

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

中村光一*¹ 丸茂克美*² 青木正博*²

1989年6月の沖縄トラフ、伊是名海穴における潜航調査において、日本近海で初めてのブラック・スモーカーと二酸化炭素に富む流体（Sakai et al., 1990）を湧出する変質帯（ポックマーク）を発見した。

ブラック・スモーカーからは1 m/秒の流速で熱水が噴出しており、放熱量は最低 8×10^6 Wと見積られる。この値は伊是名海穴海底熱水地帯から熱伝導で放出される熱量にはほぼ等しい。「黒煙」降下堆積物は薄く、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱でできている。チムニーの硫化物の鉱物組成は熱水の水理学的条件の変化に支配されてか、変化に富む。ポックマークの変質鉱物は、マイカ、マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物、自然硫黄である。

Discovery of a black smoker vent and a pockmark emitting CO₂-rich fluid on the seafloor hydrothermal mineralization field at the Izena Cauldron in the Okinawa Trough.

Ko-ichi NAKAMURA*³, Katsumi MARUMO*⁴, and Masahiro AOKI*⁴

We first discovered a black smoker vent and a pockmark emitting CO₂-rich fluid (Sakai et al., 1990) at the JADE hydrothermal site in the Izena Cauldron in the Okinawa Trough during the submersible "SHINKAI 2000" expedition in June 1989.

The black smoker vent was emitting hot water at a flow rate of approximately one meter per second. Using the measured temperature, 320°C, by the successive dive (Sakai et al., in press), we estimated the minimum heat flux from the black smoker vent as 8×10^6 W. This value is nearly equal to the conductive heat loss from the whole JADE field estimated from the heat flow data (Kinoshita et al., in prep.). The black-smoker particle deposit was very thin and mainly composed of sphalerite, galena and chalcopyrite. The mineral assemblages of the chimney bodies are variable presumably resulted from the hydraulic change at the conduit.

* 1 地質調査所 海洋地質部

* 2 地質調査所 鉱物資源部

* 3 Marine Geology Department, Geological Survey of Japan

* 4 Mineral Resources Department, Geological Survey of Japan

The alteration minerals of the sediments in the pockmark are mica, mica/
montmorillonite mixed layer and native sulfur.

1. はじめに

1988年6月に、西独調査船「ゾンネ号」による日独共同調査で発見された伊是名海穴の海底熱水性鉱床 (Halbach et al., 1989) は、同年9月に「しんかい2000」を利用した調査が実施され、鉱床マウンドの性状や成長しつつあるチムニーの存在の確認を通して、徐々に具体的な姿が明らかになりつつある (加藤幸弘ほか, 1989, 中村ほか, 1989など)。

1989年度の一連の沖縄トラフの潜航調査の第1陣として、地質調査所から中村 (Dive411)、丸茂 (Dive412) の2名が参加した。Dive411では伊是名海穴における1989年度最初の潜航ということもあり、当初、前年の鉱床サイト1 (中村ほか, 1989) に行き、そこから鉱体のマッピングを始め、周囲の状況と合わせてなるべく広い範囲をマッピングすることを計画した。最初の着底地点には泥質な海底に鉱石礫が堆積しており、鉱体に近いことを感じさせたが、昨年と同じ場所に行くことは容易ではなく、約2時間、鉱体を探索して海底を右往左往した。その主たる原因は、測位のズレとSTDによる深度データのズレであった。

約2時間の探索の後、前年同様のケヤリムシの密生する岩石や活動を停止した小規模なチムニーが見出され、マウンド状の地形となった。そこを登るとシンカイコシオリエビの密生する熱水湧出帯があり、その上にブラック・スモーカーがあった。約1時間20分、観察と試料採取作業を行った後、北側を下って、前年の鉱床サイト1に行き着き、所期の目的のマッピングを短時間で行った。

このブラック・スモーカーの発見は、最近、約1ヶ月前に仏独共同調査隊がラウ海盆でブラック・スモーカーを発見していたことが判明したため (The Nautilau Group, 1990)、背弧海盆や西太平洋で初めての発見ということではなくなったが、本邦近海では初めての発見であり、第三紀黒鉱鉱床の現世版と考えられる伊是名海穴海底熱水性鉱床に、ブラック・スモーカーが存在するということを実証した意義は大きい。

Dive412では、約40分でブラック・スモーカーに到着し、引き続き潜航調査のためにブイのついたマーカーを設置した後、周辺の観察、試料の採取を行った、その後、マウンドの北側を下って、小規模な活動中のチムニーや変質帯の観察を行った。その際、pockmark 状に小さな凹地となった変質帯でマニピュレーターで掘った穴から、「泡」を噴き出す現象を発見した。これは、その後の潜航調査によって、二酸化炭素を主体とする流体であることが判明した (Sakai et al., 1990)。これは海底熱水性鉱床地帯において、二酸化炭素が大量に変質帯中に貯えられていることを初めて示したものであり、温度・圧力条件に支配された「泡」の特異な挙動と合わせて、海底熱水性鉱床研究の上での意義は大きい。

2回の潜航調査を通して採泥管2本を携行し航行中は目視観察、ビデオ、ステレオカメラ、船内カメラ撮影を実施した。ステレオカメラの撮影に際しては東京大学海洋研究所太田秀教授製作の連続撮影用タイマーを使用させていただいた。また、前述のように、ブラック・スモーカーにおいて引き続き各種調査作業を行なう際の便を考えて、Dive412では、ブイ付きマーカーを携行して設置するとともに、模擬の採水管として、棒状の木材をペイロードに設置し、採水作業についての検討を行った。

2. Dive 411

Dive411は1989年6月12日、中村の他に海洋科学技術センターより桜井利明、広瀬重之氏が潜水船要員として乗船して実施された。

着底点はかなり傾斜した水深1410mの斜面で、全体としてシルト質な堆積物で被われており、ナマコなどの生物も豊富に棲息していたが、随所に見つけて鉱石とわかる黒々とした、時に金属光沢を持つ大きな結晶の光る中礫〜径1、2mの鉱石礫が転在していた。礫間の斜面でも傾斜の強いところでは灰茶色のシルトが崩れ落ち、礫間のマトリックスと見られる黒い硫化物に富む粗粒な砂層が見られた。これらの堆積物は斜面より上方の鉱体よりの地すべり堆積物と考えられる。第三紀黒

鉍床地帯では1960年代後半よりこのような堆積物は数多く記載され、鉍体堆積過程の一要素として重視されてきた。その現世版とも言うべき物が着底地点近傍で見られた訳だが、生物が棲息できる酸化的環境にありながら、鉍石礫、マトリックスの砂質硫化物ともに全く酸化されていないのが特徴である。表面は数 cm の厚さの半深海性シルトで被われているので、堆積してからある程度の時間は経ていると考えられる。にもかかわらず、鉍石が全く酸化していないことは、つい最近まで、直上の海水が還元的環境にあったか、薄い半深海性堆積物の被覆が酸化を防ぐ上できわめて効果的であることを示していると考えられる。

着底地点より北方に斜面を登り始めると地すべり堆積物は、ただちに鉍石礫の斜面になり、壁の如く一体化したかと思うと、左右にも海水との境が見え、鉍石が直径 3 m の巨大な塔状の構築物になっていることが判明した。鉍石礫が主たる構成要素になっているところの水深が約1410m、鉍石が一体化する水深が1404m、1402mの所に一段目の底の様な水平的な突起があり、1400mに二段目の底状突起が見られる。1400mで確実に塔状の構造であることがわかる。頂上の水深は1395mで、2～3個の径20cm、高さ約50cmの活動を停止したチムニーが見られる（写真1、この写真では一段目の底状突起の端の部分より上が写っている。）塔状の構造は、確実に塔状になっている部分が高さ5m、基部からの高さは15m近くに達する。底状の構造は、前年度の鉍床サイト2で観察された spreading cap（青木、中村、1989）のより大きなもので、flange structure（Delaney et al., 1988）と考えられる。Tivey and Delaney（1986）は、主として black smoker などから出た硫化物粒子や崩壊したチムニーの断片の堆積によって生長する鉍体である mound に対して、硫化物の沈殿がそのまま大きな鉍体になる合体した chimney-flange 構造を持つものを large sulfide structure と名づけた。large sulfide structure の成長に際しては、単なるチムニーの合体だけでなく flange 構造が発達することによって、庇の下に高温の熱水が溜まり、そこに硫化物が沈殿して、構造が水平方向にも生成していくと、鉍体生長の重要な要素と考えている（Delaney et al.,

1988, Delaney et al., in press）。伊是名海穴にもほぼ同様な large sulfide structure が見出されたことは、鉍体の発達を考える上で重要である（図1）。

図1西半部の斜面域は、所々に小規模な変質帯が見られるものの大部分はシルト質の堆積物に被われている。随所にシロウリガイの死殻は観察されたが生体は見られなかった。水深1390m付近で人工的な擦痕が見られた。1988年の潜航調査では、5～6本の歯形のついた擦痕が見られ、時期・形状から西独調査船ゾネ号によるドレッジの擦痕と推定されたが、この擦痕は歯形がなく、舟底型をしているため、1988年の「しんかい2000」Dive359の際の擦痕と思われる。このような潜航調査間の位置関係の物証が得られることは、鉍床地帯のマッピングにとって大きな意味を持つ。

略北東一南西方向に延びる峰状の高まりの内、1330mから1340mの部分には広範に変質帯が見られる。変質帯はよく見られる極細粒の白色変質帯と若干様相を異にし、シルトないし砂質で、白色がまだらに見えること、多くの軽石が変質帯の上に載っていることで特徴づけられる。峰状の高まりは、北西側斜面を登る観察では、1360mから1351mにかけては軽石層よりなり、1351mから1343m付近までは、凝灰岩またはシルトと軽石層の互層で構成されていることがわかる。軽石層が表面の被覆層でないことは直立した崖になっていることからわかる。またこの崖の基底には、伊是名海穴でははじめてハオリムシが棲息するのが見出された。とくに顕著な変質帯はないが、軽石層が何らかの流体の透過層となっていることが推定される。互層の境はシャープで、層理面はほぼ水平である。峰の頂上の特徴ある変質帯も水平に分布する母岩の性質に規定されて、広い範囲で均質に特徴だっ見えるのであろう。

large sulfide structure の見られる地点は、ほぼ1988年の鉍床サイト2に等しい。しかし、black smoker の発見された鉍床サイトは1988年には全く見出されていなかった所である。この鉍体は、Dive411で進入してきた西側は、泥質な斜面に尖塔状（時には筒状）の小規模な活動を停止したチムニーが散点的に見られるところから、次第にケ

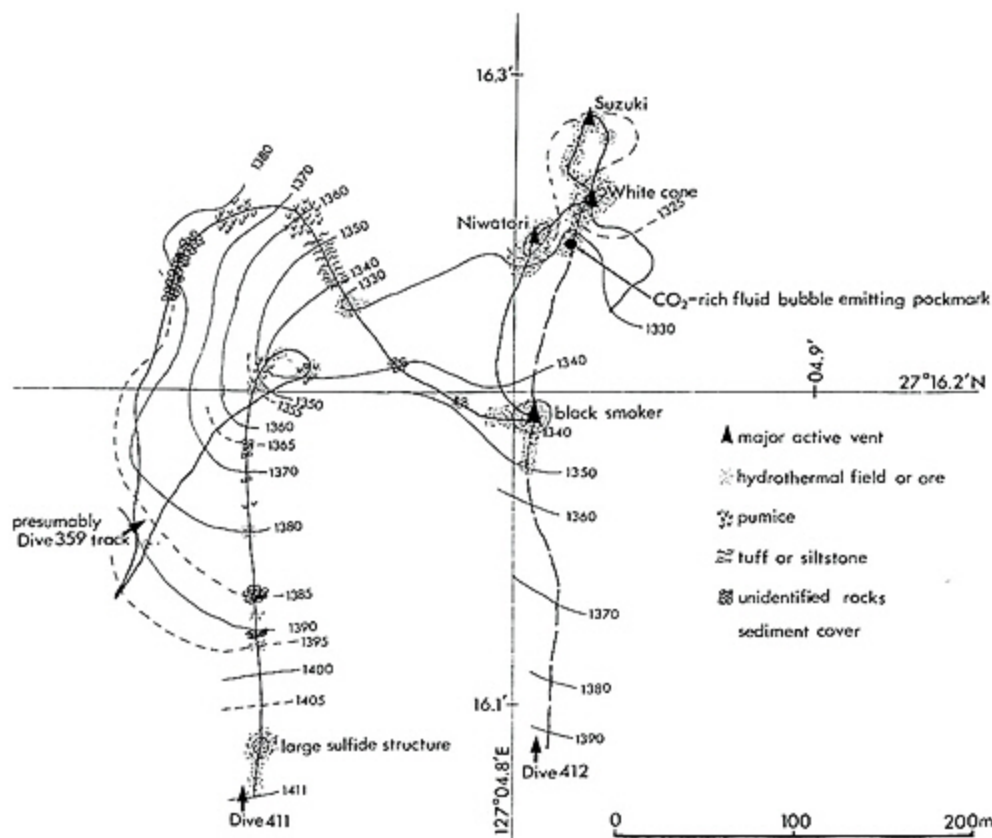


図1 Dive411, 412のルートマップ
Fig. 1 Geologic route map of Dive411 and 412.

ヤリムシに被われた鉱石の集合体になり、活動的な小チムニーと湧出する熱水、シンカイコシオリエビの群集で特徴づけられる活動的な地帯へ、徐々に移り変わる。高度も徐々に増す。しかし、少なくとも北西側と東側の一部は、鉱石礫で作られたかなり急な崖となっている。black smokerはその頂部に位置する。black smokerについては後節で詳述する。

black smokerの載る鉱床サイトと1988年の鉱床サイト1の間はDive411の航跡上では散点的に白色変質帯はあるものの、概して熱水活動の気配の少ない、シルトを主体とする堆積物に被われた海底であった。

3. Dive 412

Dive412は1989年6月13日、丸茂の他に海洋科学技術センターより田代省三、鈴木晋一氏が潜水船要員として乗船して実施された。

着底点より北に向かうと、底質は茶色の泥質から青味を帯びた泥質に移りはじめる。これは弱変質帯が発達していることを示唆するものである。更に北に進むと転石が目立ち始める。水深1360m付近でAFMソーナーに前方の崖の反応が現われ、転石の量が増え始めると同時に変質帯と考えられる白っぽい転石も目立ち始めた。

水深1345mで活動を停止したチムニーが見られ、シンカイコシオリエビも観察された。1340m付近よりシンカイコシオリエビの群集が、小規模な熱水を湧出するチムニー群の周囲に見られ、black smokerまで連続していた。

black smokerを載せる鉱体の北側はDive411の時と同様、散点的に変質帯が発達するだけで、大部分は泥質な堆積物に被われた海底である。鉱床サイト1近くの水深1335m付近で熱水を湧出する小さな尖塔上のチムニーが何本も見られ、その周

囲は不定形な形状をした低平な岩石からなっていた。試料採取を試みたが成功しなかった。しかし破断面から、この岩石は、不純物の多い硫化物ではないかと考えられる。そのような岩石の露出した地帯に接する泥質な海底の中に、直径約1m、深さ約20cmの浅い凹みがあり、白色の変質した粘土層が露出していた(写真7)。凹地の壁で観察されるように周囲の海底を被う茶褐色の泥質堆積物の厚さは、せいぜい数cmしかない。この凹地で柱状採泥を試みている際中に、マニピュレーターが海底を10cm程突き刺した拍子に、海底より「泡」が吹き上がり始めた。更に観察するためマニピュレーターで穴を広げたところ、数カ所から「泡」が断続的に吹き上がった。「泡」の直径は約5mmから1cm。ほぼ連続的に吹き上がるかと思うと止まり、噴出口に「泡」が一個止まった。約数十秒でその「泡」が吹き上がり、またしばらく連続的に「泡」が湧出したが、最初に吹き上がった「泡」は球形ではなく、小さなヘチマのような形をしており、表面に泥質なものを付着させているように見えた。このような伸長した泡は何回か観察された。「泡」は海底面下約10cmのところより湧出した。予測のつかない現象であったのでとりあえず、予備の採泥管内に「泡」を集めたが、上浮の際に水面近くで、採泥管の頂部の穴から気体の泡となって散逸するのが確認された。ひき続く潜航行動でこの「泡」が詳細に観察され、別の地点で発見された自然に湧出する「泡」が採取され、「泡」は二酸化炭素・メタン等よりなる液相流体であると推定されている。伸長した「泡」の外皮は氷結した二酸化炭素で、海面下約10cmに二酸化炭素を主成分とする gas hydrate 層があると推定されている(Sakai et al., 1990)。

以上の結果から推定すると、この白色変質帯の小凹地は、自然に二酸化炭素を主体とする流体を湧出させる時期があり、その湧出によって上の堆積物を吹き飛ばしたか、上昇流のため堆積物がたまり難かったため、写真10に見られるような小凹地を形成したと考えられる。これは、海底からの流体湧出(seepage)によって作られた地形であるから pockmark と呼ばれている微地形(Hovland and Judd, 1988)に分類されるべきものである。この発見は、今後、伊是名海穴に分布す

る変質帯を分類していく上で一つの鍵を提供したと言える。

この pockmark から White cone chimney までの間は、大小の主に活動を停止したチムニーが林立している。

4. ブラック・スモーカーについて

今回発見された black smoker は水深1338mに位置する。写真2の如く(この写真では「煙」は白く写っているが)噴出する熱水が急冷された際に、硫化物の黒い微小な結晶が析出するため、熱水が黒く濁るところから black smoker と名づけられた。「黒煙」を噴出する「煙突」は、東太平洋海膨で発見されているものなど多くは小さな煙突型をしているが、今回発見されたものは、不定形な形をしており、その中に穴が空いている感じで、いわゆる煙突の部分はほとんどない。写真3に見られる側面からの大きさが幅85cm、高さ70cmで穴の径が13cmである。熱水を出す穴も不定形で、どちらかという二連になった円または長方形に近い形をしている。13cmという径はこの長方形の対角線長に近い。写真3で、中央基底部の小さな魚(ゲンゲの仲間?)の頭の先にあるブロックがサンプル411-4である。写真8で右側が写真3の手前側、左側が black smoker 側である。写真3に見られる白い alluvinera の仲間の生物は、潜水船揚収直後に、生物グループの人々によって採取され、写真8、9には写っていない。black smoker の土台をなす鉱体は、写真4のように大小の鉱石礫より成っている。この産状は昨年の鉱床サイト1の鉱体と同じである。鉱石礫には非常に緻密なものがあり、潜水船内より粗粒な結晶が輝くのが見えるものもある。しかし、この地点では、それらに混じって写真4の中央部や、写真10、11、13に見られるような脆い、chimneyの一部と考えられる鉱石がかなり存在している点が異なる。black smoker からの「黒煙」粒子は、写真4に見られるように噴出地点から約1m位までしか及んでおらず、厚さも1cm以下である。ただし、写真4の手前数m下方では、鉱石礫が「黒煙」粒子らしきものに被われた様子が観察できる。また、Dive412の際に black smoker の近傍に設置したマーカーの鐘は約1時間余りの間に急速に「黒煙」に被われる様子が観察された。現在

のところ「黒煙」粒子堆積物の厚さなどから、この black smoker の活動開始時期を推定することはできない。

black smoker より出る熱水の流速を流速計を用いて実測した例 (Converse et al., 1984 LaFlamme et al., 1989) はそれほど多くはない。多くの場合 black smoker のビデオ画像より流速を求めている (Macdonald et al., 1980, McDuff et al., 1989)。この方法の問題点は、熱水が噴出口から出ると、周囲の海水に接する部分に混合層ができるが、この混合層のところの速度は、噴出口から離れるにつれ遅くなる。しかも、この混合層に「黒煙」が生じるので、中心部の速度の速い熱水の動きはほとんど見えなくなる (Converse et al., 1984)。写真 2 でも、噴出口の数 cm 上までしか透明な部分がないのがよくわかる。更に画像上での誤差の問題もある。しかしながら、今回 1/30 秒毎のビデオ画像をコマ送りして、なるべく噴出口に近いところの画像で流速を求める試みをした。流速の測定に用いた粒子は、black smoker の周囲に生息している alluvinera の白い体である。これは時々ひきはがされ、浮遊し、熱水の動きにより生じた周囲の海水の動きに乗って噴出口に近づき、突如熱水に巻き込まれる。その瞬間の動きから推定した。また、時々巻き上げられる噴出口付近の硫化物の断片の動きも参考にした。これから求められた熱水の流速は約 1 m/sec である。この値は流速の下限を与えていると考えるべきであろう。なぜならば、噴出口に近いところと言えども、巻き込まれる粒子の動きは、基本的には混合層のものと考えられるからである。1 m/sec という値は従来の測定値とほぼ同じ (0.6~5 m/sec, 流速計を使った例では 0.6~3 m/sec) である。

black smoker の熱水噴出口の直径を 10cm とし、後の潜航で得られた熱水の温度 320°C (Sakai et al., in press) を基に、Converse et al. (1984) と同じ方法で熱水の湧出量を求めると、5.7kg/sec, この black smoker からの放熱量を求めると、 8×10^6 W となる。この放熱量は、東太平洋海膨の black smoker で求められている値と比較すると、ほぼ平均的なところである。

1989年 7~8 月に実施された地質調査所の、白嶺丸による GH89-3 航海で、鉱床地帯周辺の詳細

な熱流量分布が求められた (Kinoshita et al., in prep)。そのデータを基に、熱伝導のみで熱が失われると仮定して熱水地帯全体の放熱量を見積ると、 10^6 W オーダーの値が得られる。このことは、この一個の black smoker による熱の放出量が、熱水地帯全体の熱の放出量の中で非常に大きな部分を占め、この black smoker の活動の変化が、熱水系全体に大きな影響を与え得ることを示している。この点も、東太平洋海膨などで指摘されていることと共通している (Macdonald et al., 1980, Converse et al., 1984)。

以上の放熱量の計算は、熱水噴出口の径、流速ともに下限の値で行っている。また、熱水は沸騰していないと考えて計算しているため、見積りとしても下限を与えていると考えられる。沸騰していると考えただけで放熱量の見積りは 2 倍近くになる。しかし、1338m (134 気圧) の水深で 320°C の温度は極めて沸騰点に近い。また、熱水には多くの溶存ガスが含まれている (Sakai et al., in press)。Dive411 でも潜水船が浮上する際に、black smoker の根元から得た試料 411-4 から沢山のガスが泡となって散逸する様子が見られた。溶存ガスが多いと沸騰点は下がる。故にこの black smoker から出る熱水が沸騰している可能性は高い。

Dive411, 412 に際して black smoker の周囲を行動した際に、湧出する熱水の中に潜水船が入った例が何回かある。0.42 秒間隔で測定されている STD 記録を見ると、噴出孔の直上 2~4 m では最高温度 31.85°C, 塩分濃度は 50.84‰ から 22.25‰ の間を示す。噴出孔の約 9 m 上方では最高温度 14.52°C, 塩分濃度は 43.19~32.37‰, 約 19 m 上では最高温度 12.53°C, 塩分濃度は 42.14‰~33.73‰ を示す。この高塩濃度と低塩濃度を示すデータは沸騰して 2 相に分離した熱水が急冷凝縮された結果をそのまま示しているようにも見える。しかし、潜水船の上部に取り付けられている STD 装置の構造を検討すると、電気伝導度測定器、水温測定用の白金測温抵抗体、塩分濃度温度補正用サーミスタ (4 個) が直径約 40cm の円周上に各々約 18cm の間隔 (直線距離) で配置されており、1ヶ所に集中していない。水温測定用の白金測温抵抗体の応答速度は 0.3 秒で

あるが、塩分濃度補正用サーミスタの応答速度は2～3秒である。この測定器の配置と応答速度を考慮に入れると、約20cm以下の水塊内の様々な温度の組み合わせがあれば熱水の塩分濃度が周囲の海水と同じでも、先述した塩分濃度変化を作ることは不可能ではない。故に今回のSTDデータから一意的に熱水が沸騰しているという結果を導くことはできない。

東太平洋海膨における海底熱水活動の発見以来、熱水の塩分濃度の多様性は多くの議論を呼んできた。特に深いところにある熱水活動では塩分濃度の高い熱水が卓越し（例えば Von Damm and Bischoff, 1987）、熱水ブルームの中の塩分濃度も高い方に振れることはあっても（Lupton et al., 1985, Little et al., 1987）逆は無いことから何らかの形で海洋地殻中で2相分離した熱水が、別の経路から海中に出ることをモデル化してきた（例えば Von Damm 1988, Bischoff and Rosenbauer, 1989）。最近、発見された塩分濃度の低い熱水を出す熱水地帯でも、熱水噴出口ごとに塩分濃度が異っており（Massoth et al., 1989）。一つの熱水噴出口から2相分離に近い熱水が出ている例は発見されていない。先述したように伊是名海穴のブラックスモーカーの熱水は海底下では沸騰している可能性が高く、少なくともサブクール沸騰はしていると推定される。熱水の挙動を捉える方法として噴出口近くで正確に温度・塩分濃度、pHなどを測定する試みを今後行う価値はあると考えられる。

5. チムニーの生長について

今回、1988年の潜航調査で発見した多くのチムニーを再訪し、チムニーの生長について多くの知見を得た。また、同時に、STDの水深値が、1988年に比べて15m浅くなっていることも判明した。STDの水深値の公称誤差は3%であり、期末入渠の際に更正をしているということなので、この差は人為的なもので、地殻変動で盛り上がったとは考えられない。しかし、1988年、1989年の値のいずれかより正しいかを定める術がないので、本報告での水深は図1も含めて、すべて1989年の実測値に基づいている。

ニワトリ・チムニー：このチムニーは1988年9月2日のDive359で発見され、Dive359及び翌日

のDive360において試料採取がされた。9ヶ月後のDive411で再訪され、写真5に見られるように左端に径約5cm、高さ約20cmの硫化物で構成されていると思われる尖塔が、成長しているのが観察された。

White cone chimney：このチムニーからはまだ誰も試料を採取していない。9ヶ月の間はかなり微妙な肋の張り方、生物のつき方を含めて、基本的な形は全く変わっていない。

スズキ・チムニー：このチムニーは1988年9月2日のDive359で発見され、直後にマニピュレーターで頂部が破壊され、中心に直径数cmの穴が空いて勢いよく熱水が噴出する様子が観察された（加藤幸弘ほか、1989、名前はこのマニピュレーターのオペレーターの名前に由来する）。1989年6月12日のDive411で再訪され、写真6のような姿が観察されたが、同時に1988年9月10日のDive364で、三段チムニーと称されたもの（木村ほか、1989）と同一のものであることが確認された。しかも、Dive364と411で見たものは、基本的に同じ形をしていた。つまり、破壊された直後に噴出した熱水中からチムニーが生長したが（写真6の中央部の段差より上の部分）、8日以内で定常状態に達し、同じ形を保っているということになる。

チムニーから出る熱水の量や性質が基本的に変わっていないことは、ビデオ映像及び生物のつき方が変わっていないことから推定できる。熱水の湧出量が変わらず、チムニーの形が変わらなければ、熱水に含まれていた金属元素はどこに行っただろうか。海水中に出ている訳ではないことは、海水と接するあたりの熱水が全く透明であることから推定できる。熱水の流速はblack smokerに比べて1桁低い10cm/secオーダーである。このように遅い流速で熱水を湧出させて、透明な熱水を湧出しているチムニーの地下では、鉱石の結晶が次第に粗粒になり、より緻密になりつつあると推定できる。

6. ブラックスモーカー近傍の硫化物試料の特徴

Dive411および412において、ブラックスモーカーの基部とその周辺から採取された多数の硫化

物礫について、その特徴的組織と化学組成を記述する。試料採取地点とブラック・スモーカーの位置関係を図2に示した。また重金属元素の化学分析結果を表1に示した。ほとんどの試料に、熱水の通路と思われる不規則な空隙や小規模なパイプ状構造が認められる。中には空隙率が高く海綿状できわめて脆いものがあるが、初成組織の保存状態が良好であることから、礫は僅かに転動したに過ぎないと思われる。採取された試料は、ブラック・スモーカー・チムニーから集中的に流出、およびチムニー下のマウンドから散漫に拡散する熱水から沈澱したものであり、崩落により本来の位置関係から僅かに変位して折り重なったものと考えられる。以下、代表的試料ごとに、形態的特徴、構成鉱物、特徴的組織、化学組成について記述する。

試料のバルク化学組成は、王水分解、硝酸分解、沸酸-硝酸を組み合わせて溶液化したのち、適宜希釈してICP発光分光分析法により測定した。bariteが不溶解残渣として残留することがあったが、この場合は遠心分離により懸濁粒子を分離除去して透明な溶液を用いた。

411-4: ブラック・スモーカーの基部から採取さ

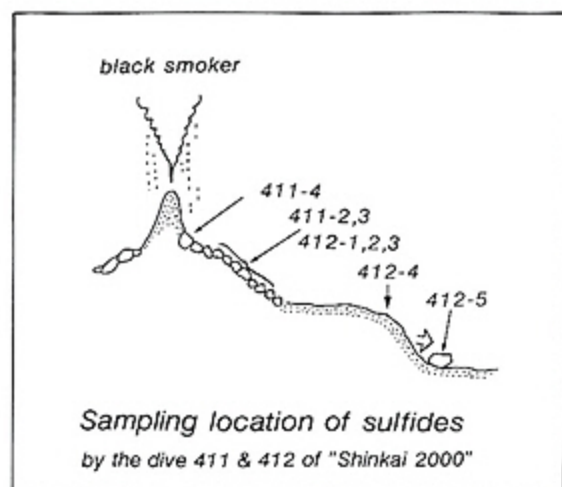


図2 採取された硫化物レキとブラック・スモーカーの位置関係

Fig. 2 Sampling location of sulfide samples around the black smoker

れたもので、多孔質で内部に多数の熱水流路が走っている。海水に面した側は黒い硫化物ダストで覆われている(写真8参照)のに対し、裏側には熱水流路に沿って鮮やかなオレンジ色の物質が沈着している(写真9参照)。黒色のダストは

表1 ブラック・スモーカー近傍の硫化物レキの重金属濃度

Table. 1 Heavy metal concentration in sulfide samples from the vicinity of the black smoker.

	1	2	3	4
	411-4G	411-4D	412-3	412-4
Cu %	1.64	0.02	5.77	7.40
Pb %	6.51	0.11	18.8	20.4
Zn %	14.1	0.16	34.7	31.2
Fe %	1.68	0.03	5.78	5.05
Mn %	0.05	0.00	0.11	0.04
As %	0.46	10.8	0.02	0.14
Sb %	0.33	0.32	0.11	1.40
Cd %	0.07	0.00	0.17	0.17
Hg ppm	250	1070	28.4	1.4
Se ppm	-	8.7	1880	1580
Te ppm	-	1.4	13	19
Tl ppm	58.4	1440	-	-
Au ppm	<0.1	10.7	<0.1	<0.1
Ag ppm	134	172	458	430

1. Accumulated dust from the black smoker mainly composed of sphalerite, galena and chalcopyrite.
2. Orange yellow incrustation lining fractures in dusty sediment. Main components are amorphous arsenic sulfide and barite.
3. Small chimney with porous texture composed of sphalerite, chalcopyrite, galena and barite.
4. Compact massive sulfide ore mainly composed of sphalerite, galena, chalcopyrite, tetrahedrite.

sphalerite, galena, chalcopyrite の微結晶混合物であり、状況から推してチムニー先端から吹き上げる熱水から降下した堆積物である。オレンジ色の物質は、barite と非晶質砒素硫化物からなる。これはきわめて軟らかく、指先で揉むと容易に粉末になる、この試料には、チムニーの先端から勢いよく噴出する熱水 (320°C : Sakai et al., in press) と、チムニー下のマウンドから滲み出す幾分冷却された熱水とがもたらす鉱物種の違いが、端的に表現されている。黒色ダストの厚みはせいぜい1-2mm で下地との分離が困難であるため、ダスト自体の化学分析は実施しなかった。ダストの下地は黒灰色を呈する微粉末の集合体で、過去の降下堆積物と推定される。barite, sphalerite, galena, chalcopyrite, tetrahedrite を主要構成鉱物とする。色合いが淡いのは barite 含有量が高いためである。この部分を411-4Gとして化学組成を示した。構成鉱物から予想されたとおり高濃度のベースメタルを含むが、砒素が0.5%以下、そして金は検出限界以下しか含まれていない。一方、オレンジ色の部分は411-4Dとして化学組成を示したように、ベースメタルの濃度がおしなべて低いのと対照的に、砒素、水銀、タリウム、アンチモニー、金などの浅熱水元素が顕著に濃集している。これらの元素は、ブラック・スモーカーの先端部からも吐き出され、海水中に拡散し、周辺の堆積物表面付近の重金属濃度異常に寄与しているものと考えられる。低流量の熱水通路に沿っては、熱水の温度低下が緩やかに起こるために、化学的性質の異なる溶存元素群が距離的に展開されて沈澱し、より低温領域で沈澱する砒素硫化物が湧出孔付近に濃集したものと解釈される。非晶質の砒素硫化物は金に対する吸着能が高いことから、吸着のメカニズムが金と砒素硫化物の顕著な随伴関係をもたらしたと考える。

412-2 : 試料の曲率からもとの姿を復元すると、直径約10cm のチムニーの断片と考えられる。破断面のエッジは鋭く、ダストによる被覆も表面の酸化も認められないことから、ブラック・スモーカー先端部から落下してあまり時を経っていないものと考えられる。チムニーは主として、sphalerite, chalcopyrite, galena, pyrite で出来

ており、成層構造を示す。最外帯はチムニー壁から直角に外側に向かって成長する繊維状 sphalerite で出来ている。繊維状組織は sphalerite が当初は wurtzite として沈澱したことを物語っている。チムニー壁の内部では、熱水流路側に向かって pyrite, chalcopyrite の量が増える。内壁の一部には、金属光沢を放つ pyrite 結晶が1-2mm 程度の大きさに成長している (写真10参照)。また、チムニーの内側のみならず破断面も厚さ数 mm の anhydrite 層に覆われていることから、チムニー先端部が落下する前にクラックが存在し、そこから熱水が側方に滲み出していたこと、また、そのクラック自体が崩壊面となったことが推定される。

412-3 : 黒色、多孔質の硫化物集合体で、sphalerite, galena, chalcopyrite と少量の barite で構成される。直径約3cm 長さ約10cm のチムニー状突起があり、その先端は閉塞しているが内側に空洞が残されている (写真11参照)。砒素硫化物に富むオレンジ色の物質は、この空洞中ではなくチムニーわきのクラックに沿って沈着している。チムニーの閉塞により熱水の流動経路が劇的に変化した結果であろう。小規模チムニーのバルク化学組成を表1に示した。顕微鏡下では、sphalerite, galena, chalcopyrite が絡み合った特徴的な樹枝状結晶成長が認められ、高温熱水からの急速成長を物語っている (写真12参照)。

412-4 : ブラック・スモーカーを載せた高まりの縁辺部から採取された礫で、進化したチムニー基部の破片と思われる。全体的に緻密で空隙が少ないが、僅かに残された空隙は線状に伸びており、これに沿って粗大な sphalerite 結晶が濃集している (写真13参照)。顕微鏡下の観察によればこの sphalerite は結晶粒径が大きいだけでなく、等方的形態に成長し、殆どモノミネラリクな集合体を形成する (写真14参照)。また、結晶の粗大化した部分は全体としては円筒状に伸長して見えることから、もともとは熱水の流路だったと判断される。一方、これを取りまく微粒子の部分は、412-3と同様に鏡下で sphalerite, galena, chalcopyrite の絡み合った樹枝状成長組織を示す

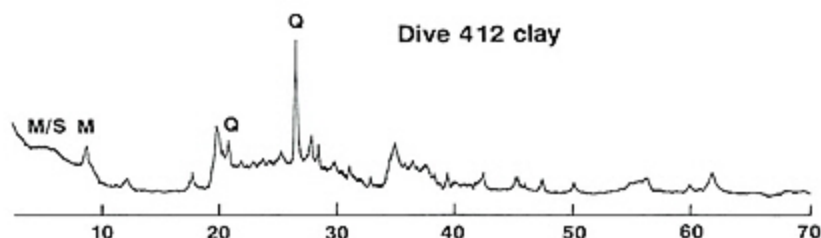


図3 白色変質帯から得た粘土のX線回折結果

M:マイカ (mica), M/S:マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物 (mica/montmorillonite mixed layer minerals)

Fig. 3 XRD patterns of clay from the white-colored alteration zone.

ことから、チムニーの壁だったと思われる。当初、大きな熱水流束に支えられて急速に成長したチムニーの内部では、結晶の成長による流路の閉塞のため流速を減じた熱水から、より低い過飽和度のもとで結晶成長が行われるようになり、この組織が形成されたものであろう。チムニー内部で結晶が大きく成長してゆくに連れて、流路の先端部で砒素硫化物の沈澱条件が準備されていたものと想像される。細粒部の化学組成を表に示した。分析値からは、tetrahedriteの含有も示唆される。

7. 液体二酸化炭素を放出した白色変質帯の鉱物組成

液体二酸化炭素の「泡」を放出した白色変質帯から採取した粘土試料の、水鏡処理物のX線回折結果を図3に示す。マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物、マイカおよび石英の回折線が検出された。また同一試料を分析電子顕微鏡を用いて調べた結果、ナトリウム長石、カリ長石、マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物および自然硫黄の存在が確認された(図4-1~5)。これらのうち、自然硫黄は“湯の華”のような白色粉体として産することが確かめられた。

X線回折にあたっては理学電気製RAD-rA型ディフラクトメーターを用い、Cu管球で40kv・150mAの出力下で、スリット系 $1^{\circ}-1^{\circ}-0.3\text{mm}$ 、走査速度 $8^{\circ}/\text{分}$ 、時定数0.2秒で実施した。分析電子顕微鏡による試料観察・化学分析にあたっては、フィリップス社製透過型電子顕微鏡

CM/12STEMにEDAX社製PV9900システムを付属させて、加速電圧100kvで実施した。

1989年夏に実施された白嶺丸のGH89-3航海では、大口径コアラーやグラブを用いて、伊是名海穴の海底熱水性鉱床の変質帯の水平的広がりに関する重要な知見が得られた。それによれば、硫化物が産する鉱床の中心部の変質は、マイカや、マイカ/モンモリロナイトの混合層鉱物の存在によって特徴づけられる。また、鉱床の周辺部は、カオリナイト、ハロイサイト、モンモリロナイトが自然硫黄や重晶石とともに産する(丸茂ら、準備中)。

二酸化炭素の「泡」を放出した白色変質帯を特徴づける粘土鉱物は、マイカ及びマイカ/モンモリロナイト混合層鉱物であり、これらは鉱床中心部に産するものである。

秋田県下の黒鉱鉱床においてもマイカや、マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物は鉱体の近くに産することが多い(Shiramizu, 1974, Date et al., 1983)。従って、今回発見された白色変質帯は、鉱床中心部に近い変質帯に対比されるものであろう。

変質帯から二酸化炭素の「泡」が放出される現象は極めて興味深いものであるが、このことは、黒鉱鉱床の成因を考える上でも重要な示唆を与えてくれる。秋田県下の黒鉱鉱床のケイ鉱から得られる石英には、二酸化炭素に富んだ(300mmol程度)液体包有物が見いだされており、(Pisutha-Arnond and Ohmoto, 1983)、鉱液中の二酸化炭素濃度が高かったことを示唆している。

19-JUN-90 10:38:57 SUPER QUANT
 RATE=14150CPS TIME= 28LSEC
 FS= 1881/ 1881 PRST= 100LSEC
 B =0.412-clay zone-1 irregular-3

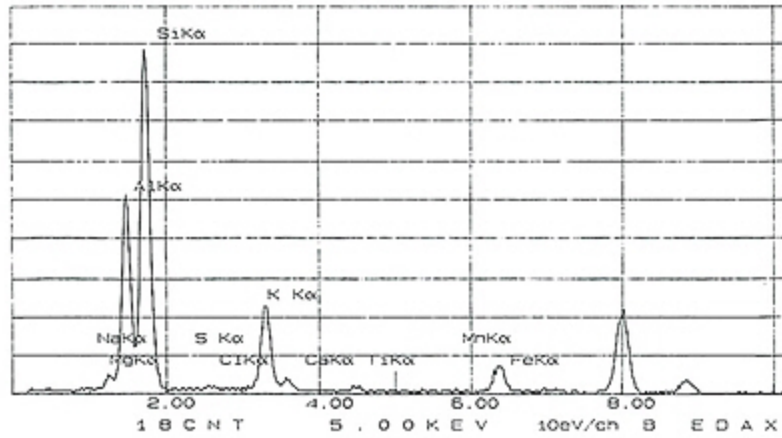


图4-1

19-JUN-90 10:56:39 SUPER QUANT
 RATE= 0CPS TIME= 44LSEC
 FS= 1699/ 1699 PRST= 100LSEC
 B =0.412-clay zone-1 irregular-6

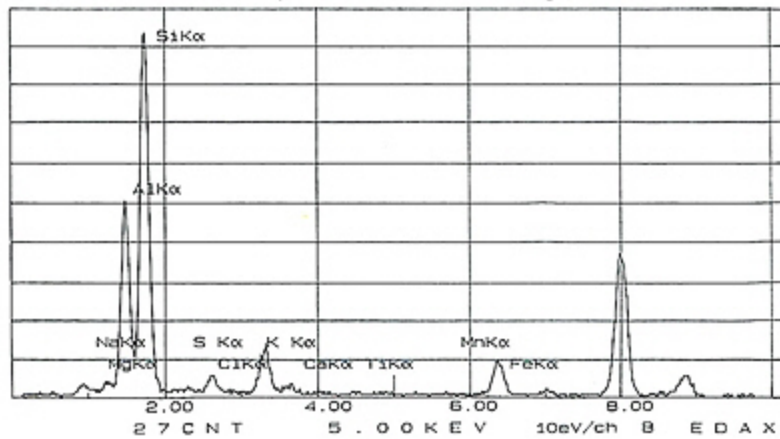


图4-2

19-JUN-90 10:33:49 SUPER QUANT
 RATE= 0CPS TIME= 39LSEC
 FS= 1720/ 1720 PRST= 100LSEC
 B =0.412-clay zone-1 irregular-2

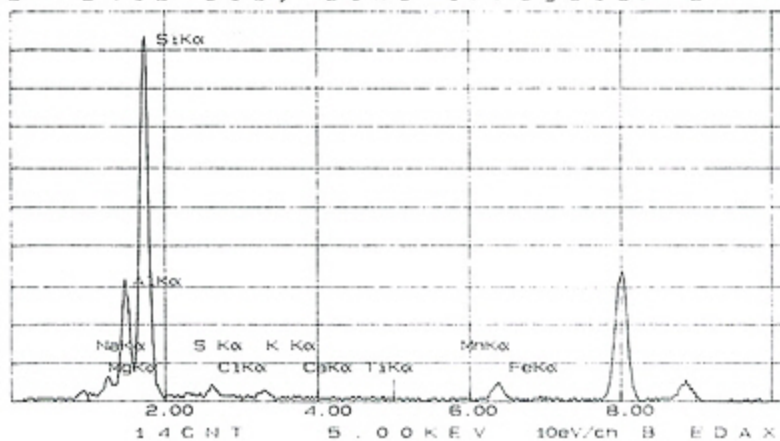


图4-3

19-JUN-90 11:01:58 SUPER QUANT
 RATE = 0 CPS TIME = 53 LSEC
 FS = 559 / 559 PRST = 100 LSEC
 B = D412-clay zone-plate-2

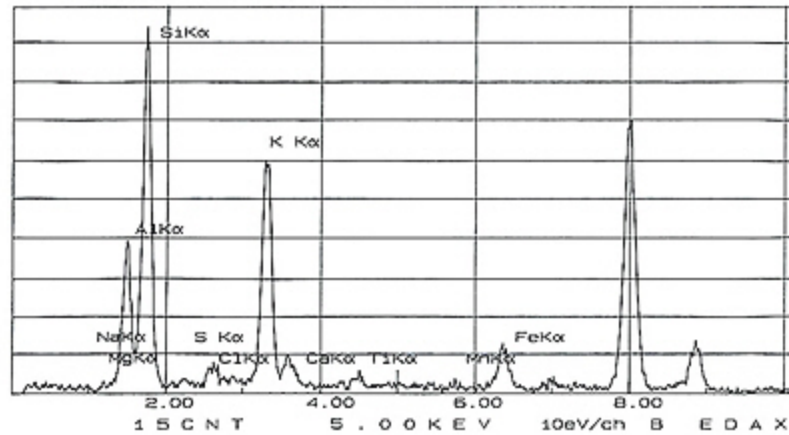


図4-4

19-JUN-90 10:27:52 SUPER QUANT
 RATE = 0 CPS TIME = 37 LSEC
 FS = 2058 / 2058 PRST = 100 LSEC
 B = D412-clay zone-sulfur-1

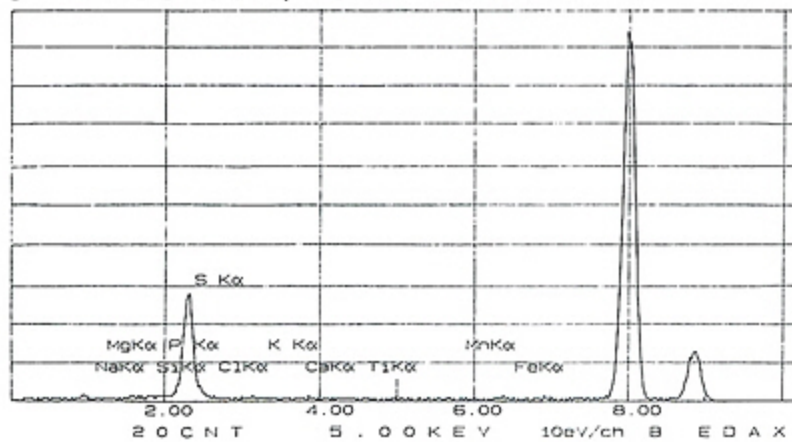


図4-5

- 図4 白色変質帯に産する各種鉱物のX線化学分析結果 上より下に向かって
- 1 : マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物 (マイカ層の多いもの)
 - 2 : マイカ/モンモリロナイト混合層鉱物 (モンモリロナイト層の多いもの)
 - 3 : カリ長石
 - 4 : ナトリウム長石
 - 5 : 自然イオウ

- Fig. 4 EDX patterns of minerals from the white-colored alteration zone
- 1 : Mica/montmorillonite mixed layer minerals (mica layer rich)
 - 2 : Mica/montmorillonite mixed layer minerals (montmorillonite layer rich)
 - 3 : Potassium feldspar
 - 4 : Sodium feldspar
 - 5 : Native sulfur

こうしたことは今回発見された二酸化炭素の「泡」を放出する変質帯の存在と極めて調和的である。

8. まとめ

Dive411, Dive412で見出された black smoker, pockmark, チムニーの生長時間などは、いずれも伊是名海穴の海底熱水性鉱床に生じている process と全体像を考える上で、多くの視点を与えるものである。他のデータと合せて、熱水過程をより深く理解できるようになることが期待できる。

謝 辞

前年度に引き続き、「しんかい2000」による潜航調査の機会を与えていただきました海洋科学技術センターの皆様、厚く御礼申し上げます。潜水調査船「しんかい2000」の段野司令以下運航チームの方々、また、母船「なつしま」の越智船長以下乗組員の方々には色々お世話になりました。乗船期間中、同乗された東大海洋研究所太田秀教授にはスチル写真タイマースイッチをお貸しいただき、また生物について色々御教示いただきました。

海洋科学技術センター田中武男氏、琉球大学木村政昭教授をはじめ、南西諸島の行動に参加された方々に複製の許可を頂いて検討させていただいた潜航ビデオは大変参考になりました。東大海洋研究所、酒井均教授からは投稿中の論文のコピーをいただきました。鶴見精機(株)須山哲氏には STD 装置について色々御教示いただき、またデータの処理もしていただきました。以上の方々には大変感謝します。

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, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 197-210.
- Bischoff, J. L. and Rosenbauer, R. J., 1989. Salinity variations in submarine hydrothermal systems by layered double-diffusive convection. *Jour. Geol.*, 97, 613-623.
- Converse, D. R., Holland, H. D. and Edmond, J. M., 1984. Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21°N) : implications

for the heat budget and the formation of massive sulfide deposits. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69, 159-175.

- Date, J., Watanabe, Y. and Saeki, Y., 1983. Zonal alteration around the Fukazawa Kuroko deposits, Akita Prefecture, Northern Japan. *Econ. Geol. Monogr.*, 5, 365-386.
- Delaney, J. R., Lilley, M. D., McDuff, R. E. and Baross, J. A., 1988. Standing pools of 350°C fluid and large seafloor sulfide structures (abstract). *EOS*, 69, 1497-1498.
- Delaney, J. R., McDuff, R. E., Baross, J. A., Lilley, M. D. and Goldfarb, M. S., in press. Trapped pools of buoyant 350°C fluid : a new submarine hydrothermal environment.
- Halbach, P., Nakamura, K., Wahsner, M., Lange, J., Sakai, H., Käselitz, L., Hansen, R.-D., Yamano, M., Post, J., Prause, B., Seifert, R., Michaelis, W., Teichmann, F., Kinoshita, M., Märten, A., Ishibashi, J., Czerwinski, S. and Blum, N., 1989. Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulfide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, 338, 496-499.
- Holvand, M. and Judd, A. G., 1988. Seabed pockmarks and seepages. 336pp., Graham & Trotman.
- 加藤幸弘, 中村光一, 岩淵洋, 橋本惇, 金子康江, 1989. 沖縄トラフ中部, 伊是名海穴の地形と地質——1987, 88年の潜航結果——, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 163-182.
- 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, 同上223-244.
- LaFlamme, B., Delaney, J. R., McDuff, R. E., Miller, V., Robigou, V., Schultz, A., Smith, M., Wells, J., Fondrk, J. and McClain, J., 1989. Observations and experimental studies in the Endeavour hydrothermal field - Summer (abstract). 1988. *EOS*, 70, 1160-1161.

- Little, S. A., Stolzenbach, K. D. and Von Herzen, R. P., 1987. Measurements of plume flow from a hydrothermal vent field. *Jour. Geophys. Res.*, 92, 2587-2596.
- Lupton, J. E., Delaney, J. R., Johnson, H. P. and Tivey, M. K., 1985. Entrainment and vertical transport of deep-ocean water by buoyant hydrothermal plumes. *Nature*, 316, 621-623.
- Macdonald, K. C., Becker, K., Spiess, F. N., and Ballard, R. D., 1980. Hydrothermal heat flux of the "black smoker" vents on the East Pacific Rise. *Earth Planet. Sci. Lett.* 48, 1-7.
- Massoth, G. J., Butterfield, D. A., Lupton, J. E., McDuff, R. E., Lilley, M. D. and Jonasson, I. R., 1989. Submarine venting of phase-separated hydrothermal fluids at Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge. *Nature*, 340, 702-705.
- McDuff, R. E. and Delaney, J. R., 1989. A time-series of fluid output from black smoker hydrothermal vents, Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge (abstract). *EOS*, 70, 1161.
- 中村光一, 加藤幸弘, 木村政昭, 安藤雅孝, 許正憲, 1989, 伊是名海穴海底熱水性鉱床の分布, 産状——1988年の知見のまとめ——海洋科学技術センター試験研究報告, 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム報告書, 183-189
- Nautilau Group, The, 1990. Hydrothermal activity in the Lau Basin. *EOS*, 71, 678-679 (no. 18, May 1).
- Pisutha-Arnond, V. and Ohmoto, H., 1983. Thermal history, and chemical and isotopic compositions of the ore-forming fluids responsible for the Kuroko massive sulfide deposits in the Hokuroku District of Japan. *Econ. Geol. Monogr.*, 5, 523-558.
- Sakai, H., Gamo, T., Kim, E.-S., Tsutsumi, M., Tanaka, T., Ishibashi, J., Wakita, H., Yamano, M. and Oomori, T., 1990. Venting of carbon dioxide-rich fluid and hydrate formation in mid-Okinawa Trough backarc basin. *Science*, 248, 1093-1096.
- Sakai, H., Gamo, T., Kim, E.-S., Shitashima, K., Yanagisawa, F., Tsutsumi, M., Ishibashi, J., Sano, Y., Wakita, H., Tanaka, T., Matsumoto, M., Naganuma, T. and Mitsuzawa, K., in press. Unique chemistry of the hydrothermal solution in the mid-Okinawa Trough Backarc Basin, *Geophys. Res. Lett.*
- Shirozu, H., 1974. Clay minerals in altered wall rocks of the Kuroko-type deposits. *Mining Geol., Spec. Issue* 6, 303-310.
- Tivey, M. K. and Delaney, J. R., 1986. Growth of large sulfide structures on the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 77, 303-317.
- Von Damm, K. L., 1988. Systematics of and postulated controls on submarine hydrothermal solution chemistry. *Jour. Geophys. Res.*, 93, 4551-4561.
- Von Damm, K. L. and Bischoff, J. L., 1987. Chemistry of hydrothermal solutions from the Southern Juan de Fuca Ridge. *Jour. Geophys. Res.*, 92, 11334-11346.

(原稿受理 1990年7月3日)



写真1, Photo. 1 Large sulfide structure, 1400m.



写真2 ブラック・スモーカーの熱水噴出と「黒煙」
Photo. 2 Emitting black-smoker vent fluid.

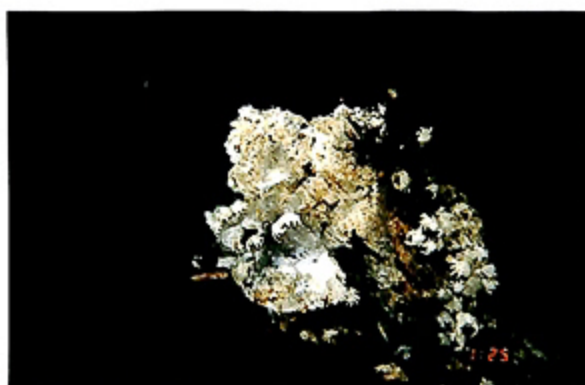


写真3 ブラック・スモーカー全景
Photo. 3 black-smoker chimney.

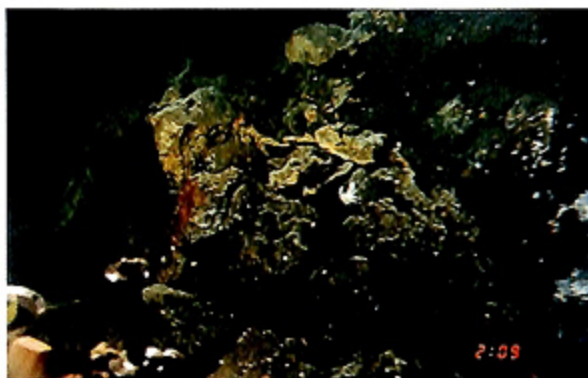


写真4 ブラック・スモーカーの周辺に鉱石と「黒煙」
粒子堆積物
Photo. 4 Ore gravels and sulfide particle deposits
around the black-smoker vent.



写真6 スズキ・チムニー, 1989年6月12日
Photo. 6 Suzuki chimney in June 12, 1989.

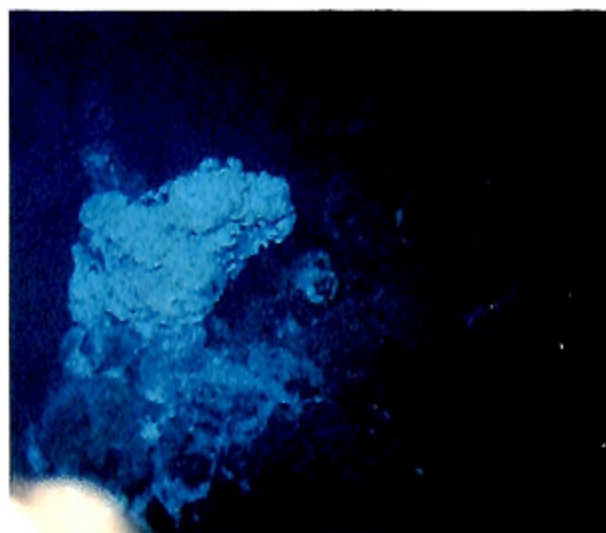


写真5 ニワトリ・チムニー, 1989年6月12日
Photo. 5 Niwatori chimney in June 12, 1989, which
shows small spire growth in nine month.



写真7 二酸化炭素に富む液体湧出変質帯 (ポック
マーク)
Photo. 7 Pockmark emitting CO²-rich fluid.

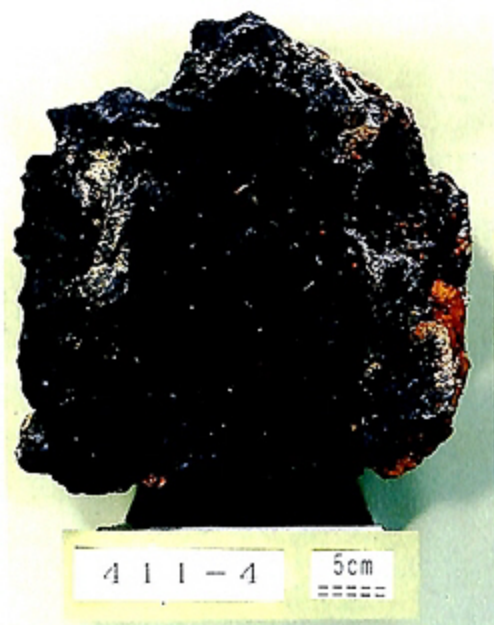


写真8 ブラック・スモーカーの基部から採取された硫化物試料
411-4の上面（海水と接している側）から見たもの
チムニー頂部から吹き上げる黒色の微細粒子が表面を覆っている。

Photo. 8 Upper surface of porous sulfide (411-4) taken from the foot of the black smoker. Surface is covered with fine grained sulfide dust.



写真9 ブラック・スモーカーの基部から採取された硫化物試料
411-4の下面（マウンド内部に向いた側）
オレンジ色の非晶質砷素硫化物の沈着が著しい。

Photo. 9 Bottom surface of porous sulfide (411-4) taken from the foot of the black smoker. Cracks are lined by amorphous arsenic sulfide (orange yellow)

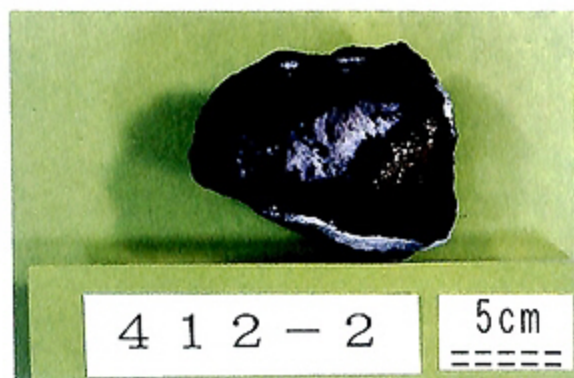


写真10 硫化物チムニー先端部の破片。恐らくブラック・スモーカー頂部から落下したものと思われる。黒色部は閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱、黄鉄鉱よりなる。白色部には硬石膏。

Photo. 10 A fragment of the extrem point of sulfide chimney.



写真11 小規模なチムニーを伴った多孔質硫化物レキ (412-3)。閉塞した先端部をもつチムニーの内側には円筒形の空間が取り残されている (矢印)。

Photo. 11 Porous sulfide breccia with small chimney structure (412-3).



写真12 小規模チムニー (412-3) の壁面を構成する硫化物の反射顕微鏡像
 写真の横幅が0.5mm。黄色が黄銅鉱、灰色が閃亜鉛鉱、白色が方鉛鉱である。樹枝状組織は急速成長を物語る。

Photo. 12 Photomicrograph of chimney wall (412-3). Dendritic growth texture indicates a simultaneous rapid growth of sphalerite, galena and chalcopyrite.

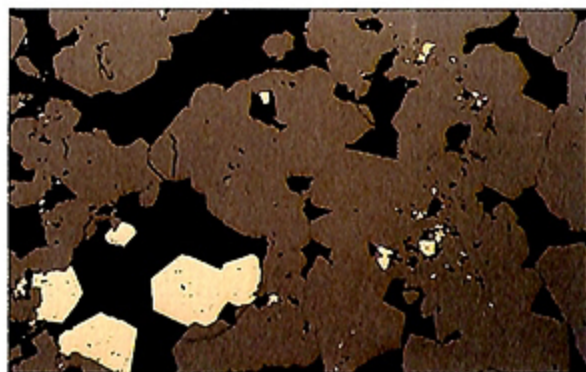


写真14 熱水流路に沿って粗大化した閃亜鉛鉱結晶の顕微鏡像 (412-4')
 写真の横幅が0.5mm。灰色が閃亜鉛鉱、クリーム色が黄鉄鉱、黒色部が空隙である。樹枝状成長組織がなく、個々の結晶粒子は独立した自形結晶をとっている。

Photo. 14 Photomicrograph of well developed idiomorphic sphalerite crystals filling hydrothermal conduit (412-4'). No dendritic growth texture is observed.

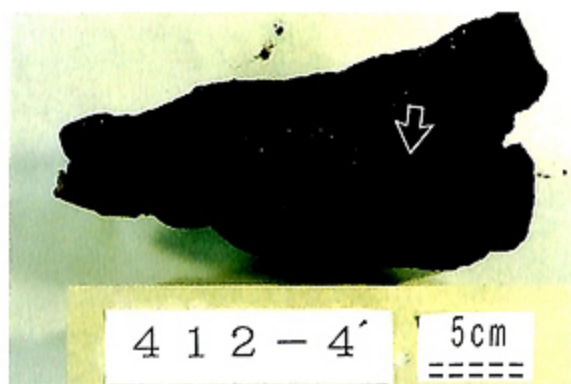


写真13 緻密な塊状硫化物レキ (412-4')
 熱水流路に沿って粗粒な閃亜鉛鉱が成長している (矢印)。

Photo. 13 Massive sulfide breccia (412-4') showing selective crystal growth of sphalerite along the conduit of hydrothermal water.