

伊豆小笠原弧の七島硫黄島海嶺における熱水鉱化作用[†]

渡辺一樹*

HYDROTHERMAL MINERALIZATION ON THE SITITŌ-IŌZIMA RIDGE IN THE IZU-OGASAWARA ARC[†]

Kazuki WATANABE*

Abstract

The Sititō-Iōzima Ridge exists on the volcanic front in the northern part of the Izu-Ogasawara Arc. Recently on some submarine volcanoes along the Sititō-Iōzima Ridge, active hydrothermal mineralizations have been discovered as a result of sea-floor surveys by the JAMSTEC's submersible 'Shinkai 2000'.

From the Kita-Beyonēse Submarine Caldera, hydrothermal sulfides, sulfates, manganese oxides have been collected. In the Myōzin syō Caldera, the fragments with hydrothermal sulfides and barites were discovered. In the caldera at the western top of Suiyō Seamount, some active sulfide chimneys gushing the hydrothermal water were discovered. Hydrothermal pyrites at a hydrothermal alteration zone in the Kaikata Caldera and possible recent hydrothermal manganese oxides on the flank of the Kaikata Seamount are observed respectively. The Kaikata Caldera is consisted of andesites or basalts. But other three submarine calderas are consisted of dacites and they are at similar geological setting.

Two reasons why some hydrothermal sulfides exist in the submarine caldera consisted of dacites are supposed as follows.

- 1) The dacitic magma with the high viscosity stays steadily at the shallow part below the sea-floor.
- 2) The activity of the dacitic magma is easy to make the concave sea-floor (submarine caldera), to protect sea-floor hydrothermal sulfides from the oxidization by deep-sea waters.

The characteristics about hydrothermal mineralizations on the Sititō-Iōzima Ridge are arranged as follows.

- 1) Sea-floor hydrothermal sulfides exist in submarine calderas consisted of dacite.
- 2) Hydrothermal sulfides have lower Fe content, in comparison with those from mid-oceanic ridges.
- 3) Contents of As, Cd and Au on minor elements are comparatively high in hydrothermal sulfides.
- 4) The Au/Ag ratio is relatively high, because the Ag content is nearly equal to that in hydrothermal sulfides of other sea areas.
- 5) It seems that the gushing hydrothermal water doesn't react on marine sediments beneath the sea-floor.

[†] Received 1996 January 8th Accepted 1996 January 22nd

* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

- 6) Manganese oxides at the Kaikata Seamount were resulted from the low-temperature hydrothermal activity of the submarine volcano on a island-arc.
- 7) Almost of hydrothermal oxides from the Kaikata Seamount consist of manganese oxides and poor in iron oxides.

1. はじめに

伊豆小笠原弧は、フィリピン海プレート北東縁に位置する典型的な島弧である。その火山フロント上に七島硫黄島海嶺が存在し、活動的な島弧性の海底火山が数多く存在する。最近になって、この七島硫黄島海嶺の海底火山でも、島弧性の海底熱水活動に伴う鉱化作用が次々に発見されている。

地質調査所では1984年から「白嶺丸」を用いて、伊豆小笠原弧周辺において熱水活動に伴う重金属資源の調査研究を行った(湯浅, 1986)。海洋科学技術センターでは「しんかい2000」を用いて、伊豆小笠原弧において精力的な潜航調査を実施し、海形海山を始め多くの海底熱水活動を発見してきた(堀田, 1992)。一方、水路部は1989年以降、測量船「拓洋」を用いて、伊豆小笠原弧周辺において海底火山の調査を行った(長岡ほか, 1991)。これらの調査の結果、七島硫黄島海嶺上の海底火山に伴う海底熱水活動の分布、鉱化作用の概要が徐々に明らかとなってきた。

これまで発見された七島硫黄島海嶺における海底熱水性沈澱物として、海形海山における硫化物を含む熱水変質岩(仲ほか, 1989)と熱水性マンガン酸化物(Usui and Nishimura, 1992)、水曜海山のカルデラにおける硫化物・重晶石・硬石膏からなるチムニー(春日・加藤, 1992a)、明神礁海底カルデラにおける重晶石・硫化物フラグメント(飯笹, 1992)、北ベヨネース海底カルデラにおける硫化物・重晶石を含む凝灰岩(飯笹ほか, 1993)が知られている。これらの海底熱水性沈澱物の発見・調査に際して、潜水調査船の果たした役割はきわめて大きいと言える(渡辺ほか, 1994a)。

本報告では、海洋科学技術センターの潜水調査船「しんかい2000」により発見され調査された、

伊豆小笠原弧の現在の火山フロントに位置する七島硫黄島海嶺における、海底熱水活動の分布、熱水鉱化作用の概要をまとめて紹介する。さらに、本海域産の海底熱水性硫化物と他の海域産の海底熱水性硫化物の化学組成を比較する。(なお、本報告中における熱水性沈澱物・変質岩等の記載名称については、解釈の相違を招かないように意図的な統一をせず、引用文献に使用されているものをそのまま使用した。)

2. 七島硫黄島海嶺の海底地形と地質学的背景

(1) 伊豆小笠原弧の海底地形

伊豆小笠原弧はフィリピン海プレート北東縁部に位置し、太平洋プレートがフィリピン海プレートの下に沈み込んでいることに関連して、形成・発達した島弧である。伊豆小笠原弧は南北方向に直線的な島弧で、その中で細かく地形を分類すると、西から東へ西七島海嶺、七島硫黄島海嶺、小笠原トラフ、小笠原海嶺が配列している(春日ほか, 1992)。伊豆小笠原弧においては、孀婦岩構造線を境に、弧の南北で地学現象の違いが指摘されている(湯浅・村上, 1985)。

(2) 孀婦岩構造線と西之島トラフの成因

南北に区分された伊豆小笠原弧の間には、海洋性地殻(西之島トラフ)が割り込んでいる。この西之島トラフの西縁が孀婦岩構造線である。孀婦岩構造線の成因としては、島弧の南北における太平洋プレートの沈み込み角度の違いを反映した断層、あるいは四国海盆と西マリアナ(パレスベラ)海盆との境をなすトランスフォーム断層の延長部の可能性が指摘された(湯浅・村上, 1985)。

この西之島トラフ周辺の海山は、伊豆小笠原弧の他の海底火山とは独立した特徴を示している。西之島トラフ周辺は、新时期海山と考えられる七曜海山列が火山フロント上に配列し、大型の古期海

山と考えられる大町海山 (3,200~3,300万年前) と 沢海山が、火山フロントをはさんで分布する (湯浅ほか1991)。これらの海山の火山岩類の化学組成は、伊豆小笠原弧の他の火山岩の特徴と異なっていて、特にストロンチウム同位体比は周囲の岩石のそれに比べ低くなっている。この内の新期海山と古期海山の間ではストロンチウム同位体比に系統的な差があり、新期海山は低い値を示す。このことはマグマソースの組成、サブダクションスラブに由来する液相、テクトニックな応力場のいずれかに時間的な変化があったことを示唆している (湯浅・野原, 1992)。

(3) 七島硫黄島海嶺上の火山列

七島硫黄島海嶺は、伊豆小笠原弧の現世の火山フロントをなす活動的の海底火山と火山島の列である。湯浅ほか (1991) は七島硫黄島海嶺の海底火山地形を記載・総括し、海底火山の配列、比高、底径、山体の間隔等に見られる規則性を指摘した。七島硫黄島海嶺を南北に二分する西之島トラフ西側の境界線 (孀婦岩構造線) を境に以下のような特徴を抽出した。

孀婦岩構造線よりも北側の海底火山は、相対的に比高が低く、南に向けて比高が低くなる。また、火山体の基底の直径が小さく、堆積層の基盤面の深さは南へ深くなっている。海底火山の配列間隔は狭く、不規則である。酸性火山岩を噴出している海底カルデラが多く出現する。太平洋プレート沈み込みは、伊豆小笠原弧の北部で先行してはじまり、継続時間も南部より北部における方が長い。北部では、現世の活動的の背弧拡大の場として、火山フロント西側に隣接して南北に断続して配列する背弧凹地の存在が指摘された (玉木ほか, 1981)。孀婦岩構造線よりも南側の海底火山は、相対的に比高が高く、北に向けて比高が低くなる。また、火山体の基底の直径が大きく、堆積層の基盤面の深さは北へ深くなっている。海底火山の配列間隔は広く、一定である。南側の火山岩は北側に比べてアルカリ元素含有量が高く、中には福德岡ノ場、硫黄島のようなアルカリ岩を噴出する活火山が存在するが、海底カルデラが出現する頻度は少ない。

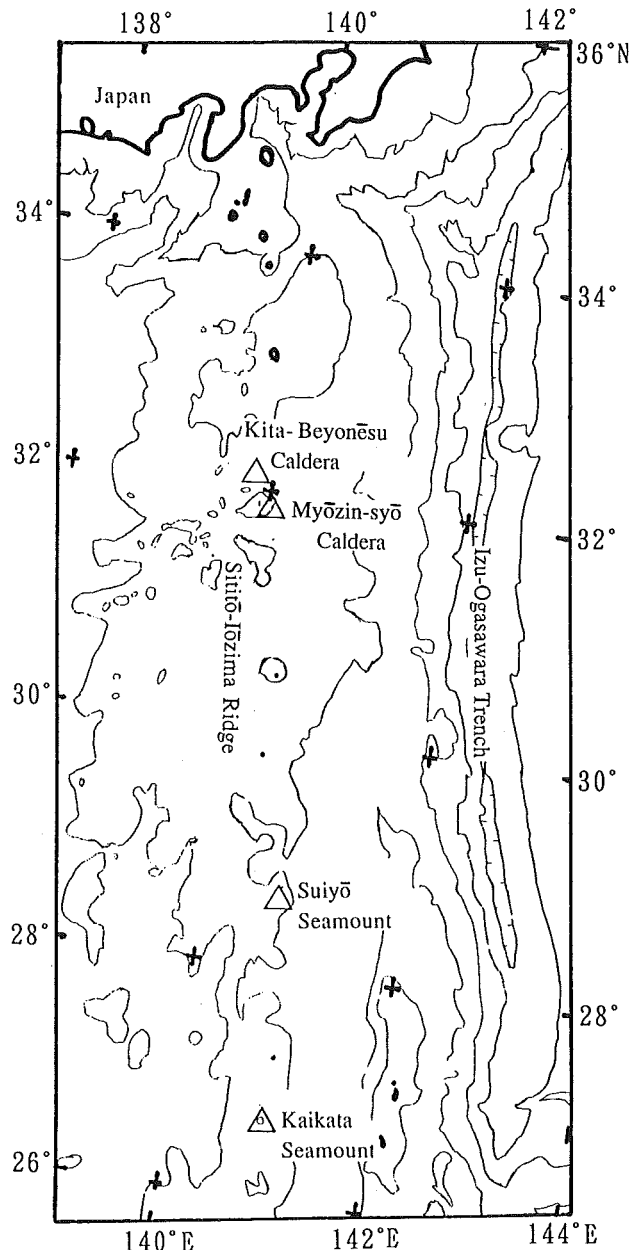


Fig. 1 The location of seamounts, where hydrothermal mineralizations have been discovered on the Sītō-Iōzima Ridge in the Izu-Ogasawara Arc.

これらの火山岩の分析から、 K_2O 、 P_2O_5 、バリウム、ストロンチウムの含有量が北から南に向かって増加する傾向がある。硫黄島と福德岡ノ場で K_2O 、 P_2O_5 、バリウム、ストロンチウムの含有量は最大値であり、これら火山体地下のマントルの部分溶融度が、最小であることが指摘された (湯浅・野原, 1992)。

(4) 伊豆小笠原弧の地質構造発達史

伊豆小笠原弧海底火山における南北間の規則性

Table 1 Chemical compositions of volcanic rocks from submarine volcanoes, where hydrothermal mineralizations had been discovered on the Sititō-Iōzima Ridge.

Sample	Kita-Beyonēsu Caldera										Myōzin-syō Caldera				
	(Yuasa, 1995)		(Fiske et al., 1995)								(Iizasa et al., 1992)				
	D638-2	D639-1	555-6	555-7	555-8	696-5	696-6	734-4L1	734-4L3	734-4L4	734-4L6	D107622	D107623	D107625	D10772
SiO ₂	71.22	73.33	74.54	75.02	74.53	73.64	71.74	74.25	74.83	74.55	73.93	69.7	69.8	69.7	69.9
TiO ₂	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	0.38	0.38	0.26	0.33	0.32	0.58	0.58	0.64	0.64
Al ₂ O ₃	13.27	12.81	13.51	13.43	13.50	13.29	13.74	13.69	13.52	13.51	13.82	14.2	13.9	14.0	13.9
Fe ₂ O ₃	0.83	0.46	0.86	0.83	0.94	0.67	3.80	0.87	0.90	0.58	0.96	1.96	1.47	1.45	1.37
FeO	1.64	1.87	1.93	1.75	1.94	2.52	-	2.11	1.60	1.87	1.52	2.3	2.6	2.6	2.8
MnO	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11	0.15	0.13	0.09	0.09	0.07	0.07	0.12	0.12	0.14	0.14
MgO	1.40	0.72	0.63	0.54	0.61	0.53	0.86	1.42	0.55	0.60	0.59	1.36	1.20	1.03	1.00
CaO	2.42	2.08	2.76	2.63	2.74	2.72	3.25	2.51	2.15	3.01	3.02	4.59	4.38	4.37	4.26
Na ₂ O	4.55	4.45	4.42	4.49	4.41	5.18	5.21	4.27	5.10	3.95	4.34	3.95	4.03	4.37	4.32
K ₂ O	0.77	0.86	0.83	0.81	0.84	0.90	0.79	0.32	0.95	1.45	1.36	0.85	0.96	0.86	0.93
P ₂ O ₅	0.08	0.07	0.09	0.08	0.07	0.08	0.09	0.09	0.06	0.07	0.06	0.09	0.09	0.11	0.12
H ₂ O ⁺	2.63	2.31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	0.3	0.1	0.3
H ₂ O ⁻	0.20	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1	n.d.	0.1
Total	99.42	99.52	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.30	99.53	99.47	99.78

Sample	Suiyō Seamount(Western Peak Caldera)					Kaikata Seamount(Kaikata Caldera:East Peak)					Kaikata Seamount(Central Peak)					
	(Watanabe and Kajimura, 1993)					(Yuasa and Nohara, 1992)										
	D562-S2	D562-S5	D562-S6	9271521	9271602	D695-2	D695-3	D829-1	D889-1	D827-1	D827-2	RS66-1	D831-1	D698-1	RS24-2	RS39-1
SiO ₂	67.83	63.93	68.10	67.91	68.20	54.00	56.6	56.14	52.69	53.79	53.38	51.02	51.39	49.13	51.54	51.61
TiO ₂	0.45	0.47	0.48	0.62	0.50	0.87	0.87	1.08	1.14	1.26	1.01	0.90	0.80	0.86	0.93	0.79
Al ₂ O ₃	15.73	15.15	15.74	16.79	15.59	17.61	17.11	14.47	15.25	14.51	16.89	18.61	19.50	17.39	17.56	19.54
Fe ₂ O ₃	2.19	3.51	2.10	2.22	2.13	2.69	2.32	2.40	3.13	2.90	2.81	2.56	2.89	3.34	2.80	2.42
FeO	2.26	1.14	2.36	1.18	2.08	7.12	6.26	9.27	10.05	10.32	8.34	8.37	6.93	8.86	8.69	7.18
MnO	0.12	0.04	0.12	0.22	0.09	0.19	0.18	0.22	0.23	0.24	0.20	0.21	0.21	0.23	0.26	0.22
MgO	1.51	1.99	1.55	0.87	1.59	2.95	2.58	3.09	4.00	3.58	3.46	3.99	3.56	5.97	4.19	3.70
CaO	4.75	4.58	4.81	4.73	4.54	9.14	7.58	7.12	9.14	8.15	9.26	10.76	10.59	11.24	10.01	10.53
Na ₂ O	3.07	2.81	3.14	4.56	4.19	3.07	3.68	3.34	3.02	3.08	2.94	2.56	2.99	2.10	2.85	2.87
K ₂ O	0.92	0.85	1.01	0.67	1.03	0.63	0.91	0.96	0.66	0.76	0.59	0.38	0.42	0.33	0.39	0.43
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.11	0.18	0.09	0.12	0.21	0.19	0.15	0.16	0.11	0.09	0.12	0.09	0.12	0.11
H ₂ O ⁺	0.37	1.72	0.21	0.53	0.63	1.07	0.24	0.91	0.42	0.95	0.91	0.52	0.47	0.39	0.60	0.46
H ₂ O ⁻	0.47	1.76	0.29	0.01	0.05	0.11	0.11	0.13	0.07	-	-	-	0.08	0.05	0.05	0.10
Total	99.78	98.06	100.02	100.49	100.27	99.57	98.65	99.32	99.95	99.69	99.91	99.97	99.95	99.98	99.99	99.96

n.d. : not detected - : not measured

の違いは、この島弧北部の島弧地殻の厚さが南部に比べ厚いことを暗示している (Yuasa et al., 1991). 伊豆小笠原弧の地質現象に見られる南北の差異は、その発達史を反映していると考えられている。北部島弧は四国海盆・西マリアナ (パレスベラ) 海盆拡大以前に、九州パラオ海嶺北部における太平洋プレートの北側からの沈み込みにより形成されはじめ、南部島弧は太平洋プレートの運動方向変換後西向きの沈み込みにより形成されはじめたものである。つまり、北部の方が太平洋プレートの沈み込みを長い時間経験している。火山フロント上の火山岩のアルカリ元素含有量にみられる南北の違いは、南北間の地殻の厚さの違い及び沈み込みの継続期間の違いで説明できると考えられている (Yuasa and Nohara, 1992).

七島硫黄島海嶺は、以上のような複雑な地質構造の上にオーバープリントされた現世の火山フロントである (Yuasa and Nohara, 1992). 七島硫

黄島海嶺において海底熱水鉱化作用が最近発見された海底火山は、北から順に以下のグループに属する (Fig. 1). 北ベヨネース海底カルデラ、明神礁海底カルデラは伊豆小笠原弧北部、水曜海山のカルデラは島弧中間部、海形カルデラは島弧南部に属する。北ベヨネース海底カルデラは直径約7 km、明神礁海底カルデラは直径約10kmの大型のカルデラであるが、水曜海山西峰カルデラ (直径約1.5km) と海形カルデラ (直径約3 km) は、海底火山山頂部にできた比較的小さいカルデラである。北ベヨネース海底カルデラ、明神礁海底カルデラ、水曜海山西峰カルデラは酸性火山岩から、海形カルデラは安山岩質溶岩から成る (Table 1).

3. 七島硫黄島海嶺の熱水鉱化作用各論

(1) 北ベヨネース海底カルデラ

1) 北ベヨネース海底カルデラの熱水鉱化作用
ベヨネース列岩の北約25kmに、直径7 km、ほぼ

円形の北ベヨネース海底カルデラが存在する。このカルデラは石英安山岩質岩石とその碎屑物により構成され、中央には直径2 km、比高300 mの中央火口丘が存在する。このカルデラ床の東部及び西部の水深1,300~1,400 mの地点においては、熱水変質帯が発見され、熱水性の硫化物、硫酸塩、マンガン酸化物と、硫化物・重晶石を含む凝灰岩(含金属凝灰岩)が採取された(飯笹ほか, 1993)。熱水変質帯内にはシンカイヒバリガイと白色のエビ、高さ10cm程度のチムニーが観察されていて、現在も熱水噴出活動は続いている。

この含金属凝灰岩中の金属含有量の最大値は、金19.3ppm、銀272ppm、砒素8,400ppm、亜鉛24.7wt%、鉄20.0wt%、銅11.1wt%、バリウム14wt%である(臼井ほか, 1994; Table 2)。金/銀比は0.036~0.

071であり、鉛含有量は平均0.25wt%である。飯笹ほか(1993)は、凝灰岩中の重晶石の初生包有物の均質化温度が150~215°C、閃亜鉛鉱の初生包有物の均質化温度が205~225°Cであり、硫化物・重晶石がおよそ250°C以下で晶出したことを指摘している。

2) 北ベヨネース海底カルデラの熱水化学組成 角皆ほか(1995)によると、北ベヨネースカルデラ内の海底直上水と各水深層海水試料の分析の結果、水深800 m以深で採取した海水試料の大部分から、CH₄(最高12nmol/kg)及び³He(最高4.5 fmol/kg)の高濃度異常が認められた。また、CH₄と³Heの濃度異常の間には、正の相関が認められた。これらの結果から、①カルデラ内にCH₄と³Heに富んだ海底熱水系が存在する可能性、②熱水湧

Table 2 Chemical compositions of sea-floor hydrothermal sulfides from the Sititō-Iōzima Ridge.

Sample No.	Al wt%	Ca wt%	Fe wt%	Cu wt%	Zn wt%	Ag ppm	As ppm	Au ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Mo ppm	Mn ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sb ppm	Se ppm	Sr ppm	Au/Ag	Temp. °C
Kita-Beyonēsu Caldera(Usui et al., 1994)																				
(maximum)	-	-	20.0	11.1	24.7	272	8400	19.3	140000	985	-	-	-	-	5000	1100	-	-	(0.071)	-
(minimum)	-	-	8.3	0.8	10.2	82	700	3	-	495	-	-	-	-	3000	400	-	-	(0.036)	-
Myōzin-syō Caldera(Iizasa, 1992)																				
A	-	-	0.74	0.20	3.35	98	496	2.7	440000	98	-	-	-	-	15200	180	-	-	0.028	-
B	-	-	2.27	2.37	30.25	350	1441	1.9	190000	1530	-	-	-	-	19500	670	-	-	0.005	-
C	-	-	2.68	1.85	43.00	170	2298	0.53	1100	2193	-	-	-	-	102000	580	-	-	0.003	-
Average	-	-	1.90	1.47	25.53	206	1412	1.7	210000	1274	-	-	-	-	45600	477	-	-	0.008	-
Suiyō Seamount(Mizuta et al., 1994)																				
OSS-1-1-10	-	-	-	-	-	140	290	0.2	-	11	320	-	-	9.9	-	30	21	-	0.001	310
OSS-1-1-20	-	-	-	-	-	50	360	1.0	-	45	89	-	-	9.7	-	n.d.	6.4	-	0.020	310
OSS-1-1-30	-	-	-	-	-	75	370	2.7	-	49	42	-	-	16	-	48	4.8	-	0.036	310
Average	-	-	-	-	-	88	340	1.3	-	35	150	-	-	12	-	26	11	-	0.015	-
Suiyō Seamount(Watanabe et al., 1995)																				
562S-4-2	0.12	0.13	11.67	0.405	43.0	313	3130	52	19	1640	n.d.	42	377	9	45800	2980	-	41	0.17	230
9271504	0.24	0.89	28.68	30.9	1.01	45.1	270	4	16	91.8	31	35	2	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	42	295	91	5	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	6	25	115	4	28	n.d.	-	15	-	310
927160401	0.17	0.04	27.33	30.9	3.98	90.8	435	10	16	334	11	50	15	n.d.	1260	44.0	-	21	0.11	310
927160404	0.27	0.09	9.46	1.58	43.8	337	2240	71	24	3950	50	263	463	2	3370	1120	-	124	0.21	-
927160405	3.77	1.03	4.25	0.392	34.6	330	885	38	26	546	6	89	234	n.d.	15200	767	-	146	0.12	-
927160503	4.38	1.10	4.10	2.89	18.4	63.5	211	16	56	723	6	128	129	2	711	50.2	-	242	0.25	-
927170501	1.65	0.35	7.92	4.78	25.0	209	1640	22	22	1030	9	289	267	3	4720	355	-	156	0.11	300
9271712	1.96	6.81	11.93	12.0	11.6	118	983	20	25	785	7	116	182	n.d.	2020	235	-	344	0.17	296
927171402	0.80	0.18	10.30	8.91	31.2	377	3130	45	13	1480	n.d.	118	313	2	7440	588	-	182	0.12	296
9271715	0.45	6.57	14.58	16.2	11.4	146	1050	22	24	734	n.d.	100	115	4	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	21	98	1570	6	65	6.8	9.1	315	-	310
93620102	0.90	7.76	16.64	23.3	1.28	24.6	207	n.d.	85	98.6	9	91	1260	n.d.	170	33.3	16.7	543	-	310
93620103	1.11	0.17	20.27	27.1	6.08	101	661	n.d.	105	407	9	157	1590	n.d.	1260	128	9.5	133	-	310
93620104	1.88	0.33	15.59	16.9	15.5	155	1110	6	126	834	13	280	1330	3	2120	237	6.6	218	0.04	310
93620105	0.95	0.16	18.10	19.0	11.6	166	1090	n.d.	136	736	10	255	1590	4	2200	229	5.0	245	-	310
93620202	1.63	0.52	27.84	5.22	4.65	52.9	1320	13	149	313	25	226	2270	19	1520	56.4	0.7	95	0.25	250
93620204	1.31	0.22	18.27	10.7	20.4	216	1690	19	107	1030	17	374	1590	n.d.	3370	332	2.8	151	0.088	250
93620-1-1	0.99	0.19	19.23	22.9	10.6	144	615	n.d.	110	579	17	166	1550	4	2260	189	11.0	109	-	310
93620-2-1	1.06	0.39	16.17	19.7	8.46	133	1600	n.d.	102	389	5	162	1529	4	4810	186	6.5	279	-	310
93622202	0.24	2.47	21.02	32.2	2.00	43.1	259	n.d.	91	154.9	n.d.	53	1660	5	704	54.7	11.1	216	-	317
93622301	1.54	0.51	10.37	1.01	39.6	371	1770	46	123	1560	16	323	1140	n.d.	7710	942	1.2	289	0.12	-
93622302	1.75	0.94	23.95	20.8	1.04	21.1	603	n.d.	123	54.2	84	72	1880	11	800	21.2	9.5	207	-	-
Average	1.22	1.50	17.6	16.1	14.5	148	1100	16	68	738	16	159	886	4	4650	368	7.5	189	0.11	-
Kaikata seamount(Usui et al., 1994)																				
(maximum)	-	-	-	-	-	2	-	0.142	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22
(minimum)	-	-	-	-	-	0.1	-	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22

n.d. : not detected - : not measured

出域はカルデラ北部～北東部のカルデラ底、もしくはカルデラ壁下部である可能性、③熱水の $\text{CH}_4 / ^3\text{He}$ 比は106～107前後と推定され、この熱水系は(多量の)堆積層に被われていない可能性が指摘された。

(2) 明神礁海底カルデラ

明神礁海底カルデラはベヨネース列岩の東側に位置し、直径約10kmの大型カルデラであり、中央に直径4km比高700mの中央火口丘が存在する。このカルデラは、石英安山岩質岩石とその碎屑物により構成されている。このカルデラ内の中央火口丘の西側、水深1,000～1,100m付近で、数百mの範囲にわたって重金属を伴う熱水鉱化帯が存在する(飯笹, 1992)。熱水変質域は中央火口丘西斜面と西側のカルデラ壁にみられる。この熱水変質域において重晶石・硫化物のフラグメントや、硫化物を含む緑色火砕岩が採取された(Iizasa et al., 1992)。

重晶石・硫化物のフラグメントでは、重晶石と硫化物の量比は逆相関の関係にある。硫化物の中では閃亜鉛鉱が最も多く、次に方鉛鉱、少量の黄銅鉱・黄鉄鉱・斑銅鉱がつづく。一般に塩化ナトリウム溶液中での銅の溶解度は、250～350℃の間で急激に減少する(中島, 1986)。このことから、閃亜鉛鉱に富み黄銅鉱の少ない明神礁海底カルデラの硫化物・重晶石フラグメントは、300℃以下で形成されたことが示唆される(飯笹, 1992)。重晶石・硫化物フラグメントはバリウム、亜鉛に富み(Table 2)、金/銀比は0.003～0.028の範囲である。

飯笹(1992)によると、硫化物の硫黄同位体比 $\delta^{34}\text{S}$ (+2.1～+2.8‰) は、黒鉱鉱床のそれに匹敵する値を示し、重晶石の硫黄同位体比 $\delta^{34}\text{S}$ (+19.5～+20.1‰) は、現世の海水のそれに似ている。硫化物の鉱染した緑色凝灰岩 ($\delta^{34}\text{S}$: +2.7‰) や変質石英安山岩 ($\delta^{34}\text{S}$: -5.3‰) 中の硫化物の硫黄同位体比は、黒鉱鉱床周辺の緑色凝灰岩や変質石英安山岩中のその値と同様の範囲内にある。同位体比のデータ、鉱物組成・組織、化学組成から、重晶石フラグメントは黒鉱タイプ鉱床に産す

る重晶石の鉱石に類似し、硫化物フラグメントは重晶石を伴う黒鉱に相当するものである。明神礁海底カルデラのおかれた地質環境やそこで得られた試料の鉱物組成、化学組成、硫黄同位体比は、Hutchinson (1973) が指摘した環太平洋島弧に見られる亜鉛—鉛—銅—銀タイプの鉱床、特に黒鉱タイプ鉱床に類似している(飯笹, 1992)。

(3) 水曜海山西嶺カルデラ

1) 水曜海山西嶺カルデラの鉱化作用

孺婦岩と西之島の間につながる七曜海山列の、ほぼ中央に位置する水曜海山西峰の山頂部に、活発に熱水を噴出する硫化物チムニーが発見された(春日・加藤, 1992b)。水曜海山は、小笠原トラフから海山全体の高さが3,000m以上に達し、東西方向に配列する山頂水深860mの西峰と、山頂水深1,310mの東峰の二つの円錐型火山体からなる(長岡ほか, 1992)。石英安山岩質岩石からなる西峰には、長径1.5km、深さ500mのカルデラが存在し、水深1,370m程度のカルデラ床の中央部に、チムニー群が存在する。チムニーの密集地には、ところどころでマウンドが形成されている。活発に噴出する熱水の温度は230～311℃であり、そのpHは25℃で3.7前後である(角皆ほか, 1993; 石橋ほか, 1994)。

これらのチムニーから採取された熱水性沈澱物の化学組成とその平均値を、Table 2に示す(渡辺・梶村, 1993)。銅含有量10wt%以上のものが多く、また、亜鉛含有量の比較的多い試料に、金銀が多い傾向が見られる。金含有量は最高71ppmであり、硫化物24試料の金含有量の平均は16ppmである。銀含有量は最高値で377.1ppm、平均148ppmである。金/銀比は平均0.11となり、海底熱水性鉱床産の硫化物としては金/銀比が大きい。

2) 水曜海山西峰カルデラの熱水化学組成

角皆ほか(1993)によると、水曜海山の熱水の CO_2 濃度は39.7mmol/kgであり、中央海嶺型の熱水よりも高く、沖繩トラフの熱水系よりも低いことがわかった。溶存ヘリウムの $^3\text{He} / ^4\text{He}$ 比の平均値は8.1 (R/Ratm) に達し、中央海嶺玄武岩から推定された上部マントルの値に匹敵する高い

Table 3 Chemical compositions of hydrothermal manganese oxides from the Kaikata Seamount on the Sititō-Iōzima Ridge.

Sample No.	Mn wt%	Fe wt%	Cu ppm	Ni ppm	Zn ppm	Co ppm	Pb ppm
D825-10	39.28	0.15	35	88	101	8	10
D826-11	45.86	0.29	22	6	32	10	13
RC449#2	45.15	0.51	355	45	61	34	14
RS9	43.00	0.07	139	6	14	27	2
RS16-2	31.10	2.04	52	40	52	14	6
RS16-3	36.80	1.21	327	10	38	34	5
RS164	33.40	2.37	1000	53	65	28	6
RS18-5#1	41.13	3.18	310	1	22	21	1
RS18-5#2	37.88	1.35	329	25	44	55	14
RS304	40.55	1.01	91	177	182	29	23
RS31-6	45.28	0.57	88	27	48	30	n. d.
RS33-3	28.32	2.89	144	168	194	28	16
RS40-8#1	30.30	2.44	161	84	112	35	n. d.
RS40-8#2	39.34	4.13	163	6	30	8	1
RS48	46.24	0.23	358	5	38	34	18

n. d. : not detected, (Usui and Nishimura, 1992)

値であった。熱水中の溶存気体組成の分析は、熱水の起源や熱源たるマグマの性質に関する情報を提供してくれる。水曜海山では、熱水中あるいはマグマ中における同位体比分別過程や高炭素同位体比物質の混入過程が存在していることは考えにくく、マグマひいては上部マントルの本源的な値である可能性が指摘された。

海底熱水系の高温の熱水に共通した特徴として、海水に比べマグネシウムと SO_4 が極めて少なく、鉄とマンガンなどの金属濃度が高く、pHが低いことが挙げられる。水曜海山の熱水もこの共通の特徴を持ち、さらに、沖繩トラフの熱水系に比べてカルシウムとストロンチウムに富んでいる(石橋ほか, 1994)。

(4) 海形海山

海形カルデラは西之島の南方約60kmに位置し、海形海山の3つの山頂のうち、最も東側の山頂に存在する直径約3kmの海底カルデラである。このカルデラは安山岩質火山岩から構成され、カルデラ内部には玄武岩質の中央火口丘が存在する。中央火口丘頂部では、22°Cの熱水噴出と生物群集が確認されている(仲ほか, 1989)。カルデラ内から採取された火山砂礫中には、黄鉄鉱が発見されている。白井ほか(1994)によると、岩石中の鉱染

状脈状硫化物の金含有量最高値は0.142ppm、銀含有量最高値は2ppmである。

地質調査所による11回にわたる調査の結果から、海形海山の他の峰も含めて、広く熱水起源マンガン酸化物が分布することが明らかにされた(Usui and Nishimura, 1992)。海形海山の低温熱水活動は、多量の硫化物を伴う高温の熱水噴出とは様式が異なり、その沈澱物はマンガン酸化物が主体である(Table 3)。さらに、この熱水性酸化物は、鉄が少なく、ほとんどマンガン酸化物から構成されているのが特徴である。その特徴的産状として、海底面の直下に数cmの厚さで盤層を形成し、数kmにわたる極めて広範囲の海底面に沈澱している。

4. 七島硫黄島海嶺の熱水鉱化作用の特徴

(1) 石英安山岩質カルデラ産の熱水性鉱床

七島硫黄島海嶺では北ベヨネース海底カルデラ、明神礁海底カルデラ、水曜海山カルデラという、いずれも石英安山岩からなるカルデラから、熱水性硫化物が採取されている。飯笹(1992)は、これら3つの石英安山岩からなる海底カルデラのおかれた地質環境が、環太平洋の島弧陸上に見られる黒鉄鉱床等の地質環境に類似していることを指摘した。一方、安山岩～玄武岩からなる海形海山カルデラからは、少量の黄鉄鉱と微細な鉱染状硫化物のみが採取されている。

これまでにまとめられた黒鉄鉱床の模式断面図では、鉱床の下盤に石英安山岩が密接に伴って存在する(佐藤, 1982)。また、北鹿ベースンの黒鉄鉱床は、カルデラ内に貫入した石英安山岩の直上部に形成されたとするモデルも提案されている(Ohmoto, 1978; Sillitoe, 1980; 中嶋, 1993)。七島硫黄島海嶺において、海底熱水性硫化物が採取されたカルデラが石英安山岩質溶岩から構成されることは、北鹿ベースンの黒鉄鉱床のケースとよく似ており、熱水活動の成因に大きく関係している可能性が高い。

島弧の火山フロントでは、一般的に安山岩質マグマが噴出するケースが多いが、玄武岩質、石英

安山岩質マグマが噴出することもある。そのうち、石英安山岩質マグマの噴出によりできた海底カルデラ内に、熱水鉱化作用により生じた硫化物が産出する理由は何か？ その理由については以下の2つが考えられる。

① 石英安山岩質マグマの粘性が高く、長期間にわたり海底下の浅い部分に居座れること。

(玄武岩質マグマは粘性が低いため、少量のマグマが島弧の地中を上昇してきた場合、海底下の比較的細い亀裂でも容易に通過してしまい、マグマの全量が海底面に放出されてしまう。その噴火活動は短期間で終了し、マグマの保有していた熱は短期間に海水により

冷却されたしまう。

石英安山岩質マグマは粘性が高いので、マグマが地中を上昇するためには、ある程度の幅を持った火道が必要である。マグマが地中を上昇しても海底まで達する火道が狭い場合や、噴火活動の末期にこの火道が狭まった場合には、粘性の高い石英安山岩質マグマは容易に海中に放出されず、長期間にわたり海底下の浅い部分に居座ることができるであろう。結果的に、マグマの保有している熱が急には冷却されず、長期間維持されると考えられる。この熱が継続的に海底下の熱対流・熱水循環を生じさせ、熱水鉱化作用・海底熱水

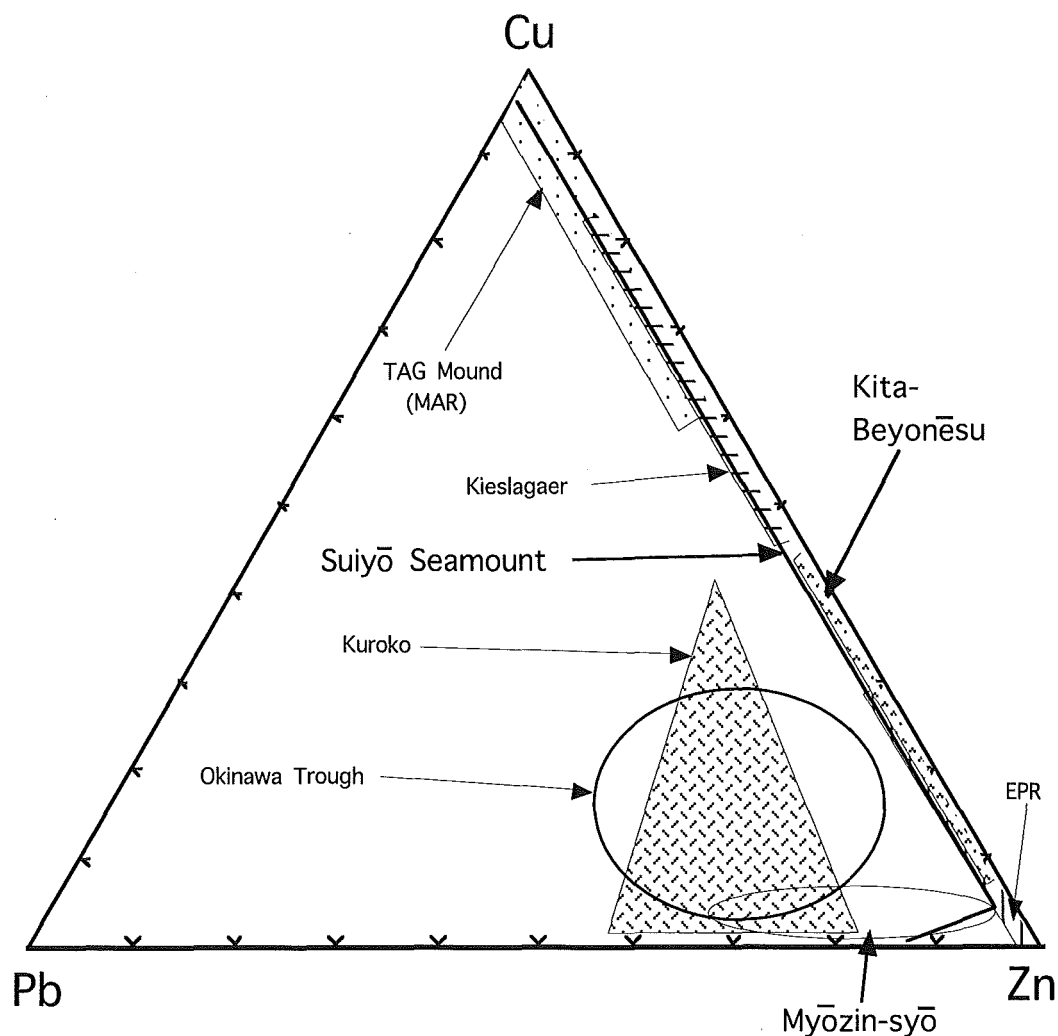


Fig. 2 The ternary diagram comparing the ratio of Cu-Zn-Pb on the bulk composition in sea-floor hydrothermal sulfides from the Sititō-Iōzima Ridge and from the other areas. The areas in the diagram show bulk compositions for hydrothermal sulfides of Kuroko-type deposits, of Kieslager-type deposits, from sea areas around Japan and on the mid-oceanic ridges (the EPR, TAG hydrothermal mound on the MAR). (After : Kajiwara, 1987 ; Watanabe et al., 1995)

性硫化物鉱床を形成している可能性がある。

一方、東太平洋海嶺 (EPR) や大西洋中央海嶺上 (MAR) の TAG など中央海嶺系では、玄武岩質マグマが大量に断続的に地下深部から供給されているために、長期間、海底下の熱対流・熱水循環が維持されていると考えられる。))

- ② 石英安山岩質マグマは、海底に沈澱した硫化物を、海水による酸化から守るための凹地 (海底カルデラ) を生じ易い。

(この凹地は必ずしもカルデラである必要はなく、例えば、中央海嶺系の中軸谷や紅海のような内湾の海底地形でもよい。機能的には、周囲の海水が容易にこの凹地の底に浸入できず、凹地内の海水が淀んだ状態になるような地形であればよい。凹地内の海水が淀み、周囲の深層水 (あるいは中層水) から遮断されると、深層水中の酸素により海底熱水性硫化物が溶脱されるのを防ぎ、熱水性硫化物鉱床が保存されやすいからである。石英安山岩質マグマは、爆発的な噴火活動による爆裂火口や、噴火後のマグマだまりの陥没による陥没カルデラを生じ易いので、そのカルデラ床に生じた海底熱水性鉱床は維持され易いと考えられる。

EPR や TAG など中央海嶺系では、海嶺中央の地溝帯に形成された帯状凹地 (グラベン) が周囲の深層水の進入を妨げ、深層水中の酸素により海底熱水性硫化物が溶脱されるのを防ぎ、熱水性硫化物鉱床が保存されていると考えられる。)

(2) 熱水性硫化物中の主要元素濃度の特徴

1) 硫化物中の銅—亜鉛—鉛比

七島硫黄島海嶺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、Fig. 2 に示す (梶原, 1987; 渡辺ほか, 1995 に加筆)。Fig. 2 には日本周辺海域産、EPR 産、MAR の TAG 熱水マウンド産の硫化物について、銅—亜鉛—鉛比の領域がプロットされている。(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 Fig. 2 にプロットされていない。)

七島硫黄島海嶺の水曜海山産と北ベヨネース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。水溶液中の銅の溶解度は温度依存性が高く、熱水が十分に高温でないと溶解・運搬されない。水曜海山における最高317°Cの熱水は、銅を十分に溶解し海底まで運搬している。かつて噴出していた明神礁海底カルデラ内の熱水と、現在微弱ながら噴出している北ベヨネース海底カルデラ内の熱水は、水曜海山における熱水よりも温度が低く、それぞれ最高温度が300°C以下、205~225°Cであったと推定されている。つまり、銅含有量を最も支配している要因は、海底下で熱水が母岩と反応し、海底面付近で硫化物を沈澱させるまでの間の温度である可能性がある。

沖縄トラフ産と七島硫黄島海嶺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られている。また、七島硫黄島海嶺の明神礁カルデラ (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, 1994b)。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、その熱水から沈澱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、その硫化物中の鉛含有量が少ないこと (Fig. 2) は、梶原 (1994) の論理に矛盾しない。

渡辺ほか (1995) は、銅—亜鉛軸が熱水の高温度 (銅)—低温度 (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、熱水性沈澱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

海底表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縄トラフ産、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澱した黄銅鉱を主体とする層が存在する可能性がある。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、高温の熱水から沈澱する黄銅鉱の層を、より低温の熱水から沈澱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等では、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澱した黄銅鉱の層を、採取することのできた可能性がある。EPR

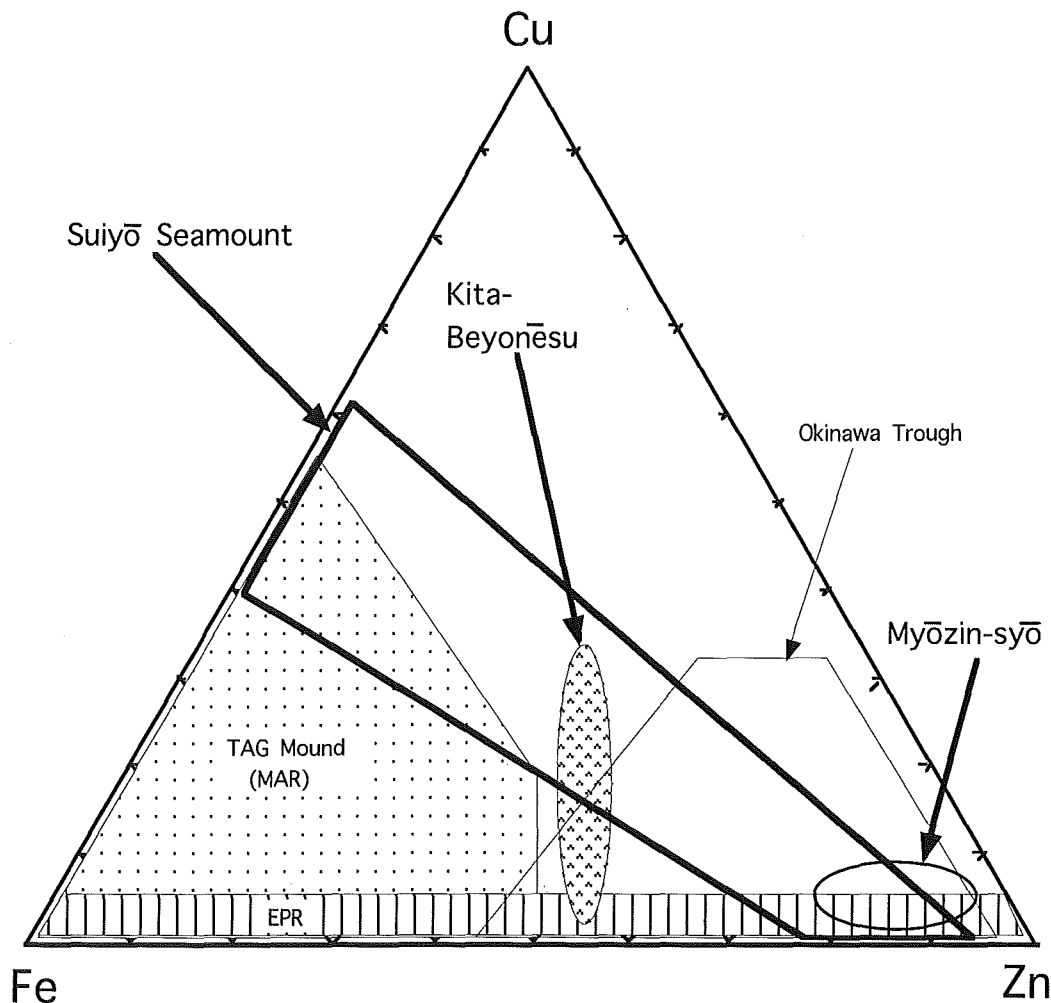


Fig. 3 The ternary diagram comparing the ratio of Cu-Zn-Fe on the bulk composition in sea-floor hydrothermal sulfides from the Suiyō-Iōzima Ridge and the mid-oceanic ridges (the EPR, TAG hydrothermal mound on the MAR). (After : Kajiwara, 1987 ; Watanabe et al., 1995)

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。

2) 硫化物中の銅—亜鉛—鉄比

七島硫黄島海嶺産とその他の海域産の硫化物の銅—亜鉛—鉄比の比較を、Fig. 3 に示す。(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 Fig. 3 にプロットされていない。)

沖縄トラフ産硫化物と、水曜海山以外の七島硫黄島海嶺の海底火山産硫化物の銅—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 (Fig. 3)。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。

日本周辺の島弧性の海底火山産硫化物と、EPR や TAG のような中央海嶺産硫化物の銅—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

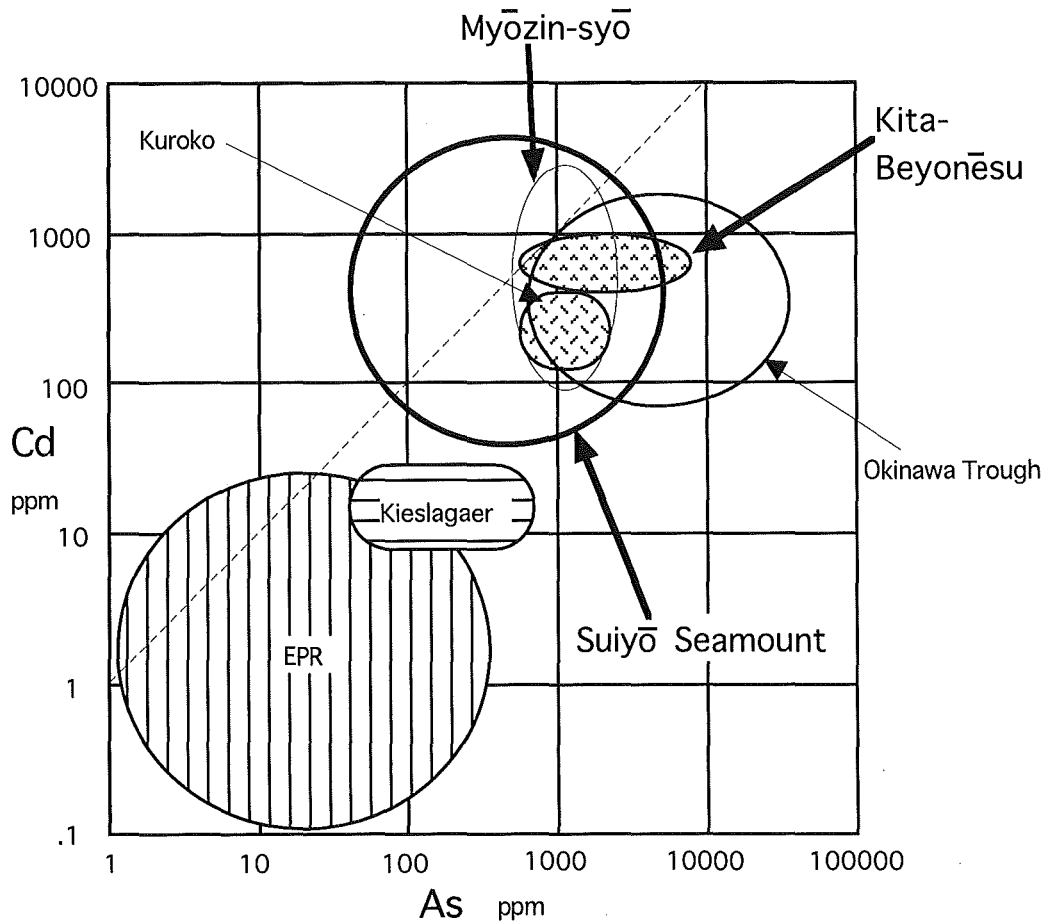


Fig. 4 Relation diagram between As and Cd contents in sea-floor hydrothermal sulfides. (After : Mizuta et al., 1994)

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。

(3) 硫化物中の微量金属濃度の特徴

七島硫黄島海嶺産の熱水性硫化物において、特に含有量の多い微量元素として砒素が挙げられる。

砒素含有量は北ベヨネース海底カルデラ（最高8,400ppm）、明神礁海底カルデラ（最高2,300ppm）、水曜海山カルデラ（最高3,130ppm）の平均値でも、いずれも1,000ppm以上に達する。硫化物中の砒素含有量は中央海嶺産のものより多く、黒鉱床産のものと同様の値を示している。しかし、沖縄トラフ産のものより低い値である（Fig. 4；水田ほか，1994）。また、カドミウムも砒素と同程度の高含有量を示し、中央海嶺産のものより多く、黒鉱床産のものと同程度、沖縄トラフ産のものより低い

値である。硫化物中のアンチモン含有量は、黒鉱床産のものより多く、中央海嶺産のものより多く、沖縄トラフ産のものより低い値である。

七島硫黄島海嶺の北ベヨネース海底カルデラ、明神礁海底カルデラ、水曜海山カルデラ産の熱水性硫化物中の銀含有量は、10～380ppm程度の含有量である。この銀含有量は黒鉱型鉱床産の硫化物と同程度であるが、中央海嶺産のものよりも多く、沖縄トラフ産のものよりも少ない（Fig. 5；水田ほか，1994）。これら3つの海底カルデラ産の硫化物では、金含有量はいずれも最高値が2ppmを越えている。この金含有量は黒鉱型鉱床産や沖縄トラフ産の硫化物と同程度であるが、中央海嶺産のものよりも多い。七島硫黄島海嶺のカルデラ産の硫化物中の金／銀比は、北ベヨネース海底カルデラで0.036～0.071、明神礁海底カルデラで0.003～0.028、水曜海山カルデラで0～0.25である。明神礁海底カルデラ産硫化物中の金／銀比は、中央海嶺産（0.001）のものよりやや高く、黒鉱型鉱床産（0.01）のものや沖縄トラフ産のものと同程度である。他の2つのカルデラ産硫化物中の金／銀比は、黒鉱型鉱床産や沖縄トラフ産のものよりやや高い値

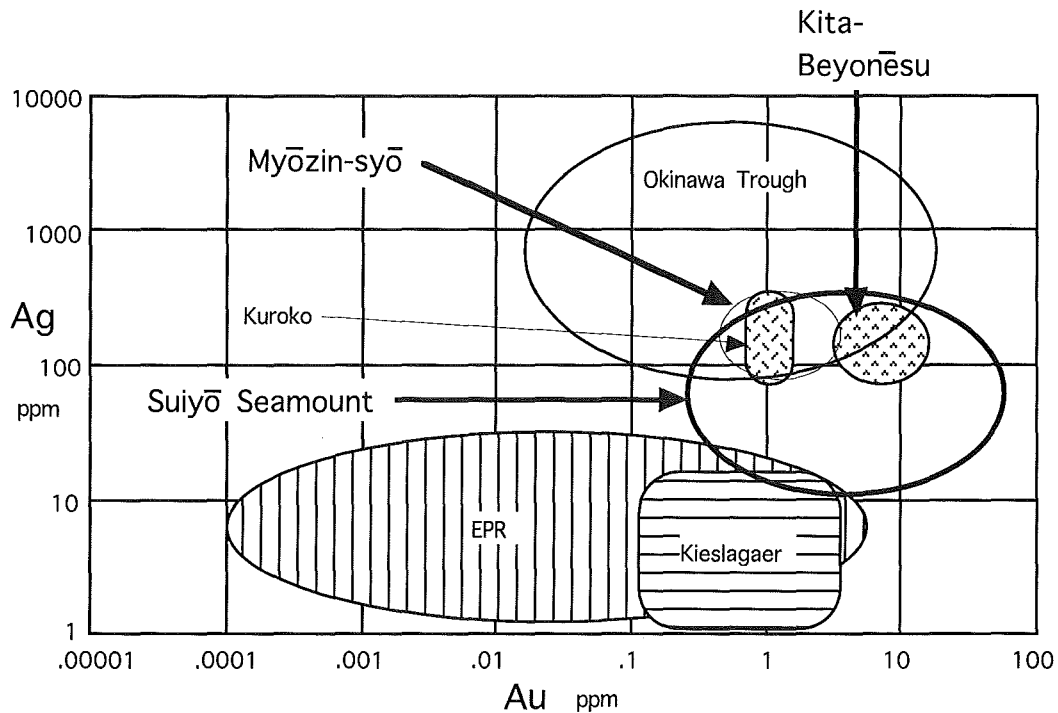


Fig. 5 Relation diagram between Au and Ag contents in sea-floor hydrothermal sulfides. (After : Mizuta et al., 1994)

を示す。つまり、相対的に金含有量が多いので、金/銀比が高くなっている。

これまで報告された七島硫黄島海嶺産の海底熱水性硫化物は、金含有量と砒素含有量の多さなどで共通点があり、その地質学的背景もまた類似点が多い。特に①島弧の火山フロント上に位置すること、②石英安山岩質の火山のカルデラ床に存在することが挙げられる。さらに、熱水性沈澱物中の金含有量の多さやその地質学的背景は、近年紹介され、現在形成されつつある青森県恐山の熱水性鉱床と類似している (Aoki, 1991; Aoki, 1992)。海底下で熱水と反応した母岩が石英安山岩であるとすると、石英安山岩が海底熱水性硫化物の微量元素組成とどのように関係しているのかは、今後、解明すべき問題である (渡辺・梶村, 1994)。

(4) 七島硫黄島海嶺の熱水の特徴

七島硫黄島海嶺で噴出している熱水について、これまでの分析値をもとに考察する。沖縄トラフ熱水系では、熱水のアルカリニティーや NH_4^+ 濃度など、堆積物中の有機物との熱水反応を示すパラメーターが顕著に高い値を示している。これに対し、七島硫黄島海嶺の北ベヨネースカルデラと水曜海山の熱水は、中央海嶺型熱水とほぼ同じレベルであった (千葉ほか, 1993; 石橋ほか, 1993)。すなわち、七島硫黄島海嶺上の海底火山で噴出している熱水と中央海嶺型熱水は、海底下で堆積物との反応の形跡を示さず、熱水はその初生化学組成と海底下で反応した岩石の影響しか受けない。それに対し背弧海盆の熱水活動は、海盆に堆積した堆積物と熱水が反応するので、熱水は堆積物と反応してその初生化学組成と異なってくる。したがって、背弧海盆の熱水活動により生じた海底熱水鉱床産の硫化物の化学組成は、必然的に島弧海嶺系と中央海嶺系の海底熱水鉱床産の硫化物の化学組成と異なってくる可能性もある。

(5) 七島硫黄島海嶺産のマンガン酸化物

熱水起源マンガン酸化物は特有の化学組成、鉱物学的特徴を持つため、マンガン団塊・クラストを形成する海水起源及び続成起源の鉄・マンガン

酸化物と、明確に識別できる。つまり、熱水起源マンガン酸化物は銅、ニッケル、コバルトが少なく、ほとんど鉄とマンガンの酸化物から構成されている。中でも、伊豆・小笠原弧 (特に七島・硫黄島海嶺周辺) の海底産の熱水起源マンガン酸化物は、鉄が少なく、ほとんどマンガン酸化物から構成されているのが特徴である (臼井ほか, 1994)。これは母岩が鉄の少ない酸性岩あるいは安山岩であることを反映しているのかもしれない。

また、その特徴的産状として、岩盤または堆積物の下部から穏やかに浸出した熱水から、酸化物が沈澱することにより、海底面の直下に厚さ数cmで盤層を形成し、数kmにわたる極めて広範囲の海底面に沈澱している形状となる。この形成過程は島弧の海底にマンガン酸化物をもたらす低温熱水活動のひとつの典型であるかもしれない (Usui and Nisimura, 1991)。つまり、低温の熱水活動は硫化物を伴う高温の熱水噴出とは、様式が異なると考えられる。

5. まとめ

七島硫黄島海嶺における熱水鉱化作用の特徴として、以下の項目が挙げられる。

- ① 海底熱水性硫化物は、主に石英安山岩質海底カルデラ内に産する。
- ② 他の海域の海底熱水性硫化物に比べ、相対的に鉄含有量が少ない。
- ③ 硫化物中の含有量の多い微量元素として、砒素と金が挙げられる。
- ④ 銀含有量は他の海域のものと同程度であるので、相対的に金/銀比が高くなっている。
- ⑤ 噴出している熱水は、海底下で海洋性堆積物と反応した形跡が少ない。
- ⑥ 海形海山を代表とするマンガン酸化物は、海底火山上の低温熱水活動によりもたらされた。
- ⑦ 熱水起源マンガン酸化物は鉄が少なく、ほとんどマンガン酸化物から構成される。

また、七島硫黄島海嶺産と他の海域産における、海底熱水性硫化物の化学組成比較の結果、海底熱

水性硫化物の主要元素濃度を支配する要因として、以下の可能性が挙げられる。

⑧ 亜鉛に比べて銅の多い熱水性硫化物の形成に関与した熱水は、より高温である。

(銅・亜鉛含有量の多少が、熱水の高温—低温軸に相当する可能性がある。)

⑨ 熱水性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。

(熱水は海底下で堆積物と反応して鉛を溶解し、海底表面にまで運搬している。)

⑩ 硫化物中の鉄含有量の多少は、熱水が海底下で反応した母岩中の鉄含有量の多少に依存している可能性がある。

以上のような可能性を証明し、海底熱水性硫化物の化学組成を支配する要因を解明するためには、母岩中の微量元素の定量、熱水の物理化学的性質や微量元素濃度等のより詳細な分析と検証が必要である(鹿園, 1988)。今後、これら基礎データの蓄積を期待したい。

謝 辞

水曜海山の潜航調査・研究については、海洋調査課春日 茂氏、沿岸調査課芝田 厚氏、梶村 徹氏の調査成果を使用させて頂いた。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御尽力をいただいた。ここに明記して謝意を表す。

引 用 文 献

Aoki, M.: Gold and Base Metal Mineralization in an Evolving Hydrothermal System at Osorezan, Northern Honshu, Japan, *Rept. Geol. Surv. Japan*, **277**, 67-70, (1991)

Aoki, M.: Magmatic Fluid Discharging to the Surface from the Osorezan Geothermal System, Northern Honshu, Japan, *Rept. Geol. Surv. Japan*, **279**, 16-21, (1992)

Fiske, R. S., Naka, J., Iizasa, K. and Yuasa,

M.: Caldera-forming Submarine Pyroclastic Eruption at Myojin Knoll, Izu-Bonin Arc, *JAMSTEC Journal of Deep Sea Research*, **11**, 315-322, (1995)

Hutchinson, R.W.: Volcanogenic Sulfide Deposits and Their Metallogenic Significance, *Economic Geology*, **68**, 1223-1246, (1973)

堀田 宏: 潜水船による深海研究, 海の研究, **1**, 189-195, (1992)

飯笹幸吉: 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, (1992)

飯笹幸吉・寺島 滋・佐々木宗建・丸茂克実: 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, (1993)

Iizasa, K., M. Yuasa and S. Yokota: Mineralogy and geochemistry of volcanogenic sulfides from the Myojinsho submarine caldera, the Shichito-Iwojima Ridge, Izu-Ogasawara Arc, northwestern Pacific, *Mar. Geo.*, **108**, 39-58, (1992)

石橋純一郎・下島公紀: 伊豆・小笠原弧における地球化学的手法による熱水活動探査, 月刊地球, **158**, 489-492, (1992)

石橋純一郎・角皆 潤・脇田 宏・渡辺一樹・梶村 徹・芝田 厚・藤原義弘・橋本 惇: 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, (1994)

海洋科学技術センター: 潜水調査船「しんかい2000」500回潜航記録, p.141, (1991)

梶原良道: 海嶺熱水鉱床の重金属の起源, 月刊海洋科学, **202**, 199-203, (1987)

梶原良道: 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, (1994)

春日 茂・加藤幸弘: 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, (1992a)
- 春日 茂・加藤幸弘：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，(1992b)
- 春日 茂・加藤幸弘・木村信介・沖野郷子・大陸棚調査室員：本州南方海域の島弧海溝系及び背弧海盆の特徴，—水路部による地球物理学的調査結果の概要—，水路部研究報告，**28**，19-54，(1992)
- 水田敏夫・小林正彦・橋本 惇・藤岡換太郎：小笠原水曜海山カルデラ内の銅に富む熱水性チムニー鉱石，JAMSTEC 深海研究，**10**，75-87，(1994)
- 長岡信治・春日 茂・加藤幸弘：小笠原—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，(1992)
- 長岡信治・沖野郷子・加藤 茂：ナローマルチビーム測深機による伊豆・小笠原弧中部の海底火山地形図，水路部研究報告，**27**，145-172，(1991)
- 仲 二郎・深海調査グループ：小笠原諸島，海形海山 KC 峰の海底，海洋科学技術センター試験研究報告，**5**，57-65，(1989)
- 中島和夫：海底熱水性鉱床の銅・亜鉛鉱化作用，月刊地球，**85**，327-331，(1986)
- 中嶋輝允：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，(1993)
- Ohmoto, H. : Submarine calderas : a key to the formation of volcanogenic massive sulfide deposits?, *Mining Geol.*, **28**, 219-231, (1978)
- 佐藤壮郎：黒鉱型鉱床の特徴，月刊海洋科学，**146**，194-199，(1982)
- 鹿園直建：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，(1988)
- Sillitoe, R. H. : Cauldron subsidence as a possible inhibitor of porphyry copper formation, *Mining Geol. Spec. Issue*, **8**, 85-93, (1980)
- 玉木賢策・井上英二・湯浅真人・棚橋 学・本座 栄一：小笠原弧の第四紀背弧拡大活動の可能性について，月刊地球，**3**，421-432，(1981)
- 千葉 仁・中島和夫・蒲生俊敬・石橋純一郎・角 皆 潤・酒井 均：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，(1993)
- 角皆 潤・石橋純一郎・脇田 宏・渡辺一樹・梶村 徹・橋本 惇：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，(1993)
- 角皆 潤・石橋純一郎・脇田 宏・蒲生俊敬・飯笹幸吉・リチャード S フィスケ・仲 二郎：伊豆・小笠原弧，北ベヨネーズ海底カルデラ熱水活動，JAMSTEC 深海研究，**11**，333-339，(1995)
- Usui, N. and Nishimura : Hydrothermal manganese oxide deposits from the Izu-Ogasawara (Bonin)-Mariana Arc and adjacent area, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **43**, 257-284 , (1992)
- 臼井 朗・飯笹幸吉・棚橋 学：日本周辺海域鉱物資源分布図，地質調査所特殊地質図，**33**，(1994)
- Urabe T., Yuasa M., Nakao S. and on-board scientists : Hydrothermal sulfides from a submarine caldera, in the Shichito-Iwojima Ridge, Northwestern Pacific, *Marine Geology*, **74**, 295-299, (1987)
- 渡辺一樹・梶村 徹：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，(1993)
- 渡辺一樹・梶村 徹：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, (1994)
- 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：海底火山と
それに伴う海底熱水鉱床の調査手法，一伊
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, (1994a)
- 渡辺一樹・芝田 厚・梶村 徹：水曜海山カルデ
ラ内の熱水活動域のマッピング, JAM-
STEC 深海研究, 10, 55-62, (1994b)
- 渡辺一樹・芝田 厚・梶村 徹：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, JAMSTEC 深海研究, 11, 351-361,
(1995)
- 湯浅真人：日本近海の海底熱水活動—伊豆・小笠
原海域を例に一，地学雑誌, 95-7, 32-40,
(1986)
- 湯浅真人：伊豆・小笠原弧北部，明神海丘潜航調
査報告(#555), JAMSTEC 深海研究, 11,
305-313, (1995)
- 湯浅真人・村上文敏：小笠原弧の地形・地質とそ
うふ岩構造線, 地学雑誌, 94, 47-66, (1985)
- Yuasa, M. and Nohara, M. : Petrographic and
geochemical along-arc variations of vol-
canic rocks on the volcanic front of the
Izu-Ogasawara (Bonin) Arc, *Bulletin of
the Geological Survey of Japan*, 43,
421-456, (1992)
- Yuasa, M., Murakami, F., Saito, E. and
Watanabe, K. : Submarine topography
of seamounts on the volcanic front of the
Izu-Ogasawara (Bonin) Arc, *Bulletin of
the Geological Survey of Japan*, 42,
703-743, (1991)