

南部沖縄トラフ・鳩間海丘における熱水の化学組成

中野 綾子^{*1} 松村美奈子^{*1} 石橋純一郎^{*1}

2000年5月に「しんかい2000」を用いて南部沖縄トラフ・鳩間海丘における熱水噴出活動に関する調査が行われた。鳩間海丘の山頂部カルデラ内では活発な熱水活動が分布している。熱水の最高温度は301℃と計測された。この調査で、カルデラ内の9箇所ですべて25の熱水試料を採取することができた。熱水試料の化学組成は単一の熱水端成分と海水の混合でほぼ説明できた。いくつかの熱水試料は熱水端成分の化学組成に極めて近く、ほぼ純粋な熱水試料も採取できたといえる。熱水端成分の化学組成の地球化学的特徴は以下のとおりである。1)カリウム濃度は中央海嶺の熱水の報告値と比べて著しく高く、熱水が中性から酸性の火山岩と反応したことが推察される。2)シリカ濃度は海底面での熱水の温度・圧力条件におけるシリカ溶解度に極めて近く、熱水の岩石との活発な反応が示唆される。3)アンモニウムイオン濃度とアルカリニティーは海水よりも著しく高く、熱水が堆積物中の有機物と反応したことを示している。4)塩化物イオン濃度は海水の値よりも低く、熱水が海底で沸騰し気液分離したことが示唆される。熱水の沸騰により海底で硫化物の沈殿が起こったと考え、海底面で硫化物チムニーが確認されなかったことをうまく説明できる。

キーワード：南部沖縄トラフ，鳩間海丘，海底熱水活動，熱水化学組成，熱水岩石反応

Geochemistry of hydrothermal fluids from the Hatoma Knoll in the South Okinawa Trough

Ayako NAKANO^{*2} Minako MATSUMURA^{*2} Junichiro ISHIBASHI^{*2}

A dive program using SHINKAI2000 was conducted in May 2000, in order to investigate hydrothermal systems in the Hatoma Knoll in the South Okinawa Trough. Within a caldera at the top of the knoll, vigorous hydrothermal activities were observed. The highest measured temperature of the venting fluid was 301℃. During the dive program, 25 hydrothermal fluid samples were collected and their chemical composition was studied. Some of the fluid samples have very low magnesium concentration, indicating that we succeeded in collecting nearly pure hydrothermal fluids. Chemical composition of all the fluid samples were well explained by mixing of a single hydrothermal fluid endmember with ambient seawater. Based on geochemistry of the hydrothermal fluid endmember, following conclusions are considered. 1) High Potassium concentration compared with that of fluids from Mid-Atlantic-Ridge indicates that the hydrothermal fluid interacted with acidic volcanic rocks. 2) Silica concentration was very close to the quartz solubility at the seafloor pressure, temperature condition, suggesting active fluids-rock interaction beneath the seafloor. 3) Ammonium ion and alkalinity were very high compared with that of seawater, indicating contribution from organic matter in sediment layer by fluid-sediment interaction. 4) Significant lower chloride concentration than that of seawater suggests that the hydrothermal fluid experienced subcritical phase separation beneath the seafloor. Sub-seafloor sulfide precipitation induced by phase separation would well explain that only sulfate hydrothermal deposits were observed on the seafloor.

Keywords : South Okinawa Trough, Hatoma Knoll, seafloor hydrothermal activity, chemical composition of hydrothermal fluid, fluid-rock interaction

* 1 九州大学理学部

* 2 Faculty of Science, Kyushu University

1. はじめに

海底熱水活動は海洋地殻内を高温熱水が循環するシステムであり、そこでは様々な化学反応と大規模な元素移動が進行している。海底から噴出する熱水は、海水がこの過程で周囲の岩石などとの反応により進化したものであると考えられるから、その化学組成を調べることは海底下の熱水反応を推察する上で重要である。

鳩間海丘における海底熱水活動は、1999年5月の「しんかい2000」による潜航調査によって山頂部のカルデラ内で発見されたもので(渡辺, 1999)、南部沖縄トラフでは初めての発見例である。本報告では、2000年5月に行われた潜航調査(土田ほか, 2000)の際に採取された熱水試料の分析結果とその地球化学的特徴について報告する。

2. 鳩間海丘の地形的特徴

鳩間海丘の位置と地形図を図1, 図2に示す。鳩間海丘は西表島の北方沖約48km、北緯24度51分、東経123度50分に位置し、水深1900mの沖縄トラフ底から比高約500m、底面の直径約4kmの海丘である。鳩間海丘の山頂部には直径約800m、比高約150mの南に開いたカルデラが存在する。過去の調査の際に山腹で巨れきの転石群が確認されていることから、山頂部南側は崩壊、滑落した可能性もあるとされている(渡辺, 1999)。

3. 鳩間海丘の熱水活動

鳩間海丘の海底熱水活動域分布図を図3に示す。熱水活動域はいくつかのサイトに分かれており、便宜的にニック

ネームがつけられている(土田ほか, 2000)。熱水試料を採取した地点を表1にまとめ、図3に印で示した。熱水活動域の中でも活動が活発であったOritori Siteには、実測された中で最高の温度である301℃の熱水を噴出しているチムニー(図4)が確認されている。

4. 研究方法

4.1. 採水方法

熱水試料の採取には、8連回転バルブ式ポンプ採水装置(酒井ほか, 1990)(図5)およびSMAP採水器(許ほか, 1997)を用いた。底層海水試料の採取には、ニスキン採水器を用いた。採水の様子を図6に示している。

4.2. 分析方法

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。pH、アルカリニティー、シリカ濃度、アンモニウムイオン濃度については6時間以内に船上で分析した。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。表2に各成分の分析方法と分析誤差をまとめてある。

5. 結果と考察

5.1. 熱水端成分(エンドメンバー)

採取された熱水試料は、純粋な熱水と熱水が噴出している付近の底層海水との混合物である。熱水の温度が150℃を超えると、熱水中に溶存していたマグネシウムイオンは反応域周辺の岩石中に変質鉱物として取り込まれ、熱

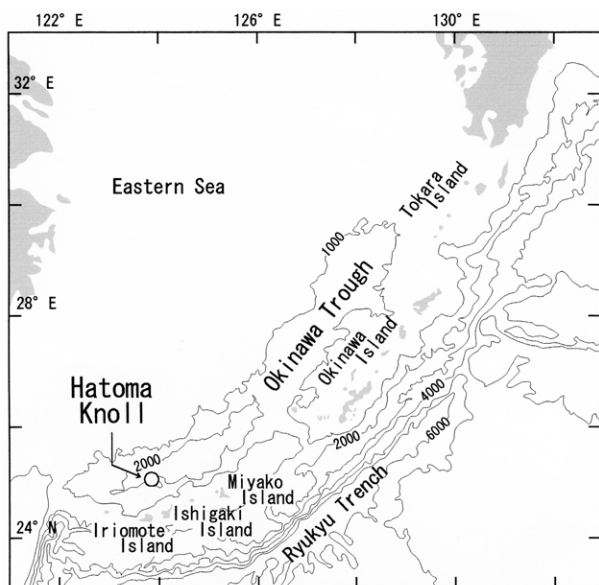


図1 鳩間海丘の位置

Fig. 1 Location of the Hatoma Knoll. Contours are in meters.

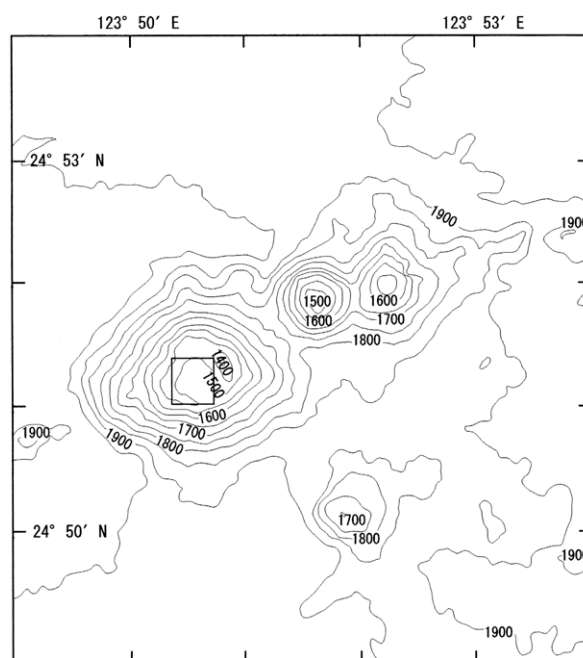


図2 鳩間海丘の地形図(渡辺, 2000に加筆)

(Geodetic system: TOKYO DATUM)

Fig. 2 Sea beam map of the Hatoma Knoll (modified from Watanebe, 2000). Contours are in meters.

表 1 試料の採水地点
Table 1 List of collected samples

date	sample No.	location	site	depth (m)	temp. ()	note
2000.5.18	D1181-R1 D1181-R2 D1181-R3 D1181-R4	24° 51. 212' N , 123° 50. 578' E	Oritori	1506	80-130	hydrothermal fluid
2000.5.19	D1182-N	24° 51. 758' N , 123° 50. 667' E		1606		ambient seawater
2000.5.21	D1184-N	24° 51. 229' N , 123° 50. 458' E		1523		ambient seawater
2000.5.24	D1185-N	24° 51. 222' N , 123° 50. 466' E		1520		ambient seawater
	D1185-S	24° 51. 210' N , 123° 50. 567' E	Oritori	1490	max 259	hydrothermal fluid
2000.5.25	D1186-R1 D1186-R2 D1186-R3 D1186-R4	24° 51. 245' N , 123° 50. 602' E	Agari	1473	max 236	hydrothermal fluid
	D1186-R5 D1186-R6 D1186-R7 D1186-N	24° 51. 216' N , 123° 50. 567' E	Oritori	1493	max 195	hydrothermal fluid ambient seawater
2000.5.26	D1187-N	24° 51. 165' N , 123° 50. 609' E		1350		ambient seawater
	D1187-R1 D1187-R2	24° 51. 216' N , 123° 50. 567' E	Oritori	1493	max 180	hydrothermal fluid
	D1187-R3 D1187-R4 D1187-R5	24° 51. 269' N , 123° 50. 481' E	Chura	1516	max 160	hydrothermal fluid
	D1187-R6 D1187-R7	24° 51. 296' N , 123° 50. 458' E	Chura	1491		hydrothermal fluid
2000.5.29	D1189-N	24° 51. 255' N , 123° 50. 567' E		1451		ambient seawater
	D1189-S	24° 51. 216' N , 123° 50. 570' E	Oritori	1493	max 301	hydrothermal fluid

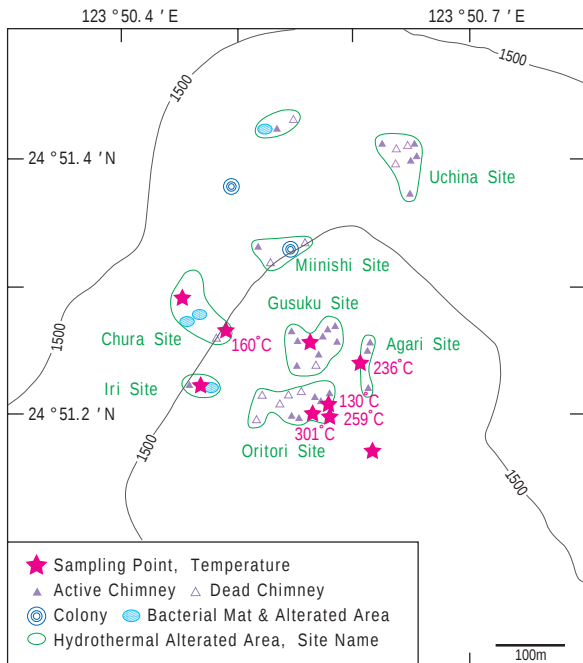


図3 鳩間海丘の熱水活動域の分布図(渡辺, 2000に加筆)。星印は試料採取地点。数字は熱水の実測温度。
(Geodetic system : TOKYO DATUM)

Fig. 3 Distribution of hydrothermal activities on the Hatoma Knoll (modified from Watanebe, 2000). Star mark indicate sampling points. Numbers indicate measured temperatures of venting fluid.



図4 301 の熱水を噴出するチムニー。このチムニーは1日で約30cmも成長した。

Fig. 4 Photograph of a chimney venting 301 fluid. This chimney grew about 30cm in a day.

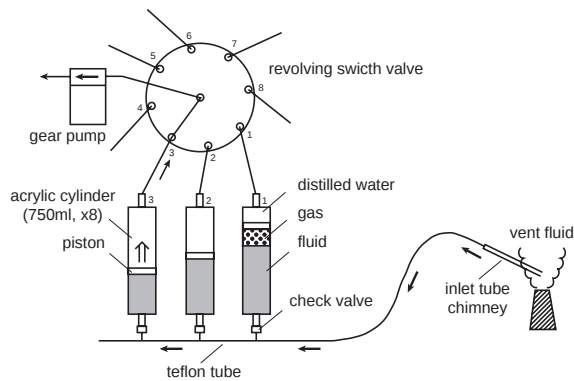


図5 8連回転バルブ式採水装置
Fig. 5 Schematic diagram of the rotary valve multi-sampler

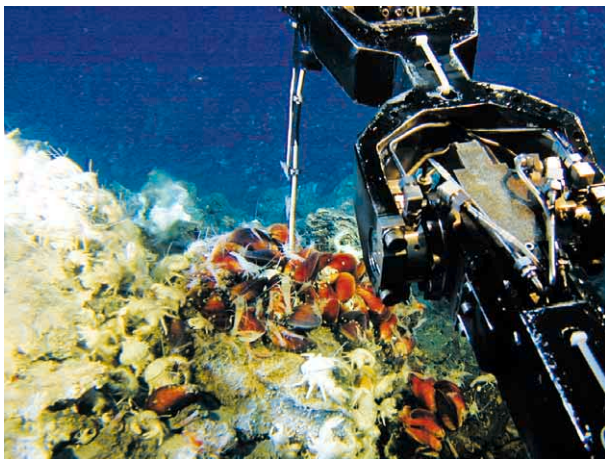


図6 熱水試料の採水の様子
Fig. 6 Sampling of hydrothermal fluid

表2 本研究で用いた分析方法および分析誤差
Table 2 Analytical methods

element	method	precision
pH	pH electrode	0.5%
alkalinity	titration	5%
SiO ₂	colorimetry (molybdate blue method)	7%
NH ₄	colorimetry (nitroprusside method)	2%
Na	flame atomic absorption spectrophotometry	10%
K	atomic absorption spectrophotometry	5%
Li	flame atomic absorption spectrophotometry	6%
Mg	ICP emission spectrophotometry	5%
Ca	ICP emission spectrophotometry	5%
Si	ICP emission spectrophotometry	5%
Sr	ICP emission spectrophotometry	5%
Mn	ICP emission spectrophotometry	5%
Fe	ICP emission spectrophotometry	5%
B	ICP emission spectrophotometry	5%
Cl	titration	2%
SO ₄	ion chromatography	6%

水中からはほぼ完全に除去されることがわかっている。このことから、純粋な熱水のマグネシウム濃度はゼロと考えられる。熱水試料のマグネシウム濃度を横軸に、各成分の濃度を縦軸にとりグラフを作成すると、熱水試料の分析値は底層海水の分析値を通る直線状にプロットされる(図7)。この直線は熱水端成分と底層海水の混合直線であると解釈できる。したがって、この直線のy切片が熱水端成分の推定値となる。

5.2. 熱水反応と熱水の特徴

図7のグラフにおいて底層海水と熱水端成分を結んだ混合直線が1本であるということは、今回得られた全ての熱水試料が単一の熱水端成分と底層海水との混合で説明できるということである。これは鳩間海丘の熱水地帯で噴出している熱水が同一の熱水帯水層を起源としていることを物語っている。

また、図7にも見られるように、いくつかの熱水試料は熱水端成分に極めて近い化学組成を持っていた。すなわち、ほぼ純粋な熱水試料も採取できたということである。これは熱水が海底下で海水の混合を受けていないことを示している。

5.2.1. 熱水の気液分離

図7を見ると、熱水端成分の塩化物イオン濃度とナトリウムイオン濃度がともに底層海水の値の70%程度にまで低下している。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して蒸留が起こり、気液分離を経験していることに起因すると考えられる。生じた気相は噴出前に凝縮して再び液相に混入する。混入する気相の割合が多いと塩濃度は低下する。鳩間海丘海底下で沸騰が起こっていると考えると、海底面で硫化物沈殿がほとんど確認されず、採取されたチムニーの主成分が重晶石などの硫酸塩であったことをうまく説明できる(Drummond et al.,1985)。

5.2.2. 熱水と岩石の反応

(1) シリカ

底層海水中のシリカ濃度が0.12-0.15mM/kgであるのに対し、熱水端成分のシリカ濃度は12.7mM/kgと大幅に増加している。これは熱水が周囲の岩石と反応してシリカを溶出しているためと考えられる。

シリカ溶解度は溶液の温度・圧力条件により決定される(Von Damm et al.,1991)(図8)。鳩間海丘で計測された熱水の最高温度は301℃であり、熱水試料が採取された海底面での圧力は150barであるから、これらの条件における石英に対するシリカ溶解度は12.1mM/kgと計算される。熱水試料から推定された熱水端成分のシリカ濃度は12.7mM/kgであるから、熱水の温度・圧力条件におけるシリカ溶解度にほぼ一致している。すなわち、熱水は沸騰後も周囲の岩石と活発に反応してシリカについて平衡に達したことが推察される。

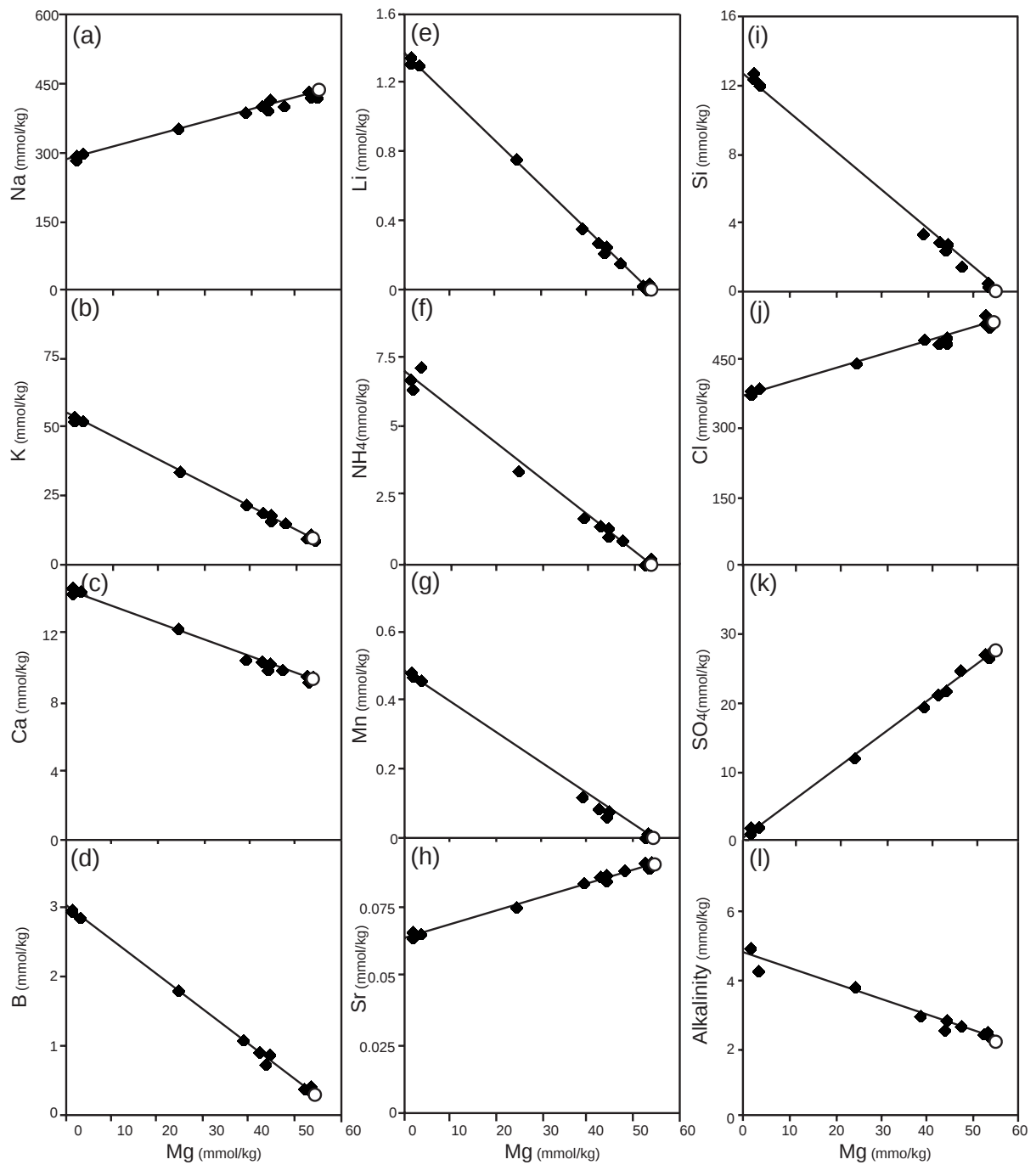


図7 熱水試料のマグネシウム濃度と (a)ナトリウム, (b)カルシウム, (c)カリウム, (d)ボウ素, (e)リチウム, (f)アンモニウムイオン, (g)マンガン, (h)ストロンチウム, (i)ケイ素, (j)塩化物イオン, (k)硫酸イオン濃度, (l)アルカリニティー の関係

Fig. 7 Relationship of Mg concentration V.S. (a)Na, (b)Ca, (c)K, (d)B, (e)Li, (f)NH₄, (g)Mn, (h)Sr, (i)Si, (j)Cl, (k)SO₄, (l)alkalinity of the fluid samples.

(2) カリウム

鳩間海丘海底熱水系の熱水端成分のカリウム濃度は54.7mM/kgであった。これは大西洋中央海嶺の報告値の17-24mM/kg (Von Damm, 1995) と比べてかなり高い値となっている。これは熱水が玄武岩でなく中性から酸性のカリウムに富んだ火山岩と反応したことを示唆している。このことは鳩間海丘で実際に採取された岩石がデイサイト質であったこと (渡辺, 2000) と調和的である。

5.2.3. 熱水と堆積物の反応

鳩間海丘海底熱水系の熱水端成分のアンモニウムイオン濃度 (6.9mM/kg) およびアルカリニティー (4.8mM/kg) は底層海水のそれぞれの値 (0mM/kg, 2.4mM/kg) よりも高い値をとっている。これらの成分は堆積物中の有機物質の熱分解に起因するものと思われる (千葉ほか, 1996)。これは、他の沖縄トラフの熱水系にも共通した性質であり、大陸近くに位置する沖縄トラフが陸源堆積物の豊富な環境であることと矛盾しない。

6. まとめ

熱水の地球化学的特徴から、鳩間海丘で噴出している熱水は海水が海底からしみ込み加熱されて上昇する過程で、デイサイト質の岩石や堆積物中の有機物と反応してその化学組成を変化させていることが明らかになった。さらにこの過程では沸騰による気液分離も起きていることが推察された。

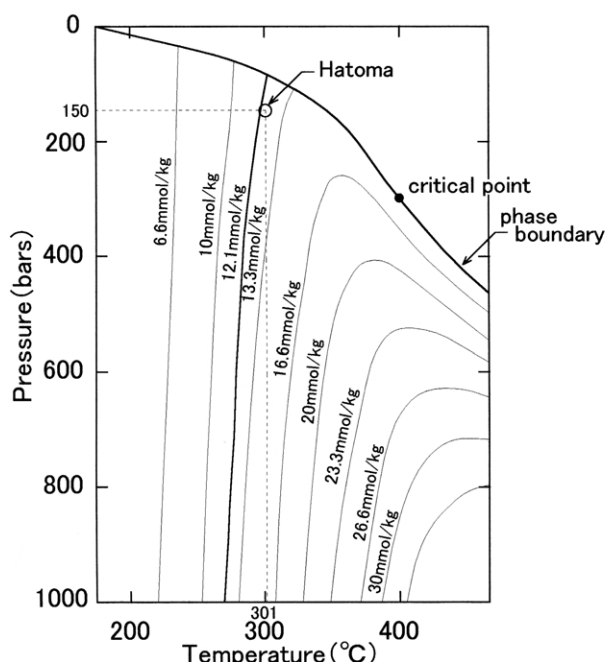


図8 3.2% NaCl溶液への石英の溶解平衡に対応したシリカの等濃度曲線 (Von Damm et al., 1991のデータにもとづいた)。

Fig. 8 Isopleths of dissolved silica in equilibrium with quartz in a 3.2% NaCl aqueous solution (data from Vom Damm et al., 1991).

謝辞

本研究における潜航調査および船内作業に際しましては、「しんかい2000」潜航チームの皆様ならびに「なつしま」乗組員の皆様に大変お世話になりました。試料採取にあたりましては、乗船された研究員の皆様に御配慮いただきました。試料のICP分析におきましては、九州大学理学部地球惑星科学科の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) J.L.Bischoff and R.J.Rosenbauer, "An empirical equation of state for hydrothermal seawater (3.2 percent NaCl)" *Amer. Jour. Sci.* 285, 725-765, (1985)
- 2) 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 "伊平屋海凹北部海丘の海底熱水活動" *JAMSTEC深海研究*, 12, 211-219, (1996)
- 3) S.E.Drummond and H.Ohmoto "Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems" *Econ. Geol.*, 80, 126-147, (1985)
- 4) 許正憲, 長沼毅, 植木達彦, 堀越弘毅 "形状記憶合金を用いた熱水自動採水装置の開発" *海洋科学技術センター試験研究報告*, 35, 99-108, (1997)
- 5) 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 "「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回潜航で採取した二酸化炭素液泡と包接化合物について - "第6回「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 69-86, (1990)
- 6) 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 "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, 地球化学的調査概要報告" *JAMSTEC深海研究*, 17, 35-42, (2000)
- 7) K.L.Von Damm, J.L.Bischoff and R.J.Rosenbauer "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, (1991)
- 8) K.L.Von Damm "Controls on the chemistry and temporal variability of seafloor hydrothermal fluids" in *Seafloor hydrothermal systems: physical, chemical, biological, and geological interactions*, *Geophys. Monog. Ser.*, 91, S.E.Humphris et al., Eds. (AGU, Washington, D.C., 1995), 222-247
- 9) 渡辺一樹 "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, (1999)
- 10) 渡辺一樹 "西表島北東沖海丘群の潜航調査 - 西表海丘, 第1・第2小浜海丘 - " *JAMSTEC深海研究*, 16, 19-28, (2000)

(原稿受理: 2001年2月7日)