

潜水調査により採取された伊豆小笠原弧明神海丘の熱水沈殿物（予報）

石塚 治*¹ 湯浅 真人*¹ 飯笹 幸吉*¹

NT98-07 乗船研究者*²

伊豆小笠原弧火山フロント上の酸性火山活動によって形成された海底カルデラである明神海丘の海底熱水活動域において、1998年度に熱水鉱床の調査が「しんかい2000」により実施された。潜航調査はカルデラ壁南東部及び北西部で行われ、両地域で活動的な熱水鉱床の観察を行い、熱水サイトの面的に広い範囲から硫化物試料を得ることができた。カルデラ南東部では、東西400m、南北400mの範囲にチムニー群が分布し、278℃に達する高温の熱水を噴出するブラックスモーカーも存在することが明らかとなった。チムニーの構成鉱物としては、sphaleriteやpyriteが多く、これにgalena, chalcopryrite及びanhydrite, barite, アモルファスシリカ等が伴う。中央海嶺系の熱水系に比べてPbに富み、Cuに乏しい特徴を示している。一方今回初めてカルデラ北西壁でも、新たにチムニーが見つかった。測定された熱水温度は78℃であり、チムニーの構成鉱物はanhydriteと少量のpyrite, sphaleriteであった。熱水サイトの地質環境は、サイトのカルデラ内での位置により異なり、硫化物マウンドが海底面上に露出している場合と、軽石などの堆積物に覆われている場合がある。

硫化物試料の一部には、sphaleriteのフィラメント状組織や、pyriteのフランボイダル組織等、微生物活動の痕跡を示すと見られる鉱物組織がみられ、金属元素濃集に微生物活動の寄与があったことが示唆される。

キーワード：伊豆小笠原弧、火山フロント、明神海丘、海底カルデラ、海底熱水鉱床、硫化物

Preliminary report on mineral composition and textures of the hydrothermal deposits of the Myojin Knoll

Osamu ISHIZUKA *³ Makoto YUASA *³ Kokichi IIZASA *³

NT98-07 shipboard scientific party *⁴

Submersible survey of active submarine hydrothermal field at the Myojin Knoll caldera, which was formed by acidic volcanism on the volcanic front of the Izu-Ogasawara arc, was conducted by "Shinkai 2000". Hydrothermal vents and sulfide mounds were observed and sampled in both southeastern and northwestern part of the caldera. In the southeastern part, hydrothermal field was revealed to be around 400m by 400m across and have vigorous hydrothermal venting at 278°C.

Sulfide chimneys are mainly composed of sphalerite and pyrite and minor amount of galena, chalcopryrite, anhydrite, barite and amorphous silica. Sulfide precipitates in the Myojin knoll are characterized by lower content of Cu and higher content of Pb compared to the hydrothermal deposits from mid-oceanic ridge. In this cruise, hydrothermal venting was discovered in the northwestern part of the caldera. Chimneys are mainly composed of anhydrite and trace amount of pyrite and sphalerite.

Geological environment of each hydrothermal site in the Myojin knoll is highly variable depending on its position in the caldera. In some hydrothermal sites, sulfide mounds are outcropped on the seafloor, but in other sites, they are entirely covered with pumiceous deposits.

Sulfide minerals sometimes show textures which are supposed to be genetically related to the microbial activity (e.g., filamentous texture of sphalerite, framboidal texture of pyrite). Microbial activity might contribute to the concentration of some metals.

Key words : Izu-Ogasawara arc, volcanic front, Myojin Knoll, submarine caldera, seafloor hydrothermal deposits, sulfides

*¹ 工業技術院地質調査所

*² 藤原 義弘、堀井 善弘、石橋純一郎、小山 純弘、植松 勝之、東出 幸真、山中 寿朗

*³ Geological Survey of Japan

*⁴ Yoshihiro FUJIWARA, Yoshihiro HORII, Jun-ichiro ISHIBASHI, Sumihiro KOYAMA, Katsuyuki UEMATSU, Yukimasa HIGASHIDE, Toshiro YAMANAKA

1. はじめに

島弧背弧系においては、黒鉄型鉄床、浅熱水性鉄床、斑岩銅鉄床等、様々なタイプの熱水活動による鉄床が形成されていることが知られているが、それぞれの鉄床が島弧の形成発達過程で、どの時期にどのような特徴を持つ火成活動に伴って形成されるかについては、系統的に明らかにされていない。海洋性島弧である伊豆小笠原弧は、過去に複数の背弧リフティングを経験し、現在も活動的な島弧であり、かつ火山フロントから背弧地域の広い範囲にわたって熱水活動及びその痕跡が見つかり、これを明らかにするのに適した地域である。島弧発達過程と熱水活動の変遷を明らかにするためには、火山フロントから背弧リフト、背弧海山列にいたる地域で、熱水活動の起きているサイト及び過去の熱水活動域を調査し、火山活動の時空変遷及び化学的特徴の変化と、火成活動に伴う熱水活動の地球化学的特徴を知り、火成活動史と熱水活動史との関連を明らかにすることが重要である。

伊豆・小笠原海域における熱水活動・熱水鉄床の調査は、地質調査所により1984年から開始され、広域的な地質調査による熱水活動存在指標の検出、海域を選定しての精査等が行われてきた(湯浅, 1986)。その結果、明神海丘海域においては、海水中のMn含有量、メタン・ヘリウム濃度の異常(角皆ほか, 1995)、海底堆積物中の硫化鉄物の分布等から、熱水活動・熱水鉄床の存在が確認されるにいたり、「しんかい2000」による潜航調査が実施された(Fiske et al., 1995; 飯笹ほか, 1993, 1995; 仲ほか, 1995; 湯浅, 1995)。1996年に行われた第896回の潜航調査の際には、非活動的ではあるが硫化物のチムニーが発見され(飯笹ほか, 1997)、1997年の潜航調査では、230°Cを超える熱水を噴出する活動的なチムニー、及び高さ15mに達する巨大なチムニーが発見された。

以上の発見をもとに、1998年に明神海丘の熱水サイトの潜水調査を行った。明神海丘における潜航調査の主な目的は、1. 現在も活動的な第四紀火山フロント上の火山における熱水活動の例としての調査、2. 海底カルデラにおける火山体形成と海底熱水系発達との関係、3. 海底カルデラにおける熱水沈澱物の保存及び鉄床形成過程の解明である。すでに1998年の調査については、全体の概要が飯笹ほか(1999)、Iizasa et al. (1999)に述べられているので、個々の熱水サイトの特徴及び採取試料について報告する。

2. 地質概略

伊豆・小笠原弧はフィリピン海プレートの東縁部にあたり、火山フロントである七島一硫黄島海嶺を中心に西側(背弧側)の西七島海嶺と東側(前弧域)の小笠原海嶺とからなる。これらの海嶺群の東方には深さ9000mを超える小笠原海溝があり、そこでは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。七島一硫黄島海嶺上では、近年目撃された福徳岡之場の火山噴火をはじめ、明神礁、西之島新島等の激しい火山活動が

りでなく、変色水域を生ずるような活動を含め、活発な島弧性の海底火山活動が行われている。これらは島弧における第1級の熱源である。

明神海丘は七島一硫黄島海嶺上にあり、ベヨネース列岩及び明神礁などからなる高まりの北北西、約26kmに位置している(図1)。同海丘の地形の概要は地質調査所による海底地質調査により明らかにされた(村上・石原,

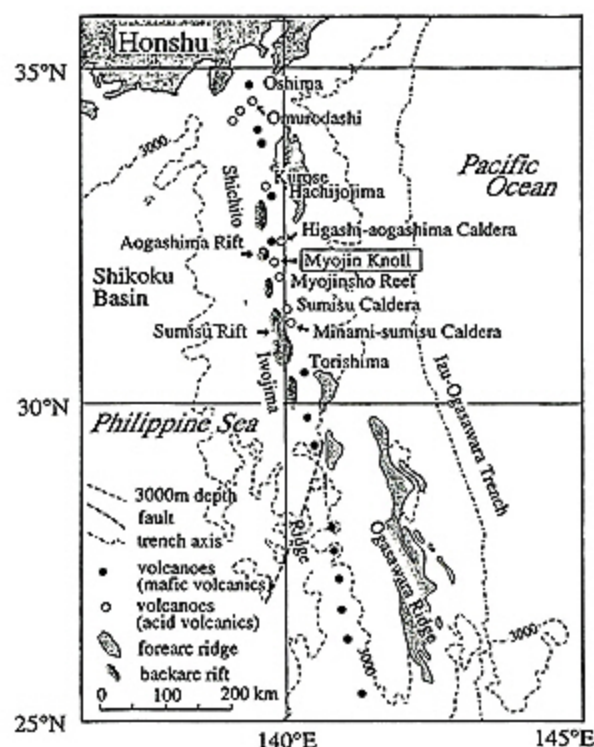


図1 明神海丘位置図。伊豆小笠原弧火山フロント上に位置する。
Fig. 1 Location of the Myojin Knoll. This submarine caldera is located on the volcanic front of the Izu-Ogasawara Arc.

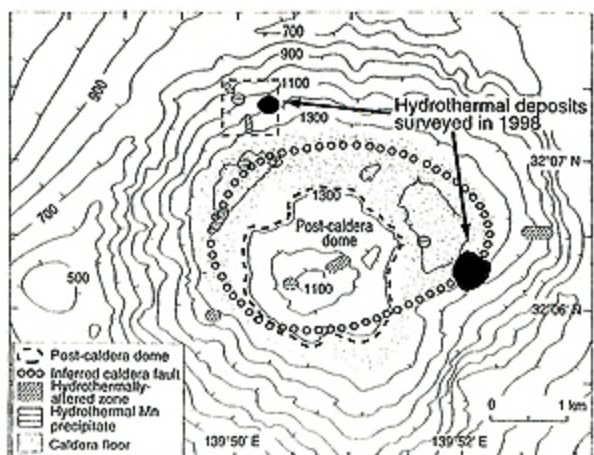


図2 明神海丘地形図。
Fig. 2 Bathymetric map of the Myojin Knoll.

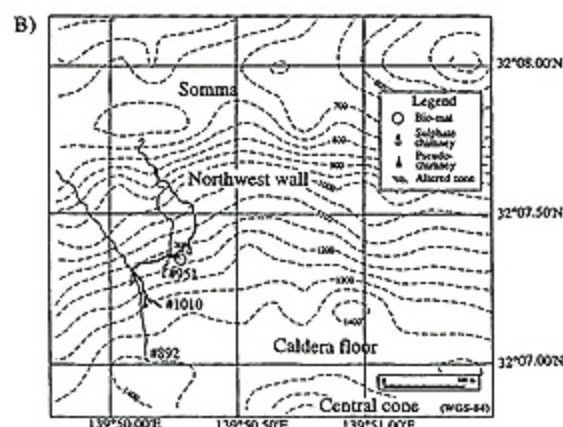
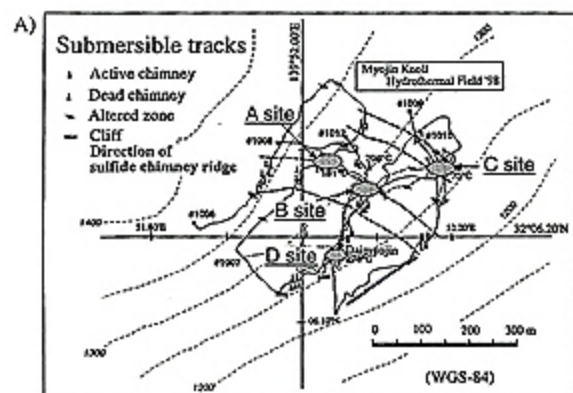


図3 1998年の潜航調査ルート及び確認された熱水活動域。A: カルデラ南東部, B: カルデラ北西部。

Fig. 3 Submersible tracks and area of hydrothermal activity recognized during the survey in 1998. A: Southeastern part of the Myojin Knoll Caldera, B: Northwestern wall of the Myojin Knoll Caldera.

1985)。山体は底径22km×18.5km、比高950mで、七島一硫黄島海嶺上の海山としては小型であり、中心部にカルデラを伴っている。カルデラ外輪山山頂の水深は600～700mで比較的凹凸は少ないが、西側外輪山上に水深364mを示すピークがある。カルデラ縁は直径6～7kmの東西にわずかにのびた楕円形を示す。カルデラ底の水深は1300～1400m、直径は5～6km、カルデラ壁の比高と傾斜はそれぞれ700～900m、20～30°と急峻である。カルデラ底中央部には底径2km、比高260m程度の中央火口丘がある(図2)。シングルチャンネルの音波探査結果では、カルデラ壁には成層した堆積層が露出している(村上・石原, 1985)。

明神海丘の地球物理学的性質については、Ishihara and Yamazaki (1991)、村上・石原 (1985) 及び Yamazaki et al. (1991)により重磁力調査の結果が報告されている。それによると、本海丘の磁気振幅は大変弱く、また重力異常図からは中央部に正の異常が認められている。

山体を構成する岩石として特徴的なのは、流紋岩質の軽石を多産することである。そのほか、石灰質岩及びごく少量の安山岩質岩、玄武岩質岩が産出する。流紋岩質軽石は斑晶鉱物として斜長石、単斜輝石、斜方輝石、ま

表1 1998年の明神海丘潜航調査により採取された岩石試料
Table 1 Rock samples collected during the submersible survey in the Myojin Knoll Caldera in 1998.

dive No.	sample No.	latitude (N)	longitude (E)	size (cm)	rock type
1006	1	32° 6.186	139° 52.044	very small	liner of conduit of black smoker
	2	32° 6.289	139° 52.182	19*9*7	dead (oxidized) chimney
	1007	32° 6.288	139° 52.167	22*9*9	active chimney with cap liner
	1008	32° 6.289	139° 52.038	16*12*10	active chimney (max 181°C)
1009	1	32° 6.289	139° 52.038	15*9*3	active chimney (max 181°C)
	2	32° 6.289	139° 52.038	20*10*2	mound surface composed of sulfide
	3	32° 6.289	139° 52.094	6*5*3	tuff (surface rock near hydrothermal seep)
	4	32° 6.288	139° 52.094	14*10*6	active chimney
	5-1	32° 6.288	139° 52.160	15*10*8	silica-coated pumice
	6	32° 6.288	139° 52.160	3*2*2	Part of inactive chimney
	7	32° 6.288	139° 52.160	48*10*10	complete chimney (weak activity)
	8	32° 6.270	139° 52.176	10*10*5	pumice
1010	1	32° 7.200	139° 50.155	7*3*2	silicified tuff, collected near dead chimney
	2	32° 7.200	139° 50.155	5*4*2	altered pumice
	3	32° 7.200	139° 50.155	20*13*9	altered pumice
	4	32° 7.395	139° 50.314	max 6*3*3	many fragments of chimney
1011	5	32° 7.653	139° 50.176		pumice (soaked in water)
	6	32° 7.653	139° 50.176	15*15*10	pumice
	1	32° 6.292	139° 52.200	max 3*4*2	tip of active chimney
	2	32° 6.200	139° 52.062	<1*1*1	tip of black smoker
1012	3	32° 6.233	139° 52.029	3*6*4	altered tuff
	1-1	32° 6.279	139° 52.083	36*26*7	active chimney
	1-2	32° 6.279	139° 52.083	15*4*4	fragment of active chimney
	BS-1	32° 6.201	139° 52.053	7*7*3	fragment of black smoker
	BS-2	32° 6.201	139° 52.053	15*5*3	fragment of black smoker
	BS-3	32° 6.201	139° 52.053	7*4*2	fragment of black smoker
	BS-4	32° 6.201	139° 52.053	6*3*3	fragment of black smoker
	BS-5	32° 6.201	139° 52.053	5*5*2	fragment of black smoker
	BS-6	32° 6.201	139° 52.053	3*2*2	fragment of black smoker
	BS-7	32° 6.201	139° 52.053	6*3*2	fragment of black smoker
	BS-8	32° 6.201	139° 52.053	6*3*1	fragment of black smoker
	BS-9	32° 6.201	139° 52.053	5*2*2	fragment of black smoker
	BS-10	32° 6.201	139° 52.053	3*2*0.5	fragment of black smoker
	BS-11	32° 6.201	139° 52.053	3*2*0.5	fragment of black smoker
	BS-12	32° 6.201	139° 52.053	2*1.5*1.5	fragment of black smoker
	BS-13	32° 6.201	139° 52.053	4*2*0.5	fragment of black smoker
	BS-14	32° 6.201	139° 52.053	3*2*1	fragment of black smoker
no number		32° 6.201	139° 52.053		fragment of black smoker

れに角閃石を含む(Yuasa and Nohara, 1992)。この軽石はSiO₂-K₂O図上では、伊豆・小笠原海域北部のほかの火山(大室だし〜南スミスカルデラ)から得られている酸性岩と同様に低カリ系列の範囲にプロットされるが、その中でも相対的にSiO₂に富みK₂Oに乏しいことが特徴である(湯浅, 1995)。

3. 潜航調査及び採取試料概要

熱水鉱床の地質学的研究を目的とした潜航調査は第1008潜航(カルデラ南東部)と第1010潜航の2潜航(カルデラ北西部)であった。1998年にはこれら以外に熱水採取及び熱水噴出口周辺の生物学的研究を目的とした潜航が5回行われた。潜航コースを図3に、採取試料のリストを表1に、主要な試料の記載を表2に示す。以下に各熱水サイトについて採取試料と共に記載する。

3.1 カルデラ南東部 第1008潜航

水深1338m 地点: Aサイト

(1) 概要

これまで確認されている熱水サイトのうち、比較的水深の深い場所に位置するチムニー群(図4)。1997年に行われた第954、955潜航の際にも観察が行われた地点を含む熱水サイト。カルデラ壁斜面に、北西-南東方向にチムニーの列が並んでいる。大部分のチムニーは数十cmから1m程度の高さであるが、まれに数mに達するもの

表2 主な硫化物試料の簡略記載。

Table 2 Simplified description of selected sulfide samples collected from the Myojin Knoll Caldera in 1998.

Sample No.	type	Site	Sp	Py	Cp	Ga	Ter	Cv	Others	Features
#1009-2	chimney	B	○	○		△	△		Jordanite	Pyrite: spherulitic (in the outermost part), dendritic (in the outermost part), colloform. Sphalerite: spherulitic, dendritic, filamentous (<5µm wide, <20µm long) Galena: intimate association with tetrahedrite and jordanite.
#1007-1	chimney (basal portion)		○	○		○	△			Pyrite: spherulitic (in the outermost part), colloform, framboidal (in the outermost part) Sphalerite: spherulitic, colloform, filamentous
	chimney (top portion)		○	○		○	△			Pyrite: spherulitic (in the outermost part), dendritic (in the outermost part), colloform. Sphalerite: spherulitic, colloform Barite: dendritic
#1008-1	chimney (center)	A	○	○	○	○		○		Pyrite: spherulitic (in the outermost part), colloform, chain of spherules, dendritic Sphalerite: spherulitic, colloform, overgrowth on pyrite filamentous (<10µm wide, <40µm long), ring-shaped Chalcopyrite: overgrowth on sphalerite, chalcopyrite disease Galena: overgrowth on sphalerite Pumice fragment is disseminated with sulfides.
#1008-3	ground surface	A	○	○	○		△	△		Pyrite: spherulitic, colloform, chain of spherules, framboidal (cubic) Sphalerite: spherulitic, colloform, overgrowth on pyrite filamentous (<10µm wide)
#1008-5	chimney	B	○	○		○				Pyrite: spherulitic, colloform Sphalerite: spherulitic, colloform, overgrowth on pyrite Galena: liner of vent
#1008-7	chimney	C	○	○		△	△		Jordanite	Pyrite: spherulitic, colloform, dendritic Sphalerite: spherulitic, colloform, overgrowth on pyrite dendritic Galena: dendritic Barite: dendritic
#1008-8	chimney (center portion)	C	○	○	○	○				Pyrite: spherulitic, colloform, dendritic Sphalerite: spherulitic, colloform, overgrowth on pyrite filamentous Galena: liner of vent Chalcopyrite: liner of vent
	chimney (outer portion)	C	○	○		○	○			Pyrite: colloform, dendritic Sphalerite: spherulitic, colloform, overgrowth on pyrite filamentous Galena: liner of vent, intimately associated with galena.
#1010-4	chimney		○	○		△				Pyrite: subhedral to euhedral (cubic)
#1012-1	chimney (outer portion)		○	○		○	○			Pyrite: spherulitic, colloform, dendritic Sphalerite: spherulitic, colloform, filamentous rod-shaped, ring-shaped Galena: liner of vent, overgrowth on sphalerite
	(center portion)		○	○	○	○				
#1012-1a-1	fragment of chimney (black smoker)	D	○	○	○	○	△			Pyrite: subhedral to euhedral (cubic) Sphalerite: colloform, dendritic Chalcopyrite: subhedral to euhedral

Abbreviations: Sp, sphalerite; Py, pyrite; Cp, chalcopyrite; Ga, galena; Ter, tetrahedrite; Cv, covellite
Abundance of sulfides: ○ > △ > □

がある。実際に熱水を噴出しているチムニーは一割程度と思われる。またチムニーの構造をほとんど持たず、堆積物の間から直接熱水が噴出している場所も見られる(図4)。噴出されている熱水はすべて透明であった。このサイトでの熱水の最高温度は190°Cであった。

熱水を噴出しているチムニーは、白色を帯びているものが多く、コシオレエビやユノハナガニが生息していた。シンカイヒバリガイはごく少数見られるにすぎなかった。

チムニーが列をなしている部分は、周囲の海底に比べ盛り上がり、リッジ状の地形をなしている。リッジの部分では、堆積物の厚さは極めて薄く、その下はすぐ、固い硫化物のマウンドになっている。また崩壊したチムニー片が積み重なっている部分も存在する(図4)。堆積物は、黄褐色の変質した軽石質のものと黒色の硫化物に富むものが認められる。黒色の堆積物はチムニーの

近傍に限られている。

(2) 採取試料

#1008-1 (チムニー片)

熱水の温度測定及び熱水採取を行ったチムニーの比較的外縁部を採取した(図5)。この試料では、チムニー全体の構造との関係ははっきりしないが、鉛直方向に伸びる熱水の通路と思われる空隙が複数観察される(図5)。空隙から離れた部分では、構成鉱物は sphalerite, pyrite でごく少量の galena を伴うことがある(図5)。sphalerite, pyrite ともしばしばコロフォーム状組織を示す(図5)。また一部 sphalerite のフィラメント状組織や、pyrite の樹枝状の成長組織が見られる場合がある。硫化鉱物以外はほとんど見られず、極めて少ない。一方空隙の周囲では、sphalerite と chalcopyrite が多く、pyrite は少ない。sphalerite

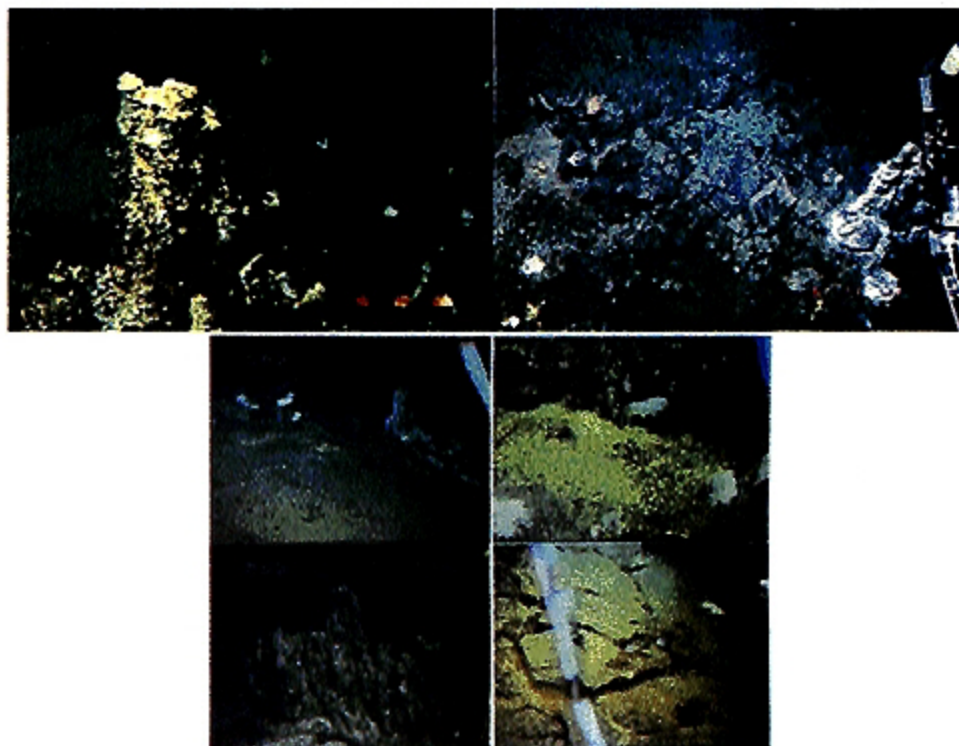


図4 カルデラ南東部水深1338m地点(Aサイト)の熱水サイトの様子。

Fig. 4 Image of hydrothermal activity at a water depth of 1338m in the southeastern part of the Myojin Knoll.

は空隙の内側に向かって成長している。chalcopyriteは、sphaleriteと密接に伴って現れ(図5)、一部 chalcopyrite diseaseを形成している。sphaleriteの表面にはgalenaが少量見られ(図5)、空隙を縁取る形になっている場合がある。

#1008-3 (硫化物マウンド表面)

この試料は、熱水を噴出しているチムニーから数m離れた位置の、海底面を覆う板状の岩石をはがしたものである(図6)。硫化物マウンドの表面に相当する。主に非常に細粒(数~数十mm)のsphalerite及びpyrite、これらの粒間をうめる石英からなり、硫化物の含有量の違いによる弱い層理構造が見られる(図6)。sphaleriteやpyriteは球状のものが多く、コロフォーム組織を示す場合がある。pyriteは自形~半自形を示すものや、フランボイド組織を示すものも見られる。試料の下半分ではchalcopyriteがsphaleriteの粒間やクラックを充填しているのが見られる。chalcopyriteの一部はcovelliteに交代されている(図6)。これ以外にchalcopyrite及びpyriteからなるパッチが見られる(図6)。これは外来のブロックと見られ、崩壊したチムニーからもたらされたのではないかと考えられる。このパッチの周囲で、層理構造がパッチの縁に沿うように変形している。これは未固結の状態であったマウンド表面の硫化物沈殿物中に、比較的固いチムニーからのブロックが混入し、その後さらに沈殿物がその上に堆積したためにできた構造と見られる。

これ以外に、熱水の通路になっていたと思われる空隙

が存在する(図6)。チムニーの場合と異なり、海底面にほぼ垂直な方向ではなく、海底面に平行に近い方向に伸びているのが見られるのが特徴である。通路の内面にはchalcopyrite及びpyriteが通路内側に向かって成長しており、一部bariteの結晶も見られる。

3.2 カルデラ南東部 水深1287m地点

第1008潜航及び第1006潜航:Bサイト

(1) 概要

これまで見つかった明神海丘の熱水サイトのうち中程度の深度に位置するもので、Aサイトと同様、チムニーは北西-南東方向に並んでいる。チムニーの高さは、数十cmから2m程度までのものが多いが、おそらく10mを越えると思われる大型のものも見られる。熱水を噴出しているチムニーの割合は、一割程度である。噴出している熱水は、すべて無色透明である。チムニー周辺の海底面には多数の亀裂が走っており、亀裂から熱水が噴出している部分もある(図7)。チムニー周辺の斜面では、大規模に斜面の崩落、滑動が起きており、海底面の下が空洞化しているのが見られる(図7)。崩落を起こしている海底面を構成している岩石は、白色の変質した軽石質の凝灰岩であった(図8)。

熱水噴出口付近には、コシオレエビやユノハナガニ、シンカイヒバリガイが生息しているが、海底面の亀裂から熱水が噴出している箇所では、シンカイヒバリガイ以外の生物はほとんど見られない。

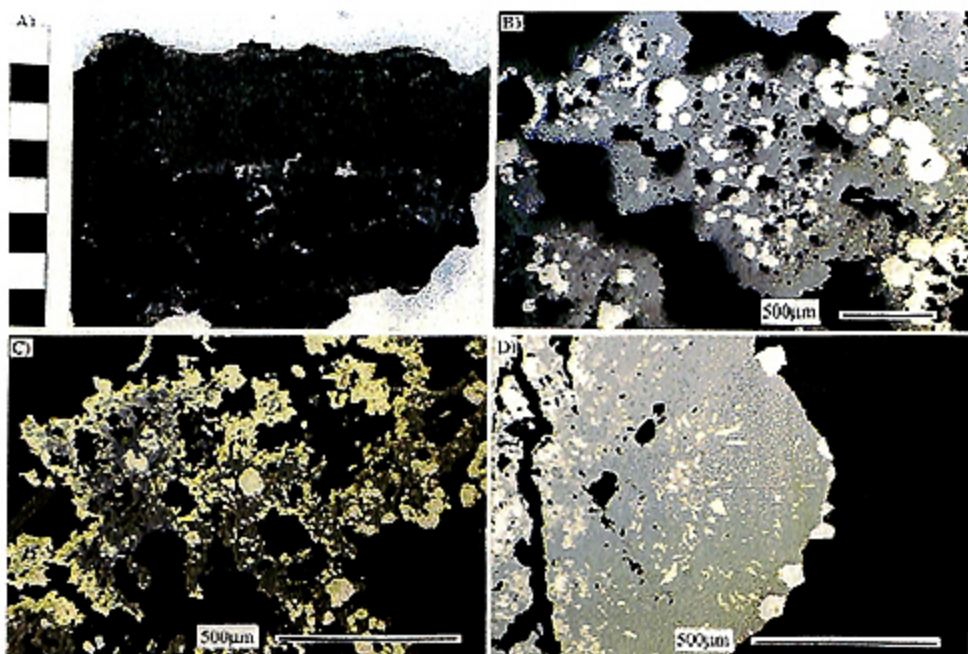


図5 A. Aサイトで採取された、約190度の透明な熱水を噴出していたチムニーの外縁部(#1008-1)。B. 球状あるいはコロフォーム組織を示すpyriteとそれにovergrowthするsphalerite。C. sphaleriteにovergrowthするchalcopyrite。D. 熱水の流路の内側に向かって成長したsphalerite及びgalena。

Fig. 5 A. Outer rim of a chimney sample collected at the A site. This chimney was jetting clear hydrothermal fluid at ca. 190°C. B. Spherical and colloform pyrite which is overgrown by sphalerite (under reflected light). C. Overgrowth of chalcopyrite on sphalerite. Chalcopyrite bleb and chalcopyrite disease are observed in sphalerite (under reflected light). D. Liner of conduit of hydrothermal solution. Galena occurs mainly on the rim of colloform sphalerite (under reflected light).

(2) 採取試料

#1008-5 (チムニー片)

熱水を噴出していたチムニーの比較的上部を採取した試料である(図8)。チムニーの外側から内側に向かって明瞭な鉱物種によるゾーニングが見られる。チムニーの最も外側の部分は硫化物に乏しく、主にanhydrite及び少量のアモルファスシリカからなり、硫化物はpyriteに限られる(図8)。pyriteは球状のものが多く、コロフォーム組織を示すものもしばしば見られる(図8)。この部分よりチムニーの内側の部分では、硫化物の量が増え、anhydriteはほとんど見られなくなる。硫化物はpyriteとsphaleriteが大部分を占め、少量のgalenaが伴う(図8)。galenaは熱水の通路であったと思われる空隙の周囲に多く見られる。一般にgalenaの結晶の成長方向は、sphalerite, pyriteとは逆方向で、空隙の内側に向かって成長している場合が多い(図8)。この試料では、Cuを含む硫化物は認められない。

3.3 カルデラ南東部 水深1292m地点

第1008潜航及び第1007潜航:Cサイト

(1) 概要

確認されている熱水サイトの中で最も東に位置するサイト。ほぼ北西-南東方向にチムニーが配列している(図9)。このサイトでは、1mを越えるような大きなチムニーはなく、数十cm程度のものが大部分である。噴出

している熱水はすべて透明である。このサイトの特徴は、カルデラ壁の崩壊堆積物とみられる大量の軽石に覆われており(図9)、硫化物マウンドはほとんど海底面に露出していないことである。チムニーに近接している軽石は硫化物あるいはMn酸化物により表面のみ黒色化しているが、大部分の軽石は白色のままである。このため、現在も斜面上部で崩壊が続く、軽石を主体とする堆積物が供給されていると考えられる。

(2) 採取試料

#1008-8 (チムニー)

高さ約50cmのチムニーをほぼ完全な形で採取した(図10)。熱水噴出はほとんど停止していた。輪切りにしてみると、熱水の通路であったと見られる部分が、少なくとも数カ所認められる(図10)。明瞭な鉱物種によるゾーニングが見られる。チムニーの最も外側の部分は、硫酸塩鉱物と球状のpyriteからなる。少し内側に入ると硫酸塩がほとんどなくなり、代わってコロフォーム組織を示すsphaleriteが増え、pyriteにovergrowthしているのが観察される。この鉱物種が変化する境界は、明瞭であることが多い。またこの部分には、sphaleriteのフィラメント状組織がしばしば見られる(図10)。熱水の通路と見られる空隙の周囲には、galenaがsphaleriteやpyriteにovergrowthする形で成長している。galenaはしばしばtetrahedriteやjordaniteを伴う。一部の空隙では、galenaと

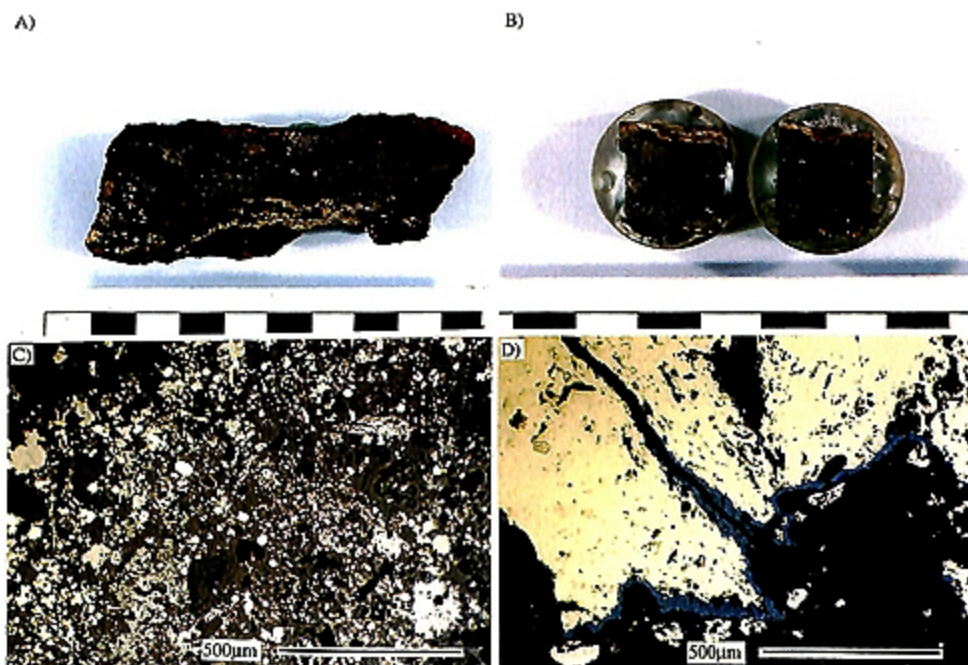


図6 A. A サイトで採取した硫化物マウンド表層の試料 (#1008-3)。上側が海底面に露出していた部分。B. 同試料の研磨片。おもに硫化物の含有量の違いによる弱い層理が見られる。また外来岩片と思われる、chalcopyrite にとむ硫化物片が見られる。C. 同試料の反射顕微鏡写真。主に細粒の sphalerite と pyrite からなる。D. chalcopyrite を交代する covellite。

Fig. 6 A. Uppermost portion of sulfide mound collected from the A site (#1008-3). B. Polished sections of the sulfide mound sample. Lamination reflecting the variation of content of sulfide minerals is faintly observed. A chalcopyrite-rich sulfide aggregate which is supposed to be derived from collapsed chimney is recognized. C. Photomicrograph of sulfide mound sample shown in Fig. 6B (under reflected light). This sample is mainly composed of fine-grained sphalerite and pyrite. D. Covellite which replaces outermost part of chalcopyrite grains.

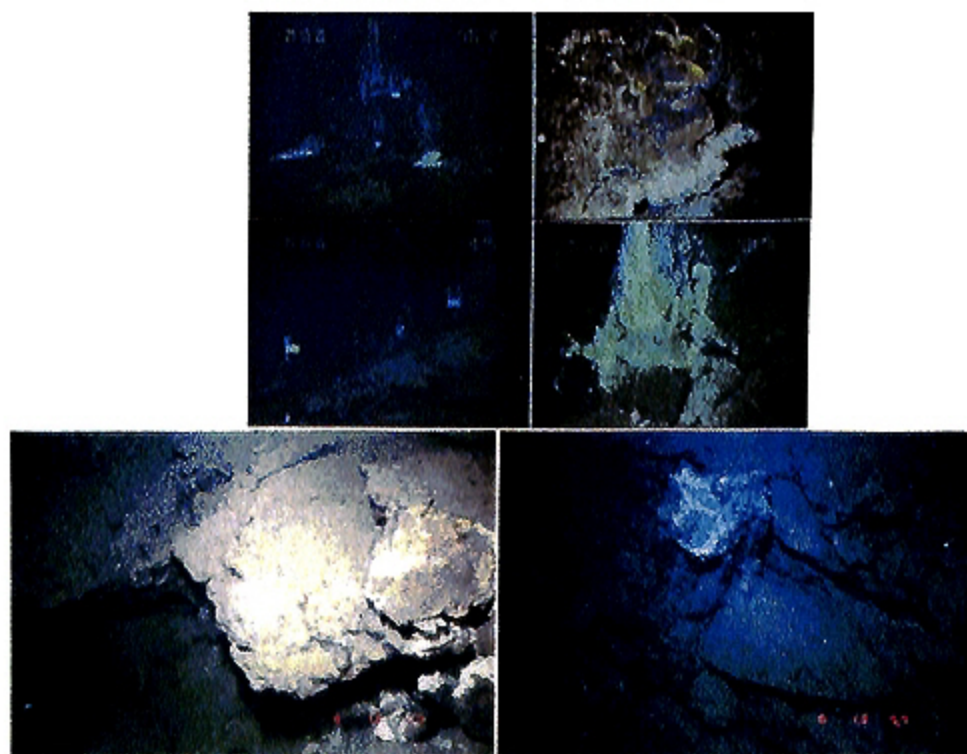


図7 カルデラ南東部水深1287m 地点 (B サイト) の熱水サイトの様子。

Fig. 7 Image of hydrothermal activity at a water depth of 1287m in the southeastern part of the Myojin Knoll.

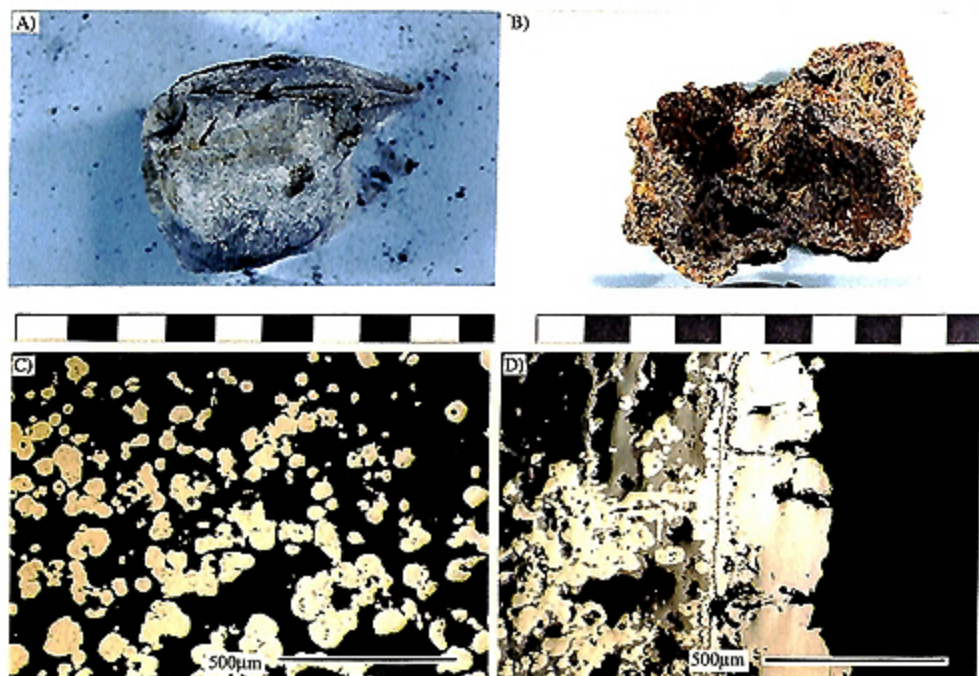


図8 A. Bサイトにおける、チムニー近傍の崩壊した海底面から採取した凝灰岩 (#1008-4)。B. Bサイトで採取された、熱水を噴出していたチムニーの断面 (#1008-5)。C. チムニーの外縁部に近い部分の反射顕微鏡写真。球状及びコロフォーム組織を示す pyrite 及び硫酸塩鉱物からなる。D. 熱水通路周囲の硫化物の組織。pyrite や sphalerite は通路から外側に向かって成長しているが、galena は内側に向かって成長している (反射顕微鏡写真)。

Fig. 8 A. Altered tuff collected from collapsed seafloor blocks near the hydrothermal vents at the B site (#1008-4). B. Cross section of an active chimney collected from the B site. C. Photomicrograph of outermost part of the chimney shown in Fig. 8B (under reflected light). This sample is mainly composed of spherical or colloform pyrite and sulfate minerals. D. Textures of sulfide minerals around the conduit of hydrothermal fluid. Pyrite and sphalerite grew outward from the center of the conduit, but galena appears to have grown inward to the conduit.



図9 カルデラ南東部水深 1292m 地点 (Cサイト) の熱水サイトの様子。

Fig. 9 Image of hydrothermal activity at a water depth of 1292m in the southeastern part of the Myojin Knoll (C site).

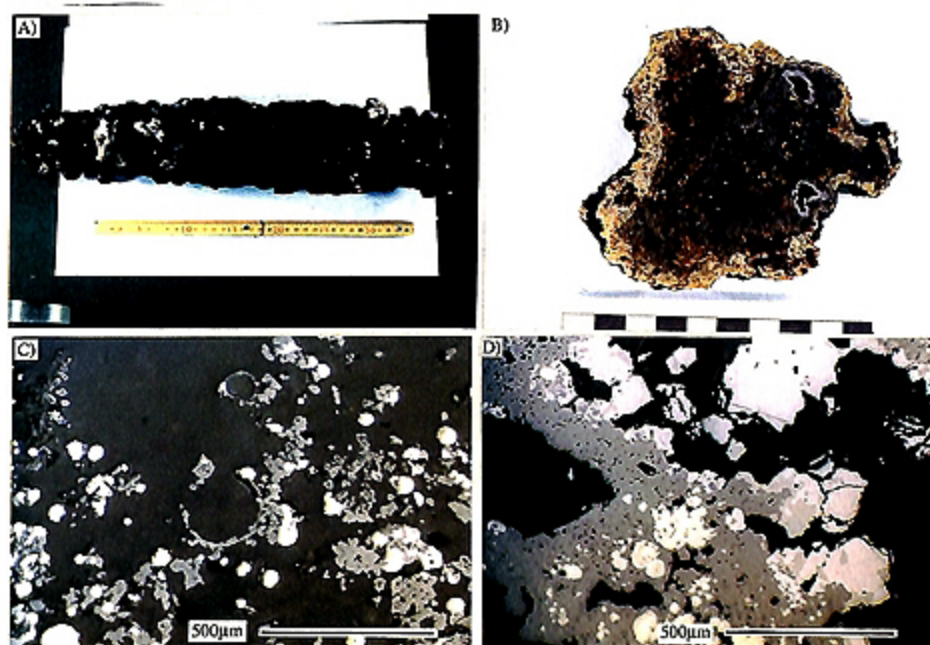


図 10 A. C サイトで採取した、わずかに熱水を噴出していたチムニー(#1008-8)。B. 同試料の断面(#1008-8)。C. フィラメント状組織を示す sphalerite (反射顕微鏡写真)。D. 熱水通路周囲の硫化物の組織。通路に面した部分(写真右手)に galena, tetrahedrite が沈殿している(反射顕微鏡写真)。

Fig. 10 A. A chimney sample collected from the C site (#1008-8). This chimney was jetting only small amount of fluid. B. Cross section of the chimney shown in Fig. 10A. C. Photomicrograph of filamentous sphalerite observed in the outer portion of the chimney shown in Fig. 10A (under reflected light). D. Textures of sulfide minerals around the conduit of hydrothermal fluid. Galena and tetrahedrite precipitated on sphalerite facing the conduit (under reflected light).

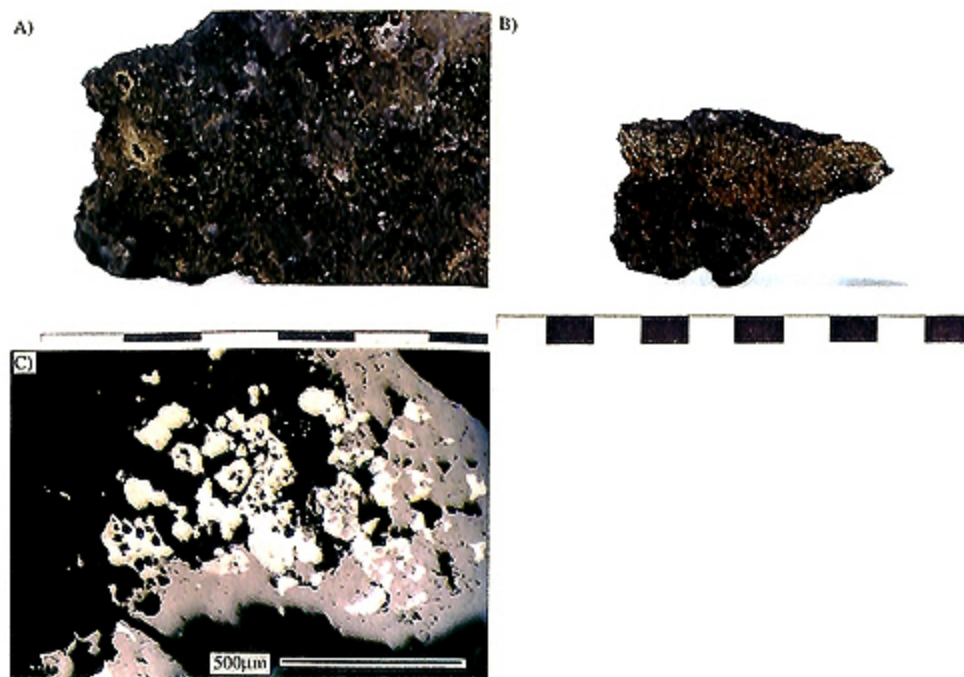


図 11 A., B. D サイトで採取した 278°C の高温熱水を噴出するブラックスモーカーの先端部(#1012-BS)。熱水の流路の周囲に chalcopyrite が濃集している。C. 同試料の研磨片の反射顕微鏡写真。chalcopyrite と sphalerite が anhydrite と共に見られる。

Fig. 11 A., B. Fragments of a chimney (black smoker) which jetted high temperature fluid at 278°C collected from the D site (#1012-BS). Chalcopyrite is concentrated around the conduits of hydrothermal fluid. C. Photomicrograph (under reflected light) of a polished section from the sample shown in Fig. 11A. Chalcopyrite and sphalerite are dispersed in anhydrite-rich matrix.

もに chalcopyrite がみられる場合もあるが、多くの場合伴わない。

3.4 カルデラ南東部 水深 1254m 地点 (飯笹ほか(1999)の“大明神”チムニー)

第 1011 潜航, 第 1012 潜航: D サイト

(1) 概要

これまで明神海丘の熱水サイトの中で最も高温の熱水活動 (278°C) が確認されている地域。約 30m に達するチムニーが存在しており、黒色に濁った熱水を噴出している (図 11)。このチムニーは噴出口を数カ所もっている。試料は熱水の噴出口の先端付近から、ホバリングしながら採取された。第 1011 潜航の際には、柱状採泥器の格納容器が高温のため溶融し、その部分にチムニーが付着することにより試料が回収された。チムニー周囲の海底で柱状採泥が行われたが、ほとんどが硫化物であった。

(2) 採取試料

#1012-BS

試料の大部分は, anhydrite により占められ、硫化物の量は少ない (図 11)。硫化物としては, sphalerite が多く、これに pyrite, chalcopyrite, galena を伴い、まれに tetrahedrite を含む (図 11)。熱水通路に相当していたと思われる部分には、粗粒 (1mm 程度) の自形の chalcopyrite の結晶が内壁を覆っていることが多い (図 11)。

3.5 カルデラ北西部 水深 1155m 地点 第 1010 潜航

(1) 概要

北西部で唯一発見されたチムニー。北西部カルデラ壁では、第 892 潜航の際に、チムニーらしい構造物が目撃されていたが、試料採取に至っていなかった。カルデラ床のチムニーの分布から、その配列が構造規制されている可能性があり、北西壁に存在しうると推定されたため、本航海では北西カルデラ壁上のチムニーの存在を確認することを目的に、潜航調査を計画した。潜航調査では、まず最初に第 892 潜航で観察されたチムニー状構造物の確認に向かった。水深 1250m 付近でそれに遭遇した。カルデラ壁下部斜面上に直立する柱状の物体で、採取した試料は赤褐色の軽石である。岩体の表面を観察すると、線状に延びた軽石の表面構造が認められ、長柱状に割れ、崩壊・堆積した崖堆積物のなかで、巨大な柱状の角礫が偶然に直立して堆積しているものと考えられた。当初の目標地点は、このようにチムニーではないことが明らかとなったため、つぎに同じ深度でカルデラ壁に沿って東寄りに航走した。カルデラ上の熱水活動が構造規制されているとしたら、その構造をどこかで横切る方向に探索することによって、熱水活動に遭遇する可能性があるものと考えた。カルデラ壁上のトラバースでは、しばらくは細粒堆積物に被われたスムーズな海底が続いていた。壁の急斜面上 1151m の地点で新たにチムニーが見つかった。熱水は、チムニー頂部のみならず、途中の

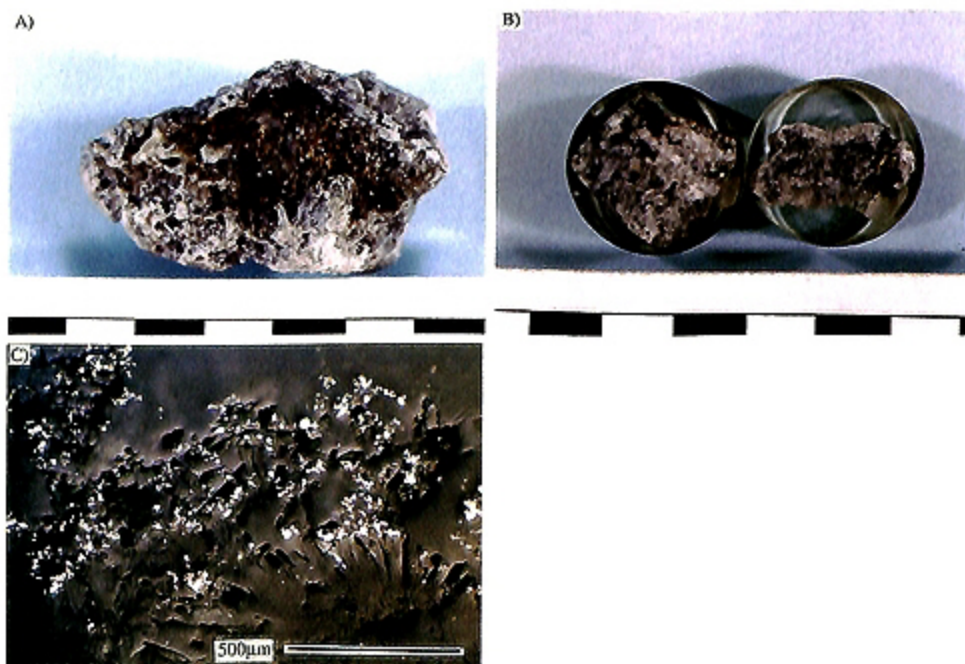


図 12 A, B. カルデラ北西壁で発見されたチムニーの一部 (#1012-4)。大部分が anhydrite からなり、少量の pyrite, sphalerite を含む。C. 同試料の研磨片の反射顕微鏡写真。細粒の pyrite が anhydrite と共に見られる。

Fig. 12 A, B. Fragments of an active chimney collected from the northwestern wall of the Myojin Knoll Caldera (#1012-BS). Chalcopyrite is concentrated around the conduits of hydrothermal fluid. C. Photomicrograph (under reflected light) of polished section shown in Fig. 12B. Fine-grained pyrite is dispersed in anhydrite-rich matrix.

側壁、基底部及び周辺の海底のあちこちから噴出していった。チムニーは高さ約2m、白色である。チムニーの基底部付近で測定された熱水温度は78℃であった。このチムニーの周囲にはユノハナガニが生息しているものの、シンカイヒバリガイは見られなかった。

(2) 採取試料

#1010-4 (チムニー片) 全体的に白色で、空隙に富む

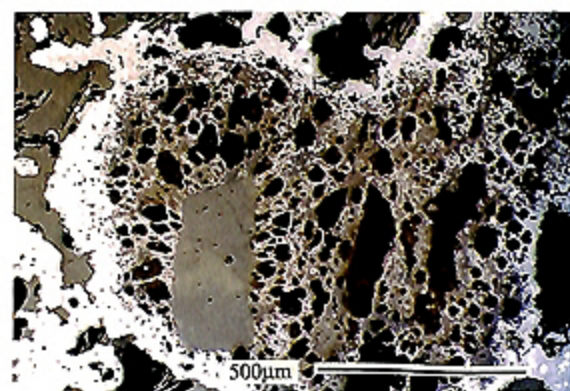


図13 チムニー (#1012-1) 中に見られる鉍染した軽石片。細粒の sphalerite や pyrite が軽石の石基部分を交代している。
Fig. 13 Disseminated pumice fragment found in a chimney (#1012-1). Fine-grained sphalerite and pyrite replaced groundmass of the pumice.

(図12)。非常にもろく、数 cm 程度の破片としか採取できなかった。大部分が anhydrite で、硫化物は2-3%程度しか含まれない。硫化物はほとんど pyrite でごく少量 sphalerite が含まれる (図12)。熱水の通路となっていたと思われる空隙の周囲で多少硫化物が多くなっている。

4. 議 論

ここまで1998年の潜航調査で観察された主な熱水サイト及びそこで採取された試料の概略を記載した。本格的な試料の分析及びそれに基づく明神海丘熱水系の検討はこれからであるが、重要と思われる観察事実を以下にまとめる。

(1) 熱水サイトの地質環境の違い

明神海丘における熱水サイトはカルデラ南東側では、水深約1370mから1220m前後までの範囲に分布しており、それぞれのサイトの地形及び地質環境は異なっている。例えば、Aサイトでは比較的堆積物は少なく、硫化物マウンドは海底面上に露出し、周囲より地形的に高くなっている。一方Bサイトでは、熱水サイト周辺で、海底面に多数の亀裂が入り、大規模に海底面が崩壊して、空洞を生じている。さらにCサイトでは、大量の軽石が熱水サイトを覆っており、硫化物マウンドは海底面上に露出していない。軽石が多い熱水サイトでは、チムニー

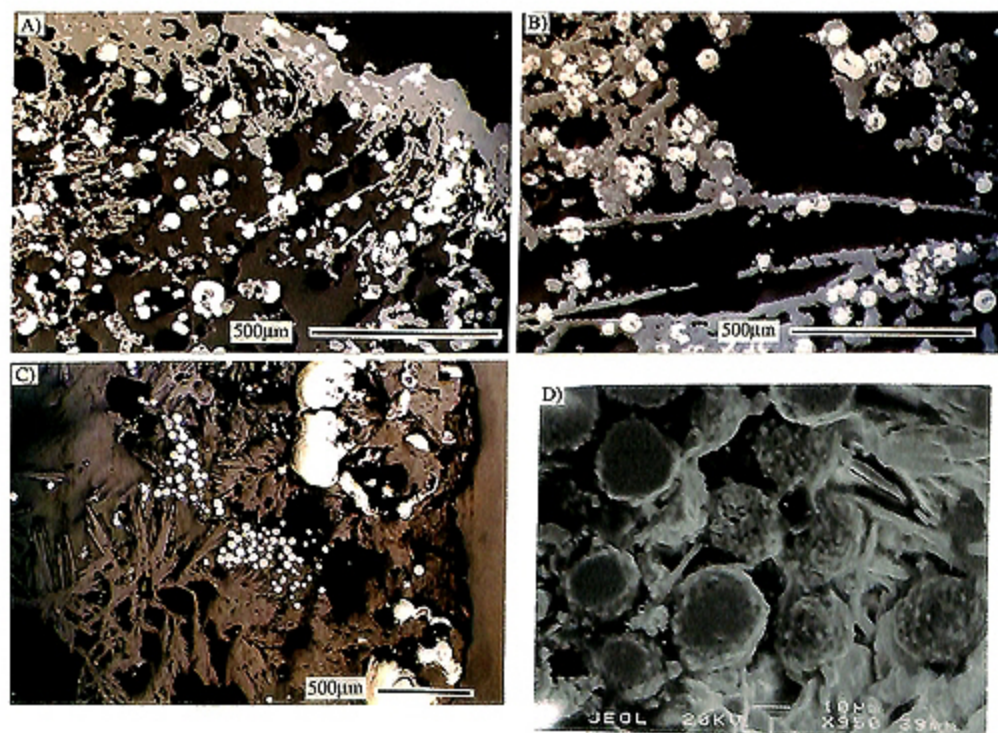


図14 微生物活動が関係していると思われる鉍物組織。A, B. フィラメント状組織を示す sphalerite の集合体 (反射顕微鏡写真)。A: #1012-1, B: #1008-7。C. チムニーの外縁部に見られるフランボイダル組織を示す pyrite (#1007-1)。D. フランボイダル組織を示す pyrite の走査電子顕微鏡写真。1mm以下の pyrite が集合して、径10-20mmの球状の集合体を形成している。
Fig. 14 Mineral textures which are supposed to be genetically related to microbial activity. A, B. Filamentous texture of sphalerite observed in relatively outer portion of chimneys (under reflected light). A: #1012-1, B: #1008-7. C. Framboidal pyrite in the outermost portion of a chimney (#1007-1). D. Detail structure of framboidal pyrite observed by scanning electron microscope. Pyrite crystals of less than 1mm in diameter assemble and form spherules of 10-20mm in diameter.

中にも熱水沈殿物に交代されている軽石片がみられる(図13)。このような熱水サイトの地質環境の違いは、熱水沈殿物の堆積及び保存状況や熱水循環システムに大きな影響を与え、海底熱水鉱床ひいては黒鉱型硫化物鉱床の形成発達を理解する上で、重要な要素であると考えられる。今後チムニーや硫化物マウンド表面の試料の解析とともに、海底面下の試料採取も望まれる。

(2) 硫化物沈殿への生物活動の寄与の可能性

今回採取された試料には、生物の寄与の可能性を示唆する鉱物組織がしばしば見られる。最も多く見られるのは、sphaleriteのフィラメント状組織である。長さは数・数十mm、幅数mm程度のものが多い(図14)。フィラメントの中央部に線状の空隙があり、その両側にsphaleriteが成長している。この組織をもつsphaleriteは、pyriteと硫酸塩鉱物からなるチムニー外縁部のすぐ内側の部分で、空隙率の高いところに多い。一部では、集合体を作っている。微生物(特にフィラメント状バクテリア)の組織を基盤として結晶成長が起きたものではないかと考えられる。微生物は単に基盤を提供しただけなのか、あるいは酸化還元状態やpHを変化させる等して、積極的に沈殿を促進したのか、今後微小領域の硫黄同位体比測定や元素分析等を通じて検討する予定である。

もう一つ生物の関与の可能性があるのは、pyriteのうちフランボイダル組織を示すものである(図14)。これは、チムニーの外縁部及びマウンドの最上部から採取した試料に見られる。1mmに満たないpyriteが10・数十mmの球状の集合体を形成している。成因については様々な説があるが、陸上の黒鉱型鉱床では、フランボイダル組織を持つpyriteが、共存する他の組織を示すpyriteや硫化物と著しく異なる負の硫黄同位体比を示すことから、バクテリアによる酸化還元の結果生成された軽い同位体比を示す硫黄が関与しているとの説が出されている(Komuro and Sasaki, 1985; Ishizuka and Imai, 1998)。

これら以外にも、よりサイズの大きい生物組織を基盤として成長したのではないと思われる組織がいくつかある。このような組織を持つ硫化物の分布範囲、存在量を把握することにより、明神海丘の海底熱水鉱床での微生物活動の元素濃集への寄与を見積もる手がかりがえられると考える。

5. まとめ

1998年度に明神海丘熱水サイトにおける、熱水鉱床、噴出熱水、熱水活動に伴う生物群集・生物活動の調査が「しんかい2000」により実施され、このうちカルデラ南東部及び北西部の熱水鉱床の地質学的調査が2潜航で行われた。カルデラ南東部の熱水サイトでは、既知のチムニーを基準に調査を広げた結果、東西400m、南北400mの範囲にチムニー群が分布すること、チムニーにはこれまで見つかった透明な熱水を噴出するものだけでなく、黒煙を噴出しているブラックスモーカーも存在することが明らかとなった。チムニーは最大30mに達する大

型のもの(大明神チムニー)があり、測定できた最高温度は278℃であった。チムニーは一般に、中心部(熱水通路)から外側に向かって、明瞭な鉱物種の違いによるゾーニングを示し、構成鉱物としては、sphaleriteやpyriteが多く、これにgalena, chalcopyrite, tetrahedrite, jordanite及びanhydrite, barite, アモルファスシリカ等が伴う。一般にchalcopyriteはマウンドの試料と、チムニーでは熱水通路の周辺に限られ、Cuの鉱化は海底面上では極めて限られている。中央海嶺系の熱水系に比べてPbに富み、Cuに乏しい特徴を示している。一方今回初めて北西部カルデラ壁でも、急斜面上の水深1151mの地点で新たにチムニーが見つかった。チムニーの基底部付近で測定された熱水温度は78℃であり、チムニーの構成鉱物はanhydriteとpyrite, sphaleriteであった。熱水サイトの地質環境は、サイトのカルデラ内での位置の違いにより異なっており、硫化物マウンドが直接海底面上に出ている場合と、軽石などの堆積物に覆われている場合とがある。チムニー及びマウンドの試料の一部には、sphaleriteのフィラメント状組織や、pyriteのフランボイダル組織等微生物活動の痕跡を示すと見られる鉱物組織がしばしば認められ、金属元素濃集に微生物活動の寄与があったことが示唆される。

今回の潜航調査により、前年度までに採取された試料とあわせ、明神海丘熱水サイトの面的に広い範囲から硫化物試料を得ることができた。今後、明神海丘海底熱水鉱床の化学的特徴や形成発達過程、微生物活動の寄与について、微小領域同位体比測定や鉱物化学組成分析等を通じて検討していく予定である。

謝 辞

本潜航調査を行うにあたっては、「なつしま」乗組員、「しんかい2000」運航チーム、海洋科学技術センター職員の方々から多大なご協力を頂き厚く感謝する。

引用文献

- R.S.Fiske, J.Naka, K.Iizasa and M.Yuasa, "Caldera-forming submarine pyroclastic eruption at Myojin Knoll, Izu-Bonin Arc," JAMSTEC J. Deep Sea Res., **11**, 315-322, (1995).
- 飯笹幸吉, 寺島 滋, 佐々木宗建, 丸茂克美, "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", JAMSTEC 深海研究, **9**, 105-115, (1993).
- 飯笹幸吉, R. S. Fiske, 仲 二郎, 角皆 潤, "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, (1995).
- 飯笹幸吉, 仲 二郎, 湯浅真人, リチャード フィスケ, "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, **13**, 443-456, (1997).
- 飯笹幸吉, 石橋純一郎, 藤原義弘, 橋本 惇, 堀井善弘,

石塚 治, 小山純弘, 湯浅真人, “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”, JAMSTEC 深海研究, **14**, 223-236, (1999) .

- K. Iizasa, R. S. Fiske, O. Ishizuka, M. Yuasa, J. Hashimoto, J. Ishibashi, J. Naka, Y. Horii, Y. Fujiwara, A. Imai and S. Koyama, “A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera,” *Science*, **283**, 975-977, (1999).
- T. Ishihara and T. Yamazaki, “Gravity anomalies over the Izu-Ogasawara (Bonin) and northern Mariana Arcs,” *Bull. Geol. Surv. Japan*, **42**, 687-701, (1991).
- O. Ishizuka and A. Imai, “Brown ore” from the Fukasawa-Kuroko deposits, Northeast Japan: Its characteristics and formation process, “*Resource Geol.*”, **48**(2), 53-73, (1998).
- K. Komuro and A. Sasaki, “Sulfur isotope ratio of ramboidal pyrite in Kuroko ores from the Ezuri mine, Akita Prefecture, Japan,” *Mining Geol.*, **35**, 289-293, (1985).
- 村上文敏, 石原丈実 “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, (1985) .
- 仲 二郎, リチャード フィスケ, 平 朝彦, 山本富士夫, 飯笹幸吉, 湯浅真人, “伊豆諸島明神礁北西方, 明神海丘の海底地質”, JAMSTEC 深海研究, **11**, 323-331, (1995) .
- 角皆 潤, 石橋純一郎, 脇田 宏, 蒲生俊敬, 飯笹幸吉, リチャード フィスケ, 仲 二郎, “伊豆・小笠原弧, 北ベヨネース海底カルデラの熱水活動”, JAMSTEC 深海研究, **11**, 333-339, (1995) .
- T. Yamazaki, T. Ishihara and F. Murakami, “Magnetic anomalies over the Izu-Ogasawara (Bonin) Arc, Mariana Arc and Mariana Trough,” *Bull. Geol. Surv. Japan*, **42**, 655-686, (1991).
- 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, 最近の地学 (地学雑), **95** (7), 32-40, (1986) .
- 湯浅真人, “「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, (1995)
- M. Yuasa and M. Nohara, “Petrographic and geochemical along arc variations of volcanic rocks on the volcanic front of the Izu-Ogasawara (Bonin) Arc, *Bull. Geol. Surv. Japan*, **43**, 421-456, (1992).

(原稿受理: 1999 年 8 月 19 日)