

■ 解 説 ■

海底熱水鉱床とその探査

Occurrence and Prospecting of Submarine Hydrothermal Deposits

中 尾 征 三*

Seizo Nakao



1. 海底熱水鉱床とは

1.1 海底熱水鉱床生成の条件

海底熱水鉱床は、その名のとおり、海底下の熱水活動にその起源をもっている。海底の拡大軸の付近では、海底下の割目に沿って浸透した海水が、比較的浅い所にあるマグマや高温の岩石と反応して金属成分に富む熱水となり、別の割目を通して上昇する。この熱水が海底に達するまで冷却されず、また、沸騰しなければ、海底上の冷たい海水に接して急速に冷され、熱水中の金属元素（鉄、銅、亜鉛等）は硫化物の微小結晶として沈澱するというわけである。このように海底熱水鉱床が形成される原理は極めて簡単であり、したがって、鉱床の生成に必要な基本的条件も、海底下の比較的浅所に熱源があることと、海水起源の熱水の循環に必要な割目等が十分に発達していることの2つに絞られるといっても過言ではない。

上に述べたことから推察すると、プレートテクトニクスの基礎となった海洋底拡大説（プレートテクトニクスとは地球の表面部分すなわち地殻が陸地・海底のいずれを問わず、いくつかのプレートと呼ばれるブロックに分かれていて、見かけ上は相互に水平運動をしているという地殻運動の機構を説明する理論であり、海洋底拡大説は、地下深部の流体部分であるマントル内の熱対流が、その上昇部分では海嶺を形作って新鮮な溶岩を海底に噴出し、逆に、下降部分では地殻をマントル内に潜り込ませて海溝—島弧系を形成するという理論である）で説明される海底拡大のいたる所で熱水鉱床が発見されそうである。しかし、実際には代表的な拡大部である東太平洋海嶺においてさえも、その発見地点は数ヶ所に絞られる。その原因のひとつは、海底熱水鉱床の主体ともいべき金属の硫化物が、現在の海底の環境下では化学的に不安定であり、海底

近くの海水の交換が活発な所では容易に崩壊し、あるいは溶解してしまうことであろう。また、もうひとつの原因は、次に説明するように、現実の海洋底の拡大が時空両面で複雑なことにあると思われる。

すなわち、海膨や海嶺と呼ばれる海底の拡大部分では、マントル物質の上昇で形成された新しい海底が、年間数cmの速度で側方へ移動しているといわれる。しかし、拡大の中心部（中軸谷）は広い目でみると1本の直線ではなく、多数の直線が少しずつずれて配列しているものであるため、海底の移動速度は場所により、あるいは時により少しずつ異なる。高温の熱水噴出を伴う熱水系の進化は次のようにまとめられる。①中軸谷の拡大速度が速くなり、地殻深部にまで割目がはいると、（より深部に存在する）定常的なマグマ溜りから分離した非定常的で小さなマグマ溜りが急速に上昇する。②海底面では、まず、シート状溶岩の噴出がみられ、次いで枕状溶岩の噴出活動が始まる。海底下1～2 kmの深さの所では、海洋底の拡大に伴うひずみを除去するために、シート状岩脈の貫入が活発になる。③熱水系は雁行状の裂罅（れっか）を利用して、急速な熱の移動を始める。高温熱水に対する熱の供給は、海底下浅所にある非定常的なマグマ溜りとシート状岩脈から与えられる。④非定常的なマグマ溜りは次第に冷却され、熱水からの沈澱物や熱水変質物による通路の閉塞に伴って熱水活動は衰え、ついには停止する。⑤それに代って、隣接地域が急速に開き始める。そして同様のサイクルを繰返す¹⁾。

上に述べた以外にも、熱水の循環を通じて濃縮される肝腎の金属元素が、実は溶岩の上に堆積している若い堆積物から供給されるのではないかというような、本質的に重要な問題が残されているのだが、ここでは生成の機構を考える上で最も重要な点を指摘するに止める。

1.2 海底熱水鉱床の特徴

さて、前節で、海底に熱水が噴出することにより金

* 工業技術院地質調査所海洋地質部海洋鉱物資源課長

〒305 茨城県筑波郡谷田部町東1-1-3

属硫化物の微小結晶が沈澱すると述べたが、熱水活動の所産として海底に沈澱する金属はいつも硫化物の形をしているわけではなく、塊状あるいは皮殻（クラスト）状の鉄・マンガン酸化物も随所で発見されている。しかし、資源として注目されてきたのは、塊状の多金属硫化物(PMS: polymetallic massive sulfides)である。そして、PMSは、熱水が海水中に噴出しながら沈澱させた金属硫化物の微粒子から成る煙突状の物体や古い煙突が崩壊してできたと考えられるマウンドを構成していることが明らかになっている。PMSから取り出されるであろう経済的に重要な金属元素は、鉱床の2つのタイプによって、銅または亜鉛・銀であるといわれる²⁾。地理的あるいは地質学的条件によっては、金や他の希少金属を期待することもできるが、この点については、まだ、系統的に議論できる程のデータが蓄積されてはいない。

ところで、海底熱水鉱床は、マンガン団塊や最近注目されるようになったコバルトクラスト等と、どこがどのように違うのであろうか。まず、金属元素の濃集機構の上からみるとどうであろうか。熱水鉱床が、その名の示すとおり海底および海底下の熱水活動(hydrothermal activity)の所産であることはすでに述べた。熱水活動以外で、海底に金属元素を濃集させる機構としては、水成作用(hydrogenesis)、海底風化作用(halmyrolysis)及び続成作用(diagenesis)が考えられる。水成作用というのは、厳密には海水中に比較的低い濃度で分布する溶存成分が、鉱物粒子などの沈降に伴って無機的に堆積することを意味する。また、海底風化作用とは、海底を構成する岩石(主に玄武岩等の溶岩)が低温の海底で変質しながら分解することを意味し、この作用によって、特定の成分が選択的に溶解して別の場所に濃集したり、あるいは逆に残留して濃集したりする。さらに、続成作用というのは、海底に沈澱した堆積物の内部で起こる物理・化学的な変化の総称で、この作用により、堆積物の鉱物組成や化学組成が変化する。もう少し具体的にいえば、各種の粘土鉱物等が海底下10cm程度の所で生成され始め、ある種の金属元素がその鉱物に取込まれたり、あるいは単にある元素が溶解して移動したり再び沈澱するといった具合である。

マンガン団塊を構成する鉱物は2種類に大別され、そのうちのひとつは、海水から沈澱した鉄-マンガン酸化物が化学的にはほとんど変化せずに凝集して団塊を形成していると考えられ、また、他のひとつは、上

記の鉱物が少し埋められた状態で還元され、マンガンをニッケルが選択的に溶解されて海底近くまで上昇・拡散し、再び酸素の多い海水に触れて沈澱したものだと考えられる³⁾。したがって、マンガン団塊にみられる金属元素の濃集は、主に水成作用と続成作用に起因すると考えて差支えない。

次に、コバルトクラストについてはどうであろうか。クラストというのは、皮殻状の物質のことである。コバルトクラストは、より正確にはcobalt rich manganese crust(日本語では富コバルト・マンガン・クラストあるいはコバルト・リッチ・クラスト)と呼ばれるべきであって、その主成分はマンガンと鉄である。鉱物としては、上に述べたマンガン団塊を構成する鉱物のうちの水成作用でできたと考えられるものと共通している。注目される副成分であるコバルトも水成作用で濃集したと考えられる。クラストがマンガン団塊のように球状の凝集体をつくらないのは、クラストが堅い岩盤の上に単純に沈澱したことによるものと思われる。

さて、海底熱水鉱床がマンガン団塊にとってかわる深海(金属)鉱物資源の花形になるのではないかと考えられた頃、その資源としての優位性は、マンガン団塊の場合と比較して、①より浅い海底(マンガン団塊:5000m程度、熱水鉱床:2500m程度)に産する、②熱水活動が続く限りの再生される可能性がある、③陸地に近い海域に産するので、当該国が排他的に開発できる場合が多い等と指摘されていた。この見解は現在も変わっていないと思われる。一方、逆に熱水鉱床の方が不利な点としては、採掘に適する鉱体の規模がマンガン団塊と比較して明らかに小さく、海底の地形が複雑であるため、海底での細かい作動制御が容易に行える採鉱装置を開発する必要があること等が指適できるであろう。なお、コバルトクラストは再生可能な資源ではないが、その分布水深(数100m~2500m程度)や海底地形(主に海山の斜面)から推察される資源としての価値は、熱水鉱床の場合と大差ないであろう。

2. 調査・研究の動向

2.1 これまでに発見された主な海底熱水鉱床

海底熱水鉱床といえるものが世界で最初に紅海で発見されたのは、1960年代中頃のことである。紅海の熱水鉱床は、種々の化合物を含む未固結の堆積物(重金属泥と呼ばれる)であったが、その後、紅海と同じような海底拡大の軸部である大西洋中央海嶺、東太平洋

海膨, ガラパゴス拡大軸部等で各種の熱水鉱床が発見されてきた。とくに, 東太平洋海膨の“北緯21度地域”で米国の潜水船が1979年に観察した熱水の噴出現場や, ガラパゴス拡大軸部で発見された巨大鉱床(長さ約1 km, 幅200 m, 高さ35~40 m)などは, 地球科学者の夢を掻立ててきた。また, 熱水の噴出現場では, それまで知られていなかった特殊な生物群が観察され, これが引金となって, 太陽エネルギーに依存しない“深海湧水生態系”が海洋生物学の新しい分野となっている。

これまでに発見された海底熱水鉱床は, PMSに限らずに, 鉄・マンガン酸化物やいわゆる重金属泥を含めれば, かなりの数にのぼる。1983年以前にそれらが発見されたのは47地点にのぼり, 表1に示した大地形区分別にみると, 中央海嶺系: 22, オフリッジ海底火山: 6, 島弧系海底火山・火山島: 9, 海盆地: 10, 海溝: 1となっている⁴⁾。ここで, これらのひとつひとつについて紹介するのは不可能であるが, 以下にいくつかの代表的な例の概要を述べる。

紅海の重金属泥 スウェーデンの深海研究チームが, 1948年に異常な堆積物の存在を発見していたが, 重金属泥と紅海特有の高温高鹹水(ホットブライン)のサンプル採取を含む詳細な調査は1966年になってから, 米国のウッズホール海洋研究所によって行われた。

紅海には, 非常に新しい海底拡大軸があり, とくにその北部には中軸谷がよく発達している。そこでは, 中軸谷とトランスフォーム断層(拡大軸を横切る断層)で, 断層運動と拡大運動による変位が互いに影響しあって, 切断された2つの拡大軸に挟まれる部分では, 断層による過去の変位と拡大による現在の相対的な変位が逆の方向になり, その外側では, 断層が過去のも

のであれば, 相対運動がないという形の断層)が交わる所にいくつかの凹地(ディープ)が形成されている。ディープの水深は2200 m程度までで, ホットブライン(温度は~65°C)の下に存在する重金属泥(酸化物, 硫化物, 珪酸塩, 炭酸塩等を含む)に含まれる有用金属の濃度は, アトランティスII世ディープ(平均)で, 鉄29%, 亜鉛3.4%, 銅1.3%, 銀54 ppm, 金0.5%等となっている。また, 同ディープの60 km²の範囲内で, 鉄3000万 t, 亜鉛250万 t, 銅50万 t, 銀9000 t等の埋蔵量が見込まれている。なお, ホットブラインに含まれる総塩分は最高で26%近くに達するが, その生成は, 部分的には, 氷河期の低海水準による閉鎖的海盆の発生とそこでの盛んな蒸発に起因すると考えられ, また, 同じ原因によって, 損われたアイソスタシーを補正しようとする力が海底拡大に結びついたといわれる⁵⁾。

東太平洋海膨(EPR)北緯21度地域の塊状硫化物 フランスの潜水調査船“Cyana”が1978年2~3月の調査で, 拡大軸から1 km以内にある小さな凹地の斜面から, 閃亜鉛鉱, 黄銅鉱, 白鉄鉱及び黄鉄鉱からなるマウンド状の熱水性硫化物を発見した⁵⁾。当時, 採取されたサンプルは, バルクで29%の亜鉛と6%の銅を含んでいた。マウンドの高さは約10 m, 幅3~4 mで, EPRの頂部と平行に並んでいた。上記のマウンド以外にも自然硫黄や鉄酸化物を主成分とするような沈殿物も発見されている。化学組成の上では, 一般に極めて不均質で, 鉄, 銅, 亜鉛, 硫黄に富み, コバルト, 鉛, カドミ及び銀は少量しか含まれない。ただし, 銀はいくつかのサンプルで1.5%の濃度に達していた。

上に述べたのは, この地域における熱水鉱床の最初の発見に関わるものであるが, “EPR 21° N”を一躍

表1 海底熱水鉱床を伴う大地形の区分⁷⁾

大地形区分	随伴する熱水性重金属濃集体
中央海嶺系 { 拡大軸部	……塊状硫化物鉱床・重金属泥(紅海)・クラスト状酸化物
断裂帯・トランスフォーム断層	……クラスト状酸化物・鉱染状および網状硫化物
海嶺頂部付近表層	……重金属堆積物
off-ridge 海底火山 { 中央海嶺系近傍	……硫化物・酸化物
ホットスポット型	……クラスト状酸化物
島弧系海底火山・火山島	……クラスト状酸化物・塊状酸化物・硫化物
海盆地 { 大洋盆	……重金属堆積物(表層および堆積層の基底部)
縁海盆 { 非活動部	……重金属堆積物(表層および堆積層の基底部)
縁海拡大軸部	……酸化物
海溝(海側海溝斜面)	……重金属堆積物(堆積層の基底部)

有名にしたのは、米国の潜水船が1979年の調査で発見した高温熱水(350℃)噴出現場であった。熱水は高さ数mの煙突から5m以上の上方に煙を噴き上げていた。この煙を吐いている煙突を発見者はスモーカーと呼んだ。ここでいう煙とは、熱水からの沈澱(物)のことである。熱水の温度が、350℃以上の場合には、硫化鉄等の微粒子が沈澱するため“煙”は黒く、“ブラック・スモーカー”となり、300℃以下の場合には非結晶質のシリカを主体とする沈澱によって白い煙が見えるので、“ホワイト・スモーカー”と呼ばれる。

また、この時の調査では、同時に、硫化物のマウンドまたは煙突が数kmにわたって断続的に分布することも明らかにされた。塊状の硫化物に含まれる主要な元素の濃度は、亜鉛23~50%、銅0.3~1.5%、鉄1.3~45%、銀83~480ppm等であった。なお、この地域の熱水には、水素、メタン及びヘリウムガスが比較的高濃度で含まれることも明らかになっている。

グアイマス海盆の滑石 アメリカ大陸西岸のカリフォルニア湾には東太平洋海膨の延長にあたる中軸谷が走っており、その北緯27度18分付近で潜水調査船が熱水鉱床を発見したのは1977年のことであった⁶⁾。採集されたサンプルの大半は、脈状及び散点的な磁硫鉄鉱と若干の銅・亜鉛硫化物を含み鉄・マンガン酸化物及び磷酸カルシウムの薄層で覆われた滑石であった。また、ガラバゴス海嶺の熱水噴出現場で生息していたのと同じ巨大な二枚貝の死殻が発見されており、熱水と海水との混合による金属元素の沈澱が、かなり最近の出来事であったと思われる。さらに、海底での硫化物の沈澱があったということは、噴出温度が比較的高かったことを示しており、海底下でもっと多量の硫化物が発見されるかも知れない⁵⁾。

以上に紹介した他にも、この節の冒頭部分で触れたガラバゴス海嶺の巨大煙突群や、東太平洋海膨とガラバゴス海膨に挟まれたパウエル海盆の鉄マンガン酸化物を含む鉄スメクタイトと呼ばれる熱水起源の粘土鉱物等は、熱水鉱床の典型例として良く紹介されるが、ここでは紙数の関係で割愛する。

2.2 我が国における調査・研究の動向

我が国では、昭和57年度に科学技術振興調査費による「我が国周辺200海里水域における調査手法に関するフィジビリティスタディ」の一環として、工業技術院地質調査所が「海底熱水鉱床の調査技術に関する調査」⁷⁾を行ったのを初めとして、科学技術庁^{8), 9)}や深海底鉱物資源開発協会^{10), 11), 12)}が海底熱水鉱床の

研究動向調査や探査手法の検討等を行っている。

また、探査・研究の面では、やはり工業技術院地質調査所が、伊豆・小笠原海域を対象とする「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」(工業技術院特別研究：昭和59~63年度の5ヶ年計画)を、そして、金属鉱業事業団が、昭和60年度から通商産業省の委託を受けて、メキシコ沖の東太平洋海膨海域の調査を実施している。前者は、海底の拡大軸ではなく、逆にプレートが沈み込んでいる海溝の内側(大陸側)に発達する火山性の弧状列島(すなわち島弧)にも、伸長応力場があって、既に述べたような海底熱水鉱床生成の基本的条件が整っているのではないかという期待の下に始められた。これまでの調査で、クラスト状の鉄・マンガンの酸化物を多数の地点で発見した他、西之島南方約65kmにある海形海山のカルデラ内では、脈状の硫化物(黄鉄鉱を主体とし、微量ながら閃亜鉛鉱や黄銅鉱を含む)を発見する等の成果をあげている^{13), 14), 15), 16)}。一方の金属鉱業事業団の調査でも、新聞報道等によれば、数地点で硫化物を発見し、鉱石の採取に成功している。

3. 海底熱水鉱床の探査手法と開発の見通し

地質調査所では、既に1983年に海底熱水鉱床の調査手法を、調査の段階に沿って予測的に体系化している。(表2)⁷⁾。その後、GPSと呼ばれる新しい人工衛星航法システムの導入が始まって、大洋上のどこにいても、数10mの精度で船の位置を出すことが可能となりつつあるなど、若干の情勢の変化もあるが、熱水鉱床を探査するという観点から見ても、この表はその基本的な骨格を示す点で重要である。

熱水鉱床の探査では、まず、熱水活動が存在する可能性のある場を抽出するための地形・地質構造調査が必要である。堆積物の覆いが薄い海域では、海底地形から火山や海底拡大の軸部を検出することができるし、拡大傾向の場に形成されて熱水の循環経路となるであろう正断層群は地質構造探査で把握される。次に、海底下あまり深くない場所に熱源があれば、種々のスケールで重力の低異常や地磁気強度の低下が観測されるであろう。さらに、熱水循環があれば高い地殻熱流量や底層海水の微妙な温度変化が観測され、あるいは海水中にメタンやヘリウムといったガスが比較的多量に溶存している可能性がある。そして、実際に循環する熱水が、有用な金属成分を海底に運んできているとすれば、それが低温のものであっても、鉄・マンガ酸

表2 海底熱水鉱床調査の各段階の概要と調査機器・技術⁷⁾

調査の段階		1. 広域的概査	2. 選定海域の概査	3. 存在指標高強度海域の精査	4. 熱水活動・熱水鉱床調査
調査の概要 対象となる地域の広がりとスケール		海底地質・地質構造調査 任意の海域（島弧，海嶺，海山群），100万分の1	精密な海底地形・地質調査 2000～400 km ² 10万～5万分の1	海底表層部微細地形・地質構造調査 及び海底観察 25～5 km ² 1万～5000分の1	潜水調査船による海底調査 5～0.25 km ² 5000～1000分の1
目 標		海底火山活動海域の選定及びそこにおける断層構造の検出	地球化学的，地球物理学的存在指標の検出及びその強度分布の解明	熱水活動・熱水鉱床地帯に特有の地形・構造の検出	熱水活動・熱水鉱床の目視確認
存在 指標	地形・地質	○火山活動・断層構造	○Fe・Mn 酸化物，岩石の熱水変質	○マウンド地形，チムニーの存在	
	化学的性質		○堆積物中のMn濃度，海水中のCH ₄ ， ³ He，全溶解性Mnの異常		
	物理的性質	○高地殻熱流量 残留磁気強度の減衰	○重力，残留磁気，地震波速度，地殻熱流量の異常	○特有生物群集の存在	
	その他		○海水温度の異常		
調査項目と機器・技術	測位方式	人工衛星航法（NNSS），ロランC	NNSSとロランCの複合航法	音響航法（トランスポンダーシステム）	音響航法
	地形・地質調査	12kHz PDRによる測深 エアガン・スパーカによる地質構造調査 ドレッジ・コアラ・グラブによる海底試料採取	マルチナロービーム測深，広域型サイドスキャンソナーによる表層構造調査（広域三次元海底探査システム）， 深海曳航式地震波探査装置による精密地質構造調査，海底試料採取， 深海TV，カメラによる海底観察。	深海曳航観測機器による精密観察 ・測定 ○狭域型サイドスキャンソナーによる海底表層微細構造調査 ○深海TV，カメラによる連続海底観察 ○深海プロトン磁力計による精密磁気測定 ○曳航式GTD観測 海底試料採取・分析	潜水調査船による目視観察，試料採取，各種測定
	地球化学的調査	堆積物，Fe・Mn酸化物等の化学分析	堆積物化学組成の系統的分析 海水中のCH ₄ ， ³ He，全溶解性Mnの分析（フリーフォール式測温多重採水装置）		
	地球物理学調査	海面上からの磁気，重力測定，地殻熱流量測量 地殻構造調査（ソノブイ）	磁気，重力，熱流量の精密測定 海底地震計を用いた火山性脈動の検出及び地殻構造調査		
	その他	CTD観測	CTD観測（曳航方式を含む）		

化物をクラストとして、あるいは堆積物中の微粒子として沈澱させているであろう。広い意味で熱水活動の存在を示すこれらの指標と、それらに基づいた各手法は、それぞれ独立した探査の段階を形作るのではなく、各段階で、観測の密度と適用される手法が少しずつ変わっていくのである。将来的には、経済効果を考慮したフローチャートのような探査マニュアルが作成されるべきであるが、現在は若干試行錯誤的に経験を積重ねながら体系化を図っているという状態である。

1.2に述べたようなマンガンと比較した場合の資源としての有利性から、海底熱水鉱床の開発への期待は一挙に高まった。しかし、現実には採算に合うような規模の鉱体がほとんど発見されていないし、現在予想できる経済的なインパクトが米国と日本の亜鉛市場に限られるだろうとの予想がある。したがって、熱水鉱床の商業的な開発が今後20年以内に始まる確率は10～30%であろうとの見方もある¹⁷⁾。ただし、この場合も、より浅い水深の海域で鉱床が発見されたり、あるいはより価値の高い貴金属や希少金属を含む鉱床が発見されれば、短時日のうちに様相は一変するであろう。また、ベースメタルそのものにしても我が国には鉱石の国内生産が皆無に近いという特殊な事情がある。いずれにしても、他国が腰を上げてから慌てて採鉱装置等を設計して、数年の遅れをとるとするような事態は避けたいものである。

参 考 文 献

- 1) 川幡穂高; 大洋中央海嶺の熱水系, 鉱山地質, 33巻5号 (1983), 347~365.
- 2) Broadus, J. M.; Economic significance of marine polymetallic sulfides, Offshore Marine Resource Proceedings, Group d'Etude et de Recherche de Mineralisations Au Large (1984), 559~575.
- 3) 白井朗; 中部太平洋マンガン団塊の分布・産状・組成の地域的变化及びその生成環境 (地質調査所第169回研究発表会講演要旨), 地質調査所月報36巻10号(1985), 584~585.
- 4) 湯浅真人・水野篤行; 海底熱水性鉱床・沈澱物のカタログ, 月刊地球6巻2号 (1984), 120~131.
- 5) Cronan, D. S.; Underwater Minerals (1981), Academic Press.
- 6) Lonsdale, P.; Submersible Exploration of Guaimas Basin, S. I. O. Report 78-1 (1978), Scripps Institn. of Oceanography, Univ. California.
- 7) 地質調査所200海里フィージビリティスタディグループ; 海底熱水鉱床の調査技術に関する調査報告 (1983), 工業

技術院地質調査所.

- 8) 科学技術庁資源調査会; 海底熱水鉱床に関する調査報告, 科学技術庁資源調査会報告第94号 (1984).
- 9) 資源調査会(編); 海底熱水鉱床に関する基礎調査, 科学技術庁資源調査所資料第120号 (1984).
- 10) 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(昭和58年度自転車等機械工業振興補助事業) (1984).
- 11) 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 (昭和59年度自転車等機械工業振興補助事業) (1985).
- 12) 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 (昭和60年度自転車等機械工業振興補助事業) (1986).
- 13) 中尾征三ほか11名; 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—昭和59年度研究航海 (GH84-2及びGH84-4)—, 地質ニュース, 365号(1985), 13~21.
- 14) 海底熱水鉱床研究グループ; 伊豆・小笠原弧の火山フロントで熱水性硫化物発見さる, 地質ニュース, 348号 (1986), 39.
- 15) 工業技術院地質調査所; 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 (昭和59年度研究報告書)(1985).
- 16) 中尾征三・湯浅真人(編); 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 (昭和60年度研究報告書) (1985).
- 17) Johnson, Ch. J., Clark, A. L. and Otto, J. M.; Pacific Ocean Minerals: The next twenty years. MS for Journal of Buisness Administration (1985), Univ. British Columbia.

