

伊豆小笠原弧, 七曜海山列の海底熱水系の 主要成分組成

石橋純一郎*¹ 角皆 潤*¹ 脇田 宏*¹ 渡辺 一樹*²
梶村 徹*² 芝田 厚*² 藤原 義弘*³ 橋本 惇*³

伊豆小笠原弧の七曜海山列に属する水曜海山で発見された海底熱水活動は、島弧の火山活動に伴うものとしては初めての発見例である。1992-1993年に行われた「しんかい2000」の潜航調査において、水曜海山のカルデラ底より噴出している最高311°Cに及ぶ熱水の試料を採取して分析を行った。試料を採取した熱水噴出孔ごとの化学組成の違いは見られず、またこの1年間に化学組成はほとんど変化していない。この水曜海山の熱水の化学組成の特徴として以下の点があげられる。1) 高温の熱水岩石反応を経た熱水に共通する性質を有する。2) 堆積物との熱水反応の影響がみられない。3) Si濃度は海底にごく近い場所での熱水反応を示唆する。4) Cl濃度が海水に比べてかなり高い。5) 他の熱水系と比較してCa濃度が著しく高い。こうした化学的性質は高い重金属元素の溶解度と調和的であり、水曜海山の熱水の化学組成が鉱床生成に適したものであることを示している。水曜海山の湧水試料は、ほとんどの化学種において海水と区別される濃度異常がみられなかった。

キーワード: 海底熱水活動, 伊豆小笠原弧, 水曜海山, 化学組成, 熱水岩石反応

Chemical Composition of Hydrothermal Fluids from the Suiyo and the Mokuyo Seamounts, Izu-Bonin Arc

Jun-ichiro ISHIBASHI*⁴ Urumu TSUNOGAI*⁴
Hiroshi WAKITA*⁴ Kazuki WATANABE*⁵
Toru KAJIMURA*⁵ Atsushi SHIBATA*⁵
Yoshihiro FUJIWARA*⁶ Jun HASHIMOTO*⁶

Vigorous high-temperature fluid (311°C) venting hydrothermal activity was discovered on the caldera floor of the Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, in 1991. This was the first example of submarine hydrothermal system related to arc volcanism. During "Shinkai 2000" dive studies conducted in 1992 and 1993, several hydrothermal fluid samples were

* 1 東京大学理学部

* 2 海上保安庁水路部

* 3 海洋科学技術センター深海研究部

* 4 Faculty of Science, University of Tokyo

* 5 Hydrographic Department, Maritime Safety Agency

* 6 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

collected. All the samples from the caldera floor is represented by mixing of one hydrothermal end-member with ambient seawater. Fluid compositions show no significant change during one year. Fluid chemistry of Suiyo Seamount hydrothermal system is characterized by 1) control by hydrothermal fluid-rock interaction, 2) no influence of fluid-sediment interaction, 3) silica concentration suggesting hydrothermal interaction at shallower depth, 4) higher chloride concentration than seawater, and 5) significant enrichment in calcium. The fluid chemistry would control solubility of ore-forming metal elements as favorable for abundant mineral occurrence. By contrast, fluid samples collected from Mokuyo Seamount show little chemical anomalies.

Key words : Hydrothermal activity, Izu-Bonin (Ogasawara) arc, Suiyo Seamount, Fluid-rock interaction

1. はじめに

1991年に行われた「しんかい2000」の潜航調査によって、伊豆小笠原弧の海底火山である水曜海山のカルデラ縁において230℃の熱水を噴出するチムニー群が発見された(春日・加藤, 1992)。ひき続く1992年の潜航調査によって、この熱水活動がカルデラ底(水深1,380m)の南北300m・東西150mの広い地域にわたって分布する大規模なものであることがあきらかにされた(渡辺・梶村, 1993)。さらに、噴出する熱水の温度は266–311℃に及んでいること、この熱水から沈殿した硫化物・硫酸塩鉱物が現代の熱水性鉱床を形成していることが確認された。これらの事実は水曜海山の海底熱水活動がこれまで研究が行われてきた中央海嶺におけるものに匹敵するものであることを示している(渡辺・梶村, 1994)。

水曜海山は水曜海山の南南西30kmにあるカルデラを持つ海底火山である(図1)。水曜海山とともに小笠原トラフ西方に位置する七曜海山列に属している。水曜海山が石英安山岩質の岩石から構成されているのに対し(渡辺・梶村, 1993)、水曜海山からはカンラン石玄武岩や普通輝石玄武岩などがドレッジされている(長岡ほか, 1992)。1990年の潜航調査においてカルデラ底北壁の水深1,214m付近の虚錘砂礫の隙間から湧水のわき出しとこれに伴った生物群集が発見されている(長岡ほか, 1992)。

水曜海山の海底熱水系は島弧の火山フロントの活動に伴って存在することが初めて示された例である。その活動に伴って噴出する熱水の化学組成も興味深い研究対象として考えられる。特に、水曜海山の石英安山岩質の岩石と反応した熱水の化学組成が、玄武岩質の岩石との反応を経ている中央海嶺型熱水の化学組成と比較してどのような共通点・相違点を示すのかという点が注目され

る。伊豆小笠原弧の他の海底火山からも高温熱水が発見されれば、さらに異なる岩石種との反応による熱水の化学組成のデータが得られると思われる。こうした比較を通して、熱水の化学組成がどのように熱水-岩石間の熱水反応によって支配されているかといった問題についてさらに理解を深めることができるに違いない。またこれとは別に、水曜海山の熱水の化学組成をあきらかにすることによって現在形成されている熱水性鉱床の特徴を支配している要因についての情報が提供されることも期待される。

このような目的のもとに本研究グループは、伊豆小笠原弧の海底火山を対象とした潜航調査において、潜航科学者の協力のもとに熱水試料・湧水試料・底層水試料の採取を行ってきた。本報告においては、これらのうち水曜海山及び水曜海山から採取された試料の化学組成から得られた知見を報告する。なお溶存気体成分の地球化学的特徴については既に別に報告されている(角皆ほか, 1993; Tsunogai et al., in press)。

2. 試料の採取と分析

試料の採取は1992年と1993年の「しんかい2000」の伊豆小笠原弧潜航調査の際に行われた。採取した試料のリストを表1にまとめた。試料番号が使用した採水器をあらわしている。主に使用した「しんかい2000」用回転バルブ式6連採水器(酒井ほか, 1990)によって採取された試料は数字のみの試料番号である。このほかにM式採泥器(蒲生ほか, 1991)で採取された試料にはMを試料番号とした。また真空引き耐圧採水器(地質調査所)(渡辺ほか, 1994)及びポリエチレンバック式採水器(深海環境プログラム)によって採取された試料から分取したものにはそれぞれVB, PBをあてている。

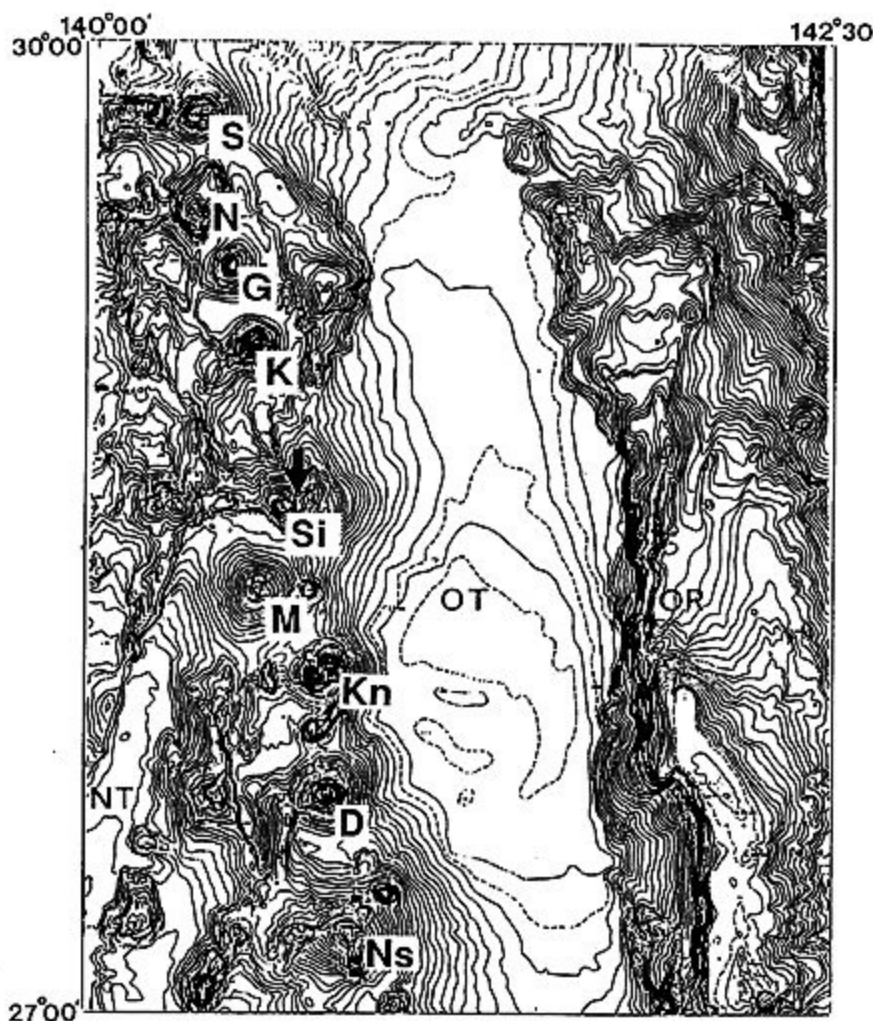


図1 七曜海山列の海底地形図

Fig. 1 A topographic map of Shichiyo Seamount Chain. Si: Suiyo SMT., M: Mokuyo SMT., OR: Ogasawara Ridge, OT: Ogasawara Trough, NT: Nishinoshima Trough, S: Sofu-gan Is., Ns: Nishino-Shima Is., N: Nichiyo SMT., G: Getsuyo SMT., K: Kayo SMT., Kn: Kinyo SMT., D: Doyo SMT.

水曜海山における試料は、主にカルデラ底内の熱水活動の盛んな場所で採取されている。後で述べるように熱水噴出孔ごとの化学組成の相違は見られないので、ここでは詳しい試料採取点の記載は省略する。木曜海山における試料は生物群集の中で採取されている。試料採取に先だって温度計測を行い最もわきだしの強そうなところで試料採取を行うようつとめた。

試料は回収後なるべく早くそれぞれの分析項目に適した瓶に小分けする。pH及びアルカリ度は、何も処理しない試料について分取後可能なかぎりただちに測定を行った。さらにNH₄、Siのための比色分析についても、ろ過試料を用いて12時間以内に行った。これらの分析はいずれも「なつしま」船上実験室で行った。このほかに

船上でろ過した試料を陸上実験室に持ち帰り他の成分の化学分析に供した。陽イオン元素分析用の試料は、持ち帰った直後に硝酸を加えてpH=1~2に調整しておいたものを適当に希釈して分析した。炎光分析でNa、Kを分析したほかは、Mg、Ca、Sr、Ba、Mn、Fe、B、Al、SiについてICP発光分光分析によって定量を行った。陰イオン元素(Cl、SO₄)分析用の試料は、何も加えずに適当な希釈の後にイオンクロマトグラフによって分析した。

3. 結 果

海底から300℃以上の高温で勢いよく噴出している熱水を純粋なまま採取することは一般に難しく、多くの熱水試料は周囲の海水をいくらかまきこんだ形で採取さ

表 1 水曜海山及び木曜海山で採取された試料一覧
Table 1 List of samples collected from Suiyo and Mokuyo Seamounts.

Dive No.	Date	Area	Observer	Sample No.	Temperature
D628	92/7/13	Mokuyo SMT.	J. Hashimoto	1-3	
D630	92/7/16	Suiyo SMT.	T. Kajimura	1-4	311
				M	3
D631	92/7/17	Suiyo SMT.	K. Watanabe	1-4	300
				5-8	296
				M	3
D684	93/6/20	Suiyo SMT.	K. Watanabe	VB 1 B	314
				VB 2 B	253
D685	93/6/22	Suiyo SMT.	A. Shibata	1-4	305
				M	3.5
D689	93/7/1	Suiyo SMT.	Y. Masuchi	PB 1	310
				PB 2	310
D690	93/7/2	Suiyo SMT.	T. Sato	PB 3	302
				PB 4	270
D693	93/7/6	Suiyo SMT.	Y. Fujiwara	1-3	3.5
				4-5	3.5
D694	93/7/9	Mokuyo SMT.	J. Ishibashi	1-3	6.5
				4-6	8.1
				M	4.0

れる。このため採取した試料の分析値から熱水の化学組成を推定するために、純粋な熱水のMg濃度が0であるという性質を利用したMgダイアグラムを用いるのが常法である (Von Damm et al., 1985)。図2に示したように、各試料について着目する化学種の濃度とMgの濃度の関係をプロットすると、これらの試料が純粋な熱水成分と周辺海水の単純混合によるものであるときにはプロットされた点がこの混合直線上にならぶ。この関係をMg=0に外挿することによって、熱水端成分すなわち純粋な熱水中の着目する成分の濃度を推定するのである。

図2からわかるように、本研究で分析した水曜海山の試料の分析値はすべて同じ混合直線上にいらんでいる。このことは、水曜海山のカルデラ底から噴出する熱水の化学組成は噴出孔にはよらず一定であること、さらにこの化学組成が1992年から1993年の1年間にほとんど変化していないことを示している。また用いた採水器の相違による分析値のずれもみられていない。これらの結果から水曜海山の熱水の化学組成を単一の熱水端成分によって代表させてよいことがわかる。各化学種のMgダイアグラムから求められた熱水端成分の化学組成を表2にまとめて示した。なお1993年に採取された試料について一部未分析の化学種があるため、この熱水端成分の化学組成の推算には1992年の試料の分析値のみを用いてい

る。以後の水曜海山の熱水の地球化学的特徴に関する議論は、この化学組成をもとにして行う。

木曜海山の湧水試料の化学組成については、試料を採取した時の温度が8.1℃と最も高かった試料の分析値を表2の4列目にあげている。この湧水の化学組成はSi, alkalinityに若干の異常が認められる以外は、ほとんどの化学種について周辺海水と変らない値となっている。溶存するヘリウムの同位体比組成からこの湧水は熱水活動を経たものが周辺海水と混合したものであることが示唆されている(角皆ほか, 1993)、海水による混合希釈の程度があまりに大きいため濃度異常が検出されにくくなっているものと考えられる。

4. 考 察

表2には比較のためにEPR21Nの熱水の組成と沖繩トラフ伊是名海穴の熱水の組成をあわせて示している。2列目に示したEPRの熱水は中央海嶺型の熱水の代表例であり、3列目に示した沖繩トラフの熱水は大陸縁辺域において堆積物との反応の影響を受けている熱水である。

まず全体的な傾向として、水曜海山の熱水の化学組成は多くの海底熱水系に共通してみられる次のような特徴を示している。すなわち、1) Mg, SO₄に欠如している、2) 陽イオン元素が海水に比べて濃集している、3)

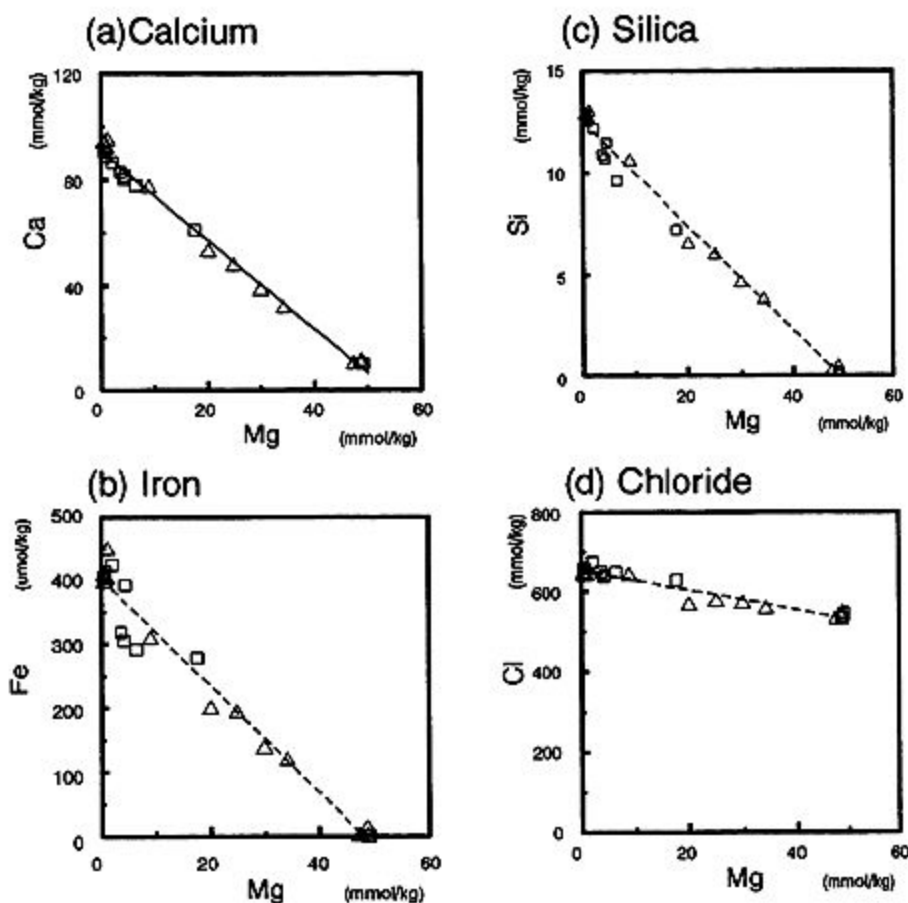


図 2 水曜海山の海底熱水系の熱水の化学組成。□は1992年に採取された試料、△は1993年に採取された試料
 Fig. 2 Mg-diagrams of fluid samples from Suiyo SMT. hydrothermal system. Squares and triangles indicate samples collected in 1992 and in 1993, respectively.

pHが低い、4) H_2S が含まれており還元性である、といった性質がみられている。これらは高温での熱水岩石反応を経た熱水であることを示すものである。

次にこの水曜海山の化学組成を他の熱水系のものと比較した場合の相違点を検討する。まず沖縄トラフの熱水で顕著である NH_4 やalkalinityの増加といった堆積物との熱水反応による影響が、水曜海山の熱水にはほとんど見られない。このことは水曜海山が大陸から遠く離れた海洋性島弧に位置することから当然期待される性質でもある。ここでBの濃度に注目すると、EPRの熱水がほぼ海水と同じ程度であるのに対して、沖縄トラフの熱水はB濃度が非常に高く、水曜海山の熱水はこの中間の値を取っていることがわかる。沖縄トラフの熱水系の場合には堆積物との熱水反応によってBが熱水中に加わったものであると解釈されるが、水曜海山の高いB濃度は他の理由を考えなければならない。とすれば、熱水が反応している水曜海山の岩石中のB濃度が高いこ

とを反映していることが期待される。一般に石英安山岩など酸性岩の方が玄武岩に比べてB濃度が高いので、この推定はもっともらしい。しかし、さらに水曜海山から採取された岩石中のBの分析やBの同位体比の測定などを行ってより確かな証拠を得る必要がある。

水曜海山の熱水のSi濃度がEPRのものより低いことも注目される。熱水中のSi濃度は一般に石英の溶解平衡によって決まっているため、熱水反応の反応条件に関する情報を得ることができる。図3に示した石英の溶解度曲線から、水曜海山の熱水のSi濃度は海底のすぐ近くの深度での熱水反応における溶解平衡に対応していることがわかる。さらに、このような性質は沖縄トラフの熱水系とも共通するものである。こうした結果は、中央海嶺では海洋地殻のかなり深いところまで熱水が循環しているのに対して、島弧の熱水系ではマグマが海底近くまで上昇してきたのに伴って熱水循環が発達していることを示唆していると考えられる。

表 2 水曜海山から噴出する熱水と木曜海山の湧水の化学組成及び他の熱水組成との比較
 Table 2 Chemical composition of hydrothermal end-member fluid of the Suiyo and Mokuyo Seamounts and comparison with other hydrothermal fluids.

Component (unit)	Izu-Bonin Suiyo	ERR21°N OBS	Okinawa JADE	Izu-Bonin Mokuyo	Seawater
tem (°C)	310	350	350	8.1	
pH (25°C)	3.7	3.4	4.7	7.0	7.3
Li (μM)	600	926	1858	26	21
Na (mM)	446	432	425	473	454
K (mM)	29.7	23.5	71.9	10.4	10.7
NH ₄ (mM)	<0.01	0.01	5.0	—	—
Mg (mM)	0	0	0	47.3	49.0
Ca (mM)	89.0	15.6	22.3	10.5	10.1
Sr (μM)	300	81	94	88	86
Ba (μM)	100	8	59	—	—
Mn (mM)	0.58	0.96	0.37	—	<0.001
Fe (mM)	0.43	1.66	0.028	—	<0.001
B (mM)	1.43	0.50	3.41	0.34	0.4
Al (μM)	17.0	5.2	4.9	—	—
SO ₄ (mM)	-0.8	0.5	0	27.0	27.2
Cl (mM)	658	489	550	523	538
alk. (meq)	-0.20	-0.4	+1.88	+2.5	+2.3
Si (mM)	13.2	17.6	12.9	0.30	0.20
H ₂ S (mM)	1.6	7.3	13.6	—	—

all units are in per kg

Suiyo : Izu-Bonin Arc, Suiyo Seamount caldera floor (Tsunogai, 1993)

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

JADE : Okinawa Trough, Izena Cauldron, JADE site (Gamo et al., 1990 ; Ishibashi, 1991)

Mokuyo : Izu-Bonin Arc, Mokuyo Seamount (This study)

Seawater : Ambient seawater collected at the Suiyo Seamount caldera floor (This study)

最後に主要成分元素では、水曜海山の熱水の Ca 濃度と Cl 濃度が他の熱水系のものに比べて著しく高いことが特徴的である。主要成分元素は、岩石から熱水に一方的に溶けだすだけではなく、熱水岩石反応に伴った変質鉱物を生成する形で熱水から岩石に移っていることが知られている。そのため、B の場合ほど単純な関係で熱水が反応した岩石の種類を反映するわけではない。

図 4 にこれまでに報告されている主な熱水の化学組成を X 軸に Cl 濃度・Y 軸に Na/Ca 比をとってプロットした。水曜海山の熱水は海水に比べると Cl 濃度がかなり高いが、そのような熱水系はこの図に示したようにほかにも多くの例が知られている。もともと海水を起源とする熱水の Cl 濃度が大きく変動する要因として次のようなモデルが提唱されている。1) 熱水が海底から噴出する前に沸騰が起きており、水蒸気がぬけて塩分濃度が高くなっている、2) 過去に沸騰して塩分濃度が高くなった熱水が岩石の隙間に残っていたものを現在の熱水循環が取り込んでいる (e.g., Von Damm and Bischoff, 1987)、3) Cl を取り込む変質鉱物が大量に熱水から生

成されたり、この変質鉱物が溶けだしたりしている (e.g., Campbell and Edmond, 1989)、4) マグマ起源の Cl を熱水が取り込んでいる。この問題については多くの議論がおこなわれているが、どのモデルも決定的なものではない。

その変動の原因については不明であるが、熱水中の Cl 濃度は他の陽イオン元素の溶解度を支配する重要な因子であることが熱力学的な考察から明らかにされている。すなわち高温高塩分である熱水溶液の中では、多くの陽イオンが裸のイオンよりも電価が 0 になる Cl 錯体のかたちで溶解するので、Cl 濃度が高い熱水ほどより多くの元素が岩石から溶け込めるのである。また 1 価のイオンに比べて 2 価のイオンのほうがこの効果は大きい。図 4 を見ると実際に海底から噴出している熱水について、Cl 濃度の高い熱水ほど Na に比べて Ca に富むようになる傾向が確かに存在することが認められる。

しかしながら水曜海山の熱水の化学組成は、他のほとんどの熱水の化学組成が示す傾向からかなり外れており、さらに Ca に富んでいる (あるいは Na に欠乏して

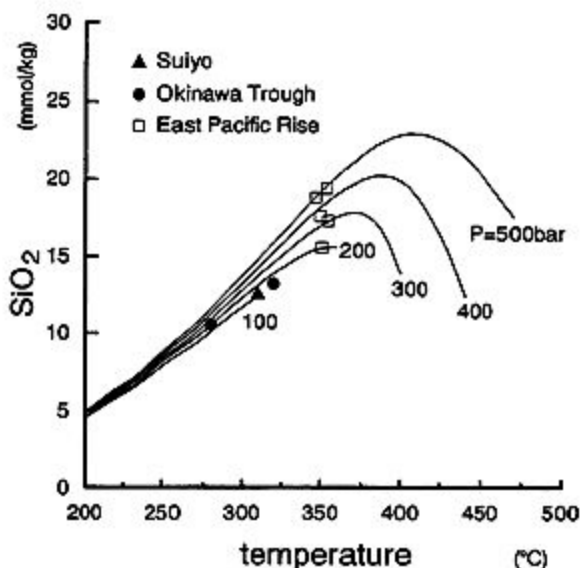


図3 石英の溶解度曲線と熱水中の SiO_2 濃度との関係
 Fig. 3 Relationship between SiO_2 concentration and equilibrium condition with quartz. Isobars are drawn according to the calculated data and plots of Von Damm et al. (1991).

Data sources of SiO_2 concentration of hydrothermal fluids; EPR21 °N: Von Damm et al. (1985), Okinawa Trough, Jade Site: Gamo et al. (1990), Okinawa Trough, Minami-Ensei Knoll: Chiba et al. (1993), Izu-Bonin Arc, Suiyo SMT: This study.

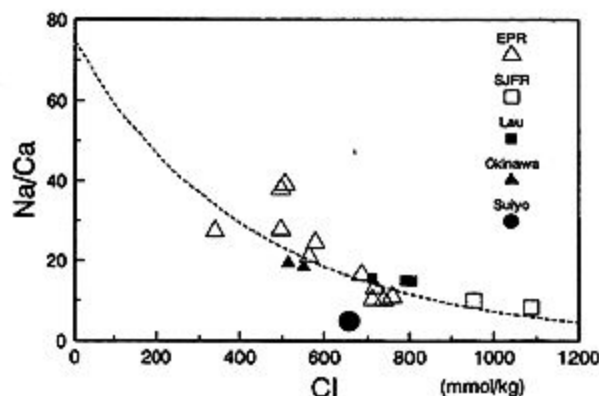


図4 熱水中の Na/Ca 比と Cl 濃度との関係。図中の破線は $[\text{Na}]^2 / [\text{Ca}]$ が一定になるように描かれている。

Fig. 4 Diagram of Na/Ca ratio vs Cl concentration of various hydrothermal fluids. Dot line represents $m\text{Na}^2/m\text{Ca}$ is constant.

Data sources; EPR21 °N: Von Damm et al. (1985), EPR11-13 °N: Bowers et al. (1988), Southern Juan de Fuca Ridge: Von Damm and Bischoff; Lau Basin: Fouquet et al. (1993), Okinawa Trough: Gamo et al. (1990), Chiba et al. (1993). Suiyo SMT: This study.

いる) である。このことを説明する仮説として次のようなことを考えることができるかもしれない。1) 熱水が沸騰を経たものであるため、気液分離によって化学組成が熱力学的に説明できるものから大きく変わっている、2) 水曜海山の熱水は CO_2 に富んでいる(角皆ほか, 1993) ので、これと CaCO_3 のかたちで錯体をつくることでより多くの Ca が熱水に溶解している、3) 熱水と反応している変質鉱物の組成が中央海嶺のものとは大きく異なっており Na がより多く岩石中の変質鉱物に取り込まれている、といった可能性である。1) については水曜海山の熱水の噴出温度 (310°C) がこの水深での沸点にかなり近いことから十分に可能性はある。しかし沸騰現象を示すような直接的な事実は見つかっていない。3) については例えば変質鉱物の中で多量に存在する長石について、異なる固溶体比 (Ab/An 比) を持った長石と反応した熱水は異なる化学組成 (Na/Ca 比) になることを実験的に確かめた報告例がある (Berndt and Seyfried, 1993)。しかし水曜海山を構成する岩石が特に Ca に富んでいるというわけではないので、そこでの熱水反応による変質鉱物が Ca に富んでいるとするのは難しいかもしれない。ともかく詳細な熱力学的計算を行って、これらの仮説の妥当性を検討することが今後の課題として残されている。

硫化物鉱物を生成する多くの重金属元素も、熱水の中では Cl 錯体のかたちで溶存していることが熱力学的に明らかにされている。このことは Cl 濃度が高い水曜海山の熱水は、重金属元素の溶解度も高いということを意味している。また水曜海山の熱水は堆積物との反応による影響がないため、pH が十分に低い。熱水の pH が低いほど重金属元素の溶解度が高いことも熱力学的な考察から導かれる性質である。このように水曜海山の熱水の化学組成は、重金属元素を多く溶解させる鉱液として適したものである。現在のところ重金属元素の分析として Fe の定量だけしか行っていないが、確かに水曜海山の熱水は EPR の熱水に匹敵するような Fe の濃度を示している。さらに多くの化学種の分析を行うことで、現在生成されている熱水性鉱床との関係についても明らかにすることが期待される。

謝 辞

「しんかい2000」運行チーム並びに「なつしま」乗組員の皆様には、潜航調査及び熱水試料の採取に際して大変お世話になりました。特に、段野洲與司令並びに運航部の皆様には、潜航調査航海への長期参加及び潜航地点

の変更に対してご助力をいただきました。地質調査所の中村光一氏・青木正博氏並びに海洋科学技術センター深海環境プログラムの増地恵子氏・佐藤孝子氏からは試料の一部を分取させていただきました。国立環境研究所の野尻幸宏氏には微量成分の分析に際してご助力をいただきました。ここに記してあつく感謝いたします。

参考文献

- Berndt, M. and W.E. Seyfried Jr. (1993): Calcium and sodium exchange during hydrothermal alteration of calcic plagioclase at 400°C and 400 bars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 4445-4451.
- 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. and J.M. Edmond (1989): Halide systematics of submarine hydrothermal vents. *Nature*, 342, 68-70.
- 千葉 仁・中島和夫・蒲生俊敬・石橋純一郎・角皆潤・酒井 均 (1993): 沖繩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. しんかいシンポジウム報告書, 9, 271-282.
- Fouquet, Y., U. von Stackelberg, J.-L. Charlou, J. Erzinger, P.M. Herzig, R. Muhe and M. Wiedicke (1993): Metallogenesis in Back-arc environments: The Lau Basin example. *Econ. Geol.* 88, 2154-2181.
- 蒲生俊敬・酒井 均・金 銀洙・下島公紀・柳澤文孝・石橋純一郎・大森 保・山野 誠・野尻幸宏・田中武男・松本 剛・溝澤巨彦・長沼 毅 (1990): 中部沖繩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. しんかい2000研究シンポジウム報告書, 6, 51-62.
- 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): 中部沖繩トラフ, 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.
- Ishibashi, J. (1991): Geochemical studies of hydrothermal fluids in the middle Okinawa Trough back arc basin. Ph. D. Thesis, Univ. Tokyo, 131pp.
- 春日 茂・加藤幸弘 (1992): 伊豆・小笠原弧水曜海山の火口底における海底熱水性硫化物鉱床の発見. しんかいシンポジウム報告書, 8, 248-256.
- 長岡信治・春日 茂・加藤幸弘 (1992): 小笠原一七曜海山列の木曜海山, 土曜海山および水曜海山の火山地質. しんかいシンポジウム報告書, 8, 237-248.
- 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.
- 角皆 潤 (1993): 溶存気体種を用いた海底湧水系の研究. 東京大学大学院理学系研究科修士論文, 181pp.
- 角皆 潤・石橋純一郎・脇田 宏・渡辺一樹・梶村徹・橋本 惇 (1993): 伊豆小笠原弧, 水曜海山・木曜海山海底熱水系の溶存気体組成. しんかいシンポジウム報告書, 9, 91-103.
- Tsunogai, U., J. Ishibashi, H. Wakita, T. Gamo, K. Watanabe, T. Kajimura, S. Kanayama, and H. Sakai (in press): Peculiar features of suiyo seamount hydrothermal fluids, Izu-Bonin Arc: Differences from subaerial volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*
- Von Damm, K.L., J.M. Edmond, B. Grant, C.I. Measures, B. Walden and R.F. Weiss (1985): Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21° N, East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2197-2220.
- 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.
- 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. *Am. J. Sci.*, 291, 977-1007.
- 渡辺一樹・梶村 徹 (1993): 水曜海山の地形・地質と熱水鉱床. しんかいシンポジウム報告書, 9, 77-90.

渡辺一樹・芝田 厚・梶村 徹・石橋純一郎・角皆潤・青木正博・中村光一 (1994) : 海底火山とそれに伴う海底熱水鉱床の調査手法—伊豆・小笠原弧の水曜海山における「しんかい2000」の潜航調査を例として—, 海洋調査技術, 6, 29-44.

渡辺一樹・梶村 徹 (1994) : 伊豆・小笠原弧中部, 水曜海山の熱水鉱化作用. 資源地質, 44, 133-140.

(原稿受理 : 1994年6月30日)

