

南部沖縄トラフ第四与那国海丘と鳩間海丘の熱水性沈殿物の鉱物組成

岡本 和洋*¹ 石橋純一郎*² 本村 慶信*² 山中 寿朗*³ 藤倉 克則*⁴

南部沖縄トラフの第四与那国海丘と鳩間海丘から「しんかい2000」で採取された熱水性沈殿物の鉱物組成および化学組成を検討した。両海域での鉱物の違いは見られなかったが、チムニーの試料とマウンドの試料とでは構成鉱物が大きく異なる事が明らかになった。チムニーは重晶石からなる硫酸塩チムニーであった。例外として生成後数日の間に採取したチムニーは硬石膏のみからなっていた。チムニーに含まれる硫化物は熱水流路の周囲に黄鉄鉱、四面銅鉱がわずかに存在するのみであった。一方、マウンドを形成する沈殿物はウルツ鉱、方鉛鉱、四面銅鉱、黄銅鉱などの硫化物に富み、少量の黄鉄鉱を含んでいた。また、ウルツ鉱の同質異像である閃亜鉛鉱は存在しない。チムニーに含まれる硫化物とマウンドを形成する硫化物とでは亜鉛、鉛、銅、鉄の量比に明瞭な違いが見られる。このことからマウンドの硫化物はチムニーの硫化物が単に集積したものでないことが明らかになった。さらに、マウンドの硫化物が初生的に硫酸塩鉱物を含有していないことから海底面下でマウンドの硫化物は沈殿して形成すると考えられる。チムニーは熱水が海底面に噴出する際に海水と混合して硫酸塩鉱物が沈殿することによって生成されることが考えられる。第四与那国海丘と鳩間海丘の熱水性沈殿物をこれまでに研究された沖縄トラフの他の熱水地帯のそれと比較すると、重晶石からなる硫酸塩チムニーとウルツ鉱を主体とする硫化物マウンドが特徴的である。

キーワード：熱水性沈殿物、沖縄トラフ、第四与那国海丘、鳩間海丘、黒鉱型鉱床

Mineralogical Studies of Hydrothermal Deposits collected from the Dai-Yon Yonaguni Knoll and the Hatoma Knoll in the Okinawa Trough

Kazuhiro OKAMOTO*⁵ Junichiro ISHIBASHI*⁶ Yoshinobu MOTOMURA*⁶
Toshiro YAMANAKA*⁷ Katunori FUJIKURA*⁸

Mineral composition and chemical composition of hydrothermal deposits collected by "SHINKAI 2000" from Dai-Yon Yonaguni Knoll and Hatoma Knoll in Southern Okinawa Trough are studied. Significant differences were noted between chimney samples and mound samples. The chimney samples consist predominantly of barite. Young chimney samples consist of anhydrite. Only little amount of sulfides was found in the chimney samples; pyrite and tetrahedrite were found along a conduit. On the other hand mound samples include abundant sulfides such as wurtzite, galena, tetrahedrite, chalcopyrite. Sphalerite was not found and pyrite exists only in a few parts of deposits. Different mineralogical composition between the chimney and mound deposits suggests that sulfide minerals in mound were not composed of chimney fragments. Sulfate chimney samples deposited as a result of mixing hydrothermal fluid and sea water on the

* 1 九州大学大学院理学府
* 2 九州大学大学院理学研究院
* 3 九州大学大学院比較社会文化研究院
* 4 海洋科学技術センター
* 5 Graduate school of science, Kyushu University
* 6 Faculty of science, Kyushu University
* 7 Graduate school of social and cultural studies
* 8 Japan marine science and technology center

seafloor. Compared with other hydrothermal deposits in Okinawa Trough, Dai-Yon Yonaguni Knoll and Hatoma Knoll hydrothermal deposits are characterized as abundant barite chimney and sulfide mound including wurtzite.

Keywords : Hydrothermal Deposits, Okinawa Trough, Dai-Yon Yonaguni Knoll, Hatoma Knoll, Kuroko

1. はじめに

鳩間海丘における熱水活動は1999年5月の「しんかい2000」の潜航調査で発見された(渡辺, 1999)。また, その後2000年5月に行われた潜航調査(土田ほか, 2000)では採取された熱水試料の分析が行われている(中野ほか, 2001)。一方, 第四与那国海丘における熱水活動は2000年7月の「しんかい6500」の潜航調査によって発見されたものである(木下ほか, 2000)。本報告では2001年5月に行われた「しんかい2000」潜航調査(第1267潜航～第1277潜航)の際に採取された熱水性沈殿物の分析結果とその特徴を報告する。なお, この潜航調査の概要は藤倉ほか(2001)に報告されている。

2. 地形的特徴及び熱水活動

第四与那国海丘は北緯24度50分東経122度42分に位置している(図1)。熱水活動は大きく北部と南部の2つのエリアに分かれ広がっている。北部のほうが南部よりチムニーの数が多く, よく成長したもの(最大で10m)が確認されている。南部では比較的新しいチムニーが確認されている(木下ほか, 2000)。

鳩間海丘は北緯24度51分東経123度50分に位置し熱水活動域は総面積が16800m²程度にわたり広がっている。噴出する熱水の温度は中心部の最も高いもので300℃程度,

中心から離れるにしたがい温度が低くなる傾向がある。チムニーには透明な熱水を噴出するアクティブチムニーの他に, 熱水噴出活動を終えたデッドチムニーも多く存在する(渡辺, 1999)。また, 噴出している熱水は同一の熱水帯水層をその起源としている(中野ほか, 2001)。

3. 熱水性沈殿物の鉱物組成

3.1. チムニーの構成鉱物

第四与那国海丘と鳩間海丘から採取された熱水性沈殿物には, 重晶石(BaSO_4), 硬石膏(CaSO_4), ウルツ鉱(ZnS), 黄鉄鉱(FeS_2), 方鉛鉱(PbS), 黄銅鉱(CuFeS_2), 四面銅鉱($(\text{Cu,Ag})_{10}(\text{Fe,Zn})_2(\text{Sb,As})_4\text{S}_{13}$), 自然硫黄(S), 輝安鉱(Sb_2S_3), 砒素硫化鉱(As-S), 石黄-鶏冠石がX線回折およびEPMAの分析より確認された。以下にその産状と共生関係を述べる。

第四与那国海丘と鳩間海丘のチムニーはともに重晶石を主要構成鉱物としていた。その重晶石が骨格となり間隙は非晶質シリカに埋められている(図2)。硬石膏は生成後間もないチムニーでは主成分として存在する。しかし, そうでないチムニーの試料からはその存在は確認できなかった。

チムニーには塊状の硫化物はほとんど見られなかった。硫化物は熱水の通路の周囲にわずかに存在するのみで, 自

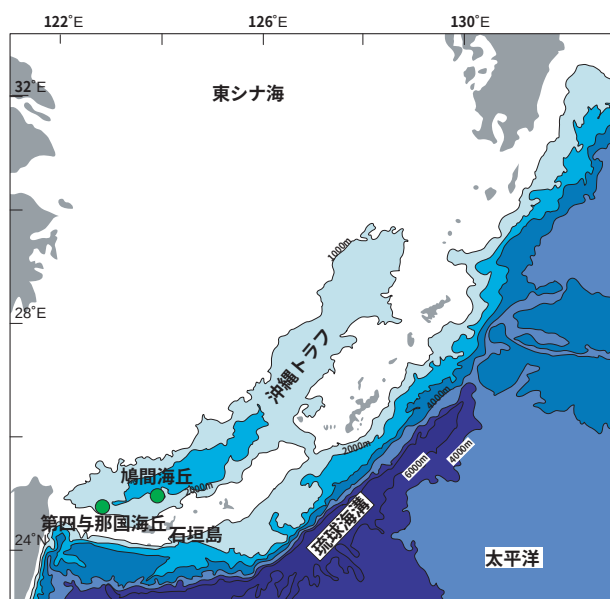


図1 第四与那国海丘と鳩間海丘の位置図。

Fig. 1 Location map of Dai-Yon Yonaguni Knoll and Hatoma Knoll in the Okinawa Trough

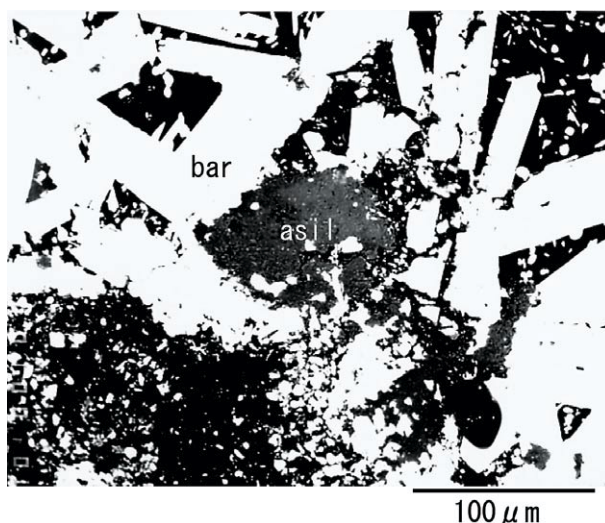


図2 チムニーの反射電子線像。明るい柱状のものが重晶石の骨格でその間隙に非晶質シリカが存在する。bar, 重晶石 asil, 非晶質シリカ

Fig. 2 Backscattered electron image of chimney body sample bar, barite asil, amorphous silica

表1 分析試料一覧
Table 1 List of samples

Sample No.	Location			Depth(m)	Note
1267L-1	Dai-Yon Yonaguni	24-50.935'N	122-42.013'E	1336	recovered with mussels
1267L-2	Dai-Yon Yonaguni	24-50.935'N	122-42.013'E	1336	recovered with mussels
1268L-1	Dai-Yon Yonaguni	24-50.909'N	122-42.038'E	1345	beside active vent
1268L-2	Dai-Yon Yonaguni	24-50.810'N	122-41.987'E	1375	beside shimmering vent
1269L-1	Hatoma	24-51.481'N	123-50.487'E	1472	active chimney max234°C
1270L-1	Hatoma	24-51.454'N	123-50.351'E	1523	active chimney max120°C
1270L-2	Hatoma	24-51.454'N	123-50.351'E	1523	dead chimney
1271L-1	Dai-Yon Yonaguni	24-50.981'N	122-41.953'E	1346	active chimney max121°C
1271L-2	Dai-Yon Yonaguni				colored deposit
1273L-1	Dai-Yon Yonaguni	24-50.912'N	122-42.043'E	1339	recovered with barnacles
1274L-1	Dai-Yon Yonaguni	24-50.810'N	122-41.987'E	1375	recovered with barnacles
1275L-1	Hatoma	24-51.466'N	122-41.915'E	1473	recovered with barnacles
1275L-2	Hatoma	24-51.466'N	122-41.915'E	1473	active chimney max149°C
1276L-1	Dai-Yon Yonaguni	24-50.666'N	122-42.047'E	1386	beside active vent
1277L-2	Hatoma	24-51.649'N	123-50.292'E	1496	beside active vent
1277L-3	Hatoma	24-51.576'N	123-50.307'E	1447	recovered with mussels

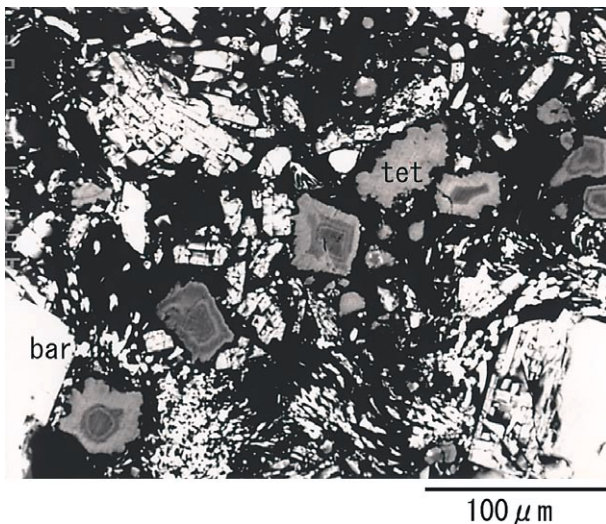


図3 チムニー熱水流路の反射電子線像 tet,四面銅鉱
Fig. 3 Backscattered electron image of chimney conduit sample tet, tetrahedrite

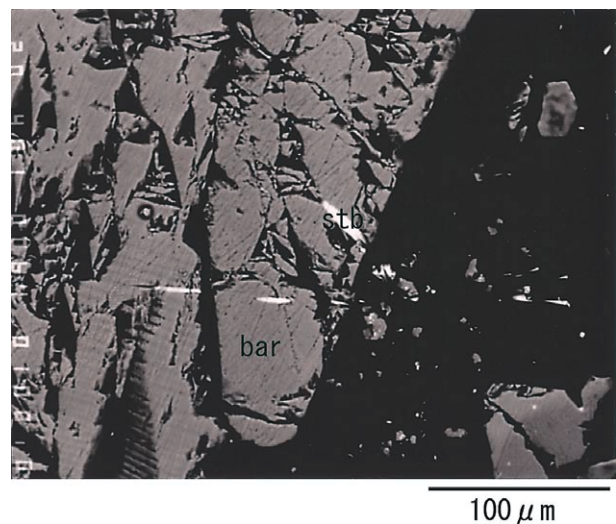


図4 チムニー熱水流路の反射電子線像 stb,輝安鉱
Fig. 4 Backscattered electron image of chimney conduit sample stb, stibnite

形の黄鉄鉱のほか四面銅鉱, ウルツ鉱が認められた。四面銅鉱は極少量の銀を含有していた。また, 一部の四面銅鉱は黄鉄鉱を置換したと考えられる(図3)。

微量鉱物としては輝安鉱, 砒素硫化鉱物が特徴的である。輝安鉱は重晶石中に結晶として含有される(図4)。チムニーの表面には輝安鉱の変質した紅安鉱による赤褐色部が認められる。砒素硫化鉱物は鶏冠石か石黄とみられ, 熱水流路の周りに沿って沈殿しているのが確認された(図5)。

3.2. マウンドの構成鉱物

マウンドの試料にはウルツ鉱, 四面銅鉱, 方鉛鉱, 黄鉄鉱, 黄銅鉱が主要な鉱物として存在する(図6,7)。大部分の試料ではウルツ鉱, 四面銅鉱, 方鉛鉱が多く, 少量の黄鉄鉱, 黄銅鉱が見られる。局部的には黄銅鉱, 黄鉄鉱の多く存在する箇所もあるが, 全体として鉄に乏しい。また, マウンドの四面銅鉱はチムニーのものと異なり, 銀を含有していなかった。硫酸塩鉱物がこれらの硫化物と初生的に共生している

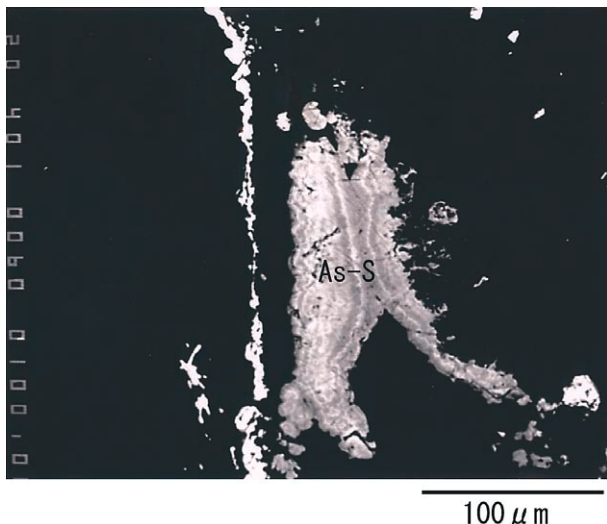


図5 チムニー表面の反射電子線像。As-S,砒素硫化鉱物
Fig. 5 Backscattered electron image of chimney surface sample As-S, arsenic sulfide

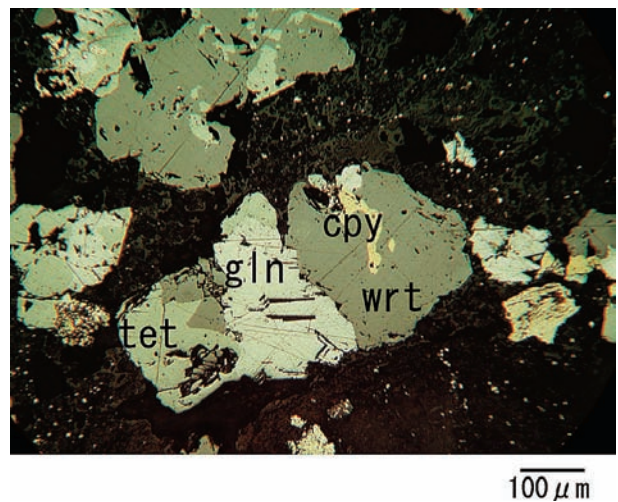


図7 マウンドの反射顕微鏡写真 gln,方鉛鉱cpy,黄銅鉱
Fig. 7 Microphotograph of mound sample gln, galena cpy, chalcopyrite

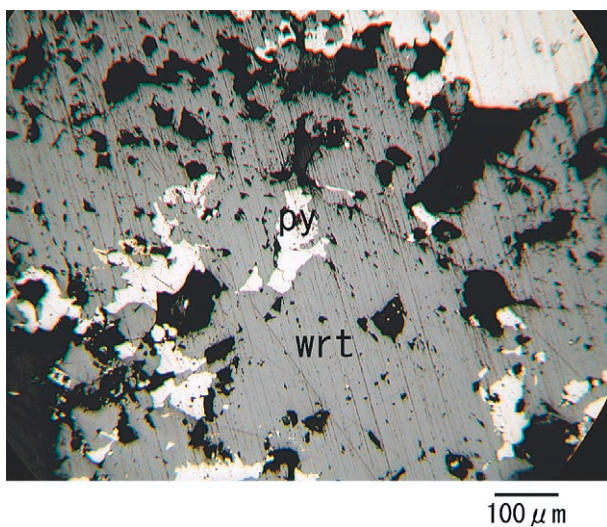


図6 マウンドの反射顕微鏡写真 wrt,ウルツ鉱 py,黄鉄鉱
Fig. 6 Microphotograph of mound sample wrt, wurtzite py, pyrite

ものはみつめられなかった。

マウンドには上記の硫化物のほかチムニーの倒壊物、自然硫黄の沈殿、母岩などが認められ、それらの混合物としてマウンドは形成されている。

4. 生成過程の考察

4.1. チムニーの成因

チムニーはほとんどが重晶石を主とするもので、一部の生成早期のものは硬石膏により構成されている。鳩間海丘の熱水端成分には硫酸イオンが存在しない(中野ほか, 2001)ので重晶石や硬石膏は海水と熱水の混合により沈殿すると

考えられる。また、硬石膏は重晶石に富む成長したチムニーにはほとんど見られないことから、チムニーの成長に伴って外壁の温度が下がり、硬石膏の溶解度が大きくなるため海水に溶解したと考えられる。チムニーには黒鉱型の塊状硫化物はわずかにしか存在しない。熱水は硫化水素を含有するが、黒鉱型の塊状硫化物を形成するほどに十分な量の金属イオンを含有していないと思われる。

EPMAで砒素硫化鉱物の縞状組織が認められたことから(図5)砒素鉱物の組成が周期的に変化している事が示唆される。おそらく、周期的な熱水温度変化を反映しているものと考えられる。チムニー表面の赤褐色部は重晶石と共に沈殿した輝安鉱が海水により酸化され、紅安鉱になることにより二次的に生じるものであると考えられる。

4.2. マウンドの成因

チムニーとマウンドを構成する鉱物の大まかな存在比を知るために試料を王水に溶解させてICP発光分光法により化学組成を分析した。表3にその結果を示す。Total質量パーセントをみるとChimney Bodyは硫化物の含有量が非常に少ない事がわかる。それに比べるとChimney Conduitには硫化物がより多く存在している。Chimney Conduitでは鉄が硫化物の約半分を占め、次いで銅が多い。亜鉛が少ない事を考慮すると、黄鉄鉱、黄銅鉱が大部分を占めることがわかる。一方、マウンドは明らかにその大半を硫化物に占められている。マウンドでは亜鉛が全体の約1/2を占め、鉛が1/4、鉄と銅がそれぞれ1/8程度である。このことからウルツ鉱次いで方鉛鉱に富むことがわかる。

ウルツ鉱の化学組成に着目してEPMAで定量分析を行った。その結果を表4に示す。チムニーとマウンドを比較すると銅、鉄、マンガンの含有量に違いがみられた。銅はマウンドのウルツ鉱には含有されていないが、チムニーのウルツ鉱に

表2 熱水性沈殿物の構成鉱物 +++良く見られる ++普通に見られる +あまり見られない

Table 2 Mineral assemblage of hydrothermal deposits from Dai-Yon Yonaguni knoll and Hatoma knoll +++ abundant ++ common + rare

Sample			Barite	Anhydrite	Stibnite	Kermesite	As-Smineral	Wurtzite	Galena	Chalcopyrite	Tetrahedrite	Pyrite	Covellite	Sulfur
Sulfate Ore	1267L-1	Dai-Yon Yonaguni	+++		+	+								
	1267L-2		+++		+	+								
	1271L-1		+++		+	+	+				+	+		
	1269L-1	Hatoma		+++										
	1270L-2		+++		+	+						+		
	1275L-2			+++										
	1277L-3		+++											
Sulfide Ore	1268L-1	Dai-Yon Yonaguni						+++	+++	++	+++			
	1268L-2							+++	+++	++	+++	++		++
	1273L-1							+++	++			++		
	1274L-1							+++	+++	++				
	1276L-1							+++	++			++	++	
	1275L-1	Hatoma						+++	++			++		
	1277L-2							+++	++	++				
Yellow Deposit	1271L-2	Dai-Yon Yonaguni												+++
	1270L-1	Hatoma												+++

表3 熱水性沈殿物の化学組成(ICPによる)

Table 3 Chemical composition of hydrothermal deposits (determined by ICP)

Ore	Sample No.	Mineral Composition (wt.%)				
		Zn	Pb	Fe	Cu	Total
Chimney Body	1271L-1	0.05	0.07	0.04	0.01	0.17
	1271L-1	0.10	0.00	0.03	0.03	0.16
Chimny Conduit	1271L-1	0.21	0.41	1.85	1.02	3.48
	1271L-1	0.47	0.71	2.19	1.87	5.24
Mound	1268L-2	30.9	15.6	7.41	7.00	60.9
	1273L-1	36.0	21.2	9.75	9.35	76.3
	1273L-1	26.7	15.3	7.41	7.00	56.3
	1273L-1	41.5	24.7	12.0	11.2	89.5

表4 ウルツ鉱の化学組成(EPMAによる)

Table 4 Microprobe analyses of wurtzite from various ore types (determined by EPMA).

Sample No.	Ore	Mineral Composition (wt.%)						Atomic Ratio	
		Zn	Cu	Fe	Mn	Cd	S	Zn	S
1270L-2	Chimney	61.9	1.45	0.14	0.94	0.10	33.3	46.6	51.1
1276L-2	Mound	65.6	0.04	1.11	0.19	0.14	33.1	48.7	50.1
1277L-2		64.2	0.06	2.23	0.13	0.18	32.8	47.9	49.9
1277L-2		64.0	0.00	2.52	0.21	0.20	32.8	47.7	49.8

表5 沖縄トラフ各熱水噴出地域の熱水性沈殿物の鉱物学的特徴(伊平屋、南奄西、伊是名の沈殿物のデータはNakashima et. al (1995) から引用) +++ 良く見られる ++ 普通に見られる + あまり見られない

Table 5 Mineral assemblage of hydrothermal deposits of Okinawa Trough. (Data of Iheya, Minami-Ensei, Izena, are from Nakashima et. al (1995))
+++ abundant ++ common + rare

	Dai-Yon Yonaguni		Hatoma			CLAM Site(Iheya)		Minami-Ensei		JADE Site(Izena)	
	Chimney	Mound	Baby C.	Chimney	Mound	Baby C.	Pyramid C.	Chimney	Sheet Sulfide	Black ore	Zn-Pb ore
Calcite							+++	+			
Rhodochrosite							+++				
Dolomite								+			
Cerussite								+			
Anhydrite			+++				+	+++		+++	
Gypsum							+	++	+++	+++	
Barite	+++			+++			+	+		++	+++
Anglesite								+			
Sphalerite								++	+++	+++	+++
Wurtzite		+++			+++		++				
Pyrrhotite							+				+
Pyrite	+	+		+	+	++	+	++	++	+	+
Marcasite									+		+
Galena		++			++		+		++	++	++
Chalcopyrite		++			++		+	+	++	++	++
Iso-cubanite							+				+
Stibnite	+			+					++	+	
Tennantite	+								+		
Tetrahedrite	+	++			++				+	+	
Alabandite							+				
Amorphous silica	+++			++			+++		++	+++	++
Talc								+			
Chrysotile								+			
Sulfur		++			++	+++	+		+		
Realgar	+						+				++
Cinnabar									+		+
Mn-hydroxide							++				
Fe-Pb oxhydroxide							+				

は多量に含まれる。また、チムニーのウルツ鉱がほとんど鉄を含有していないことも特徴的である。以上の分析からチムニーのウルツ鉱とマウンドのウルツ鉱とではその化学組成が異なる事がわかった。この結果は両者が異なる環境下で形成された事を示唆している。

これまでに述べたように、マウンドで硫化物と初生的に共生する硫酸塩鉱物はみられないこと、チムニーとマウンドで硫化物の組成がかなり異なることから、マウンドの形成過程はチムニーの形成過程と異なるものであると考えられる。おそらく、海底面下での沈殿形成によりマウンドは成長したものと思われる。

5. 沖縄トラフのほかの熱水地帯の熱水性沈殿物との比較

表5にこれまでに研究された沖縄トラフの熱水噴出地域である伊平屋凹地、南奄西海丘、伊是名海穴から得られた

熱水性沈殿物の構成鉱物と本研究地の試料との比較を示す。伊平屋凹地の熱水性沈殿物はマンガンに富む炭酸塩により特徴付けられ(井沢ほか、1991)、南奄西海丘では硫酸塩と亜鉛を主体とした硫化物により特徴付けられる(中島ほか、1993)。伊是名海穴では黒鉱型の塊状硫化物鉱床の存在が特徴的である(Halbach et al,1993)。

第四与那国海丘と鳩間海丘の間では熱水性沈殿物の構成鉱物の差は少ない。これらの沈殿物は伊平屋凹地、伊是名海穴とはその特徴を異にするが、南奄西海丘の熱水沈殿物試料とは構成鉱物が似ている。しかし、本地域ではチムニーでの硫酸塩の生成とマウンドの硫化物の生成が明瞭に区別されている。さらに、閃亜鉛鉱ではなくウルツ鉱が沈殿している。以上のことから、重晶を主体とした硫酸塩チムニーとウルツ鉱を主体とした硫化物マウンドで特徴付けられる熱水性沈殿物と言える。

謝辞

本研究における潜航調査および船内作業に際におきまして、「しんかい2000」潜航チームの皆様、「なつしま」の乗組員の皆様ならびに研究支援員の皆様には大変お世話になりました。試料の採取に際しては乗船研究者の皆様にご配慮を頂きました。鉱物の分析の際には九州大学理学部の島田和彦氏に、またICP分析の際には九州大学理学部の宮本知治博士にご協力いただきました。以上の方々にあつく御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 藤倉克則, 藤原義弘, 石橋純一郎, 片岡聡, 小松徹史, 前澤優子, 牧陽之助, 宮崎淳一, 三宅裕志, 岡本和洋, 土田真二, Laszlo G.T., 大越健嗣, 山口寿之, 山本啓之, 山中寿朗, 渡部元, 渡部裕美, Susanne Z., 加藤憲二, “ 沖縄トラフ第四与那国海丘と鳩間海丘における「しんかい2000」システムによる熱水生態系調査報告 ” , JAMSTEC深海研究, 19, 141~54 (2001)
- 2) P. Halbach, B. Pracejus, A. Marten, "Geology and Mineralogy of Massive Sulfide Ore from Central Okinawa Trough, Japan, "Economic Geology, 88, 2210~2225 (1993)
- 3) 井沢英二, 本村慶信, 田中武男, 木村政昭, “ 沖縄トラフ伊平屋海嶺の熱水性炭酸塩チムニー ” 海洋科学技術センター試験研究報告, 185~192 (1991)
- 4) 木下正高, 加賀谷一茶, 館川恵子, J.C.Sibuet, C.S.Lee, 松本剛, YK00-06Leg 2航海乗船研究者一同 “ 沖縄トラフ石垣第四与那国海丘北方域の熱水地帯マッピング ” , 第17回しんかいシンポジウム予稿集, 103~104 (2001)
- 5) 中野綾子, 松村美奈子, 石橋純一郎, “ 南部沖縄トラフ・鳩間海丘における熱水の化学組成 ” , JAMSTEC深海研究, 18, 139~144 (2001)
- 6) 中島和夫, 酒井均, 吉田広樹, 千葉仁, 田中善孝, 蒲生俊敬, 石橋純一郎, 角皆潤, “ 沖縄トラフ伊平屋凹地と南奄島海丘の熱水性沈殿物の鉱物組成と流体胞有物: 「しんかい2000」第621潜航報告及び第487潜航と第622潜航の熱水性沈殿物について ” , 第9回しんかいシンポジウム報告書, 253~269 (1993)
- 7) K. Nakashima, H. Sakai, H. Yoshida, H. Chiba, Y. Tanaka, T. Gamo, "Hydrothermal mineralization in the Mid-Okinawa Trough, "in Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific, H. Sakai and Y. Nozaki, Eds. (TERAPUB. Tokyo, 1995), 487~508
- 8) 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)
- 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, “ 沖縄トラフ, 鳩間海丘の海底熱水活動域のマッピング ” , JAMSTEC深海研究, 19, 87~94 (2001)

(原稿受理:平成14年8月29日)

