

ついに実現した海底熱水鉱床のボーリング調査

飯笹 幸吉¹⁾・松本 勝時²⁾・熱水調査チーム³⁾

1. はじめに

「ドーン、ミッシミッシ」、「ガシャーン」。階下で皿の割れる音がする。初冬の海は容赦なく強烈な波を船に打ちつける。荒れ狂う季節の海洋調査の始まりである。

2000年12月、3年ほど前に発見した黒鉱型の巨大硫化物鉱床をボーリングする機会がついに到来した。「遅すぎた発見」(飯笹, 1997)の中で紹介した伊豆・小笠原弧の火山フロント上の海底カルデラに存在するこの鉱床は、その後、「サンライズ鉱床」と名付けられた(Iizasa *et al.*, 1999)。そして、海底鉱物資源調査の新たな展開が始まった。

1999年、金属鉱業事業団による沖縄の熱水鉱床調査航海が終わり、調査の対象が伊豆・小笠原弧に移ったことから、明神海丘を取り巻く事態は急速に進展したのである。「遅すぎた発見」とはいえ、それはある意味ではタイムリーでもあった。国の委託を受けた金属鉱業事業団は、平成12年度から6年計画で伊豆・小笠原弧における熱水硫化物の資源量調査を実施することになり、サンライズ鉱床はボーリング調査を主体にした資源量評価をするための絶好の対象となった。これまで、有人潜水艇「しんかい2000」を利用した海底調査から、サンライズ鉱床の硫化物チムニーの海底表層における分布や産状はおおよそ把握できていたが、鉱床直下における深部の試料がないために、鉱床全体の様子が全くと言っていいほど理解できていなかった。これを明らかにするために、ボーリングによる掘削を実施し、最終的に資源量評価に結びつける試みがまったのである。

金属鉱業事業団は、すでに1999年暮れに同島弧の熱水性硫化物を伴う水曜海山において試験的にボーリング調査を行っていた。同団は海底着座式のボーリングマシンを所有し、世界で唯一海洋性島弧の熱水硫化物鉱床の掘削を成功させた実績を持っているのである(松本・皿田, 2000)。

調査航海に先立って調査関係者とのミーティングが何度も行われ、回を重ねるごとにボーリング調査に対する関係者の意気込みが高まっていくのを感じた。「サンライズで掘削しよう!」世界的に見ても海洋性島弧の巨大硫化物鉱床における掘削は初めてのことであり、このことも調査関係者の意欲を一層高めた。

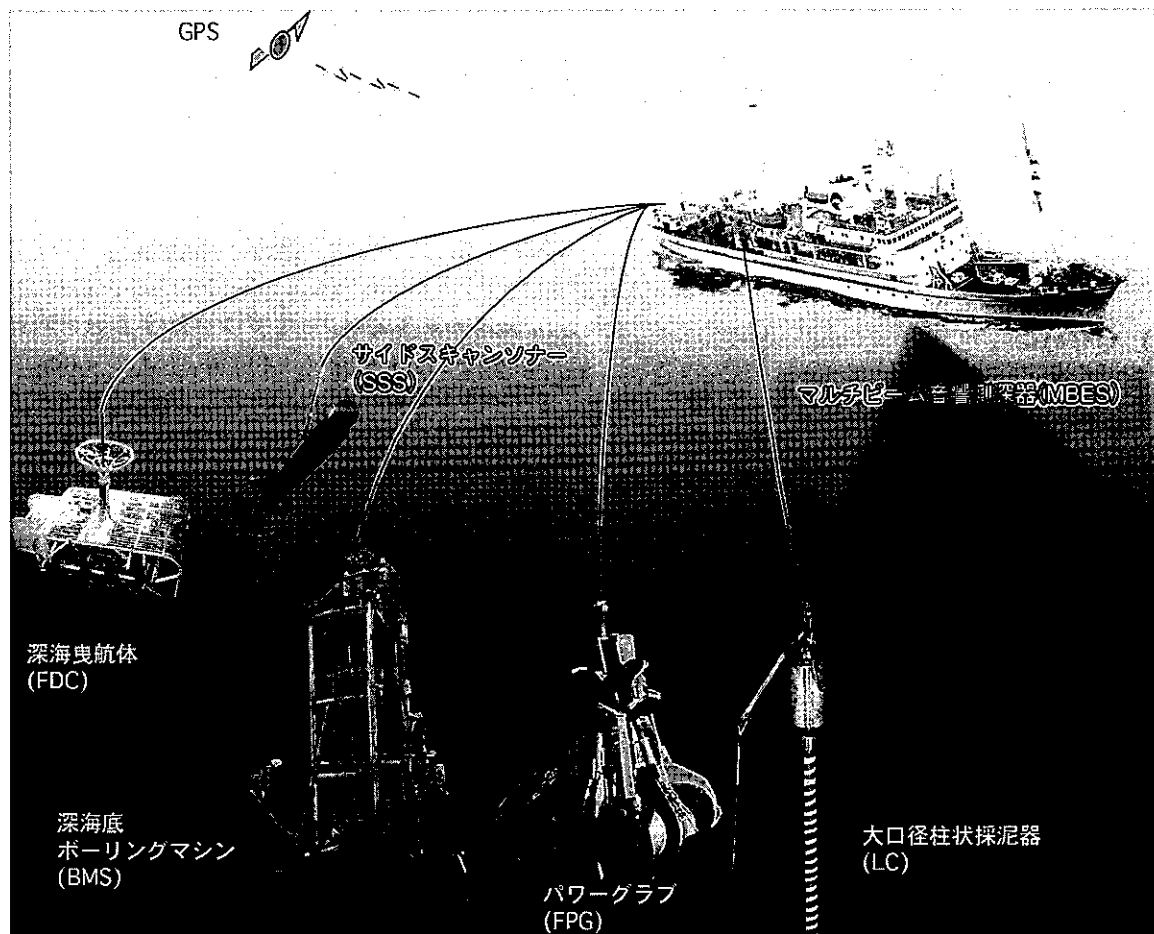
本稿では、伊豆・小笠原弧における熱水硫化物の潜在的資源量の評価を実施するにあたり、まず「第2白嶺丸」に搭載された深海底ボーリングマシンと事前調査に使用した機器類の紹介をおこない、2000年暮れに実施した調査結果の概要を報告する。

2. 事前調査

本誌「伊豆・小笠原弧における海底熱水鉱床の新探査法」にもあるように、熱水鉱床の発見に至るまでの各段階で調査手法が異なり、本稿で紹介するボーリング装置を有効に活用するまでには、たとえば以下に示す調査機器類のいくつかを使用した事前調査が必要である(第1図)。ここでは紹介されていない海水中のマンガン、ヘリウム、メタンやバクテリア(たとえば Mita *et al.*, 1988)などの異常をとらえる調査手法もある。

1) 産総研 海洋資源環境研究部門
2) 深海資源開発株式会社
3) 深海資源開発株式会社(斎藤洋男, 村山信行, 岡崎正次, 松井一徳, 飯 博行, 柴崎洋志, 杉浦則清)

キーワード: 島弧, 海底熱水鉱床, 黒鉱型, ボーリング, BMS



第1図 海底熱水鉱床調査において使用した第2白嶺丸の搭載機器類.

3. 海底地形図の作成

「第2白嶺丸」には海底地形を即座に作成することのできるマルチビームという音響測深器が船底に装備されている(第1図)。この装置は、たとえばすでに廃船になった「白嶺丸」が3度の航海(延べ日数にすると半年ほど)を費やして作成した海底地形図を、わずか数日で作成してしまうのである。隔世の感がある。それも遥かに高精度で、その上、白黒ではあるけれども海底地形が航空写真のような陰影図としても得られる優れものである(口絵1)。この陰影図には、サンライズ鉱床の位置と形状が見事に描き出されていた(口絵2)。また、海底面から反射して帰ってくる音の強さから、海底を濃淡の模様の音圧図として表現することも可能である。この濃淡模様は、サイドスキャンソナーに比べると精

度は落ちるものの、海底表層が露岩域であるのか柔らかい堆積物であるのかななどの物理的性質を教えてくれる。これらの陰影図や音圧図は海域の構造や地質を把握するのに適しており、短時間で広域を調査できるのが強みである。

4. サイドスキャンソナー(SSS)

熱水活動域の調査では、SSSを使用する前に、まず事前調査として直径12cm、長さ3から4m、重さ500kgほどの巨大な槍型をした大口径柱状採泥器をワイヤーの先に吊し、これを深海底に突き刺して堆積物を採取する(第1図)。この堆積物の重鉱物組成分析から有望地域を絞ったあとに、SSSの使用となる(第1図)。この1.5mほどの長さをした魚雷の形をした音響装置は、アーマードケーブル(外

側を鋼線で覆った中心部には、太さ数十マイクロメートル、長さ1万メートルの光ファイバーケーブルが入っている)の先端に取り付けて海底面上およそ60mから100mほどのところを歩くようなゆっくりとした速度で曳航して、海底表層の性質や地形的特徴を濃淡模様の画像として表現することが可能である。これによって、熱水域の微地形や表層の構造などを把握する。

実は、調査海域は海山やカルデラなどの急峻な地形が多く、SSSを曳航するには十分な距離が得られないために、曳航体を安定させることが難しいと指摘されていた。調査時には、SSSをディプレッサーという深度調節用のおもりの下のケーブルにつけるのだが、このケーブルの長さをできるだけ短くすることで調査チームは、この問題を解決してくれた。さすがに、調査経験の豊富な仲間には、貴重な存在である。サンライズ鉱床の調査で得られた画像は、見事に鉱床の輪郭やマウンドの存在を示し、さらに別の熱水域の存在を示唆するなどすばらしい成果を上げた。

5. 深海曳航体 (FDC)

SSSで得られたデータ解析の結果を受けて、次に登場する調査機器がこのTVカメラを搭載したFDCである(第1図)。これは、アーマードケーブルと連結して海底面上3m程の高度を保ちながらゆっくりと曳航

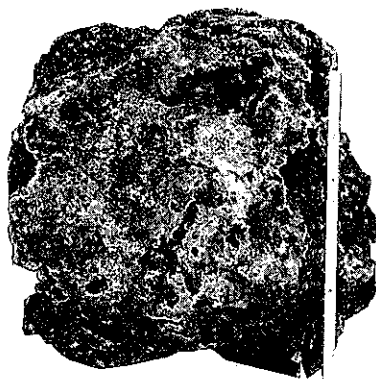


写真1 明神海丘カルデラサンライズ鉱床においてパワーグラブによって採取した重さ600kgを越える長さ1.5m、太さ80cmほどの硫化物チムニー。このチムニーは閃亜鉛鉱・重晶石などから構成されており、1トンあたり金40g、銀1,000gを含んでいる。

して、海底の様子を幅数mのカラー画像としてリアルタイムで船上に電送してくれる優れものである(口絵3~6)。このほかに、スチルカメラ、深度計、水温計、電気伝導度計なども搭載して利用する。本調査では、サンライズ鉱床のチムニーや熱水域の分布を把握するのに非常に役立った。

6. パワーグラブ(PG)

PGは重さ4.6トン、高さ4m程の岩石採取機である。これをアーマードケーブルの先端に取り付けて海底におろす(第1図)。PGの内側のテレビカメラを通して海底をオンラインで観察しながら希望の試料を採取することができる。PGは、着底したら6本の爪をゆっくり閉じて試料を採取する。時にはバランスを崩して横転しケーブルを痛めることもあり、PGの爪を閉じるときは特に細心の注意を払わなければならない。今回の調査では、サンライズ鉱床において、金を多量に含む重さ1トンほどの硫化物チムニーを見事にもぎ取ってきた(写真1)。

7. 深海底ボーリングマシン(BMS)

本調査航海における期待の星BMSは、重量4.8トン、高さ5m、底辺4×3mの大きさである(第1図)。これをアーマードケーブルの先端に吊して船尾から海底に着座させ、船上から光ケーブルを通じてオンラインで操作する。これにはTVカメラが搭載されており、海底を直接観察することにより掘削する場所を選択することができる。作業中は船上から3,000ボルトの高電圧をかけるのであるが、ボーリング装置に届く頃には熱損失のためにわずか600ボルトほどに減衰してしまい、このために掘削中の操作を難しくしている。

海底では、内径4.6cm、長さ2mほどのコアバレルをつなぎ合わせて掘削していくことになる。まず1本目を掘削するとき、海底表層の状態に応じて、たとえば軟弱層を支えるためにケーシングというコアを使用するときもあるのだが、いずれにしても1本目はいとも簡単に掘削できる。さらに掘り進む場合は、コアバレルを引き抜いてカートリッジに収容してから、新たに引き出したコアバレルを先ほどの掘削孔に入れて、さらに2mほどのロッドを1本

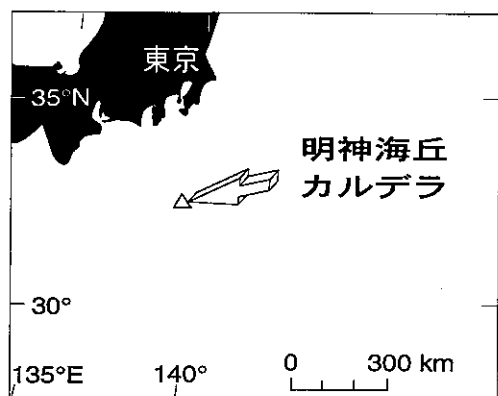
つなぎ合わせて掘り進む。そして、2本目の2~4mが掘れたら、1本目と同様にこれを引き抜いて新たなコアバレルを掘削孔に入れて、さらにこれに2本のロッドをつなぎ合わせて4~6mほど掘っていくのである。このような作業では、オペレーターのパアを2組作って1~2本掘削したら交代しておこなう。オンライン操作とはいえ船上から繰り返し指令を送って実施するのは、何とも時間のかかることである。ただ、掘ればいいと言うわけではなく、岩石の硬軟に合わせてロッドの中の水の流速やロッドの回転数、掘削速度を変えていかなければならず、オペレーターでなくとも神経がすり減る思いである。現在の掘削能力は20mほどであるが、将来的には100mも可能とされている。掘進長は、岩質にもよるが半日かけて十数mというところである。

この掘削作業は、潮流が1ノット以下でうねりがない海況、そして潮と風の方向が同じという好条件に恵まなければならないと成功はおぼつかず、秋から冬の時期の調査には非常に苦しいものがある。もっとも、これより悪い状況でも、船の装備が整っていればこの限りではないのだが、たとえば、スラスターという船の位置を微調整できるプロペラが船の前後に装備されていたならばと言うことである。因みに第2白嶺丸のスラスターは船首に1機だけであるが、船長はじめ乗組員はケーブルが捻れないように船を8時間以上も定点保持してくれる。

8. サンライズ鉱床の輪郭

サンライズ鉱床は明神海丘カルデラのカルデラ床南東部に位置し、金や銀に富んでいる黒鉱型硫化物鉱床である(第2図)。

BMSの事前調査として実施した鉱床周辺部におけるFDCおよび有人潜水艇「しんかい2000」の調査結果から、熱水活動域の分布がカルデラ床の縁辺部に沿って広がり、それは500m四方に及んでいることが判明した。本来、調査の手法としては、このFDCによる調査のあとピンポイントの精密調査に移るのであるが、時期や調査船などの装備の関係で手順を踏んだ十分な調査をできないことがある。しかし、今回の調査では「しんかい2000」では調査しきれなかった地域もカバーし、しかも新たな硫化物チムニー群を多数確認できたことは大きな成果



第2図 明神海丘カルデラの位置図。

であった。ただ、鉱床の海底表層における広がり
を把握できて、海底下のデータが全くないのが依
然として問題である。

9. ボーリングが証明した予測の正しさ

2000年12月8日午前8時、サンライズ鉱床の水深
1,300m付近においてまず最初のボーリングに挑戦
した。この熱水活動域については、すでに「しんか
い2000」を利用して海底の地理を十分に把握して
いたつもりであったが、いざBMSを鉱床中央部の
硫化物チムニーのもっとも発達しているところに着
底させ始めると、BMSの重量では簡単に堆積物に
埋まってしまう場所ばかりで、1時間以上も熱水域
をさまようことになってしまった。その後、何とか鉱
床の北西部にBMSを着底させて夕方までに7.6m
まで掘削することに成功したが、潮の流れが変化し
たため掘削を中止せざるを得なかった。この場所
は、カルデラ床側の鉱床縁辺部に位置し、硫化物
の発達が中央部ほど顕著ではないところである。
回収率は1割ほどであったが、採取コアは我々にと
って最高のものであった。銅や亜鉛に富む硫化物
を多量に含んでいる試料を手に入れたのである
(口絵7)。まさに、これは我々が待ちに待った試料
であった。この貴重なコアには硫化物チムニーの
破片や塊状硫化物が分布しており、サンライズ鉱床
の成長史を正確に教えてくれていた。少なくとも、
この場所では、硫化物を沈殿させマウンドを形成
する熱水活動が2回あったことを示していた。

12月9日午前8時、第2回目の掘削を開始した。

掘削地点は昨日行った地点から南西方40m程の
鉱床縁辺部である。前回にもまして、オペレーターチ
ームは慎重に行っていたが、8.8mまで掘削したとき、
急に油圧が落ちてしまいコアリングを断念した。調
整や点検を十分行っていたにもかかわらず油漏れ
である。水深1,300mの深海という高い水圧と摂氏
4度の低温の悪環境下で使用する調査機器には、
予想もつかないことがしばしば起こるものである。
非常に残念であった。しかし、採取したものは昨日
とは異なったもので、鉱床の成長史を組み立てる
上で貴重な試料となった。モニターを通して掘削
地点を観察していると、表層は堆積物に少し覆わ
れたマンガングラストのようであった。海底下2.7m
から回収されたコアバレルには、厚さ50cmにわた
って銅を含む塊状の黄銅鉱、緑色に熱水変質し
た軽石、軽石に鉱染した硫化物、硫化物チムニー
片などが含まれていた。これ以深では、重晶石鉱
化作用を受けた軽石や、灰白色に変質した軽石、
新鮮な軽石などが得られた。

サンライズ鉱床における規模についてすでにい
くつかの雑誌に、その推定量を書いていたので、
掘削調査を実施するまで、実際にどのくらいの深度
まで硫化物が存在しているのか、また熱水変質帯
の範囲はどのようなものであるのかワクワクしてい
た。鉱床縁辺部での掘進長は短かったものの、
鉱床の深部にも硫化物が存在することが明らかにな
った上に、堆積物によって埋没しつつあるという
当初予想したような産状を示す試料であった。しか
し、今回の調査による掘削はわずか2回のみで終
わりとなった。荒れる海と黒潮の蛇行が原因であ
った。やはり、自然には勝てなかった。

10. 結び

今回の掘削調査では、これまで知りたいと思っ
ていた熱水地帯の深部の産状を少なからず知るこ
とができ、これによって島弧の海底熱水活動に伴
う潜在資源量を把握するうえで貴重な成果を手
に入れることができた。また、深部における硫化物
の分布から、その地点における硫化物マウンドの形
成が少なくとも2回あり、しかも周辺部が熱水変
質を受けていたことなどを把握できたことは、鉱
床生成モデルを考える上で重要なデータであった。

調査航海では、マルチビーム音響測深器により作成した海底地形図から、硫化物鉱化作用の存在が推定される新たな海底カルデラを発見した。今回はボーリングによる調査が主な目的であったが、水曜西凹地やベヨネズ海丘などにおける採泥調査によって、ボーリングでは採取が困難な表層の柔らかい堆積物中に熱水活動に伴う硫化物を発見した。伊豆・小笠原弧における熱水活動の候補地がさらに増えたことなど、有意義な成果をあげることができた。今後は、採取試料の分析結果と併せて、同島弧の地形や構造の特徴から、さらに熱水活動の可能性のある有望な地域を選定し、BMSで確認していくことが課題である。しかし、海洋調査は自然任せなところが多く、実施時期を間違えたと無様な結果だけが残ってしまうのが頭の痛いところである。

日本周辺の排他的経済水域内における金・銀等を含む金属資源の潜在量を把握する調査は、ようやく始まったばかりである。2001年の調査が行われたのは11月であった。サンライズ鉱床におけるBMS作業は、幸運にも強風とうねりの合間をぬって2度ほどできたが、十分事前調査をして掘削位置を選定したにもかかわらず、目標点にたどり着くことができず、BMS本体を水深1,300mの深海に4時間以上も引き回してしまった。サンライズ鉱床の地形はあまりにも複雑で、しかも掘削点を探し回っているうちに表層の堆積物をまきあげてしまい、その粒子がBMSの稼働部に入り込んで作業が中断されてしまうということも起こった。波、風、潮、そして複雑な海底地形という自然がなかなかサンライ

ズに近づけさせてくれない、すくなくとも我々の接近を拒む要素をできるだけ事前に取り除かなければならないと思う。

ボーリング調査をしていて思うことであるが、海洋における調査はマニュアル通りには決していかないものである。調査に携わる人、一人一人が持っている知識・経験、そしてチームワークが大切であることをあらためて実感した。これをいかに伝えていくことができるかが、今後の調査の鍵でもある。

謝辞：本文を執筆するにあたり、第2白嶺丸の遠藤船長はじめ乗組員の方々のご協力に感謝するとともに、経済産業省資源エネルギー庁鉱物資源課、金属鉱業事業団及び深海資源開発(株)の関係者のみなさまに感謝の意を表す。白井 朗博士には、本文の内容に関して有益な助言を頂いた。

参考文献

- 飯笹幸吉(1997)：遅すぎた発見-明神海丘熱水硫化物チムニー-。地質ニュース, no.514, 30-37.
- Iizasa, K., Fiske, R. S. *et al.* (1999) : A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera. *Science*, 283, 975-977.
- 松本勝時・皿田 滋(2000)：伊豆・小笠原弧水曜海山の海底熱水鉱床ボーリング。資源地質50, 35-43.
- Mita, N., Maeda, M. and Tominaga, H. (1988) : A new rapid prospecting method for submarine hydrothermal activity by determining lipopolysaccharide as bacterial biomass. *Geochemical Journal*, 22, 83-88.

IIZASA Kokichi, MATSUMOTO Katsutoki and on-board scientists (2002) : Sunrise drilling of a volcanogenic massive sulfide deposit in the sea.

<受付：2002年1月18日>