

「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

酒井 均^{*1} 山野 誠^{*3} 田中武男^{*4} 蒲生俊敬^{*1}
金 銀洙^{*1} 石橋純一郎^{*2} 下島公紀^{*1} 松本 剛^{*4}
大森 保^{*5} 柳澤文孝^{*1} 堤 眞^{*1}

第413及び414回潜航では、伊是名海穴 JADE サイト、ブラックスモーカーの熱水温度計測と採取を目的としたが、着底のための足場の悪さや採水器の不備などのため成功しなかった。このため第422、423回潜航では特殊な採水装置を製作し、再度ブラックスモーカーに挑戦した結果、目的を達する事が出来た。採水に用いたチタン製回転式6連採水器、可変角型採水管保持装置などについて述べる。

第415回潜航においては、同上海域の液体 CO_2 と思われる、液泡を湧出する白色変質帯を中心とする海底表面の温度勾配を測定した。温度勾配は液泡湧出点において最も高く（約80K/m、熱流量にして約70W/m²）、変質帯より30、100mと遠ざかるにつれて、33から2 K/mと減少した。これらの結果と既存のデータから、JADE サイトの海底表面には水平方向のスケールが100m 程度の対流セルが存在する事が推論された。

第424回潜航において白色変質帯より湧出する CO_2 流体を採取し、その組成を分析した。また潜水船の浮上中における液泡の相変化をビデオと肉眼により観察した。これらの結果から見ると液泡は $\text{CO}_2=86\%$ 、 $\text{H}_2\text{S}+\text{CH}_4+\text{H}_2=14\%$ を含む液体であり、海底堆積物内に $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 包接化合物として凍結蓄積されていたものが温度勾配の上昇とともに分解湧出していると考えられる。 CO_2 液体の相分離をもたらす原因としてマグマの分別結晶による CO_2 フラックスの増加、熱水の沸騰、 CO_2 に富む酸性火山岩の熱水変質が考えられる。

-
- * 1 東京大学海洋研究所
 - * 2 東京大学理学部
 - * 3 東京大学地震研究所
 - * 4 海洋科学技術センター
 - * 5 琉球大学理学部
 - * 6 Ocean Research Institute, University of Tokyo
 - * 7 Faculty of Science, University of Tokyo
 - * 8 Earthquake Research Institute, University of Tokyo
 - * 9 Japan Marine Science and Technology Center
 - * 10 Faculty of Science, University of Ryukyus

Geochemical studies of the hydrothermal system at the Izena Cauldron using "SHINKAI 2000" —reports on dive numbers 413 and 415, and on the liquid CO₂ bubbles and hydrate collected during dives number 424.

Hitoshi SAKAI^{*6}, Makoto YAMANO^{*8}, Takeo TANAKA^{*9}
Toshitaka GAMO^{*6}, Eun-Soo. KIM^{*6}, Jun-Ichiro ISHIBASHI^{*7}
Kiminori SHITASHIMA^{*6}, Takeshi MATSUMOTO^{*9}, Tamotsu OOMORI^{*10}
Fumitaka YANAGISAWA^{*6} and Makoto TSUTSUMI^{*6}

Dive number 413 (and 414) attempted to measure the exit temperature of the Black Smoker solution and to sample it. However, rough ground for the submersible landing and physical insufficiency of our sampling system at that time kept us away from the goal. These objectives were successfully achieved during dives 422 and 423 with the newly developed devices for the attack of the smoker. These devices including our Ti-water sampler were described.

During dive 415, the temperature gradients at shallow depth of a white alteration zone were measured where CO₂-rich liquid had been and was observed to emerge into bottom seawater, forming CO₂-hydrate. The highest gradient of 80 K/m or 70 W/m² in terms of heat flow was measured at the site of liquid bubbling, while it decreased to 33 K/m at 30 m off the center of the alteration zone and to 2 K/m at nearly 100 m off. Those as well as previously reported data suggest that the JADE hydrothermal system consists of shallow convective cells with a horizontal scale of about 100 m, superimposed on larger deeper convective cells.

The liquid carbon dioxide bubbles were sampled into an acrylic cylinder during dive 424 and their phase changes during the submersible's ascent to surface was recorded on video. These observations and their chemical and stable isotopic ratios indicate that the liquid bubbles are composed of 86% of carbon dioxide of magmatic origin and the rest is balanced by hydrogen sulfide, methane and hydrogen. Fractional crystallization in magma chamber, subcritical boiling of hydrothermal solution and post-depositional hydrothermal alteration of gas-rich volcanogenic sediments are suggested to be the most likely mechanisms for accumulation of the phase separated carbon dioxide-rich fluid at the JADE site.

1. はじめに

沖縄トラフは琉球海溝と対をなす背弧海盆であるが、アジア大陸南端部の大陸地殻内に形成されつつある背弧海盆として注目される。沖縄トラフはほぼSSW方向に延びる全長約1000kmのdepressionであるが、南から北に向かって水深が浅くなると共に玄武岩質火山岩の露出域が減少するなど、背弧海盆の形成が南から北に向かって進行中であり、中部沖縄トラフはリフティングの初期段階にあると考えられている(Kimura et al. 1989)。沖縄トラフを南北に縦断する研究は、大陸地殻縁辺部に形成される背弧海盆の進化史を知る上で重要な情報をもたらすと考えられる。

1988年伊是名海穴(通称JADE Site, 27°16'N, 127°04'E)と伊平屋小海嶺東部の北スロープ(通称CLAM Site, 27°33'N, 126°58'E)において、まず日独共同による「SONNE-56」航海(Halbach et al., 1989a, b)によって、ついで海洋科学技術センターのディープトウ観測(門馬ほか, 1989), 更に「しんかい2000」による潜航調査(中村ほか, 1989; 木村ほか, 1989; 田中ほか, 1989)によって活発な熱水活動とこれに伴う硫化鉱床(JADE Site)や生物群集の存在が確認され、中部沖縄トラフの研究に一層のはずみがついた。しかし、このときの潜航調査ではせっかくの準備にも拘らず、悪天候のため熱水の採集と表面熱流量の測定のために計画された3回の潜航が中止となり、画竜点睛を欠くことになった。

JADE及びCLAM Sitesの更に詳細な潜航調査が1989年の6月から7月にかけて行われた。我々の前に行われた潜航調査によって日本近海では初めてのブラックスモーカーが発見され、その熱水の測温と採取に特に重点を置いた潜航計画が、我々だけでなく海洋科学技術センターの潜航も含めて計画実行された。このため本年度は両サイトで約30個の熱水の採取が可能であった。

JADE Siteにおいて我々の潜航以前に行われたいま一つの重要な発見は、白色変質帯における二酸化炭素と思われる液泡の湧出である。これはまず第412回潜航において丸茂が、ついで第415回潜航において山野がブラックスモーカーの北で、ついで第418回潜航で木村がJADE Siteの南縁で発見したものである。ビデオに記録された液泡の様

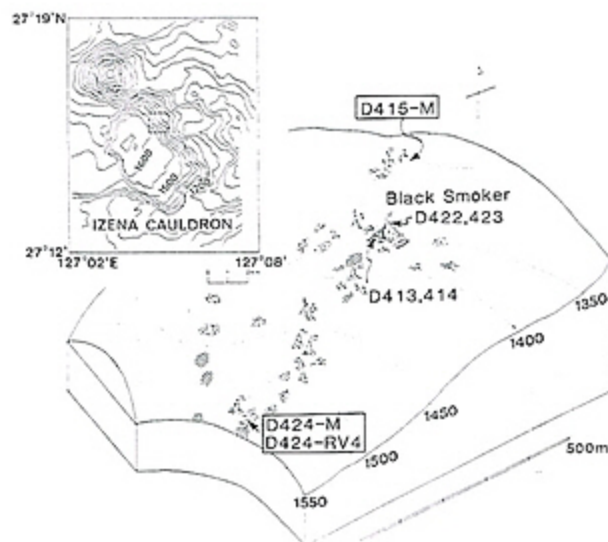


図1 伊是名海穴JADEサイトの模式図(原図は田中武男による)。D424-M, D415-MにてCO₂-液泡が湧出、前者にて捕集された

Fig. 1 Schematic map showing the JADE site hydrothermal field on the eastern slope of the Izena Cauldron (insert). Venting of liquid CO₂ was observed at D424-M and D415-M and it was sampled at the former.

子とCO₂-H₂O系の包接化合物の安定領域から考えて、二酸化炭素の液泡が海底面で包接化合物の皮膜を作りながら湧出している可能性が極めて高く、これを実証するために第424回潜航では液泡の採取が行われた。図1にJADEサイトの熱水、液泡採取点を模式的に示した。

本報告ではまず、酒井と山野がオブザーバーとして行った第413, 415回潜航の概要を述べる。しかしこのときは採水装置の不備によりブラックスモーカーの採水と温度測定には失敗した。この目的が達成されたのは整備チームの協力で新たな採水の仕掛けを作って再度挑戦した第422, 423潜航(ともにオブザーバーは田中)においてであった。そこで次に、採水に用いたチタン採水器及びブラックスモーカー採水のための仕掛けについて述べる。最後に、第424回潜航において田中が採取した液泡の分析結果と考察を述べる。ブラックスモーカーはじめ熱水の主成分元素の分析結果と考察については蒲生ほか(1990, 本誌)に、又Heその他のガス成分については石橋ほか(1990, 本

誌)に述べられている。

2. 第413回潜航の概要

1989年6月16日

観察者 酒井 均

潜水船船長 赤澤克文

潜航士 廣瀬重之

2. 1 目的と装備

本潜航の目的はブラックスモーカー及び周辺の熱水の採取と测温である。使用した機器は回転式6連チタン採水器・アルビン型採水器・バンドン採水器各一式及びPt抵抗温度計である。ブラックスモーカーは足場の悪いマウンド上にあり、着底してマニピュレーターによる採水は困難であると判断されたため、「しんかい2000」先頭部のペイロードにアルビン型採水器を温度計と共に取り付けた。回転式採水器は温度計なしでスモーカーの裾野から湧出する熱水の採水に使用した。

2. 2 潜航経過

- 10:00 潜航開始、アルビン型採水器の調整、取付に手間取り出発が遅れる
- 10:57 オリーブ色の泥質海底に着底
- 11:59 約1時間の探索航走の後目標のブラックスモーカーを発見、直ちに採水のため接近する
- 12:55 12:03より同53の間に4回のアプローチを試みるがいずれも失敗する、原因はチムニー周辺に不規則な強い水平流が存在することと、ペイロードよりのアルビン型採水器の先端の突き出しが不十分であったことによる。3回目のアプローチではブラックスモーカー上に乗り上げてしまい急上昇
- 13:00 ブラックスモーカーを一旦諦め、西側スロープ上のコシオリエビが群棲する熱水湧出帯に着底、コシオリエビのほかにも、イガイとフジツボの類が群棲する
- 13:06 同上点にて熱水の採水開始
- 13:36 3回の採水を終了(試料番号

D413, RV1, 2, 3), ネットにてコシオリエビの採取を試みるが失敗

- 13:48 離底、ブラックスモーカーに向かって航走開始
- 13:50 第1の採水点より数mの位置に再び熱水のゆらぎの激しい地点を認め着底
- 13:59 採水開始
- 14:20 3回の採水(D413, RV4, 5, 6)採水終了、中型イガイ1個採取
- 14:25 鉾石1個採取、離底、ブラックスモーカーに向かう
- 14:33 ブラックスモーカーに5度目のアプローチを試み西側の崖をマニピュレーターにて這い登るも失敗、残念ながら諦める
- 14:52 ブラックスモーカーを去り北進開始
- 14:58 深い谷を越え平坦な泥質海底に出る
- 15:19 北正面丘の上に2本のチムニーを認め接近するも、舞い上がった泥で視界悪く一旦停止
- 15:20 高さ数10cmの発泡をともないながら熱水を湧出する小型チムニーを発見、チムニーは2個あり、巨礫で囲まれた径数mの凹地にある、着底不能のため、直上を通過しながらバンドン採水器を閉じるがタイミングが悪く失敗、泡は時々発生するがすぐに海水中に溶失してしまう
- 15:38 離底

3. 第415回潜航の概要

1989年6月20日

観察者 山野 誠

潜水船船長 鈴木晋一

潜航士 小倉 訓

3. 1 目的と装備

本潜航の主な目的は、1988年の潜航調査で熱水を噴出するチムニー群が発見された伊是名海穴の北東側斜面において、チムニー周辺における表面熱流量の分布を調べることにより、海底下の熱水循環のパターンを明らかにすることであった。具

体的には、第411回潜航で発見されたブラックスモーカーと、第412回潜航で発見された泡を噴き出す白色の変質帯を中心に熱流量測定を行い、さらに噴出する湧水の採水も行うことを予定した。このため、第413回潜航で用いた6連採水器・温度プローブ・M式採泥管・コアラを使用した。温度プローブは、1986年以来「しんかい2000」の潜航で用いているもので（木村ほか、1987）、長さは約40cm、2個の温度センサー（サーミスター）が25cmの間隔で取り付けられている。

3.2 経 過

着底した地点でブラックスモーカーと変質帯の中間付近で、表面的には熱水活動の徴候は見られない場所であった。ここで1回目の温度勾配の測定を行った。

まず変質帯をめざして航走を開始したが、これを発見するまでに約1時間を要した。この間に、第413回潜航で見られたものと同様な、細い小型のチムニーから熱水が湧出しているのが観察された。また、到達した変質帯は第412回潜航と同一のものであるが、これから数mのところには小規模ながら熱水を噴出するチムニーが存在することが判明した。

変質帯では、今後の調査のためにマーカーブイを設置した後、2回目の温度勾配測定を実施した。温度プローブを突き刺した際、第412回潜航の時と同様に堆積物中から泡が噴き出すのが観察された。また、突き刺す途中で抵抗を感じたことから、深さ25cm前後のところにはやや硬い層があるのではないかと考えられる。次にM式採泥管により、表層の物質を海底付近の海水とともに採取した。さらに、6連式採水器の採水口を泡の噴き出してくる点の直上に置いて採水を行った。この間、泡の噴き出す様子をビデオカメラで観察した。

ここまでかなりの時間を費やしてしまったため、ブラックスモーカーに向かうことは断念し、変質帯から次第に遠ざかりながら温度勾配の測定を4回行った。これらの点は、いずれも見たとこ通常堆積物で覆われており、そのうちの1点（変質帯から約5mの地点）では、熱伝導率測定

の目的も兼ねて堆積物のコアを採取した。

4. 熱水の採取、特にブラックスモーカーの攻略

4.1 採水器及びブラックスモーカー用可変角型採水ノズル

熱水採水器は高温・酸性・高塩濃度の熱水溶液との接触による破損、重金属成分の汚染を防ぐ目的で設計された2種のタイプの採水器を用いた。第1は6連回転式チタン採水装置（以下回転式採水器と称する）、第2はアルビン用にウッズホール海洋研究所で製作されたものを、「しんかい2000」用に改造したものである。これについてはVon Damm et al. (1985)に詳しく述べられているので、ここでは第1のものについてのみ紹介する。

図2に模式的に示したように、回転式採水器は長さ約40cm、外径約10mmのチタン管と約3mのフレキシブルテフロンチューブからなる採水管・回転バルブ・6連チタンシリンジ・ギアポンプよりなる。潜航時、チタンシリンジ内のピストンは採水管側にあり、全ての空間は蒸留水で占められている。採水は「しんかい2000」のマニピュレーターによってチタン採水管を熱水湧出口に挿入した後、船内スイッチによりギアポンプを始動する。ギアポンプによってチタンシリンジの一つ（回転バルブにより決められる）の蒸留水が排出されると共にピストンが上昇し、熱水が吸入される。チタンシリンジの容積は約780mlであり、全容積を熱水で満たすのには約6分を要する。写真1に「しんかい2000」の左舷頭部に設置した採水器を示す。

しかし後述のごとくJADEとCLAMサイトの熱水は多量の二酸化炭素を含むため、全容積を熱水で満たして浮揚すると、圧力の低下と共に溶存ガスが分離してシリンジ内の圧力が上昇し、ついにチェックバルブが破裂し、試料の大半が失われてしまうことがある。このため高温熱水の採取時は、採水時間を所要時間の約半分にすることによってピストンが途中で停止するようにした。この場合、潜水船の浮揚に伴いシリンジ内の圧力が上昇しても、チェックバルブの破裂前に回転バルブがリークし、ピストンが押し上げられるため内圧

Ti - water sampler

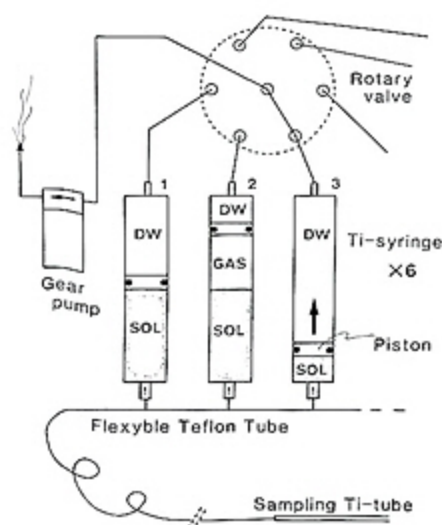


図2 回転式6連チタン採水器の模式図、チタン採水管は三本だけ示してある

Fig. 2 Schematic diagram showing the revolver type titanium water sampler. Only 3 out of 6 titanium syringes are shown. The piston is placed at the bottom of the syringe and all the open spaces are filled with distilled water before diving. At hydrothermal vents, the Ti-sampling tube (10mm OD X 40 cm) is held in position by the manipulator and the distilled water is pumped out to draw sample solution into the space below the piston. When gas-rich solution is taken, the piston is stopped at halfway of the full drive so that pressure rise due to evolution of gas at surface is compensated for by further move of the piston (see syringe No.2)

の上昇が抑えられ、試料が完全に保持される。

第413, 414回潜航においては、アルビン型採水器をパイロードにとりつけてブラックスモーカーの採水を試みたが、採水管が短すぎて目的を達成できなかった。このため第422, 423回潜航においては、長さ2m 径1cmのチタン管を採水管としてパイロードに温度計とともに取付け、更に着底した際に潜水船とブラックスモーカーの相対位置が多少変わっても採水口の先端を噴出口に容易に挿入できるように、採水管を水平から鉛直まで90度潜水船内より変化できるようにした。この仕掛は整備長の今井義司氏が設計・製作したもので、変角用のモーターには電動グラブサンプラー用の

被圧式モーターを転用した。写真2に変角用のギヤーのモーター部、写真3にブラックスモーカーに挿入され湾曲したチタン採水管を示す。

4. 2 母船「なつしま」上におけるガス分析

母船「なつしま」に回収された採水管は、ブラックスモーカーの採水が順調に行われた場合、内部には約400cc ずつの気相と液相が分離して存在し、かつ内圧は高かった(約2気圧)。船上ではまず気体試料を図3に模式的に示した簡易分離装置で H_2S , CO_2 , Rガス(残留ガス、主として CH_4 と H_2)に分離、定容した。即ち、50ccの医用シリンジで抽出した気体を、2N酢酸亜鉛溶液および飽和水酸化バリウム液で順次振盪し、 H_2S と CO_2 をそれぞれ ZnS , $BaCO_3$ として沈澱除去したのち、残留ガス(CH_4 , H_2)を鉛ガラス製容器に保存した。それぞれの過程での容積変化から気体の組成を求めた。この方法は、これだけ多量の気体の存在を予測していなかったため急場しのぎの方法であり、誤差も大きい。なお、 H_2S の含

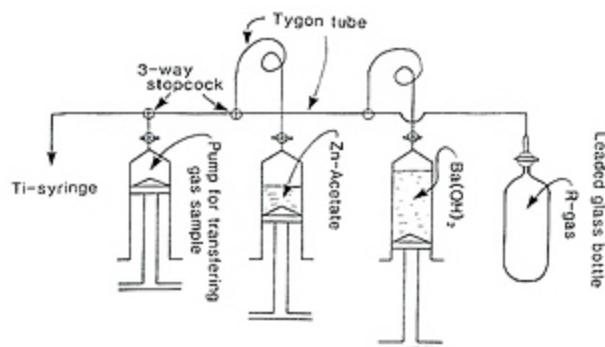


図3 気体試料船上分析装置の模式図

Fig. 3 Schematic diagram showing the manifold used for shipboard analyses of evolved gases from hydrothermal solution. Gases evolved in the Ti-syringe (see Fig. 2) is shaken successively with zinc acetate and barium hydroxide solution and the remaining gas is stored in a leaded glass bottle. The volume change between each step is taken to represent that of hydrogen sulfide and carbon dioxide, respectively. The precipitates are used for stable isotopic measurements of sulfide and carbon dioxide. The residual gas is analyzed for methane, hydrogen and rare gases.

有量は、別に一定量の生ガスを酢酸亜鉛溶液に加え沈澱した ZnS を実験室に持ち帰り、硫黄を硫酸として求めた。この方法は注射器法より精度が高いので本報告書ではこの値が用いられている。写真4は、気体を分離した後もバイアル瓶に分取するとなお発泡を続けるブラックスモーカーの熱水を示す。

4. 3 安定同位体比の測定

二酸化炭素・メタンの炭素同位体比、硫化水素・硫酸イオンの硫黄同位体比を測定した。二酸化炭素と硫化水素は気液間に分配されるので両者について測定し、加重平均をとった。メタンは気相中にほとんど100%移行するため、液相については同位体比分析をしなかった。

4. 4 R ガスの分析

R ガスは $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の測定（石橋ほか、1990）に供すると共に、陸上の実験室において段階的酸化法と4重極子質量分析法の二通りの方法により、メタンと水素の分析を行った。段階的酸化法では酸素ガスを加えた後まず180℃に加熱した CuO 炉で水素を水に変換除去した後、CuO 炉を800℃に昇温してメタンを二酸化炭素に酸化し、得られた二酸化炭素量をもってメタン量とした。またこの二酸化炭素の炭素同位体比を測定し、メタンのそれとした。一方、R ガスを四重極子型質量分析計に導入し、メタン、水素及びヘリウムの存在比を求めた。これらについては石橋ほか（1990本誌）を参照されたい。

4. 5 ブラックスモーカーの温度測定

ブラックスモーカーより噴出する熱水の温度測定は、外径3 mm、長さ2 m のステンレス管にシールした CA 熱電対を先に述べた長さ2 m のチタン採水管に外付けして行った。第422及び423回潜航においてブラックスモーカーの採水に成功したが、30分以上の採水時間中ともに $333 \pm 1^\circ\text{C}$ という極めて安定した、且つ再現性のよい結果が得られた。しかし温度計が海水中にあるときの指示温度は潜水船の Pt 抵抗温度計より13℃高い。従って、熱水の真の温度は320℃付近にあると思われる。ちなみに第412潜航（オブザーバー：丸

茂）において、木棒の先端に鉛とフューズを取りつけたものを「しんかい2000」の前頂部に取り付け、熱水中に挿入する事に成功している。このとき写真5に示すように鉛は熔けなかったがフューズは熔融した。実験室においてこの鉛とフューズの融点を測定したところ、それぞれ320℃と190℃であった。これらの結果からブラックスモーカーの噴出温度としては $320 \pm 10^\circ\text{C}$ としておく。

5. Jade サイトにおける表面熱流量の分布

大洋中央海嶺などの海底熱水活動が盛んな地域では、表面で測定される地殻熱流量は基本的に熱水の上昇・下降に支配されていること、すなわち熱流量分布は海底下の熱水循環のパターンを反映していることが知られている（Lister, 1980等）。沖縄トラフ中部においても、中軸部で高密度の熱流量測定が行われており、その結果と「しんかい2000」により発見された熱水噴出活動を考え合わせて、熱水循環のパターンに関する考察が試みられている（山野ほか、1988;木下・山野、1989）。

伊是名海穴で最初の熱流量測定が行われたのは1987年の潜航調査の際であり、海穴の底に存在する高まりの上で5.6K/m という高い温度勾配が測定され、この場所が熱的に活動的である可能性が示された（加藤ほか、1989）。そこで、1988年の「SONNE 号」の航海において通常の熱流量測定を実施したところ、海穴の底で平均300～400W/m² という高い値が得られた（木下・山野、1989）。さらに同年の潜航調査では、海穴の北東斜面の熱水鉱床地域において最高20W/m² に達する高熱流量が測定されている（加藤ほか、1989）。

第415回潜航では、熱水を噴出するチムニー周辺の局所的な熱水循環のパターンを知るために、計6地点で温度勾配の測定を行った。プローブを必ずしも垂直に突き刺すことができなかったので、ビデオ記録を利用して傾角の補正を行った。また、1点で採取したコアについて、ニードル・プローブ法（Von Herzan and Maxwell, 1959）により熱伝導率を測定し、平均0.9W/m・K という値を得た。

温度勾配が最も高かったのは泡を噴き出した白

色の変質帯であり、約80K/mに達する。白色物質の熱伝導率は不明であるが、仮に周囲の堆積物と同じ0.9W/m・Kであるとする、熱流量は約70W/m²となる。これは、トラフ中軸部で発見された熱水マウンド付近において測定された11-14W/m²という値（木村ほか、1987）に比べてもはるかに高く、この場所がまさに熱水の上昇域に当たっていることを示している。実際、変質帯から数mのところでは熱水噴出が観察されており、白色物質が熱水性の粘土鉱物である（丸茂克美、私信）ことも整合的であると言える。

問題は、この熱水上昇域がどの程度の範囲に広がっているかであるが、変質帯から約10m以内の3点で測定された温度勾配は45-70K/m（熱流量にして40-65W/m²）と、変質帯中に匹敵する高さである。さらに、変質帯から30m程度離れた点においても、温度勾配は33K/m（熱流量は30W/m²）と依然として高く、表面が通常の堆積物で覆われていても、その下では活発な熱水の上昇が起こっていることを示唆している。

一方、着底点で測定された温度勾配は1.9K/m（1.7W/m²）と一桁余り低いが、トランスポンダによる位置決定によると、この地点は変質帯から100mも離れていない。1988年の第359回潜航でも同じ鉱床地帯において、数10m離れた2地点で温度勾配が6倍異なることが観測されており（加藤ほか、1989）、熱水循環のスケールとして100m以下のものが存在しているものと考えられる。循環セルの形などを明らかにするには、より多くの点での熱流量測定とともに、チムニーや変質帯の詳細なマッピングを行うことが必要である。

「しんかい2000」による潜航調査の後、1989年8月には地質調査所による「白嶺丸」を用いた伊豆名海穴周辺の調査が実施され、熱水鉱床地域での熱流量測定も行われた（木下ほか、1990）。それによると、チムニー群に近接して10W/m²を超えるような値が数点で測定されており、潜航調査で測定された異常な高熱流量は決して特殊な地点に限られるわけではないことを示している。さらに全体として見ると、北東-南西方向に2-3W/m²以上の高熱流量帯が伸び、その回りを1W/m²以下の値が囲んでいる。熱流量の変化の距離スケールは200-300mであり、潜航調査で見ら

れたものよりも一回り大きい（深い）循環の存在を表しているものと考えられる。

6. JADE サイト熱水域海底における二酸化炭素を主成分とする液泡の湧出と同包接化合物の形成

JADE サイト熱水域で「しんかい2000」によって採取された鉱石試料が、潜水船が浮上する際水深300mくらいで激しく“発泡”することは既に知られていた（中村光一、私信）。ついで丸茂克美は、第412回潜航に於てブラックスマーカーの北で発見した白色変質帯で、コアラーを海底に挿入したところ、透明な液泡が間欠的に湧出するのを認めビデオに収めた。又この際同地点で採取したコアが、潜水船の浮上と共に発泡することを観察している。更に第415回潜航において山野は、同じ白色変質帯において海底表面の温度勾配を測定したが、この際、温度計を挿入すると丸茂が観察したと同じ様な泡の発生がみられた。この時の模様は本報告書で既に述べた通りである。

これらのビデオで白色変色帯における発泡の様子を観察すると奇妙なことに気が付く。即ち、発泡の勢いが衰えると泡が一旦静止するが、次に頭部がふくらみ、そこから新しい泡が成長する（写真6左上、下、第415回潜航の際に撮られたもの、以下同）。従って上で太く、根元が細い縦長の泡が根元で堆積物に引っかかったような形となる。また新しく成長した頭部を除くと、泡全体が半透明でしわのある膜で被われたように見える（写真6）。やがてこのラップ状の泡は全体が浮揚して視界から消えてしまうが（写真6右下）、数秒で同じ所から次の発泡サイクルがはじまる。

これらの観察結果と、第413回潜航で得られた熱水が多量のCO₂を含むこと、海底の水圧・水温が液体CO₂とCO₂-H₂O包接化合物（CO₂・5.75H₂O）の安定領域にあること（図4）などから、泡の正体はCO₂を主成分とする液体であり、その奇妙な挙動は上記包接化合物が被膜状に泡を被うことに由来するものであろうと想像された。ついで第418回潜航において、木村はブラックスマーカーの南約200mの地点に活動的なチムニー群を発見したが、その近くに白色変質帯では同様な泡が自噴することを認めた。これらのこと

から、JADE 熱水域の表層堆積物中には液状 CO_2 が広く分布することが想像され、その正体を実証することが次の重要課題の一つとなった。

泡の採取は田中武男をオブザーバーとする第424回潜航において実現した。採取点は図1に示した。又採取には通称 M 式採泥器を用いた。この採泥器は内径60mm、長さ300mm の一端を閉じたアクリル筒で、ゴムバンドで駆動される蓋によって他端が閉じられるようになっている。この採泥管をマニピュレーターで発泡点上に垂直に保持しながら泡を採取した。泡は海水中を上昇する間は透明であるが、アクリル管に捕集され、動きが止まるやいなや白色半透明となり、もとの大きさのまま“葡萄の房”状の泡塊をつくり決して相互に融合しなかった（写真7）。

アクリル筒の1/3くらいの泡を採取したところ

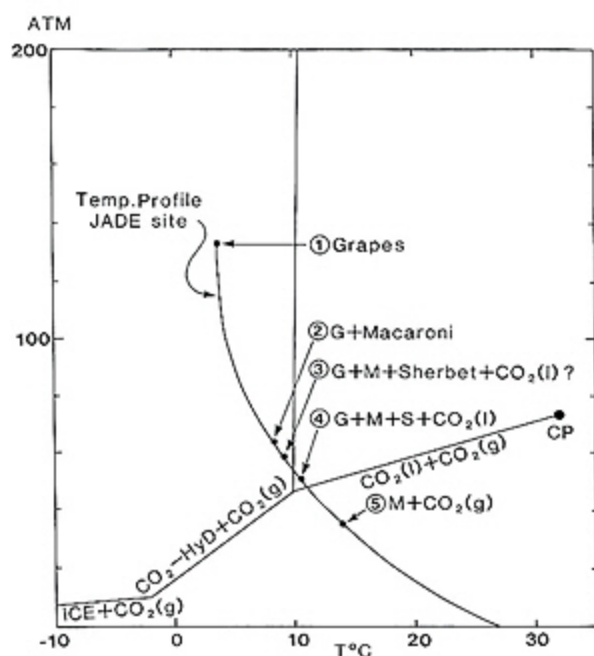


図4 CO_2 - H_2O 包接化合物の安定領域 (Sakai et al., 1990) と「しんかい2000」で捕集、浮上中に観察された液泡の挙動

Fig. 4 Phase changes of liquid CO_2 trapped in an acrylic cylinder during the ascent of "SHINKAI 2000", superimposed on the stability diagram of CO_2 -hydrate (after Sakai et al., 1990). Solid curve is the temperature-depth profile of the water column that was followed by the submersible during her ascent.

で下蓋を閉じ、試料バスケットの前面に固定した後ビデオ及び肉眼で観察しながら浮上した（写真8 A, B, C, D）。図4は浮上中の水温・水深変化にともなうアクリル筒内の泡の状態変化を記載したものである。また同図には CO_2 - H_2O (CO_2 過剰) 系の安定相関図も示してある。JADE サイト海水の温度・圧力の鉛直分布（図4の太実線）は、第424回潜航で「しんかい2000」のCTDによって得られたものである。

「しんかい2000」の浮上開始に伴う最初の変化の兆しが“葡萄の房”（図4, G; 写真8左上）に表れたのは、水深約730mにおいてであった。“葡萄の房”は不安定なゆらぎを示しはじめ、510mではつぶれた泡の隙間を液相が埋めた一見“シャーベット”状（図4, S; 写真8左下）を呈するに至った。この前後から小さな泡が“シャーベット”層を通してアクリル筒の上端に浮上するのが見られた。泡の発生は始めはゆっくりであったが、深度が減少するに従い速度を早め、ついには連続的となった。“シャーベット”の出現とほぼ時を同じくして、直径～5mmの白色チューブ（“マカロニ”：図4, M; 写真8右）が“葡萄の房”から下方に向かって成長し始めた。“シャーベット”は次第に減少し、やがて泡塊は“マカロニ”の集団となり、水深約300mにおいてアクリル管下部より発泡が始まる（写真8D）と共に急速に減少し、消滅した（約350m）。潜水船が表面に浮上した時アクリル筒には気体が残るのみであり、浮上のショックと浮力でアクリル筒は浮上直前に保持金具からはずれ、視界から消え去ったが、幸いにダイバーによって発見、回収され、貴重な試料を手にすることが出来た。

上述の浮上中の泡の変化をまとめると図4①～⑤となる。なおアクリル管表面における照明光のハレーションにより、内部の変化がビデオを見ても明確でない点があったのは残念であり、今後この種の実験の際、留意すべき点である。

船上でアクリル筒から水上置換で捕集した気体（試料番号424-M）の組成を表1に示した。泡の採取後、発泡点より数m離れた熱水ベント（最高温度220℃）において、回転式採水器により採水を試みたが、この際、チタン採水管の入口に泥が強く詰まってしまう採水には失敗した。しか

し、「しんかい2000」の浮上中にこの泥から多量のガスが発生し、偶然のメカニズムでチタン筒に捕集できたものが表1の424-RV4である。またBlack Smokerは、第423回潜航（オブザーバー：田中武男）によって捕集されたブラックスモーカーの320℃の熱水に溶存していた気体である（蒲生ほか、1990本誌参照）。

ブラックスモーカーの熱水は約200mM/kg（または0.34モル%）の二酸化炭素を含み、海水と安山岩質一流紋岩質火山岩との反応で形成されたものである（Sakai et al., 1990; 蒲生ほか、1990）。C, S, Heの同位体比からみても、溶存気体もメタンを除くとすべて大部分がマグマ起源であり、島弧の揮発性成分に富んだ火山活動の特徴をすべて備えている。表1からも判るように、アクリル筒によって採取された液泡（424-M）は、成分組成からも同位体比からもブラックスモーカーの熱水に溶けた気体と同じものであり、マグマ起源のものと言える。しかし、ブラックスモーカーの熱水が海底表面のP, T条件（150気圧、3.8℃）まで冷却しても期待に反して二酸化炭素を析出しない。なぜならば、上記圧力下で4℃の海水は約

2.6モル%のCO₂を溶解する（Takenouchi and Kennedy, 1964）ため、ブラックスモーカーの熱水はなおCO₂について不飽和である。

JADEサイトの海底表層で二酸化炭素を主成分とする液相が形成されるためには、周囲の海水が二酸化炭素で飽和される必要があり、このためには上述のごとく現在の熱水より更に7倍くらい高濃度のCO₂を含む熱水の放出が必要である。このために考えられる機構として次の三つがある。

① マグマ溜りでの分別結果：残留マグマ中のCO₂濃度はマグマの結晶分化が進めば急速に増大し、時にいわゆる“second boiling”を引き起こし、CO₂のフラックスが急激に増加するであろう。

② 熱水の沸騰：ブラックスモーカーの水深1335mにおける熱水の沸点は335℃（Bischoff and Rosenbauer, 1984）であり、ブラックスモーカーの熱水温度320℃よりわずかに高いのみである。また熱水中のCO₂濃度が高まるにつれて沸点低下が起こるので、この差は実際には更に小さいかもしれない。もし、火山活動が現在より更に活発な時期が近過去にあったとすれば、熱水の沸騰が

表1. JADEサイトの白色変質帯で捕集されたCO₂-液泡（424-M，写真7，8）の化学組成と同位体比。
424-RV4は白色変質帯の泥より発生した気体試料（本文参照）。Black Smokerはブラックスモーカーの熱水中に溶存した気体（Sakai et al., 1990）

Table 1. Compositions and stable isotopic ratios of the gas left in the acryl cylinder (424M, Photos 7 and 8) and that evolved from mud collected at the same site (424-RV4). Black Smoker is the dissolved gas in the Black Smoker solution (after Sakai et al., 1990).

Sample	CO ₂	H ₂ S (vol %)	R-gas*	$\delta^{13}\text{CO}_2$ (‰PDB) ⁺	$\delta^{13}\text{CH}_4$ (‰PDB) ⁺	$\delta^{34}\text{S}$ (‰CDT) ⁺	$\delta^3\text{He}/^4\text{He}$ (R/R _a) ⁺
424-M	86 ± 5	3	11 ± 1	-5.0	-36	+8.0	6.6
424-RV4	92 ± 1	4.4	4 ± 1	-4.8	--	+7.2	5.8
Black Smoker	88 ± 1	5.5	6.5	-4.8	-33	+7.3	6.5

* Residual gas after removal of CO₂ and H₂S. CH₄ and H₂ are the main components. The presence of CH₄ was confirmed but H₂ was not analyzed.

+ Stable isotopic ratios are expressed in permil deviation from PDB (carbon) and from Canon Diablo troilite (sulfur) standards.

= Ratio to $^3\text{He}/^4\text{He}$ of atmospheric helium (1.4×10^{-6})

海底下に起こり、いわゆる蒸気卓越型の熱水系が形成された可能性がある。CO₂ その他の気体成分は蒸気相中に濃縮するので、気相が液相より分離されたまま凝縮液化すれば、CO₂ に飽和した液相が形成されるであろう。ファン・デ・フカ海嶺の Axial Volcano では実際に Cl 濃度が低く、CO₂ に富む熱水が発見されている (Massoth et al., 1989)。また北フィジー海盆においても同様な蒸気相起源の熱水が発見されている (石橋純一郎, 私信)。

③ 火山岩の熱水変質：本海域には材木状軽石など多孔質火山岩、火山砕削物が厚く堆積している (加藤ほか, 1989)。これらの火山噴出物は約 150 気圧の水圧下で噴出したものであるから、陸上の酸性火山岩に比してなお多量の揮発性成分を、流体泡有物などの形で内蔵していると考えられる。一方、これらの火山性堆積物は粗粒で透水

性が高く熱水の循環に適している。熱水との相互作用によってこれらの堆積物の変質する過程で、CO₂ などの揮発性成分は液相に移動し、やがて CO₂-rich な液相と H₂O-rich な液相の二相からなる間隙水が出来るであろう。

これらのいずれの過程で形成されたにしても、分離した CO₂ 流体相 (純 CO₂ の臨界点は 32℃) は地熱地帯の上昇流によって海底表層に運ばれるが、堆積層の温度が 10℃ (本海底の水圧における CO₂-H₂O 包接化合物の分解温度, 図 4) 以下になると同時に、CO₂-H₂O 包接化合物が急速に生成して間隙を充填し、間隙水のそれ以上の上昇を妨げるシール層が形成されるであろう (図 5 A)。凍結層を通しての CO₂ の底層水への散逸速度は遅いので、シール層の下には CO₂ の液相が蓄積することになる (図 5 A)。熱水活動の高まりと共に温度勾配が上昇して、下層の CO₂ 包

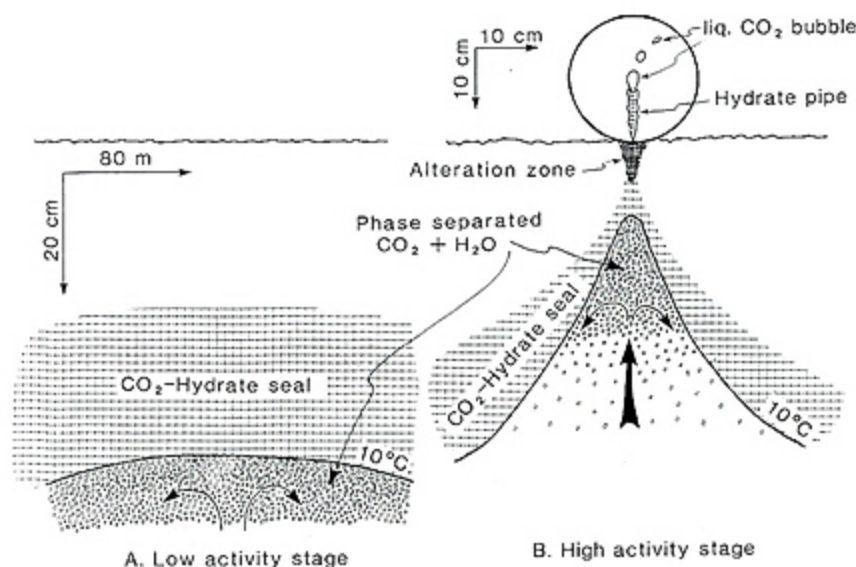


図 5 海底表層における CO₂ と CO₂-H₂O 包接化合物の生成, A: 熱水活動の平穏時, B: 高揚時, 約 200m 径の熱水循環セルができたと仮定, 包接化合物の分解温度, 10℃ 等温線が海底表面に達し CO₂-fluid が hydrate pipe 作りながら湧出する。温度勾配の分布は本文で述べた第 415 回潜航の結果を参考にしたが、もちろん仮想的なものである、B の円内を除くと水平/鉛直スケール比 = 4 000 であることに注意

Fig. 5 Schematic cross section of the sediment underlying the CO₂-venting white alteration zone, JADE site. A: stage of CO₂-fluid and hydrate accumulation. 10°C isopleth is the boundary below which hydrate decomposes. B: hydrothermal convection cell of about 200 m diameter at high activity stage, during which the 10°C isopleth is pushed to surface and CO₂-fluid leaks into bottom seawater, forming hydrate pipe. The thermal gradients are only approximate and tentative, although reference was made on data obtained during dive 415.

接化合物が分解し、圧力が増加するとともにシール層の下限は海底表面に向けて押し上げられる。やがてその頂部が海底面に達し、CO₂流体が底層海水中に湧出することになる（図5B）。熱流量の高い白色変質帯に液泡の湧出がみられる理由もこのモデルによって理解できる。図5は第415回潜航で得られた白色変質帯における熱流量分布（本報告第5章）を参考にして、熱水活動の平穏時と高揚時における10℃等温面の変化と、それにとともにCO₂-包接化合物の挙動を示したものである。

7. まとめと今後の課題

本報告では、伊是名海穴JADEサイトのブラックスモーカーの熱水採取に関する技術的問題及び白色変質帯から湧出するCO₂を主成分とする液泡の化学組成・成因について述べた。ブラックスモーカーは「しんかい2000」による採水が困難な地形に守られていたが、整備士、潜航士、研究者の三者一体になった工夫と熟練によって採水を繰り返し成功させることが出来た。沖縄トラフの熱水系の特徴の一つは溶存ガス成分に富むことで、熱水1リットル中に約5リットルSTPのCO₂が含まれている（蒲生ほか、1990）。このため熱水を採取して浮上すると採水器中の熱水が発泡し、内部圧が著しく高まる。今回使用した採水器ではピストンの位置を調整することでこれを回避したが、もちろん完全なものとは言えない。今後この点も含めて採水器および採水法の改良に努める必要がある。

海底堆積物中におけるCH₄-H₂O包接化合物の存在は、BSRの存在（Tucholke et al., 1977）やトリロールや掘削によって実際に回収されたメタン包接化合物（Shipley and Didyk, 1982; Brooks et al., 1984）などにより既に周知の事実であるが、JADEサイトの白色変質帯におけるCO₂液泡とCO₂-H₂O包接化合物の発見は、恐らく世界的にも今回が初めてであり、特筆すべき事項である。しかし、その成因や分布についてはまだほとんど不明であり、今後更に地形や温度勾配との関連を明らかにしつつ説明すべきである。またその真の組成を知るためには今回のように浮上中の発泡を避け、加圧状態で捕集するか、風船のごときサンプ

ラーで全体を逃さず採取することも必要であろう。

JADEサイトのブラックスモーカーの温度測定はCA熱電対により行ったが、潜水船内の計器に至るまでに異種金属間の接点が多く、その正確な補正は困難である。ブラックスモーカーは現在のところ300℃を越す海底熱水チムニーとしては世界中で最も水深の浅いところであり、本報告で採用した熱水温度320℃は、同深度に於ける熱水の推定沸点335℃からわずか15℃低いのみである。次回潜航調査では、補正のより容易なPt抵抗温度計を用いて、より信頼性の高い温度を求める必要がある。又CO₂液泡の成因を解明するためにも、その温度・化学組成などの経時変化を長短の時間スケールで実施することが強く望まれる。

謝 辞

今回の「しんかい2000」によるブラックスモーカーをはじめとする熱水の採取のために、海洋科学技術センター深海研究部の堀田宏部長および「しんかい2000」の段野州典司令はじめ運航チームに多大のご協力をいただいた。特に整備長今井義司氏の臨機応変の工夫と製作になる「可変角式採水管保持器」なくしては、ブラックスモーカーの採水は不可能であった。これらの皆様ならびに「なつしま」船長越智貞己氏はじめ乗組員諸氏に深謝する。なお本研究の一部は文部省科学研究費No. 60430010（代表 酒井均）、No. 6342001（代表 小林和男）およびDELP特別事業費の援助を受けて行われた。

参考文献

- Bischoff, J. L. and Rosenbauer, R. J. 1984. The critical point and two-phase boundary of seawater, m 200-500°C. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 68, 172-180.
- Brooks, J. M., Kennicut II, M. C., Fay, R. R., McDonald, T. J., and Sassen, R. 1984. Thermogenic gas hydrates in the Gulf of Mexico. *Science* 225, 409-411.
- 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, 田中武男, 松本剛, 満澤巨彦, 長沼毅, 1990. 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，及び熱水的主要化学成分濃度から見た熱水活動の特徴

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

Halbach, P., Wahsner, M., Lange, J., Kaselitz, L., Hansen, R-D., Post, J., Prause, B., Seifert, R., Teichmann, F. and Marten, A. 1989b. Hydromin 1. Geoscientific investigations to explain the formation of hydrothermal ore deposits at convergent plate margins in the region of the Okinawa Trough. -So-56- Technical Univ. Clausthal, Institute for Mineralogy and Mineral Raw Materials Clausthal -Zellerfeld June 1989.

石橋純一郎，佐野有司，脇田宏，蒲生俊敬，堤真，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：溶存気体からみた熱水活動の特徴. 海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTEC DEEPSEA RES., (本誌，別記)

加藤幸弘，中村光一，岩淵洋，橋本淳，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 JAMSTEC DEEPSEA RES., 163-182.

Kimura, M., Kaneoka, I., Kato, Y., Yamamoto, S., Kushiro, I., Tokuyama, H., Kinoshita, H., Isezaki, N., Masaki, H., Ishida, A., Uyeda, S. and Hilde, T. W. C. 1986. Report on DELP 1984 cruises in the middle Okinawa Trough-5: Topography and geology of the central grabens and their vicinity. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo* 61, 269-310.

木村政昭，加藤祐三，田中武男，仲二郎，蒲生俊敬，山野誠，安藤雅孝，上田誠也，酒井均，

大森保，伊沢英二，兼永勝，小野朋典，押田淳，1987. 沖縄トラフ中央地溝の研究，海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTEC DEEPSEA RES., 165-196.

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，海洋科学技術センター試験研究報告，JAMSTEC DEEPSEA RES., 223-244.

木下正高，山野誠，1989. 沖縄トラフの地殻熱流量. 月刊地球，11，585-590

木下正高，木川栄一，浦辺徹郎，中村光一，奥田義久，1990. 中部沖縄トラフ伊是名海穴（鉱床地帯）の熱流量異常，地震学会講演予稿集，1990，No. 1

Lister, C. R. B., 1980. Heat flow and hydrothermal circulation. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 8, 95-117.

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.

門馬大和，橋本淳，田中武男，深海調査グループ 1989. 沖縄トラフ深海曳航調査 (DK88-2-OKN=LEG1.1) 速報，海洋科学技術センター試験研究報告，JAMSTEC DEEPSEA RES., 203-221.

Takenouchi, S. and Kennedy, G. C. 1964. The binary system H_2O-CO_2 at high temperatures and pressures. *Amer. Jour. Sci.* 262, 1055-1074.

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 JAMSTEC DEEPSEA RES., 183-189

Sakai, H., Gamo, T., Tanaka, T., Ishibashi, J., Yamano, M., Kim, E-S., Tsutsumi, M., Oomori, T., and Wakita, H. 1990. Venting of CO_2 -rich fluid and hydrate formation in mid-Okinawa Trough Backarc Basin. *Science*.

- Sakai, H., Gamo, T., Kim, E-S., Shitashima, K., Yanagisawa, F., Tsutsumi, M., Ishibashi, J., Sano, Y., Wakita, H., Tanaka, T., Matsumoto, T., Naganuma, T. and Mitsuzawa, K. 1990. Unique chemistry of the hydrothermal solution in the mid-Okinawa Trough Backarc Basin. submitted to *Geophys. Res. Letters*.
- Shipley, T. H. and Didyk, B. M. 1982. Occurrence of methane hydrates offshore southern Mexico. In Creager, J. S. and Sholl, D. W., eds., *Initial Report of the Deep Sea Drilling Program*, 66, 547-556.
- 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年潜航調査に就いて, 海洋科学技術センター試験研究報告 JAMSTEC DEEPSEA RES., 267-281
- Tucholke, B. E., Bryan, G. M. and Ewing, J. I. 1977. Gas-hydrate horizons detected in seismic-profiler data from the western North Atlantic. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 61, 698-707
- Von Damm, K. L., Edmond, J. M., Grant, B., Measures, C. I., Walden, B., and Weiss, R. F., 1985. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21N, East Pacific Rise. *Geochim. Cosmochim. Acta* 49, 2197-2220.
- Von Herzen R. P. and Maxwell A. E., 1959. The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method. *J. Geophys. Res.*, 64, 1557-1563.
- 山野誠, 上田誠也, 木下正高, 1988. 中部沖縄トラフの地殻熱流量分布と熱水循環. 地球化学, 22, 57-64

(原稿受理 1990年7月2日)

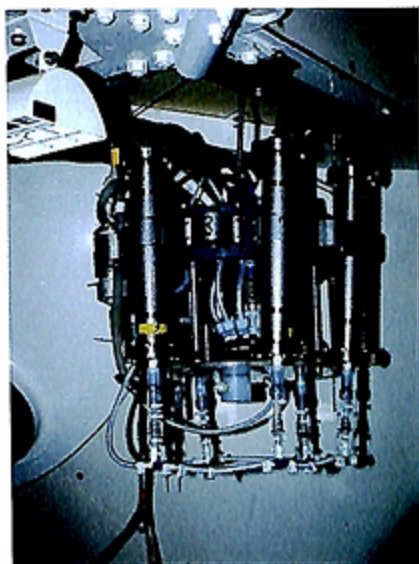


写真1 「しんかい2000」に取り付けた6連式チタン採水器

Photo. 1 Revolver-type titanium water sampler installed on the forehead of "SHINKAI 2000".
-See also Fig. 2.

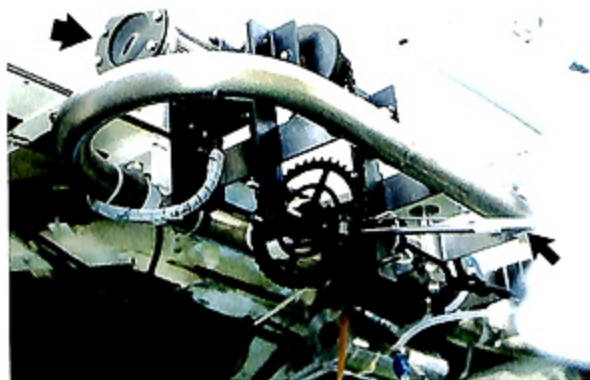


写真2 「しんかい2000」前頭部ペイロードに取り付けた可変角式採水管駆動部（整備長今井義司製作による）。矢印は駆動用モーター

Photo. 2 The motor-driven device that enabled the submersible pilots to change the angle of the 2-m-long Ti-sampling tube for insertion into the mouth of "Black Smoker" chimney. The device was made by Mr. Y. Imai. The motor is indicated by arrow.

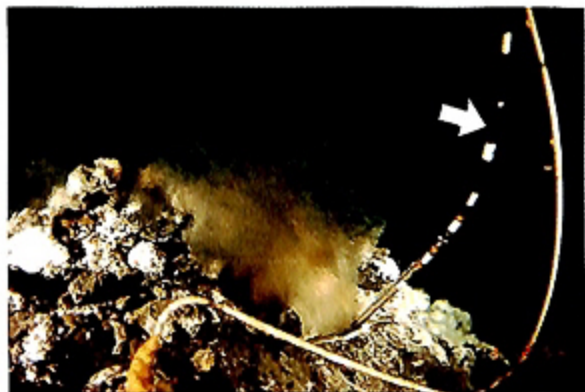


写真3 「しんかい2000」前頭部よりブラックスモーカーに挿入された10mm 径チタン採水管（矢印）

Photo. 3 2-m-long Ti-but (white arrow) inserted into "Black Smoker" chimney for water sampling.



写真4 チタン採水器よりガラスバイアル瓶に分取されたブラックスモーカーの熱水。既に1リットルあたり5リットルSTPのガスを除いたにも拘らず尚発泡を続ける

Photo. 4 "Black Smoker" solution which still effervesced when transferred from a Ti-syringe into the glass vial. The gas evolved within the Ti-syringe was amounted to 5litre STP per kg water and had been removed before this operation.

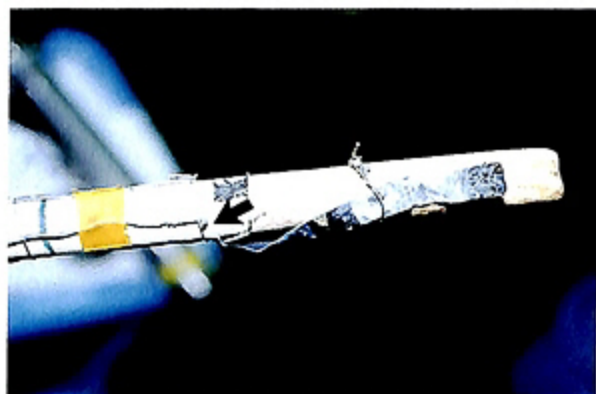


写真5 ブラックスモーカーの噴出口に挿入されて先端が溶融したヒューズ（融点190℃、矢印）と溶けなかった鉛（融点320℃）

Photo. 5 Fuse wire (m. p.=190℃) and lead foil (m. p. 320℃) which were kept in jet-stream of "Black Smoker" solution just above its exit. Note that the fuse wire was melted at its end (arrow), while lead foil was not.

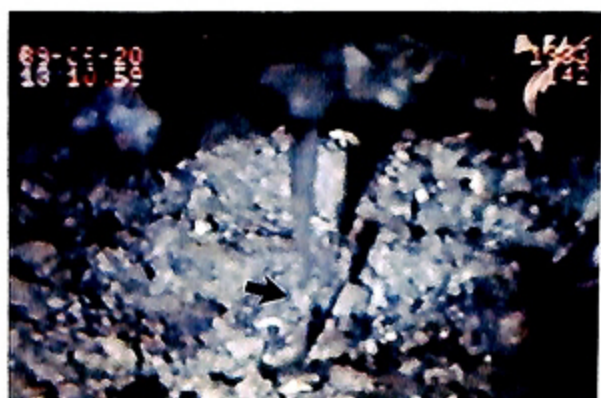


写真6 伊是名海穴熱水域白色変質帯で観察された CO_2 - ($\text{H}_2\text{S}-\text{CH}_4$) 液泡の挙動（第415回潜航ビデオより）（説明は本文参照）

Photo. 6 Transparent CO_2 -rich liquid bubble (small arrow) growing through a CO_2 -hydrate pipe (large arrow) standing on white sediment-covered seafloor (A, B). The bubble is just to leave the pipe at the neck pointed by arrow (C). When bubbling ceased, the pipe itself often drifted away (D) and a new bubbling cycle started from the same spot as before (from the video taken during dive number 415). The pipe is about 10 cm long and 1 cm in top diameter.

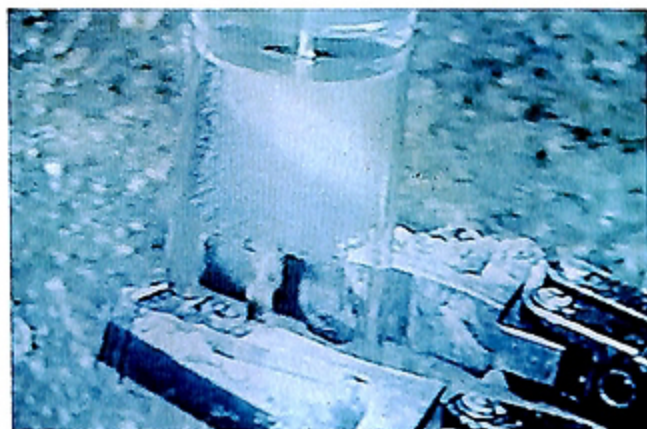


写真7 アクリル製 M 式採泥管に捕集される液泡。白色半透明の泡が“葡萄の房”状に集合し、決して一体とならない（採取点：図1，D424-M，水深1550m）

Photo. 7 CO_2 -rich liquid bubbles collected into an acryl cylinder. When stopped their motion, the bubbles were immediately covered with the translucent white film of CO_2 -hydrate and did not coalesce into larger bubbles. The acryl cylinder is 30 cm long and 6 cm in internal diameter. Site 1, D424-M in Fig. 1. Water depth 1550 m

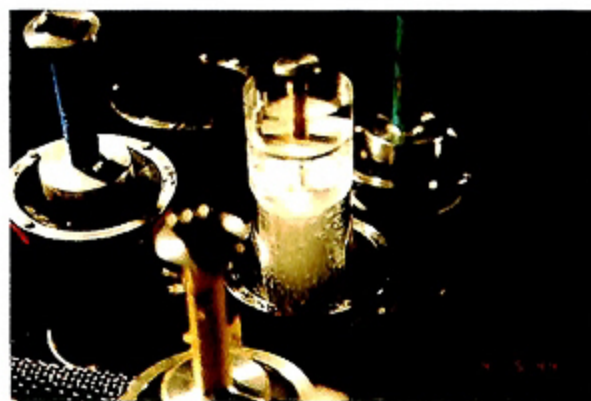


写真8 写真7のM式採泥管を「しんかい2000」の観測窓前に固定し、浮上中の相変化をビデオにて観察したもの（図4参照）

Photo. 8 Phase change of the CO_2 -rich liquid bubbles in the acryl cylinder (Photos 6 and 7) during the ascent of "SHINKAI 2000". Top left : Hydrate-covered bubbles forming "cluster of grapes" (G in Fig. 4) at 1300 m water depth ; bottom left : About 670 m water depth. Grapes partly collapsed to form "Sherbet", while tubes of hydrate ("Macaroni", M in Fig. 4) developed; right : About 300 m, gas bubbles started to evolve through the bottom cap.