

中部沖縄トラフ, 伊平屋凹地(クラムサイト)における熱水性マウンドの構造的, 鉱物学のおよび化学的特徴からみたマウンドの成長過程について: 「しんかい2000」第486, 487, 488回潜航報告

蒲生俊敬^{*1} 酒井 均^{*2} 石橋純一郎^{*3} 大森 保^{*4} 千葉 仁^{*5}
下島公紀^{*6} 中島和夫^{*2} 田中善孝^{*2} 益田晴恵^{*7}

堆積物に覆われた海底熱水系として注目されている伊平屋凹地(クラムサイト)に潜航し, 海底のマウンドやチムニーの形状を精査, あわせてそれらの鉱物学的・化学的特徴を明らかにした。伊平屋凹地の熱水活動域は「ひさし」状に水平に伸びた平板の積み重なりによって特徴づけられ, チムニー状に盛り上がったベント中心も, かさぶた状のひさしが幾重にも積み重なった形状をしている。これらのひさし状構築物は, 噴出速度が比較的穏やかな熱水が水平方向に湧出することによって成長するものと見られ, 代表的な埋積海嶺であるカリフォルニア湾・ワイマス海盆の熱水チムニーの形状と酷似している。200℃以上の熱水を噴出し, 現在成長中の「ひさし」もしくはチムニーは, 硫化物を含む硬石膏, 炭酸カルシウム, および不定形シリカから構成され, ベント中心から遠ざかるほど「ひさし」は低温で形成されるため硬石膏は含まれなくなる。伊平屋凹地の海底で観察された様々な熱水活動の形態をもとに, 当海域の熱水マウンドとチムニーの成長過程について考察した。

Growth mechanism of the hydrothermal mounds at the CLAM Site, Mid Okinawa Trough, inferred from their morphological, mineralogical, and chemical characteristics

Toshitaka GAMO^{*8} Hitoshi SAKAI^{*9} Jun-ichiro ISHIBASHI^{*10}
Tamotsu OOMORI^{*11} Hitoshi CHIBA^{*12} Kiminori SHITASHIMA^{*13}
Kazuo NAKASHIMA^{*9} Yoshitaka TANAKA^{*9} and Harue MASUDA^{*14}

- *1 東京大学海洋研究所
- *2 山形大学理学部
- *3 東京大学理学部
- *4 琉球大学理学部
- *5 岡山大学地球内部研究センター
- *6 電力中央研究所
- *7 大阪市立大学理学部
- *8 Ocean Research Institute, University of Tokyo
- *9 Faculty of Science, Yamagata University
- *10 Faculty of Science, University of Tokyo
- *11 Faculty of Science, University of the Ryukyus
- *12 Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University
- *13 Central Research Institute of Electric Power Industry
- *14 Faculty of Science, Osaka City University

The CLAM site, one of the representative sediment-hosted submarine hydrothermal fields in the world, was investigated by the submersible "SHINKAI 2000" in order to elucidate morphological, mineralogical and chemical characteristics of the hydrothermal mounds and chimneys in detail. A unique morphology at the CLAM site is that the bottom is almost covered with multi-layered "eaves" which extend horizontally from the center of active mounds, which themselves are composed of overlapping thin eaves erupting hot fluids from their edges. The eaves seem to be grown by moderate horizontal emanation of hydrothermal fluids inside the caves. Such bottom morphology of the CLAM site resembles closely with that of the Guaymas Basin, Gulf of California, which is the most typical sediment hosted ridge system so far reported. From XRD measurements, it was found that active eaves erupting hydrothermal fluids of more than 200°C consist of anhydrite, calcite, Mn calcite, amorphous silica with trace sulfides, while inactive eaves rather distant from active mounds are free of anhydrite probably due to low formation temperatures. By summarizing the observational and analytical results, a growth mechanism was presumably constructed for hydrothermal mounds and eaves at the CLAM site.

1. はじめに

沖縄トラフは堆積物に覆われた拡大軸（埋積海嶺）の一つで、その海底熱水活動の化学的性質は、堆積物を欠いた東太平洋海膨や大西洋中央海嶺の熱水系とは著しく異なることが明らかにされている（Sakai et al., 1990; Gamo et al., 1991）。これまでに沖縄トラフで発見された熱水活動域のうち、クラムサイト（伊平屋凹地）（図1）では、別の熱水域である伊是名海穴（JADE サイト）を特徴づける硫化物・硫酸塩チムニーは見られず、海底は炭酸塩を主体とするクラストによって覆われている（田中ほか, 1989）。それぞれの活動域から採取された熱水の化学組成や同位体組成からみても、クラムサイトではJADE サイトとは性質の異なった熱水循環系が形成されていると考えられる（Sakai et al., 1990; 藩生ほか, 1990; 石橋ほか, 1990）。

本研究に先立ち、1989年に行われた「しんかい2000」潜航による伊平屋凹地からの熱水の採取では、採水中の温度計測に問題があり、化学組成と温度との相関関係から熱水エンドメンバーの化学組成を正確に推定するには至らなかった。そこで熱水採水システム（酒井ほか, 1990）の温度センサー（白金抵抗体）部を改良し、今回1990年に再び同海域の潜航調査計画を立てて、熱水の温度と化学組成との関係を明らかにするための採水を行

うことにした（潜航第486, 487回）。ところが、第486回潜航では採水器が作動せず、さらに第487回潜航中に採水器の回転バルブが予想外に浸水破壊されてしまった。そこで今回は熱水の採取と化学分析を断念し、その代わりにクラムサイト熱水活動域の中心部の詳しい観察を行うことと、相互に位置関係のはっきりした海底物質（ひさし状の温泉沈着物や露岩など）を多数採取することに努めた。潜航第488回では熱水域の北方の熔岩丘まで探査域を広げ、熱水活動の空間的広がりも調査した。

本報告では、まず3回の潜航と採取された試料について詳しく記載を行う。次にこれらの潜航によって観察されたクラムサイトの海底の全般的特徴をまとめ、採取した岩石試料の外観および鉱物学的・化学的性質を明らかにする。最後にこれらの結果をもとに、同海域の熱水性マウンドとチムニーの成長過程の復元を試みたい。なお伊平屋凹地の海底の記載にあたり、我々の潜航に先だって行われた潜航第477回（オブザーバー：海洋科学技術センター、満澤巨彦氏）、478回（同、許正憲氏）、および479回（同、長沼毅氏）のビデオ記録も参照した。

2. 潜航記録

以下に「しんかい2000」潜航第486, 487, およ

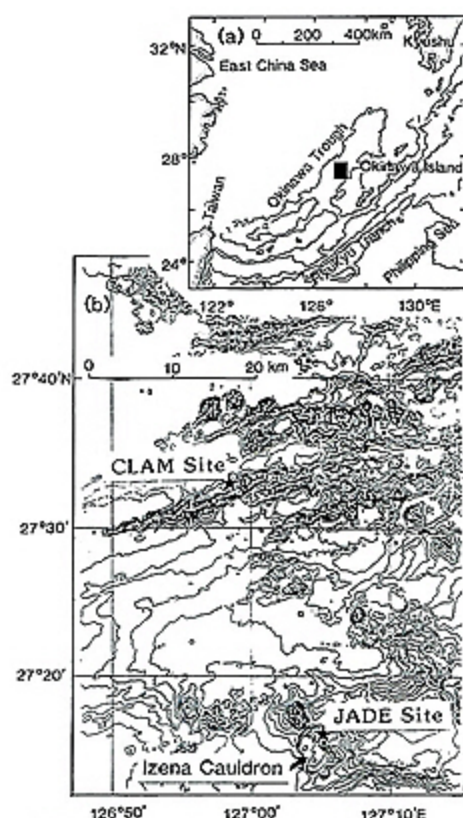


図1：沖縄トラフの位置 (a) と、中部沖縄トラフの海底地形図 (海上保安庁水路部による) 上の伊平屋凹地 (CLAM site) の位置 (b)。

Figure 1. Location of the Okinawa Trough (a), and topographic map of the mid-Okinawa Trough area (from the Japan Maritime Safety Agency) showing the location of the CLAM site (b).

び488回潜航 (図2に航跡図を示す) の作業記録を示す。すでに我々の潜航以前に行われたクラムサイトの潜航調査により、熱水活動が特に顕著にみられる場所として、ピラミッドチムニー (図2の測点A, 写真1~3), KIKOチムニー群 (図2の測点B, 写真6), 及びベビーチムニー群 (図2の測点C, 写真7) などが見いだされていた。そこで第486及び487回潜航では、これらの地点を主なターゲットとして観察とサンプリングを行った。図3にこれらの熱水ベントを含め、クラムサイト中心部の大まかな海底の特徴を示す。

2-1. 潜航第486回 (1990年6月10日)

潜水船船長：鈴木晋一
船長補佐：広瀬重之

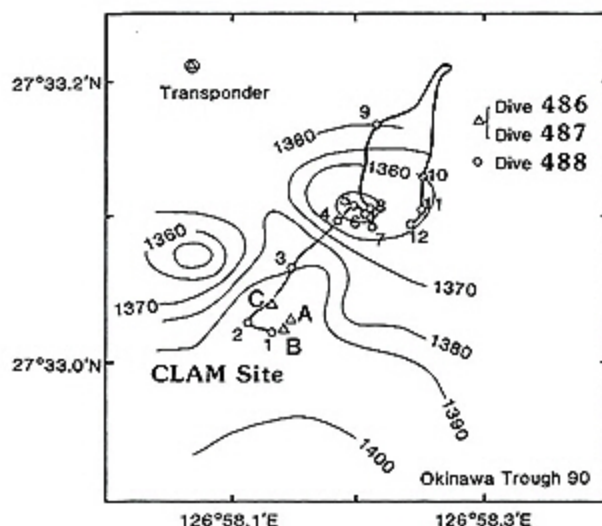


図2：「しんかい2000」第488回潜航の航跡と海底地形。△の点は潜航486と487で観察した熱水噴出域の位置 (A：ピラミッドチムニー, B：KIKOチムニー, C：ベビーチムニー) を示す。

Figure 2. Bathymetry map of the CLAM site showing the transect of dive 488. Triangles A, B, and C indicate the location of PYRAMID chimney, KIKO chimney, and BABY chimney, respectively, which were observed during the dives 486 and 487.

オブザーバー：石橋純一郎

2-1-1. 潜航作業・映像

時刻	観察記録
09:18	ハッチ閉鎖
09:38	潜航開始
11:42	ピラミッドチムニーを左手にみてその周囲をまわる。
11:45	目標とする噴出孔 (写真5の白矢印, ピラミッドチムニーの東側) を通過。噴出孔の周辺は赤色に変色している。
11:49	噴出孔の全景。帯状の変色帯が認められる。
11:50	生物の密集したブロック (熱水が出ているのは見えない)。
11:51	噴出孔のクローズアップ (下方の噴出孔からは熱水が間欠的に噴出している) 生物はきわめて少ない。
11:57	噴出孔に接近中。

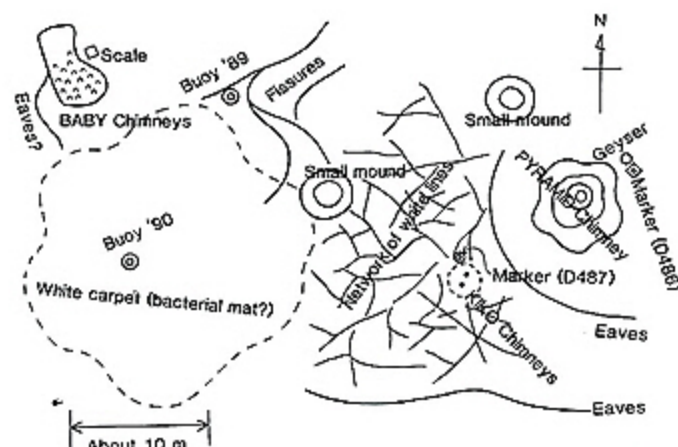


図3：伊平屋凹地（CLAM Site）中心部の地図。ビデオ映像をもとに作成したおおまかな図で、距離や形は厳密に正確ではない。

Figure 3. Generalized map showing the central part of the CLAM hydrothermal site.

- | | |
|--|----------------------------------|
| 12:02 着底（図2の測点A）。 | 13:29 ビラミッドチムニーから遠ざかる。 |
| 12:03 ベンチマーカー（D487、石橋）をピラミッドチムニーの東北東～北東側の麓に設置。 | 13:32 白色変質帯を通過中？ |
| 12:06 着底点からみたピラミッドチムニー。左手に別の熱水噴出孔がある。 | 13:41 D477のブイを視認。 |
| 12:14 温度計測を開始。熱水噴出の様子。 | 13:43 ブイ近傍を通過。 |
| 12:18 エビがトラップの周りに群がっている。 | 13:45 二つブイを確認。まきあがる白色変質物。 |
| 12:20 温度計を熱水中にかざす試み。 | 13:45 ベビーチムニーを視認。 |
| 12:30 艇が斜面下方に向かって流される。 | 13:46 ベビーチムニー全景およびその周囲（写真7）。 |
| 12:39 噴出孔下方の映像（黄色の変質帯）。 | 13:50 着底。熱水の噴出を確認（測点C）。 |
| 12:45 温度計測を再開。 | 13:51 熱水噴出孔の直上に温度計をかざす。70℃。 |
| 12:53 温度78～83℃を記録。間欠的に熱水が出ているためか、温度が安定しない。 | 13:55 温度計を海底に置く。79.5℃。 |
| 12:57 熱水採取を開始。温度70～92℃。 | 13:59 採水（3本目）開始。86.7℃。 |
| 12:58 採水器出口の蒸留水確認できず。 | 14:05 採水（4本目）開始。 |
| 12:59 一旦ポンプを止め、1本目の採水を再度試みるが成功せず。 | 14:06 採水しながら、M式採泥器（付録参照）による底質採取。 |
| 13:01 噴出孔の周囲の風景。 | 14:11 採水（5本目）開始。89℃。 |
| 13:02 1本目採水終了。 | 14:12 柱状採泥器による底質採取（ベビーチムニー内）。 |
| 13:04 2本目採水開始。温度60～70℃。 | 14:16 採水（6本目）開始。 |
| 13:05 採水を中断。 | 14:18 チムニー変質帯とその外側の境界。 |
| 13:08 艇が流されはじめる。 | 14:22 採水作業終了。93.4℃（最高温度）。 |
| 13:13 再び採水管を噴出孔にセット。温度68～73℃。 | 14:25 ベビーチムニー全景。少し黄色がかっている。 |
| 13:14 また艇が流されて噴出孔から遠ざかる。 | 14:26 ベビーチムニー個体のアップ映像。 |

- 14:30 白色変質帯を横切る。
 14:31 ピラミッドチムニーを視認。
 14:33 ピラミッドチムニーと KIKO チムニー周囲の密集したわれめ。
 14:34 KIKO チムニーからの熱水噴出を視認。
 14:37 KIKO チムニーわきに接近して温度計測(図2の測点B)。
 14:41 一瞬100℃を記録。
 14:42 ピラミッドチムニーに向かう。
 14:46 最初の着底点(マーカー)を視認。
 14:56 離底。
 15:46 浮上。
 16:15 ハッチ開放。

2-1-2. 採取試料

ベビーチムニー物質 (M 式採泥器)
 同上 (柱状採泥器)

2-2. 潜航第487回 (1990年6月11日)

潜水船船長 : 桜井利明
 船長補佐 : 赤沢克文
 オブザーバー : 蒲生俊敏

2-2-1. 潜航作業・映像

時刻	観察記録
09:30	ハッチ閉鎖。
09:48	潜航開始。
11:00	海底視認 (1395m)。
11:01	小規模のマウンドより熱水のゆらぎ (ピラミッドチムニーの南側20~30m?)。熱水湧出孔を中心に、ハオリムシ様の白色の生物が円形の噴水状に密集。海底面には、厚さ10cm 程度の薄いプレート状のクラストが何層にも積み重なっているような構造が顕著に見られ、割れ目も多い。コシオリエビ散見。
11:03	ピラミッドチムニーを確認 (写真1)。周囲をひとまわりして観察。着底位置の検討。
11:20	チムニーに接近。全体が揺らぎに包まれているが、活動は頂上付近よりは麓の辺りの方が強い。頂上から斜面にかけてコ

- シオリエビがびっしり付着している (写真3)。
 11:26 チムニーの南東側の麓に着底 (測点 A, 1395m)。チムニーの中心から外向きにひさし状のでっぱりが積み重なっており、ひさしの下側は空洞でイガイやエビが密集している。ひさしが折れて落ちている部分もある。
 11:34 生物採取容器を設置。
 11:39 温度計の記録開始。チムニーの南側には、陥没してできたと思われる深い空洞があり、その手前に残された部分が、堤防のように盛り上がって見える。空洞の内側から新しいひさしが熱水を盛んに噴出している。この熱水の温度測定を開始 (写真4)。
 11:43 最高温度70℃。
 12:04 1 本目の採水開始。温度は25~35℃を細かく変動。噴出孔が細く、ゆらぎが振れる度に温度が変化する。採水開始後間もなく、ポンプから排出されるはずの蒸留水が見えなくなる。
 12:13 2 本目の採水開始。蒸留水出ず。一時中断してやり直したが、状況変わらず。再び中断し、採水筒を一つ先送りする。採水再開、蒸留水出ず。
 12:22 採水作業終了。
 12:23 熱水を噴出しているひさし部分のサンプリング (D487-A)。マニピュレーターで掴むと脆く崩れる。折れた後からは激しく熱水が噴出。サンプリングを4 回行う。
 12:38 サンプリング終了。最後に取ったひさし試料の内側には、明らかに熱水の通過していたと思われるくぼみがあった。
 12:47 生物トラップを設置し直す。
 12:49 ピラミッドチムニーの先端部を見おろす。周囲が黒くマンガン酸化物(?)に覆われた円柱形のでっぱりで、コシオリエビが周り (特に西側に多い) にとりついている。先端にはかつて熱水が噴出していた穴らしき窪みがあるが、そこからゆらぎは見えない。

- 12:50 ピラミッドチムニーでの作業終了。
- 12:57 ピラミッドチムニーの東側約10mにも、似たような地形の高まりが3つ並んでいる（北側のものが最も活動的）のが見える。
- 13:02 KIKO チムニー視認（測点B）。ほぼ南北方向に2本のチムニー。南側は背が高く（15～20cm）、北側はほとんど海底面に接している。南側のチムニーは、前日に比べて形状が異なっている。南側のチムニーの方が熱水の噴出が激しい。
- 13:11 （昼食、休憩）
- 13:20 マーカー（石敢当、Dive 487）設置（写真6）。
- 13:22 熱水の温度計測開始。南側の背の高いチムニーの直上10cmで70℃、直上5cmで150℃。
- 13:30 チムニー折れる（ビデオではよく見えない）。
- 13:32 採水（4本目）開始。蒸留水出ず。最高温度、214℃記録。
- 13:37 採水（5本目）開始。蒸留水出ず。
- 13:47 折れた KIKO チムニーを M 式採泥器で採取（D487-C、写真13）。
- 13:55 チムニー周辺の海底を M 式採泥器でこすったが、堅くて何も取れず。
- 13:57 KIKO チムニーでの作業終了。
- 14:06 '90設置のブイの数 m 西側（白色変色帯）に着底（位置は図2ではほとんど測点Cと同じ）。白色物質を M 式採泥器で採取。白色物質は厚さ 5 mm 程度でふわふわしているが、その下の底質は黒く硬い。
- 14:15 白色物質を柱状採泥器で集める。白色物質の下は固くて刺さらない。表面の白色部分のみ、こまめに刺しまくって採取。ここでの作業終了。
- 14:20 移動しながらベビーチムニーを観察（熱水湧出は、KIKO チムニーに比べて遙かにおだやか）。
- 14:29 ピラミッドの直上を南から北方向に通過（写真2）。
- 14:38 生物トラップを一旦回収し、ピラミッドチムニーの北西斜面に着底（測点A）。

- トラップにイガイをつぶして入れる。
- 14:43 北西～西側斜面のひさし岩石（イガイつき）をサンプリング（D487-B）。
- 14:43 北西斜面で蟹サンプリング。
- 14:47 生物トラップの蓋を閉めて回収（エビ1匹）。
- 14:52 北西側麓の大きな陥没穴の手前部分（D487-D：通称「つけもの石」）を採取。
- 15:01 西へ約100m 移動して、離底。
- 15:58 浮上。
- 16:23 ハッチ開放。

2-2-2. 採取試料

（岩石試料）

487-A：ピラミッドチムニー斜面で現在熱水を噴出して成長中のひさし部分（8断片）。

487-B：ピラミッドチムニー麓の活動のほとんどないひさし部分。

487-C：KIKO チムニー本体（写真13）

487-D：ピラミッドチムニー麓の活動のほとんどないひさし部分（大きいため通称「つけもの石」。切断面を写真12に示す）。

（生物試料）

バクテリアマットとみられる白色物質（M式採泥器による）

同上（柱状採泥器による）

蟹——1

イガイ——487-Bに22匹、487-Dに49匹

エビ——1

2-3. 潜航第488回（1990年6月12日）

潜水船船長：鈴木晋一

船長補佐：広瀬重之

オブザーバー：酒井 均

2-3-1. 潜航作業・映像

時刻	観察記録
09:19	ハッチ閉鎖。
09:44	潜航開始。
10:54	熔岩の露出する泥質海底に着底、北進開始。

- 11:02 ピラミッドチムニーを南より視認。
- 11:20 ピラミッドの直上を通過する。周辺を旋回し KIKO チムニー、白色変色域、ベビーチムニー群を視認した後、北よりピラミッド直上を通過し KIKO チムニーの南数メートルの地点 (図2, 測点1, 水深1395m) に着底。本地点では KIKO チムニーよりほぼ水平にテラス状に延びる白色沈殿物層が途切れて、層厚約10cmの断面が東西方向に露出している。興味あることはこの第1層の下に更に黒色の第2層が存在することである (写真8)。第2層は“しんかい2000”の着底点を含めこの地点の海底を広く覆っているらしい。第2層と第1層の境界にそって水の“ゆらぎ”が随所でみられ、境界に沿って熱水が海水中に流れ出していることがわかる。第2層は恐らくマンガン沈殿物と思われる黒色沈殿物で覆われているが、マニピレーターによって一部をもぎ取った試料を観察すると、第1層と同じく炭酸カルシウムを主体とする温泉沈殿物である。
- 11:44 測点1にて上記第1、第2層の岩石試料3個 (試料番号:D488-A, B, C) を採取し離底。白色変色域を越えてベビーチムニー群へ向かう。
- 11:55 ベビーチムニー群南端より数メートル離れた露岩場に着底 (測点2)。露岩より岩石試料1個採取 (D488-D)。
- 12:10 ベビーチムニー群南端に着底、テレビ撮影と昼食。
- 12:38 測点2離底、北の斜面に向かう。
- 12:50 枕状熔岩の急崖を上る (測点3, 1388m)。
- 12:53 海底にシロウリガイと思われる死殻を視認 (測点4, 1360m)。
- 12:58 急崖をなす海底上に大型シロウリガイ、小型ハオリムシを伴う熱水ベントを発見 (測点5, 1347m)。
- 13:01 尾根づたいに頂上に至る (測点6, 1349m)。熔岩塊に覆われた頂上は狭く、着底には適さない。熔岩の間に大型ハオリムシとエビが生息するのが見られる。
- 13:04 頂上より南東に約10m下の急崖に熱水ベントを発見、観察とビデオ撮影 (測点7, 1352m)。熱水は、腰掛け状に水平に成長した厚さ約10cmの白色沈殿物 (50×50cm) の下部より湧出する。白色沈殿物は恐らく炭酸カルシウムと思われる、その上部は細管ハオリムシでおおわれ多数のエビが見られる。
- 13:25 頂上に戻り溶岩露頭に囲まれた直径10mくらいの平坦地に着底。管径約15mmのハオリムシが群棲。「ハオリムシの丘」と名付ける。白色沈殿物で覆われた径30cmの変色帯が1箇所見られる (測点8, 1349m)。
海底の温度計測を行ったが異常なし。
M式採泥管-1にて採泥。
ハオリムシ3体 (D488-E1, E2, E3, このうちE3は岩石試料, D488-Fに付着), 岩石2個 (D488-F, -H), イガイ2体 (D488-G) を採取。
- 14:20 マーカー (石敢当, Dive 488) を設置したのち離底、ハオリムシの丘の北端を目指して航走開始。
- 14:33 ハオリムシの丘の北端の海底視認 (測点9, 1380m)。この地点より丘に沿って北東に約100m航走した後、進路を南に向け丘の北斜面を昇る。海底は大部分が泥で覆われ、熱水活動の兆候はみられなかった。
- 14:54 頂上近くにて白色変色域を発見 (測点10, 1360m)。
- 14:56 再び頂上に至る (測点11, 1358m)。白色小動物が群生する大型チムニーや、マウンドから成るとされる熱水域を遠望するも、離底時間が迫り、詳しく確認できず。しかし一部の海底より、熱水の湧出によると思われる“ゆらぎ”を確認 (写真10)。
- 15:03 離底。
- 15:56 海面に浮上。
- 16:18 ハッチ開放。

2-3-2. 採取試料の記載

(1) 岩石・鉱物試料

D488-A: 18x14x6.5cm。第2層(観察記録参照)をなすと思われる転石、炭酸塩沈殿物。殻長1cm足らずのイガイ3体が付着していた(測点1)。

D488-B: 13x10x4.5cm。第2層をなす黒色沈殿物(マニピュレーターでもぎ取る)。表面をマンガン酸化物にて覆われた炭酸カルシウムを主体とする沈殿物。一部にレアルガー(鶏冠石)らしき黄赤色斑点を含む(測点1)。

D488-C: 7.5x5x2cm。第1層(白色層)の炭酸カルシウムを主体とする硬質沈殿物。レアルガーらしき黄赤色斑点あり(測点1)。

D488-D: 13x29x7cmの多泡性熔岩。1~2mmの厚さの酸化マンガン層にて被覆される(測点2)。

D488-F1: 5x3.5x3cmの多泡性熔岩。泥中より拾う(測点8)。

D488-F2: 14x10x8cm, 同上。ハオリムシが1体付着(測点8)。

D488-H: 22x14x10cm, 同上。露岩よりもぎ取る。F1, F2より数メートル離れた位置より。着底した円形平坦地を囲む熔岩露頭中、最も中心に近いものの1つより採取(測点8)。

(2) 生物試料

D488-E: ハオリムシ3体(測点8)

D488-G: イガイ2体(測点8)

3. クラムサイト(伊平屋凹地)の熱水ベントの地形的特徴

今回の3潜航によって観察されたクラムサイト中心部の熱水系(ピラミッドチムニー、KIKOチムニー、およびベビーチムニー)とそれらにともなう海底の特徴を以下にまとめる。なお、北側の地形の高まり(「ハオリムシの丘」)における熱水活動については、岩石試料の分析がまだ継続中なので、それらのデータを含め別の機会に詳しく考察したい。

3-1. ピラミッドチムニー

チムニーというよりは発達したマウンドと呼ぶべきかもしれない。円錐形のピラミッド状(写真

1)で、全体が熱水のゆらぎに包まれている。頂上付近の活動は弱く、ゆらぎは主として麓の辺りから湧出する熱水が上昇することによる。頂上から斜面にかけてシンカイコシオリエビがびっしり付着している(写真3)。

チムニーの中心から外向きにひさし状のでっぱりが積み重なっており(写真1, 2)、ひさしの下側には空洞が見られ、その中にも熱水性のイガイ、エビ、シンカイコシオリエビが密集している。チムニーの南側や西側には、ひさしが陥没してできたと思われる深い空洞が見られ、空洞の周囲から新しいひさしが成長している(写真4)。このようなひさしの先端には、5~10cmおきに径1cm程度の小さい噴出孔がみえ、ここから熱水が勢いよく水平方向に噴出している(写真4)。このような噴出孔の部分は特に成長が速いため、ひさしを上からみると波うった形をしている。この様なひさしはチムニーのさらに上側にも幾重にもかさぶたのように積み重なっている(写真2)。一方、空洞の手前に残された古いひさしは、ちょうど堤防のように盛り上がりが見える(写真1)。これらのひさしの鉱物組成と化学組成については、5-2.で詳述する。

潜航第486回(D486)では、ピラミッドチムニー東側の麓にある活発な噴出孔(写真5、海底の割れ目が盛り上がったように見える)から、熱水が数秒の周期で「息をして」(間欠的に)噴出しているのが観察された。これは海底下のどこかで熱水の流路がふさがりかけて、噴出孔としては末期的な状態を示しているためかもしれない。D486ではこの間欠泉で、またD487ではチムニー南東斜面の活動的なひさしの部分で熱水の温度測定を行った(写真4)が、得られた最高温度は間欠泉で測定された92℃にとどまった。これは昨年のD416(蒲生ほか、1990)に同チムニーで測定された最高温度216℃に比べるとかなり低い。今後さらに継続観測が必要であるが、チムニーの活動はやや弱まりつつあるのかもしれない。

3-2. KIKOチムニーの特徴と経時変化

KIKOチムニー群は、ピラミッドチムニーの西南西方向約10m、海底に白いひび割れが最も顕著に発達した場所(図3参照)のなかで見つかった

長さ20~30cm程度の小型のチムニー（2~3本）である。海底面の白くひびわれた部分からはかすかに熱水のゆらぎが認められるので、白線に沿ってごく穏やかな熱水の湧出が起きていると考えられるが、KIKO チムニーの周辺はこの様な熱水のしみだしが特に集中している場所といえる（写真6）。

チムニーの先端からは激しく熱水が噴出し、その温度はD487で時間をかけて測定したところ、最高214℃を記録した。この値は、これまでに伊平屋凹地で観測された最高温度220℃（田中ほか、1989）に匹敵する高温である。

D487では、折れたばかりのチムニーを破壊せずに持ち帰ることに成功した（写真13）。チムニーは太さ約5cmのいびつな円筒形で、中央に貫通穴がある。貫通穴は太さ約2cmで円筒の中央ではなく端に片寄っており、壁の最も薄い箇所は厚さ2~5mm程度しかない。壁の厚い反対側にはかつて細い貫通穴があいていてそれが塞がってしまった痕跡があるので、チムニーの成長過程で貫通穴が何本もあいていた時期もあったのであろう。チムニーの外側は黒っぽい部分と白い部分とのまだら模様で、内壁は外壁に比べると白っぽい。X線による鉱物組成と化学分析の結果はまだ出ていないが、肉眼で見る限りではピラミッドチムニーで採取された盛んに熱水を噴出する「ひさし」部分（5-2-1. 参照）と共通点が多い。

潜航487回で観察した2本のチムニーのうち、南側のチムニーの形状が前日の潜航（D486）のビデオ映像に記録されたものと明らかに異なっていた。KIKO チムニーの周辺には自然に倒壊したとみられる古いチムニーの断片が散らばっており、チムニーの成長・破壊のサイクルがかなり速いことをうかがわせる。そこで、KIKO チムニー群の時間的変遷を調べるために、約1ヶ月前にやはり KIKO チムニーの観察を行っている3潜航（D477, 478, 及び479）を加えた5潜航のビデオ映像を詳しく調べた。以下に、それぞれの潜航時に KIKO チムニー群がどのような様であったかを簡単に記載する（図4参照）。

D477（5月11日）：西北西~東南東方向に2本の噴出孔。西北西側（チムニー A）が東南東側

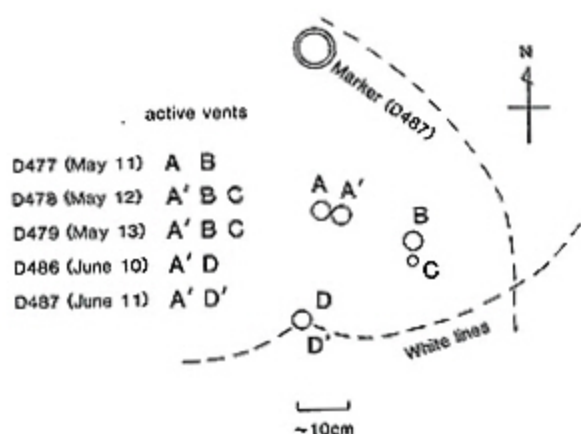


図4：1990年6月~7月にかけての5潜航で観察された KIKO チムニー群の時間的変遷。A, A'—D' はチムニーの位置を示す。詳しくは本文参照。

Figure 4. Short term variation of the location of KIKO chimneys observed by the dives 477 ~487 during June and July 1990.

（チムニー B）の約2倍の高さ。チムニーの外壁は、いずれも黒と白の斑模様。2本のチムニーの外側を海底の白いすじがほぼ楕円状に取り巻いており、2本のチムニーはこの楕円形のほぼ長軸上に並んでいる。両方のチムニーを結ぶ線上とその周辺には、倒壊したチムニーと思われる白と灰色の断片が散乱して積み重なっている。チムニー A のさらに西北西方向にも活動を停止したチムニーが3本固まって立っている。これらの死んだチムニーの外壁は真っ白である。

D478（5月12日）：チムニー A はほとんど活動を停止し、外壁は真っ白に変色していた。その数cm 東南東側にチムニー A の約半分の高さの新しいチムニー A' が新たに成長。このチムニーはかなり黒っぽく見える。頂上のみならず、頂上のすぐ下の壁面にも大きな穴があいていて、両方の穴から熱水を激しく噴出。一方チムニー B は、見かけ上前日とほとんど変化なし。ただし、チムニー B のすぐ南側に、小さいチムニー C が新たに成長し、比較的穏やかに熱水を噴き出している（チムニー C は、チムニー B の根元で枝別れしたものとも見えるがはっきりしない）。

D479（5月13日）：チムニー A' は約2cm、チムニー B は約5cm それぞれ成長。チムニー B の

昨日までの部分（新たに成長した先端5cmを除いた部分）の外壁の色が黒白のまだらから真っ白に変わり、新たに成長した部分は黒っぽい。チムニーA'の成長部分は前日までのチムニーと同じ外観（黒と白のまだら）をしている。チムニーCは特に前日と変化なし。

D486（6月10日）：約1ヶ月経過。2本のチムニーが、北北東-南南西方向に並んでいる。D477-479で見られたチムニーB、Cはもはや存在しない。活動を停止して、すでに倒壊してしまったものと思われる。これに代わって、チムニーA'の南南西方向に、高さ25-30cm程度の背の高いチムニーDが新たに成長。チムニーDは、D477の記載で述べたチムニー群を囲む白いすじのちょうど上にある。チムニーA'は厳密にD479の時と同じものかどうかはビデオからは判定できない。チムニーDは、東側に大きく傾いてから再び上向きに持ち直したような不安定な形をしている。

D487（6月11日）：前日とほぼ同じ位置に2本のチムニー。南側のチムニーはやや背が低くなり（20cm程度）、前日と違ってほとんど直立している。したがってチムニーは前日のものと明らかに別物で、ここではチムニーD'と呼ぶことにする。チムニーD'のすぐ東側と南東方向の少し離れたところに、倒れたチムニーDの断片と思われる円筒形の塊がころがっている。前日の観察後にチムニーDは真中やや下へ付け根付近で折れ、その後10-15cm成長してチムニーD'になったものと考えられる。なお、チムニーD'は、この潜航で採取された（487-C、写真13）。

このようにKIKOチムニー群は、1日に10cm程度の著しい早さで成長しては倒壊することを繰り返す。海底面は倒壊したチムニーの破片が次第に蓄積している。D477で見られた死んだチムニー群や、D478のチムニーAの外壁が真っ白なのは、チムニーの活動終結とともにチムニーの温度が低下することと関係があるのであろう。また、D478のチムニーA'やD479のチムニーBのように、新たに成長したチムニーが黒っぽく見えるのは、硫化物の割合が高いためと想像される。

熱水チムニーの形態変化は、中部ファンデフカ海嶺のAxial Seamountで、細いチムニー（spire）

群の脇に係留した深海カメラが、30時間おきに約1年間にわたって記録を取り続けた例がある（Johnson and Tunnicliffe, 1988）。彼らの観察によると、チムニーは一日に10cm以上という速さで次々と成長し、約1mの高さに達すると外壁の色が黒から白に変わって倒壊することを繰り返したとのことである。本研究で観察されたKIKOチムニー群の経時変化とよく似ている点が興味深い。

3-3. ベビーチムニーと白色変質域

ベビーチムニー群とは、図3に示したクラムサイト中心部の北西側にある、5-10cm程度の小型のチムニー20-30本の集合体である（写真7）。チムニーとそのまわりの海底面はいずれも白色～淡黄色で、チムニーは細かい破片に容易に崩れる。そのような崩れたチムニー物質で覆われた海底面も、白色物質がさらさらと舞い上がりやすい。チムニーの頂上には小さな穴があいており、いくつかのチムニーはこの穴から熱水を穏やかに湧出している。D486で測定した熱水の最高温度は93℃であった。

D486では、ベビーチムニー本体をM式採泥器によってすくい取るようにして採取した（採取中に原形は崩れた）。また海底の白色物質（チムニーが壊れて細粒化したものと思われる）も柱状採泥器によって採取した。採取されたベビーチムニー物質の中には、黄色の破片が多数見られ、これらは主として天然硫黄から成ることが分かった。

天然硫黄が沈積することから考えると、湧出する熱水の温度は120℃（硫黄の融点）以下で、pHはかなり低いと推定される。硫化物の黒色がみられないことから、熱水中の重金属濃度は低いであろう。アルカリニティーも低く、炭酸物質含量は小さいであろう。このような性質を持つ熱水の湧出によって、それまで存在していた炭酸塩のひさし溶けてしまった跡にベビーチムニー群が成長した可能性もある。熱水噴出の中心域（ピラミッドチムニー付近）から少し離れた場所では、化学的性質の異なった熱水循環系が存在するのかもしれない。熱水の採取と化学分析が今後必要である。

D487においては、図3の'90ブイのすぐそばのきわめて顕著な白色変質帯でバクテリアマットと

みられる白色の海底物質を、M式採泥器と柱状採泥器に採取した。この白色物質中にも、ベビーチムニーほど多くはないが、天然硫黄の破片が見いだされた。ここで天然硫黄がみられることは、ベビーチムニー域で湧出していると同様の熱水が、より穏やかに湧出している（チムニーを作るほどの勢いはない）ことを示すのかもしれない。またD477では、白色変色帯の東側にある小規模なマウンドから引き剥したひさし状のクラストの裏側に、硫黄とおぼしき淡黄色が認められた。東側のピラミッドチムニーやKIKOチムニーの周辺には天然硫黄は見つかっていない。この点からも、熱水の化学的性質が伊平屋凹地の東側と西側で異なっていることが示唆される。

5. 伊平屋凹地の形成過程

クラムサイトにみられる熱水性マウンドやチムニーの成長過程を、ピラミッドチムニーとKIKOチムニーおよびこれらの周辺の海底の構造的特徴から推察する。また、クラムサイトの海底面の最も大きな特徴である「ひさし構造」について、その鉱物学的・化学的特徴も含めて、ここで詳しく考察する。

5-1. ピラミッド型チムニーの形成

ピラミッドチムニーから10m程度東側には、同じくらいの規模を持つ円錐形の高まりがいくつか見られ、その一部はすでに活動を停止している。また、ピラミッドチムニーの西側に続く白くひび割れた海底面には、激しく熱水を噴出するKIKOチムニーや、比較的穏やかに熱水を湧出する規模の小さいマウンドがいくつか認められる。これらの小型のマウンドもひさし構造がかさぶたのように積み重なっている。このようにクラムサイトの海底にみられるいくつかの特徴的な構造物は、熱水性マウンドの成長と活動停止に至る一連の過程のそれぞれ特定の時期に対応するものと考えられる。

以下に示すのは、これまでの伊平屋凹地の観察記録から推測されるピラミッド型チムニーの成長過程の一例である（図5参照）。

最初は白色のすじに過ぎなかった場所（図5 a）で、何らかの理由によって深部からの熱水の

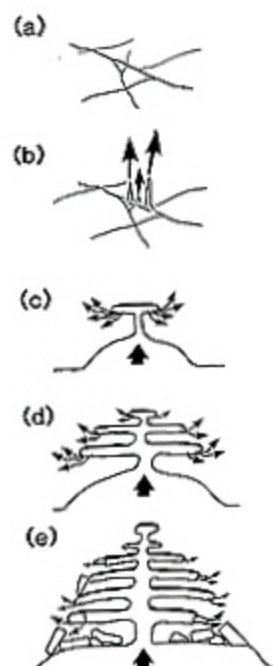


図5：ピラミッド型チムニーの成長過程（a-e）。
Figure 5. Growth stages (from (a) to (e)) presumed for a PYRAMID-type chimney.

供給が局所的に活発化すると、まずKIKOチムニーのような構造物ができる（図5 b）。熱水の噴出はきわめて細いチムニーを通してのみ起こるため、噴出は激しく、チムニーも上に向けて成長する。チムニー体は数日程度の短い時間スケールで成長と崩壊を繰り返し、崩れたチムニー物質の堆積によってマウンドは次第に高まりを増していく。

マウンドの規模が大きくなるにつれてチムニー先端からの熱水の勢いは弱まり、チムニーは塞がりやすくなる。出口を失った熱水は横方向に進路を変え、チムニーは水平に成長して「ひさし構造」が発達する（図5 c）。先端に再び穴があくとチムニーは上方に成長を続け、先端が塞がるとまた横にひさしが伸びる。この繰り返しでひさしが積み重なり、ひさしひさしとの間には空隙が残る（図5 d）。

チムニー先端の高さがピラミッドチムニー級にまで達すると、もはや熱水は先端までほとんど届かなくなり、先端は完全に塞がる。熱水の供給が充分に行われる斜面のひさしのみが成長を続ける。長く伸びすぎたひさしは自重で折れて空隙に

落ち、断面からまた新しいひさしが成長する (図 5 e)。やがて熱水の供給がやむと、それまで硬石膏や炭酸カルシウムで白っぽかった斜面がマンガン酸化物などに覆われて黒ずみ、生物群集もいなくなって死んだチムニーが残る。

チムニーの誕生から活動停止までのタイムスケールはまだ明らかでなく、今後の研究課題である。

5-2. 「ひさし」の成長と鉱物組成

クラムサイトの熱水性沈殿物は、ほとんどが横方向に成長した「ひさし」構造を持っている。これらは、今まさに成長しつつある活動的な熱い「ひさし」(タイプ1, 写真4)と、熱水活動の中心から比較的遠く熱水が極めて穏やかにしみだしているか、あるいは熱水の循環がストップしてしまった低温の「ひさし」(タイプ2, 写真8)とに大別できる。前者はピラミッドチムニー本体を形成し、また後者はさらに周辺に伸びてクラムサイトの海底面を形成している。

5-2-1. ひさし (タイプ1) の特徴

タイプ1のひさしは、潜航487回の際に採取された (D487-A1~8)。写真11は、試料 D487-A7 の切断面の組織を示す。色と組織から肉眼的に3つの部分が識別できる (Zone I~III; 写真11b)。Zone Iは全体として灰色を呈するが、白色柱状の結晶の間を黒色で細粒の結晶が埋めているのがわかる。Zone IIは黒色ないし暗褐色細粒であり、Zone IIIは白色粗粒の結晶からなる。顕微鏡とX線回折の結果、それぞれのZoneは以下に記すような特有の鉱物組成を持っていることが分かった。

Zone Iは、5 mm 前後の柱状ないし放射状の硬石膏を主体としている。硬石膏の劈開に沿って炭酸塩鉱物が生じており、さらに100~200 μ mの自形の石膏が点在している。特に石膏が存在する付近では硬石膏の組織が乱れ、炭酸塩鉱物も微粒の集合体となることから、石膏は硬石膏よりもあとの生成であると考えられる。X線回折の結果、炭酸塩鉱物は菱マンガン鉱であった。これは、EPMAの元素濃度マッピングで、Ca濃度が比較的低くMnが多いことと調和的である (図6,

7)。

Zone IIは、細粒の硫化鉱物と炭酸塩鉱物より成る。硫化鉱物には、針状で最大100 μ mの磁硫鉄鉱、自形~半自形で最大200 μ mのアラバndaイト (MnS)、および粒状で50~100 μ mのCu-Fe-S系鉱物が確認された。炭酸塩鉱物はX線およびEPMAのマッピングによれば、そのほとんどが菱マンガン鉱である。硫化鉱物はZone III (方解石)と接する部分に多く沈殿している (図8)。アラバndaイトの周囲や鉱物の粒間には結晶性の低い不透明~褐色半透明の鉱物が存在している。これはおもに菱マンガン鉱の変質によってできたMnハイドロイトであると思われる。この試料中でZone IIが最も黒色である原因は、これらの微粒の硫化物やMnハイドロイトのためであろう。なお、Zone IIIは0.5~1 mmの方解石がモザイク状に組合わさっており、結晶の境界付近にはしばしば空隙がみられる。方解石結晶のリムの部分にはMnが濃集しており (図7)、EPMAの半定量の結果これは菱マンガン鉱であった。

このようにD487-A試料の鉱物組成は、硬石膏、石膏、方解石、菱マンガン鉱、磁硫鉄鉱、アラバndaイト、Cu-Fe-S系鉱物、Mnハイドロイト(?)と比較的単純である。しかしその形成過程は、上記の観察結果からみて複雑なものであるらしい。採取試料が充分でないため、なお今後の調査が必要であるが、今回の測定データをもとにタイプ1のひさしの形成過程を推定すると以下のようになる。

まず硬石膏が炭酸塩や硫化鉱物に交代されていることから、この試料の中では硬石膏が最も早く沈殿したと考えられる。硬石膏中にMn oxide (?) が包有されていることから、硬石膏の晶出時は比較的低温・酸化的であったと考えられる。多分熱水湧出の早期に海水と接することにより沈殿したのであろう。Zone IIの硫化鉱物はZone IIIの方解石の末期に晶出したと思われることから、硬石膏の沈殿後おそらく温度上昇にともなって方解石の生成が始まり、それに引き続いて一部の硬石膏の溶解とともに菱マンガン鉱や硫化鉱物が沈殿したのと考えられる。この頃にはかなり温度も高く還元的であったのであろう。さらに熱水の供給が部分的に弱まることにより酸化が進み、既

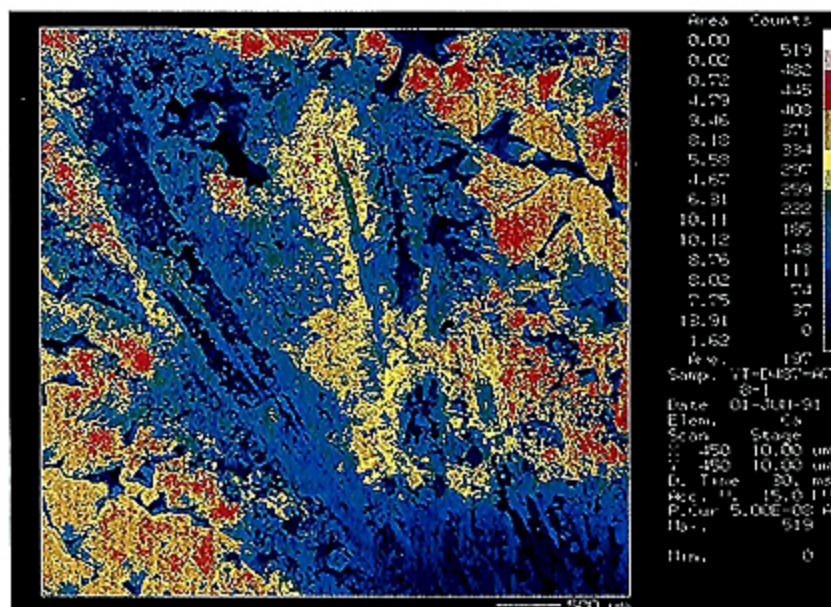


図6：EPMAによる元素濃度マッピング (Ca)。赤～オレンジ色のところは方解石，緑～黄緑色は硬石膏にはほぼ対応している。

Figure 6. Concentration map of Ca by EPMA. Areas with Red to orange color and those with green to yellowish green color correspond to calcite and anhydrite, respectively.

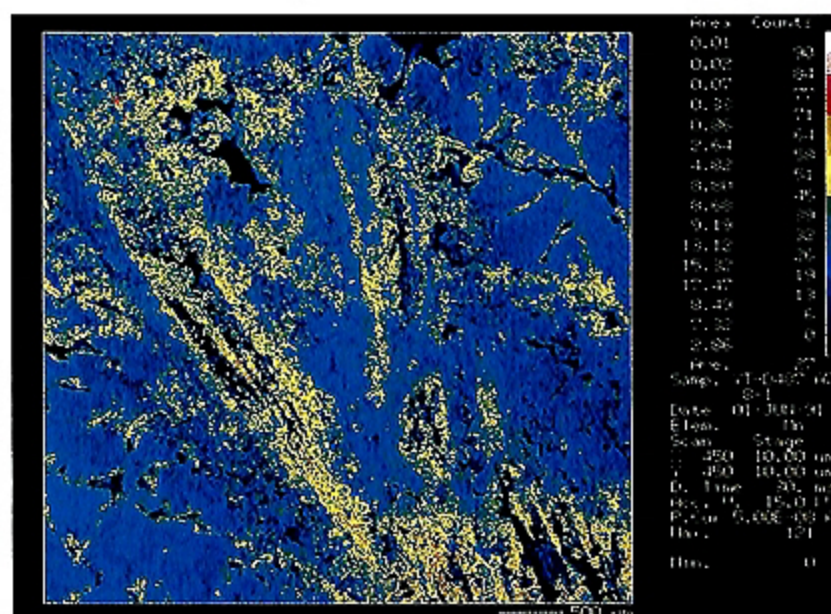


図7：EPMAによる元素濃度マッピング (Mn)。方解石のリム部 (右上と左下) や割れ目周辺で Mn 濃度が高い。

Figure 7. Concentration map of Mn by EPMA. Mn is concentrated along the rims of calcite as well as near the fissure.

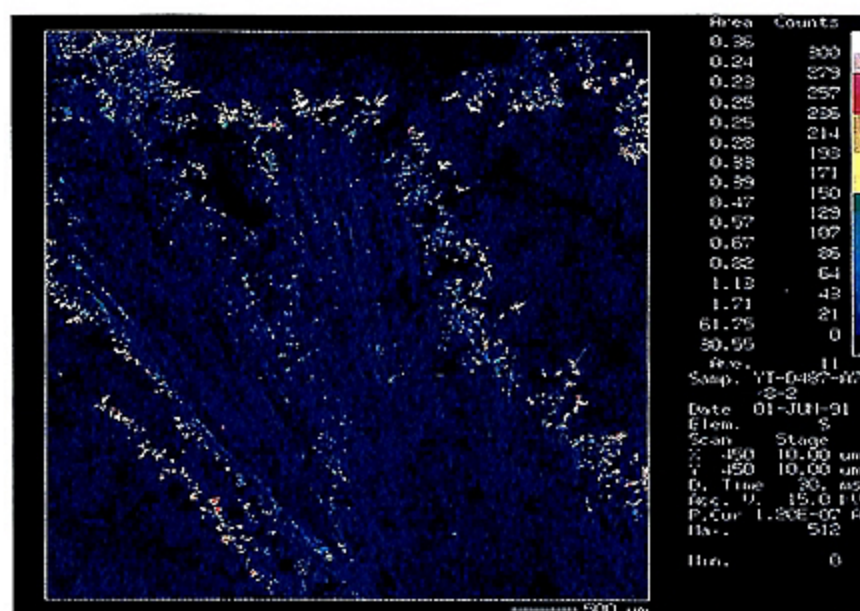


図8：EPMAによる元素濃度マッピング(S)。白色～赤色は硫化鉱物、水色は硬石膏と石膏に対応している。

Figure 8. Concentration map of S by EPMA. Areas with white to red color and those with light blue color correspond to sulfides and anhydrite plus gypsum, respectively.

存の含 Mn 鉱物が変質し Mn ハイドロイト (?) が沈殿したものと思われる。

以上まとめると、硬石膏の沈殿 (Zone I) → 方解石の沈殿 (Zone III) → おもに硬石膏の交代による硫化鉱物・菱マンガン鉱の形成 (Zone II) → アラバナイト・菱マンガン鉱の変質による Mn ハイドロイトの形成 (Zone I, II) となる。ひさしの成長にともなって熱水の通過する経路もこきざみに変化し、それが鉱物分布をより複雑なものにしたと考えられる。

本試料から産出した鉱物のうち、磁硫鉄鉱とアラバナイトは沖縄トラフからは初めてのものであり、EPR のようにかなり還元的な熱水活動も一部で起こっていることをうかがわせる。生成環境についてさらに定量的な議論を行うために、鉱物の定量分析、同位体分析、流体包有物分析を、多くの試料について今後さらに行う必要がある。

5-2-2. ひさし(タイプ2)の特徴

写真12に、タイプ2のひさしの典型例として、

ピラミッドチムニーの麓で採取した487-D 試料の断面を示す。肉眼観察により、断面の組織は5つの層に大別できる(写真12のZone-A~E)。ひさしのほぼ上側半分のZone-AおよびB(白色～乳白色)は組織が緻密であるが、下半分のZone-C~E(白色、乳白色～黒色)はきわめて空隙に富んでいる。これはひさしの上側には熱水が浸透しにくく、下側の空隙を通して横方向に流れていたことを示している。Zone-Fは、Zone-Eによく似た黒色層である。なお写真12に示した断面の左端にはZone-A~Cを貫くひび割れがみられ、熱水がここだけ上向きに通り抜けた跡とも考えられる。

X線分析によると、Zone-A,Bは主として方解石やマンガン方解石で構成されており、Zone-Aには所々に赤色の辰砂が不定形のシリカとともに細長く入り込んでいる。一方Zone-C~Eは、白色(Zone-C)～乳白色(Zone-D)の2層と、乳白色層の中に板状の黒色物質(写真12では針状に見える)が0.1~1 mm 間隔で細かく貫入している層(Zone-E)とに大別される。白色～乳白色

層は方解石、マンガン方解石、不定形シリカなどから成る。一方黒色部分は、脈状の針鉄鉱とそのまわりに付着する硫化物（黄鉄鉱、閃亜鉛鉱）から成る。産状からみて、針鉄鉱はかつて熱水の通路に沿って生成した黄鉄鉱が、後で酸化されたものと推定される。タイプ1のひさしと異なり、タイプ2のひさしは硬石膏を含んでいない。これはタイプ1のひさしよりも低温で成長するためであろう。

各ゾーン毎に代表的な部分のバルク試料を一つずつ（A-1、B-1、C-1、D-1、E-1、F-1）カットし、予備的に化学分析を行った結果を表1に示す。Zone-A、Bの緻密層の主成分はシリカで、空隙の多いZone-C～Eにはシリカは比較的少ないことが分かる。硫化物を形成する銅、亜鉛、鉛は、Zone-E（およびF）にきわめて濃集している。これらの3元素とアルミニウムとの間には相関関係が認められ、またナトリウムとアルミニウムもよい相関を示す。これらの特徴は、ひさしの先端部で熱水と海水が接触した際、Zone-E（F）において硫化物と粘土鉱物（スメクタイト）が同時に形成されたことを示唆している。その後Zone-D～Aがこの順番に沈積したのであろう。なお、辰砂の存在を反映してZone-Aのみ水銀の濃度が高い。

488-A 試料（ピラミッドチムニーから約10m離れた場所のひさし）の断面は、表面が487-D試料よりはるかに厚くマンガン酸化物に覆われているが、断面を調べると487-Dとほぼ同じ外観と化学組成を示す。

表1. 試料 D487-D の化学組成

Table 1 Chemical composition of D487-D

D487-D	A-1	B-1	C-1	D-1	E-1	F-1
SiO ₂ (%)	74.8	45.7	19.9	11.7	13.7	
Al ₂ O ₃ (%)	0.46	0.29	0.22	0.19	1.33	0.65
Fe ₂ O ₃ (%)	0.28	0.44	0.98	3.35	11.29	3.23
Na ₂ O (%)	0.73	0.39	0.13	0.14	2.09	1.3
K ₂ O (%)	0.19	0.12	0.03	0.03	0.53	0.3
V (ppm)	37	50	66	82	88	57
Cr (ppm)	27	43	59	67	74	45
Ni (ppm)	224	27	42	35	30	40
Cu (ppm)	94	34	41	50	4904	857
Zn (ppm)	159	266	518	1563	22600	6780
Sr (ppm)	221	29	44	37	85	22
Ba (ppm)	1487	641	17	15	4431	1206
Hg (ppm)	169	n.d.	n.d.	n.d.		n.d.
Pb (ppm)	<200	256	338	941	22800	5839

5-2-3. ワイマス海盆との比較

クラムサイトに特徴的な「ひさし」構造は、カリフォルニア湾のワイマス海盆の海底熱水系と酷似している (Lonsdale and Becker, 1985; Peter and Scott, 1988)。ここでは、厚さ500mに達する有機物に富む堆積物を貫通して熱水が噴出している。ワイマス海盆の海底では、円柱形のチムニーの側面から熱水が水平方向にも湧出して「ひさし (eaves)」構造が発達し、中にはひさしが建物の屋根のように何層にもわたって張り出しているチムニー（パゴダ（寺院）チムニーと呼ばれる）もある。マウンドの多くは一枚もしくは数枚のひさしが積み重なっており、それぞれのひさしの厚さは約10cm、幅0.5～2mの大きさで、ひさしはほぼ水平かわずかに下方に垂れ下がっている。ひさしが成長する理由は、チムニーの先端が鉱物の晶出によって塞がるために、行き場のなくなった熱水が否応なしに横方向に向きを変えて噴出するためと考えられている。ひさしの内部には高圧の熱水が充満し、空隙に富むひさしの下側から熱水が吹き出しているのが観察される (Lonsdale and Becker, 1985)。

クラムサイトにおいても、熱水性マウンド表面がすぐに透水性の低い物質で覆われるため、熱水はその下側を横方向に移動せざるを得ず、ひさし構造が発達するのであろう。5-2-2. で述べたように、クラムサイトのひさし（タイプ2）の断面は、下側がきわめて空隙に富んでおり、熱水が流動していたことをうかがわせる。また、クラムサイトで噴出する熱水の勢いが、ワイマス海盆に比べて明らかに弱いことも、背の高いチムニーを形成しにくくさせ、ひさし構造の発達を促進しているかもしれない。

ワイマス海盆のマウンドやチムニーは、おもに硬石膏、重晶石、方解石、不定形シリカによって構成され、これに少量の硫化物（磁硫鉄鉱、閃亜鉛鉱、ウルツ鉱、方鉛鉱など）が含まれている (Peter and Scott, 1988)。田中ほか (1989) や本研究で明らかにされた伊平屋凹地の海底物質の鉱物組成も、ワイマス海盆ときわめてよく似ている。噴出する熱水の化学組成についても、伊平屋凹地とワイマス海盆との類似性が指摘されており (蒲生ほか, 1990; Gamo et al., 1991)、今後さら

に比較研究を進めることによって、熱水と堆積物との相互作用について多くの知見を得ることが出来るであろう。

5-2-4. ひさしの成長過程

これまでの観察結果を集約し、クラムサイトの熱水循環にともなうひさし構造の成長過程を復元してみたい。タイプ1のひさしでは、熱水の循環が活発に起こるために、ひさしの内部に熱水の通路と思われる空洞（内径1～数cm）のみられる場合がある。しかし、熱水活動の中心から遠ざかるにつれてひさし内にはっきりした熱水の通路はみられなくなり、熱水はひさしの下部の細かい空隙の中を比較的穏やかに移動するものとみられる。

ひさしの中に硬石膏が晶出するかどうかは熱水の温度と圧力によって決まる。硬石膏の溶解度(Blount and Dickson, 1969)は、100～300℃の範囲では温度と共に減少する。硬石膏の溶解度曲線と伊平屋凹地（圧力140bar）の熱水のカルシウム濃度からみて、熱水の温度が約120℃を越えると硬石膏について過飽和になることがわかる。ひさしの中の熱水の温度がこれ以下に下がると、硬石膏は生じない。また、いったん高温の条件下で硬石膏が晶出しても、その後熱水活動が衰えて温度が低下すれば硬石膏は溶解して消失する。

タイプ1、2とも、ひさし部分が伸びすぎると重さを支えきれなくなってひさしの中間部分で折れて落ちたり、割れ目ができてそこから新たに熱水が湧出する場合がある。ピラミッドチムニーの麓にみられるいくつかの大きな穴は、このように

してできたものであろう。また、タイプ2のひさしの内部で熱水の流動が活発な場所では、ひさしの表面に割れ目が入りやすく、そこから熱水がしみだして、白色のすじを作る。KIKO チムニーはこのようすじが縦横無尽にはしるタイプ2のひさしの上に成長したものとみられる。

D488では、KIKO チムニーから南に伸びるタイプ2のひさしの先端部が詳しく観察された（測点1）。ひさしの先端からは穏やかに熱水がしみだしており、炭酸カルシウムが沈積して真っ白に見える。ひさしの上面は、マンガン酸化物に覆われるので黒っぽく見える。このひさしの下側にさらに別の古いひさしが横たわり（写真8）、二重に重なったひさしのそれぞれがD488ではサンプリングされた。下側のひさしも、表面は黒色の層（マンガンの酸化物と思われる）で厚く覆われているが、切断してみると内部構造は上層のひさしと同様であり、生成時期は異なるにしても同じ過程によって生成したものであることを示している。

図9は、ピラミッド型チムニーを中心として、タイプ2のひさし構造が周囲に向かって伸びる様子を模式的に想像したものである。クラムサイトに普遍的にみられる平板構造は、基本的にはこの図のような熱水の流れとひさしの成長によって説明されよう。このようなひさし構造の下側から何らかの原因によって多量の熱水が供給されると、KIKO チムニーの活動が始まり（図9）、やがて大きなマウンドへと成長するのであろう（図5参照）。今後さらにひさし物質の特性を熱水の性質とも関連させながら広範囲にわたって解明するこ

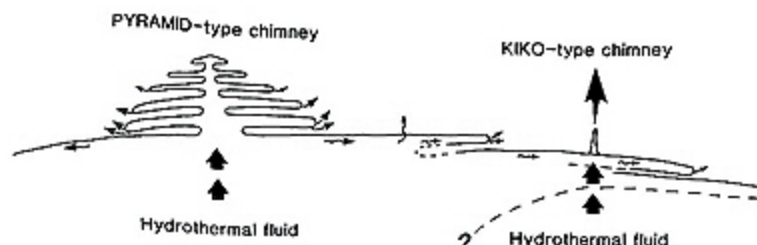


図9：ピラミッド型チムニーから伸びるひさし構造の模式図。矢印は熱水の移動をあらわす。

Figure 9. Cartoon showing structures of eaves extending from a PYRAMID-type chimney. Hydrothermal fluid flow is indicated by arrows.

とができれば、クラムサイトの海底熱水活動をより定量的に理解することが可能となろう。

6. 謝 辞

本研究の推進にあたり、海洋科学技術センターの堀田宏部長を始めとする深海研究部の皆様には数々の便宜をはかっていただいた。「しんかい2000」の潜航に際しては、司令の段野州典氏をはじめとする潜航要員の皆様、また「なつしま」船長の越智貞巳氏をはじめとする乗組員の皆様のご協力を戴いた。満澤巨彦、許正憲、長沼毅の各氏（海洋科学技術センター）には、伊平屋海域の潜航ビデオを見せていただいた。また、ワイマス海盆の海底熱水系の記載のために、Dr. Brend R. Simoneit より提供された潜水船アルビンによるビデオテープを参考にした。ビデオ映像記録の解析には、渡辺正晴氏（東大海洋研）の協力が有益であった。これらの方々にあつくお礼申し上げる。なお、本研究の一部は文部省科研費重点領域研究「海洋フラックス」(No.03248103)の補助を受けて行われた。

参考文献

- C. W. Blount and F. W. Dickson (1969) The solubility of anhydrite (CaSO_4) in $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ from 100 to 450°C and 1 to 1000 bars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, 227-245.
- 蒲生俊敬, 酒井均, 金銀洙, 下島公紀, 柳澤文孝, 石橋純一郎, 大森保, 山野誠, 野尻幸宏, 田中武男, 松本剛, 満澤巨彦, 長沼毅 (1990) 中部沖縄トラフ海底熱水活動の地球化学的研究: 「しんかい2000」第416回潜航報告および熱水の主要化学成分濃度からみた熱水活動の特徴, 第6回「しんかい2000」研究シンポジウム報告集, 51-62.
- T. Gamo, H. Sakai, E. -S. Kim, K. Shitashima, and J. Ishibashi (1991) High alkalinity due to sulfate reduction in the CLAM hydrothermal field, Okinawa Trough. *Earth Planet. Sci. Lett.*, in press.
- 石橋純一郎, 佐野有司, 脇田宏, 蒲生俊敬, 堤眞, 酒井均 (1990) 中部沖縄トラフ海底熱水活動の地球化学的研究: 溶存気体成分からみた熱水活動の特徴, 第6回「しんかい2000」研究シンポジウム報告集, 63-68.
- H. P. Johnson and V. Tunncliffe (1988) Time lapse photography of a hydrothermal system: a successful one-year deployment. *EOS*, 69, 1024.
- 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, 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム報告集, 223-244.
- P. Lonsdale and K. Becker (1985) Hydrothermal plumes, hot springs, and conductive heat flow in the Southern Trough of Guaymas Basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73, 211-225.
- J. M. Peter and S. D. Scott (1988) Mineralogy, composition, and fluid-inclusion micro-thermometry of seafloor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California. *Can. Mineral.*, 26, 567-587.
- H. Sakai, T. Gamo, E. -S. Kim, K. Shitashima, F. Yanagisawa, M. Tsutsumi, J. Ishibashi, Y. Sano, H. Wakita, T. Tanaka, T. Matsumoto, T. Naganuma, and K. Mitsuzawa (1990) Unique chemistry of the hydrothermal solution in the mid-Okinawa Trough backarc basin. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 2133-2136.
- 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, 柳澤文孝, 堤眞 (1990) 「しんかい2000」による伊是名海穴熱水系の地球化学的研究——第413回及び第415回潜航報告, 及び第424回潜航で採取した二酸化炭素液泡と包接化合物について, 第6回「しんかい2000」シンポジウム報告集, 69-85.
- 田中武男, 満澤巨彦, 堀田宏 (1989) 沖縄トラフ伊平屋小海嶺東部の1988年潜航調査について, 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム報告集, 267-281.

付録: M (益田) 式採泥器について

東大海洋研究所で1987年に製作し、「しんかい2000」によってしばしば用いられてきた採泥器

(写真14)。当初は、沖縄トラフのなつしま海丘における脆い熱水性堆積物を採取する目的で、ハワイ大学の潜水艇で使用されていた採泥器を参考にして設計・製作されたが、最近では海底物質の採取のみならず、海底から自噴する気体の捕集にも利用されている。

アクリル製の円筒（外径70mm）で、筒の片側にはゴムパッキンの付いた蓋があり、もう一方の側には蓋を閉めるためのトリガー機構がある。蓋はゴムバンドによってアクリル筒の内部に引っ張られている。「しんかい2000」の潜航前に手で蓋を開け、蓋の外側のアイボルトにとりつけたテグス糸をトリガーピンに引っかけて蓋を開けた状態に保っておく。海底では「しんかい2000」のマニピュレーターで筒をつかみ、海底面を引っかくようにして表面堆積物を取り込んだり、自噴する気泡の上にかざして気体試料を集めたりすることができる。試料採取後、マニピュレーターで本体をつかんだまま、トリガー（写真14では右端の出っ張り部分）を海底面など堅いところに当てて押し込むとピンがずれてテグス糸がはずれ、ゴムの張力で自動的に蓋が閉まる。マニピュレーターが一本しか使えないときの海底試料採取に特に効果的である。

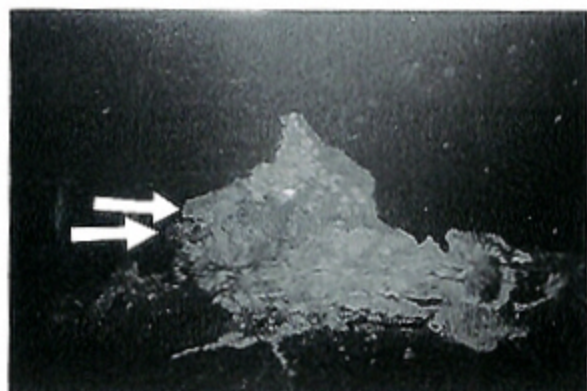


写真1：KIKO チムニー側からみたピラミッドチムニーの全景 (D487)。左側の斜面にひさし状の出っ張りが2層 (白矢印) とその下の陥没穴が見える。

Photo 1. A general view of the PYRAMID chimney taken from the KIKO chimney.

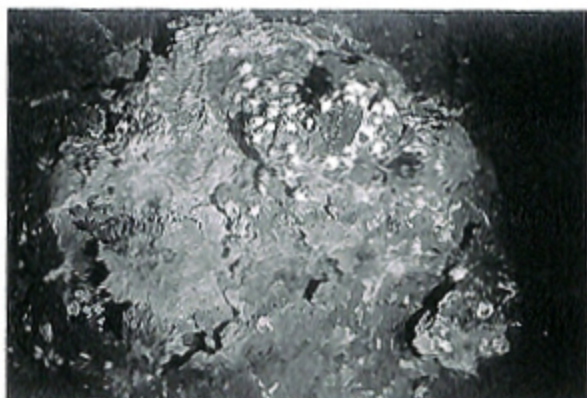


写真2：真上からみたピラミッドチムニーの全景。

Photo 2. A whole view of the PYRAMID chimney overlooked from its top side.

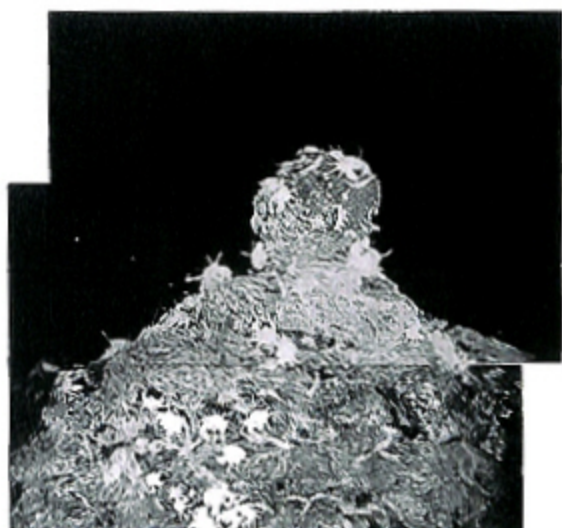


写真3：ピラミッドチムニー上部の近接写真。

Photo 3. A close-up picture of the upper part of the PYRAMID chimney.

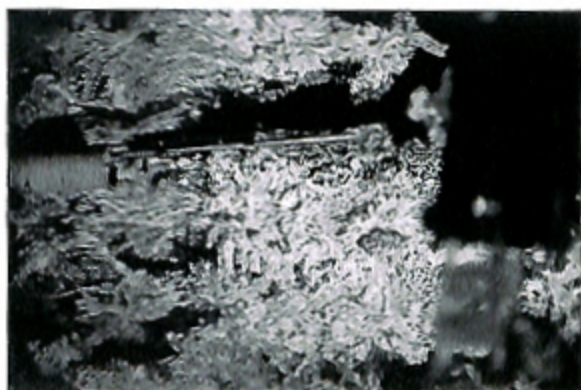


写真4：ピラミッドチムニー南東側の麓の陥没部 (黒い空洞) と熱水を噴出するひさし。ひさしの先端から噴出する熱水に採水口をあてがっている (採水口の内側に白金抵抗温度計が装着されている)。

Photo 4. A depression at the southeastern foot of the PYRAMID chimney, the rim of which is actively erupting hot fluids horizontally to grow eaves.



写真5：ピラミッドチムニーの東側の麓で間欠的に熱水を噴いている割れ目。

Photo 5. A fissure erupting hydrothermal fluids intermittently at the eastern foot of the PYRAMID chimney.

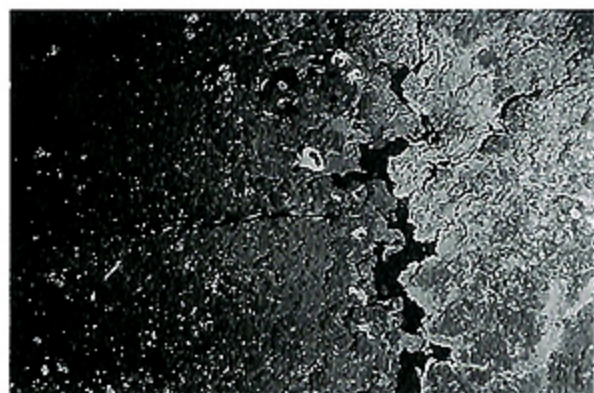


写真8：KIKO チムニー南側約10mの海底面にみられるひさしの二重構造。

Photo 8. An overlapping structure of two eaves observed at about 10m south of the KIKO chimney.

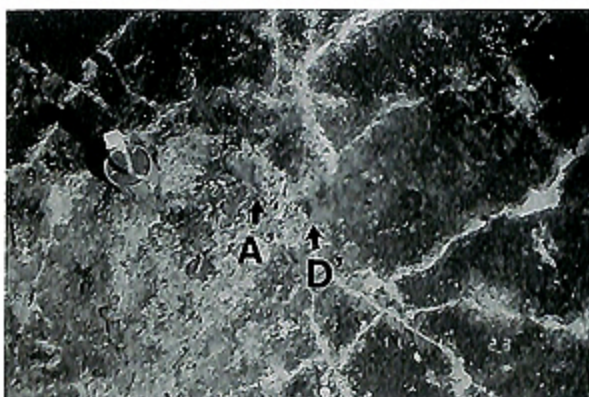


写真6：ほぼ真上からみた KIKO チムニー群とマーカー (D487)。

Photo 6. Overlooked KIKO chimneys and the deployed marker (Dive 487).



写真9：ピラミッドチムニー近傍の典型的な海底の割れ目。

Photo 9. Typical fissures on the bottom near the PYRAMID chimney.



写真7：ベビーチムニー群と D479で設置されたスケール。

Photo 7. BABY chimneys and the scale deployed by the dive 479.



写真10：クラムサイト北側の小丘（「ハオリムシの丘」）で見つかった海底熱水活動。

Photo 10. Hydrothermal active site on the northern small hill observed during the dive 488.

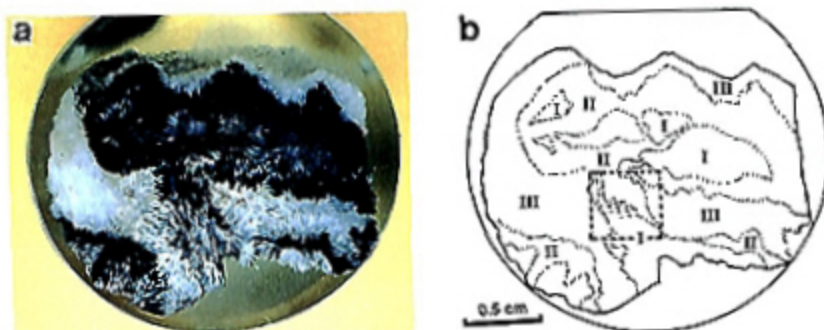


写真11：487-A7/8試料の断面 (a)。色と鉱物組成により3つのゾーンに区分できる (b)。点線の枠はEPMAによる元素濃度マッピングを行った場所を示す。詳しくは本文参照。

Photo 11. Cross-cut surface of sample D487-A7/8, which can be classified into three zones from color and mineralogy.

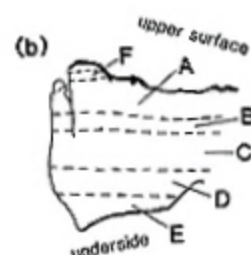
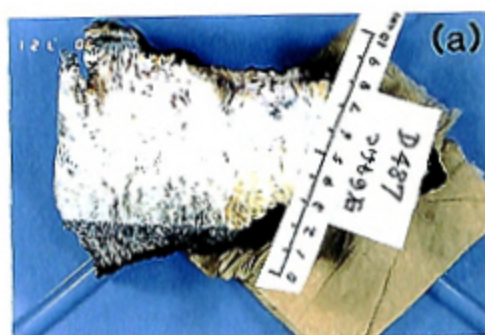


写真12：487-D試料 (つけもの石) の断面 (a)。外観より5つのゾーンに大別できる (b)。詳しくは本文参照。

Photo 12. Cross-cut surface of sample D487-D, which can be sub-divided into 5 zones from its outside view.



写真13：採取した KIKO チムニー (D487-C) の一部。

Photo 13. A part of the KIKO chimney taken during the dive 487.

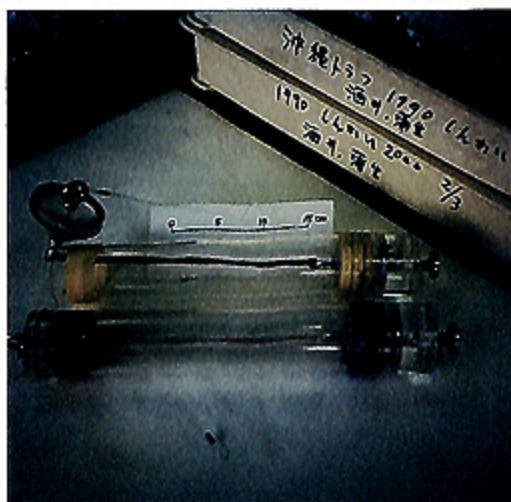


写真14：M 式採泥器（2 本）。向こう側の採泥器は蓋を開けた状態。

Photo 14. MASUDA-type bottom samplers.