

現代の海底熱水鉱床

飯 笹 幸 吉¹⁾

1. はじめに

我々にもっとも馴染みのある海の物語は、日本の南方海上から始まった。それは、19世紀のフランスの作家ジュール・ベルヌの「海底2万里」である。この物語は今から130年も前に、作者の想像した画期的な潜水艦をネモ船長が操り、時には海底を潜水服を着て自由に歩き廻り、世界の海底を舞台に数々の冒険を繰り広げるという内容である。こんな想像の世界が語られる一方で、現実の世界では、この小説の発表と相前後して、英国のチャレンジャー号が世界一周の海洋科学調査を行っている。この航海の成果のひとつに、海底の鉱物資源に関する研究を世界の舞台に登場させたマンガン団塊の発見などがある。

現在、我々は水深6,500mまで潜航して海底調査ができる潜水艇を持ち、ベルヌの世界を越えつつある。また、様々な調査機器を搭載した最新鋭の調査船により、過去40年ほどの間に深海底における鉱物資源に関する知識は飛躍的に増えてきた。

海底熱水活動に伴う硫化物鉱床は、1965年、アフリカとアラビア半島を隔てる紅海のAtlantis II Deepにおいて、アメリカの研究機関によって発見された。1970年代後半には、東太平洋海膨北緯21度やガラパゴスリフトにおいて、ブラックスモーカーや熱水域に特有の生物群集などが初めて報告された。これらは、海洋における未来資源であり、しかも海洋における物質収支に関する重要な研究要素を含んでいた。1980年代後半には、海洋性島弧の背後に位置する背弧海盆の拡大軸及び火山フロントの海底カルデラなどの活動域にも硫化物の存在が知られるようになってきた。その後、最近に至るまで140を越える硫化物鉱床の存在が報告されて

いる。

日本の排他的経済水域内には、中央海嶺型より貴金属元素に富む島弧型の火山性塊状硫化物を形成するための地質・構造的条件が備わった場所が多くあると言われていた(Sillitoe, 1982; 藤岡, 1983)。地質調査所では、1984年度から1989年度までの6年間に亘り、熱水活動に伴う潜在的な鉱物資源の評価手法の研究を、海洋調査船「白嶺丸」により主に伊豆・小笠原弧において実施してきた。この成果を踏まえて、1997年度、有人潜水艇「しんかい2000」を利用して東京の南400kmにある明神海丘カルデラにおいて金や銀に富んだ大規模な黒鉱型の硫化物鉱床(サンライズ鉱床と命名)を発見した(Iizasa *et al.*, 1999)。

ここでは、ベルヌの「海底2万里」の世界を現実のものとした立役者、すなわち最新鋭の機器を搭載した調査船や潜水艇の登場によって得られた科学的成果、特に熱水硫化物の分布特性、掘削試料の深度方向の分布、日本周辺の熱水鉱床の存在の可能性について紹介する。

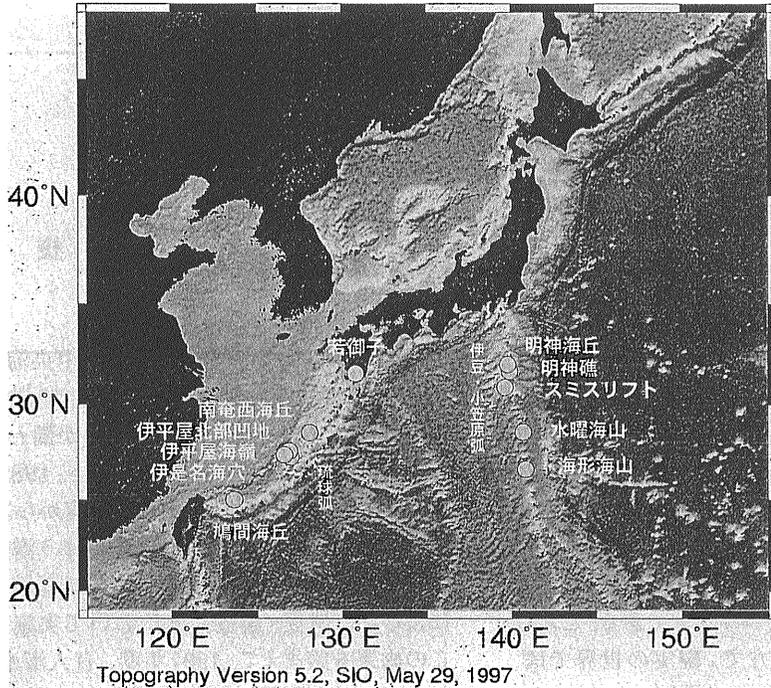
2. 海底火山性塊状硫化物の分布

現在、海底における熱水硫化物鉱床は、殆どがプレート生産の行われる中央海嶺とプレートの沈み込む島の島弧周辺にその分布が限られている。これらの地域の硫化物は、構造的な交差部やその近傍、及び凹地に生成していることを示している。

地質時代に生成し陸上で稼行された509箇所の火山性塊状硫化物鉱床の統計によれば、貴金属元素に富んだ鉱床がプレート収斂域の珪長質岩石を伴う地域に5割以上も集中していたことを示している(Mosier *et al.*, 1983)。一方、これまで、様々な

1) 地質調査所 研究調査官

キーワード: 海底熱水鉱床, 硫化物, 黒鉱, 海底カルデラ, 掘削, 資源



第1図
日本周辺における
海底熱水鉱床の
分布。

海域において採取された試料の化学組成，水深，陸域からの距離等の要素は，経済的な観点から見た場合，中央海嶺における塊状硫化物より西太平洋に数多く分布している島弧や背弧海盆におけるものが有望であることを示している。

この10年間に，日本の排他的経済水域内にある伊豆・小笠原弧や沖縄トラフでは，水曜海山（春日・加藤，1992）や伊是名海穴（Halbach *et al.*, 1989）を始め10を越える熱水硫化物が海底カルデラや海山から発見されている（第1図，写真1）。

3. 硫化物鉱床の掘削

塊状硫化物鉱床の掘削調査は，ODPにより中央海嶺において実施された。それは，拡大速度の遅い大西洋中央海嶺のTrans-Atlantic Geotraverse (TAG, 片側拡大速度1.2 cm/year) 海域，Gorda海嶺南部のEscanaba Trough (1.2 cm/year)，及び拡大速度が中程度であるカナダ西岸沖のJuan de Fuca海嶺Middle Valley (2.9 cm/year) である。その結果，これらの鉱床の下部には角礫状の硫化物が存在すること，さらにその下には鉱染状の硫化物が分布すること，また周辺部には熱水変質

帯が形成されていることが明らかにされた。特に，TAG硫化物鉱床は玄武岩を基盤としており，その鉱床形成には少なくとも25,000年を要したことが明らかにされた。一方，Middle ValleyやEscanaba Troughの鉱床は堆積物上のものであり，しかも堆積物中にも硫化物が存在していた。これら二つの鉱床の鉛の同位体比の分布は，堆積物起源の鉛を含んでいることを示していた。これは，熱水溶液がどのような岩石や堆積物と反応したかにより，鉱床を構成する金属元素に特徴が現れることを示す一例である。こうした観点から，多種類の岩石や堆積物に富む島弧の火山フロントやその背弧における硫化物鉱床は，その地域の地質の多様性を反映した多金属に富む硫化物鉱床を生成するだろうことは，想像に難くないであろう。

最近，伊豆・小笠原弧の父島の南の水深1,400m程の海底にある水曜海山において，簡易型の掘削装置を利用した熱水地帯の調査が金属鉱業事業団所有の第二白嶺丸により行われた。この海洋性島弧の火山フロント上の海底熱水活動域における掘削は，世界的に見ても初めてのことであった。

今回，熱水域の中心部からやや離れた地点における掘削結果は，熱水地帯の海底下10mにわたり

著しい鉱化作用が存在していることを明らかにした。掘削試料は、海底表層では未変質の軽石堆積物が中心であったのが、深度1.9m以深から10mの間の軽石堆積物は、硫化物や多量の硬石膏を伴って強い熱水変質を受けていた。しかも、脈幅1cmを越える硬石膏脈が水平から垂直まで様々な傾きを示していた。このことは、熱水溶液がフラクチャーを通路として周辺にも浸透し、鉱化作用の範囲がさらに広がっていることを物語っている。

従来、鉱床の三次元的な分布及び正確な資源量評価は、潜水艇による海底観察や試料採取ではどうしても限界があったが、掘削機の登場によって可能になりつつある。

4. 硫化物鉱床の再生

中央海嶺の硫化物鉱床における掘削や表層調査の結果によると、鉱床の成長史は複雑である。海底火山活動に伴う熱水活動の消長にあわせて、鉱床形成の盛衰があることがわかってきた。ある鉱床は短期間で成長を停止し、また別の鉱床は断続的に何万年もかけてほぼ同じ場所で鉱物の沈殿を何回も繰り返して大きくなる。活動的な熱水地帯では、硫化物チムニーを採取しても次の年にはまた立派なチムニーが再生しているのである。

ひとつの鉱床における盛衰の歴史がその鉱床に記録されているのと同様に、ひとつの鉱床型の盛衰の歴史が地層に記録されていることも知られている。これは、サンライズ鉱床と同じ黒鉱型鉱床が今から約1,300万年前の火山活動が激しかった東北日本や環太平洋のその他の地域に存在した事実にも表れている。

5. 黒鉱型鉱床の存在の可能性

伊豆・小笠原弧北部における第四紀火山フロント上の個々の火山の火山岩量は、100～500km³と背弧雁行山脈の一部の海山を除けば背弧リフトのそれより際だって大きいことを示している(菅・藤岡, 1990)。現在活動的なサンライズ鉱床を伴う明神海丘はおよそ100km³である。火山フロント上のその他の珪長質海底カルデラの火山岩量は、明神海丘カルデラより大きいのかそれに近い値を示して



写真1 伊豆・小笠原弧の明神海丘サンライズ鉱床の硫化物チムニー群の合成写真。右後方に見える高さ30mにも達する硫化物チムニーは、鉱床内ではもっとも活動的であり278度の熱水を噴出している。手前の硫化物チムニー群の高さは、10mを越えている。

いる。火山岩量の大きさは、マグマの供給率や寿命に関係することから、火山岩量の大きい海底カルデラには、少なくとも現在の背弧リフト帯に比べて、熱水活動を持続させるのに十分な熱源が存在する可能性があるものと思われる。特に、明神海丘カルデラ周辺40km以内の火山フロント付近には、4つの海底カルデラが存在している。これは、東北日本の北鹿地域における中新世の黒鉱型

鉱床を伴っているカルデラの大きさやその密集度と、ほぼ似たような規模である。

サンライズ鉱床と類似の黒鉱型鉱床が、現在活動的な伊豆・小笠原弧に他にも存在する可能性が高いことは、明神海丘カルデラの置かれている次の地球科学的特徴から示唆される。明神海丘カルデラは、(1) 背弧雁行山脈群のひとつと火山フロントという構造的な弱線同士が交差する場にあること、(2) カルデラ構造をもち熱水の通路になる裂罅の発達が良いこと、(3) 第三紀中新世の黒鉱型鉱床と同様に酸性岩を主体にしていること、(4) カルデラを構成する火山岩量が大きく、これを生成したマグマだまりが大きいか、或いは寿命が長いことを示している。以上の特徴をもつ海底カルデラが伊豆・小笠原弧北部には少なくとも8つあることと、これらのうちのいくつかのカルデラ床の堆積物中にすでに硫化物が確認されていることなどから、未発見の黒鉱型鉱床の存在が十分に予測され得ると言えよう。

6. 将来展望

サンライズ鉱床の規模は、中央海嶺型鉱床と比較すると現世の海洋底における硫化物鉱床の中では、紅海に次いで第2位であり、金・銀の金属量では第1位である。しかし、定量的に鉱量の比較を行うにはあまりにもデータが少ない。なぜなら、サンライズ鉱床の調査は海底表層における試料を基にした比較であるため、鉱化作用がどの深度まで達しているのか、またそこにおける金属量がどのくらいであるのか全く明らかにされていないからである。この問題を明らかにするためには、少なくとも掘削を実施することが必要である。これによって得られたデータを解析することによって、鉱床の成因に関する詳細なモデルを構築することもできるであろう。さらに、このモデルを他海域に適用することにより、熱水活動に伴う潜在的な硫化物鉱床の存在及びその重金属量の評価を検討することができる。

日本周辺海域において発見された火山性塊状硫化物鉱床は、中央海嶺の硫化物と比較するととりわけ貴金属に富んでおり、しかも鉱床は1,400mより浅い水深で、陸から近い排他的経済水域内にあることが特徴となっている。潜在的な塊状硫化物鉱床の存在する候補地は、伊豆・小笠原弧だけでも未調査のまま数多く残されており、今後の調査によって、東北地方の黒鉱型鉱床に匹敵する規模のものが発見される可能性も小さくない。このように、日本周辺海域の硫化物は、その潜在的な資源量とその地理的分布とを考慮併せると、非常に高い資産的価値を有していることを伺い知ることができる。

金属資源の少ない我が国の資産となる可能性を秘めた海底熱水鉱床の調査研究は、資源量評価を行う段階へと移ってきたことは間違いないであろう。既に、パプアニューギニアの東方海域には、オーストラリアの探鉱会社による鉱区の設定が行われている。今後、海洋底における熱水硫化物の正確な資源量評価が待ち望まれる。

引用文献

- 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, p.55-68.
- Halbach, P., Nakamura, K., *et al.* (1989): Probable modern analogue of kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa trough back-arc basin. *Nature*, 338, p.496-499.
- Iizasa, K., Fiske, R. S., *et al.* (1999): A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera. *Science*, 283, p.975-977.
- 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. USGS Open File Rep., 83089, 77p.
- Sillitoe, R. H. (1982): Extensional habitats of rhyolite-hosted massive sulfide deposit. *Geology*, 10, p.403-407.
- 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, p.484-488.
- 菅 香世子・藤岡換太郎(1990): 伊豆・小笠原弧北部の火山岩量。火山, 35, p.359-374.

IIZASA Kokichi (2000): Submarine volcanogenic massive sulfide deposits in this century.

<受付: 2000年4月7日>