

沖縄トラフ伊平屋海凹北部海丘海底熱水系の地形と熱水の化学組成

片岡 聡^{*1} 石橋純一郎^{*1}
山中 寿朗^{*2} 千葉 仁^{*3}

1996年から1999年の潜航調査によって、沖縄トラフ伊平屋海凹北部海丘海底熱水系の地形、熱水の化学組成の全体像が明らかになってきた。この熱水系にはNBC(North Big Chimney)を中心に南北と東西方向に熱水の噴出口が点在している。現在の熱水系の活動の中心は、熱水の最高温度(311℃)を記録したNBCであると考えられる。熱水試料の溶存塩化物イオン濃度はいずれも海水のそれよりも低く(最低50%)、熱水は海底下で気液分離した蒸気相を含んでいることが示唆される。熱水端成分の組成には噴出口による相違が見られるが、同一起源の熱水から気相と液相に分離したものが異なる比で混合した後に噴出していると考えるところを説明することができる。

キーワード：沖縄トラフ、伊平屋海凹北部海丘海底熱水系、海底熱水活動、海底地形、熱水化学組成

Topography and Fluid geochemistry of the Iheya North Knoll seafloor hydrothermal system in the Okinawa Trough

Satoshi KATAOKA^{*4} Junichiro ISHIBASHI^{*4}
Toshiro YAMANAKA^{*5} Hitoshi CHIBA^{*6}

Topography and fluid geochemistry of the northern Iheya Ridge seafloor hydrothermal system in the Okinawa Trough were revealed by a series of Sinkai2000 dive studies conducted during 1996-1999. In the center of the hydrothermal area, NBC (North Big Chimney) vent emanates 311 °C fluid and other active vents are aligned in the direction of south-north and east-west. The hydrothermal fluids show Cl concentrations much lower than seawater, indicating that they have experienced phase separation at sub-seafloor and enriched in vapor phase. Diversity of chemical composition of hydrothermal fluid endmembers are well explained by mixing of vapor and brine phases of an original hydrothermal fluid at different mixing ratio.

Key words : Okinawa Trough, North Knoll at the Iheya Ridge, Seafloor hydrothermal activity, Topography, Chemical composition of hydrothermal fluids

* 1 九州大学理学部
* 2 九州大学ベンチャービジネスラボラトリー
* 3 岡山大学附属固体地球科学研究センター
* 4 Faculty of Science, Kyushu University
* 5 Venture Business Laboratory, Kyushu University
* 6 Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

1. はじめに

沖縄トラフ伊平屋海凹北部海丘(北緯27°47.2', 東経126°53.9' 水深約1000m, 図1)に存在する海底熱水系の地球化学的研究は, 熱水系が発見された翌年である1996年以来(千葉他, 1996), 断続的に進められてきた。これまで海況不良や採水器の故障などのために必ずしも良質の熱水試料は採取されていないものの, 熱水試料の化学組成のデータが蓄積されており, また「しんかい2000」の潜航データから熱水地帯の地形も明らかになってきている。本報告では現在までに明らかになった熱水地帯の地形と熱水系の関係, および熱水の化学組成の全体像について報告する。

2. 熱水系の地形

図2に「しんかい2000」の潜航データ(第1028~1030, 1092~1094潜航のx, y, 深度, 高度)を用いて作成した沖縄トラフ伊平屋海凹北部海丘の頂部付近に広がる高温

熱水域の地形図を示す。図上の三角形は, これまでに熱水の採取された熱水噴出口と北端のチムニー(NEC)の位置を示したものである。括弧内に示したのは, それぞれの熱水噴出口で測定された熱水の最高温度である。この熱水域では優勢な熱水活動が地形的高まりの上部で見られており, 南北方向には途中にひさし状の張り出しを持つ高さ10~15mを越えるEndeavor-typeのチムニーであるNEC, 北のビッグチムニー(NBC), 南のビッグチムニー(SBC)が立ち並んでいる。南北方向ではNBCから離れるにしたがって温度が低下する傾向が見られる。東西方向にもNBC, 247の熱水噴出口, 放射能強度の高い熱水噴出口(HRV)と高温の熱水の広がりが見られる。

上記のように採取された熱水の温度はNBCで一番高く(311), 周辺へ向かうにつれて低下している。これは伊平屋海凹北部海丘海底熱水系における現在の活動の中心がNBCにあることを意味している。このことは後述の熱水の塩濃度からも支持されることである。

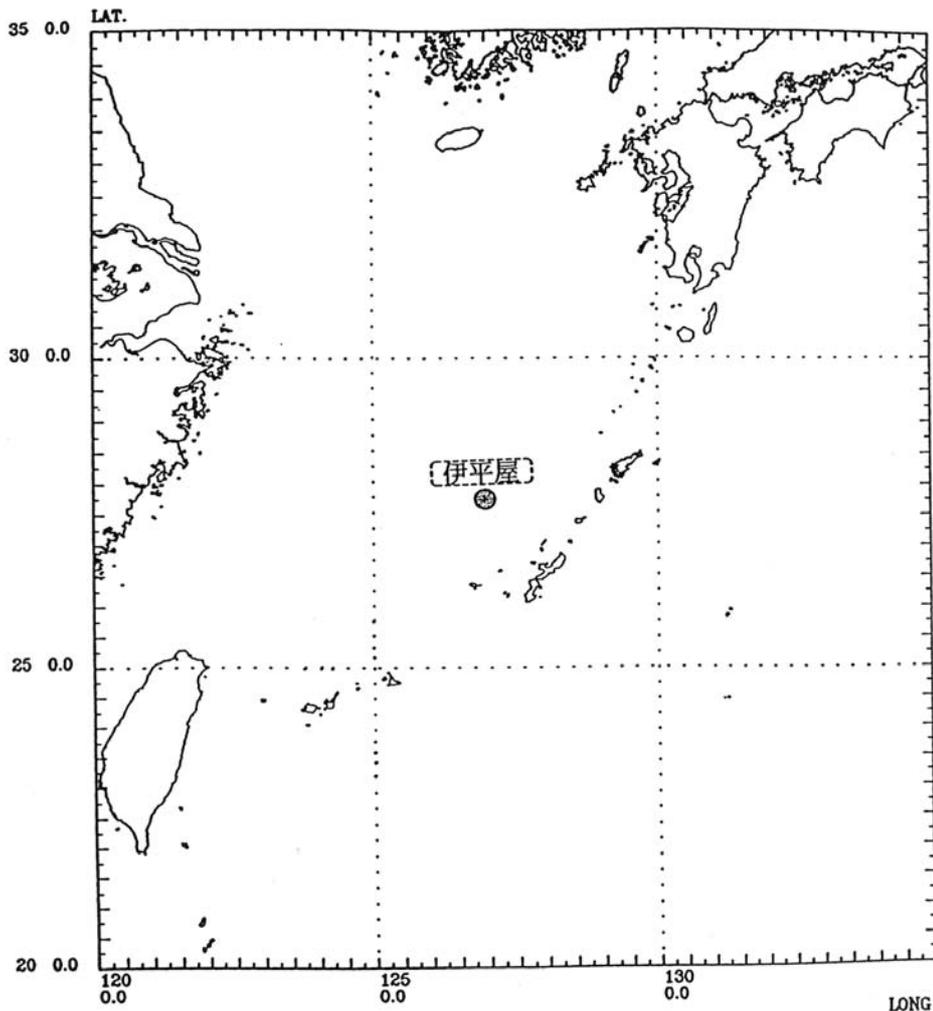


図1 伊平屋凹地北部海底熱水系の位置

Fig. 1 Location of the northern Iheya Ridge seafloor hydrothermal system.

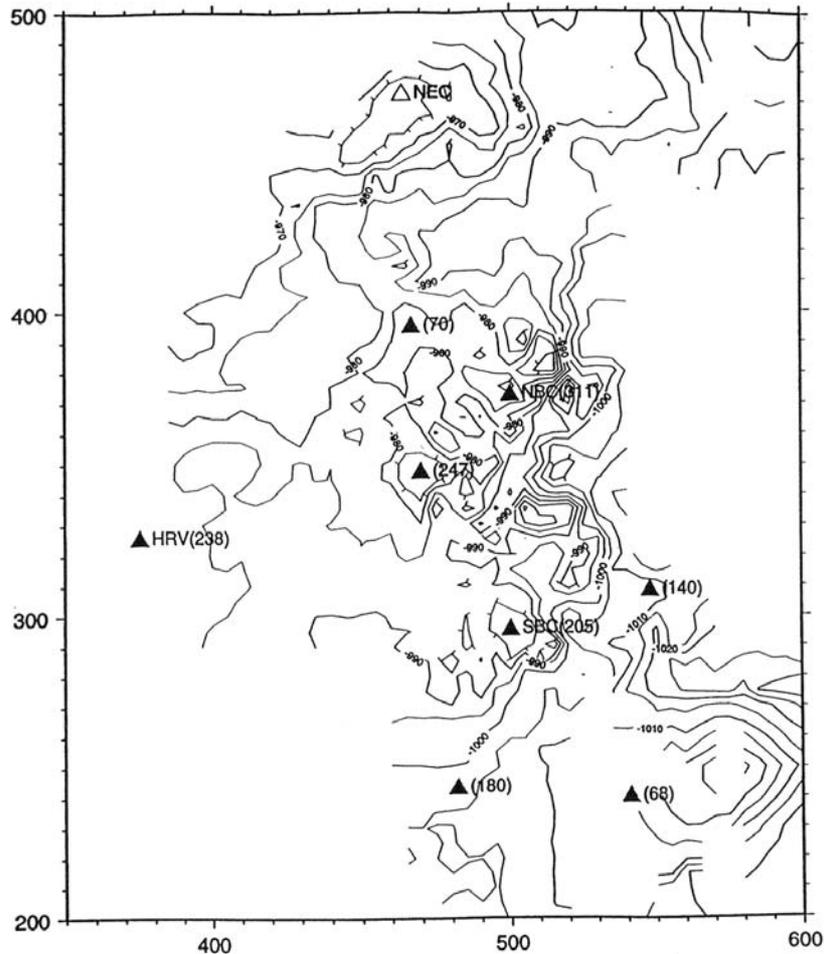


図2 伊平屋凹地北部海底熱水系の地形図(作図原点は27°47.018'N, 126°53.609'E)。三角形は熱水噴出口。()内は熱水の最高測定温度。

Fig. 2 Map of the northern Iheya Ridge seafloor hydrothermal system. Triangles indicate hydrothermal vents. Measured maximum fluid temperatures are shown in parenthesis.

3. 熱水端成分の化学組成

3.1 試料の採取と分析

1996年から1999年の潜航調査で採取された熱水試料のリストを表1にまとめた。試料番号が通算潜航回数と使用した採水器を表している。Dの後の数字が通算潜航回数である。RV1, 2, はそれぞれ「しんかい2000」用回転バルブ式6連採水器(酒井他, 1990)1本目, 2本目で採取された試料であることを示す。Nはニスキン採水器によって採取された試料であることを示す。

採取された熱水試料は、「しんかい2000」揚収後ただちに「なつしま」船上で処理を行った。船上の常圧条件下で脱ガスを起こしている試料については、気体試料と液体試料に分けて回収した。pH, アルカリニティー, シリカ, アンモニウムイオン濃度の分析は試料の処理後ただちに船上で行った。pHは処理していない試料についてpH電極を用いて測定した。アルカリニティーは処理していない試料についてグランプロットを用いる精密測定法で測定した。シリカはモリブデン青法によって, アンモニウムイオン濃度はインドフェノール青法によってろ過し

た試料について比色分析を行った。その他の成分については船上で処理した試料を陸上実験室に持ち帰り分析した。塩化物イオン濃度は処理していない試料についてモール滴定法により分析した。硫酸イオン濃度はろ過した試料を200倍に希釈したものについてイオンクロマトグラフィーによって分析した。ナトリウム, カリウムはろ過・酸処理した試料を100倍に希釈したものについて蛍光分光分析により分析した。マグネシウム, カルシウム, ストロンチウム, リチウム, マンガンはろ過・酸処理した試料を100倍に希釈したものについてICP発光分析により分析した。

3.2 熱水の塩濃度

得られた試料の成分をマグネシウム濃度を横軸にとってプロットしたものを図3に示す。試料は熱水と海水の混合物であるから, 分析値はこの図で混合直線上に並ぶはずである。しかしすべての主成分に対して, 分析値は1本の混合直線上には並んでおらず, むしろこれを3つのグループに分けることが妥当であると考えられる。そ

表1 熱水試料の採取地点
Table1 List of collected samples.

vent	location		temp. ()	depth(m)	sample No.	year
NBC(311)	27° 47 . 220 N	126 ° 53 . 906 E	311	971	D1092-RV5	1999
			311	971	D1092-RV6	1999
			311	977	D974-RV8	1997
HRV(238)	27° 47 . 200 N	126 ° 53 . 849 E	238	984	D857-RV5	1996
			238	984	D857-RV6	1996
			238	984	D857-RV7	1996
			238	984	D859-RV2	1996
			238	984	D859-RV4	1996
			238	984	D859-RV5	1996
			117	982	D1092-RV8	1999
SBC(205)	27° 47 . 176 N	126 ° 53 . 906 E	205	984	D1092-RV2	1999
			205	984	D1092-RV3	1999
180	27° 47 . 154 N	126 ° 53 . 916 E	180	1004	D861-RV6	1996
			180	1004	D861-RV7	1996
70	27° 47 . 241 N	126 ° 53 . 892 E	70	982	D974-RV4	1997
			70	982	D974-RV5	1997
			70	982	D974-RV6	1997
ambient sea water	27° 47 . 220 N	126 ° 53 . 906 E		971	D1092-N	1999
	27° 47 . 223 N	126 ° 53 . 902 E		975	D1093-N	1999
	27° 47 . 220 N	126 ° 53 . 910 E		969	D1094-N	1999

それぞれのグループの熱水端成分の組成を、NBC、HRV、180 の熱水噴出口で採取された試料の組成と底層水の組成から求められる混合直線をMg=0に外捜して求めた。

図3を見ると、3つの熱水とも塩化物イオン濃度とナトリウム濃度が海水よりも小さいことが分かる。このような海水からの塩濃度の低下は熱水が海底下で沸騰により気相と液相に分離しており、生じた気相が噴出前に凝縮して再び熱水に混入した結果であると考えられる。この海域の海底下では沸騰が起こり、気相と液相の分離が起こっていることが推定される。

熱水の塩濃度は熱水地帯の中央に位置するNBCで一番高く、そこから離れた熱水噴出口のものほど低くなっている。後述の通り、この3つの熱水が元は1つの熱水であったとすると次のことが推定される。海底下で沸騰した熱水は、活動の中心部であるNBCでは気液二相が十分分離しないまま上昇して、海底面あるいはその直下で混合して噴出している。これに対して周辺部へは移動性の高い気相の割合が大きくなった二相流が移動して、沸点以下に冷却されて海底下で液相となった後に海底面上に噴出している。

3.3 熱水と岩石の反応

図4にいくつかの化学種について、3つの熱水の端成分を塩化物イオン濃度を横軸にとってプロットしたものを示す。この図を見ると、3つの熱水端成分が原点を通

る直線上に並ぶことが分かる。これは、3つの熱水が1つの共通の熱水から沸騰によって分化したものであることを意味している。また、この直線が海水組成からへだたっていることから、沸騰による気液分離は海水が岩石と十分に反応した後に起きていることが示唆される(千葉他, 1996)。

図5に他の熱水系との比較のために、横軸に塩化物イオン濃度、縦軸にカリウム濃度をとった図を示す。伊平屋海凹北部海丘の熱水は、中央海嶺の熱水が分布する領域よりもカリウム濃度が高い位置にプロットされる。これは他の沖縄トラフの熱水や背弧海盆の熱水にも共通して見られる特徴であり、熱水が中性から酸性の岩石と反応したことを反映しているものである。このことは熱水系で採取された変質した火山岩の試料が流紋岩～デイサイト質の岩石であるという報告(千葉他, 1996)と調和的である。

3.4 その他の特徴

熱水端成分のシリカ濃度はNBCで9.0mM/kg、HRVで9.3mM/kg、180 の熱水噴出口で7.1mM/kgであると推算された。高温・高圧の実験的研究(Von Damm et al., 1991)によって与えられた石英の海水に対する溶解度の温度依存性の実験式を用いると、HRVの熱水端成分のシリカ濃度に対しては約235 で飽和していたと計算される。この値はHRVの熱水温度の実測値(238)とよく一致してお

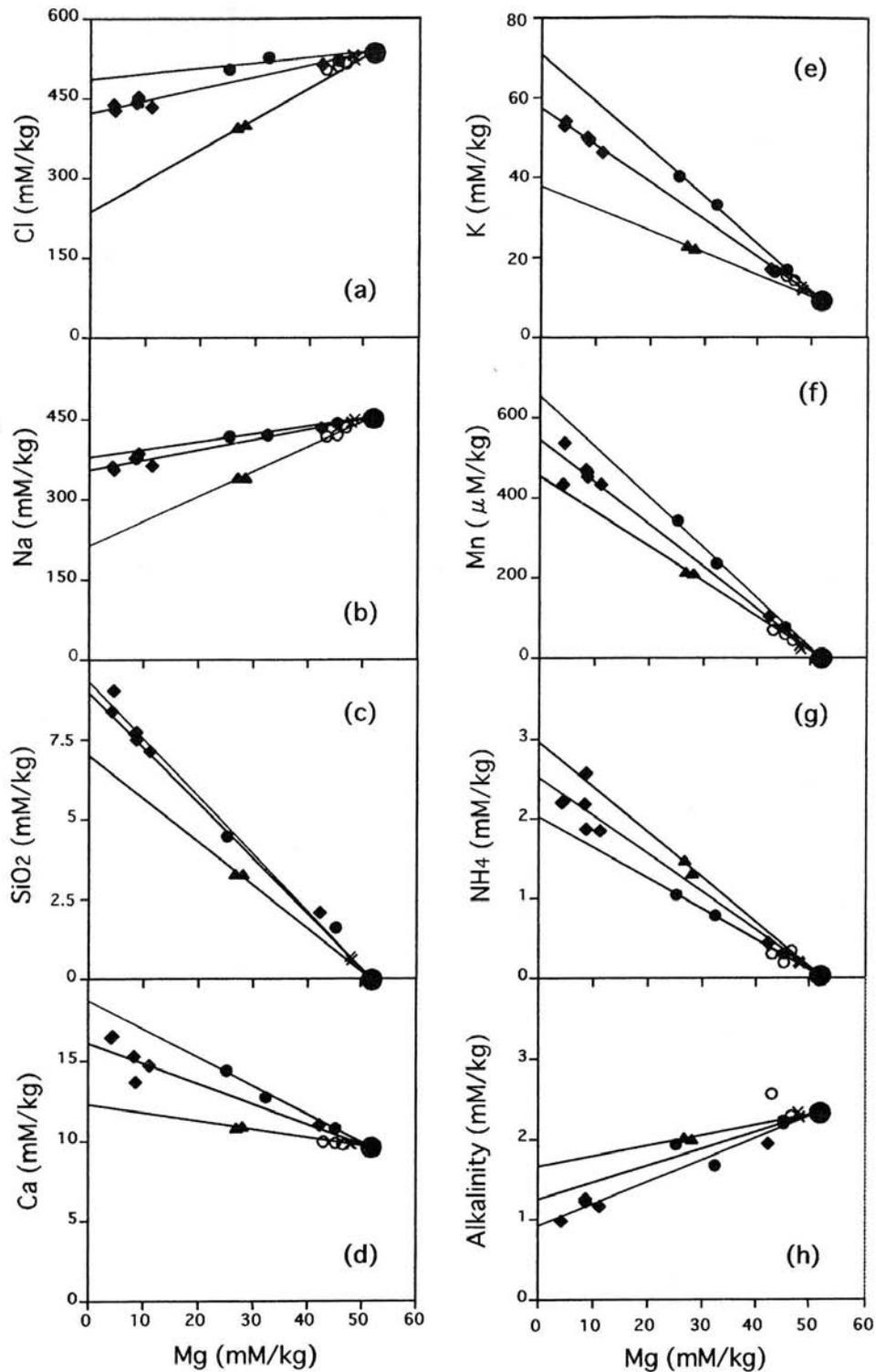


図3 熱水試料のマグネシウム濃度と塩化物イオン(a), ナトリウム(b), シリカ(c), カルシウム(d), カリウム(e), マンガン(f), アンモニウムイオン濃度(g), アルカリニティー(h)の関係

Fig.3 Relationships of Mg concentration v.s. Cl (a) Na (b) SiO_2 (c) Ca (d) K (e) Mn (f) NH_4 (g) concentration and alkalinity (h) of hydrothermal fluids.

(\blacklozenge : NBC, \bullet : HRV, \circ : SBC, \blacktriangle : 180 vent, \times : 70 vent, \circ : sea water)

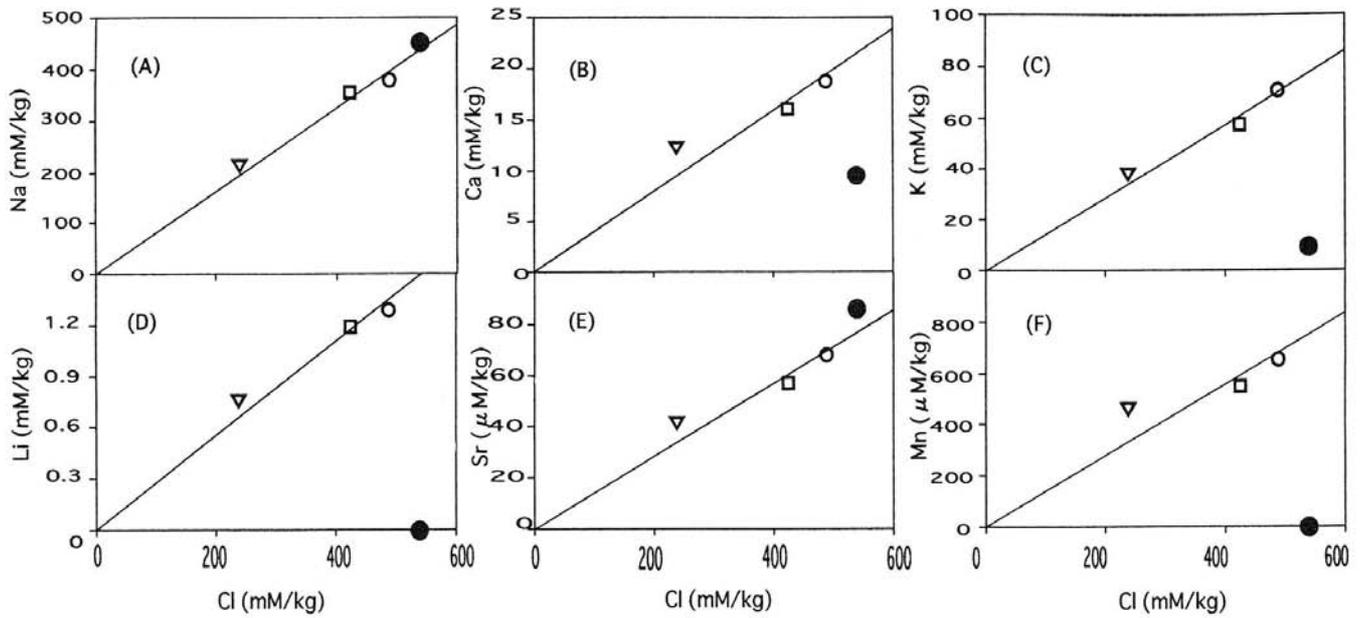


図4 熱水端成分の塩化物イオン濃度とナトリウム(A), カルシウム(B), カリウム(C), リチウム(D), ストロンチウム(E), マンガン濃度(F)の関係

Fig.4 Relationships of Cl concentration v.s. Na (A) Ca (B) K (C) Li (D) Sr (E) Mn (F) concentration of end members of hydrothermal fluids. (● : NBC, ○ : HRV, □ : 180 vent, △ : sea water)

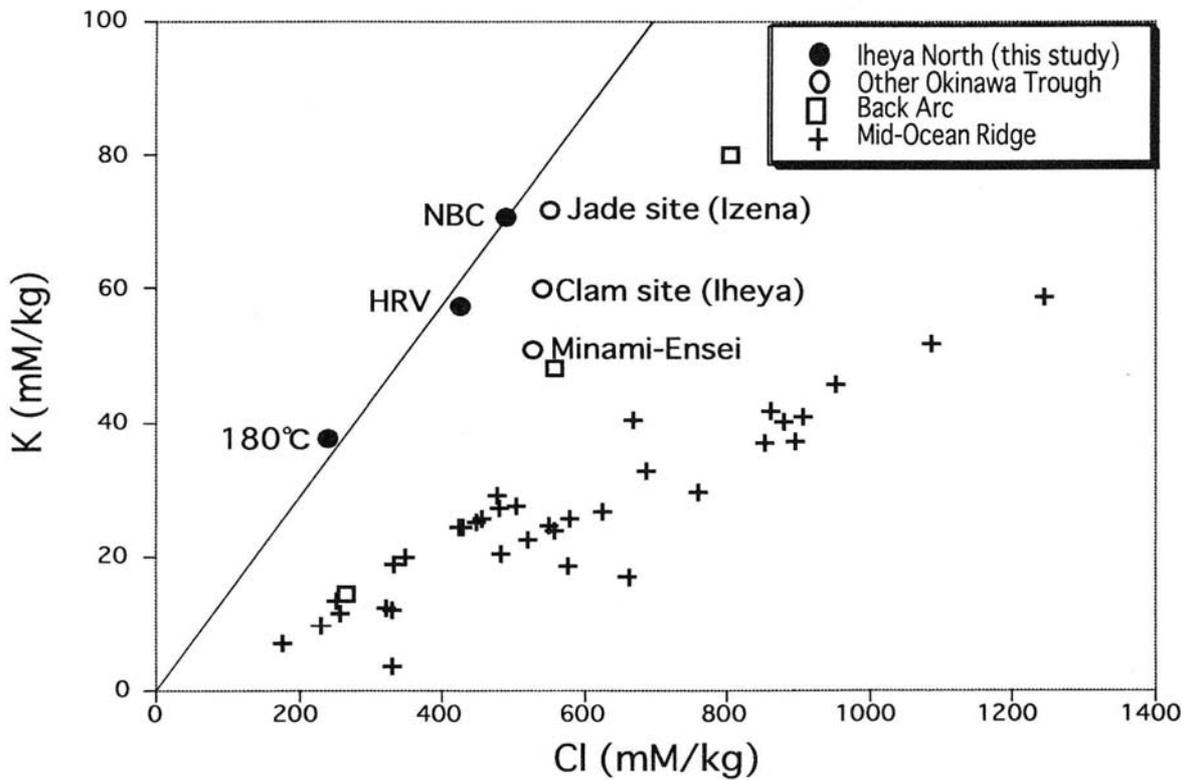


図5 伊平屋海凹北部海丘海底熱水系, 沖縄トラフの他の熱水系, 背弧海盆, 中央海嶺の熱水試料の熱水端成分の塩化物イオン濃度とカリウム濃度の関係

Fig.5 Relationships of Cl concentration v.s. K concentration of end members of hydrothermal fluids collected from the northern Iheya Ridge seafloor hydrothermal system, other sites in Okinawa Trough, Back Arc and Mid-Ocean Ridge.

り、HRVの熱水は海底下でほぼ実測温度で石英と平衡に達していたと考えられる。一方、180 の熱水噴出口の熱水端成分のシリカ濃度からは、石英と平衡にあった温度が約210 であることが計算された。この不一致については千葉他(1996)に述べられているように、約210 の熱水と約4 の海水がほぼ半分ずつ混ざったものが採取されたと解釈するのが採水時の温度記録や得られた試料のマグネシウム濃度から整合的である。ところが、最高温度が311 を記録したNBCの熱水の溶存シリカ濃度からは、この熱水は約230 で石英と平衡にあったと計算される。逆に実測温度から推定される溶存シリカ濃度は約12.5mM/kgで、推算値よりも3mM/kg程も高い。この不一致の原因については、今のところよくわからない。

図3から熱水端成分のマンガン濃度は、0.45~0.65 mM/kgの範囲と推算される。千葉他(1996)に指摘されているように、この値は同じ沖縄トラフの伊是名海穴や南奄西海丘に比べて非常に高く、伊平屋海域のクラムサイトの熱水端成分のマンガン濃度とほぼ同じである。マンガン濃度が高いのは、沖縄トラフの中でも伊平屋海域のみ見られる特徴なのかもしれない。

熱水端成分のアルカリニティーは、ほぼ1.0~1.7mM/kgの範囲だと推算される。この値は、同じ沖縄トラフの伊是名海穴や南奄西海丘で推定されている値と非常に近い値である。アンモニウムイオン濃度(2~3mM/kg)も、同様に似た濃度範囲に入っている。これらの成分は有機物の熱分解生成物に由来するものが主であることから、伊平屋海凹北部海丘海底熱水系においても他の沖縄トラフの海底熱水系と同様に、熱水と堆積物の反応が熱水組成に強く影響していることがわかる(千葉他, 1996)。なお、伊平屋海凹のクラムサイトの熱水では、非常に高いアルカリニティーが報告されており、硫酸イオンの還元と有機物の分解を伴うローカルな浅い熱水循環の存在が示唆されているが(Gamo et al., 1991)、伊平屋海凹北部海丘海底熱水系ではこうしたものは存在しないと考えられる。

4. まとめ

沖縄トラフ伊平屋海凹北部海丘海底熱水系では、1996年から1999年の潜航調査によって実測最高温度311 の熱水の噴出が確認された。熱水の塩化物イオン濃度は底層水の最大50%にまで低くなっており、熱水は海底下で沸騰のために気相と液相に分離していることが推測される。また、推定された3つの熱水の端成分がその塩化物イオン濃度を横軸にとったグラフ上で原点を通る1つの直線上に並ぶことから、これらはもとは同じ熱水だったものが沸騰により分化したものであることが示唆される。さらに、この直線が底層水の組成から隔たっていることから、沸騰による気液分離は海水が岩石と反応した

後に起きたことが示唆される。熱水端成分のカリウム濃度は、中央海嶺の熱水に比べると明らかに高く、熱水が玄武岩ではなく中性から酸性の背弧海盆の岩石と反応したことと調和的である。

熱水の実測最高温度はNBCで一番高く、またそこからの距離が離れるにつれて低下することから、伊平屋海凹北部海丘海底熱水系の熱水活動の中心部はNBCであると考えられる。また熱水の塩濃度は熱水地帯の中央に位置するNBCで一番高く、そこから離れた熱水噴出口のものほど低くなっている。このことから海底下で沸騰した熱水は、活動の中心部であるNBCでは気液二相が十分分離しないまま上昇しているのに対して、周辺部へは移動性の高い気相の割合が大きくなった二相流として移動していることが示唆される。

謝 辞

潜航調査、および船内作業に際しましては、「ドルフィン3K」、「しんかい2000」潜航チームの皆様、並びに「なつしま」乗組員の皆様にご多大のお世話になりました。試料採取にあたりましては、乗船研究員の皆様に御配慮いただきました。試料のICPによる分析には、九州大学理学部地球惑星科学科宮本知治助手の御指導をいただきました。また、本研究には松本・高千穂奨学資金を使わせていただきました。記して深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 千葉 仁・石橋 純一郎・上野 宏共・大森 保・内山 明紀・武田 哲一・高峰朝一郎・李 受映・糸満 彩子(1996) 伊平屋海凹北部海丘の海底熱水活動, "JAMSTEC深海研究, 12, 211-219
- 2) Von Damm, K. L., J. L. Bischoff and R. J. Rosenbauer (1991) Quartz solubility in hydrothermal seawater: an experimental study and equation describing quartz solubility for up to 0.5M NaCl solutions, "Amer. Jour. Sci., 291, 977-1007.
- 3) 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, " Earth and Planetary Science Letters, 107, 328-338
- 4) 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

(原稿受理: 2000年1月4日)