

海底熱水鉱床について

湯 浅 真 人 (海洋地質部)
Makoto YUASA

1 はじめに

海底の新たな鉱物資源として 有用金属元素を多量に含む熱水性硫化物鉱床が 新聞紙上や商業雑誌類でとりあげられ始めたのは つい先頃のことである (第1表)。

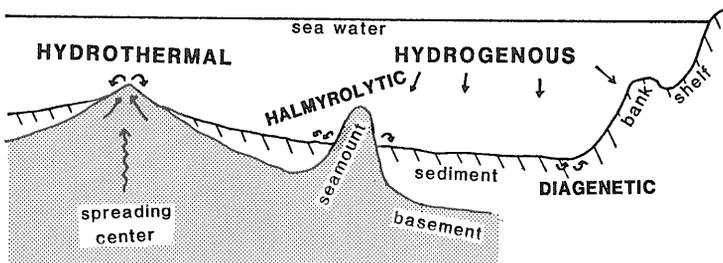
これが騒がれ始めたのは 東太平洋海膨やガラパゴスリフトで銅や亜鉛を多量に含む 塊状硫化物鉱床が発見されたことが直接の引き金になっている。さらに 深海底鉱物資源の開発に関する国際海洋法条約をめぐって一部の海洋先進国がとった態度にも関係している。米国で報道されている新聞記事などでは このような硫化物鉱床が米国沖合 200 海里以内の海底に存在していることが強調されているし また NOAA (米国海洋大気局) の1983会計年度に始まる 5 か年計画で提案されているプログラムも 200 海里の排他的経済水域を充分に意識したものとなっている (Duane 1982)。

有用金属元素を含む 硫化物を主とした熱水性の鉱床

が海底から発見されたのは そう古い話ではなく 今から10数年前に紅海の凹地 (ディープ) で発見されたのが最初である (Miller et al. 1966 ; Degens and Ross eds. 1969)。ただし紅海で発見されたのは 軟かな泥状の重金属濃集体 (重金属泥) である。このような重金属濃集体が紅海に存在するのは ここではディープ中に 温い濃厚塩水 (ホットブライン) を伴うという事情もあって 拡大初期の拡大軸でかつ海水の循環が制限された還元環境という open sea とは異なった特殊な条件が存在するためと考えられた。しかし最近相次いで発見・報告されている塊状硫化物鉱床は open sea の中央海嶺系に伴われており 盛んに熱水を噴き出している煙突 (チムニー) が実際に観察され 現在そこに硫化物鉱床が形成されているという点で 海洋底地球科学の関係者のみならず 鉱床関係の人たちも含め大きな関心をまきおこした。さらに前述のように このような鉱床が 200 海里の排他的経済水域内に存在するという点で 沿岸各国に起きた波紋は大きいものとなった。資源小国を自認し かつ四方

第1表 新聞・雑誌類による熱水鉱床紹介記事。

新聞・雑誌名	日付	標 題	執 筆 者
日経新聞	56・12・20	〃 重金属泥、開発乗り遅れるな	浅井恒雄
〃	57・4・5	深海底に噴き出す金属硫化物	〃
読売新聞	57・6・28	新しい海盆誕生の兆し〃宝の山、熱水鉱床発見も	
朝日新聞	57・10・25	資源の宝庫 海底の〃黒煙	
毎日新聞	57・11・19	深海の熱水鉱床開発へ	
自 然	55・5月号	灼熱の海底 -1980年代の地球科学に向けて	上田誠也
サイエンス	55・7月号	東太平洋海膨の熱水噴出	マクドナルド、K.C.・ルーウェンダイク、B.P. (中村保夫・藤岡換太郎 訳)
OCEAN AGE	57・7月号	特集 新資源 熱水鉱床への期待	岡村健二・長谷川淳・水野篤行・中原裕幸
海洋時報	57・8月号	深海底金属資源のニューフェイス	水野篤行
科学と実験	57・9月号	新資源 熱水鉱床	中村政雄
科 学	57・10月号	深海底に噴出する熱水	
〃	58・2月号	新しい海底鉱物資源	佐藤壮郎・水野篤行



第1図 海底における重金属濃集のプロセスと濃集の場の違い (Bonatti 1975)。

を海に囲まれている我が国でこのような海底熱水鉱床が注目を浴びるのは当然でもある。

ここでは 硫化物鉱床以外の鉄マンガン酸化物も含め海底の熱水鉱床とはどのようなものなのか その産状や分布などについて いわば資料としてまとめておく。

さらに 熱水鉱床発見の今後の可能性についても触れることにする。

この小文を書くにあたり 海洋地質部小野美代子技官には文献の収集に御協力をいただきました。 同部水野篤行部長には原稿に目を通していただき 多くの御助言をいただきました。 記して厚く感謝致します。

2 海底における重金属元素の濃集

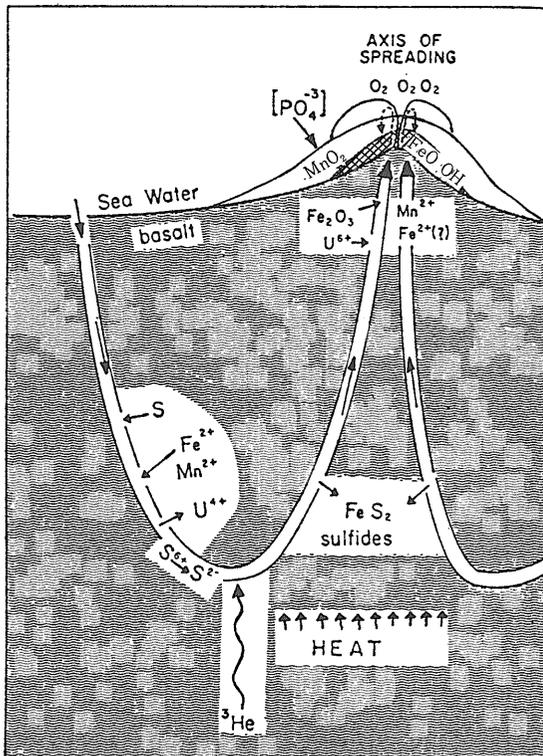
海底における重金属元素の濃集に関わるプロセスは熱水鉱床をつくるような熱水活動のみではない。 深海底鉱物資源として先輩格のマンガン団塊の成因としては別のプロセス(水成作用)が考えられている。 また水成作用で形成された鉄マンガンクラストと熱水活動で形成された鉄マンガン酸化物のクラストとでは見かけ上の識別は困難な場合も多い。

本章では 海底における重金属元素の濃集プロセスについて 一通り眺めておくことにする。

Bonatti et al. (1972a) は 海底での重金属元素 特に鉄 マンガンの濃集する原因を次の4つに分類している(第1図)。

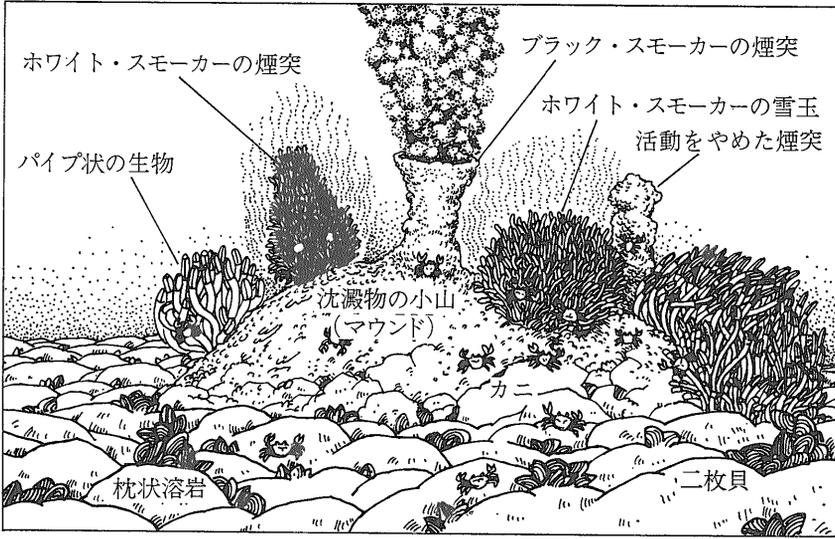
- ① hydrogenous …通常の中海水中に含まれている重金属元素(水成作用)がゆっくり沈澱する。 マンガン団塊はこの過程によって形成されたと考えられている。
- ② hydrothermal …火山活動に伴われる熱水から重金属元素が供給される。 活動的な海嶺やリフトに伴われることが多い。
- ③ halmyrolitic …岩石の海底風化によって重金属元素が供給される。 通常の底層水温下でのゆっくりした変質作用であり玄武岩質ガラスからのマンガンの溶脱などはこれに含まれる。
- ④ diagenetic …有機物に富むような堆積物中の還元環境下で形成される。 マンガンは還元されて堆積物中を移動し水と堆積物との境界付近で酸化され再沈澱している。

これら4つのプロセスは 重金属濃集体の成因の違い



第2図 中央海嶺拡大軸部の熱水系モデル (Bonatti 1975). 海底下へ浸透した海水が 拡大軸下のマグマ・高温岩体と反応。 重金属元素に富む熱水となって上昇。 海底近傍で海水と混合し硫化物あるいは酸化物として重金属が沈澱する。 この図では硫化物は海底下の玄武岩中に沈澱するように描かれているが 熱水が海底に噴出するまでの間で海水との混合・それによる冷却が最小限に抑えられれば 熱水は高温かつ還元性を保たれるので 海底面上に硫化物を沈澱する。

を示すとともに 重金属元素の供給源の違いをも反映している。 すなわち ①通常の中海水 ②熱水 ③海底の岩石 ④間隙水と堆積物 である。 ②の熱水により供給される重金属元素は 海水が海底下の高温岩体と反応し岩石中から抽出(リーチング leaching)されたものが主体であるという見方(第2図)をすれば③との違いは抽出・溶脱時の温度条件だけとなり 両者の境界は漸移的なものとなる。 また上記4つの供給源と多少重複する部分はあるが 陸源物質や生物源物質も供給源として加えてよいかもしれない。 実際 南太平洋のラウ海盆(Lau Basin)では堆積物中の重金属元素の供給源の1つとして 近接するトンガ海嶺に由来する火山性物質(軽石)が考えられており(Bertine 1974) また マンガン団塊中への銅の濃集機構の一部は 放散虫によりまかわられているようである(Frazer・Fisk 1980)。



第3図
熱水鉱床の概念図 (東太平洋海
膨北緯21度 マクドナルド・ル
ーウェンダイク 1980に基づ
く)。

以上のように 海底における重金属元素の濃集体には多くの種類があり 成因も様々に異なっている。これらのうち 海底風化により岩石 (主として玄武岩) から溶脱されて沈積した重金属濃集体の量は 他のプロセスによるものに比べはるかに少ないと考えられる。海底近傍における通常の温度条件下で岩石から溶脱する重金属の量は 熱水作用による供給に比べれば極めて少なく このようなプロセスによる重金属の濃集は 恐らくローカルにしか生じえない。残る3つのプロセスの中でも 続成作用による重金属の濃集は 有機物の流入量の大きい大陸縁辺部に限定されるであろうから 海底の重金属元素の濃集体としては 水成作用および熱水活動によるものが 分布・存在量ともに大きいといえる。

3 海底熱水鉱床の産状

初めに「鉱床」という言葉の使用についてお断わりしておかなければならない。東太平洋海膨等における硫化物鉱床の発見以来 熱水鉱床という言い方がされることが多いが 海底の熱水活動に起因する重金属元素の濃集体には 硫化物ばかりでなく酸化物もあり 産状も固化した塊状のものもあれば 軟かい泥状のものもある。陸上における重金属濃集体に対して使われている鉱床という言葉には 経済的価値というイメージがつきまとうが 海底のそれについては 経済的価値が確認されているのは紅海の重金属泥のみと言っても過言ではない。ここで海底熱水鉱床という言葉を使うのは 現在ではそれが最も通りの良い言葉であると思われるからで 経済的価値の概念は伴っていない。また ここでは遠洋性堆積物に比べ 鉄やマンガンに富んでいるという程度の

“濃集体”についても扱う。これについては重金属堆積物という言葉を使うことにする。しかし 熱水鉱床と重金属堆積物との境界は 厳密に定義されている訳ではない。

東太平洋海膨やガラパゴスリフトから発見されている塊状硫化物鉱床も含め 今までに発見・報告されている熱水性の主な重金属濃集体は 組成・産状から次のようにまとめられる。

- | | | |
|-----|---|-------------|
| 硫化物 | } | 塊状 |
| | | 重金属泥 (紅海) |
| | | 鉱染状・網状 |
| 酸化物 | } | クラスト (皮殻) 状 |
| | | 重金属泥 (紅海) |
| | | 塊状 |

以上のほかに重金属堆積物が加わる。また 岩石の割れ目に鉄マンガン酸化物が網状にしみ込んだ産状をする場合があるが これはクラスト状酸化物の一部と考えられる。

1) 硫化物

硫化物としては塊状硫化物鉱床が最も良く その形成されている産状が観察されている。これは 第3図に示すような煙突 (チムニー) の存在を特徴としている。この煙突は黄銅鉱・閃亜鉛鉱・黄鉄鉱などの硫化鉱物や硬石膏・石膏などの硫酸塩鉱物 および非晶質シリカ 硫黄などからなり 熱水の噴出口となっている。煙突には熱水を現在噴出しているものとそうでないものがあり 噴出がみられるものはスモーカー (Smoker) と呼

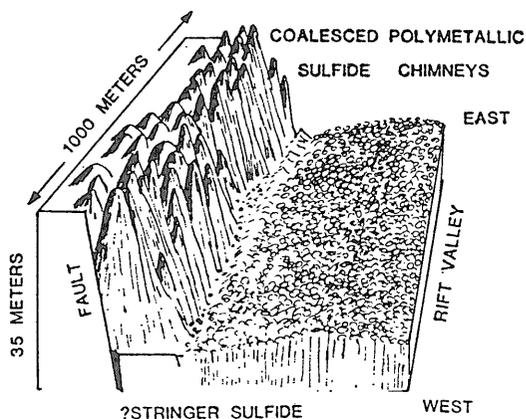
第2表 東太平洋海膨北緯21度から報告された チムニー マウンド スモーク等の構成鉱物.

Mounds	Chimneys				Particulates		Sediments	
	dead	live			black smokers	white smokers	fallout from black smokers	disaggregated mounds
		non-smokers	black smokers	white smokers				
<i>sphalerite</i> <i>wurtzite</i> <i>pyrite</i> chalcocopyrite marcasite amorphous silica barite sulfur goethite Fe-oxyhydroxide jarosite (cubanite) (natrojarosite) (talca) (corundum)?	<i>sphalerite</i> sulfur pyrite chalcocopyrite wurtzite marcasite amorphous silica barite goethite Fe-oxyhydroxide jarosite (natrojarosite) (corundum)? (galena) (bornite) (cubanite) (chalcocite)	anhydrite pyrite (gypsum)	anhydrite chalcocopyrite sphalerite pyrite Mg-hydroxy-sulfate-hydrate gypsum (pyrrhotite) (wurtzite) (cubanite) (bornite) (covellite)	amorphous silica sulfur pyrite barite anhydrite (gypsum) (sphalerite) (wurtzite) (marcasite) (corundum)?	pyrrhotite pyrite sphalerite	amorphous silica pyrite barite	sphalerite pyrrhotite pyrite chalcocopyrite wurtzite sulfur	sphalerite pyrite chalcocopyrite wurtzite talc Fe-oxyhydroxide (sulfur) (digenite) (pyrite) (marcasite) (gypsum)

主成分鉱物をイタリックで アクセサリー鉱物を括弧で示した. Haymon・Kastner (1981) による.

ばれている. スモーカーから出ている“スモーク”にも黒色のもの(ブラックスモーク)と白色のもの(ホワイトスモーク)とがあり 両者では含まれている微粒子が異なっている(第2表). また“スモーク”の温度・噴出速度も異なり ブラックスモークでは 350°C 前後 1.0~2.6 m/s ホワイトスモークでは 300°C 以下で 噴出速度は 30°C の場合に 0.1~0.2 m/s 140°C の場合に 0.7 m/s と測定されている (Converse et al. 1982). ブラックスモーカーの周囲には生物活動は見られないがホワイトスモーカーの周囲では生物活動が盛んである.

これらの煙突は小さな丘(マウンド)の上に乗っている. この丘は主として 活動をやめた煙突の破片からなる. 大きさは 高さ 1~4 m 底面の幅 5~15 m 程のものか



第4図 ガラパゴスリフトで発見された非活動的煙突(チムニー)からなる metalliferous ridge (Malahoff 1982).

ら 大きなものでは高さ20m 幅50mに達するものもある (Williams et al. 1979). 煙突の高さは 0.5~6 m 位であるが 最近 Malahoff (1982) により報告されたガラパゴスリフトの煙突(非活動的)では 35mの高さをもつものが 幅200m 長さ1000mの metalliferous ridge をなしているという(第4図).

紅海の重金属泥は 中軸部リフト谷とそれを横断する断層との交点付近に発達する凹地(ディープ)に沈積している. Bischoff (1969) はアトランティスII世ディープでの調査結果に基づいて 7つの堆積相を分類したが Cronan (1980) はその後の調査結果も加え 次の6つのグループに分類しなおした. それらは 酸化物 硫化物 硫酸塩 炭酸塩 ケイ酸塩 通常の堆積物である. このうち酸化物 硫化物 ケイ酸塩が金属元素に富んでいる.

硫化物としては 鉄・銅・亜鉛硫化物の混合相と黄鉄鉱相とが識別されるが いずれも細粒泥状の見かけをしている (Ross・Degens 1969にそのカラー写真が掲載されている).

硫化物としては以上2つのタイプのほか 海底から採取された玄武岩中に鉱染状・網状に生じているものがあるが 量は少ない.

2) 酸化物

海底の熱水活動により形成されている酸化物は 鉄マンガン あるいは両者の酸化物である. これらの酸化物は 海底の岩石の表面をクラスト状に覆って沈積し

第3表 紅海重金属泥の各堆積相ごとの平均化学組成 (Bischoff 1969).

	Detrital	Fe Mont- morillonite	Goethite- Amorphous	Sulfide	Manganite *
SiO ₂	27.3	24.4	8.7	24.7	7.5
Al ₂ O ₃	8.4	1.7	1.1	1.5	0.7
Fe ₂ O ₃ (total)	6.5	37.1	64.2	24.3	30.5
FeO	1.4	11.7	2.7	13.4	0.4
Mn ₂ O ₄	0.6	2.1	1.1	1.1	35.5
CaO	23.6	4.8	3.4	2.5	2.9
ZnO	0.08	3.2	0.7	12.2	1.4
CuO	<.01	0.8	0.3	4.5	0.1
CO ₂	23.1	8.6	3.6	5.7	2.2
S	0.3	3.9	0.6	16.8	0.6

* Based on only 2 analyses.

ていたりあるいは 崖錐の角礫のマトリックスとして沈積している。鉱物相としては 針鉄鉱 マンガナイト (10Å 7Å) ランシー鉱などが識別されることが多いが 非晶質の鉄やマンガンの酸化物・水酸化物も多く見られる。

紅海のリ重金属泥中の酸化物には 褐鉄鉱相 鱗織石相 赤鉄鉱相 磁鉄鉱相 マンガナイト相が識別される (Cronan 1980)。また 非晶質のマンガン酸化物 鉄マンガン酸化物もみられる。これらの酸化物はディープ中では 硫化物に比べ 熱水噴出口からより離れた位置に分布している。

上記2タイプの酸化物に分類されない塊状のものを塊状酸化物とした。伊豆・小笠原海域で採取された例 (Yuasa・Yokota 1982) では 黒色 不規則塊状で 表面はアア溶岩状にゴツゴツしている。酸化物としては 磁鉄鉱 10Å マンガナイトが主成分となっている。熱水性の酸化物の場合 潜水調査艇により観察・記載されたものは少く ドレッジにより採取されたものが殆んどである。従って観察例が多くなれば 現地性の産状に基づく名称が提案されるかもしれない。

3) 重金属堆積物

通常の遠洋性堆積物に比べ 鉄 マンガンほかの重金属元素に富む堆積物を重金属堆積物とした。前述の酸化物との境界は厳密ではないが こちらの方が 鉄 マンガンの含有量は低い。中央海嶺系の表層堆積物として 広く分布するほか グローマーチャレンジャー号による深海掘削の結果 大洋盆の堆積層の最下位 (玄武岩層の直上) 付近に存在することが知られている。鉄酸化物粒子 マンガンマイクロ団塊 海底火山物質とその変質物 粘土鉱物 生物片などからなり 陸源物質は少ない。

4) 熱水性酸化物の識別

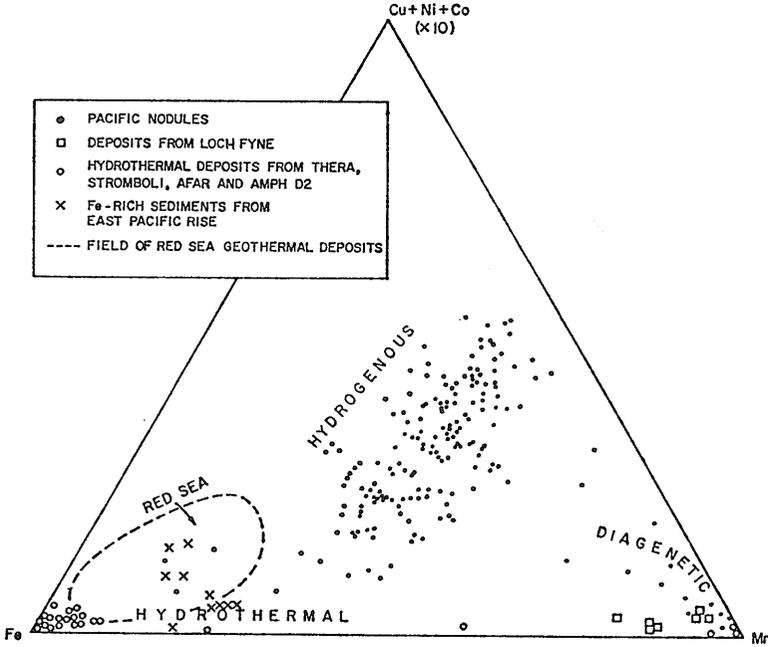
塊状硫化物のように産状が明らかなものは問題ないが産状の不明な 特に鉄やマンガンの酸化物の場合 見かけ上これを水成作用によるものと識別するのが困難なことが少なくない。海底の熱水鉱床を探索する際には 同じマンガン酸化物であっても それが熱水活動に由来するものかどうかは 大事な指標となる。

海底風化による重金属の濃集は一般的でないので除外するとして 水成作用 続成作用による 重金属濃集体 (酸化物) と熱水活動によるそれとの間の識別は それぞ

第4表 成因別の鉄マンガン酸化物の組成。

%	Hydrogenous		Hydrothermal			Diagenetic	
	1	2	3	4	5	6	7
Fe	15.5	17.3	28.0	31.1	0.24	3.99	0.6
Mn	15.7	18.6	9.2	0.58	52	30.70	37.0
Si	1.35	3.55	7.9	5.8	—	6.3	0.40
Al	2.59	0.69	0.4	<0.5	—	2.8	1.20
Ni	0.59	0.32	0.0010	0.0090	0.0320	0.0075	0.051
Co	0.41	0.44	0.0015	0.0032	<0.0003	0.0115	0.092
Cu	0.14	0.11	0.0160	0.0060	0.0100	0.0020	0.010
Mn/Fe比	1.01	1.08	0.33	0.02	216.7	7.69	61.7
Mn/Fe比の範囲	0.5~5		変動が大きい			高い	

産地は 1: Blake 海台 2: 赤道部太平洋 3: ストロノボリ火山 4: 東太平洋海膨 Amph 2D 5: トンガケルマデック海嶺 6: スコットランド Loch Fyne 7: off Japan Bonatti et al. (1972a) を一部改変し Cronan et al. (1982) によるトンガケルマデック海嶺のデータを加えた。



第5図
水成作用 熱水活動 続成作用により形成された鉄マンガン酸化物の化学組成の特徴 (Bonatti et al. 1972a).

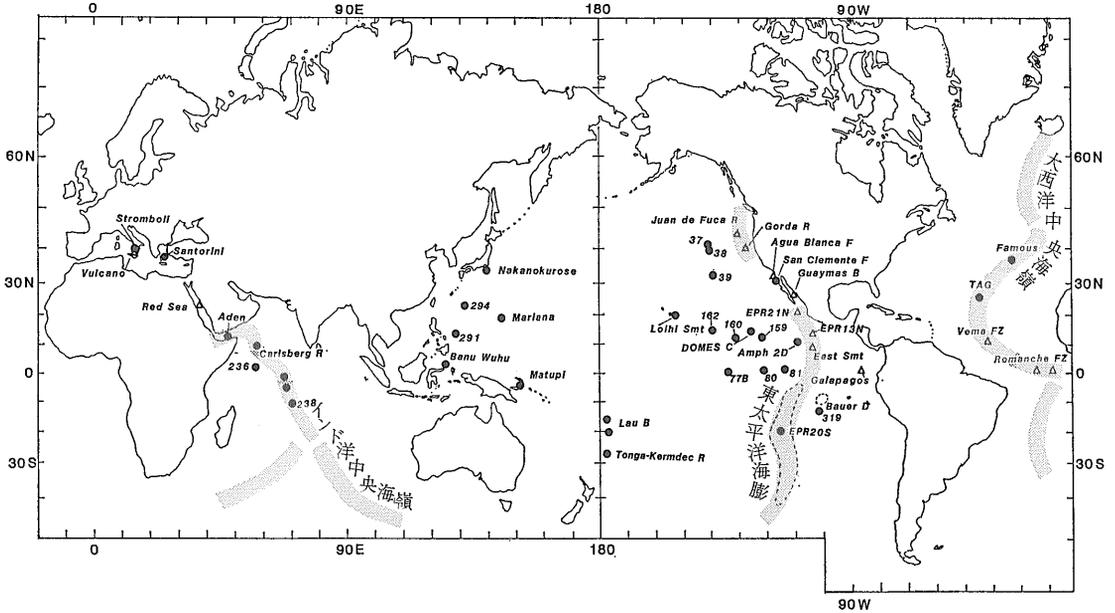
れの化学組成の特徴によっている。第4表および第5図に示されるように 水成作用による重金属元素濃集体 (マンガン団塊・クラスト) は 熱水活動により形成された鉄やマンガンの酸化物に比べ ニッケル コバルト 銅などの微量元素含有量が高いのが際立った特徴である。熱水活動で形成された鉄マンガン酸化物の場合 Mn/Fe 比がマンガン団塊のそれと良く似ていることがあるが この場合でも微量元素含有量は後者に比べ 1~3桁少ない。

第4表では 熱水活動に由来するマンガン酸化物の化学組成の特徴は 続成作用に由来するマンガン酸化物のそれに 大変良く似ている。両者の識別は Mn/Fe 比や微量元素含有量からは不可能であり これを識別するための幾つかの試み・提案がなされている (Gundlach et al. 1982; Hekinian 1982; Marchig et al. 1982)。地質学的背景等の状況証拠からの推定もある程度は可能であろうし 沈積速度が測定できれば強い証拠ともなりうる。しかし 沈積速度の測定は 試料の状態にもよるが困難な場合が多い。その点 Marchig et al. (1982)

表第5表 熱水活動および続成作用に由来する重金属濃集体あるいは堆積物の元素含有量の違い (Marchig et al. 1982).

Average As contents for various types of marine sediments — comparison of three different analytical methods

Type of sediment	As content in ppm		
	Neutron activation analysis	X-ray diffraction	Atomic adsorption (hydride)
Deep-sea sediment	5 ± 1 (n = 5)	10 ± 2 (n = 4)	3 ± 0.3 (n = 3)
Diagenetic metalliferous sediments	10 ± 1 (n = 6)	27 ± 6 (n = 7)	31 ± 33 (n = 5)
Bauer Deep sediment	—	66 (n = 1)	23 ± 1 (n = 2)
Hydrothermal metalliferous sediment East Pacific Rise	180 ± 30 (n = 6)	222 ± 46 (n = 6)	157 ± 12 (n = 4)
Hydrothermal metalliferous sediment Red Sea	230 ± 150 (n = 3)	201 ± 111 (n = 7)	153 ± 94 (n = 10)



第6図 海底熱水鉱床・重金属堆積物の分布。

略号は次の通り

△：硫化物採取測点 ●：酸化物採取測点 B：海盆 D：ディープ F：断層 FZ：断裂帯 R：海嶺 数字のみで示してあるのは DSDP の測点番号。南東部太平洋の破線で囲まれた地域は東太平洋海嶺 およびパウエルディープの重金属堆積物分布地域を示す。

により提案されている 元素含有量を用いた識別は 分析の簡便さも含め 好都合な基準である (第5表)。

鉄 マンガン 微量元素による識別法は 陸上のオフィオライトに伴う鉄マンガン酸化物の形成場のインディケーターの一部としても使用されうる (Bonatti et al. 1976a)。

4 海底熱水鉱床の世界的分布

前章では海底熱水鉱床の産状について述べた。ここでは 鉱床とは呼ばれないものも含め 熱水活動に起因すると考えられている重金属元素の濃集体の分布について述べる。

第6図に熱水性鉱床・重金属泥・重金属堆積物等の分

布を示した。これらの分布は 当然のことながら中央海嶺系や火山性島弧など 火山活動の存在するところあるいはその近辺に集中している。直接的な火山活動の存在しない場合でも それに関わりをもつ断裂帯・構造線に伴われていることが殆んどである。ここでは熱水鉱床や重金属堆積物が伴われる大地形を第6表の様に区分する。この地形区分を念頭におき海底熱水鉱床・重金属堆積物の発見・研究史をたどりながら それぞれに伴うタイプをみてみよう。

1) Challenger Expedition

海底から重金属元素に富む堆積物が最初に採取されたのは マンガン団塊やフォスフォライト 団塊を最初に発見した19世紀後半のチャレンジャー VI号 (H.M.S.

第6表 海底熱水鉱床を伴う大地形の区分。

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)
非活動部	……重金属堆積物(表層および堆積層の基底部)
縁海盆 { 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)

Challenger VI) の探検航海である。Rona・Lowell (1980) の記述によれば チャレンジャー航海により得られた堆積物について Murray・Renard (1891) により火山源成分を含むという記載がなされており 後に Revelle (1944) による化学分析の結果 重金属元素に富む堆積物であることが分ったそうである。

2) 紅海のホットブラインと重金属泥

紅海で塩分濃度の高い温海水 (ホットブライン) が発見されたのも1880年代であり 今から1世紀も昔のことである (Miller et al. 1966)。ホットブライン下の堆積物が重金属元素に富むことが明らかにされたのは 1965年のアトランティスII世号 (Atlantis II) の調査による (Miller et al. 1966)。その後 1966年にはチェーン号 (Chain) によって紅海の堆積物は更に詳しく調べられ その結果は Degens・Ross eds. (1969) により単行本としてまとめられた。紅海の重金属泥については黒鉱鉄床との類似性が指摘され 我が国でも度々紹介されてきた (堀越 1972; 佐藤・兼平 1974; 鹿園 1974)。

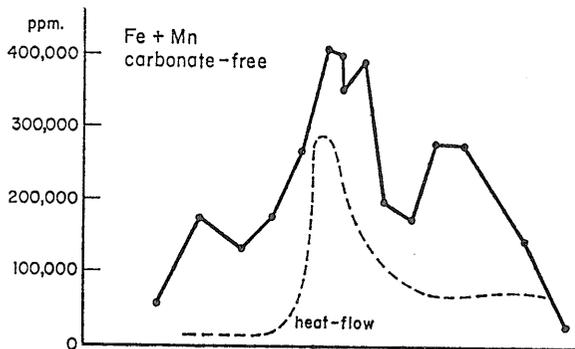
3) 海底重金属堆積物 (鉄マンガン酸化物) の発見

中央海嶺頂部の重金属堆積物

紅海の重金属泥とは別に 東太平洋の堆積物の化学分

第7表 サントリニ火山に伴う鉄酸化物に富む堆積物の化学組成 (Bonatti et al. 1972b)。

Per cent	Thera (a)	Thera (b)	Thera (c)	Thera (d)	Thera (e)	Thera (f)
Si	6.5	11.6	5.1	8.4	6.1	10.6
Al	0.3	1.2	0.5	0.03	0.3	0.7
Ca	0.66	0.57	0.38	0.10	0.91	1.18
Mg	0.83	0.34	0.49	0.12	0.63	0.84
K	0.43	0.14	0.18	—	0.49	0.56
Na	6.29	0.50	3.41	—	5.01	5.01
Fe	27.0	35.0	40.0	40.5	37.1	27.0
Mn	0.2	0.6	0.07	0.11	0.007	0.01
P	0.8	1.1	0.3	0.13	0.11	0.71
Ti	0.009	0.03	0.003	0.006	—	—
H ₂ O ⁻	—	—	—	—	13.27	9.72
H ₂ O ⁺	—	—	—	21	5.58	6.91
ppm						
B	130	190	135		6400	2600
Ba	80	90	88			
Co	<5	<5	<5			
Cr	<5	<5	<5			
Cu	9	30	20			
La	<10	<10	<10			
Ni	<5	<5	<5			
Sc	<3	<3	<3			
V	30	60	70			
Y	70	170	35			
Zr	<10	19	<10			
Fe/Mn	135	58	540	368	5300	2700

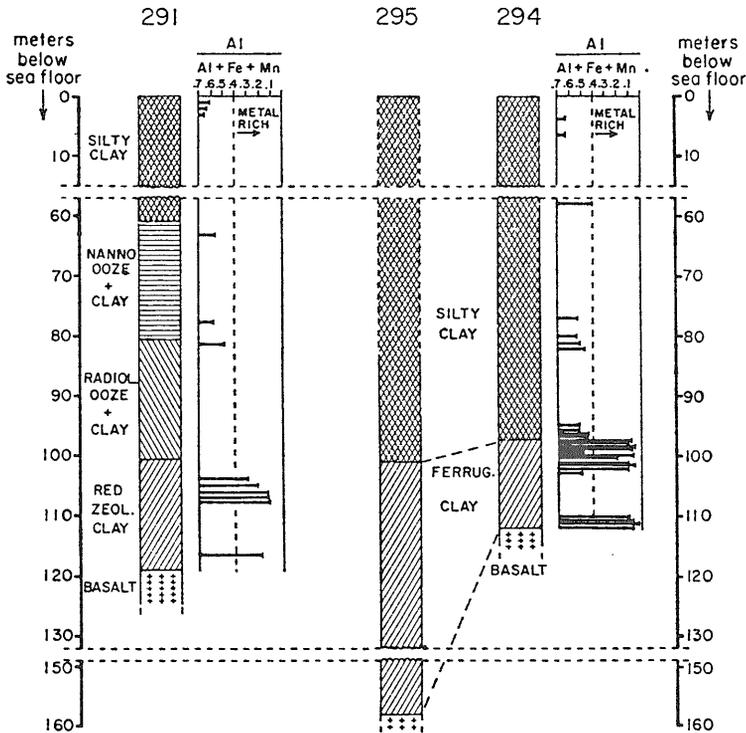


第7図 東太平洋海膨 (南緯12—16度) を横断する堆積物の鉄+マンガン組成プロファイル (Bostrom・Peterson 1966)。破線は熱流量プロファイル。

析結果から 東太平洋海膨拡大軸部を中心として 鉄マンガンに富む堆積物の存在することが見いだされた (Skorniyakova 1965; Bostrom・Peterson 1966) (第7図)。このような異常組成の堆積物の成因として 海底温泉起源 (Skorniyakova 1965) 深海底における magmatic process 起源 (Bostrom・Peterson 1966) などが提案された。東太平洋海膨頂部近傍の海山斜面の測点 Amph 2D から最大で32.5%の鉄を含む堆積物を採取した Bonatti・Joensuu (1966) は この堆積物の起源を火山起源の熱水および深海底玄武岩質溶岩からのリーチングによると考えた。

島弧系火山の重金属堆積物

鉄マンガンあるいは鉄に富む堆積物は 中央海嶺系のみならず島弧系の火山に伴っても形成されている。地中海 Hellenic弧 (Cyclades 弧) のサントリニ火山 (カルデラ) に伴う鉄酸化物 (Bonatti et al. 1972b; Puchelt 1973) 同じく地中海 Calabrian 弧 (Aeolian 弧) のストロンボリ火山に伴う鉄マンガン酸化物 (Bonatti et al. 1972b) と同弧ブルカノ火山に伴う鉄硫化物 (Vallet 1973; Honnorez et al. 1973) などはその例である (第7表)。また 西太平洋でもインドネシア Mahengetan 島沖にあるバヌワフ海底火山に伴う鉄あるいは鉄マンガン水酸化物 (Zelenov 1965) パプアニューギニア ニューブリテン島マツビ湾の鉄酸化物 (Ferguson・Lambert 1972) などが報告されている。これらの酸化物はいずれも 陸上で観察できる程の海岸線付近の温泉噴出口周辺 (サントリニ マツビ湾) 海岸から近い浅海底 (バヌワフ) あるいは変色水域 (ブルカノ) 等 特別の海洋調査を必要としない沿岸域に分布している。



第8図
フィリピン海盆のDSDPコア中の基底重金属堆積物 (Bonatti et al. 1979).

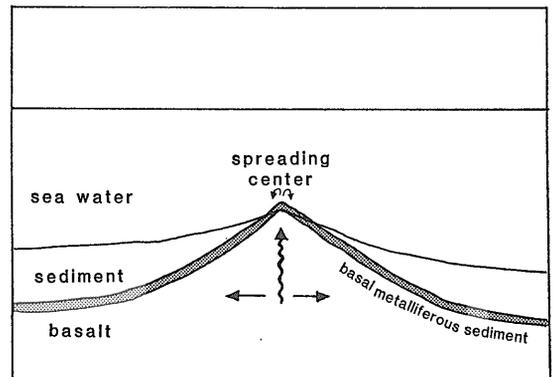
海盆底の重金属堆積物

同様の堆積物は ラウ海盆 (Bertine 1974) やパウエルディープ (Sayles・Bischoff 1973) のような大洋中にある海盆底からも報告されている。しかし海盆底の鉄やマンガンに富む堆積物の場合 火山活動に直接伴うものとしてではなく ラウ海盆の場合であれば先に述べた様に近接島弧に由来する火山性物質を含め海盆底に露出するソレライト質玄武岩の風化 および海水・間隙水からの沈積等の複合した形成過程が考えられている (Bertine 1974) パウエルディープの場合には隣接する東太平洋海膨上で形成された細粒含金属物質が海膨斜面を流下して海盆底に沈積したという説 (Dymond et al. 1973) もある。

基底重金属堆積物 (basal metalliferous sediment)

海盆底で見られる前述の鉄・マンガンに富む堆積物は海盆底堆積層の最上位にあり海底に露出して存在するがグローマータレンジャー号 (Glomar Challenger) による深海掘削が開始されてからは深海底堆積物の最下位付近にも同様の堆積物の存在することが明らかにされた。この堆積物は特に基底重金属堆積物 (basal metalliferous sediment) と呼ばれ インド洋西部 (DSDP Site 236 238 など Cronan et al. 1974) フィリピン海 (DSDP Site 291 294 など Bonatti et al. 1979) 太平洋

東部 (DSDP Site 37 38 39 77B 80 81 159 160 162 319 など von del Volch・Rex 1970; Bloch 1981; Cronan et al. 1972; Dymond et al. 1977) にその例が知られている (第6図および第8図)。基底重金属堆積物は前述の中央海嶺系で形成された鉄・マンガンに富む重金属堆積物がプレートの拡大に伴って現位置まで運ばれその過程で上位に後の堆積物が堆積したものと考えられている (例えば Cronan et al. 1972; Bonatti 1975) (第9図)。このような基底重金属堆積物が断層運動等の構造運動で上昇し被覆堆積物が浸食されることにより海底面に露出したとされている場合がある。これは東太平洋のDOM-



第9図 基底重金属堆積物の形成・移動概念図 (Bonatti 1975).

ES (Deep Ocean Mining Environmental Study) Site C で知られており (Bischoff et al. 1979) 海底表面に露出している重金属堆積物の微化石年代は中新世前期である。

また 基底重金属堆積物の形成・移動プロセスからすれば このような堆積物がプレートの移動に伴って 海溝域に到達することが当然考えられる。最近 Yuasa・Yokota(1982) は このようなものの例として小笠原海溝側海溝斜面の断層崖から マンガン酸化物を報告している。

以上の様に各地で重金属元素に富む堆積物が多数発見されていったが これらは主として酸化物であり 硫化物を伴う場合でもその量は少なく 硫化物鉱床と呼べる程度の規模をもつものは紅海の重金属泥のみであった。

(なお 引用文献については 次号掲載分についても一括して載せてある)

引用文献

- Anderson, R.N. (1975) Heat flow in the Mariana marginal basin. *J. Geophys. Res.*, 80, 4043-4048.
- Ballard, R.D. and Francheteau, J. (1982) The relationship between active sulfide deposition and the axial processes of the mid ocean ridge. *Marine Technol. Soc. Jour.* 16, no.3, 8-22.
- Bertine, K.K. (1974) Origin of Lau Basin Rise sediment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 629-640.
- Bischoff, J.L. (1969) Red Sea geothermal brine deposits; their mineralogy, chemistry and genesis. in *Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea* (Degens, E.T. and Ross, D.A. eds.), Springer-Verlag, 368-401.
- , et al. (1979) Nature and origin of metalliferous sediment in DOMES site C, Pacific manganese nodule province. *Colloq. Internat. Centr. Nation. Reche. Sci.*, no.289, 119-137.
- Bloch, S. (1981) Antipathetic magnesium-manganese relationship in basal metalliferous sediments. *Chem. Geol.* 33, 101-113.
- Bonatti, E. (1975) Metallogenesis at oceanic spreading centers. *Ann. Rev. Earth planet. Sci.*, 3, 401-431.
- and Joensuu, O. (1966) Deep-sea iron deposit from the South Pacific. *Science*, 154, 643-645.
- , et al. (1972a) Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. in *Ferromanganese deposits on the ocean floor* (Horn, D.H. ed.), 149-166.
- , et al. (1972b) Submarine iron deposits from the Mediterranean Sea. in *The Mediterranean Sea* (Stanley, D.J. ed), Dowden, Hutchinson and Ross, 701-710.
- , et al. (1976a) Metalliferous deposits from the Apennine ophiolite: Mesozoic equivalents of modern deposits from oceanic spreading centers. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, 83-94.
- , et al. (1976b) Copper iron sulfide mineralizations from the equatorial Mid-Atlantic Ridge. *Econ. Geol.*, 71, 1515-1525.
- , et al. (1976c) Hydrothermal pyrite concretions from the Romanche Trench (equatorial Atlantic): metallogenesis in oceanic fracture zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 32, 1-10.
- , et al. (1979) Metallogenesis in marginal basins: Fe-rich basal deposits from the Philippine Sea. *Marine Geol.*, 32, 21-37.
- Boström, K. (1973) The origin and fate of ferromanganese active ridge sediments. *Stockholm Contr. Geol.*, 27, 149-243.
- and Peterson, M.N.A. (1966) Precipitates from hydrothermal exhalations of the East Pacific Rise. *Econ. Geol.*, 61, 1258-1265.
- Chung, Y. and Craig, H. (1972) Excess-radon and temperature profiles from the eastern equatorial Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.* 14, 55-64.
- Converse, D.R., et al. (1982) Hydrothermal flow rates at 21°N. *EOS*, 63, no.18, 472.
- Corliss, J.B., et al. (1978) The chemistry of hydrothermal mounds near the Galapagos Rift. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 40, 12-24.
- , et al. (1979) Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science*, 203, 1073-1083.
- Craig, H. et al. (1975) Excess He in deep water on the East Pacific Rise. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26, 125-132.
- Cronan, D.S. (1976) Implications of metal dispersion from hydrothermal systems for mineral exploration on mid-ocean ridges and in island arcs. *Nature*, 262, 567-569.
- (1980) *Underwater minerals*. Academic Press, 362p.
- , et al. (1972) Iron-rich basal sediments from the eastern equatorial Pacific: Leg 16, Deep Sea Drilling Project. *Science*, 175, 61-63.
- , et al. (1974) Sediments from the Gulf of Aden and western Indian Ocean. *Init. Repts. DSDP*, 24, 1047-1110.
- , et al. (1982) A submarine hydrothermal manganese deposit from the south-west Pacific island arc. *Nature*, 298, 456-458.
- Degens, E.T. and Ross, D.A. eds. (1969) *Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea*. Springer-Verlag, 600p.
- Duane, D.B. (1982) Elements of a proposed five-year research program on polymetallic sulfides. *Marine Technol. Soc. Jour.*, 16, no.3, 87-91.
- Dymond, J., et al. (1973) Origin of metalliferous sediments from the Pacific Ocean. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, 3355-3372.

- , et al. (1977) History of metalliferous sedimentation at Deep Sea Drilling Site 319, in the south eastern Pacific. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, 741-753.
- Ferguson, J. and Lambert, I.B. (1972) Volcanic exhalations and metal enrichments at Matupi Harbor, New Britain, T.P.N.G. *Econ. Geol.*, 67, 25-37.
- Fox, P.J., et al. (1973) The geology of the oceanic crust: compressional wave velocities of oceanic rocks. *J. Geophys. Res.*, 78, 5155-5172.
- Francheteau, F., et al. (1979) Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, 277, 523-528.
- , et al. (1980) *naissance d'un ocean (birth of an ocean)*. Centr. Nation. pour l'Exploit. Oceans, 86p.
- Frazer, J.Z. and Fisk, M. B. (1980) Geological factors related to characteristics of seafloor manganese nodule deposits. *SIO BuMines, OFR 142-80*, 41p.
- 藤岡換太郎 (印刷中) 黒鉱鉱床はどこで形成されたか。鉱山地質特別号, no. 11.
- Gundlach, H. and Marchig, V. (1982) Ocean floor "metalliferous sediments" two possibilities for genesis. in *Ore genesis -The state of the act* (Amstutz, G. C. et al. eds.), 200-210.
- Haymon, R.M. and Kastner, M. (1981) Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21°N: preliminary description of mineralogy and genesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53, 363-381,
- Hekinian, R. (1982) *Petrology of the ocean floor*. Elsevier, 393p.
- , et al. (1981) Sulfide deposits: East Pacific Rise near 13°N. *EOS*, 62, no. 45, 913.
- Hoffert, M., et al (1978) Hydrothermal deposits sampled by diving saucer in Transform fault "A" near 37°N on the Mid-Atlantic Ridge, Famous area. *Oceanol. Acta*, 1, 73-86.
- Honnorez, J., et al. (1973) Present day formation of an exhalative sulfide deposit at Vulcano (Thyrrhenian Sea), Part II: active crystallization of fumarolic sulfides in the volcanic sediments of the Baia di Levante. in *Ores in sediments* (Amstutz, G.C and Bernard, A.J. eds.), Springer-Verlag, 139-166.
- 堀部純男 (1982) マリアナトラフの熱水。海洋の動的構造 ニュースレター, no. 6, 3-5.
- Horibe, Y., et al. (1982) Deep ocean hydrothermal vents in Mariana Trough. *Post-program abstracts, Fifth Intern. Conf. Geochronol. Cosmochronol. Isotope Geol.*, 154.
- 堀越観 (1971). 紅海の底——重金属に富む堆積物。科学, 41, 617-625.
- Hussong, D.M. and Uyeda, S. et al. (1981) *Init. Repts. DSDP*, 60: Washington (U. S. Govt. Printing Office), i-xxvi, 929p.
- Klinkhammer, G., et al. (1977) Hydrothermal manganese in the Galapagos Rift. *Nature*, 269, 319-320.
- Klitgord, K.D. and Mudie, D. (1974) The Galapagos spreading center: a near-bottom geophysical survey. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 38, 563-586.
- 小林和男 (1980) 深海底で何が起っているか。ブルーバックス B-438, 講談社, 232P.
- Larson, R.L., et al. (1968) Gulf of California: a result of ocean-floor spreading and transform faulting. *Science*, 161, 781-784.
- Leinen, M. and Anderson, R.N. (1981) Hydrothermal sediment from the Mariana Trough. *EOS*, 62, no. 45, 914.
- Lister, C.R.B. (1972) On the thermal balance of a mid-ocean ridge. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 26, 515-535.
- Lonsdale, P. (1977) Structural geomorphology of fast-spreading rise crest: the East Pacific Rise near 3° 25' S. *Marine Geophys. Res.*, 3, 251-293.
- , et al. (1980a) A high-temperature hydrothermal deposit on the seabed at Gulf of California spreading center. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 49, 8-20.
- , et al. (1980b) Nodules of hydrothermal birnessite in the caldera of a young seamount. *Jour. Geol.*, 88, 611-618.
- , et al. (1982) Metallogenesis at seamounts on the East Pacific Rise. *Marine Technol. Soc. Jour.*, 16, no. 3, 54-61.
- Macdonald, K.C. and Mudie, J.D. (1974) Microearthquakes on the Galapagos spreading center and the seismicity of fast spreading ridges. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 36, 245-257.
- マクドナルド, K. C. ・ルーウェンダイク, B. P. (1980) 東太平洋海膨の熱水噴出。サイエンス, 10, no. 7, 78-94 (中村保夫・藤岡換太郎訳), 日経新聞社.
- Malahoff, A. (1982) A comparison of the massive submarine polymetallic sulfides of the Galapagos Rift with some continental deposits. *Marine Technol. Soc. Jour.* 16, no. 3, 39-45.
- , et al. (1982) Geology and chemistry of hydrothermal deposits from active submarine volcano Loihi, Hawaii. *Nature*, 298, 234-239.
- Marchig, V., et al. (1982) Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. *Marine Geol.*, 50, 241-256.
- McGregor, B.A., et al. (1977) Magnetic anomaly patterns on Mid-Atlantic Ridge crest at 26°N. *J. Geophys. Res.*, 82, 231-238.
- Miller, A.R., et al. (1966) Hot brines and recent iron deposits in deeps of the Red Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 30, 341-359.
- Murray, J. and Renard, A.F. (1891) Report on deep sea deposits based on specimens collected during

- the voyage of the H. M. S. Challenger in the years 1872 to 1876. in *Report of the scientific results of the voyage of H. M. S. Challenger during the years 1873-76* (Thompson, C. W. and Murray, J. eds.), 292-320.
- Normark, W. R., et al. (1981) Hydrothermal vents and sulfide deposits on the southern Juan de Fuca Ridge. *EOS*, 62, no. 45, 913.
- , et al. (1982) Polymetallic sulfide deposits and water-column of active hydrothermal vents on the southern Juan de Fuca Ridge. *Marine Technol. Soc. Jour.*, 16, no. 3, 46-53.
- Puchelt, H. (1973) Recent iron sediment formation at the Kameni Islands, Santorini (Greece). in *Ores in sediments* (Amstutz, G. C. and Bernard, A. J. eds.), Springer-Verlag, 227-245.
- Revelle, R. (1944)* Marine bottom samples collected in the Pacific Ocean by the Carnegie on its seventh cruise. *Carnegie Inst. Washington Pub.* 556, part 1, 1-180.
- RISE project group (Spiess, F. N. et al.) (1980) East Pacific Rise: hot springs and geophysical experiments. *Science*, 207, 1421-1433.
- Rona, P. A. (1976) Pattern of hydrothermal mineral deposition: Mid-Atlantic Ridge crest at latitude 26°N. *Marine Geol.*, 21, M59-M66.
- (1978) Magnetic signatures of hydrothermal alteration and volcanogenic mineral deposits in oceanic crust. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 3, 219-225.
- (1980) TAG Hydrothermal Field: Mid-Atlantic Ridge crest at latitude 26°N. *J. Geol. Soc. London*, 137, 385-402.
- (1982) Polymetallic sulfides at seafloor spreading center: a global overview. *Marine Technol. Soc. Jour.*, 16, no. 3, 81-86.
- , et al. (1975) Anomalous water temperatures over Mid-Atlantic Ridge crest at 26° North latitude. *Deep Sea Res.*, 22, 611-618.
- , et al. (1976) Tectonic fabric and hydrothermal activity of Mid-Atlantic Ridge crest (lat 26°N). *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, 661-674.
- and Lowell, R. P. (1980) Editors' comments on papers 5 through 31. in *Seafloor spreading centers hydrothermal systems* (Rona, P. A. and Lowell, R. P. eds.), Dowden, Hutchinson and Ross, 84-91.
- Ross, D. A. and Degens, E. T. (1969) Shipboard collection and preservation of sediment samples collected during Chain 61 from the Red Sea. in *Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea* (Degens, E. T. and Ross, D. A. eds.) Springer-Verlag, 363-367.
- 佐藤壮郎・兼平慶一郎 (1974) 世界の層状硫化鉄床 (その1) 黒鉄鉄床 キースラーガーと現世の“海底鉄床”. *地質ニュース*, no. 240, 27-37.
- Sayles, F. L. and Bischoff, J. L. (1973) Ferromanganese sediments in the equatorial east Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 330-336.
- Scott, M. R., et al. (1974) Rapidly accumulating manganese from the median valley of the Mid-Atlantic Ridge. *Geophys. Res. Lett.*, 1, 355-358.
- 鹿園直建 (1974) 重金属元素に富む沈積物を伴う現在の熱水系——特にその化学組成, 同位体組成と起源——(I). *鉱山地質*, 24, 367-376.
- Simoneit, B. R. and Lonsdale, P. F. (1982) Hydrothermal petroleum in mineralized mounds at the seabed of Guaymas Basin. *Nature*, 295, 198-202.
- Skornyakova, I. S. (1965) Dispersed iron and manganese in Pacific Ocean sediments. *Intern. Geol. Rev.*, 7, 2161-2174.
- Sykes, L. R. (1971) Earthquake swarms and sea floor spreading. *J. Geophys. Res.*, 75, 6598-6611.
- 玉木賢策ほか (1981) 小笠原弧の第四紀背弧拡大活動の可能性について. *月刊地球*, 3, 421-431.
- 上田誠也 (1980) 灼熱の海底——1980年代の地球科学に向けて——. *自然*, 35, no. 5, 36-45.
- Valette, J. N. (1973) Distribution of certain trace elements in marine sediments surrounding Vulcano Island (Italy). in *Ores in sediments* (Amstutz, G. C. and Bernard, A. J. eds.), Springer-Verlag, 321-337.
- Vidal, V. M. V., et al. (1978) Coastal submarine hydrothermal activity off northern Baja California. *J. Geophys. Res.*, 83, 1757-1774.
- von del Borch, C. C. and Rex, R. W. (1970) Amorphous iron oxide precipitates in sediments cored during Leg 5, Deep Sea Drilling Project. *Init. Repts. DSDP*, 5, 541-544.
- Weiss, R. F., et al. (1977) Hydrothermal plumes in Galapagos Rift. *Nature*, 267, 600-603.
- Williams, D. L., et al. (1979) The hydrothermal mounds of the Galapagos Rift: observations with DSRV Alvin and detailed heat flow studies. *J. Geophys. Res.*, 84, 7467-7484.
- Yuasa, M. and Yokota, S. (1982) Hydrothermal manganese and ferromanganese concretions from seafloor of the Iosawara Arc-Trench region, north-western Pacific. *CCOP Tech. Bull.*, 15, 51-64.
- Zelenov, K. K. (1965) Iron and manganese in exhalations of the submarine Banu Wuhu volcano (Indonesia). *Dokl. Acad. Nauk. SSSR*, 155, 94-96.

* この文献には直接目を通すことはできなかった。