

水曜海山海底熱水性鉱床と 他の海底熱水性鉱床の化学組成比較

渡辺 一樹*¹ 芝田 厚*¹ 梶村 徹*¹

伊豆・小笠原弧、水曜海山産の海底熱水性硫化物の化学組成分析を行った。その結果、水曜海山産の硫化物は、微量元素のヒ素、カドミウム、アンチモンに富み、主要元素の鉄、銅、亜鉛が多く、鉛が少ないのが特徴である。

これまで発見された海底熱水性鉱床の硫化物について、主要元素含有量の比較を行った結果、以下の特徴が挙げられる。水曜海山、EPR、TAG産の硫化物は、鉛含有量が少ない。一方、沖縄トラフ産の硫化物は鉛含有量が多く、黒鉄型鉱床の化学組成と類似している。沖縄トラフ産の硫化物は亜鉛の硫化物を主体とし、水曜海山産の硫化物は銅と亜鉛の硫化物を主体とする。EPRとTAG産の硫化物は鉄の硫化物を主体とし、相対的にEPRで亜鉛含有量が多く、TAGで銅含有量が多い。硫化物の鉄含有量は、島弧性の海底火山産の硫化物で相対的に少なく、中央海嶺産の硫化物で相対的に多い。

海底熱水性硫化物の主要元素組成を支配する要因の候補として、①銅・亜鉛については熱水の温度、②鉛については熱水が海底下で反応した海洋性堆積物の有無、③鉄については熱水が海底下で反応した母岩の鉄含有量が挙げられる。

キーワード：水曜海山、海底熱水性硫化物、主要元素組成、銅-亜鉛-鉛三角図、銅-亜鉛-鉄三角図

Comparison of the Bulk Chemical Composition between Hydrothermal Sulfides from Suiyo Seamount and Sea-floor Hydrothermal Sulfides from the Other Areas

Kazuki WATANABE*² Atsushi SHIBATA*²
Toru KAJIMURA*²

Sea-floor hydrothermal sulfides from Suiyo Seamount on the Izu-Ogasawara Arc were analyzed chemically. So the chemical composition of sulfides from Suiyo Seamount is characterized by enrichments in Fe, Cu, Zn and a poorness in Pb as major elements, with As, Cd, Sb as minor elements.

The major element composition of sulfides from sea-floor hydrothermal deposits discovered so far is characterized as follows. Sulfides from Suiyo Seamount, EPR, TAG

* 1 海上保安庁水路部

* 2 Hydrographic Department, Maritime Safety Agency

hydrothermal field have lower Pb contents. The other side, sulfides from submarine volcanoes in the Okinawa Trough have higher Pb contents, which chemical compositions resemble them of Kuroko-type deposits. Sulfides from the Okinawa Trough are richer in Zn, from Suiyo Seamount are richer in Cu and Zn. Sulfides from EPR and TAG have an enrichment in Fe. Relatively sulfides from EPR are richer in Zn, from TAG are richer in Cu. The Fe content in sea-floor hydrothermal sulfides from arctic submarine volcanoes is lower, that from hydrothermal fields on mid-ocean ridges is higher, relatively.

As candidates for factors dominating major element compositions in sea-floor hydrothermal sulfides, three causes are cited as follows, 1) the temperature of hydrothermal fluids about Cu and Zn, 2) the existence of deep-sea sediments that hydrothermal fluids have reacted under sea-floor about Pb, 3) the Fe content in volcanic rocks that hydrothermal fluids have reacted under sea-floor about Fe.

Key Words : Suiyo Seamount, Sea-floor hydrothermal sulfide, Major element composition, Cu-Zn-Pb ternary diagram, Cu-Zn-Fe ternary diagram

1. はじめに

伊豆・小笠原弧の火山フロント上に位置する七島・硫黄島海嶺には、活動的な海底火山が多数存在する。「しんかい2000」の精力的な潜航調査により、この七島・硫黄島海嶺においても、島弧性の海底熱水活動に伴う海底熱水性鉱床が次々に発見されている（春日・加藤，1992a；飯笹，1992；飯笹ほか，1993；仲ほか，1989）。

そのうち水曜海山は、七島・硫黄島海嶺上の七曜海山列のほぼ中央に位置する（図1）。1991年に水曜海山西峰カルデラ内に、活発に熱水を噴出する硫化物チムニーが発見されて以来（春日・加藤，1992b），1993年までに合計6回の「しんかい2000」の潜航調査（第562，629，630，631，684，685潜航）で、数十個の熱水性硫化物試料を採取した（渡辺・梶村，1993；渡辺ほか，1994a）。いずれの硫化物試料も活発に熱水を噴出しているチムニーか、あるいはその根元のマウンドを崩して採取したものであり、噴出している熱水の温度は230～317℃であった。

本報では、水曜海山西峰カルデラ産の海底熱水性硫化物（以下、硫化物と略す）について、化学分析の結果を詳細に検討し報告するとともに、他の海域産の硫化物の化学組成と比較する。

2. 水曜海山産の硫化物の分析とその結果

本報では硫化物鉱床全体の組成を議論するために、化学分析用試料は硫化物の未変質部分の塊全体を、10g以上粉碎して均質化したものを用いた。硫化物24試料35元素についてICP分析を行い、含有量の多い亜鉛と銅については、粉末法蛍光X線分析（渡辺，1994）と水溶液に溶

解して原子吸光分析とを併用して化学分析を行った。また、金、銀、ヒ素、アンチモン、ビスマス、ゲルマニウム、セレン、テルルのICP分析については、前処理の溶解方法を変えてデータの再確認を行った。

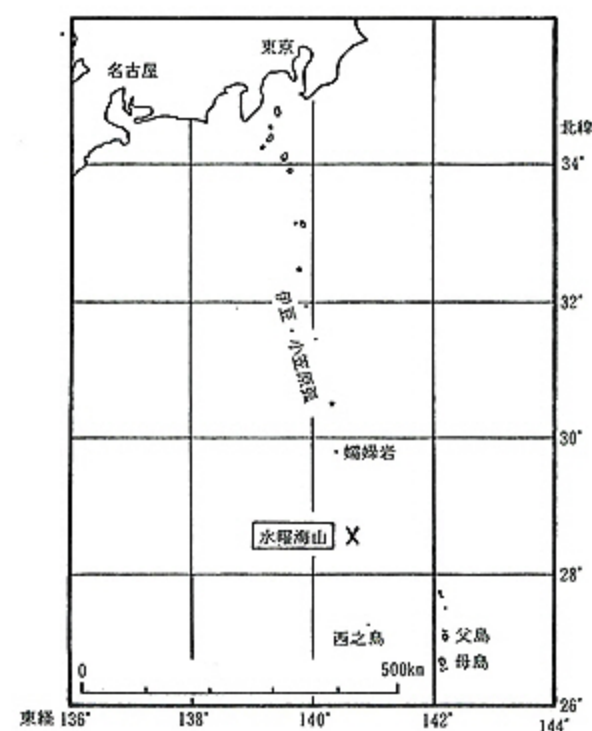


図1 水曜海山の位置

Fig. 1 The location of Suiyo Seamount.

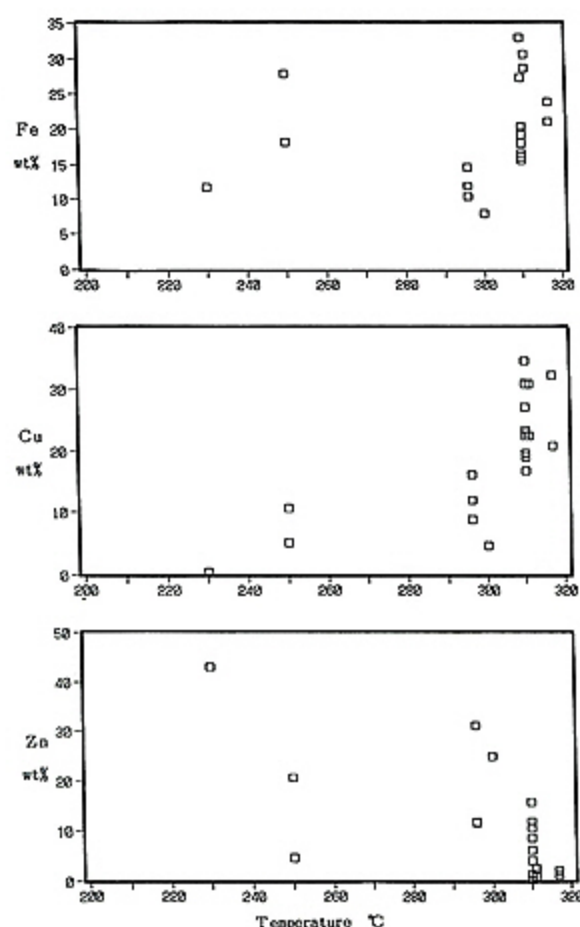


図2 水曜海山産の硫化物の鉄、銅、亜鉛含有量と採取された熱水の温度との関係

Fig. 2 Relations between Fe, Cu, Zn contents of hydrothermal sulfides from Suiyo Seamount and in situ temperatures of hydrothermal fluids collected by "Shinkai 2000".

硫化物の分析結果とその平均値、噴出していた熱水の温度を表1に示す。この温度は熱水を採取した際に、採水口先端に取り付けられた温度センサーにより得られた温度の最高値である(石橋ほか1994; 角皆ほか, 1993)。残念ながらいくつかの試料については、噴出していた熱水の温度を測定していない。これらの硫化物試料の化学組成の範囲は、金0~71ppm、銀12.6~377ppm、銅0.392~34.5wt%、亜鉛0.15~43.8wt%、鉛0.002~4.58wt%、鉄4.10~32.9wt%であった。

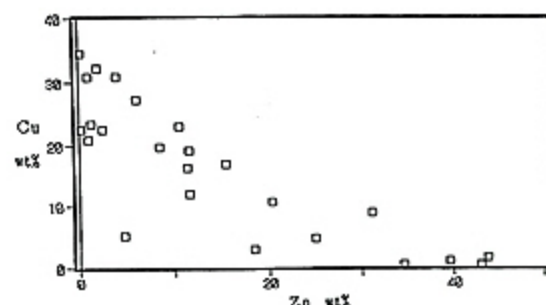


図3 水曜海山産の硫化物の銅と亜鉛含有量との関係

Fig. 3 The Relation between Cu contents and Zn contents in hydrothermal sulfides from Suiyo Seamount.

3. 水曜海山産の硫化物の化学組成に関する考察

3.1 硫化物の化学組成の特徴

表1に示す硫化物の化学組成の平均値から、鉄、銅、亜鉛の含有量はいずれも平均15wt%前後である。それに比べて、鉛の含有量は平均0.465wt%であり、相対的に少ない。(以下、鉄、銅、亜鉛、鉛の4つの金属元素を主要元素と呼ぶ) 鉱石中で主に硫酸塩として存在するカルシウム含有量は平均1.5wt%、バリウム含有量は平均0.465wt%である。鉱石の顕微鏡観察とX線回折分析では、硬石膏とバライトは確認されているものの、鉱石全体からみた含有量は少ない値を示す。また、ヒ素、カドミウム、アンチモンは平均値でも数百ppm含まれている。つまり、水曜海山産の硫化物は、微量元素のヒ素、カドミウム、アンチモンに富み、主要元素の鉄、銅、亜鉛を主体とする硫化物であり、鉛の含有量が少ないのが特徴である。

3.2 硫化物中の主要元素の関係

噴出している熱水の温度と鉄、銅、亜鉛の含有量との関係を、図2に示す。銅の含有量は高温ほど多い傾向が見られ、特に熱水の温度が300°C以上では15wt%を超える。一方、亜鉛の含有量は熱水の温度が300°C以上では20wt%以下となる。鉄の含有量は熱水の温度に対して明瞭な傾向が無く、およそ10~30wt%である。300°C以上の熱水を噴出しているチムニー、マウンドの硫化物の銅含有量が多いのは、高温の熱水により銅が母岩から溶脱、運搬されたためである。銅の溶解度は熱水の温度依存性が高く、300°Cの熱水でないと母岩から銅を十分に溶解・運搬し、海底噴出時に銅の硫化物を多量に沈殿させることができないからである(中島, 1986)。

硫化物中の銅と亜鉛の含有量の関係を図3に示す。こ

表1 水曜海山西峰産の海底熱水性硫化物の分析結果とその平均値

表中の温度は採取された熱水の温度の最高値である。

Table 1 Chemical analyses of sea-floor hydrothermal sulfides from the western top of Suiyo Seamount and average contents of them. Temperatures in this table are the highest values in situ about hydrothermal fluids collected by "Shinkai 2000".

Sample No.	Al wt%	Ca wt%	Fe wt%	Cu wt%	Zn wt%	Ag ppm	As ppm	Au ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Mn ppm	Pb ppm	Sb ppm	Sr ppm	Au/Ag	Temperature °C
562S-4-2	0.12	0.13	11.67	0.405	43.0	313	3130	52	19	1640	42	377	45800	2980	41	0.17	230
9271504	0.24	0.89	28.68	30.9	1.01	45.1	270	4	16	91.8	35	2	268	n.d.	73	0.09	311
9271513	1.16	0.37	30.56	22.4	2.54	63.2	1130	5	29	172	295	91	1290	57.1	57	0.08	311
927160202	0.09	0.04	32.95	34.5	0.182	14.2	41.2	n.d.	36	42.4	25	115	28	n.d.	15	-	310
927160401	0.17	0.04	27.33	30.9	3.98	90.8	435	10	16	334	50	15	1260	44.0	21	0.11	310
927160404	0.27	0.09	9.46	1.58	43.8	337	2240	71	24	3950	263	463	3370	1120	124	0.21	n.m.
927160405	3.77	1.03	4.25	0.392	34.6	330	885	38	26	546	89	234	15200	767	146	0.12	n.m.
927160503	4.38	1.10	4.10	2.89	18.4	63.5	211	16	56	723	128	129	711	50.2	242	0.25	n.m.
927170501	1.65	0.35	7.92	4.78	25.0	209	1640	22	22	1030	239	267	4720	355	156	0.11	300
9271712	1.96	6.81	11.93	12.0	11.6	118	983	20	25	785	116	182	2020	235	344	0.17	296
927171402	0.80	0.18	10.30	8.91	31.2	377	3130	45	13	1480	118	313	7440	588	182	0.12	296
9271715	0.45	6.57	14.58	16.2	11.4	146	1050	22	24	734	100	115	2440	231	331	0.15	296
93620101	1.06	4.74	20.44	22.5	0.151	12.6	434	n.d.	78	23.9	98	1570	65	6.8	315	-	310
93620102	0.90	7.76	16.64	23.3	1.28	24.6	207	n.d.	85	98.6	91	1260	170	33.3	543	-	310
93620103	1.11	0.17	20.27	27.1	6.08	101	661	n.d.	105	407	157	1590	1260	128	133	-	310
93620104	1.88	0.33	15.59	16.9	15.5	155	1110	6	126	334	280	1330	2120	237	218	0.04	310
93620105	0.95	0.16	18.10	19.0	11.6	166	1090	n.d.	136	736	255	1590	2200	229	245	-	310
93620202	1.63	0.52	27.84	5.22	4.65	52.9	1320	13	149	313	226	2270	1520	56.4	95	0.25	250
93620204	1.31	0.22	18.27	10.7	20.4	216	1690	19	107	1030	374	1590	3370	332	151	0.083	250
93620-1-1	0.99	0.19	19.23	22.9	10.6	144	615	n.d.	110	579	166	1550	2260	189	109	-	310
93620-2-1	1.06	0.39	16.17	19.7	8.46	133	1600	n.d.	102	389	162	1529	4810	186	279	-	310
9362202	0.24	2.47	21.02	32.2	2.00	43.1	259	n.d.	91	154.9	53	1680	704	54.7	216	-	317
93622301	1.54	0.51	10.37	1.01	39.6	371	1770	46	123	1560	323	1140	7710	942	289	0.12	n.m.
93622302	1.75	0.94	23.95	20.8	1.04	21.1	603	n.d.	123	54.2	72	1880	800	21.2	207	-	n.m.
Average	1.22	1.50	17.6	16.1	14.5	148	1100	16	68	738	159	886	4650	368	189	0.11	

n. d. : not detected

n. m. : not measured

の図から銅と亜鉛の含有量は、明瞭な負の相関関係にある。水曜海山西峰の熱水循環系は、観察された山頂地形の形状や規模から、カルデラ内の小規模な熱水循環系であると推定される(渡辺・梶村, 1994)。水曜海山の熱水噴出域は比較的狭く(南北300m, 東西100m; 渡辺ほか, 1994b)、熱水の化学組成はほぼ均質である(石橋ほか, 1994; 角谷ほか, 1993)、発生した熱水の起源は単一であり、熱水が海底下で反応した母岩は1種類であると考えられる。水曜海山西峰のカルデラ床下では、300°C以上の熱水が発生していて、海底下の通路途中であまり冷やされずに上昇し、海底面まで到達した熱水の噴出口に沈殿した硫化物は、相対的に銅に富んでいる。一方、上昇中に冷やされて、海底下の通路に銅を沈殿してしまった熱水の噴出口から採取された硫化物は、亜鉛に富んでいると解釈される。このような解釈から、亜鉛を主体とする硫化物からなるチムニー、マウンドの海底下には、銅を主体とする硫化物が存在する可能性がある。亜鉛を主体とする硫化物(黒鉱)層の下に、銅を主体とする硫化物(黄鉄)層が形成される構造は、黒鉄型鉄床の層状

構造に類似している(佐藤, 1982; 中嶋, 1993)。

3. 3 硫化物中の金と他の元素との関係

硫化物中の金と他の元素との相関を図4に示す。金は亜鉛、銀、ヒ素とは正の相関を、銅とは負の相関を示す。亜鉛、銀、ヒ素の含有量の多い硫化物鉄床に金含有量が多いことは、これまで発見された多くの海底熱水性鉄床と共通の性質である(Hannington et al., 1991)。銅は高温の熱水から沈殿するので、熱水が海水と混合して冷却される前に海底下で沈殿してしまう場合が多い。銅を沈殿した後の熱水溶液は、銅と共沈しない亜鉛、銀、ヒ素、金に富む傾向がある。よって、銅を沈殿した後の300°C以下の比較的低温の熱水から沈殿した硫化物は、銅を主体とする硫化物よりも亜鉛、銀、ヒ素、金に富むと考えられる。逆の見方をする、高温のまま熱水が海底面まで到達した場合、海水と混合し冷却されて黄鉄鉱が多量に沈殿することにより、硫化物中の亜鉛、銀、ヒ素、金の含有量が少なくなってしまうと考えられる。水曜海山西峰の硫化物中の銅の高含有量は、熱水が海底下で高温で発生し、上昇して海底面に達するまで高温を維持して

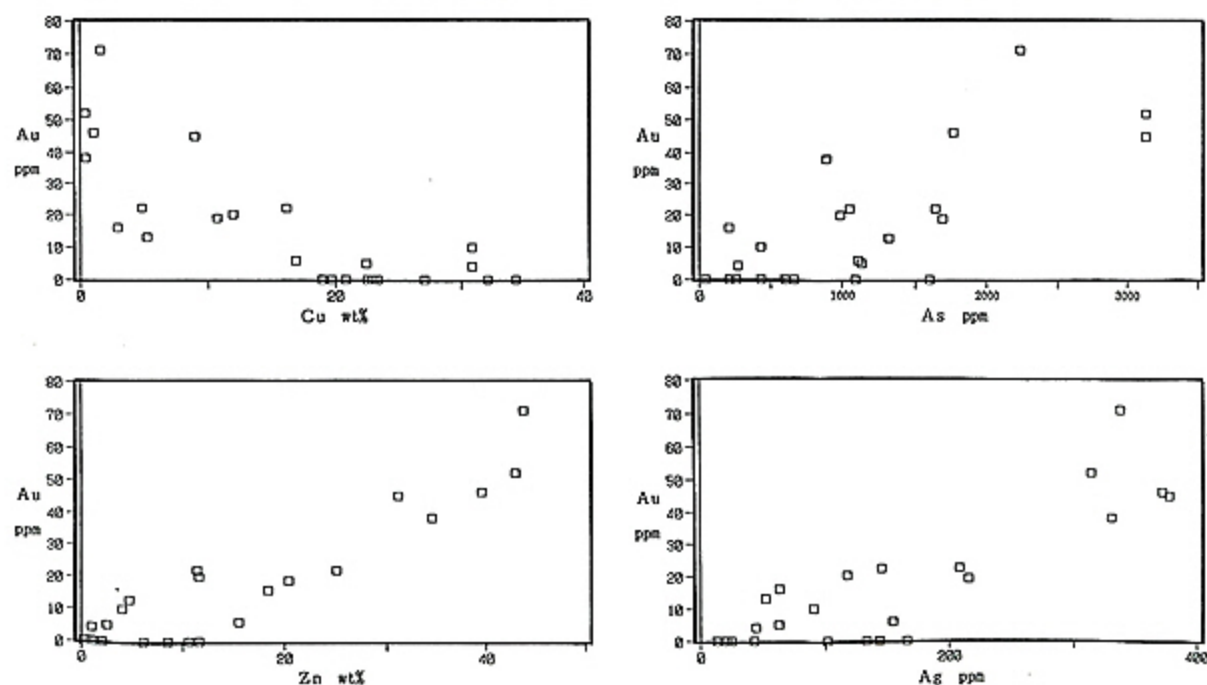


図4 水曜海山産の硫化物の金含有量と他の元素の含有量との関係

Fig. 4 Relations between Au contents and Cu, Zn, Ag, As contents in hydrothermal sulfides from Suiyo Seamount.

いることを表している。硫化物中の銅の含有量の多少は、海底下と海底噴出時の熱水の温度に依存する部分が多く、熱水の起源や反応した母岩の性質を、あまり反映していない可能性がある。

硫化物中の金/銀比と鉄、銅、亜鉛の含有量との関係を、図5に示す。鉄、亜鉛に対して金/銀比はほとんど相関がないが、銅に対しては負の相関の傾向を示している。これは銅含有量が増えると銀、金含有量が減少し、特に金含有量が極端に減るためである。例えば、図4から銅含有量が20wt%以上の試料のほとんどが、金含有量1 ppm以下であることが挙げられる。これは銅の硫化物が熱水から多量に沈殿するような物理・化学的条件下では、金は沈殿しにくいことを如実に表している。

4. 他の海底熱水性硫化物との化学組成比較

4. 1 硫化物中の銅-亜鉛-鉛比の比較

水曜海山産の硫化物と他の海域産の硫化物の銅-亜鉛-鉛比の比較を、図6に示す(梶原良道, 1987より)。図6 a)には日本周辺海域産の硫化物、図6 b)には東太平洋海嶺 (EPR) 産と、大西洋中央海嶺 (MAR) のTAG熱水マウンド産の硫化物の銅-亜鉛-鉛比を示す。(これまでに報告された硫化物の中には、主要元素の鉛の定量分析

を行っていないものも多く、それらの化学分析値は図6にプロットされていない)

伊豆・小笠原弧の水曜海山産と北ベヨネーズカルデラ産の硫化物の銅-亜鉛-鉛比は、そのほとんどが銅-亜鉛軸近くにプロットされる。沖縄トラフの伊平屋海丘と南奄西海丘、伊豆・小笠原弧の明神礁海底カルデラ産の硫化物の銅-亜鉛-鉛比は、黒鉱型鉱床に近い比較的鉛含有量の多い領域にプロットされる。梶原 (1994) によると、硫化物中の鉛の起源は、熱水が海底下で反応した海洋性堆積物であるとしている。確かに沖縄トラフの伊平屋海丘と南奄西海丘の周辺海域には、海洋性堆積物の分布が確認されている。千葉ほか (1993) によると、沖縄トラフの南奄西海丘の熱水は、化学分析の結果、海洋性堆積物と反応していると結論づけている。また、伊豆・小笠原弧の明神礁カルデラ (直径10km) 床も、厚さは不明であるが堆積物に覆われている (Iizasa et al., 1992)。このようなことから、硫化物中の鉛の起源は、熱水が反応した海洋性堆積物である可能性は高いと考えられる。

一方、水曜海山西峰のカルデラ床は狭く (長径800m; 長岡ほか, 1992)、山体の規模を考慮しても、カルデラ内に多量の海洋性堆積物は存在し得ない (渡辺ほか, 1994

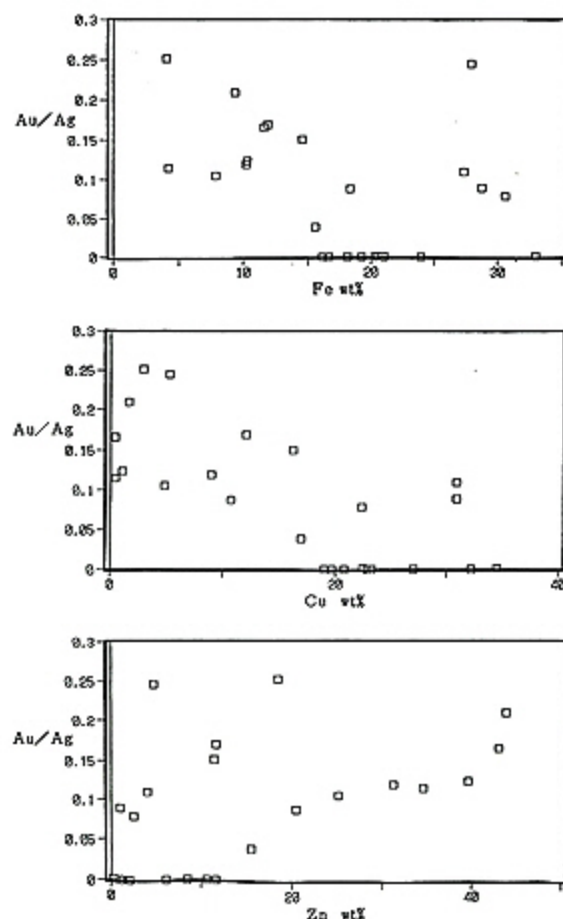


図5 水曜海山産の硫化物の金/銀比と鉄、銅、亜鉛の含有量との関係

Fig. 5 Relations between Au/Ag ratios and Fe, Cu, Zn contents in hydrothermal sulfides from Suiyo Seamount.

b). 角皆ほか (1993) は、熱水中の溶存気体分析の結果、水曜海山で噴出している熱水は海底下で海洋性堆積物とほとんど反応せず、直接マグマから供給されている成分が多いことを指摘している。よって、水曜海山の熱水は海底下で海洋性堆積物とほとんど反応しなかったため、その熱水から沈殿した硫化物中の鉛含有量が少なくなったと説明できる。また、EPRとTAGの熱水噴出域は海底拡大軸に位置し、周辺地質はほとんど玄武岩であり堆積物はあまり堆積していないので、硫化物中の鉛含有量が少ないこと (図6b) は、梶原 (1994) の論理に矛盾しない。

前章で水曜海山産の硫化物の場合、図6の銅-亜鉛軸は、熱水の高温 (銅) - 低温 (亜鉛) 軸である可能性を指摘した。ここで注意しなければならないことは、潜水

調査船で採取できる硫化物は、海底表面に露出しているものだけであり、熱水性沈殿物のごく上層部のみを採取している点である。採取できる硫化物は上層部のごく一部であり、鉱床全体の化学組成を議論するには、片寄ったサンプリングとなっている可能性がある。例えば、比較的銅含有量の少ない沖繩トラフ産、EPR産の硫化物は、海底表面から採取されたものであり、その海底下には、より高温で熱水から沈殿した黄銅鉱を主体とする層が存在する可能性はある。つまり、長期間熱水活動が継続している海底の熱水噴出帯では、高温の熱水から沈殿する黄銅鉱の層を、より低温の熱水から沈殿する閃亜鉛鉱や硬石膏の層が、厚く覆ってしまうことも想定される。逆に、水曜海山やTAGでは、熱水噴出活動が地質学的に最近始まったため、表層の閃亜鉛鉱や硬石膏の層が薄く、その下のより高温の熱水から沈殿した黄銅鉱の層を、採取することで可能性がある。EPR産の硫化物の亜鉛含有量が多いことと、TAG熱水マウンド産の硫化物の銅含有量が多いことを、熱水の温度のみで説明できるかについては、それぞれの熱水系の海底下の構造やその規模、熱水噴出活動の継続時間を検討する必要がある。

4. 2 硫化物中の銅-亜鉛-鉄比の比較

水曜海山産とその他の海域産の硫化物の銅-亜鉛-鉄比の比較を、図7に示す。図7aには日本周辺産の、図7bにはEPRとTAG熱水マウンド産の硫化物の銅-亜鉛-鉄比を示す。(これまでに報告された硫化物の中には、主要元素の鉄の定量分析を行っていないものも多く、それらの化学分析値は図7にプロットされていない)

水曜海山産の硫化物の銅-亜鉛-鉄比は、閃亜鉛鉱と黄銅鉱の組成を結ぶ線に近い領域にプロットされる (図7a)。沖繩トラフ産の硫化物と、水曜海山以外の伊豆・小笠原弧の海底火山産の硫化物の銅-亜鉛-鉄比は、そのほとんどが三角図中の亜鉛50%以上の領域にプロットされる。つまり、日本周辺の島弧の火山活動に関連した海底熱水性鉱床中の硫化物は、亜鉛の硫化物を主体とするものであり、水曜海山産の硫化物のみが亜鉛と同程度の銅を含んでいる。

EPR産の硫化物の銅-亜鉛-鉄比は、鉄-亜鉛線に近い領域にプロットされる (図7b)。TAG熱水マウンド産の硫化物の銅-亜鉛-鉄比は、三角図中の鉄50%以上の領域にプロットされる。TAG熱水マウンド産の硫化物の中には、黄銅鉱の化学組成に近い領域にプロットされるものもある。EPRとTAG産の硫化物の共通点は、鉄の含有量が多いことであり、相対的にEPRで亜鉛含有量が多く、TAGで銅含有量が多いことになる。

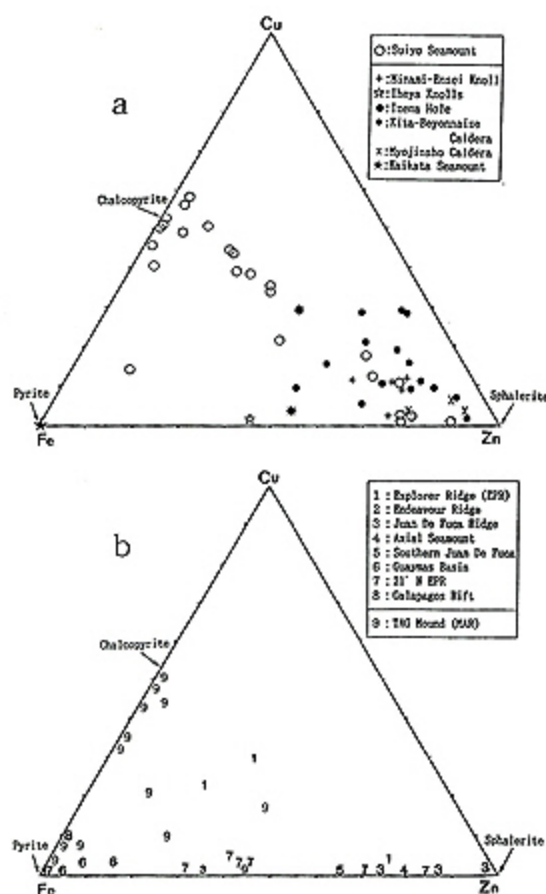


図7 水曜海山産とその他の海域産の硫化物との銅-亜鉛-鉄比の三角図

図7aには日本周辺産、図7bにはEPRとTAG熱水マウンド産の硫化物の銅-亜鉛-鉄比をプロットした(引用文献は図6に同じ)。

Fig. 7 Cu-Zn-Fe ternary diagrams comparing the bulk composition of hydrothermal sulfides from Suiyo Seamount and sea-floor hydrothermal sulfides from the other areas.

(a) plot of bulk compositions for hydrothermal sulfides from sea areas around Japan. (b) plot of bulk compositions for hydrothermal sulfides on the mid-ocean ridges (from the EPR, TAG hydrothermal mound on the MAR). (References are the same to them in Fig. 6.)

日本周辺の島弧性の海底火山産の硫化物と、EPRやTAGのような中央海嶺産の硫化物の銅-亜鉛-鉄比を比較すると、鉄含有量が相対的に前者に少なく、後者に多いことになる。これは海底下で熱水が上昇する際に反

応する母岩が、前者が安山岩から流紋岩で相対的に鉄含有量が少なく、後者がソレライト質玄武岩で相対的に鉄含有量が多いことと調和的である。このことから海底熱水性硫化物の鉄含有量は、熱水が海底下で反応した母岩の鉄含有量の多少を、そのまま反映している可能性がある。両者とも亜鉛に富むもの、銅に富むものが存在する理由は、海底下や海底噴出時の熱水の温度のみならず、その他の物理化学的諸条件による可能性もある。

海底熱水性硫化物のこのような化学組成を支配する要因を説明するためには、海底下で熱水と反応する母岩の金属含有量と、高温時の熱水溶液の物理化学的データが必要である(鹿園, 1988)。残念ながら現時点では、母岩の化学組成と熱水の基礎データが不足しているため、理論的に説明することは難しい。本報では、主要元素の化学組成の特徴を指摘するにとどめたい。

5. まとめ

これまでの化学分析の結果、水曜海山産の硫化物の化学組成は、微量元素のヒ素、カドミウム、アンチモンに富み、主要元素の鉄、銅、亜鉛が多く、鉛が少ないのが特徴である。

硫化物の主要元素の比較から、水曜海山、EPR、TAG産の硫化物は、共通して鉛含有量が少ないことが分かる。一方、沖繩トラフ産の硫化物は鉛含有量が多く、黒鉱型鉄床の化学組成と類似している。沖繩トラフ産の硫化物は亜鉛の硫化物を主体とするものであり、水曜海山産の硫化物は銅と亜鉛を主体とするものである。EPRとTAG産の硫化物は鉄を主体とするものであり、相対的にEPRで亜鉛含有量が多く、TAGで銅含有量が多い。硫化物の鉄含有量は、島弧性の海底火山産の硫化物で相対的に少なく、中央海嶺産の硫化物で相対的に多い。

硫化物の主要元素組成を支配する要因の候補としては、①銅・亜鉛では熱水の温度、②鉛では熱水が海底下で反応した海洋性堆積物の有無、③鉄では熱水が海底下で反応した母岩中の鉄含有量が挙げられる。今後、海底熱水性硫化物に関するこれらの特徴や要因を、説明する基礎データや理論の構築が必要である。

謝 辞

海洋科学技術センターの「しんかい2000」運航チーム及び「なつしま」乗組員の方々には、潜航調査に際し多大なご尽力をいただいた。東京大学理学部の石橋純一郎氏と角谷潤氏には、熱水に関する情報を提供していただいた。地質調査所の青木正博氏と中村光一氏には、熱水

活動に関する多くの助言をいただいた。ここに明記して謝意を表す。

引用文献

- 青木正博・中村光一 (1989) : 伊豆・小笠原海穴、鉱床サイト 2 のチムニー群の産状、及び硫化物チムニーの組織と鉱物組成、「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 5, 197-210.
- 青木正博・中村光一 (1992) : 南奄西海丘ベースメタル鉱床の生成過程と熱水の地球化学, 第9回しんかいシンポジウム予稿集, 56-57.
- Bischoff, J.L., R.J. Rosenbauer, P.J. Aruscavage, P.A. Baedeker and J.G. Crock (1983) : Sea-floor massive sulfide deposits from 21° N, East Pacific Rise; Juan de Fuca Ridge; and Galapagos Rift: bulk chemical composition and economic implications. *Economic Geology*, 78, 1711-1720.
- Halbach, P., K. Nakamura, M. Wahsner, J. Lange, H. Sakai, L. Kaselitz, R.D. Hansen, M. Yamano, J. Post, B. Prause, R. Seifert, W. Michaelis, F. Teichmann, M. Kinoshita, A. Marten, J. Ishibashi, S. Czerwinski and N. Blum (1989) : Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, 338, 496-499.
- Hannington, M.D., J.M. Peter and S.D. Scott (1986) : Gold in Sea-Polymetallic Sulfide Deposits. *Economic Geology*, 81, 1867-1883.
- Hannington, M., P. Herzig, S. Scott, G. Thompson and P. Rona (1991) : Comparative mineralogy and geochemistry of gold-bearing sulfide deposits on the mid-ocean ridges. *Mar. Geo.*, 101, 217-248.
- 飯笹幸吉 (1992) : 伊豆・小笠原弧—明神礁海底カルデラの熱水活動. 月刊地球, 158, 499-506.
- 飯笹幸吉・寺島 滋・佐々木宗建・丸茂克実 (1993) : 伊豆・小笠原弧—明神海丘 (北ベヨネース海底カルデラ) の熱水活動. しんかいシンポジウム報告書, 9, 105-115.
- Iizasa, K., M. Yuasa and S. Yokota (1992) : Mineralogy and geochemistry of volcanogenic sulfides from the Myojinsho submarine caldera, the Shichito-Iwojima Ridge, Izu-Ogasawara Arc, north-western Pacific. *Mar. Geo.*, 108, 39-58.
- 石橋純一郎・角 潤・脇田 宏・渡辺一樹・梶村 徹・芝田 厚・藤原義弘・橋本 惇 (1994) : 伊豆・小笠原弧、七曜海山列の海底熱水系の主要成分組成. JAMSTEC 深海研究, 10, 89-97.
- 梶原良道 (1987) : 海嶺熱水鉱床の重金属の起源. 月刊海洋科学, 202, 199-203.
- 梶原良道 (1994) : 海底熱水鉱床の地球化学的性質と起源. 第7回地質調査所研究講演会資料「海洋に資源を求めて」, 47-56.
- 春日 茂・加藤幸弘 (1992a) : 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, 249-256.
- 春日 茂・加藤幸弘 (1992b) : 水曜海山の火口底で発見された海底熱水性鉱床—「しんかい2000」による潜航調査結果—. 月刊地球, 158, 484-488.
- 川崎徳高 (1986) : 中央海嶺熱水系の化学. 鉱山地質, 36, 377-398.
- 木村政昭・田中武男・許 正憲・安藤雅孝・大森 保・井沢英二・嘉川郁朗 (1989) : 「しんかい2000」による沖縄トラフ中部熱水域の地形・鉱床・生物の観察. 「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 5, 223-244.
- 木村政昭・大森 保・井沢英二・加藤祐三・田中武男・仲 二郎・小野朋典 (1991) : 「しんかい2000」による伊平屋海山の第284, 286, 287, 366潜航と伊豆・小笠原海穴第36潜航の結果. 「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 7, 147-161.
- Koski, R.A., D.A. Clague and E. Oudin (1984) : Mineralogy and chemistry of massive sulfide deposits from the Juan de Fuca Ridge. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 930-945.
- Koski, R.A., P.F. Lonsdale, W.C. Shanks, M.E. Berndt and S.S. Howe (1985) : Mineralogy and Geochemistry of a Sediment-Hosted Hydrothermal Sulfide Deposits From the Southern Trough of Guaymas Basin, Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 90, 6695-6707.
- Lilley, M.D., J.A. Baross and L.I. Gordon (1983) : "Reduced gases and bacteria in hydrothermal fluids: The Galapagos spreading center and 21° N East Pacific Rise." p411-449. In: *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers*. Edited by P.A. Rona, K. Bostrom, L. Laubier and K.L. Jr. Smith, Plenum Press.
- Mills, R. and H. Elderfield (1993) : A Dual Origin for

- the Hydrothermal Component in a Metalliferous Core From the Mid-Atlantic Ridge. *J. Geophys. Res.*, **98**, 9671-9681.
- 長岡信治・春日 茂・加藤幸弘 (1992): 小笠原-七曜海山列の水曜海山、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.
- 仲 二郎・深海調査グループ (1989): 小笠原諸島、海形海山KC峰の海底。「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, **5**, 57-65.
- 中島和夫 (1986): 海底熱水性鉱床の銅・亜鉛鉱化作用。月刊地球, **85**, 327-331.
- 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 (1993): 沖縄トラフ伊平屋凹地と南奄西海丘の熱水性沈殿物の鉱物組成と流体包有物: 「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。しんかいシンポジウム報告書, **9**, 253-269.
- 中嶋輝允 (1993): 北鹿ベースンの地質構造・火成活動と黒鉱鉱床形成場。地質調査所月報, **44**, 251-282.
- 中村光一・青木正博 (1992): 南奄西海丘熱水活動地域の地質と熱水の化学的性質のその場測定を試み。第9回しんかいシンポジウム予稿集, 54-55.
- 中村光一・丸茂克美・青木正博 (1990): 沖縄トラフ伊是名海穴海底熱水性鉱床地帯におけるブラック・スモーカーと二酸化炭素に富む流体湧出変質帯 (ポックマーク) の発見。「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, **6**, 33-50.
- 根建心具・上野宏共・小坂丈子・野上健治・橋本 惇・藤倉克則・三浦知之 (1992): 沖縄トラフ南奄西海丘の海底熱水鉱床-特に構成鉱物について。しんかいシンポジウム報告書, **8**, 95-106.
- 大森 保・木村政昭・田中武男 (1990): 「しんかい2000」潜航調査で採集された沖縄トラフ海底熱水鉱床の化学組成と同位体組成。月刊地球, **130**, 243-249.
- Ohmoto, H. (1978): Submarine calderas: a key to the formation of volcanogenic massive sulfide deposits? *Mining Geol.*, **28**, 219-231.
- Rona, P.A., Y.A. Bogdanov, E.G. Gurvich, N.A. Rimski-Korsakov, A.M. Sagalevitch, M.D. Hamington and G. Thompson (1993): Relict Hydrothermal Zones in the TAG Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge 26°N, 45°W. *J. Geophys. Res.*, **98**, 9715-9730.
- Sakai, H., T. Gamo, J. Ishibashi, K. Shitashima, E.-S. Kim, F. Yanagisawa, M. Tsutsumi, Y. Sano, H. Wakita, T. Tanaka, T. Matsumoto, T. Naganuma and K. Mitsuzawa (1990): Unique chemistry of the back arc basin hydrothermal solutions at the Mid-Okinawa Trough. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 2133-2136.
- 酒井 均・山野 誠・田中武男・蒲生俊敬・金 銀珠・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.
- 佐藤壯郎 (1982): 黒鉱型鉱床の特徴。月刊海洋科学, **146**, 194-199.
- 鹿園直建 (1988): 黒鉱鉱床と海嶺熱水性鉱床に濃集した元素種の違いとその原因。月刊海洋科学, **214**, 217-222.
- Sillitoe, R.H. (1980): Cauldron subsidence as a possible inhibitor of porphyry copper formation. *Mining Geol. Spec. Issue*, **8**, 85-93.
- 田中武男・堀田 宏・酒井 均・石橋純一郎・大森 保・井沢英二・小田 望 (1990): 伊是名海穴の熱水現象とその分布。「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, **6**, 11-26.
- 千葉 仁・中島和夫・蒲生俊敬・石橋純一郎・角皆 潤・酒井 均 (1993): 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。しんかいシンポジウム報告書, **9**, 271-282.
- 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.
- 浦辺徹郎 (1989): 伊是名海穴 (鉱床サイト1) の鉱床の鉱物学的特徴-黒鉱との比較において。「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, **5**, 191-196.
- 渡辺一樹 (1994): 堆積物の主要元素と硫化鉱石中の銅・亜鉛の分析法。水路部技報, **30**.
- 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**, 77-89.
- 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.
- 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 (1994a): 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・芝田 厚・梶村 徹 (1994b): 水曜海山カルデラ内の熱水活動域のマッピング, JAMSTEC深海研究, 10, 55-62.

Welhan, J.A. and H. Craig (1982): "Abiogenic methane in Mid-Ocean ridge hydrothermal fluids." p122-129. In: Deep Source Has Workshop Tech.

Proc. Edited by W.J. Gwilliam Morgantown, West Virginia.

Zierenberg, R.A., W.C. Shanks III and J.L. Bischoff (1984): Massive sulfide deposits at 21°N, East Pacific Rise: Chemical composition, stable isotopes, and phase equilibria. Geological Society of America Bulletin, 95, 922-929.

(原稿受理: 1995年6月12日)