

遅すぎた発見 — 明神海丘熱水硫化物チムニー —

飯 笹 幸 吉¹⁾

はじめに

ブラックスマーカー, チムニー, 塊状硫化物, 熱水生物群集. 今では聞き慣れたこの言葉は, 1970年代後半, 海外の海洋研究機関が中央海嶺において精力的に実施した探査研究の結果, よく知られるようになった. 例えば, 1977年, 赤道直下のガラパゴス諸島付近のガラパゴスリフトにおける特異な熱水生物群集 (Corliss et al., 1979), また1978年, メキシコ西方の東太平洋海膨における塊状の熱水硫化物 (Francheteau et al., 1979) などの発見である (第1表). この事が1979年に雑誌で紹介されると, 驚きとともに確かに「海洋底は生きていて, そしてまだまだ未知の世界である。」という印象を様々な人々に与え, ますます, 熱水鉱床の探査研

究に拍車がかかった. そして, 1980年代にはいると, 続々と熱水硫化物の存在が報告され始めた.

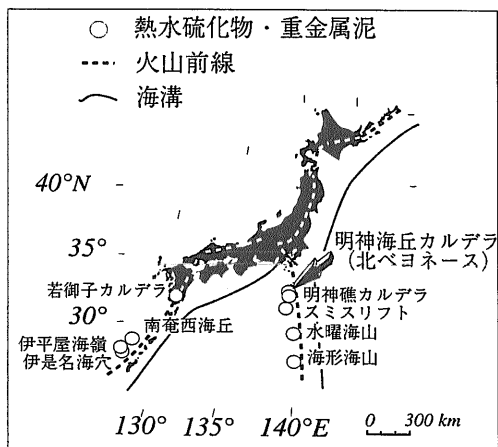
その頃, 世界的な海洋鉱物資源調査の流れの中で, 日本では遅ればせながら, しかし, 唯一地質調査所が, 日本周辺の島弧における熱水硫化物の調査・研究に本腰を入れつつあった (湯浅, 1983). なぜ, 島弧かというと, 日本からは大洋の中央海嶺は非常に遠くまた水深が島弧より深く調査効率が上がらないし, 我々は, 我が国の周辺の海洋鉱物資源の潜在性を, まだ, なにも知らなかったからである. また, 日本の陸上には, 世界的に知られた塊状硫化物の黒鉱という鉱床があり, これが, およそ一千数百万年前に起こった, 背弧における海底火山活動によってできたことが知られていたこともある (例えば Tanimura et al., 1983). しかも, 陸上の

第1表 熱水活動に伴う沈積物—中央海嶺及び日本周辺海域.

| 中央海嶺における黎明期の発見 | | |
|----------------|---|---|
| 中央海嶺 | 紅海アトランティス二世凹地 ガラパゴスリフト 東太平洋海膨 | 硫化物を含む重金属泥 (Miller et al., 1966) 特異な熱水生物群集, マンガンクラスト (Corliss et al., 1979) 塊状硫化物, チムニー (Francheteau et al., 1979) |
| 日本周辺海域における発見 | | |
| 伊豆・小笠原弧 | 海形海山 海形海底カルデラ スミスリフト 水曜海山 明神礁海底カルデラ 明神海丘カルデラ 明神海丘カルデラ | 熱水性マンガンクラスト (Usui et al., 1986) 硫化物を含む変質した安山岩 (Urabe et al., 1987) 重晶石・シリカチムニー (Urabe and Kusakabe, 1990) 活動的, 硫化物チムニー (春日・加藤, 1992) 硫化物・重晶石片や硫化物を含む変質安山岩 (Iizasa et al., 1992) 鉱染状硫化物 (飯笹ほか, 1993) 活動的 (?), 塊状硫化物, チムニー (飯笹ほか, 1996) |
| 沖縄トラフ | 伊是名海穴 伊平屋海嶺 南奄西海丘 | 活動的, 塊状硫化物, チムニー (Halbach et al., 1989) 活動的, 硫化物・硫酸塩・炭酸塩, チムニー (田中ほか, 1989) 活動的, 硫化物・硫酸塩, チムニー (根建ほか, 1992) |
| 鹿児島湾 | 若御子カルデラ | 活動的, 硫化物, 重金属泥 (小坂ほか, 1980; Sakamoto, 1985) |

1) 地質調査所 海洋地質部

キーワード: 伊豆・小笠原弧, 明神海丘, カルデラ, 熱水硫化物, チムニー, 潜水艇



第1図 日本周辺海域における熱水硫化物及び熱水性の重金属堆積物の発見地点。

塊状硫化物鉱床の数や鉱量をまとめてみると、このような島弧の流紋岩火山活動に伴う塊状硫化物鉱床は、中央海嶺における玄武岩火山活動に伴う物より、はるかに重要な資源である (Mosier et al., 1983; Lowell and Rona, 1985)。このような黒鉱鉱床が形成された地質環境に類似する場として、現在の沖縄トラフ (Sillitoe, 1982) や伊豆・小笠原弧 (藤岡, 1983) に想定されたが、調査開始当時、多くの人々は日本近海における熱水鉱床の存在にははなはだ懐疑的であった。

地質調査所による伊豆・小笠原弧の調査期間中の1980年代後半、日本では、熱水硫化物探査が最盛期を迎えていたと言えるだろう。

ここでは、東京の南およそ400kmの距離 (東京と京都間に相当する) にある伊豆・小笠原弧の明神海丘カルデラ (当初、地質調査所では北ベヨネース海底カルデラと称していたが、後に海上保安庁水路部により明神海丘と命名されたため改称) における、熱水硫化物チムニーの発見に至る1996年までのおよそ10年間に得られた成果の一部をエピソードを交えて紹介したい (第1図)。

船による調査・経験

小さい頃、学校でよく歌ったように、外洋に出ていくと「海は広いな大きな」である。その海の底には、陸上にみられるように山もあれば谷もある。日本列島のすぐそばには、世界的に知られた日本海

溝や小笠原海溝のように深いところもある。また、東京の南にある伊豆・小笠原諸島の海底には、海の上に顔を出した島の数よりもっと多くの海底火山が連なっている。水深1,400mの海底にある明神海丘もそのひとつである。

広い海での調査には、人工衛星や海洋構造物を主に利用して、データの収集を行うこともあるだろう。また、調査船を利用した、文字どおり、波に揺られて試料を得る方法/およそ110年前の英国の海洋調査船チャレンジャー号よりは、はるかに、ハイテク機器を搭載しているが、まだまだ、人海戦術を必要とする/もある。私たちは、後者の船を走らせる調査を行った。

長い調査期間中には色々なことに遭遇する。海は、シケるときもあればナギのときもある。あの広い太平洋の海原で、気紛れな台風に出会ってしまうと逃げ回るのである。ある時、逃げ切れずに暴風圏に捕まってしまった。その時は、2,000トン近くある調査船が木の葉のように揺れ、大波は10数mの高さにある船橋にまで打ちつけた。回避行動をしている最中に、海が穏やかなときは海面から3-4mの高さにある船尾甲板に海水が乗り上げてきた。お風呂で子供が遊ぶ小さな船が揺れるように、何時沈んでもおかしくないくらい揺れるのである。嵐が過ぎて、ナギになれば、荒れた海がウソのように、あの大洋が鏡のように平らになるのである。そんな海で、体力に物言わせて、ひたすら海の底に何かいいものがあるのではないかと希望を持ちつつ何日もがんばるのである。昔は、と言っても20年ほど前からつい最近まで、調査では2ヵ月の連続調査などは普通であった。読者の皆さんは、船酔いをご存じだろうか。これは、経験したことがある人たちだけがその気持ちをわかるもので、二日酔いとは比較にならないくらい、この世のものと思えないひどさである。宇宙酔いは知らないけれど。

しかし、調査はいつも辛い日々の繰り返しではない。この海の底にあるはずの熱水硫化物を何とか採取しようとして新たな調査手法を考案し、その結果に基づいて有望地点の海底を調査する時、気持ちがわくわくする。このような気持ちを調査のたび味わいながら、そして、3年目の航海で熱水変質岩を手にしたときの喜びは何とも言えない。まして、緑色の変質岩にキラリと光るものを目にしたときに

は疲れも船酔いも吹き飛んでしまう。

熱水調査の方法・成果

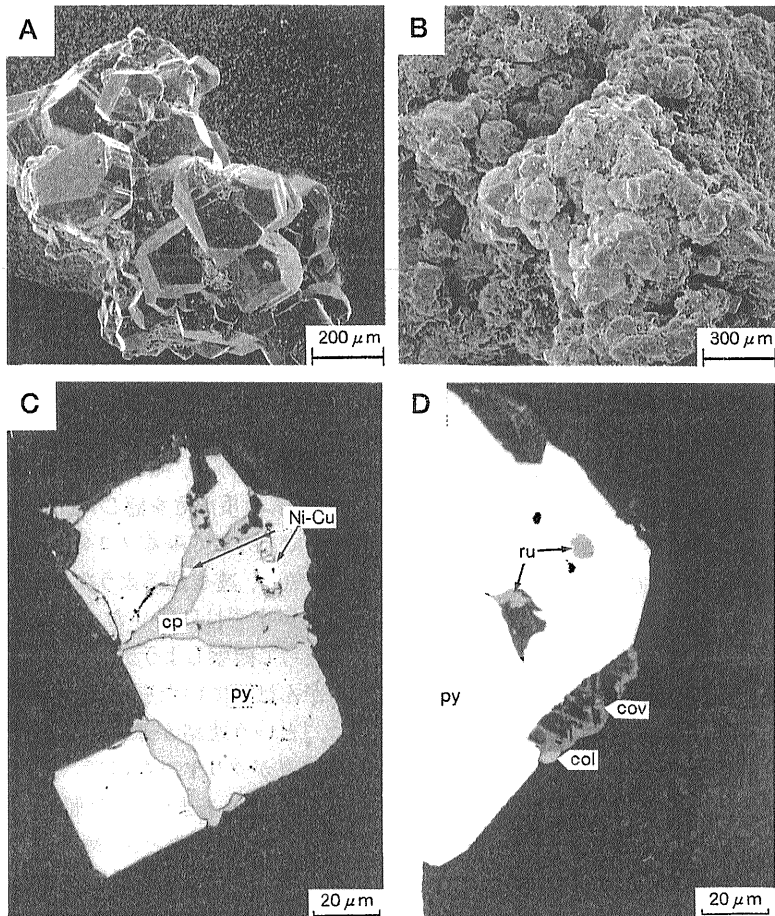
地質調査所による熱水硫化物調査・研究プロジェクトは、1984年から始まって1989年までの6年間にわたって行われた。この間の海底調査では、未発見の海底カルデラが、伊豆・小笠原弧にいくつかある(村上・石原, 1985)ことがわかり、その中の一つが明神海丘カルデラであった。これは、古期岩体を基盤とし軽石を主体とする火山である(湯浅・村上, 1989; 湯浅, 1995)。また、調査海域内では熱水性のマンガン酸化物の存在が何ヵ所も報告され始めた(Usui et al., 1986)。私は海洋鉱物資源調査が終了した後も調査航海で得られた試料をもとに、熱水硫化物鉱床が存在する候補地を絞る研究をしていた。この結果を踏まえて、これまでに、海洋科学技術センターのしんかい2000と呼ばれる水深2,000mまで潜航できる潜水艇に、何度となく乗ることになった。そして、ついに、今度(1996)こそ、なにも発見できなければ潜水調査は打ち切りになると、一人心に決めていた航海で、とうとう、明神海丘において大規模と思われる熱水硫化物チムニー群と、これに付随する硫化物鉱石を見つけたのである(飯笹ほか, 1996)。

どのように、熱水硫化物鉱床の場所を特定していったかを簡単に述べる。活動的な熱水鉱床が存在する場所であれば、精密な海底地形図をもとに様々な水深で海水を採取して、海水中に溶けている特定の元素(メタン、ヘリウム、マンガンなど)の分析、酸化還元電位(中村ほか, 1994)や水温などの測定を行い、熱水活動の存在を知ることができる。今回採用した方法は、鉱物学的手法である。これは、船上からワイヤーロープで吊り下げた採取装置を利用して、取れた堆積物に混じっている特定の鉱物、例えば、熱水活動により作られたと考えられる、銅・鉛・亜鉛などを含む鉱物を探して、それを定量的に調べるのである(第2図)(Iizasa, 1993a)。採取した堆積物を篩いにより粒度をそろえ、その後、重液分離や磁気分離を行い重鉱物を顕微鏡で観察する。そして、これらの鉱物の重量と形態および分布を調べた上で、熱水活動の有望域を選定するのである。ところで、このような鉱物は

酸化的な環境下では不安定で、それほど長い期間、海水が存在する場所では残らないと思われていたが、敢えてこの鉱物達を探すことに挑戦した。なぜなら、地質時代に海底で形成された黒鉱鉱床が陸上に見つかっていることを考えれば、現在の海洋底における熱水活動に伴って生成した硫化物鉱物が残らないことはないだろうし、また、当たり前だと思われていることにこそ意外に見落としがあるかもしれないと考えたからである。この探査手法は、当初考えていたよりも信じられないくらいの情報を私に与えてくれた。これは、砂金などで知られる漂砂鉱床の調査では、普通に取られる方法のひとつであると思うが、深海底で生成したあるいは生成しつつある硫化物鉱床の探査では異色の存在であると思う。この鉱物探しを実を結ぶのが、プロジェクトが終わる頃の1988年の調査航海であった。

調査海域は、今回硫化物チムニーが見つかった明神海丘の南およそ20数kmにあり、危険海域に指定され誰も近づかない明神礁をひとつの外輪山とする海底カルデラであった。決死の覚悟で調査に臨んだのである。このカルデラにおいて採取した堆積物は、様々な種類の硫化物を含んでおり、カルデラ内における分布を知ることができた(Iizasa, 1993b)。これをもとに、先ほども紹介した黒鉱鉱床に出てくる物と似たタイプの鉱石の破片や硫化物を含む変質岩も手に入れたのである(Iizasa et al., 1992)。この頃には、熱水活動に伴う地域をもう1ヵ所特定していた。それが、今回の明神海丘であった。明神海丘で採取した堆積物中の重鉱物は、重液分離をするとキラキラ輝きながら重液中を落ちていく。この試料には相当量の黄銅鉱・閃亜鉛鉱・黄鉄鉱などの硫化物が含まれていた。また、船上調査によって明神海丘のカルデラ内の海水中に、マンガンやメタンの異常が測定されていた(石橋・下島, 1992)。しかし、プロジェクトの終わりに来ていたので、硫化物の採取は実現することなく潜在的な可能性を残したまま時は過ぎていった。

ここで、登場してくるのが、しんかい2000という潜水艇である。我々の深海における鉱物資源の調査にはそれぞれ調査の段階があり、潜水艇を利用した調査は、調査船による概査及び精査の後の最終段階に位置づけられる。この潜水艇による調査はピンポイントになってしまうが、十分な事前調査



第2図 海底カルデラから採取された堆積物中にみられる熱水硫化物。A：黄銅鉱及びB：黄銅鉱・閃亜鉛鉱の走査電子顕微鏡写真，C：黄鉄鉱 (py)・黄銅鉱 (cp)・ニッケル・銅 (Ni-Cu) 及びD：黄鉄鉱・銅藍 (cov)・コルサイト (col)・ルチル (ru) の反射顕微鏡写真。

の結果を受けて実施するため密度の高い試料やデータを手に入れることができる。

潜水艇による調査

私は、海の仕事をしている割には、船酔いを始め海の調査では幸運に恵まれないようである。またしても、潜水艇を利用した調査では、海の気象状況という敵が現れてきた。私が潜りにいくと言うときに、何度となく海が荒れた。ある人には、海の神様にお祈りが足りないのじゃないかとか、君を行かせたくない何かがあるんだよとか言われたりした。調査海域に到着しても潜航できないことは、荒れた海で船酔いと闘いながら、潜水艇に乗れることを、ただ、ひたすら待ち望んでいる身にしてみると

残酷なものである。ある時などは、潜水艇の母船に乗るためにわざわざ港まで出かけたのにも関わらず、船舶電話で母船に連絡してみると、台風が近づいてきて大荒れだから、今回は中止です。また、来年ですね、と言う話であった。重い荷物をおかつぎ、満員電車で揺られてきたのに、と思ったりもした。このようなことがあり、明神海丘で最初の1回目を潜るために、多少時間を要した。

1992年の夏、わざわざ、私のため(そんなことはないと思うけれども、少し運航側の気持ちを感じる)に、いや私にとってこの海域でもっとも良い時期に潜航する機会が回ってきた。しかし、この年は、気象がちょっと変で、台風が早々とやってきていた。船に乗る前から天気予報は、調査する期間中、あまり良くないと報じていた。天気予報はあく

までも予報であると、ある時は信じ、今回は信じたくない気持ちで出かけていった。その時は、私は母船には乗れた。ここまでは良かったと、船に乗船したとき思った。他に、もう一人、アメリカ人研究者が乗船した。彼は、はるばるハワイからやって来ていたので、海が味方したのか、とにかく潜れた。しかし、私の番のときは、海は荒れだして潜水艇を着水させるのが難しくなってきた。ここで、弱気になって、また、来年があるさなどと思う顔をせずに、ひたすら乗りたいんです、という顔を船長と潜水艇の司令にし続けていた。その甲斐があつてかあるいは多少天気が遠慮したのか、とにかく潜水艇に乗ることはできた。潜水する前は、待機室で短時間のミーティングをするのだが、その時に、今日はこれからもっと荒れ出すから、いつものように潜航時間をとれないかもしれないと宣告された。それでも潜る。なにがなんでも潜る。このままでは帰れない。

ここからは、初めて潜水艇の耐压殻の中から海をみた感想を少し披露したいと思う。海は、青いのである。宇宙飛行士が、「地球は青かった」と感動したように、潜り始めてしばらくは青いのである。この青の世界の底に山や谷があり、そして、計り知れない物が隠されている。しんかい2000は、指定した地点に向かって、およそ毎分30mほどの速さで潜航し始めた。潜航と言っても、ただ物が落ちるように、この場合はゆっくりと右回りに時には左回りに螺旋を描くように沈んでいく。うれしいものである。自分たちが事前調査した場所に向かって、世界でもいくつもない高価な乗り物に乗れるのだから。しかも、これまでの調査研究成果が、実を結ぶとなると感慨無量である。潜航を開始して水深20mを越すと、もう、そこは海上の波の影響を受けず快適な世界である。潜航している間は、無音潜航である。そして次第に暗くなっていく。ジェット旅客機に乗って昼間に窓の外を見ると濃い青色と暗い宇宙の境界をみる事ができるように、ちょうど海の中も水深が400mにも達すると、もうそこは、青から漆黒の闇の世界に変わる。船の人が言うマリンスター、という潜水艇に触れたり衝突すると、青白く発光する生物に出会った。綺麗である。宇宙船に乗っていたって、こんな世界は経験できないだろうなとか、ちょっと冷えてきたなとか、耐压殻の中

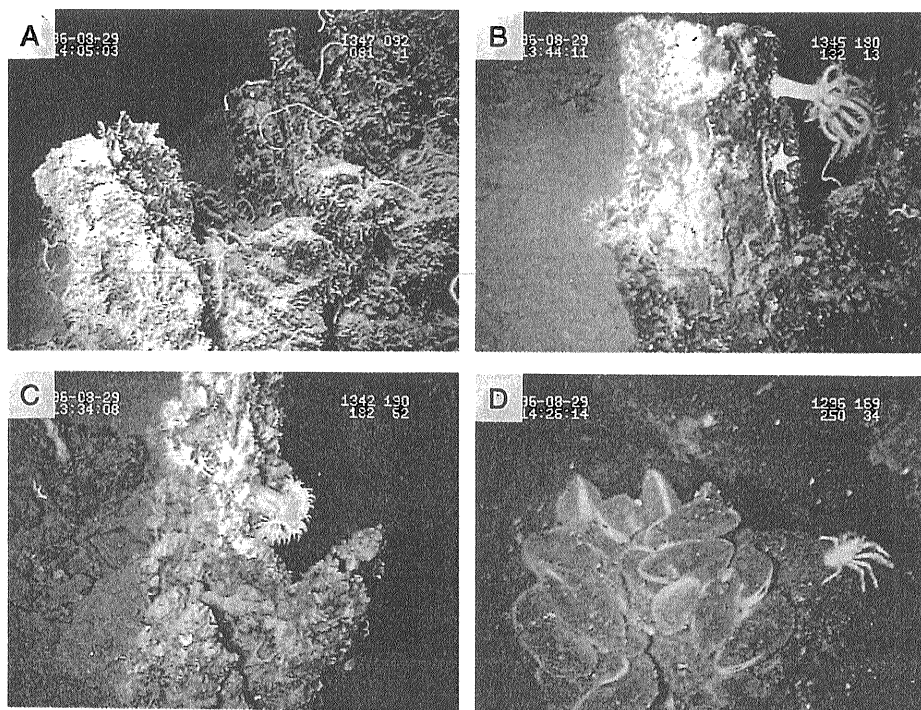
は狭い割には以外に窮屈な感じがしないなとか、考えたりしながら海底の様子を想像していた。潜水艇の中には、酸素マスクがいざという時のために備えてあった。事前説明では、万一、この潜水艇が潜航中に何かあったら救助が来るまで充分？ 持つだけの量があるという話であった。また、潜水艇は3人乗りで私以外はチーフパイロットとパイロットであり、この二人に何かあった場合は、私が母船と交信するなどの説明を受けた。

さて、潜航してから数十分が過ぎて、船外の電気を点灯して海底に着く直前に、中性浮力を取り、そして、1,400mの海底に着いた。海水の厚さとか重さとか、照らし出された深海の世界に水深1,400mの重厚さを感じた。意外にカルデラの床は平らで、初めてみるソコダラとか言う細長い鰻のような魚と、透き通るような赤みを帯びたオレンジの海老がまず目に付いた。呼び戻される前にどんでん走って観察しようと意気込んで、昼御飯も食わずにがんばっていたら、「海が荒れてきたので離底せよ。」という連絡が来た。そう、水中電話って、意外と音声クリヤーなので、初めて聞いた私は驚いた。しかし、あまり、有り難くないはっきりとした声であった。そんなとき、めざす硫化物と思われる角礫状の破片を採取した。また、熱水域や海底の湧水域などに棲息している、特徴的なシンカイコシオリエビやすでに死んでしまって殻だけのシロウリ貝をみたのである。すでに遅しである。泣く泣く離底した。海は大荒れになりつつあった。

採取した試料は、鉱染状の硫化物を多量に含んでおり、金含有量は19ppmを示し予想以上にいいものであった。これは、ここ何年も夢にまで描いていた熱水硫化物チムニーではなかったけれどもそれに匹敵するものであった。

硫化物チムニーの発見

初めて潜航してから、4年が過ぎた。その間やはり、海洋の気象条件に恵まれず何回も潜航を断念してきた。1995年は、あの未曾有の悲劇をもたらした兵庫県南部地震の影響があった。潜水艇の母船が、震災地付近の造船所で定期点検を受けている時に地震の影響を被り、その年の潜航計画に支障を来した。そして、ついに、1996年の夏に、この話

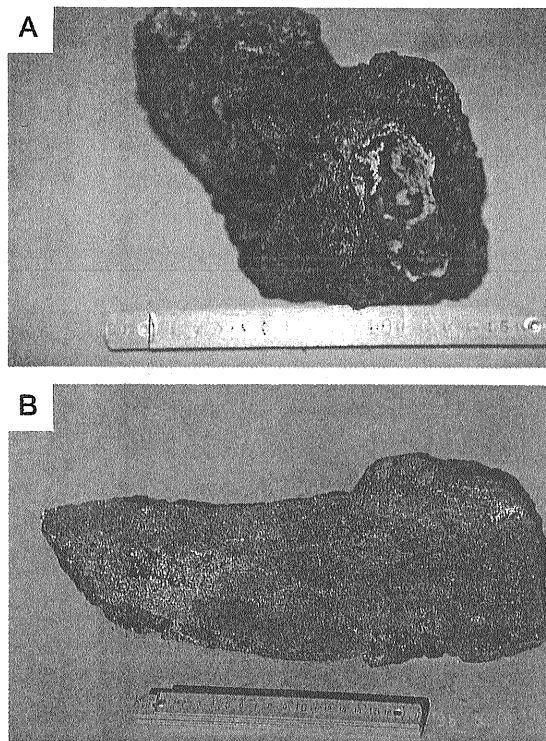


第3図 明神海丘カルデラ床東部で発見された、すでに活動を停止した熱水硫化物チムニーと熱水生物。A：角礫状鉱石の上に屹立する硫化物チムニー，B：途中で折れた硫化物チムニー，C：主チムニーから分岐している小チムニー，D：低温熱水域に棲息しているシンカイヒバリガイとシンカイコシオリエビ。

しを書く動機にもなった熱水硫化物鉱床を発見したのである。しかし、ここでも、私はトラブルに見舞われた。3人の共同研究者と一緒に行ったのであるがどういう訳か私の潜航のときだけトラブったのである。割り当てられた潜航は一度だけしかないにも関わらず着底後航走しようとした時、潜水艇の左右についている補助推進機の向きがどうしても変わらないのである。調査を断念せざるを得なかった。もう、これで来年はないなと思っていた。しかし、仲間は有り難い存在である。彼の潜航を一つゆづってくれたのである。これは大変な決断である。

今度こそ、絶対に潜航して何かをつまえて来るんだ。明神海丘カルデラの東に着底して、しばらく航走すると、マンガンを含む10cmほどのチムニーが立っているのみつけて喜んだ。これは、4年前ビデオに撮っていたが試料は手にしていなかった。これからでてくるのが何かも知らずに、じっくりと観察していて時間配分を間違えてしまった。よくある

ことである。さい先がいいな、と勝手に思ってカルデラ壁まで進んでいった。ほとんど平坦であった海底が徐々に登りになったところで、一面に板上の黒色のマンガン酸化物があがるではないか。そのうえ、板状のマンガン酸化物の表面が至る所で下から突き上げられたように割れて、何やら黄色の沈殿物が吹き出している。もう、これで残り時間など考えることなど、どこかに吹っ飛んで行ってしまった。そして、このあたりまで来ると、時折、潜水艇のソナー画像に進行方向に適当な間隔を置いて障害物が映るようになった。最初はそれを巨大な岩と思っていた。しばらくすると、角礫状の鉱石が所々に現れてきた。さらに進んでいくと、一瞬、先が大きな岩で塞がれたような気がした。なんとそれは角礫状の鉱石の上に、活動していない屹立した巨大なチムニーではないか(第3, 4図)。高さはおよそ3m、幅は1mほどもある。最初は、なんだろうなと思ってしばらくわからなかった。目の前に次々にでてくる大小のチムニーをみて、ようやく言葉になっ



第4図 明神海丘カルデラで採取した試料。A：閃亜鉛鉱に富む硫化物チムニー，B：黄銅鉱・黄鉄鉱から構成された角礫状鉱石。

た。「とうとうやった。」さすがに、潜水艇による海底の直接観察の威力は、ものすごいものがある。現場にいる者に、いいしれぬ興奮を起こさせる。もう、それから観察はしたいは試料は取りたいはで、結局、努力した割には試料が意外に取れない。しかし、時間はどんどん過ぎてしまう。いっそのこと、外にでてハンマーでたたいて取って来ようかしら、などと思う始末。船の人は、私の欲しい試料をマニピレーターで一生懸命取ろうとしているのに、また、「これを取ったらもう次の試料はもう入りません。重量オーバーです。」などと言う。まだ、取り始めたばかりなのに。しかたなしに試料は一つだけにする。これから何が出てくるかわからないのだから。さらに進むと、角礫状の鉱石の山とチムニーが、セットメニューで現れるではないか。試料はどれを取ったらいいのか、早く取らないと時間がない、などと考えている内に時間は過ぎていく。一つの露頭で一試料しか取れない、だから、よく選んで決めよう。そして、あれを取って下さいと言えば、

「これはちょっと取れません。」そう、なかなか潜水艇の繰船は難しいのです。象のようです。すぐに向きは変えられないのです。象の鼻のように長い手があれば別なのですが。軽いと思った試料が実は30kgもあり、「これはダメです。」などとおっしゃる。しかし、取ってくれた。試料をバスケットに入ると潜水艇が前に傾いた。「もう、本当にダメですよ。」カルデラ床から100mほど上昇したところまで、硫化物チムニーや変質帯が観察された。そして、離底間近になって、角礫状の鉱石の間に低温ではあるが熱水噴出を確認した。そこでは、規模は小さいがシンカイコシオリエビやシンカイヒバリガイの生物群集が棲息していた。この硫化物のセットメニューは、さらに、カルデラ壁の浅部に続くことが予想された。

ここは、理想的な鉱床形成の場であった。火山フロント上の流紋岩を伴う典型的なカルデラ地形に硫化物鉱床が存在し、さらに、それがカルデラ壁の崩落で埋積され始めているのである。鉱床として残るセッティングである。採取試料の化学分析の結果は、銅・亜鉛・鉄に富み金は最高で32ppmを示し、伊豆・小笠原弧の水曜海山の72ppmに次ぐ値であった。これは、日本周辺海域の潜在資源として、財産目録に書き留めるに値する。

結び

ここまで、海底の熱水活動によって作られた硫化物チムニーのことを紹介してきましたが、はじめに述べた一千数百万年前につくられた日本の黒鉱鉱床にも、現在の海底で発見されているチムニー構造を持った硫化物が報告されている(Shimazaki and Horikoshi, 1990)こともつけ加えておきたい。私は、しんかい2000の潜航調査に関して、潜航の成功率では、最悪の研究者であつたらしい。それでわざわざあるシンポジウムにおいて有り難くない表彰もされた。そのおかげかどうか、潜水船に関係する方々の心に私のことが刻まれたようである。これは、その後の潜航調査に参加してわかったことである。

熱水硫化物探しは、10年後に、ようやくその成果をみた。長い道のりであった。

ここにいたるまで、多くの方々にご御協力と励ま

しをいただいた。特に、海洋科学技術センター、地質調査船白嶺丸の乗組員の方々、そして地質調査所の皆様に感謝の意を表します。また、本稿執筆に際し、有田正史・湯浅真人両博士には有益な助言をいただいた。

引用文献

- Corliss, J. B., Dymond, J., Gordon, L. I., Edmond, J. M., von Herzen, R. P., Ballard, R. D., Green, K., Williams, D., Bainbridge, A., Crane, K. and van Andel, T. H. (1979): Submarine thermal springs on the Galapagos rife. *Science*, **203**, 1073-1083.
- Francheteau, J., Needham, H. D., Choukroune, P., Juteau, T., Seguret, M., Ballard, R. D., Fox, P. J., Normark, W., Carranza, A., Cordoba, D., Guerrero, J., Rangin, C., Bougault, H., Cambon, P. and Hekinian, R. (1979): Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, **277**, 523-528.
- 藤岡換太郎 (1983): 黒鉱鉱床はどこで形成されたか。鉱山地質特別号, **11**, 55-68.
- Iizasa, K. (1993a): Petrographic investigations of seafloor sediments from the Kita-Bayonnaise submarine caldera, Shichito-Iwojima ridge, Izu-Ogasawara arc, northwestern Pacific. *Mar. Geol.*, **112**, 271-290.
- Iizasa, K. (1993b): Assessment of the hydrothermal contribution to seafloor sediments in the Myojinsho submarine caldera, Shichito-Iwojima ridge, Izu-Ogasawara arc. *Japan. Mar. Geol.*, **114**, 119-132.
- Iizasa, K., Yuasa, M. and Yokota, S. (1992): Mineralogy and geochemistry of volcanogenic sulfides from the Myojinsho submarine caldera, the Schichito-Iwojima ridge, Izu-Ogasawara arc, northwestern Pacific. *Mar. Geol.*, **108**, 39-58.
- 飯笹幸吉・仲 二郎・湯浅真人・R. Fiske (1996): 明神海丘カルデラにおけるチムニーを伴う熱水活動。第13回しんかいシンポジウム予稿集, 24-25.
- 飯笹幸吉・寺島 滋・佐々木宗建・丸茂克美 (1993): 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。第9回しんかいシンポジウム報告書, 10-115.
- 石橋純一郎・下島公紀 (1992): 伊豆・小笠原弧における地球化学的手法による熱水活動探査。月刊地球, **14**, 489-492.
- 春日 茂・加藤幸弘 (1992): 水曜海山の火口底で発見された海底熱水性鉱床。月刊地球, **14**, 484-488.
- Lowell, R. P. and Rona, P. A. (1985): Hydrothermal models for the generation of massive sulfide ore deposits. *J. Geophys. Res.*, **90**, 8769-8783.
- Mosier, D. L., Singer, D. A. and Salem, B. B. (1983): Geologic and grade-tonnage information on volcanic-hosted copper-zinc-lead massive sulfide deposits. *U. S. G. S. open-file rep.* 83-89.
- Miller, A.R., Densmore, C. D., Degens, E. T., Hathaway, J. C., Manheim, F. T., McFarlin, P. F., Pocklington, P. and Jokela, A. (1966): Hot brines and recent iron deposits in deeps of the Red Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **30**, 341-359.
- 村上文敏・石原丈実 (1985): 小笠原島弧北部で発見された海底カルデラ。月刊地球, **7**, 638-646.
- 中村光一・Baker, E. T.・リッジフラックスR/V Melville Westward Expedition Leg 1乗船研究者一同 (1994): Tow-yo, Eh その場測定による東太平洋海膨熱水ブルームの特徴づけ。地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集, 167.
- 根建心具・上野宏共・小坂丈予・野上健治・橋本惇・藤倉克則・三浦知之 (1992): 沖縄トラフ南奄西海丘の海底熱水鉱床-特に構成鉱物について-。しんかいシンポジウム報告書, **8**, 95-106.
- 小坂丈予・平林順一・岡田 清 (1980): 海底火山活動に伴う2-3の鉱物の生成-特に黄変色海水中に含まれる沈殿鉱物について-。鉱物学雑誌, **14**, 特別号2, 118-125.
- Sakamoto, H. (1985): Distribution of mercury, arsenic, and antimony in sediments of Kagoshima Bay. *Bull. Chem. Soc. Japan*, **58**, 580-587.
- Shimazaki, H. and Horikoshi, E. (1990): Black ore chimney from the Hanaoka Kuroko deposits, Japan. *Mining Geology*, **40**, 313-321.
- Sillitoe, R. H. (1982): Extensional habitats of rhyolite-hosted massive sulfide deposits. *Geology*, **10**, 403-407.
- 田中武男・満沢巨彦・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。海洋科学技術センター試験研究報告第5回深海2000研究シンポジウム報告書, 267-281.
- Tanimura, S., Date, J., Takahashi, T. and Ohmoto, H. (1983): Geological, paleontological, and tectonic studies: Geologic setting of the Kuroko deposits, Japan: Part II. Stratigraphy and structure of the Hokuroku district. In: Ohmoto, H. and Skinner, B. J. (eds.), The Kuroko and related volcanogenic massive sulfide deposits, *Econ. Geol. Monograph* **5**, 24-39.
- Urabe, T. and Kusakabe, M. (1990): Barite silica chimneys from the Sumisu rift, Izu-Bonin arc: possible analog to hematitic chert associated with Kuroko deposits. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **100**, 283-290.
- Urabe, T., Yuasa, M., Nakao, S. and on-board scientists (1987): Hydrothermal sulfides from a submarine caldera in the Shichito-Iwojima ridge, northwestern Pacific. *Mar. Geol.*, **74**, 295-299.
- Usui, A., Yuasa, M., Yokota, S., Nohara, M., Nishimura, A. and Murakami, F. (1986): Submarine hydrothermal manganese deposits from the Ogasawara (Bonin) arc, off the Japan islands. *Mar. Geol.*, **73**, 311-322.
- 湯浅真人 (1983): 海底熱水鉱床について (2)。地質ニュース, no. 346, 14-21.
- 湯浅真人 (1995): 「しんかい2000」による海底軽石火山の観察: 明神海丘潜航調査。火山, **40**, 277-284.
- 湯浅真人・村上文敏 (1989): 七島-硫黄島海嶺北部の海底カルデラの成因について (演旨)。火山, **34**, 131.

IIZASA Kokichi (1997): Too Late: The Discovery of Sulfide chimneys in the Myojin knoll caldera.

<受付: 1997年3月14日>