

沖縄トラフ南奄西海丘の海底熱水活動： 熱水の地球化学的特徴

千葉 仁^{*1} 中島 和夫^{*2} 蒲生 俊敬^{*3}
石橋純一郎^{*4} 角皆 潤^{*4} 酒井 均^{*2}

南奄西海丘の熱水活動の地球化学的特徴とその活動様式を調べるために、「しんかい2000」によりC凹地の北側と南側の熱水チムニー計3本から高温の熱水を採取した。3つの熱水の溶存物質の化学組成は相互によく類似しており、また、伊平屋海嶺の熱水よりも伊是名海穴の熱水に化学組成上類似している。熱水の化学組成とストロンチウム同位体比を熱水/岩石相互作用における振る舞いの違うグループごとに検討したところ、南奄西海丘の熱水活動には堆積物が関与していることが強く示唆された。熱水中の二酸化炭素濃度も高く、気体成分に富むという沖縄トラフの熱水活動の特徴が南奄西海丘でも確認された。熱水温度と水深の関係は、熱水活動が沸点近くで起きていることを示し、熱水のシリカ濃度は熱水のサーキュレーションの深さが浅いことを示唆している。

Hydrothermal Activity at the Minami-Ensei Knoll, Okinawa Trough: Chemical Characteristics of Hydrothermal Solutions

Hitoshi CHIBA^{**} Kazuo NAKASHIMA^{**} Toshitaka GAMO^{**}
Jun-ichirou ISHIBASHI^{**} Urumu TSUNOGAI^{**} Hitoshi SAKAI^{**}

Three hydrothermal fluids are collected from the chimneys at the northern and southern parts of C-depression in the Minami-Ensei Knoll in order to investigate the chemical characteristics and mode of hydrothermal activity. These fluids are chemically similar to each other and also resemble to the hydro-thermal fluid in Izena cauldron rather than those in Iheya ridge. Inspection of groups of species, including Sr isotopes, which behave differently during water/rock interaction strongly suggests that the composition of the hydrothermal fluid is affected by the interaction with sediment. The

-
- * 1 九州大学理学部
 - * 2 山形大学理学部
 - * 3 東京大学海洋研究所
 - * 4 東京大学理学部
 - * 5 Faculty of Science, Kyushu University
 - * 6 Faculty of Science, Yamagata University
 - * 7 Ocean Research Institute, University of Tokyo
 - * 8 Faculty of Science, University of Tokyo

volatile rich characteristic of hydrothermal activity of Okinawa Trough is also recognized by the high concentration of carbon dioxide. The relationship between temperature of the hydrothermal fluid and water depth indicates that the hydrothermal activity occurs at the condition very close to the boiling point of seawater. The shallow circulation of hydrothermal fluid is suggested by the silica concentration of the fluid.

1 はじめに

背弧海盆である沖縄トラフにおける活動的な熱水現象は、伊是名海穴、伊平屋海嶺、南奄西海丘で発見されている。このうち、南奄西海丘C凹地における活発な海底熱水活動の存在は、1991年の「しんかい2000」による一連の潜航調査によって明らかにされ、既に1992年度末までに総計18回もの潜航調査が行われている。南奄西海丘は、奄美大島の西方約140kmに位置し、長径約2kmの楕円形の高丘である。高丘上には、いくつかの凹地が存在し、その中の3つがディープ・トウや「しんかい2000」によって調査されている（橋本ほか、1990）。しかし、現在のところ活発な熱水活動が見いだされているのは、このうちの最も南に位置するC凹地だけである。

伊是名海穴のブラック・スモーカーの熱水と伊平屋海嶺のいくつかのチムニーから噴出している熱水の化学組成は、既に詳細な報告がなされている（e.g. Sakai et al., 1990; 蒲生ほか、1991）。これらの研究によれば、沖縄トラフの熱水は、中央海嶺系の熱水に比べて、KとLiに富み、かつ高濃度の NH_3 を含むことから、熱水循環の過程で中性から酸性の火山岩と相互作用を行い、かつ海底堆積物中の有機物の分解の影響を受けていることが示唆されている。ここでは、第622潜航（南奄西海丘C凹地）で採取された熱水の化学組成を報告し、他の沖縄トラフおよび中央海嶺の熱水系熱水と比較して、南奄西海丘の熱水活動の特徴を議論する。

2 第622潜航の概要

本潜航は、1992年6月12日に南奄西海丘C凹地の南東部のくぼみで行われた。C凹地南東部の最深部は、北東方向に伸びた長径約500m、短径200mの凹地である。この潜航は、「しんかい2000」に

よる1992年5～6月の南西諸島の一連の潜航調査の最後の潜航であった。図1に第622潜航の航跡（太線）をそれまでに行われた潜航調査の航跡（細線）とともに示す。本潜航も含み、多くの潜航の航跡がC凹地内部を南北に走っているのは、この南北の線に沿って数多くのチムニーが存在しているためである。

本潜航調査の主たる目的は、回転バルブ式熱水採取装置（酒井ほか、1990）による高温の熱水の採取と熱水性沈殿物の採取であった。C凹地南西部のくぼみの外側北東方向に着底した後、ほぼ南西方向に進路を向け、熱水活動域へと向かったが、凹地の外側北西部では活発な熱水活動は見られなかった。しかし、C凹地内部では見かけられないシロウリガイの大規模なコロニー（大部分は、死貝）が砂質の海底で見られた（図1の1）。C凹地南西部のくぼみの中へ入ると内部へ向かって落ち込む急峻な崖の下に、このくぼ地の中では最も北に位置すると思われるチムニーが観察された（図1中の2、および、写真1）。その後、チムニーの丘北東部の“竜神チムニー”（写真2）を観察し、その1艇身程横に小規模な隣合って立っている2本のチムニーを発見した。しかし、これらのチムニー周辺の海底は、着底しての採水作業に不適当であった。このため、西へ向かい、“チムニーの丘”から約50m北西の地点でマウンド上にチムニー（図1中の3、および、写真3）を発見した（深度691m）。「なつしま」常備の高温用温度計による温度測定の結果、熱水の温度は278℃であり、このチムニーより熱水、チムニー本体、周辺部より熱水性堆積物、海底より泡となって立ち上る気体を採取した。熱水の採取のため、チムニーを根元から壊したところ、チムニーの根元から内面が白色の非常に円形に近い熱水噴出口が観察された（写真4）。試料採取後、再び“竜神チムニー”

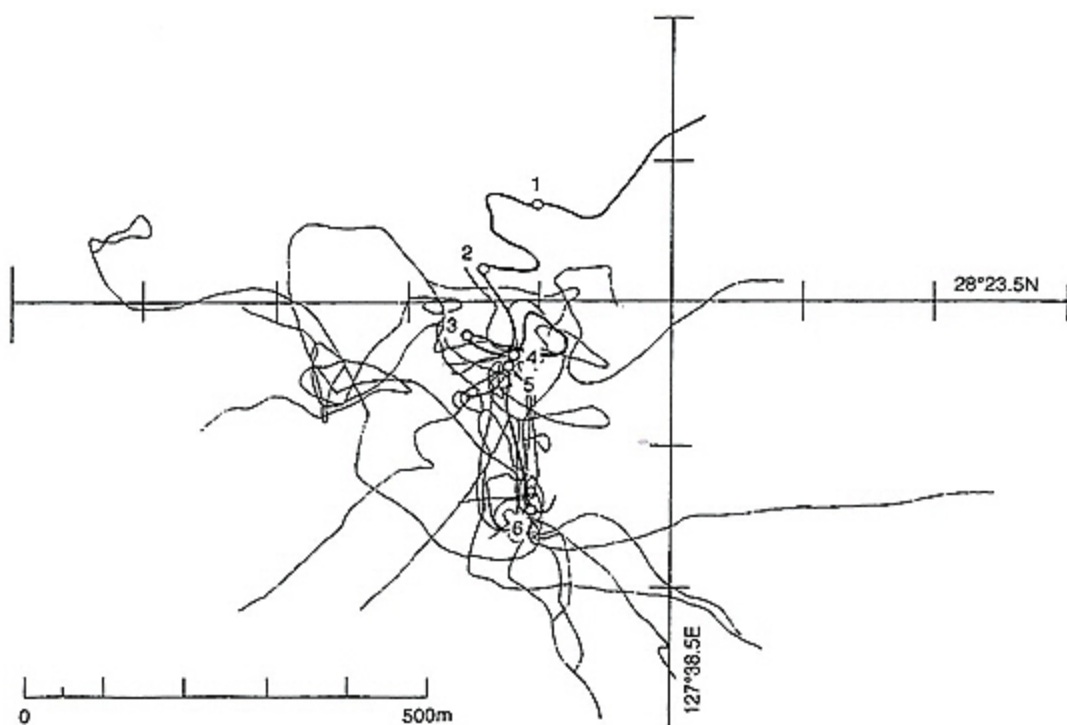


図1 第622潜航の航跡図。太線：第622潜航の航跡；細線：1992年末までの他の「しんかい2000」の潜航調査の航跡。図中の番号については、本文参照

Fig. 1 Track of Dive #622, heavy line: track line of No.622 dive by "Shinkai 2000"; thinline : track lines of other dives by "Shinkai 2000" until 1992. See text for the numbers in the figure.

近くに戻る途中に、周囲を小規模なシンカイヒバリガイのコロニーにとりまかれた活動を停止しているか非常に不活発なチムニーが観察された。

“竜神チムニー”近くの第618潜航によってマーカーブイを設置されたチムニー（図1中の4、および、写真5）へ向かい、このチムニーから2組目の採水とチムニー自体の採取を行った（深度693m）。チムニーから放出される熱水の温度は、276℃であった。試料採取後、さらに少し南下し、第617潜航によって、採水のために根元から破壊されたチムニー（図1中の5、および、写真6）を観察した。写真6のチムニー右側に見えているのは、設置途中のマーカーブイの重りで、その長さは約12cmである。2つの潜航の間のわずか8日間に、このチムニーは50cm以上も成長したことが分かる。最後に、これまでの潜航によって知られている最も南側に位置する“湯の井チムニー”の採水に向かったが、その途中で“鉄チムニー”と“たいまつチムニー”が視認された。“湯の井

チムニー”（図1中の6、および、写真7）は、267℃の熱水を放出していた（深度704m）。3組目の熱水試料の採水とチムニー自体の採取を行ったが、このチムニーも採水のために破壊したところ、最初に採水したチムニーの場合と同じく、根元に真円形に近い熱水噴出口が観察された。

熱水試料は、採水し易いようにそれぞれのチムニーをくずした後に、回転バルブ式採水器の採水ノズルを熱水の流出口に挿入して採取された。潜航前に採水管につめられてあった蒸留水や前回の試料のコンタミネーションを防ぐために、各チムニーから2本以上の試料を採取した。

3 観察された熱水チムニーの本数とその周辺の特徴

本潜航で確認されたチムニーの本数は、総計10本である（潜航の初期に観察された隣合って立っている2本のチムニーは合わせて1本とした）。沖縄トラフにおいて、現在までにこれほどの密度

で活発な熱水チムニーが観察された場所はほかになく、南奄西海丘の熱水活動が非常に活発であることを示している。熱水チムニーの存在している場所のまわりには、1つの例外を除き大きなシンカイヒバリガイのコロニーがともなっている。小規模なシンカイヒバリガイのコロニーしか観察されなかったのは、ほとんど活動を停止しているように見えるチムニーのまわり1カ所だけである。熱水チムニーは、いずれも大きさの大小はあってもマウンド状の盛り上がりの上に存在している。大きなマウンドの上に立つチムニーは、チムニー自体も大きく、活発な熱水活動によるチムニーの活発な成長とその倒壊によりマウンドが成長していったことを示唆している。チムニーにともなうシンカイヒバリガイのコロニーは、マウンドの上まで進出していることはほとんどない。このことは、マウンドの急速な成長がチムニー近傍へのシンカイヒバリガイの進入を拒んでいるのか、シンカイヒバリガイがマウンドを構成している砂質に

近いマウンドの底質を好まないためによるものと思われる。また、熱水チムニー近傍では、海底から二酸化炭素と思われる気泡の発生しているところが随所で見かけられた。太田・金(1992)によって既に報告されているシンカイヒバリガイの死貝が溶食された残渣(黒色の殻皮)と思われるものが海底の随所に散乱しているのも視認された。

採取された活動していたチムニー本体は主として硬石膏からなり、採取する以前に倒壊していたチムニーは一部石膏を含んでいた。それに対して、チムニー周辺部のマウンドから採取された試料や板状の熱水性沈殿物は、主に硫化物鉱物から構成されている。これらの固体試料については、中島ほか(本報告書)に詳しくまとめられている。

4 熱水中の溶存成分の化学組成

熱水の化学分析結果のまとめと他の熱水系のデータを比較したものを表1に示す。Guaymas Basin (Von Damm et al., 1985b) は堆積物によって覆

表1 南奄西海丘と他の海底熱水系の熱水の化学組成と同位体組成

Table 1 Comparison of chemical and isotopic compositions of hydrothermal fluids between Minami-Ensei and other seafloor hydrothermal systems.

	Minami-Ensei	Izena	Guaymas	21°N
temp., °C	265-278	310	100-315	273-355
pH	4.90-5.08	4.7	5.9	3.3-3.8
alkalinity, mM/l	3.02-3.51	1.9	2.8-10.6	-0.19-0.50
Na, mM/kg	410-431	425	475-513	432-510
K, mM/kg	48.7-50.9	71.9	37.1-49.2	23.2-25.8
Li, mM/kg	5.4-5.8	2.48	0.63-1.08	0.89-1.32
Ca, mM/kg	20.7-22.1	22.3	26.6-41.5	11.7-20.8
Mg, mM/kg	0.36-1.01	0	0	0
Sr, μM/kg	215-227	94	160-253	65-97
Ba, μM/kg	53.3-55.6	59	>7-24	>7-15
B, mM/kg	3.7-4.0	3.41	-	-
Mn, μM/kg	88.1-93.6	110	128-236	699-1002
Cl, mM/kg	501-527	550	581-637	489-579
NH ₄ ⁺ , mM/kg	4.56-4.70	5.32	10.7-15.6	<0.01
SiO ₂ , mM/kg	10.4-10.8	12.9	9.3-13.8	15.6-19.5
CO ₂ , mM/kg	63.9-95.7	209	16-24	8.0
H ₂ S, mM/kg	1.58-2.44	13.7	3.6-6.0	6.6-8.4
N ₂ , mM/kg	0.27-0.48	-	-	-
CH ₄ , mM/kg	2.63-7.00	7.6	12.0-16.5	0.05-0.07
He, μM/kg	0.09-0.68	0.82	-	0.9-2.2
H ₂ , μM/kg	11.9-13.3	20	-	227-1275
δ ¹³ C(CO ₂), ‰	-4.0-5.3	4.8-5.0	-10.5-3.4	-7.0
³ He/ ⁴ He, R/Ra	6.97-7.51	6.1-6.9	7.0	7.8
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.7100	0.7089	0.7052-0.7058	0.7030

われた海底熱水系の代表として、E.P.R 21°N (Von Damm et al., 1985a) は海底を堆積物に覆われておらず、かつ、気液分離をしていない海底熱水系の代表例としてあげてある。表1に示した南奄西海丘の分析結果は、同一のチムニーから複数採取された試料の中で最後に採取された試料の分析値の範囲である。熱水に対する周囲の海水の混入の度合いを示すMgの濃度は、いずれの試料も非常に低く、良質な熱水試料が採取されたことを示している。なお、採取された試料には、採水

器の構造上、少量の蒸留水（試料に対して最大4%程度と見積もられる）が混入しているがその補正は行っていない。さらに、通常行われるMg濃度ゼロへの外挿も、熱水試料のMg濃度が非常に低いため行わず、分析値をそのまま示した。また、中央海嶺の熱水系の熱水と化学組成的に異なっているいくつかの成分を図2にも示した。

表1および図2を見ると、南北に分布する3つのチムニーから採取された気体成分を除く熱水の化学組成が、非常にせまい範囲に集中しているこ

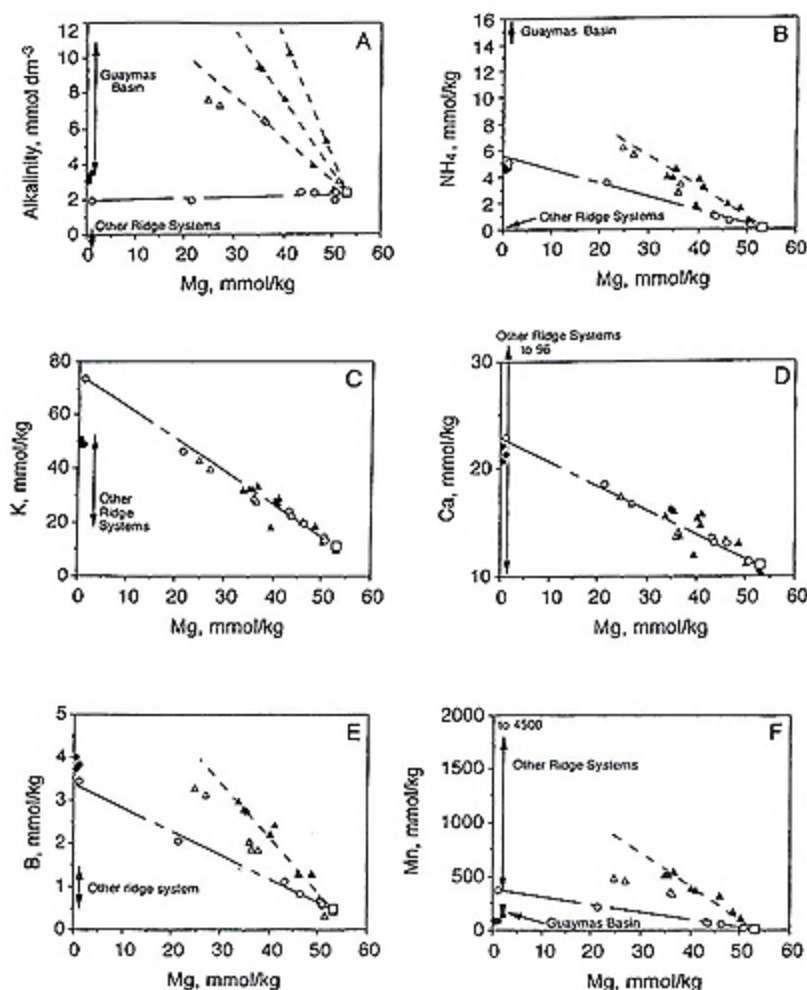


図2 南奄西海丘海底熱水系の熱水の化学組成。●は南奄西海丘（本研究）、○は伊是名海穴（Sakai et al., 1990）、△は1992年に伊平屋海凹（本研究）、▲は1991年以前に伊平屋海凹で採取された試料（蒲生ほか, 1990）を示す。

Fig. 2 Chemical compositions of hydrothermal fluids discharged at Minami-Ensei Knoll. ●:Minami-Ensei Knoll (this study); ○:Jade site (Sakai et al., 1990); △:Clam site collected in 1992 (this study); ▲:Clam site collected before 1991 (Gamo et al., 1990)

とが分かる。現在までに研究されている海底熱水系で、大規模な気液分離を行って塩濃度が海水に比べて大きく異なっている熱水系を除き、それぞれの熱水系の熱水の化学組成は比較的狭い範囲内に入っている。このことは、南奄西海丘も含めて、海底熱水系の熱水の湧出機構が地上の熱水系と比べて比較的単純で、単一に近いソースからあまり分化をせずに、あるいは、どの熱水噴出口でも同じような分化のパスを通して海底面上に噴出していることを示すのかもしれない。なお、南奄西海丘の熱水では、海水と比較して最大で10%程度の塩素濃度の低下がみられる。

図2を一見して分かることは、南奄西海丘の熱水の多くの成分の濃度が伊是名海穴の熱水と類似していることである。図2Aのアルカリ度と図2Bのアンモニアは、熱水が堆積物中の有機物と反応することによって熱水中に増加する成分である。硫酸と硫化水素の硫黄同位体比から明らかに有機物の分解が起きている伊平屋の熱水 (Gamo et al., 1991) や堆積物に厚く覆われているGuaymas Basinの熱水 (Von Damm et al., 1985b) ほどではないが、堆積物によってカバーされていない海底熱水系に比べて、南奄西海丘の熱水はこの2つの成分で明らかに高い濃度を持っている。このことは、南奄西海丘でも熱水が有機物と反応していることを示唆している。気体成分であるメタンの濃度が高いのも、熱水系内部で有機物の分解が起きているとの考え方に調和的である。

図2CとDのカリウムとカルシウムは、岩石から熱水へ溶け出してくると考えられる成分である。ただし、その濃度は岩石中のそれぞれの濃度に影響されるものの生成する2次的な変質鉱物によるコントロールも受けていると考えられる。図2Dのカルシウムの濃度は、他の海底熱水系の熱水のカルシウム濃度と比べて低い方に入るように見えるが、大規模な気液分離を起こして塩濃度に大きな変化がみられる熱水系を除いて考えると、海底熱水のカルシウム濃度としては標準的な値である。伊是名海穴と伊平屋の熱水のカリウム濃度は、他の海底熱水系の熱水と比べて高いことがその特徴の1つとして報告され、その原因はカリウム含有量の多い中性から酸性の火山岩と反応していることが示唆されている (Sakai et al., 1990)。南奄

西海丘では、未変質の火山岩は採取されていないが、潜航中の観察 (太田・金, 1992) と熱水沈澱物中の岩片の分析 (中島ら, 本報告書) から、南奄西海丘の火山活動が酸性の火山岩によるものであることが示唆されている。図2C中で、南奄西海丘の熱水のカリウム濃度は、伊是名海穴の熱水に比べて低いが、他の海底熱水系の熱水中のカリウム濃度範囲の中で最も高い部類にはいる。これまでに研究されている沖縄トラフ以外の海底熱水系で、南奄西海丘の熱水系と同程度のカリウム濃度を持っているのは表1からも分かるように厚い堆積物に覆われたGuaymas Basinの海底熱水系だけである。このことは、陸源の堆積物との反応でも熱水中にカリウム濃度が高くなり得ることを示している。したがって、南奄西海丘の熱水の比較的高いカリウム濃度は、中性から酸性の火山岩か陸源堆積物との反応によってもたらされたものであろうと推測される。

図2Eに示されているホウ素は、熱水と岩石の反応によって、それを主成分とする鉱物を作らず、また、他の変質鉱物中に取り込まれにくい、ほぼ一方的に岩石から熱水へと移動する性質を持つ元素である。したがって、熱水中のホウ素濃度は、熱水が反応した相手の岩石の種類と密接な関係を持っていると期待される。ホウ素は、玄武岩よりも安山岩から流紋岩中で濃度が高く、さらに堆積物中にも高濃度で存在している元素である (石川・中村, 1989)。高いホウ素濃度は、熱水が中性から酸性の火山岩、堆積物、あるいは、堆積物を同化したマグマからもたらされた岩石と反応していることを示しているのであろう。表1に示したリチウムも熱水/岩石相互作用において、ホウ素と同様な挙動を示す元素である。このリチウムも、南奄西海丘の熱水中で高濃度であり、かつ、火山岩中よりも堆積物中でその濃度が高い (Chiba et al., 1992) ので上記の推測を支持している。

図2Fに示してあるマンガンの濃度は、伊平屋海凹の熱水に比べて、また、他のすべての報告されている海底熱水に比べても低い。伊平屋海凹では、熱水噴出孔周辺部がマンガン酸化物に覆われて真っ黒であるのに対して、伊是名海穴の熱水噴出孔周辺が白色ないしは茶色であることにも対応しているのであろう。マンガンの濃度はGuaymas

Basinの熱水でも低い、これは高いアルカリ度と高いpHのために金属元素一般の溶解度が低下してしまっているためと考えられている (Von Damm et al., 1985b)。高いアルカリ度とpHをもたらしている原因が熱水と堆積物の反応であるとするならば、高温での火山岩との反応で熱水中に高濃度で存在していたマンガンは、海底下で熱水が堆積物の中を通過して上昇してくる間に除かれてしまっているものと考えられる。南奄西海丘の熱水のマンガン濃度が低いのも、このような海底下の過程に関連しているのかもしれない。熱水中の硫化水素濃度が低い(表1)のも、こうした海底下の過程に関連している可能性が高い。

溶存成分の1つであるストロンチウムの同位体比(表1)は伊是名海穴の熱水系の熱水では、他の熱水系に比べて非常に高く海水(0.709)に近い値を示す(Chiba et al., 1992)。南奄西海丘の熱水は、さらに海水のストロンチウム同位体比を超える値を示している。沖縄トラフで採取された火山岩のストロンチウム同位体比は、最も高いものでも0.704である。こうした火山岩が海水と反応を行っても、熱水のストロンチウム同位体比は決して海水より高くなることはない。このことは、南奄西海丘では、熱水が火山岩以外のものとも反応していることを強く示している。中央海嶺熱水系では、玄武岩と海水が反応する際にストロンチウムの全体としての出入りがないので熱水と海水の間でストロンチウム濃度に違いがなく、熱水/岩石比にしたがって同位体交換反応を行うと考えられている(Albarede et al., 1981)。これに対して南奄西海丘では、熱水中のストロンチウム濃度も海水に比べて上がっており、熱水と反応している固相側からストロンチウムが熱水に溶脱している。その固相が高いストロンチウム同位体比を持っていると考えられ、海水より高いストロンチウム同位体比を持った沖縄トラフにたまっている堆積物(Chiba et al., 1992)と考えられる。

以上述べてきた熱水中の溶存物質の化学組成からは、南奄西海丘の熱水が最終的には堆積物、あるいは、堆積物を同化したマグマ起源の岩石と反応したものであることが強く示唆される。なお、“最終的には”とことわり書きを付けたのは、このように高温な熱水系が形成されるために、十分

な大きさの熱源が必要であり、堆積物以外に熱源となる十分に熱い火成岩(あるいは、マグマ)と反応しているのは明らかなためである。

5 熱水中の気体成分

気体成分中で最も濃度の高い二酸化炭素濃度を他の海底熱水系と比べて図3に示した。この図から、南奄西海丘の熱水が、沖縄トラフの他の熱水系同様に中央海嶺系の熱水系と比べて非常に二酸化炭素に富んでいることが分かる。しかし、溶存成分がよく似ている伊是名の海底熱水系の半分以下の濃度しか二酸化炭素は含まれていない。この違いを考察するために基本となるのは、熱水に対する二酸化炭素の溶解度のデータである。しかし、残念ながら、沖縄トラフの熱水系程度の温度圧力条件下における熱水に対する二酸化炭素の溶解度の実験的研究は現在までのところ十分になされていない。そのため、温度圧力の異なる伊是名海穴と南奄西海丘の熱水に二酸化炭素が飽和まで溶けているのかどうか定量的に吟味することはできない。同じ圧力下にあるC凹地内部だけで比較してみると、北部の高温のチムニー(276°Cと278°C)から採取された試料の二酸化炭素濃度は低く(64.8と63.9mmol/kg)、C凹地南部の低温の“湯の井チムニー”(265°C)からの試料が二酸化炭素に富んでいる(95.7mmol/kg)。他の気体成分であるメタンや硫化水素においても同様の傾向が

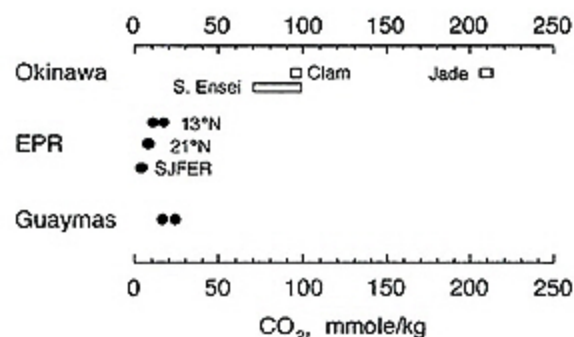


図3 南奄西海丘と他の海底熱水系の二酸化炭素濃度の比較

Fig. 3 Comparison of the carbon dioxide concentration among Minami-Ensei and other seafloor hydrothermal systems.

みられる(表1)。定圧下において温度が低いほど気体の溶解度は増加するという一般的な傾向から考えれば、もし熱水が二酸化炭素に飽和していると仮定するならば、測定された濃度の違いを定性的に理解することはできる。もう1つの解釈として、熱水中の塩素濃度が海水に比べて少し低いということから、海底下で沸騰が起こり一度熱水から分離した蒸気相が再凝縮して熱水に様々な割合で混じり込んでいるということも考えられる。この場合、塩濃度の低い熱水ほど蒸気相に選択的に分配される気体成分に富んでいると期待されるが、使用した採水器の固有の問題もあって本研究の結果だけから判断することは難しい。また、南奄西海丘の場合、塩濃度の低下量が少ないことと沸騰して蒸気相を失ない塩濃度が大きく上昇している熱水が発見されていないことから、現在、海底下で沸騰現象が起こっているとしても、決して大規模なものではないであろうと推測される。

熱水に溶存していた二酸化炭素の炭素同位体比は、-4.0 から -5.3 パーミルの間にある(表1)。南奄西海丘で海底から立ちのぼっていた気泡(千葉ほか, 1992)や伊是名海穴および伊平屋海嶺(石橋ほか, 1990)の熱水や液泡の二酸化炭素の炭素同位体比もこの範囲に入る。したがって、熱水中に溶けている二酸化炭素もマグマ活動に由来するものであることが確認された。

熱水中のヘリウム同位体比は、伊是名の熱水系よりも高く(表1)、中央海嶺の熱水系の値に近い。この値は、ヘリウムがマントル起源であることを示し、大陸地殻中の放射壊変起源のヘリウムの寄与をほとんど受けていないことを示す。南奄西海丘周辺部では大陸地殻が薄いために、ヘリウム同位体比に影響が現れにくいのかもかもしれない。また、この高いヘリウム同位体比は溶存成分の濃度やストロンチウムの同位体比から推定される熱水が反応を行ったとされる物質とは一見矛盾するように思われる。しかし、ヘリウムは全く反応性を示さない元素であることから、熱水系浅部における熱水/岩石相互作用はヘリウム同位体比に影響をおよぼさないのであろう。

6 熱水活動の場の特徴

図4に熱水活動の温度とそれが起きている海底の圧力(水深)をプロットした。南奄西海丘の場合、伊是名海穴と同様に海底面上の熱水活動の温度圧力条件は、海水の沸騰曲線に非常に近い。図4では、他のいくつかの海底熱水系も比較したが、このように沸騰曲線に近い温度圧力条件下にある熱水系は非常に希である。塩濃度からみて、大規模な沸騰現象が海底下で起きているであろうと考えられている北フィジー海盆の海底上での熱水活動(Grimaud et al., 1991)は、沸騰曲線より低温側へ大きく外れている。これを見ると、現在の南奄西海丘の熱水活動が、いかに微妙なバランスの上に成り立っているのかが分かる。さらに、熱水中のシリカ濃度は、温度と圧力によって決まるものであるが、現在の南奄西海丘の熱水のシリカ濃度は、熱水の温度と水深で決まる圧力での石英に対する飽和溶解度に非常に近い。このことは、熱水活動のサーキュレーションが海底下あまり深いところまで到達していないのか、現在採取されている熱水はそのシリカ濃度を熱水系の浅

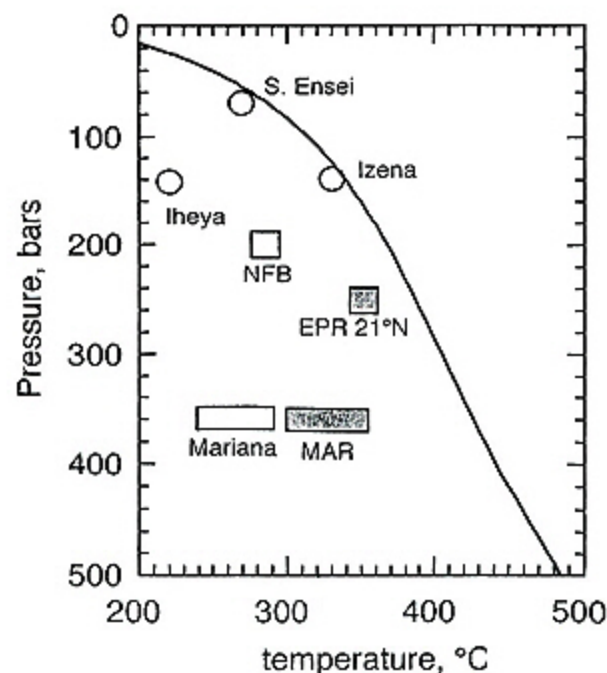


図4 海底熱水活動の熱水温度と水深の関係
Fig. 4 Relationship between temperatures of seafloor hydrothermal fluids and water depth.

い部分でリセットされているかのどちらかであろう。この点も南奄西海丘の熱水活動の特徴の1つである。伊是名海穴の熱水活動についても、シリカ濃度からは同様なことが示唆される。

南奄西海丘において海底下が現在よりも高温の状態になると、熱水は大規模な沸騰を始めることになるであろう。そのような高温状態が存在し、かつ、熱水あるいは蒸気を海底まで運ぶ通路が十分に発達していない場合、水蒸気爆発が起きる可能性がある。C凹地内で現在観察される巨礫が散乱している様子は、かつて、そのような現象が起きたことを意味しているようにも見る事ができる。

最後に、大規模で爆発的な沸騰現象ではなく、緩やかな沸騰が海底下で起きている場合に考慮すべきことに簡単に触れておく。海底熱水系を考えるうえで、最も大きな制約事項となるのは、当然のことながら海底の上に存在する海水である。陸上の熱水系との比較で考えると、水が無制限に存在していることを意味する。このため、よほど特殊な事情がないかぎり、蒸気相が直接に海底上に出現することは不可能である。これは、海水という巨大な冷たい水塊が、海底下の熱水系浅部をも含めて冷却し、蒸気をみな凝縮させてしまうであろうためである。したがって、海底下での沸騰の影響を受けている熱水について考えるとき、蒸気が持っている大きな潜熱による加熱の能力とその熱水の持っている化学組成は大きな制約条件になる。今回詳しい議論をできないが、今後、海底下の沸騰現象が熱水の化学組成に与える影響を議論するときに、蒸気の持っている大きな潜熱とそれが付け加わる熱水の化学組成を組み合わせる必要があるであろう。

謝 辞

第622潜航にあたってお世話になった「しんかい2000」の司令および運航チームの方々、「なつしま」船長、乗組員の方々に深く感謝します。本研究の一部は、文部省科学研究費・重点領域研究「海洋フラックス」No.04232103（代表者、酒井均）の補助を受けて行われた。ストロンチウム同位体比の測定は、岡山大学地球内部研究センターの共同利用により行った。

参考文献

- Albarede, F., A. Michard, J.F. Minster and G. Michard (1981): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in hydrothermal waters and deposits from the East Pacific Rise at 21° N. E.P.S.L., 55, 229-236.
- 千葉 仁・酒井 均・蒲生俊敬・石橋純一郎・中島和夫・南 秀樹・土橋 史 (1992): 南奄西海丘で湧出している気泡の化学・同位体組成, しんかいシンポジウム報告書, 8, 81-87.
- Chiba, H., H. Sakai, J. Ishibashi and T. Urabe (1992): Sr isotopic study of seafloor hydrothermal system in mid-Okinawa Trough. Abst. 29th IGC, 754.
- 蒲生俊敬・酒井 均・石橋純一郎・大森 保・千葉 仁・下島公紀・中島和夫・田中善孝・益田晴恵 (1991): 中部沖縄トラフ、伊平屋凹地（クラムサイト）における熱水性マウンドの構造的、鉱物学および化学的特徴からみたマウンドの成長過程について: 「しんかい2000」第486, 487, 488回潜航報告. 「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 7, 163-184.
- Gamo, T., H. Sakai, E.-S. Kim, K. Shitashima and J. Ishibashi (1991): High alkalinity due to sulfate reduction in the CLAM hydrothermal field, Okinawa Trough. E. P.S.L., 107, 328-338.
- Grimaud, D., J. Ishibashi, Y. Lagabriele, J.-M. Auzende and T. Urabe (1991): Chemistry of hydrothermal fluids from the 17°S active site on the North Fiji Basin Ridge (SW Pacific). Chem. Geol., 93, 209-218.
- 橋本惇・藤倉克則・堀田宏 (1990): 南奄西海丘における深海生物群集の観察. 「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 6, 167-179.
- 石橋純一郎・佐野有司・脇田 宏・蒲生俊敬・堤 眞・酒井 均 (1990): 中部沖縄トラフ海底熱水活動の地球化学的研究: 溶存気体成分からみた熱水活動の特徴. 「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 6, 63-68.
- 石川綱志・中村栄三 (1989): ホウ素の同位体地球・宇宙化学. 地球化学, 23, 23-34.
- 太田 秀・金 東成 (1992): オオエンコウガニ

- の配偶行動とシンカイヒバリガイの摂餌生態について -「しんかい2000」ダイブ#542 (南奄西海丘C海凹) 潜航報告-。しんかいシンポジウム報告書, 8, 279-285.
- 太田 秀・金 東成 (1992): 沖縄トラフ熱水生物群集の位置づけについて。第9回しんかいシンポジウム予稿集, 66-68.
- 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」による伊是名海穴熱水系の地球化学的研究 -第413回潜航報告及び第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。「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 6, 69-85.
- Sakai, H., T.Gamo, E.-S.Kim, K.Shitashima, F.Yanagisawa, M.Tsutsumi, J.Ishibashi, Y.Sano, Wakita, T.Tanaka, T.Matsumoto, T.Naganuma and K.Mitsuzawa (1990): Unique chemistry of the hydrothermal solution in the Mid-Okinawa Trough back-arc basin. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 2133-2136.
- 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.
- (原稿受理: 1993年7月22日)
- (注) 写真は次ページ以降に掲載

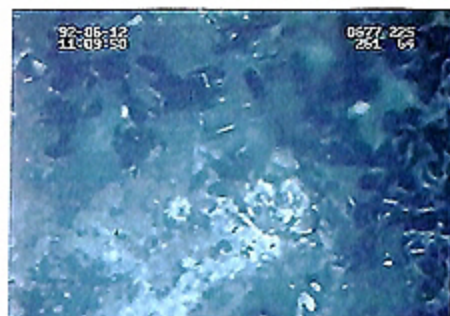


写真1 南奄西海丘C凹地北部の活動的チムニー

Photo 1 Active chimney at the north part of the C-depression in the Minami-Ensei Knoll.

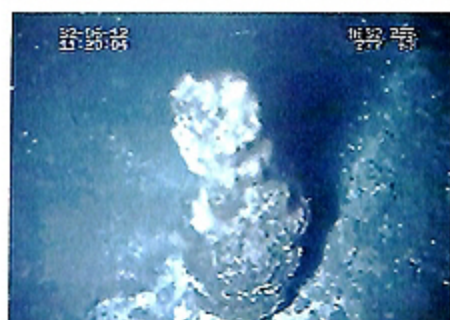


写真2 チムニーの丘北東部の“竜神チムニー”

Photo 2 "Ryujin chimney" at the northeast of the hill of chimneys.

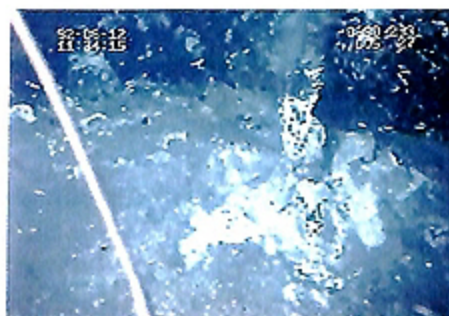


写真3 最初の採水を行ったチムニー。チムニーの丘から北西へ50m

Photo 3 Chimney from which the first fluid sample was collected. It stands 50m northwest from the hill of chimneys.

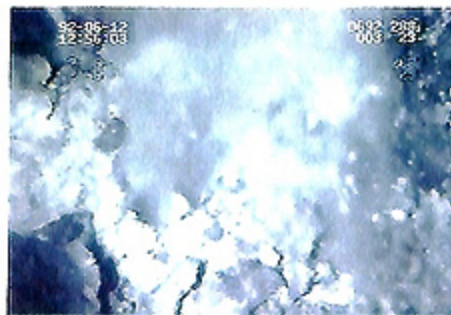


写真4 写真3のチムニーを倒したあとに現れた熱水噴出口。非常に円形に近い。

Photo 4 Hydrothermal vent appeared after the removal of the chimney of photo 4. Its shape is nearly perfect circle.

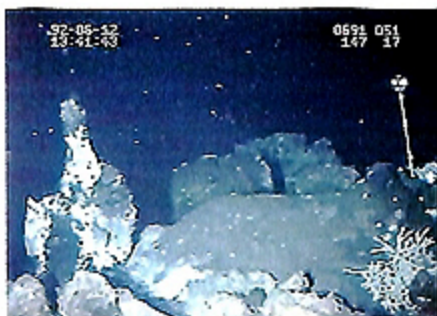


写真5 2番目の採水を行ったチムニー。マーカーブイは、第618潜航により置かれたもの

Photo 5 Chimney from which the second fluid sample was collected. The marker bouy was installed by Dive No. 618.



写真6 第617潜航で採水のために破壊されたチムニー。右の円筒形のは、設置中のマーカーブイの重り。長さ12cm

Photo 6 Chimney which was destroyed by Dive No. 617 for the fluid sampling. The column like material at the right is the weight of the marker bouy. Its length is 12cm.

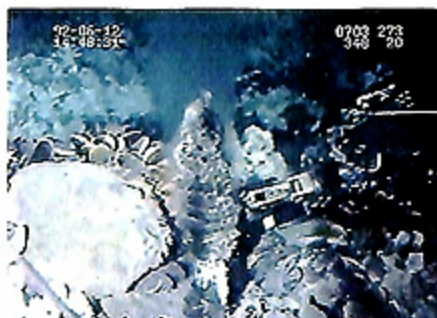


写真7 3番目の採水を行った“湯の井チムニー”

Photo 7 "Yunoi chimney" from which the third fluid sample was taken.