エンドメンバー試料がまだ採取されていないこと、Mg をゼロに外挿したものがエンドメンバーと見なせるかどうかとも問題があるので、この表からは除いてある。

表2から明らかなように、沖縄トラフ熱水は、これまでに知られている熱水エンドメンバーの中で、最も K と Li の濃度が高い。一方 Ca 濃度は比較的低い。これらの特徴は、沖縄トラフの熱水循環に関与する深部のマグマ成分が、大洋中央海嶺のような玄武岩質ではなく、K や Li に富む島弧系の安山岩一流紋岩質であることを示唆している。

JADE Site の熱水は多量のアンモニアを含んでいることも注目しなければならない。これまでに熱水中にアンモニアの検出されているのは、カリフォルニア湾のワイマス海盆 (Von Damm et al., 1985b) や、ゴルダ海嶺南部のエスカナバトラフ (Campbell et al., 1988a) のような「埋積海嶺」の熱水のみである。このような海域では、熱水が厚い堆積層を貫いて噴出するため、堆積物中に含まれる有機物が分解されてアンモニアが生じると言われており、沖縄トラフでも同じ現象が起っているとみられる。安山岩質マグマに含まれるアンモニアの寄与もあるかもしれない。

アンモニアを含むために、JADE の熱水エンドメンバーは、ワイマス海盆を除くいずれの中央海嶺系の熱水よりも pH が高い。高い pH は金属硫化物の溶解度を低下させるので、海底下での硫化物の析出を促進していることが推察される。

表2 沖縄トラフ JADE Site と、世界各地の海底熱水エンドメンバーの化学組成の比較
Table. 2 Comparison of end-member concentrations between the JADE Site of the Okinawa Trough and other ridge systems in the world.

Component	JADE	GUAYMAS	21°N EPR	11~13°N EPR	SJFR	MAR	SEAWATER
Li (μM)	2480	630~1076	891~1322	484~884	1110~1810	411~849	26
Na (mM)	425	475~513	432~510	290~596	700~800	509~584	463
K (mM)	71.9	37.1~49.2	23.2~25.8	18.7~32.9	37.3~51.6	17.0~23.9	9.79
Rb (μM)		57~86	27~33	15~25	28~37	10~10.8	1.3
Be (nM)		12~91	10~37	95~150		38.0~38.5	0.02
Mg (mM)	0	0	0	0	0	0	52.7
Ca (mM)	22.3	26.6~41.5	11.7~20.8	10.6~54.8	77.3~96.4	9.9~26.0	10.2
Sr (μM)	94	160~253	65~97	38~182	230~312	50~99	87
Ba (μM)	59	>7~>24	>7~>15				0.14
Al (μM)	0	0.9~7.9	4.0~5.2	12.9~20.0	1.9	5~5.3	0.005
Mn (μM)	110	128~236	699~1002	742~2932	2610~4480	491~1000	<0.001
Fe (μM)	2.8	17~180	750~2429	1640~10760	10300~18700	1640~2180	<0.001
Co (nM)	2.7	<5	22~227				0.03
Cu (μM)	0.003	<0.02~1.1	<0.02~44		<2	10~17	0.007
Zn (μM)	7.6	0.1~40	40~106	2~105	<900	47~50	0.01
Ag (nM)		<1~230	<1~38				0.02
Cd (nM)	1.3	<10~46	17~180	<1~70			1
Pb (nM)	36	<20~652	183~359	9~270			0.01
Se (nM)		0~92	0~72		<1		2.5
As (nM)		283~1074	<30~452				27
pH (25°C)	4.7	5.9	3.3~3.8	3.1~3.7	3.2	3.7~3.9	7.8
Alk (mM)	1.9	2.8~10.6	-0.19~-0.50	-0.28~-1.02	~0	-0.06~-0.24	2.3
NH ₄ (mM)	5.0	10.7~15.6	<0.01				<0.01
SO ₄ (mM)	0	0	0		0		27.9
Cl (mM)	550	581~637	489~579	338~760	896~1090	559~659	540
SiO ₂ (mM)	12.9	9.3~13.8	15.6~19.5	14.3~21.9	22.7~23.3	18.2~22.0	0.18
H ₂ S (mM)	12.4	3.80~5.98	6.57~8.37	2.9~12.2	3.0~4.4	5.9	0

(mM: mmol kg⁻¹, μM : $\mu\text{mol kg}^{-1}$, nM: nmol kg⁻¹)

JADE: JADE Site (Izena Cauldron) black smoker (This work)

GUAYMAS: Guaymas Basin (Von Damm et al., 1985b)

21°N EPR: 21°N East Pacific Rise (Von Damm et al., 1985a)

11~13°N EPR: 11~13°N East Pacific Rise (Bowers et al., 1988)

SJFR: Southern Juan de Fuca Ridge (Von Damm and Bischoff, 1987)

MAR: Mid Atlantic Ridge (Campbell et al., 1988b)

3. 4 JADE Site と CLAM Site との比較

今回の結果で特に注目すべきことは、同じ沖縄トラフでも、JADE Site (伊是名) と CLAM Site (伊平屋) とで熱水の性質が明らかに異なっていることである。

図4(b)および(c)は、Mg と Li および NH₄ との関係性を JADE と CLAM の両サイトについてプロ

ットしたものであるが、同じ Mg 濃度に対する Li および NH₄ の値は、いずれも後者の熱水の方が高い。後で図5に示すように、pH とアルカリニティーについても同様の傾向がみられる。また図には示していないが、Mn と Fe についても、明らかにサイト間で別々の直線が得られる。このような特徴は、熱水活動の起こり方が両サイト間で異なることを強く示唆している。

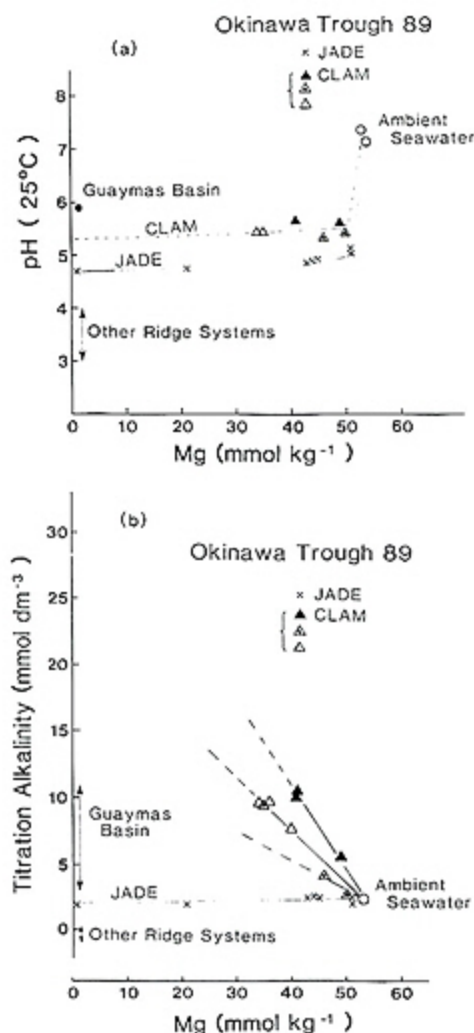


図5 1988年度に沖縄トラフから採取された熱水試料の(a) Mg-pH, および(b) Mg-TA (アルカリニティー) 関係。CLAM サイトのデータのうち ▲および△は第416潜航の第1および第2採水地点, △は第426, 427潜航の際の採水地点のデータを示す

Fig. 5 (a) Mg-pH and (b) Mg-TA (Titration Alkalinity) relationships for the hydrothermal fluid samples from the Okinawa Trough in 1989. As to the CLAM Site data, ▲ and △ stand for the data at the first and the second sampling site, respectively, of the dive 416, and △ the sampling sites of the dives 426 and 427.

CLAM Site の熱水が, JADE Site に比べて高い pH やアルカリニティーを示すのは, 炭酸カルシウムの溶解もしくは硫酸還元によって有機物から生

じる重炭酸イオンの寄与が余分にあることを示唆している。またアンモニア濃度の高いことも, 有機物の分解量が多いことを示唆する。熱水中に含まれる H_2S と SO_4 濃度および各々の硫黄の同位体比を測定した結果によると, CLAM Site の熱水中では硫酸還元が進行中であることがわかる (Sakai et al., 1990; 金ほか, 1990; Gamo et al., 1990)。硫酸は熱水循環の過程で海水から供給されたに違いなく, 硫酸還元を考慮に入れば, CLAM Site でアルカリ度およびアンモニア濃度の高いことをうまく説明することが出来る。

3. 5 CLAM Site 内での変動

1989年の CLAM Site での熱水採取は, 表1に示した3回の潜航 (D416, D426, D427) によって行われた。これらの潜航で得られた熱水試料を, これまではすべて CLAM Site として一括して扱ってきたが, 試料を採取したベントの位置や採取時期は, 実は少しずつ異なっている。データを詳しく検討した結果, ベント毎にわずかながら熱水の化学的性質に違いのあることが明らかになった。

図5(a)は pH-Mg 関係図であるが, D416における第1地点と第2地点 (図1の航跡図からみると, 約30m 離れている), および D426と D427における熱水採取地点 (この2点はいずれも D416の第1地点にきわめて近いが, 表1に示したようにサンプリング時期は D416に比べて約1ヵ月遅い) の3通りの熱水データを別々の記号を用いて表示してある。JADE Site のデータが極めて単純な1本の曲線で表されるのに対し, CLAM Site における上記の3潜航のデータは, pH 値が約0.1ずつずれていることがわかる。

また, 図5(b)はアルカリニティーのデータを同じようにして表示したものであるが, ここでも JADE のデータがきれいな直線上に乗るのに対して, CLAM Site では3通りの異なった直線が得られる。

同様の傾向は, 熱水中の硫化水素の $\delta^{34}S$ にも見いだされている (金ほか, 1990)。D416の第1および第2地点にみられるような, 数10メートル程度の狭い範囲内での熱水の化学的性質の不均一性は, 熱水ベントごとに, 熱水反応の進行度がま

ちまちであることを示唆している (Gamo et al., 1990)。すなわち CLAM Site においては、多数の小規模な熱水循環系が存在し、それぞれ異なった時間スケールで海水が循環している可能性がある。一方、ほとんど位置的には差のない D416 の第 1 地点と D426, 427 の採取地点との間にみられる不均一性は、上記のような小規模な循環系が、短い時間内に活動を強めたり弱めたりしていることを反映しているのかもしれない。この様な点を明らかにするために、今後、時間的にも空間的にもより広い範囲で、多くのデータを蓄積する必要がある。

4. まとめ

① 沖縄トラフ JADE Site の熱水は、中央海嶺系の熱水と同じく Mg や SO_4 濃度がゼロのエンドメンバーを持つ。したがって、Mg 濃度は熱水と海水との混合比の指標となる。

② 熱水試料は、Mg 濃度の変化にかかわらず一定した Cl 濃度を示すことから、熱水の噴出前に沸騰 (気液分離) はしていないとみられる。

③ JADE Site の熱水は、中央海嶺系の熱水に比べ、Li と K に富む一方、Ca は比較的少ない。これは、熱水循環に関与するマグマが、中央海嶺のような玄武岩質ではなく、島弧に特徴的な安山岩一流紋岩系であることを示唆する。

④ JADE Site の熱水の、アンモニア・pH およびアルカリニティーは、堆積物に乏しい中央海嶺系の熱水と比較して明らかに違いが認められ、ワイマス海盆と同じように熱水循環に堆積物が関与していることを示している。

⑤ 同じ沖縄トラフでも、JADE Site と CLAM Site では、熱水の pH・アルカリニティー・アンモニア・リチウムなどの濃度が明らかに異なる。このような化学的性質の違いは、CLAM Site の熱水成分が、堆積物中での硫酸還元反応の影響を強く受けているためとして説明できる。

⑥ 同じ CLAM Site 内でも、ベントの位置が数 10 メートル程度異なると熱水の性質に違いがみられる。これは CLAM Site 内に、時間スケールの異なる小規模な熱水循環系が複数存在することを暗示している。

謝 辞

潜航・船上作業を通じて多大なご支援をいただいた海洋科学技術センター・堀田宏深海研究部長、「しんかい2000」の段野州興司令・今井義司整備長をはじめとする整備・潜航要員の皆様、ならびに「なつしま」の越智貞巳船長はじめ乗組員の皆様へ厚くお礼申し上げます。また、図の作成では長谷川和子氏の助力に負うところが大きい。本研究は、文部省科学研究費 (No. 01540468) の補助を受けて行われた。

参考文献

- Bischoff, J. L. and R. J. Rosenbauer 1984. The critical point and two-phase boundary of sea-water, 200-500°C. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 68, 172-180.
- Bowers, T. S., A. C. Campbell, C. I. Measures, A. J. Spivack, M. Khadem, and J. M. Edmond 1988. Chemical controls on the composition of vent fluids at 13°-11°N and 21°N, East Pacific Rise. *J. Geophys. Res.*, 93, 4522-4536.
- Campbell, A. C., C. German, M. R. Palmer and J. M. Edmond 1988a. Preliminary report on the chemistry of hydrothermal fluids from the Escanaba Trough (abstract). *EOS*, 69, 1271.
- Campbell, A. C., M. R. Palmer, G. P. Klinkhammer, T. S. Bowers, J. M. Edmond, J. R. Lawrence, J. F. Casey, G. Thompson, S. Humphris, P. Rona, and J. A. Karson, 1988b. Chemistry of hot springs on the mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 335, 514-519.
- Edmond, J. M. and K. Von Damm, 1983. Hot springs on the ocean floor. *Sci. Amer.*, 248(4), 78-93.
- Gamo, T. and H. Sakai 1989. Submarine hydrothermal activity around Japanese Islands. Oral presentation at the 32nd IUPAC Congress, Stockholm.
- Gamo, T., H. Sakai, E.-S. Kim, K. Shitashima, F. Yanagisawa, M. Tsutsumi, J. Ishibashi, Y. Sano, H. Wakita, M. Yamano, T. Tanaka, T. Matsumoto, T. Naganuma, K. Mitsuzawa, and T. Oomori 1990. Chemistry of hydrothermal

- fluids in the Okinawa Trough (abstract). *EOS*, 71, 953.
- Gamo, T., H. Sakai, E.-S. Kim, K. Shitashima, and J. Ishibashi 1990. Anomalous high alkalinity due to sulfate reduction in the CLAM hydrothermal field, Okinawa Trough. Submitted to *Earth Planet. Sci. Lett.*
- Grimaud, D., J. Ishibashi, J. M. Auzende, and T. Urabe 1989. The chemistry of the hot spring at 17°S on the North Fiji Basin axis (SW Pacific) (abstract). *EOS*, 70, 1398.
- Halbach, P., K. Nakamura et al. 1989. Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, 338, 496-499.
- 石橋純一郎, 佐野有司, 脇田宏, 蒲生俊敬, 堤眞, 酒井均, 1990. 溶存ガス濃度からみた沖縄トラフ海底熱水活動の地球化学的特徴。(本誌)
- 金銀洙, 酒井均, 蒲生俊敬, 橋本惇, 太田秀, 柳澤文孝, 1990. 沖縄トラフ熱水生物の炭素・窒素及び硫黄安定同位体比。(本誌)
- 木村政昭, 田中武男, 許正憲, 安藤雅孝, 大森保, 井沢英二, 嘉川郁朗, 1989. 「しんかい2000」による沖縄トラフ中部熱水域の地形・鉱床・生物の観察。海洋科学技術センター試験研究報告 *JAMSTECTR DEEPSEA RES.*, 223-244.
- Massoth, G. J., D. A. Butterfield, J. E. Lupton, R. E. McDuff, M. D. Lilley and I. R. Jonasson 1989. *Nature*, 340, 702-705.
- 門馬大和, 橋本惇, 田中武男, 深海調査グループ 1989. 沖縄トラフ深海曳航調査(DK88-2-OKN-LEG1, 2)速報。海洋科学技術センター試験研究報告 *JAMSTECTR* 21, 203-221.
- 中村光一, 加藤幸弘, 木村政昭, 安藤雅孝, 許正憲, 1989. 伊是名海穴海底熱水性鉱床の分布・産状——1988年の知見のまとめ——。海洋科学技術センター試験研究報告 *JAMSTECTR DEEPSEA RES.*, 183-189.
- 中村光一, 1989. 沖縄トラフ, 伊是名海穴海底熱水性鉱床の研究 I ——新たに発見したブラックスモーカーを中心とする鉱床の分布と産状——。第6回「しんかい2000」研究シンポジウム予稿集, 32-33.
- Sakai, H. et al. 1990. Unique chemistry of the backarc basin hydrothermal solutions at the mid-Okinawa Trough. *Geophys. Res. Lett.*, in Press.
- 酒井均, 山野誠, 田中武男, 蒲生俊敬, 金銀洙, 石橋純一郎, 下島公紀, 松本剛, 大森保, 柳澤文孝, 堤眞, 1990. 「しんかい2000」による伊是名海穴海底熱水系の地球化学的研究——第413回及び第415回潜航報告, 及び第424回潜航で採取した二酸化炭素液泡と包接化合物について。(本誌)
- 田中武男, 満澤巨彦, 堀田宏, 1989. 沖縄トラフ伊平屋小海嶺東部の1988年潜航調査について。海洋科学技術センター試験研究報告 *JAMSTECTR DEEPSEA RES.*, 267-281.
- Von Damm, K. L., J. M. Edmond, B. Grant, C. I. Measures, B. Walden, and R. F. Weiss 1985a. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N, East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2197-2220.
- Von Damm, K. L., J. M. Edmond, C. I. Measures and B. Grant 1985b. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at Guaymas Basin, Gulf of California. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2221-2237.
- Von Damm, K. L. and J. L. Bischoff 1987. Chemistry of hydrothermal solutions from the southern Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, 92, 11334-11346.

(原稿受理 1990年7月2日)

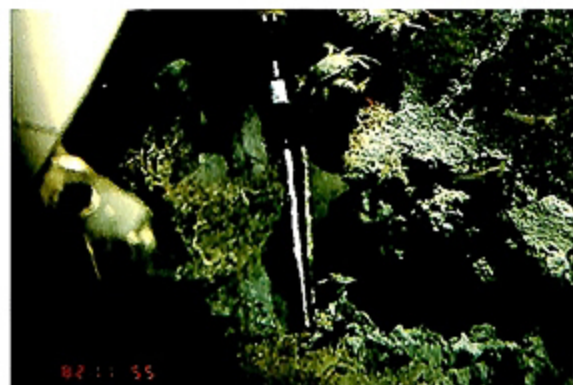


写真1 第1地点(潜航第416回)における熱水の採取

Photo. 1 Hydrothermal fluid sampling at the first sampling site of the dive 416.



写真2 第1地点(潜航第416回)における生物トラップの回収

Photo. 2 Recovery of a trap for benthic animals at the first sampling site of the dive 416.

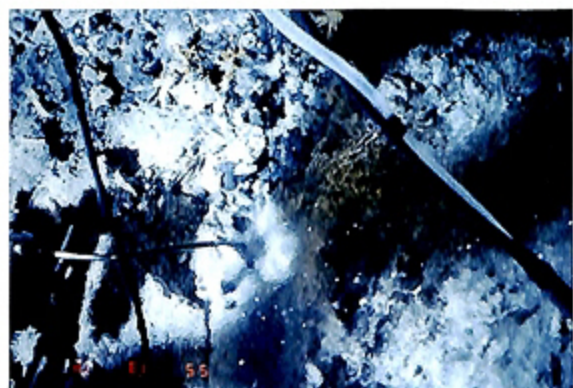


写真3 第1地点(潜航第416回)におけるアルビン型採水器による熱水採取

Photo. 3 Hydrothermal fluid sampling with an Alvin-type sampler at the first sampling site of the dive 416.

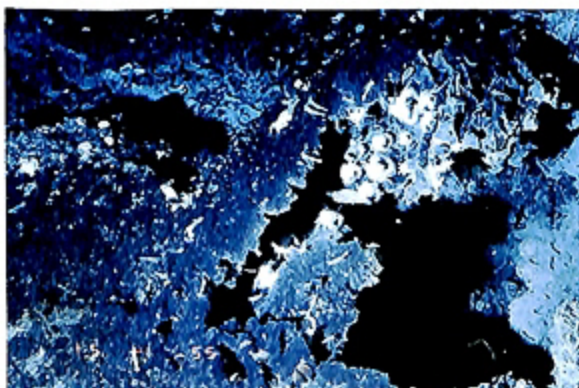


写真4 第2地点(潜航第416回)の海底面の様子

Photo. 4 Bottom features at the second sampling site of the dive 416.