

明神海丘のアクティブ熱水フィールドとブラックスモーカー

飯笹 幸吉*¹ 石橋純一郎*² 藤原 義弘*³ 橋本 惇*³
堀井 善弘*⁴ 石塚 治*¹ 小山 純弘*³ 湯浅 真人*¹

伊豆・小笠原弧北部の火山フロント上の流紋岩質の明神海丘カルデラの東部カルデラ床からカルデラ壁下部における、1997年6月及び1998年5月に実施した「しんかい2000」の潜航調査により、ブラックスモークを噴出する巨大な硫化物チムニー群、塊状硫化物や熱水生物群集を伴う、少なくとも幅400m長さ400m高さ約30m以上の規模のマウンド地形を発見した。このマウンドの規模や硫化物の金属含有量は、これまで報告された海底の硫化物鉱床と比較すると、最大でしかも最高のものに相当する。このマウンドの硫化物の産状や鉱物組成の特徴は、黒鉱型鉱床に類似する点が多い。このような巨大硫化物鉱床が、火山フロント上に発見されたのは初めてである。明神海丘の熱水の化学組成は、同島弧南部の水曜海山のものに似ていることが明らかになった。

明神海丘カルデラにおける巨大硫化物鉱床の発見は、同島弧北部のその他の海底カルデラに明神海丘と同様の鉱床が存在する可能性を示唆している。

キーワード：伊豆・小笠原弧、火山フロント、明神海丘カルデラ、流紋岩、硫化物チムニー、ブラックスモーカー、黒鉱類似鉱床

Active hydrothermal field associated with black smoker in the Myojin knoll, Izu-Ogasawara arc, northwestern Pacific

Kokichi IIZASA*⁵ Junichiro ISHIBASHI*⁶ Yoshihiro FUJIWARA*⁷
Jun HASHIMOTO*⁷ Yoshihiro HORII*⁸ Osamu ISHIZUKA*⁵
Sumihiro KOYAMA*⁷ Makoto YUASA*⁵

In 1997 and 1998, a huge sulfide mound (the Sunrise deposit) of at least 400 m by 400 m across and 30 m high, which is associated with black-smoker venting and inactive sulfide chimneys and massive sulfides significantly rich in Au, Ag, As, Sb, Cd, Zn, Fe, Cu, Ba and Pb, and vent biota, was first discovered in the eastern caldera wall of a submarine rhyolite caldera, Myojin knoll, located on the volcanic front in the northern Izu-Ogasawara arc. The Sunrise deposit analogous to Kuroko-type Deposits is the first discovery in the rhyolite suite on the volcanic front and is among the largest and the highest of such marine volcanogenic massive sulfide deposits in oceanic ridges, back-arc basins and island-arcs. The hydrothermal fluid chemistry of the Myojin

* 1 工業技術院地質調査所

* 2 九州大学理学部

* 3 海洋科学技術センター

* 4 東京都水産試験場八丈分場

* 5 Geological Survey of Japan

* 6 Faculty of Science, Kyushu University

* 7 Japan Marine Science and Technology Center

* 8 Hachijo Branch, Tokyo Metropolitan Fisheries Experiment Station

knoll is similar to that of the Suiyo seamount. The discovery indicates that large sulfide deposits may exist in the other submarine calderas in the northern Izu-Ogasawara arc.

Keywords: Izu-Ogasawara arc; Volcanic front; Myojin knoll caldera; rhyolite; sulfide chimney; black smoker; Kuroko-analogue ore deposit

1. はじめに

中央海嶺における塊状硫化物の発見 (Francheteau et al., 1979) 以来、海洋の様々なテクトニックセッティングにおいて硫化物の調査研究が行われ数多くの熱水硫化物の存在が報告されてきた (例えば, Rona and Scott, 1993)。

Sillitoe (1982) は、すでに、西太平洋に数多く存在する背弧海盆のリフトにおける流紋岩質岩石に伴う塊状硫化物鉱床の存在の可能性を指摘しており、その発見の一例が沖縄トラフにおける黒鉱タイプの鉱床であった。一方、日本周辺海域の島弧・海溝系における熱水硫化物に関して、藤岡 (1983) は、伊豆・小笠原弧に存在する背弧凹地が中新世に形成された黒鉱鉱床の構造的要素に類似することから、硫化物鉱床の存在の可能性を予測していたが、火山フロント沿いの水曜海山 (春日・加藤, 1992) や明神礁海底カルデラ (Iizasa et al., 1992) における小規模な硫化物のほかには、沖縄トラフにおけるような大規模な硫化物鉱床に匹敵するものは発見されていなかった。

伊豆・小笠原弧の火山フロント上の明神海丘カルデラにおける調査船「白嶺丸」及び潜水艇「しんかい2000」による、カルデラ床の堆積物中の熱水性鉱物や化学組成等の分布 (Iizasa, 1993; 1995) とカルデラ内の海水中のマンガン・メタン・ヘリウムの濃度異常 (石橋, 下島, 1992; 角皆ほか, 1995) から、カルデラ内の東部及び北西部に熱水活動に伴う硫化物鉱化作用の存在が指摘されていた (Iizasa, 1993; 1995) (図1)。その後の潜水艇しんかい2000の調査によって、カルデラ床東部において、1992年7月に鉱染状の硫化物を初めて採取した (Iizasa et al., 1997)。1996年8月に東部のカルデラ床やカルデラ壁下部において、硫化物チムニーや塊状硫化物に伴うシンカイヒバリガイ、巻き貝やユノハナガニなどの熱水生物群が、また、北西部のカルデラ壁において重晶石を多量に含む鉱染状凝灰角礫岩やシンカイコシオリエビが発見された (飯笹ほか, 1997)。1997年6月及び1998年5月、東部カルデラ壁の下部において、高さ30mにも達する活動的で巨大な硫化物チムニー群、塊状硫化物や熱水生物群集に伴う少なくとも幅400m長さ400m高さ約30m以上の規模のマウンド地形を発見した (図2)。このような

巨大硫化物鉱床の発見は、現世の中央海嶺や背弧海盆 (Rona and Scott, 1993) とは異なったテクトニックセッティングの火山フロント上では初めてである。

ここでは、明神海丘カルデラ床の東部において、しんかい2000によって1997年6月に発見された硫化物チムニーを伴う巨大硫化物鉱床 (ここでは、Sunrise 鉱床、と呼ぶ) 及び同地域において1998年5月に実施された潜航調査において、新たに発見されたブラックスモークを噴出するおよそ30mに達する巨大硫化物チムニー (ここでは大明神、と呼ぶ) や熱水の化学組成の特徴を報告する。

2. 地形・地質概要

フィリピン海プレート東縁に位置する南北に延びる伊豆・小笠原弧は、東から小笠原海嶺、新黒瀬海嶺、火山フロントの七島・硫黄島海嶺及び西七島海嶺からなり、娯楽岩構造線によって南部とそれより地殻の厚い北部とに分けられる (湯浅・村上, 1985; 湯浅, 1991)。同島弧には、七島・硫黄島海嶺と西七島海嶺の間にいくつかの背弧凹地が存在する (玉木ほか, 1981)。新第三紀火山岩類から構成される西七島海嶺は、島弧北部では北東-南西方向を持つ12列の雁行海山群の南北配列として分布する (湯浅・村上, 1985)。Sunrise 鉱床が発見された、東京の南方約400kmに位置する第四紀海底カルデラの一つの明神海丘カルデラ (村上・石原, 1985) は、その雁行海山群のひとつの北東延長部が火山フロントに交わる所に位置している (図1)。カルデラ縁は、東西7km南北6km程でやや楕円形を示し、その水深は520mから880mの範囲にある。このカルデラ縁には4つの高まりがあり、また、最浅部は西部に位置する約350mの外輪山である。カルデラ床の全体の広がり、東西4km南北3km程で水深1,350~1,400mにわたっている。このカルデラ床には、その中心よりやや南西よりの水深約1,100mに頂部を持つ中央火口丘が存在するため、カルデラ床の平坦部の幅は、南部から西部及び北部に行くにしたがい次第に広くなり、東部ではもっとも広く1kmを越える。カルデラ床の最深部は、東部及び北西部にあ

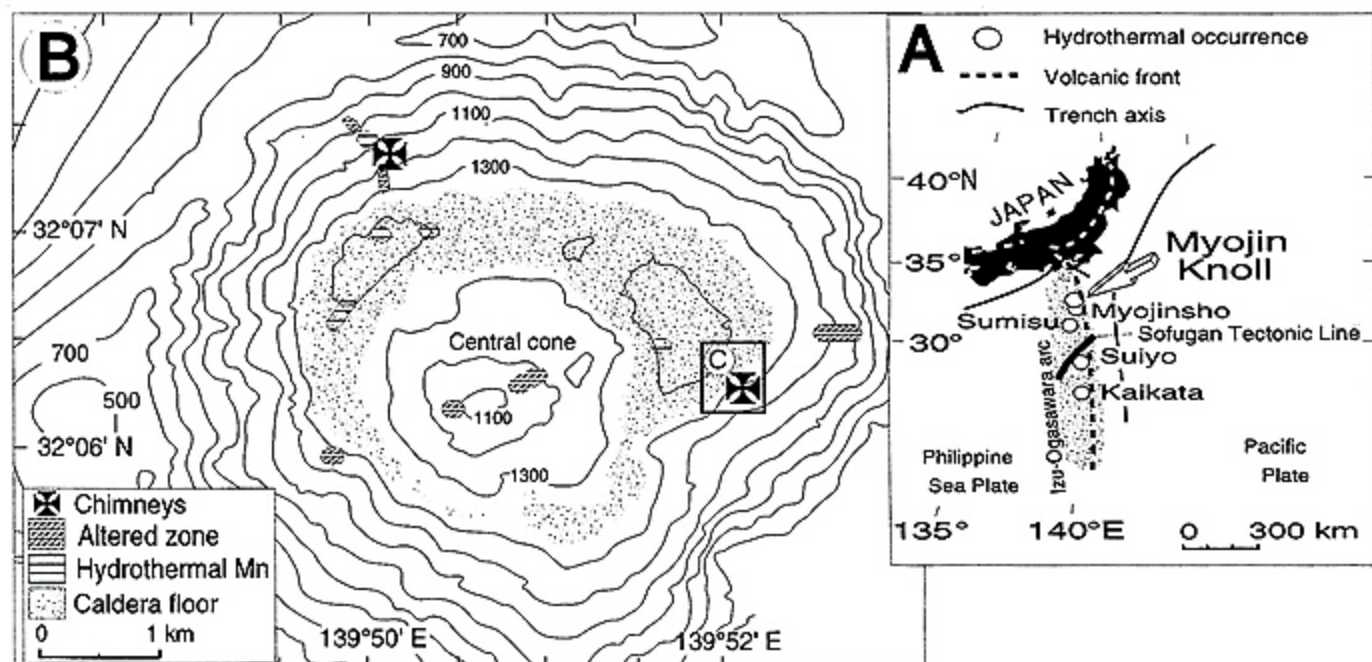


図1 A: 明神海丘カルデラ位置図及び伊豆・小笠原弧における熱水沈殿物の発見位置。B: 明神海丘カルデラにおける硫化物チムニー、熱水性マンガン沈殿物及び熱水変質による粘土化帯の分布。図中のCは図2に拡大して示す。水深はmを示す。明神海丘海底カルデラ: Iizasa et al. (1992), スミスリフト: Urabe and Kusakabe (1990), 水曜海山: 春日・加藤 (1992), 海形カルデラ: Usui et al. (1986); Urabe et al. (1987)。

Fig.1 Location of marine hydrothermal deposits around the Izu - Ogasawara arc (A). Bathymetric map (100 - m isodepths) of the Myojin knoll caldera, showing hydrothermal mineralization and other features in the caldera. Inset "c" shows in Fig.2 the location of the sulfide mound discovered by "Shinkai 2000". Myojinsho submarine caldera: Iizasa et al. (1992), Sumisu rift: Urabe and Kusakabe (1990), Suiyo seamount: Kasuga and Kato (1992), Kaikata seamount: Usui et al. (1986); Urabe et al. (1987)。

りその水深は約1,400mであり、その一部に陥没地形が見られる。Sunrise 鉱床のカルデラ壁の下部には、階段状の地形が存在しており、カルデラ壁下部の傾斜がその他のカルデラ壁に比べて緩い傾向にある。

明神海丘カルデラは、 SiO_2 (71 wt%以上) に富みまた著しく K_2O (0.86 wt%以下) が低い流紋岩や同質の軽石及び凝灰岩を主体にする (湯浅・村上, 1989; Yuasa et al., 1991; 湯浅, 1995; Iizasa et al., 1997)。カルデラ壁上部は軽石堆積物から、また、カルデラ壁下部は、カルデラ西部や中央火口丘に見られる流紋岩溶岩とカルデラ東部に存在する凝灰角礫岩や凝灰岩から構成されている。Sunrise 鉱床の北東約1kmの東部のカルデラ壁の水深1,200~960mの間には、流紋岩質の凝灰岩層を挟む白色に変質した凝灰角礫岩層が存在する。この白色変質帯の上部及び下部の境界は鮮明ではないがその上位には層状及びマンガンの被覆を受けた角礫状の露岩域及び砂泥質層が分布している。この変質帯は、セリサイト成分に富むセリサイト-モンモリロナイト混合層鉱物、緑泥石、石英、磁鉄鉱、燐灰石及び約5wt%以上の硫化物

(方鉛鉱, 黄銅鉱, 閃亜鉛鉱, 黄鉄鉱, 銅藍, 輝銀鉱), 白鉛鉱, 重晶石やルチルを含んでいる (飯笹ほか, 1995)。このセリサイト-モンモリロナイト混合層鉱物は、Sunrise 鉱床の北西端において採取された鉱染状硫化物が含まれる変質凝灰岩中にも見られる (Iizasa et al., 1997)。また、北西部, 南西部のカルデラ壁そして中央火口丘の北東部及び南西部にも小規模な白色変質帯が存在している。カルデラ床堆積物は主に流紋岩質軽石及び火山砂から構成されている。カルデラ床の東部及び北西部では、マンガクラストや不規則な形をした非晶質マンガン水酸化物の沈殿物が堆積物表層に分布している (飯笹ほか, 1995)。東部のカルデラ床には、大きき数mの巨礫が点在している。

3. 硫化物試料の産状・分布

1997年6月の潜航調査結果

カルデラ床東部の Sunrise 鉱床における大小の乾立した長柱状, 尖塔状及び倒壊した硫化物チムニー群は、カルデラ床が緩く登り傾斜になるところからカルデラ壁下

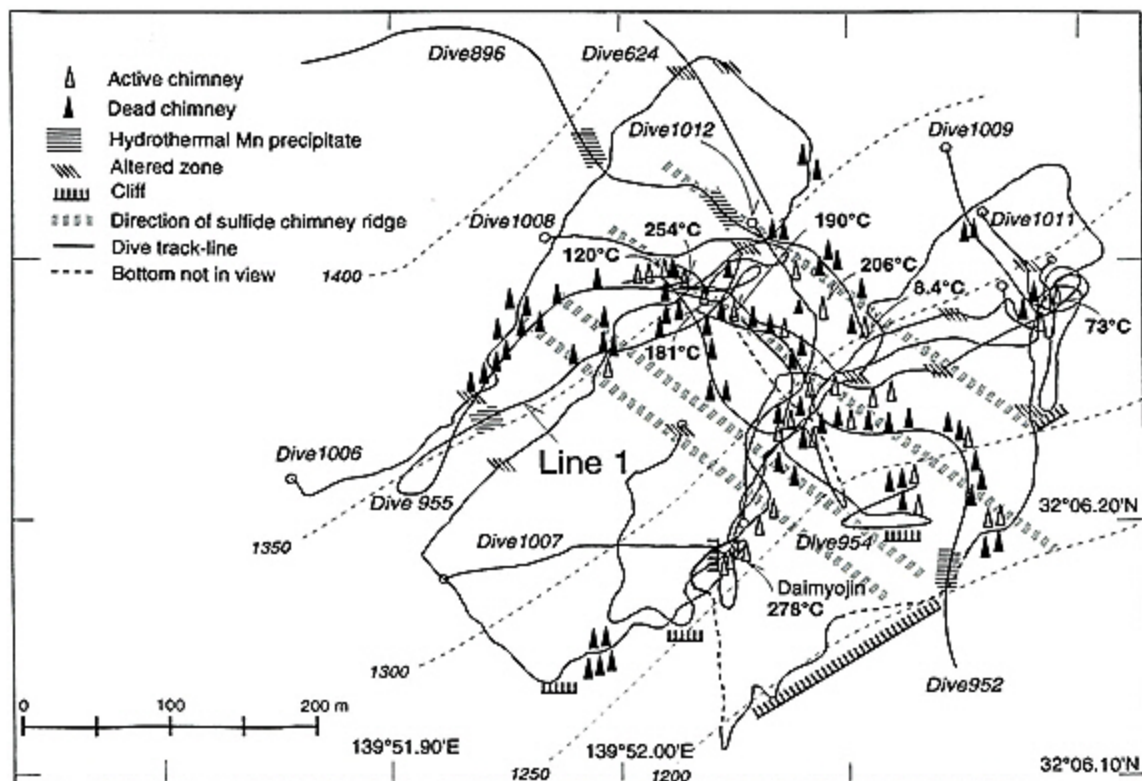


図2 明神海丘カルデラ床東部のSunrise鉱床における「しんかい2000」による航跡に沿う硫化物チムニー、熱水性マンガン沈殿物、変色帯の分布及び測定された熱水の温度、第952,954及び955潜航は1997年6月に行ったものであり、丸印のついた航跡は1998年5月に実施されたものである。

Fig.2 Track-lines of dive 624 in 1992, dive 896 in 1996, dives 952, 954 and 955 in 1997, and others in 1988 surveyed by "Shinkai 2000" and distribution of chimneys, hydrothermal Mn precipitates and other features.

部にわたって、北西-南東方向に延びる4本の海嶺状の地形として分布している(図2)。このチムニー群は、1,350m付近の等深線沿いにおける産状から、全体として幅約250m、高さ約30mのひとつの巨大なマウンド地形上に存在している(図3)。硫化物チムニー群によって形成される海嶺のひとつは、カルデラ床の水深1,370mから現れ、1,220mのカルデラ壁下部まで少なくとも400m以上連続して分布している。この海嶺状を示すチムニー群は、カルデラ床に最も近い所では幅およそ2~3m高さ1mの小マウンド状を示し、高さ数十cmほどのチムニーを数本伴っている(写真1)。一方、同じ海嶺上の1,250m付近では海嶺の幅が20m以上に広がり、高さも15m以上に巨大化した多数のチムニーの下部が結合して巨大な壁を形成している。各海嶺間の谷は角礫状塊状硫化物、熱水性マンガン酸化物及び砂泥質堆積物により被われている。海嶺上の各チムニー群は小規模のマウンド地形を示す。このマウンドは、その中心部にチムニーを、その周辺部に倒壊したチムニー、角礫状硫化物や自然硫黄などの熱水沈殿物を伴っている。また、硫化物チ

ムニー群の中には、チムニーを伴うマウンド地形の一部に亀裂が入り片側が崩れ落ち、そのマウンド断面には、シリカや軽石を伴う層と硫化物層から構成された層状硫化物とその下部の角礫状の塊状硫化物との堆積構造が見られる。

チムニー群の多くは、すでに活動を停止しているが、挿らぎや最高254度の灰色の熱水を噴出するチムニーもある。活動的なチムニーは、その周囲に噴出した熱水から降下した微粒の熱水沈殿物を多量に伴っている。また、挿らぎの観察されるチムニーには、シンカイヒバリガイ、ユノハナガニや巻き貝などの熱水生物群集が多数棲息している。

カルデラ床東部では厚さ1cmのマンガンクラスト及び高さ10cm程のマンガンチムニーが、そして、カルデラ北西部壁の中腹の水深1,196m及び1,091m付近の階段状の地形を示すところには、倒壊したチムニー及び重晶石を多量に含む灰白色凝灰角礫岩が分布している。これらは、Sunrise鉱床に存在する北西-南東方向を持つ4本の海嶺状チムニー群のそれぞれ700m及び3.5kmの北西延

長部に位置する。この北西延長部の熱水沈殿物の分布やSunrise鉱床に見られる4本の海嶺状のチムニー群の走向は、明神海丘より北部に位置する火山フロント上の火山に見られる北西-南東方向の火口配列から想定される圧縮の方向（中村, 1969; Takada et al., 1992; Suga, 1998）と調和的であることから、これらの火山に作用しているのと同様のテクトニックな力が明神海丘にも働いている可能性があることを示唆している。

明神海丘のカルデラ床東部に発見された硫化物マウンズの規模は、現世の背弧海盆(Fouquet et al., 1993a; Halbach et al., 1993)や中央海嶺(Rona and Scott, 1993)における硫化物鉱床の最大級のものに匹敵する。

1998年5月の潜航調査結果

昨年の潜航調査により発見されたカルデラ床東部のSunrise鉱床の精密調査に6潜航及び1996年の潜航調査の際に採取した重晶石や硫化物を含む凝灰角礫岩の存在する北西部カルデラ壁における調査に1潜航を割り当て実施した。その結果、東部においては、昨年より高温の278度に達するブラックスモークを噴出するおよそ30mにも達する巨大チムニー（大明神）及びその他多数のチムニーを発見した。これらチムニーの周辺には、昨年と同様にユノハナガニ、シチヨウシンカイヒバリガイやシンカイコシオリエビなどの生物が多数確認された。また、北西部カルデラ壁においては、透明な熱水を噴出する硫酸塩チムニーを発見し、その周辺の熱水温度は78度を記録した。ここでは、主に、東部における調査結果について述べる。

大明神は、Sunrise鉱床の南東部の水深1,252mに位置する2本の小規模のチムニーを乗せているひとつの巨大チムニーである。ひとつの小規模チムニーは、その先端の四ヶ所から278度に達するブラックスモークを噴出している。大明神の中腹部には、高さ2mほどのデッドチムニーが分布している。大明神の基部の南側はオーバーハングしており、その天井部に揺らぎが見られた。その部分には、シチヨウシンカイヒバリガイ・ユノハナガニが高密度に分布していた。採取した試料は、黄銅鉱と硬石膏に富んでいた。

硫化物チムニーの分布は、昨年得られた結果よりさらに大きな広がりを示し、少なくとも400m×400mの範囲に高さ30mを越すマウンド状の熱水地帯であることが判明した。硫化物チムニーを伴う小マウンドが海嶺状にほぼ北西-南東方向に配列していること、また、ほぼ同方向の亀裂がマウンド上に存在しその一部が崩

落してマウンドの断面が現れていることなども、昨年観察された事実と一致する。

昨年と今年の結果を総合すると、チムニーで測定された熱水温度が200度を越える地域がカルデラ壁の下部と麓の2ヶ所に存在することが明らかになった。

4. 採取した硫化物チムニーの鉱物組成

これまで明神海丘カルデラ内から採取した試料は、その外観の特徴から、硫化物を多量に含む空隙の顕著な黒灰色のチムニー、黒色塊状及び黒灰色層状硫化物、そして、灰白色鉱染状凝灰角礫岩に分けることができる。ここでは、1997年6月の潜航調査の際に、Sunrise鉱床において採取された硫化物チムニーについて記述する。採取した硫化物チムニーは、灰色の熱水を噴出する活動的なもの、揺らぎを示しているもの及びすでに活動を停止してしまったものである。

水深1,340mに産する190度の灰色の熱水を噴出している高さ約50cmの活動的な硫化物チムニーの上部35cmを採取した。この試料の下部の熱水の通路にあたる部分は、2~3mm以下の黄銅鉱結晶の集合体からなり、チムニー上部に向かうにつれてその結晶が小さくなる傾向を示している（写真2）。この黄銅鉱とともに銀を含む半自形の四面銅鉱や砒四面銅鉱がわずかであるが産する。チムニー中心部の熱水の通路からチムニーの外側に向かって、数mmの結晶を伴う硬石膏がチムニーを取りまき、海水に接する部分は、細粒の閃亜鉛鉱及び硬石膏結晶から構成されている。噴出した熱水から降下した黒色や灰白色の沈殿物がチムニーの外側に堆積していることから、チムニーの最外層の一部は、降下した熱水鉱物によって形成されている可能性が考えられる。

揺らぎの見える数mの高さの硫化物チムニーの上部60cm程をカルデラ壁下部の水深1,280mにおいて採取した（写真2）。このチムニーの先端部の熱水噴出口はすでに閉じており、チムニーの外側には白色の殻を持つゴカイ類が棲息していた。このチムニーを構成する主要鉱物は、細粒の閃亜鉛鉱である。チムニーの先端から約50~60cm下部のチムニー内の熱水の通路には、1mm以下の細粒の黄銅鉱結晶集合体が産し、それより上部には存在していない。チムニー先端から黄銅鉱が沈殿している間の熱水の通路には、閃亜鉛鉱が晶出している。この閃亜鉛鉱上には、球状シリカ、重晶石、ヨルダナイト、ウルツ鉱、方鉛鉱、自然砒素、鶏冠石、石黄、自然硫黄が様々な割合で沈殿している。一方、チムニーを黄銅鉱を含む部分で輪切りにしたときの鉱物の分布は、熱水の通

路から外側に向かって半自形から自形の黄銅鉱と四面銅鉱-砒四面銅鉱，コロフォーム状の方鉛鉱や黄銅鉱を含むコラム状や樹枝状組織の閃亜鉛鉱，ベレット状や他形から半自形の黄鉄鉱そして他形から半自形の方鉛鉱である。

活動を停止した硫化物チムニー試料の大部分は，主要鉱物の閃亜鉛鉱，少量の非品質シリカ，方鉛鉱，重晶石や砒素化合物から構成されており，熱水の通路はすでに閉じて明らかでないものや，通路が確認できるものでも活動的なチムニーに比べてより細くなっている。また，熱水の通路が確認されるチムニー試料には，その通路内壁上に少量の黄銅鉱が産することもある。

5. 明神海丘産硫化物及びその他の火山性硫化物の化学組成の比較

明神海丘カルデラにおいて，これまでに採取した11本のチムニー，2塊状，2鉱染状及び1層状硫化物の代表的な部分の44試料について，中性子放射化分析 (Au, Ag, As, Sb, Fe, Ba) 及びICP分析 (Cd, Cu, Pb, Zn, SiO₂) を実施した。表1には，そのうちの18分析値及び全体の平均値について示してある。

硫化物チムニー中の閃亜鉛鉱を主要構成鉱物とする部分の金含有量は，ほとんどの試料が高い値を示し最高値49ppmである。チムニーのその他の化学組成は，銀（最高3,400ppm），砒素（最高1.9wt%），アンチモン（最高

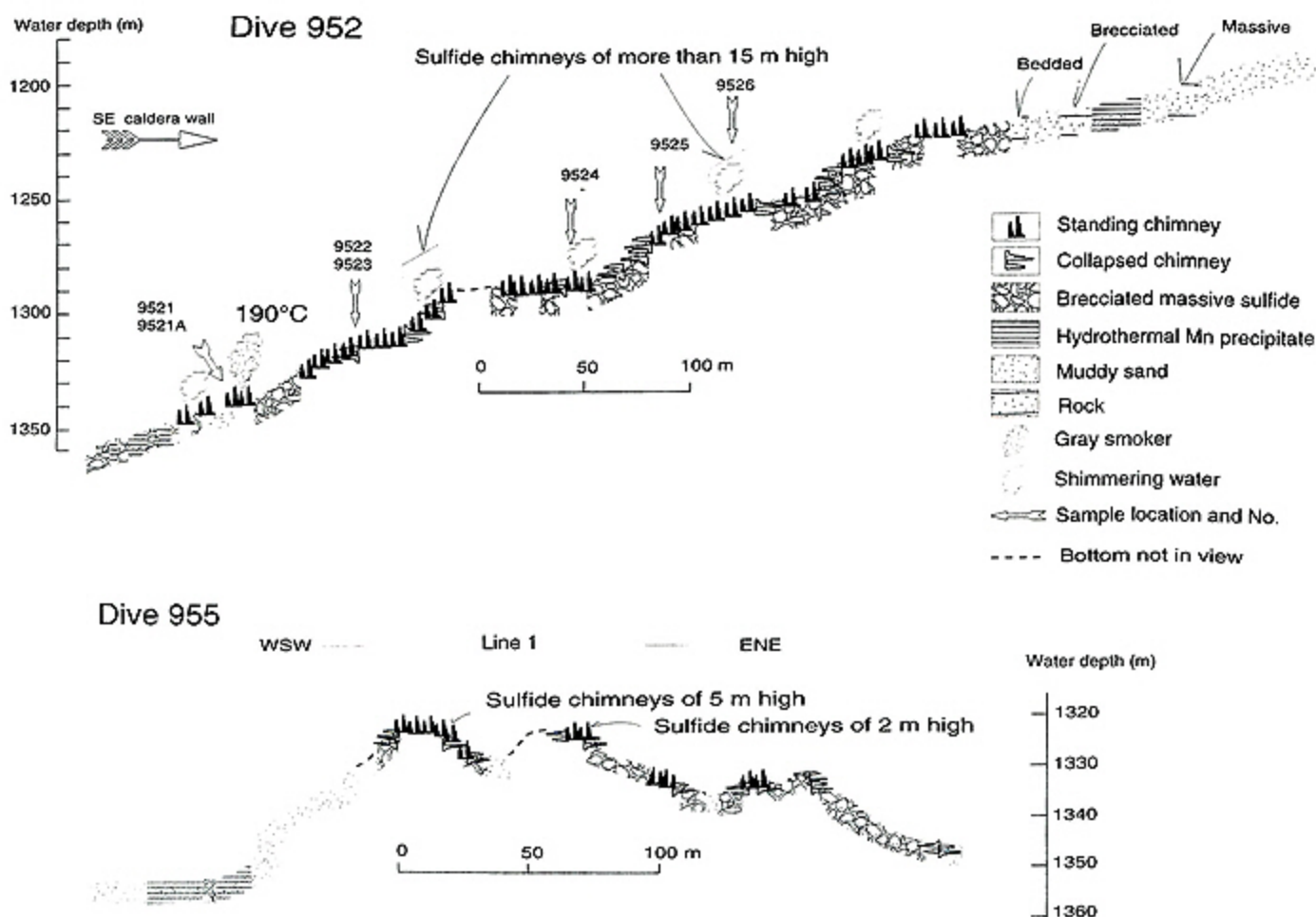


図3 明神海丘カルデラ床東部の Sunrise 鉱床における第952及び第955潜航の航跡上の表層地質。

Fig.3 Surface geology along track - lines of dives 952 and 955 in the Sunrise deposit. Dive 952 shows surface geology on a sulfide ridge occurring from the floor to the lower wall of the eastern part of the Myojin knoll caldera. Line 1 of dive 955 indicates surface geology along the isobath of about 1,350 m.

2. 8wt%), カドミウム (最高8,930ppm), 亜鉛 (最高52wt%), 鉛 (最高11wt.%) に富むことを示し, 明らかにその他の試料の値より高くなっている. チムニー内の熱水の通路内壁の黄銅鉱を主要構成鉱物とする部分の金, 銀, 砒素, アンチモン, カドミウム濃度は, 閃亜鉛鉱を主体にするその他のチムニー部分のそれよりはるかに低い傾向にある. 角礫状硫化物及び層状硫化物は, 銅 (最高25wt%), 鉄 (最高37wt%) シリカ (最高17wt.%) に富んでいる. 鉱染状硫化物は, 少量の亜鉛や鉄を伴いながらシリカ (最高45wt.%), バリウム (最高46wt%), 銀 (最高4,530ppm) に富んでいる.

金含有量は, 硫化物チムニー, 鉱染状硫化物及び塊状硫化物の順に低下する傾向にある. 銀含有量に関しても同様の傾向が見られるが, 一部の鉱染状硫化物中の銀量は最大4,530ppmを示している. シリカはチムニー内部では少なく, 塊状, 層状及び鉱染状硫化物やチムニーの最外層部に十数パーセントから最高49wt%と様々な割合で含まれている. バリウムは, 鉱染状, チムニー, そして塊状及び層状硫化物の順に低下する.

明神海丘カルデラにおいて採取した硫化物試料の化学組成の44分析値の相関係数は, 金-亜鉛と砒素-アンチモンの組み合わせが0.9, そして, 金-カドミウムと亜鉛-カドミウムが0.7の高い値を示している. 東部カルデラ壁から3.5km程離れた北西部のカルデラ壁において採取した重晶石に富む灰白色凝灰角礫岩の3分析値を除くと, カルデラ東部の硫化物試料の金-銀の相関(0.8)はかなり高くなる. 特に, 金を含む鉱物は, 光学顕微鏡やSEMでは確認されていないことと金-亜鉛の相関が著しく良いことから, 金は閃亜鉛鉱中に微粒子として存在するか閃亜鉛鉱の格子中に取り込まれている可能性が示唆される.

海洋性島弧, 背弧海盆, 中央海嶺における火山性硫化物の金・銀・銅・鉛・亜鉛・鉄の平均化学組成の比較から, 明神海丘の熱水活動の特徴の一部が明らかになった(表2). 伊豆・小笠原弧北部の明神海丘産試料の銅・亜鉛・鉄含有量は, 同弧南部の水曜海山に比べて銅含有量が少なく中央海嶺の試料より亜鉛が多く, むしろラウ背弧海盆産試料に近いことを示している. 島弧及び背弧海盆産の試料は, 中央海嶺産のものに比べて金・銀・鉛に富む傾向にある. 特に, 前者の中でも明神海丘産の金含有量は, 伊豆・小笠原弧南部の水曜海山産のものに次いで多いことを示している. 一方, 明神海丘産の銀及び鉛含有量は沖縄トラフ産の試料の次に多く, 水曜海山産のものよりはるかに高い値を示している. 特に, 同じ火山

フロント上の明神海丘と水曜海山に関して, このような銀や鉛含有量に違いを生じているのは, Hutchinson (1973)が地殻の進化に伴う火山性硫化物鉱床中の金属含有量や鉱物種の違いを指摘したように, 島弧北部の明神海丘の硫化物は, 島弧南部の水曜海山より地殻が厚いところに生じたことが一因とも考えられる.

6. 熱水化学組成の地球化学的特徴 (1998年5月の潜航結果)

熱水試料の採取は, 1998年の5回の潜航で行われた(1997年の潜航では採水器不調のため試料が得られなかった). 試料の採取は主に多連回転バルブ式ポンプ採水器(酒井ほか, 1990)を用いた. 大明神は熱水噴出がその頂部付近でしか見られないことから試料採取は困難を極めたが, 第1012潜航で「しんかい2000」の前頭部をチムニーに押し付けるアクロバティックな作業を行うことで, ここからきわめて質の高い試料を得ることができた.

分析結果の一例を示すために, 採取された試料についてCa濃度とMg濃度をプロットしたのが図4である. 一般に高温熱水はMg濃度が0になることから, 採取された試料の分析値をこのようにプロットするとある一直線上にならぶ. この直線は熱水と海水の混合直線であり, そのY切片から熱水端成分(海水を全く含まない熱水)の化学組成を知ることができる. 図4を見るとあきらかに, 今回採取されたすべての試料の分析値は一本の直線のまわりにほぼ集まっており, 一つの熱水端成分で明神海丘の熱水の化学組成を代表することができる. 採水は熱水地帯のあちこちで行っており, 特にカルデラ北西壁のMk#10-2は遠く離れた場所であるにもかかわらず, 熱水化学組成が同じであるという結果は興味深い.

この明神海丘の熱水端成分の組成を, 同じ伊豆小笠原弧の水曜海山で見ついている熱水系のそれ(石橋ほか, 1994)と比べたのが図5である. ここでは主成分のうち, アニオンの代表としてCl濃度をX軸にカチオンの代表としてCa濃度をY軸にとって, プロットした. 明神海丘の熱水組成(●印)は水曜海山の熱水組成(○印)とともに, 中央海嶺の熱水(+印)のトレンドとはあきらかに一致しない. 両者の熱水は, 同じCl濃度で比べた時に中央海嶺のものに比べてCa濃度が高いのが特徴的である. 伊豆小笠原弧で見つかった2つの熱水系の熱水化学組成が似た特徴を示すという結果は興味深く, 熱水の化学組成が何によって支配されているのかという大きな問題を解く手がかりとなることが期待できる.

表1 明神海丘カルデラ産硫化物試料の化学組成

Table 1 Chemical composition of representative hydrothermal sulfide samples from Myojin knoll caldera

	Au* (ppm)	Ag* (ppm)	As* (ppm)	Sb* (ppm)	Cd† (ppm)	Cu† (%)	Pb† (%)	Zn† (%)	Fe* (%)	Ba* (%)	SiO ₂ † (%)
Sulfide chimney											
<i>conduit wall (chalcopyrite-rich)</i>											
95213	2.0	110	580	36	8	30.70	0.08	0.33	25.20	0.05	0.10
<i>conduit wall (sphalerite-rich)</i>											
8964C	23.0	3400	19000	28000	8930	6.49	7.06	22.00	2.50	3.80	2.32
95231	49.0	1700	6500	6800	6040	8.55	1.56	37.10	8.82	1.50	2.47
95232	48.0	990	2600	3500	5650	2.88	0.91	52.10	4.65	0.50	3.04
9541	38.0	2300	2900	4100	2480	1.26	7.94	38.20	9.47	1.50	0.31
<i>massive interior (sphalerite-rich)</i>											
9521A2	30.0	2400	3100	4000	3020	2.51	7.12	38.3	8.37	<0.02	4.18
95244	36.0	2000	5500	4400	2170	0.98	3.42	42.10	7.44	3.40	0.91
9525	38.0	2100	9800	4700	1610	0.83	4.30	34.80	7.28	8.70	0.51
9552	38.0	2600	2300	4200	1250	0.66	11.00	33.30	2.84	2.50	1.63
<i>rim (sphalerite-rich)</i>											
95211	25.0	770	3200	1500	2080	3.55	1.24	31.20	12.10	3.90	1.29
95243	30.0	2100	6300	3000	1290	0.56	5.23	34.70	12.00	1.90	0.29
<i>rim (anhydrite-rich)</i>											
95212	3.5	180	1300	380	102	0.29	0.87	3.79	3.42	8.50	0.33
<i>rim (silica-rich)</i>											
9551	2.9	36	1800	210	28	0.12	1.42	1.36	0.99	9.90	49.40
Layered sulfide											
9522	0.8	100	330	65	145	24.60	0.03	1.77	21.20	0.70	16.00
Brecciated massive sulfide											
8963L1	1.0	<5	170	26	89	0.14	0.01	1.40	37.40	0.84	17.40
89651	3.2	54	1200	140	4	11.40	0.04	0.77	27.30	0.20	16.70
Disseminated sulfide											
624-3	3.3	82	2200	400	495	0.81	0.46	10.20	6.30	5.10	44.94
89242	1.3	4530	550	850	14	0.10	0.14	0.30	2.07	45.20	9.68
average (N= 44)	18.4	1088	4477	3120	1857	5.62	2.09	20.33	12.76	6.13	9.63

Element determinations on dry basis were carried out by * = instrumental neutron activation analysis and † = inductively coupled plasma emission analysis (X-ray Assay Laboratories, Canada). N = number of samples analysed.

表2 海洋性島弧産、背弧海盆産及び中央海嶺産硫化物の平均化学組成の比較

Table 2 Average chemical compositions of sulfide samples from island-arc, back-arc basin and

	Au	Ag	Cu	Fe	Zn	Pb	Remarks
	(p.p.m.)	(p.p.m.)	(wt. %)	(wt. %)	(wt. %)	(wt. %)	
Island-arc (Izu-Ogasawara arc)							
Myojin knoll (N= 44)	18.4	1088	5.6	12.8	20.3	2.09	this study
Suiyo seamount (N= 16)	24.3	181	12.5	16.6	19.2	0.62	ref 1, 2
Back-arc basin							
Izena cauldron (N= 31)	3.9	1823	4.2	6.6	22.3	11.84	ref 3-7
Lau (N= 64)	2.7	194	5.8	10.8	20.9	0.42	ref 8, 9
Oceanic ridge							
TAG (N= 85)	4.0	59	11.2	27.1	5.5	0.03	ref 10-12
Snake Pit (N= 44)	1.7	73	7.9	36.5	5.2	0.04	ref 13, 14
Explorer (N= 48)	0.8	124	3.4	26.8	5.0	0.11	ref 14
Axial Seamount (N= 18)	4.2	188	0.3	4.9	18.9	0.36	ref 14, 15
EPR13°N (N= 41)	0.4	46	7.3	26.3	7.8	0.05	ref 16, 17
Galapagos (N= 17)	0.08	17	4.7	28.7	0.8	0.01	ref 18

ref 1= 渡辺・梶村 (1993), ref 2= 渡辺・梶村 (1994), ref 3= Halbach et al. (1989),

ref 4= 青木・中村 (1989), ref 5= Halbach et al. (1993), ref 6= 中村ほか (1990)

ref 7= 浦辺 (1989), ref 8= Fouquet et al. (1993a), ref 9= Herzig et al. (1993), ref 10= Hannington et al. (1988),

ref 11= Rona et al. (1986), ref 12= Rona et al. (1993), ref 13= Fouquet et al. (1993b),

ref 14= Hannington et al. (1991), ref 15= Canadian American Seamount Expedition (1985),

ref 16= Fouquet et al. (1988), ref 17= Hekinian and Fouquet (1985), ref 18= Embley et al. (1988)

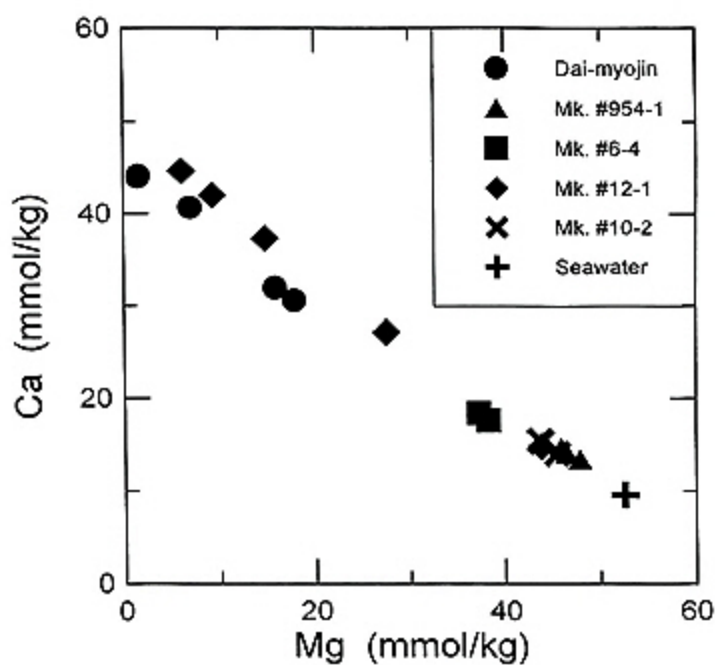


図4 明神海丘で採取された熱水試料のCa濃度とMg濃度
 Fig. 4 Ca - Mg plot for the samples collected from the Myojin Knoll.

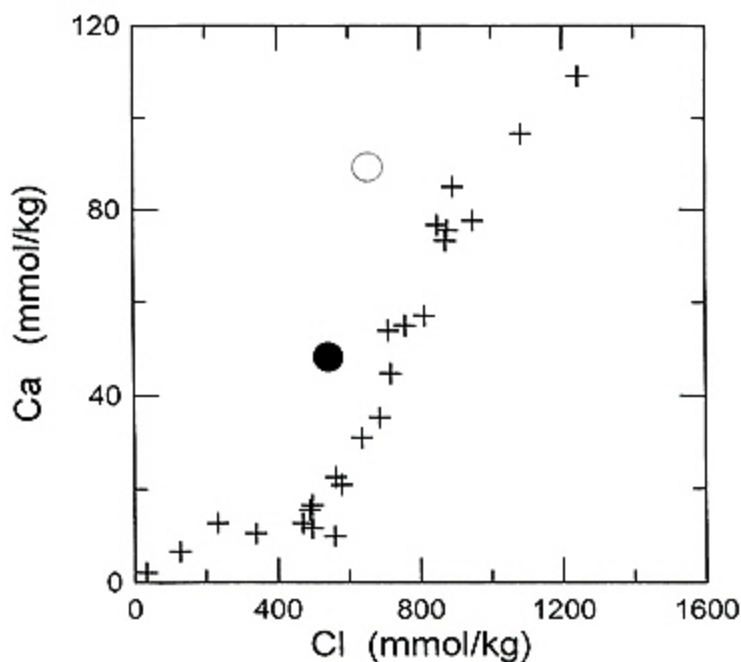


図5 伊豆小笠原弧の熱水系と中央海嶺の熱水系における熱水化学組成の比較
 Fig.5 Comparison of fluid chemistry between Izu - Bonin Arc and mid - oceanic ridge. Solid circle : Myojin Knoll (this study) .open circle : Suiyo SeaMt. (Ishibashi et al.,1994) .cross : mid - oceanic ridge (compiled data by Von Damm,1995) .

7. おわりに

流紋岩質の明神海丘カルデラの東部における硫化物チムニー及び塊状硫化物を伴う巨大熱水鉱床の発見は、中央海嶺や背弧海盆とは異なるテクトニックセッティングの火山フロントでは初めてである。この熱水鉱床は、その規模がすくなくとも幅約400m長さ400m高さ30m以上のマウンド地形を示し、多数の硫化物チムニー、塊状硫化物や熱水生物を伴っている。マウンド上の、278度のブラックスモークを噴出するチムニーの高さは30mにも達する。この鉱床の規模は、中央海嶺や背弧海盆に知られている最大級の硫化物鉱床に匹敵する。しかも、ここで得られた試料は、銅・鉛・亜鉛・鉄・バリウムを伴い金・銀の値が現世の海洋底に発見された硫化物の中でも高いことを示し、特に、金含有量は、背弧海盆や中央海嶺産硫化物のそれよりはるかに多く、銀や鉛含有量は、沖縄トラフの伊是名海穴産のものに次いで多いことが明らかになった。

明神海丘カルデラにおいて、これまで得られた試料の鉱物組成の特徴及び産状は、沖縄トラフに発見された現世の黒鉱型鉱床と同様に第三紀中新世に形成された黒鉱鉱床に類似する点が多いことを示している。

カルデラ東部のSunrise 鉱床とカルデラ北西壁のMk#10-2は遠く離れた場所であるにもかかわらず、熱水化学組成が同じであることを示している。また、同じ島弧上の明神海丘と水曜海山の2つの熱水系の熱水化学組成は似た特徴を示す。

明神海丘カルデラにおける巨大硫化物鉱床の発見は、伊豆・小笠原弧北部に分布するその他の海底カルデラにも、明神海丘カルデラの硫化物鉱床に匹敵するものが存在する可能性を示唆している。

謝 辞

「しんかい2000」運航チームならびに母船「なつしま」の乗組員の方々に大変お世話になった。以上の方々に、ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- 青木正博・中村光一(1989) : 伊是名海穴、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.
- Canadian American Seamount Expedition (1985) : Hydrothermal vents on an axis seamount of the Juan de Fuca ridge, *Nature*, 313, 212-214.

Embley, R.W., I.R. Jonasson, M.R. Perfit, J.M. Franklin, M.A. Tivey, A. Malahoff, M.F. Smith and T.J.G. Francis (1988) : Submersible investigation of an extinct hydrothermal system on the Galapagos ridge : Sulfide mound, stockwork zone, and differentiated lavas. *Canadian Mineral.*, 26, 517-539.

Fouquet, Y., G. Auclair, P. Cambon and E. Etoubleau (1988) : Geological setting and mineralogical and geochemical investigations on sulfide deposits near 13°N on the East Pacific Rise. *Mar. Geol.*, 84, 145-178.

Fouquet, Y., von U. Stackelberg, J.L. Charlou, J. Erzinger, P. M. Herzig, R. Muhe and M. Wiedicke (1993a) : Metallogenesis in back-arc environments : The Lau basin example. *Econ. Geol.*, 88, 2154-2181.

Fouquet, E., A. Wafik, P. Cambon, C. Mevel, G. Meyer and P. Gente (1993b) : Tectonic setting and mineralogical and geochemical zonation in the Snake Pit sulfide deposit (Mid-Atlantic Ridge at 23°N). *Econ. Geol.* 88, 2018-2036.

Francheteau, J., H.D. Needham, P. Choukroune, T. Juteau, M. Seguret, R.D. Ballard, P.J. Fox, W. Normark, A. Carranza, D. Cordoba, J. Guerrero, C. Rangin, H. Bougault, P. Cambon and R. Hekinian (1979) : Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, 277, 523-528.

藤岡換太郎(1983) : 黒鉱鉱床はどこで形成されたか、*鉱山地質特別号*, 11, 55-68.

Halbach, P., K. Nakamura, M. Wahsner, J. Lange, H. Sakai, L. Kaselitz, R.-D. Hansen, M. Yamano, J. Post, B. Prause, R., W. Seifert, W. Michaelis, F. Teichmann, M. Kinoshita, A. Marten, J. Ishibashi, S. Cerwinski and N. Blum (1989) : Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, 338 : 496-499.

Halbach, P., F. Pracejus and A. Marten (1993) : Geology and mineralogy of massive sulfidated ores from the central Okinawa trough, Japan. *Econ. Geol.*, 88, 2210-2225.

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. Geol.*, 101, 217-248.

Hannington, M.D., G. Thompson, P.A. Rona and S.D. Scott

- (1988) : Gold and native copper in supergene sulphides from the Mid-Atlantic ridge, *Nature*, 333, 64-66.
- Hekinian, H. and Y. Fouquet (1985) : Volcanism and metallogenesis of axial and off-axial structures on the East Pacific Rise near 13°N. *Eon. Geol.*, 80, 221-249.
- Herzig, P.M., M.D. Hannington, Y. Fouquet, U.V. Stackelberg and S. Petersen (1993) : Gold-rich poly-metallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the southwest Pacific. *Eon. Geol.*, 88, 2182-2209.
- Hutchinson, R.W. (1973) : Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Eon. Geol.*, 68, 1223-1246.
- Iizasa, K. (1993) : Petrographic investigations of seafloor sediments from the Kita-Bayonnaise submarine caldera, Shichito-Iwojima Ridge, Izu-Ogasawara arc, northwestern Pacific. *Mar. Geol.*, 112, 271-290.
- Iizasa, K. (1995) : Geochemical assessment on hydrothermal contribution to floor sediments from the Kita-Bayonnaise submarine caldera, Izu-Ogasawara arc, northwestern Pacific. *Mar. Georesources Geotechnology*, 13, 339-355.
- 飯笹幸吉・R.S. Fiske・仲二郎・角皆潤 (1995) : 明神海丘 (北ベヨネース海底カルデラ) の熱水活動に伴う鉱化作用. *JAMSTEC 深海研究*, 11, 341-350.
- 飯笹幸吉・仲二郎・湯浅真人・リチャードフィスケ (1997) : 明神海丘カルデラにおける硫化物チムニーを伴う熱水活動. *JAMSTEC 深海研究*.
- Iizasa, K., S. Terashima, M. Sasaki and K. Marumo (1997) : Volcanic-hosted sulfide-barite deposit from the Kita-Bayonnaise submarine caldera, Izu-Ogasawara arc, northwestern Pacific. *Mar. Georesources Geotechnology*, 15, 1-20.
- Iizasa, K., M. Yuasa and S. Yokota (1992) : Mineralogy and geochemistry of volcanogenic sulfides from the Myojinsho submarine caldera, the Schichito-Iwojima ridge, Izu-Ogasawara arc, northwestern Pacific. *Mar. Geol.*, 108, 39-58.
- 石橋純一郎・下島公紀 (1992) : 椅子・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*, 14 (8), 489-492.
- 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 (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, 89-98.
- 春日茂・加藤幸弘 (1992) : 水曜海山の火口底で発見された海底熱水性鉱床. *月刊地球*, 14, 484-488.
- 村上文敏・石原丈実 (1985) : 小笠原島弧北部で発見された海底カルデラ. *月刊地球*, 7, 638-646.
- 中村一明 (1969) : 広域応力場を反映した火山帯の構造. *火山*, 14, 8-20.
- 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.
- Rona, P.A., M.D. Hannington, C.V. Raman, G. Thompson, M.K. Tivey, S.E. Humphris, C. Lalou and S. Petersen (1993) : Active and relict sea-floor hydrothermal mineralization at the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic ridge. *Eon. Geol.*, 88, 1989-2017.
- Rona, P.A., G. Klinkhamme, T.A. Nelsen, J.H. Trefry and H. Elderfield (1986) : Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic ridge. *Nature*, 321, 33-37.
- Rona, P.A. and S.D. Scott (1993) : A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization: new perspectives, Preface. *Eon. Geol.*, 88, 1935-1976.
- 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, 柳沢文孝, 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, 6, 69-85.
- Sillitoe, R.H. (1982) : Extensional habitats of rhyolite-hosted massive sulfide deposits. *Geology*, 10, 403-407.
- Suga, K. (1998) The evolution process and its characteristics in the Hachijojima volcanic group, Izu-Bonin Arc. *The Quaternary Research*, vol. 37, no. 1, 59-76.
- Takada, A., Oshima, O., Aramaki, S., Ono, K., Yoshida, T. and Kajima, K. (1992) : Geology of Aogashima volcano, Izu Islands, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 37, 233-250.
- 玉木賢策・井上英二・湯浅真人・棚橋学・本座栄

- (1981) : 小笠原弧の第四紀背弧拡大活動の可能性について.地球,3,421-432.
- 角皆潤・石橋純一郎・脇田宏・蒲生俊敬・飯笹幸吉・R.S.Fiske・仲二郎 (1995) : 伊豆・小笠原弧,北ベヨネーズ海底カルデラの熱水活動.JAMSTEC 深海研究,11,333-339.
- 浦部徹郎 (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.
- Urabe,T.and M.Kusakabe (1990) : Barite silica chimneys from the Sumisu rift,Izu-Bonin arc : possible analog to hematitic chert associated with Kuroko deposits. Earth Planet.Sci.Lett.,100,283-290.
- Urabe,T., M.Yuasa, S.Nakao and on-board scientists (1987) : Hydrothermal sulfides from a submarine caldera in the Shichito-Iwojima ridge,northwestern Pacific.Mar.Geol.,74,295-299.
- Usui,A., M.Yuasa, S.Yokota, M.Nohara, A.Nishimura and F.Murakami (1986) : Submarine hydrothermal manganese deposits from the Ogawawara (Bonin) arc,off the Japan islands.Mar.Geol.,73,311-322.
- Von Damm,K.L. (1995) : " Controls on the chemistry and temporal variability of seafloor hydrothermal fluids." p222-247.InPhysical,Chemical,Biological,and GeologicalInteractionswithinHydrothermalSystems. Monogr.v.91,EditedbyJ.Lupton,L.Mullineaux & R.Zierenberg,Am.Geophys.Un.,Washington DC.
- 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.
- 湯浅真人 (1991) : 伊豆・小笠原弧の地学現象に見られる南北対立はなぜ生じたか.地学雑誌,100,458-463.
- 湯浅真人 (1995) : 「しんかい2000」による海底軽石火山の観察 : 明神海丘潜航調査.火山,40,277-284.
- 湯浅真人・村上文敏 (1985) : 小笠原弧の地形・地質と娯婦岩構造線.地学雑誌,94,47-66.
- Yuasa,M., F.Murakami, E.Saito and K.Watanabe (1991) : Submarine topography of seamounts on the volcanic front of the Izu-Ogasawara (Bonin) arc. Bull.Geol.Surv.Japan.42,730-743.

(原稿受理 : 1998年7月14日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載

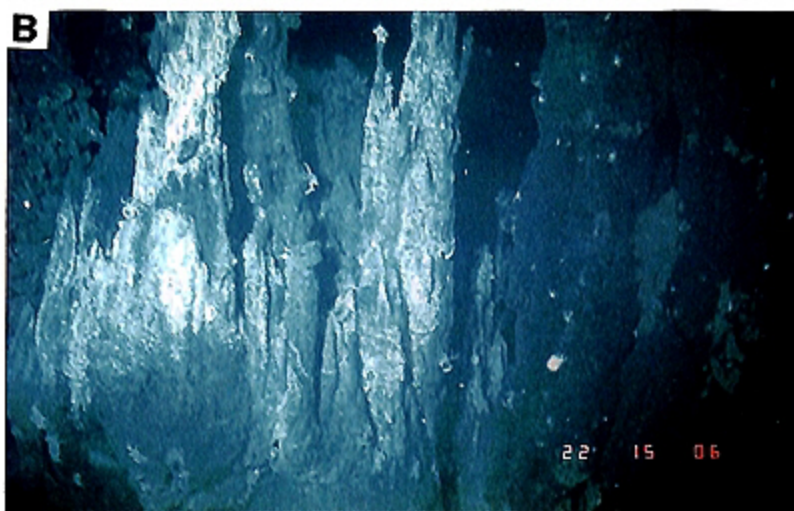
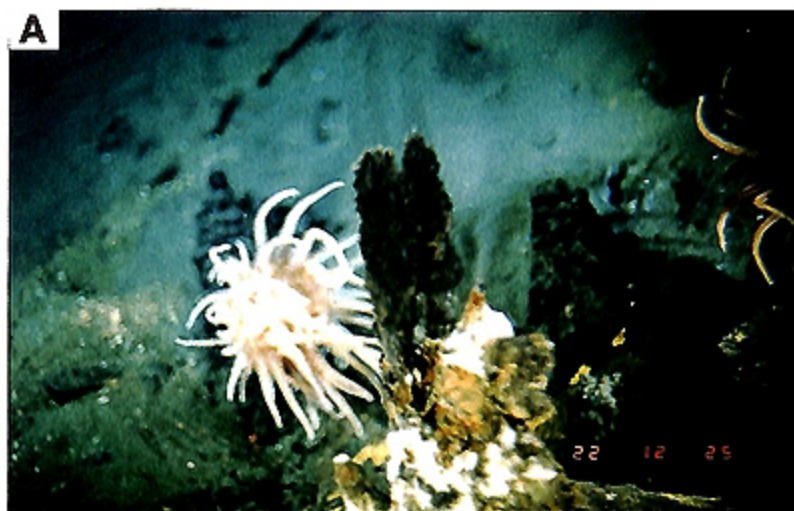


写真1 明神海丘カルデラ床東部の Sunrise 鉱床の硫化物及び生物.A: カルデラ床の水深1,340mにおける 190度の灰色の熱水を噴出する高さ50cm程の閃亜鉛鉱・黄銅鉱・硬石膏から構成される硫化物チムニー.B: カルデラ壁下部の水深1,290m付近の高さ数mから15m以上に達する硫化物チムニー群.C: カルデラ壁下部の水深1,255mにおける透明な熱水を噴出する高さ15m以上の硫化物チムニー群と熱水生物.D: カルデラ壁下部の水深1,267mにおけるチムニーを伴うマウンドの断面に見られる角礫状硫化物.

Photo 1 Sulfide chimneys and vent biota in the Sunrise deposit. A: Sulfide chimneys composed of sphalerite, chalcopyrite and anhydrite, jetting grayish hydrothermal fluid of 190°C. B: Sulfide chimneys of more than 15 m high on the lower caldera wall at a water depth of 1,290 m. C: Vent biota on sulfide chimneys of more than 15 m high on the lower caldera wall at a water depth of 1,255 m. D: Cross sectional occurrence of a brecciated massive sulfide layer in a mound associated with sulfide chimneys.

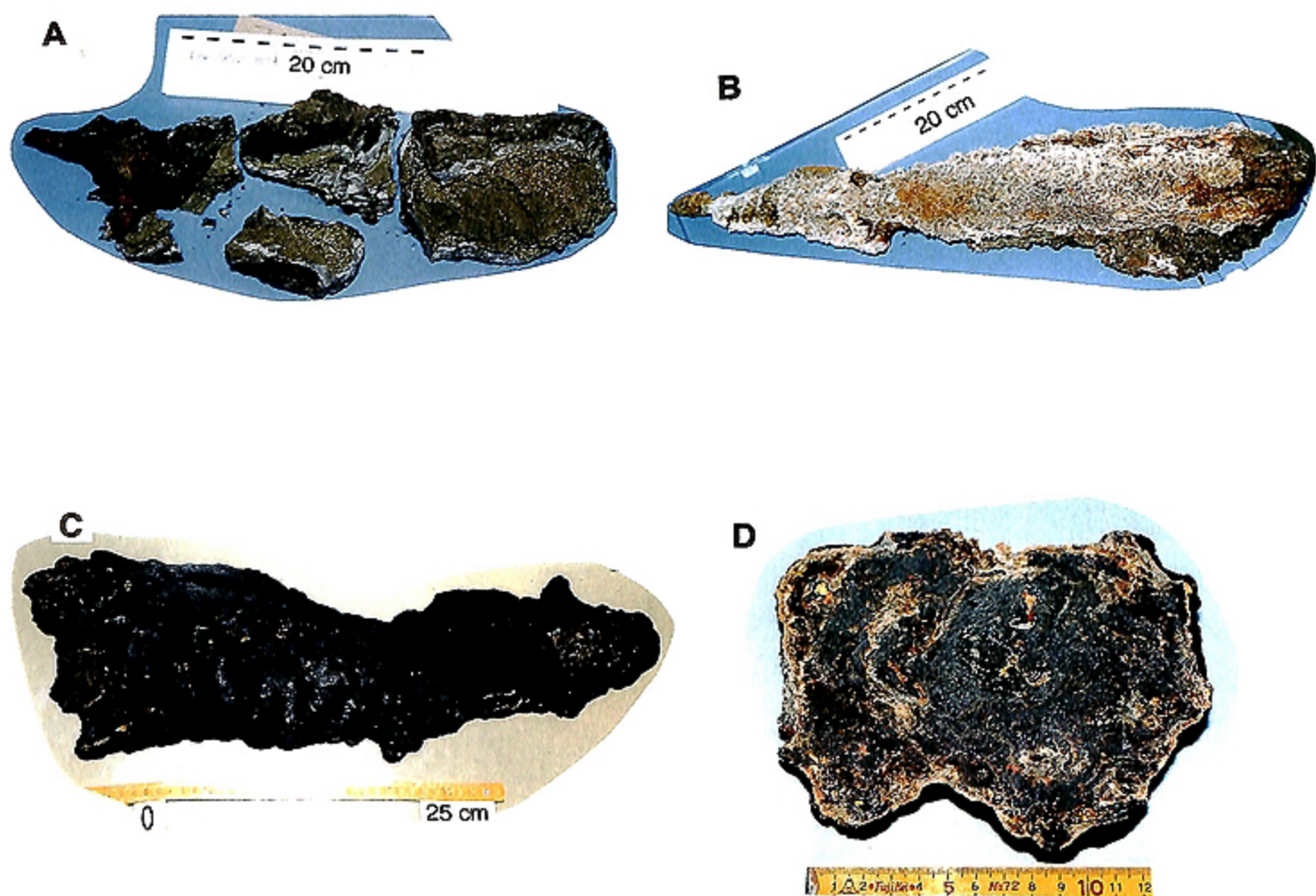


写真2 Sunrise 鉱床から採取された硫化物チムニー。A：190度の熱水を噴出していた閃亜鉛鉱・黄銅鉱・硬石膏から構成されるチムニー。B：低温熱水を噴出していた閃亜鉛鉱を主要構成鉱物とするチムニーとそのチムニー表面に棲息する白色の殻を持つゴカイ類。C：低温熱水を噴出していた閃亜鉛鉱・シリカ・重晶石を含むチムニーとその表面 (D)

Photo 2 Sulfide chimneys sampled at the Sunrise deposit. A: A chimney jetting 190°C grayish hydrothermal fluid, composed of chalcopyrite (yellow tint) on conduit wall of the chimney, anhydrite (white) and sphalerite (black). B: A sulfide chimney, with diffuse venting, composed mainly of sphalerite and vent biota on its surface. C: A chimney composed of sphalerite, silica and barite. D: A cross section of the chimney sample C which shows the distribution of sphalerite (black), barite and silica (light brown), and arsenic compounds (reddish brown).