

## 随 想

プレートテクトニクスと  
海底鉱床の誕生

水野篤行\*

1970年代末から1980年初頭にかけて、プレートテクトニクス理論の発展の上に、そして新しい有望な海底金属資源の認識という上に非常に意義深い、重要な発見が東太平洋であいついでなされた。水深約2600mの中央海嶺中軸部の海底での高温の熱水の地下からの噴出と、噴出口及びその周辺でのさまざまな金属を含む塊状硫化物の沈殿—熱水起源の海底鉱床（熱水鉱床）の誕生—の発見である。以来、我が国を含み主要先進国によって学術的研究や探査がこの新たに発見された海底鉱床に対して続けられている<sup>1)~6)</sup>。深海底の鉱床といえば、とくに1970年代に入ってからマンガン団塊が著しい注目をあび、研究・探査、採掘技術の開発が国際的に活発に行われてきたことについては、今さら多言を要しないであろう。しかし、かつてマンガン団塊が占めていた“人類

残された最後の資源”という座は今や熱水起源（熱水性）の海底鉱床にゆずり渡されることになったのである。熱水性の海底鉱床とは、海底下における熱水作用（hydrothermal activity）に直接起因して形成される金属沈殿物集合体のことであり、性状から多金属塊状硫化物（polymetallic massive sulfide；以下塊状硫化物鉱床とよぶ）、鉄マンガン酸化物、重金属泥に大別される。資源的にもっとも重要なのは、それらのうち塊状硫化物である。それらは、形成の場やプロセスを異にしているが、いずれにせよ熱水作用に直接起因するという点で、直接的には水成（hydrogenous）の起源を持つマンガン団塊あるいはマンガンクラストとは、成因、分布、性状等あらゆる点で大きく異なっている。

さて、図1をまずみていただきたい。世界の海洋から海水をとり去つてあらわれた海底の起伏を示すこの図において、まず目につくのは、地球表面をとり巻いている大山脈—中央海嶺—で、全延長約54000kmと算定されている。その軸部には中軸谷といわれる割れ目が中央海嶺の延びの方向に発達し、一部では紅海やカリフォルニア湾にみられるように大陸のなかに割つて入つたような姿を示している。一方、大陸縁辺沿い、あるいはその

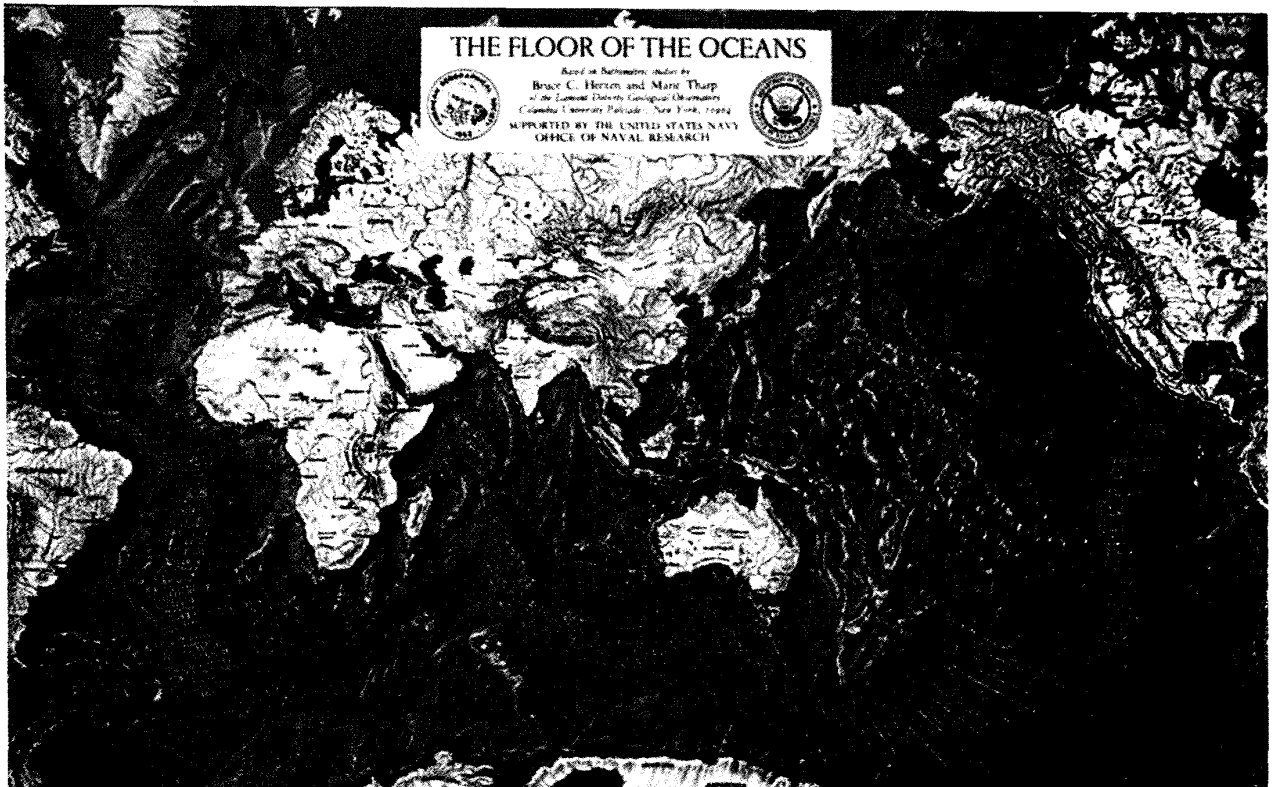


図1 世界の海洋底の起伏図

(The Floor of the Oceans, Marie Tharp による)

中央海嶺が地球表面をとりまいている様子がよくわかる。これまで知られている熱水鉱床の大部分は中央海嶺の軸部ぞいに分布する（図2参照）。マンガン団塊はとくに太平洋中東部及びインド洋中央部の比較的平坦な深海盆に多く分布する。

\* 山口大学理学部 理博

近くには、深い海溝が細長く走るところがみられ、その全延長は約 52000 km といわれる。そして海溝の大陸側では、とくに西太平洋域で顕著にみられるが、大小の背弧海盆が発達するところが多い。

ところで、中央海嶺において地下深部から高温物質が上昇して、新しい海盆をつくり、マントル対流によつて新しい海底が次々と拡大・移動し、最後に海溝部で再びマントルにもぐり込んで行く、という海洋底拡大説が提唱されたのは 1960 年代初頭のことであつた。この考え方は、諸データのひきつづいての発見・蓄積とあいまつて 1960 年代末には、現在世界的に多くの科学者によつて支持されているプレートテクトニクス説に発展した。プレートテクトニクス説においては、地球表面が約 100 km 程度の厚さの剛体的なふるまいをする 10 個程度のリソスフェア (プレート) によつておおわれており、それらが相対運動を行い、重要な地球科学的諸現象の多くがそれらの境界部で行われる (過去から未来を通じて) と考える。プレート境界には、発散型、収斂型、平行移動型の 3 種類が識別される。熱水性の海底鉱床が形成されるのもこのプレート境界、とくに前 2 者が大きな役割を果たしているのである。

発散型プレート境界はとなりあう二つのプレートが互いにはなれて行くところであつて、中央海嶺の拡大軸がこれに相当する。ここでは、アセノスフェアから高温の熔融状態にあるマグマが拡大軸そのものである中軸谷の割れ目に沿つて上昇し冷却・固結して大洋底玄武岩からなる新しいリソスフェアを形成して行く。マグマは海底に到達し、海底では常に火山活動が行われている。形成されたリソスフェア (プレート) は中軸谷から両側に移動し、そのすき間を埋めるような形で順次新しいリソスフェアが付加されて行く。中軸谷の周辺は常に伸長性テクトニクス場であり、多数の正断層や割れ目が形成されている。また、その地下深部では断層や割れ目を通じて滲透した海水と高温のマグマあるいは固結した岩石との反応によつて高温かつ金属に富化された熱水 (hydrothermal liquid) が形成され、その上方への移動に伴つて海底下及び海底に熱水起源の金属化合物 (熱水鉱床) が沈澱する。

このようなタイプの海底熱水鉱床が最初に発見されたのは、海洋底拡大説が提唱されて間もなく、1960 年代の中頃、紅海の中軸谷においてであつた。すなわち、紅海の中軸谷の一部の凹地の海底に亜鉛・銅・銀等に富む重金属泥が堆積し、その上を 56°C に達する高温塩水がおおつていることが明らかにされた。この発見は、海洋底拡大説の正当性を支持するものとして、また中央海嶺の拡大軸においてどのような地学的現象がおこっているかということに対する一つの key を提供したものとして、科学者を勇気づけた。そして、潜水調査船を使用し、1970 年代前半の大西洋中央海嶺中軸谷に対する詳

細な米仏共同の FAMOUS 計画に発展し、さらに 1970 年代後半の東太平洋海膨 (以下 EPR という) をはじめとする、東太平洋の中央海嶺拡大軸における米仏による詳細な研究へと発展した。先に述べたように、熱水鉱床には重金属泥のほか、鉄マンガン酸化物 (低温、酸化型)、多金属塊状硫化物 (高温、環元型) の両者が知られている。FAMOUS 計画の研究によつて、大西洋中央海嶺の拡大軸の地質地球物理学的特徴の詳細が明らかにされると共に熱水起源の低温型鉄マンガン酸化物の沈澱、熱水作用の存在が明らかにされた。EPR 等の東太平洋の拡大軸に対しては、ひきつづいて同様に潜水調査船を含むさまざまな詳細な研究が諸処で行われ、両タイプの熱水鉱床の存在が確認されただけでなく、1979 年になつて潜水調査船アルビン号が EPR の北緯 21° 地域 (カリフォルニア湾口沖合) で史上最初の大発見を行つた。それは、水深約 2600 m で複雑な凹凸地形の拡大軸 (プレート境界) の海底において玄武岩の上に高さ数 m 程度の大小の多数の煙突 (噴出口; ベントあるいはチムニーと呼ばれている) がならび、そこから黒い煙が勢よく噴き上がつているという光景であつた。その黒い煙は約 350°C に達する高温を示し、海底下に起源をもつ懸濁した硫化鉄からなる熱水溶液であつた。煙突は亜鉛・銅・鉄等の硫化鉱物であり、同様な硫化鉱物からなる大小の塊りがその周辺に存在していたのである。東太平洋の中央海嶺拡大軸の研究はこれを契機として諸所において急速に進展し、同様なチムニーや高温・還元型の塊状硫化物鉱床が低温・酸化型のものと共に、EPR 北緯 13° 地域、ファンデフーカ海嶺、ガラバゴス拡大軸その他の地域においてあいついで発見された。なかでも、1981 年にガラバゴス拡大軸西経 86° 地域において巨大な (高さ 35 m に達する) 活動を停止したチムニーが、20~200 m の幅、1 km 程度の範囲に互いにゆ着しあつたような形で林立していることが発見されたことは、拡大軸における塊状硫化物鉱床の大きな資源的価値の可能性追求の端緒となつた。これまでに、図 2 にみられるように東太平洋の拡大軸ぞいに北緯 50° 付近 (バンクーバー沖; エクスプローラ海嶺) から南緯 20° 付近にわたつて諸所で塊状硫化物鉱床が発見されている。それらのなかで、とくにエクスプローラ海嶺、ゴルダ海嶺、ファンデフーカ海嶺はカナダ、米国の 200 海里水域に属し、将来独自に開発が可能であることから両国によつて著しく注目され、探査がすすんできた。エクスプローラ海嶺では当初低温・酸化型のものしか知られていなかったがカナダの科学者による詳細な調査の結果、1984 年夏にはじめて少なくとも 150 万 t 以上といわれる銅・亜鉛硫化物鉱床が発見されたのであつた。

これまでに知られている限り、拡大軸部における塊状硫化物鉱床の産状・諸性質にはかなりの共通性が認められる。同鉱床はせまい中軸谷 (水深 2000~2600 m 程

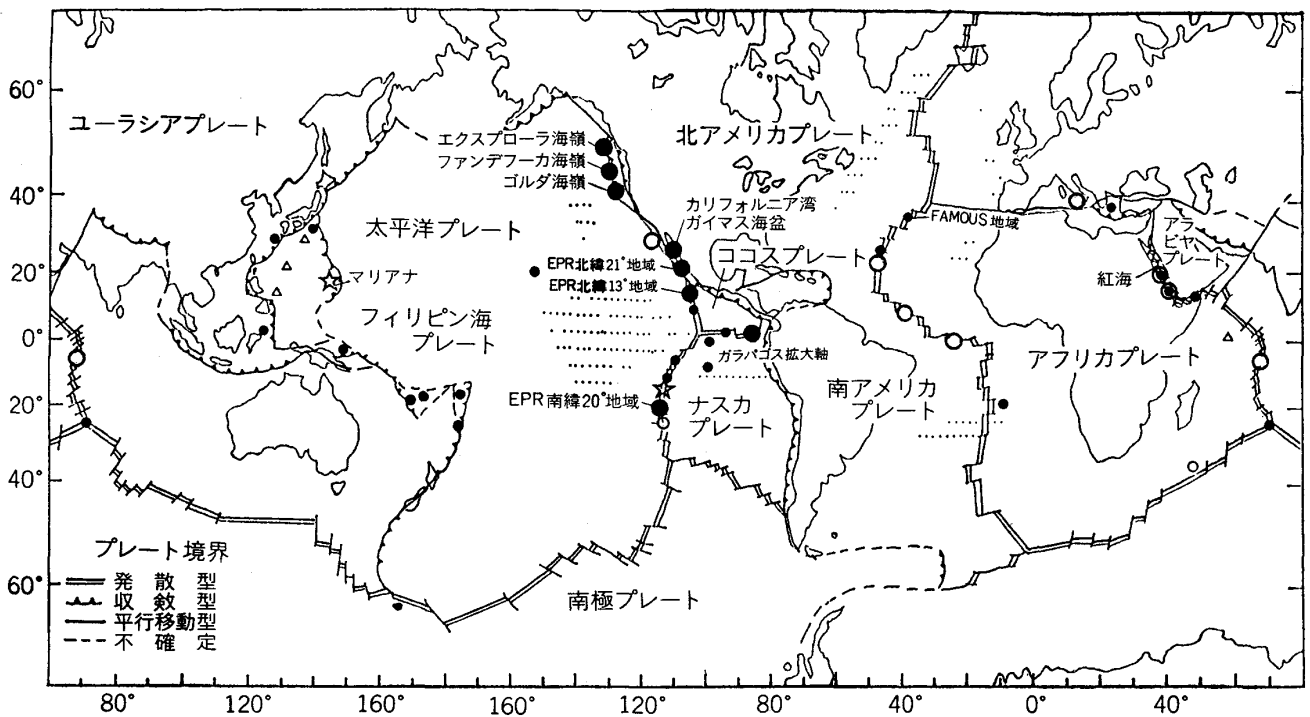


図2 プレート境界と熱水鉱床及び熱水起源含重金属の堆積物の分布

大きな黒丸—塊状硫化物。小さな黒丸—鉄マンガン酸化物。  
 大きな白丸—硫酸塩。二重丸—紅海の重金属泥  
 星印—塊状硫化物の存在が強く推定されているところ。  
 三角印—基底含重金属堆積物。細かい点の範囲—基底含重金属堆積物が多く、深海掘削コアから発見されている範囲。基底含重金属堆積物とは、過去の地質時代の中央海嶺または背弧海盆の拡大軸で形成された熱水起源の重金属にとむ堆積物が形成後のプレートの移動、その上位での堆積物の堆積に伴って、遠隔地に移動し、現在、厚い堆積層の基底（大洋底玄武岩の直上）に埋没しているものの総称である。深海掘削の手段によつてのみ発見が可能である。

度)のなか、あるいはその周辺に玄武岩上にあり、熱水を噴出する活動的チムニー、あるいはすでに活動を停止したチムニー、あるいはマウンド等として存在する。これらはウルツ鉱・閃亜鉛鉱・黄銅鉱・黄鉄鉱・磁硫鉄鉱を主とし、化学組成上亜鉛硫化物系、銅硫化物系に大別される。最大 350°C あるいはそれ以上の温度に達する噴出した熱水から上記の諸鉱物が沈澱、チムニーを成長させるが、その成長速度は1日当たり 8 cm 前後という測定例が一部で知られている。高温・還元型のものと同時に低温・酸化型の鉄・マンガン酸化物も諸所に沈澱している。硫化物の金属含有量はばらつきが大きい、最大値をとると亜鉛約 60%、銅約 6.5%、銀 300 ppm に達している。噴出する熱水はマントル起源と考えられるヘリウム、メタン、水素は多く含まれるほか、マンガンその他若干の金属に富んでいる。とくにヘリウム、メタン、マンガンは直上のウォータコラム中に濃集する傾向を示し、探査のためのよい指標となつている。塊状硫化物鉱床地帯では、地下の活発なマグマ溜りの活動、活発な熱水循環、熱水による岩石の変質等を反映して、ブーゲー重力異常の低下、火山性微小地震活動、地震波速度の減衰、岩石の残留磁気強度の低下、高地殻熱流量値と低地殻熱流量値の周期的な地理的変動等の地球物理学的

な特異性が認められ、これらも探査のためのよい指標となつている。

さて、熱水起源の鉱床は図2にみられるように世界の中央海嶺の中軸部ぞいに分布しているが、これまでのところ塊状硫化物が知られているのは東太平洋域のみであつて、それ以外からは知られていない。これは発散型プレート境界（中央海嶺の拡大軸）におけるプレートの拡大速度の相違に関連した地下の構造、マグマ溜りや熱水循環の状態の相違によるものと考えられる。中央海嶺の拡大軸は場所によりさまざまな拡大速度を示している。熱水鉱床が知られているところについてみると、東太平洋の拡大軸では 4~19 cm/年であり、いつぼう大西洋中央海嶺の拡大軸では 2~4 cm/年である。拡大軸は一般におそい拡大速度のもの (4 cm/年以下)、中程度の拡大速度のもの (4~6 cm/年)、はやい拡大速度のもの (6 cm/年以上) にわけられている。これまでの諸観測データによると、拡大速度が中程度ないしはやい拡大軸ではマグマ溜りは海底下 0.5~1 km まで上昇し、5 km 程度の深さで約 20 km の広がりを持つたくさび状であり、さらにマグマ溜りの上には付随的にキューボラといわれる小さなマグマ溜りが存在する。平均地温勾配は約 2 °C/m と考えられる。このような場合には地下の残所に

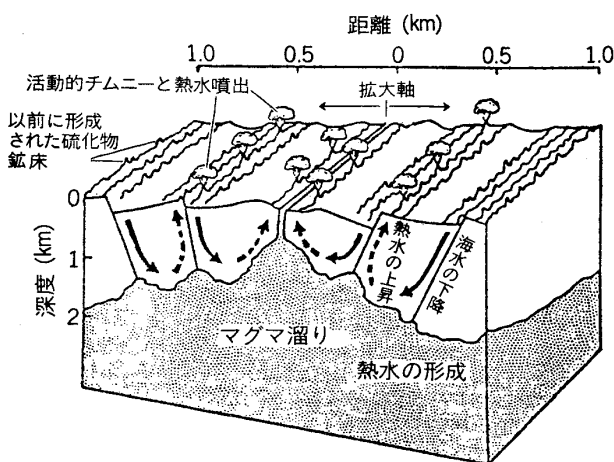


図 3 中央海嶺の拡大軸における熱水循環と塊状硫化物の形成 (Rona 1982, MTS J., 16[3], Fig. 2 にもとづく)

断層・割れ目等によって地下深く浸透した海水は加熱されると同時に、マグマ溜り、周囲の岩石から諸金属成分がそのなかに入り込み熱水が形成される。マンタル起源の物質も一部付加される。形成された密度の小さい高温の熱水は割れ目を伝って海底まで上昇し、その途中あるいは海底上に熱水性の塊状硫化物鉱床を沈澱させる。

高温の熱水系が存在でき、熱水が海底に噴出するまで高温・還元性に保たれ、銅-亜鉛-鉄の塊状硫化物が海底で熱水から沈澱、形成される(図3)。いつぼう、大西洋中央海嶺のように拡大速度がおそい拡大軸では、マグマ溜りははるかに深く位置し、約3.5 kmの深さに頂部をもつ比較的せまいマグマ溜りとなつている。平均地温勾配は約0.3°C/mと非常に小さい。地下深所で形成された熱水は上昇する過程で下降してくる新鮮な海水との混合によつて温度が低下し、かつ酸性化となる。その結果、海底には鉄マンガン酸化物が沈澱する。硫化物は海底下の玄武岩中に分散状、鉱染状、あるいは塊状に沈澱していると推定されている。

発散型プレート境界における熱水鉱床形成のプロセスについて、巨視的には上記のような説明が可能であるとしてもまだ問題は残されている。東太平洋の中央海嶺中軸部では諸所で硫化物と酸化物がわずかに隔つて存在している。海底下のマグマ溜りや熱水系の発達状況の地理的な変動を示すものか、あるいはそれらが時代的に異なつているのか、海底で硫化物を形成するような熱水作用は拡大軸ぞいにどの程度の間隔でおこつているのか、硫化物中の高品位の亜鉛の濃度はどのようなプロセスによるのか等、発散型プレート境界そのものの性質を明らかにする上に重要なkeyとなり、また資源探査の上にも同時に重要である基礎的な面が未解決なまま残されているのである。

いつぼう、収斂型プレート境界は発散型プレート境界とは逆に2つのプレートが相接近し、海洋性プレートが大陸性プレートの下に沈み込んでいくところであり、沈み込んだプレートは地下深部でやがてアセノスフェアに

一体化されていく。沈み込みは大陸縁辺部と大洋底を境する海溝に沿つて行われる。沈み込みに伴つてさまざまな地球科学的現象がおこるが、典型的には二つのタイプにわけられる。すなわち、チリ型とマリアナ型である。前者では現在南米の西部にみられるように海溝の陸側が大陸となつている。いつぼう後者では現在マリアナ地域にみられるように海溝の陸側に島弧を隔てて、すなわち島弧-海溝系の大陸側に背弧海盆が形成されつつある。このちがいは沈み込むプレートの形態や性質に関連していると考えられる。そしてそれは時代的に変化してきたと考えられるものである。

背弧海盆は、マリアナ型の沈み込みの大陸側に伸長性テクトニクス場が生じ、新しい海底地殻の誕生と海洋底拡大が、すなわち背弧拡大がおこることによつて形成されると考えられる。さまざまなデータは、大洋の中央海嶺と同じように、背弧海盆にも高熱流量値によつて特徴づけられ起伏のはげしい拡大軸があり、それを中心として地磁気縞模様が認められることが多いことを示している。現在みられる背弧海盆の多くは過去の地質時代に形成されたものであり、拡大軸は堆積物によつて埋積されていることが多い。しかし、一部のものは現在拡大中であり、拡大軸あるいは火山体の近くに活発な熱水活動が期待される。マリアナトラフはその典型例である。

マリアナトラフは約500万年前以来平均4.3 cm/年の速度で背弧拡大を行つてきた。拡大軸付近での高熱流量・低熱流量値の周期的変動、はげしい地形的起伏、ウォータコラム中のメタン、ヘリウム異常、堆積物中の熱水性鉱物の存在、熱水性鉄マンガン酸化物の存在等、中央海嶺と同様な地下における活発な熱水循環を示す証拠が多く得られている。このようなことからここにおいても熱水噴出口や高温・還元型の塊状硫化物の存在が十分に推定され、国際的に大きな注目をあびている。現在日米の科学者の協力によるアルビン号潜航調査が計画されており、その成果はまだ十分に解明されていない背弧海盆の地下構造や拡大機構の問題に、またまた塊状硫化物が発見されていない他の背弧海盆における今後の研究に画期的な貢献となることが予想される。

マリアナトラフの北側には、南硫黄島から八丈島、さらに北方へと連なる火山からなる七島-硫黄島海嶺がある。またそのすぐ西側にはマリアナトラフと類似の性格を持つ、「小笠原弧の背弧凹地」とよばれているリフト地形が断続的に南北にわたつて発達している。まだ明確な証拠は得られていないが、諸データから、その一部は80万~90万年前から拡大を開始した、いわば背弧海盆形成の初期段階にあると考えられている。周辺及び凹地内には火山活動が認められ、日本列島に特徴的に分布する銅・鉛・亜鉛を主とする黒鉱鉱床はかつてのこのような凹地に形成されたのではないかとこの考え方もあり、現在の塊状硫化物の形成の可能性がマリアナトラフと同

様に注目されているところである。工業技術院地質調査所では昭和 59 年からこの海域に対して詳細な研究を実施している。まだ塊状硫化物は発見されていないが、八丈島付近や西七島海嶺の海山に低温・酸化型の熱水性鉄マンガン酸化物が分布し、地下で熱水循環が行われていることが明らかとなった。この海域の一部については数年後ジョイデスレゾリューション号を使用した国際深海掘削計画 (ODP) による深海掘削が検討されている。これらの研究の進展により、マリアナトラフと同様に、塊状硫化物の発見、初期段階の背弧拡大の詳細の解明が著しくすすむことが期待される。

収斂型プレート境界においてほかに熱水鉱床が形成されつつある可能性のある海域は、日本周辺では沖縄トラフ、南西太平洋の背弧海盆と島弧 (ラウ海盆, ウッドラーク海盆, ビスマルク海等), インド洋北東部のアンダマン海などである。これらの大部分から熱水性の鉄マンガン酸化物や重金属に富む堆積物が知られており、塊状硫化物の今後の発見が国際的に注目されている。収斂型プレート境界の現在拡大中の背弧海盆においては諸処で熱水循環がおこっている。そして発散型プレート境界と類似の地質地球物理学的な構造となっており、海盆での熱水噴出とそれに伴う高温・還元型の塊状硫化物の形成が予想されるわけであるが、発見されるとすれば、大陸性地殻中の熱水循環に伴って海洋性地殻のみからなる大洋中央海嶺の場合とはやや異なつて、黒鉱鉱床に類似して、銅・鉛・亜鉛・金・銀・バリウム・などに富むほか、とくにゲルマニウム、ガリウム、インジウム、タリウム等のレアメタルを少なからず含むであろうという意見がある。

東太平洋の中央海嶺の塊状硫化物についてはとくに米国・カナダの沖合いのものは両国の 200 海里水域内に存在するということから両国によつて著しく注目されていることを先に述べた。一方では、主要金属、鉛・亜鉛等の将来の需給関係 (代替品の開発によつて影響を受ける)、探査・開発のコストなどの予測結果から塊状硫化物の商業的価値を疑問視する見解も出されているが、いずれにせよ、資源的価値の評価のもととなる塊状硫化物の分布、鉱床としての規模・性状など、著しくデータが少ないのが現状であり、背弧海盆も合わせて今後の詳細な全体的アセスメントが是非必要である。

我が国はいうまでもなく金属鉱物資源に著しく乏しく、レアメタル、ベースメタルともに大部分を海外に依存している。将来、それらのうち、マンガン・ニッケル・銅については深海底のマンガン団塊にもとめることができようが、他の金属についてはそういう事情にはない。そこでクロズドアップしてくるのが、塊状硫化物である。東太平洋の中央海嶺の塊状硫化物は亜鉛・銅を豊富に含むほか金・銀・鉛、その他のレアメタルを含んでいる。背弧海盆に期待される塊状硫化物は、さらに多

くのレアメタルが含まれている可能性がある。となると、とくに注目し値するのは我が国の 200 海里水域内に位置する「小笠原弧の背弧凹地」及びその周辺の火山地帯である。また、マリアナトラフや南西太平洋の背弧海盆についても将来の国際共同開発の可能性の点から目を向ける必要がある。「小笠原弧の背弧凹地」及びその周辺域については、先述のように工業技術院地質調査所がシステムティックな、組織的な研究を 59 年から開始し、すでに将来の探査に対して基礎となるよい成果をあげている。東太平洋の公海水域内にある中央海嶺の塊状硫化物については、すでに報じられているように昭和 60 年から金属鉱業事業団が通商産業省の委託による海底熱水鉱床探査を開始した。今後継続的に、探査がすすめられることになっている。なお、プレートテクトニクスと背弧海盆の熱水循環・鉱床形成という純学術的観点からは、東大地震研究所、東大海洋研究所、東海大学の研究者グループが中心となつて、沖縄トラフ、マリアナトラフに関する研究がすすめられつつある。

海底熱水鉱床の探査・研究手法は 70 年代からすでに仏・米両国において検討され、この 10 年間に著しい改善、新機器・手法の開発がなされてきた。すでにふれた地球物理的・地球化学的示標の検出のほか、直接的な手段としてナロービーム音響測深機、サイドスキャンソナー等の音響的方法、試料採取、さらに潜水調査船による潜航目視調査・試料採取等、極めて効果的である。とくに音響的方法についての研究開発は米国において著しいものがある。次に、まず問題になるのはどのように塊状硫化物を採掘するかという技術である。現在いくつかの採掘システムの案が検討されているが、基本的には、鉱体の粉碎と集鉱、スラリー化、揚鉱のシステムから構成され、また、動力・信号複合ケーブル、船上からの遠隔操作技術等は重要な要素となる。いずれにせよ深海の高圧・暗黒・低温の環境下で、かつ地形的に複雑なところで比較的小さな、不規則な形の鉱体の群を対象とするので、マンガン団塊の採掘にくらべてはるかに困難であり、まず、高度な要素技術の開発、それらのシステム化が必要となる。現在すすみつつあるいわゆる局限技術の研究開発の成果はその重要な基礎の一つとなろう。また一方では、この技術開発は高度な応用・波及効果を持っているといえよう。

以上に、塊状硫化物を中心とする海底熱水鉱床のプレートテクトニクスとの成因的關係、知られている性状等、探査・開発の現状などを概観した。海底熱水鉱床の発見はプレートテクトニクス研究発展の大きな成果の一つであり、一方ではそれはこれまで十分に知られていなかったプレート境界の地下深部に関する科学的認識を深め、プレートテクトニクスのいつそその発展に大きな寄与をしているといえる。とはいふものの、海底熱水鉱床についてはまだわかっていないことが多々あり、今後の

研究・探査により、上記の関係がますます発展することが十分に予想できるのである。さらに、海底熱水鉱床の探査、採掘の技術開発は大規模な経費を要するものであるが、我が国の将来の経済安全保障という観点から、さらに期待される高度な応用・波及効果という観点からも積極的に継続的に発展させる必要がある。なお、とくに探査についてはこれまでの諸外国の経験が示すように塊状硫化物の発見自体が、かりに存在するとしても極めて困難なものであり、ある意味では試掘による石油の探査・発見とにたような状況下にある。気長な、そして十分な投資による探査によつてはじめて成功する場合が多いということをあらかじめ認識しておく必要がある。

#### 文 献

- 1) 資源調査会編: 海底熱水鉱床に関する基礎調査, 資料 No. 120 (1984), p. 365 [科学技術庁資源調査所]
- 2) (社)深海底鉱物資源開発協会: 海底熱水鉱床に関する調査研究報告書 (1984), p. 340
- 3) (社)深海底鉱物資源開発協会: 海底熱水鉱床に関する調査研究報告書 (1985), p. 239
- 4) 工学技術院地質調査所: 海底熱水鉱床の調査技術に関する調査報告, 我が国周辺 200 海里水域の調査手法に関するフィージビリティースタディ (1983), p. 58
- 5) 工学技術院地質調査所: 海底熱水活動に伴う重金属資源の評価手法に関する研究 (1985), p. 99
- 6) 上記のほか, 月刊海洋科学, 15 (1983) 9; 15 (1983) 10 [海洋出版(株)] は熱水鉱床特集号として, 計 27 編の熱水鉱床に関する論文を掲載している。