

海底マンガン鉱床の研究—その現状と展望

白井 朗¹⁾

1. はじめに

マンガン酸化物は海洋底堆積物に広く含まれる物質の一つであり、様々な形態・産状でごく一般的に認められるものである。その濃集体は海底面に横たわるマンガン団塊、岩盤を覆うマンガンクラストとしてよく知られている。マンガン団塊は1872-1876年に発見、記載されて(英国チャレンジャー号航海)以来長い間地球科学的興味の対象であったが、1960年代になり将来の銅・ニッケル等の資源として有望であることが指摘されて(Mero, 1965)から急激に調査研究と探査活動が活発になった。調査研究の主な動機は、政治・経済情勢の変化に伴う大きな金属価格の変動と陸上資源の枯渇への危機感であった。またこの時期は海洋地球科学の分野におけるプレートテクトニクス理論の黎明期にあたり、深海掘削計画等様々な海洋地質調査によって海洋底の実態が飛躍的に明らかになった時期でもある。1970年代にはマンガン団塊の調査を目的とした大規模な調査航海が欧米先進諸国を中心に実施された。また1980年代前半にはコバルト価格の高騰がきっかけとなって、米・独によるコバルトリッチマンガンクラストの基礎的研究が開始された。

主に先進諸国による過去約30年間の研究活動の結果、「団塊・クラストとは如何なるものか?」、「どの辺りに多いのか?」といった基本的な問題の概略は既にわかってきた。しかし、局地的偏在性の要因、成長の詳しいメカニズム、海洋の物質循環のなかでの起源、海底近傍における堆積作用・生物活動との相互作用、地球史における鉱床生成等に関しては、実は多くの未解明の課題が残されているのである。それらの研究を通じて、次世代の商業探査活動、採掘技術開発、海洋環境への影響評価等にも活用できる地球科学的知識を蓄積していくことは研究

に携わるのものの責務であろう。

本稿では海底マンガン鉱床に関する現在の我々の地球科学的知識を概観し、今後の研究面での課題を指摘したい。海洋地質学、地球化学、鉱床学、鉱物学的分野における研究、および探査事業・技術開発の参考ともなれば幸いである。

2. 金属資源としての側面

始めに海底マンガン鉱床(ここでは、海洋のマンガン酸化物濃集体を総称する)の資源的側面に触れておく。1970年に始まった第三次国連海洋法会議では、「海底資源は人類共同の遺産」との認識の下、陸上資源生産国と先進諸国の利害調整を目的として国連の管轄下でマンガン団塊を中心とした海底鉱物資源の開発を行うことが提唱された。当時は調査データも不十分だったため「海洋は無尽蔵の宝の山」との認識も強く、国際的利害対立が過熱していたが、その後の調査によって金属資源の分布実態が次第に明らかになるにつれて、各国とも冷静に現実的に対応できるようになった。同時に、1980年代以降の世界的な金属価格の低迷・安定に伴う海洋金属資源の商業的価値の相対的低下(Hillman and Gosling, 1985; 米国 MIT 内部資料, 1985)および主要国の団塊鉱区登録などを機に、先進国の探査活動・研究活動のペースは全体に低下し始めた。しかしながら国連海洋法条約が昨年(1994年11月)発効となり、先進国と途上国との歩み寄りによって現実の商業生産に一步近づくとする状況もある。

このような不確定な状況の中では海底鉱物資源の経済的評価は難しいとはいえ、海洋のマンガン団塊・クラストに含まれるCu, Ni, Coが陸上鉱床の総埋蔵量に匹敵する、又はそれを上回る、膨大な量の将来資源であるとの認識は現在でも変わりはない

1) 地質調査所 海洋地質部

キーワード: マンガン団塊, マンガンクラスト, 海底鉱物資源, 白嶺丸

第1表 海底鉱物資源の将来予測の一例。
貴金属のほか、重金属についても高い枯渇度が予想される。Broadus(1987)から抜粋。

海底資源 の種類	対象	推定埋蔵量			陸上資源の 陸上資源枯渇度	
		海底 (報告値)	陸上	海底/陸上	余命	2030年の予想
		A (千トン)	B (千トン)	A/B (%)	B/年間産出 (年)	(対需要不足分) (%)
炭化水素	原油	>61429000	181,857,000	34	65	185
	天然ガス	>60000000	228,214,000	26	176	45
砂/砂利	砂/砂利	665,778,000	莫大	小	長期	-
硫黄	硫黄	27,125	5,000,000	<1	93	120
燐灰土	燐酸塩	7,939,000	129,500,000	6	814	12
漂砂鉱床	Sn	2,500	34,500	7	172	105
	Ti	13,060	181,440	7	510	-
	Zr	29,040	54,432	53	77	40
	Au	<1	72	<1	72	443
	Ag	-	743	-	62	295
	団塊	Pt	2-3	99	2-3	446
/クラスト	Co	6,000-24,000	10,886	55-220	340	-
	Ni	35,000-131,000	129,730	27-101	174	77
	Mn	706,000-2,600,000	10,866,400	6-24	465	17
	Cu	29,000-108,000	1,600,000	2-7	205	86

(Archer, 1985). 事実、近年団塊鉱区登録を目指してきた、韓国、インド、中国等の調査活動は依然として活発である。21世紀には海底鉱物資源に対する商業的関心が徐々にしかし確実に高まることは間違いない(第1表: Broadus, 1987)。

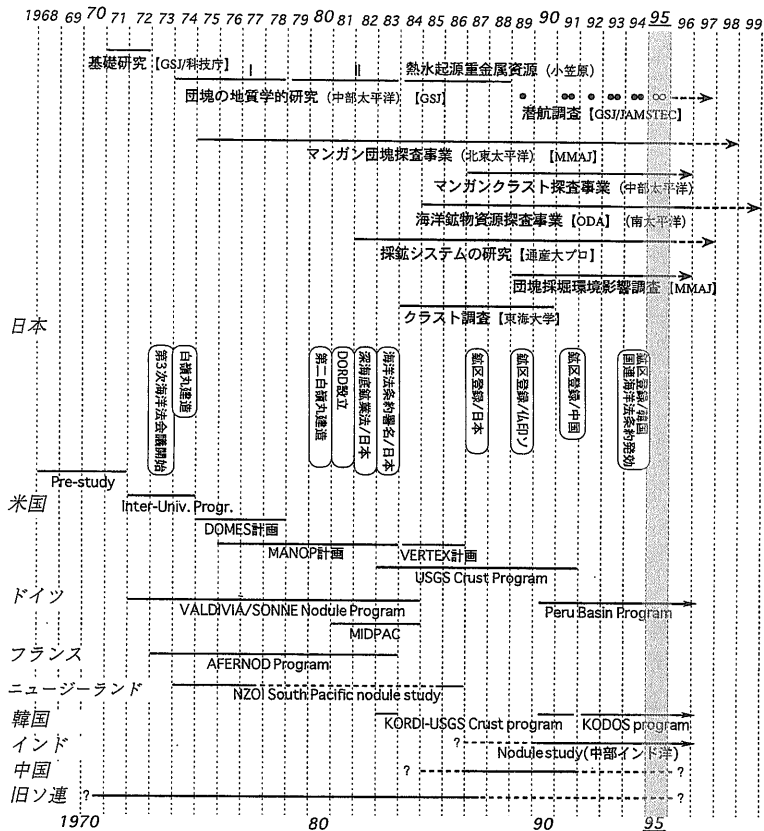
海洋鉱物資源に関する概要解説(堀部ほか, 1984; 大町ほか, 1987; 南部, 1988; 青木, 1990; 中尾, 1993), 資源経済学の問題(Siapno, 1986; 志賀・納, 1992; 西山, 1993; 志賀, 1994), わが国の対応(資源エネルギー庁, 1993), 海洋法条約の経緯, 問題点(志賀, 1994)等については他の文献や書籍に述べられているので参照されたい。

3. 研究の経緯

欧米先進国における学術的研究は、国策としての探査活動を追う形で実施され、1960年代~1970年代には特に米国で大きなプロジェクトが実施された。例えば Inter-University Program (1972-1973), DOMES(深海底採掘環境調査計画; 1975-1977), MANOP(マンガングル床調査計画1977-1983)では、深海底マンガングル床を取り巻く、海洋地質学、海洋化学、海洋物理学、海洋生物学、海洋工学の多岐にわたる総合調査を実施している。しかし米国では1980年代半ばに関連する計画は急激に縮小され、ドイツ・フランスも遅れて同様の経過をたどっている(第1図)。

これらの成果は大縮尺の団塊分布図、組成図、市販公開データベース(NOAA 米国海洋大気局・地球物理データセンター, 1992), 多数の科学論文として発表されている。しかし国家・企業機密とされている生データは公開された研究データよりはるかに多いはずである。但し最近では、各国間で過去の調査データを公開し、共有しようとする動きがあり、例えば米国企業を中心とした OMCO グループの北東太平洋のデータ(Morgan et al., 1993), 同韓国鉱区(Moon et al., 1994), 同ロシア鉱区(Skorniyakova et al., 1990; Skorniyakova and Murdmaa, 1992), 中部インド洋のインド鉱区(Valsangkar et al., 1992; Nath et al., 1992)などの調査結果が学術誌などに次々に公表され始めている。

一方、我が国では米・独・仏に若干遅れて、1970年代前半に地質調査所を中心とした基礎的な調査・研究(1971-1983)が、また同後半には金属鉱業事業団(MMAJ)による探査活動(1975年以降)が開始された。中部及び東部太平洋において、両者は各々基礎科学調査と探査活動を担当し、互いに補完しつつ調査・研究を実施してきた(第2図)。前者の研究成果は地質調査所出版物(クルーズレポート、海洋地質図、学術論文)等として発表されている。しかし現在では、残念ながら国内の大学、研究機関による海底マンガングル床に関する実質的なプロジェクト研究は行われていない。海洋地球科学分野の研究の発展には最新の調査機器を用いたフィールド調

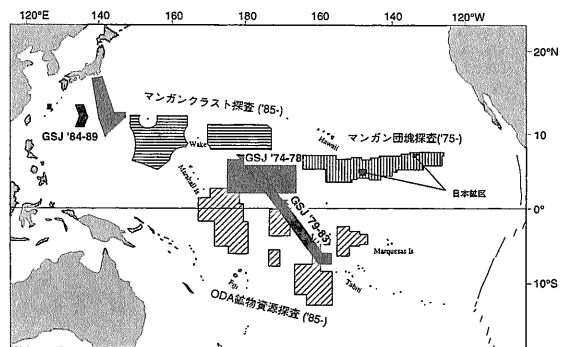


第1図 我が国及び諸外国におけるマンガン団塊・マンガンクラストの研究の歴史。現在は、米国，ドイツ，韓国及び我が国で調査が活発である。

査によって得られるデータが不可欠であることを考えると、探査事業と並行して海洋地質、海洋化学、海洋物理、海洋生物を含めた総合的地球科学的研究を継続的に実施していくことが重要である。海底マンガン鉍床のダイナミックな実態が理解できてこそ、開発への展望が開けるものと確信する。

4. 従来の研究成果の概要

さて、ここでは現在の海洋に分布するマンガン団塊・マンガンクラストを中心に過去約30年の内外の研究面での成果を要約してみたい。その組成・形態・組織等の記載的研究、分布・産状、地形・地質との関係等フィールドデータに基づく研究、沈殿・濃集の過程・条件等成長メカニズムの研究、不均質性・偏在性の規制要因に関する研究等に関して、現在の知識を整理する。



第2図 我が国によるマンガン団塊・クラストの調査・探査海域。全て白横丸(黒)、第二白横丸(ハッチ)による調査である。

4.1 分布・産状

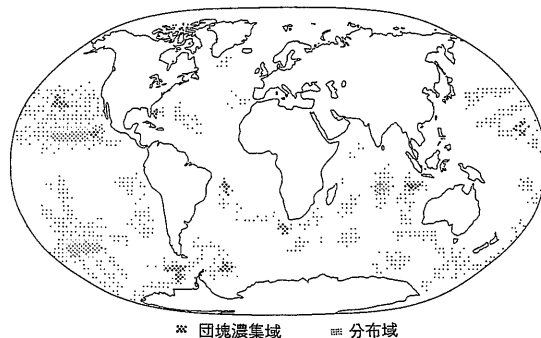
一般にマンガン団塊・クラストの産状は調査船からの試料採取又は曳航式テレビ・カメラによって観察される。分布量は一定面積の表層堆積物試料から得られた団塊の湿重量(=濃集率 kg/m²)、または

画像から解析された面積占有率(=海底被覆率%)で表わされる。過去の調査航海のデータの集積から、世界の海洋底に分布する団塊・クラストの広域的分布の特徴はおおむねわかってきた。公表されたデータに基づく世界分布図(Rawsaon and Ryan, 1978; Piper et al., 1985)によると、太平洋では北東赤道太平洋(Mn Nodule Belt と呼ばれる)、中央太平洋海盆北部、南太平洋タヒチ西方の深海盆、南東太平洋ペルー海盆に広い高濃集域がある。インド洋中部、南アフリカ南方にも濃集域が認められ、南極大陸の周辺の深海盆にも中規模ながら濃集域が確認されている(第3図)。

一般にマンガングル酸化物は、以下の2つの条件が地質学的に長い期間保持された海底で形成される：1)堆積物の供給が少ないか又は無堆積(おおむね堆積速度5 m/m.y. 以下)、及び2)溶存酸素に富む底層水の供給。従って大陸縁辺や海洋島の斜面、生物高生産帯、プレート境界などの火山活動域、地形的に閉鎖された縁辺海などには極めて少ない。深海掘削などによって、世界の海洋底の構造発達史、堆積史の概略が明らかになった現在、マンガングル・クラストの広域的な分布もそれらに関連づけて解釈されるようになった。特に南極底層水の深海盆への供給はマンガングル酸化物の分布を強く支配しており、例えば新生代におけるインド洋・太平洋に向かう北向きの底層流の流路と団塊の濃集地帯との間には対応関係が認められている(Kennet and Watkins, 1975)。また南極海から太平洋への水路となる海域には40~50 kg/m²に及ぶ団塊濃集域が広がり、毎秒10 cmに及ぶ強い底層流が定常的に流れている(Lonsdale, 1980)。また日本南方、西七島海嶺の天保海山には中新世の岩石が広く露出しており、その団塊・クラスト濃集域では毎秒40 cm以上の底層流が観測されている(Usui et al., 1994)。

しかしこれら地質時代の産物と現在の地形や底層流とが必ずしも対応するわけではなく、堆積環境の時間的変化を考慮しなくてはならない。堆積環境の時間変化は海底堆積物の諸性質に残されているので、周囲の堆積物の層序は団塊・クラストの成長を議論する上で最も重要である。

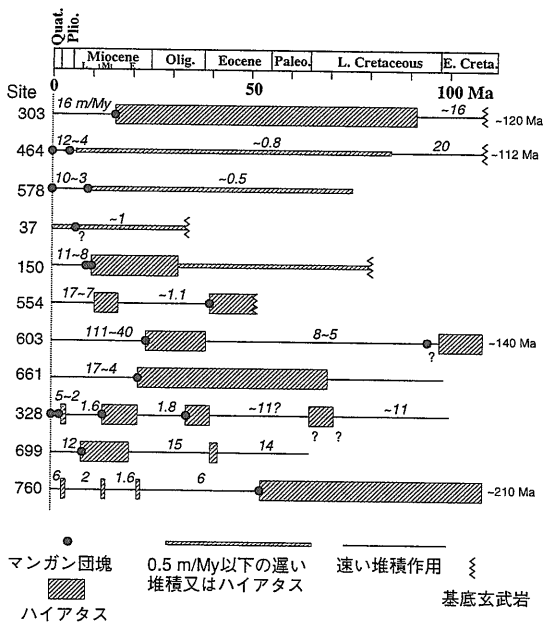
例えば地質調査所が実施した中央太平洋海盆における音波探査プロファイルと深海掘削の対比に基づくと、白亜紀の基盤の上に古第三紀以降の遠洋性堆



第3図 世界の海洋底におけるマンガングル濃集域(Cronan, 1980)。

積物が広く分布し、その上部には新第三紀～第四紀の堆積物が大きな広域的・局地的層厚変化を伴って分布する(Tamaki and Tanahashi, 1981; Furukawa et al., 1992; Nishimura, 1992)。この地域のマンガングル・クラストの形成は、おおむね中新世から鮮新世に始まり、深層流に起因した遅い堆積速度又はハイアタスに伴って成長を続け現在に至っている(Nishimura, 1992; Usui and Moritani, 1992)。この時期に堆積速度が早かった地域ではマンガングル・クラストの形成が阻害され、結果として海域内で堆積層厚と団塊分布量との間に逆の関係が認められる。太平洋の他の海域でも類似の関係が様々な距離スケールで認められている(Calvert et al., 1978)。

団塊又はクラストの形成環境は古い時代の世界の大洋底でも同様である。深海掘削コア中に見られるマンガングル・クラストと堆積環境の関係を総括した結果によると(Usui and Ito, 1994)、マンガングル酸化物の形成は少なくとも始新世前期(又は白亜紀後期)にはすでに存在し、現在と同様な海底環境の下でハイアタスに伴って団塊の形成が起こっていたことがわかる(第4図)。しかし、団塊が形成を開始した海底で、長期にわたって形成に適した環境が持続するとは限らず、プレートの移動、大陸の配置、火山活動、生物高生産帯との位置関係、海水準変動などにより形成環境は変化する。ある時期に堆積速度が増加するとそれ以降の堆積物によって団塊・クラストが埋没してしまう(Usui et al., 1993; Usui and Ito, 1994)。海底の団塊・クラストの広域的分布概要が明らかになった現在、次の課題はその時間的・空間的偏在性の規制要因を海洋環境変遷史のなかで把握することである。

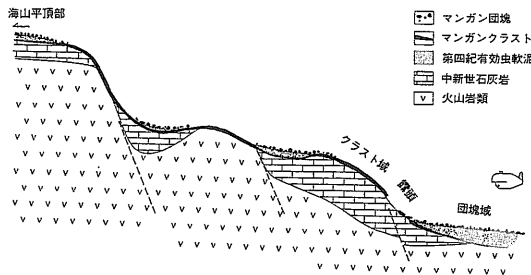


第4図 深海掘削コア中に埋没したマンガン酸化物と堆積物層序との関係。長いハイアタスまたは遅い堆積速度と団塊の産出の関連が明らかである。

さて、これら数1000~100 km オーダーの広域的变化に加えて、1 km 又はそれ以下の局地的な分布・産状変化もしばしば認められ、大規模な濃集帯の中での小さいスケールの分布量・組成の変化も一般的である(Usui et al., 1987; von Stackelberg and Marchig, 1987)。局地的変化の実態を把握することは、海底におけるマンガン酸化物の形成環境、成長史の解明に不可欠であるだけでなく、鉱床の経済評価の上でも貴重な知見となるだろう。しかしながら現在、公表されたデータは極めて少ない。船上からの密なサンプリング、テレビカメラによる観察、又は潜水調査船によるマッピング(第5図)などによって、底質・微地形・地質と団塊・クラストの産状・形態・濃集率の変化との密接な関係が認められた例もあるが、局地的変化の実態とそれを規制する地質学的要因に関する研究は緒についたばかりといえてよい。

4.2 構成物質・構造・組成

マンガン団塊・クラストはマンガン(及び鉄)を主成分とした化学堆積岩である。構成するマンガン鉱物は低結晶質の含水マンガン(又は鉄・マンガン)酸化物である。各鉱物の単結晶サイズは0.01~0.001 μm のオーダー(コロイドの範囲)であり、光学顕微



第5図 潜水調査船「しんかい2000」による海底マッピングの例(日本南方海域の天保海山、水深1000~1500 m)。白井 朗(第556, 625潜航)及び西村 昭(第557潜航)の調査結果に基づく。

鏡や低倍率の走査型電子顕微鏡では一般に観察できない。鉱物の集合体は肉眼及び顕微鏡スケールの層状、葉理状、柱状、樹枝状、塊状など様々な微細構造を呈し、その間隙は海水、碎屑物等で充填されている。全体としては空隙が多く、30~40%の空隙率を持つ。また成長の過程で様々なサイズの沈降粒子(碎屑物)、表層堆積物、岩片、生物遺骸、宇宙塵などを取り込み、一般に複雑な組織を示す。肉眼又は光学顕微鏡下では微細成長構造、構成成分の変化に起因する様々なオーダーの縞状構造を示すことが多い。

多くの場合、火山岩、堆積岩、稀に化石などが団塊の核又はクラストの基盤となっている。見かけの形状は核又は基盤の形態を反映することが多く、核が相対的に小さい団塊は球形に近い。表面は黒色から茶褐色であり、表面構造は微細成長構造の違いを反映して平滑なものから粗いものまで様々である。内部にもしばしば同等の成長構造が観察される。

主要な鉄・マンガン鉱物は vernadite, buserite, todorokite の3種である。結晶化学的記載には問題点が残されているが、基本的には第2表にあるように、vernadite は鉄とマンガンをはほぼ同量含む結晶性の低い鉱物であり、後二者は様々な金属元素を必須副成分として含むマンガン酸塩(manganate)鉱物である。団塊・クラストの一般的な構成鉱物は前二者である。中でも buserite は溶液反応によって容易に合成できるため、その結晶化学的性質はよく調べられている。これはマンガン酸化物の鉱物学的分類の中では層状マンガン酸塩鉱物(phyllomanganate)に属し、10 Å の面間距離を安定化する交換性層間イオン(Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, 2Na⁺)

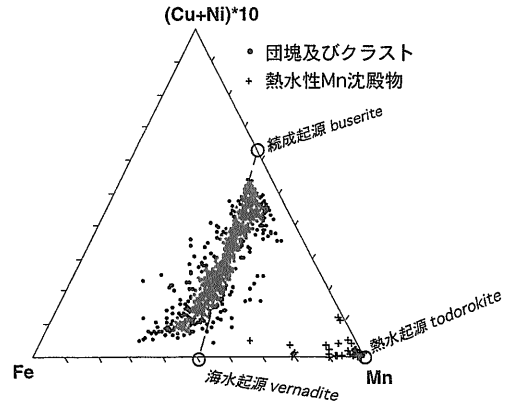
第2表 海底マンガン酸化物の起源別3タイプ. 広域的・局地的変化, 試料中の組成変化の基本となっている.

起源	海水起源	続成起源	熱水起源
	(hydrogenetic)	(diagenetic)	(hydrothermal)
形態	クラスト・団塊	団塊	細脈, 均質層, 疊層など
形成環境	深海盆・海山	深海盆	火山, リフト
鉱物組成	vernadite	buserite	todorokite/buserite
化学組成(主)	Mn及びFe	Mn	Mn
化学組成(副)	Co	Ni, Cu	Mg, Ba, Ca
結晶サイズ	0.01-0.001 μm	0.01-0.001 μm	0.1-100 μm
色	黒	黒	灰黒
光沢	無	無	亜金属

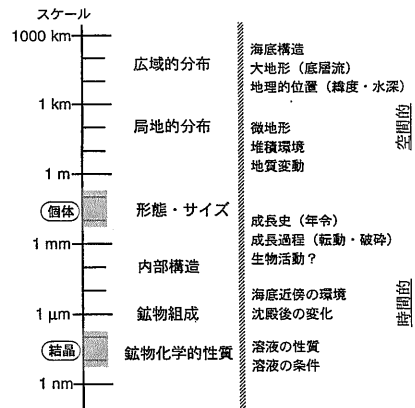
を一定量(Mnに対する原子比で1/6)保持する. 理想化学式は $RO \cdot 6MnO_2 \cdot nH_2O$ (Rは前述; $n=2\sim3$) である. マンガン団塊に最大2~3%の銅+ニッケルが濃集する理由は buserite のイオン交換能であるとする説明が有力である (Usui, 1979; Arrhenius, 1981; Golden et al., 1986). 珪酸塩鉱物のなかではスメクタイトのような粘土鉱物がこれに類似した性質を持っている.

詳しい鉱物学的記載によって, 団塊内部での化学組成変動, 表面構造と化学組成の関係, 化学組成の地域変動の多くが解明されている (Usui et al., 1987; von Stackelberg and Marchig, 1987; Halbach et al., 1988). 例えば第6図に示した海底マンガン鉱床中のCu, Niの大きな変動は第一次的には, 一定の化学組成を持つ上記鉱物の混合物として説明される. これらの鉱物は, 重金属元素を殆ど含まない堆積物粒子, 微化石等によって任意に希釈されている. さらに各鉱物は形成過程, 微細成長構造とも対応することがわかっているが, この点については後に説明する.

マンガン団塊・クラストは別名 polymetallic oxides とも呼ばれ, 多くの元素から構成されることが特徴である. 0.1%を超える元素は20近くある. 他の重要な特徴は化学組成の大きな変動である. 第7図に示したように変動のスケールは数1000 kmに及ぶ広域的变化から試料内部のミクロン以下の変化まで多様である. しかしその変動幅, 元素間の相関関係等の傾向はいずれの場合も同様である. その原因は, 上述した海底マンガン鉱床を構成する鉄マンガン鉱物がほぼ一定の化学組成を持つ3種の鉱物から構成されるからである. 一次的には, 化学組成の変動は, 成因を異にする鉱物の形成が, 時間的



第6図 有用金属元素(Cu, Ni)含有量のMn-Fe依存性. 団塊・クラスト・熱水起源酸化物は特有の領域にプロットされる.



第7図 海底マンガン鉱床(団塊・クラスト)の様々なスケールの偏在性, 不均質性とその規制要因.

・空間的に変化することに起因するといえる. 例をあげると Mn/Fe 比は1以下から10以上まで大きく変化するが, これは単に vernadite(鉄とマンガン)を主成分とし, 時に Co に富む), buserite(マンガン)を主成分とし, Cu, Ni を副成分とする), 及び稀に todorokite(Mn 以外の重金属を殆ど含まない Mn 鉱物)の量比によって変化する. 混合の影響を除いた各鉱物そのものの組成変化を明らかにすることが次の課題であるが, 研究例はまだ少ない. また, 他の注目すべき元素(例えば Fe, Ba, Sr, REE, Ti, Mo, V)がマンガン鉱物, 珪酸塩鉱物あるいはそのほかの碎屑物にどのように分配しているか充分にはわかってはいない. 例えば, 同位体分析値に基づいて年代あるいは起源を論ずる場合などには, いずれの鉱物に含まれているのかという情報は極めて重

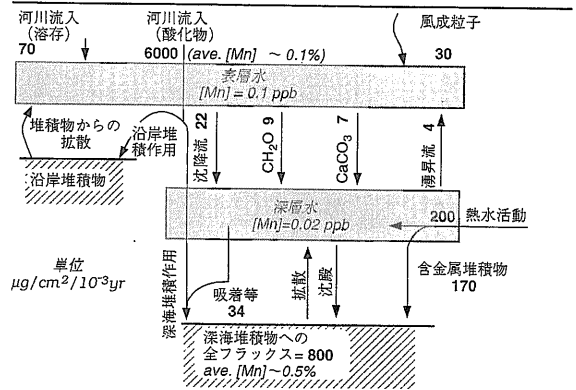
要である。Sr^{87/86}によるクラストの年代測定(Ingram et al., 1990)では一定の酸抽出成分についてのみ可能であった。

4.3 沈殿のプロセス・環境

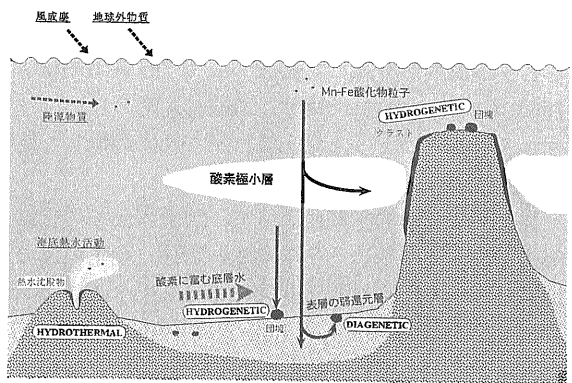
海洋におけるマンガン酸化物形成のメカニズムには様々な局面がある。海洋における物質循環・物質収支の中での団塊・クラストを構成する金属の起源や挙動の問題、海水又は堆積物から重金属類が除去され輸送されるプロセスの問題、銅・ニッケル・コバルト等が選択的に濃集するメカニズムの問題、微細成長組織と海底の物理的・化学的環境との関連の問題、地球規模での海底環境の変遷史における陸上マンガン鉱床との関連の問題等々多くの課題が指摘される。ここではその中で一般的に多くの研究者によって認められている共通の認識と思われるものの概略を述べてみる。

まず金属の起源として挙げられているものは陸源物質、海底の岩石風化、海底火山活動である。Mnについての海洋全体への収支計算などによると陸源物質からの供給が圧倒的に大きい(第8図: Bender et al., 1977)という説と大半が熱水活動起源とする説(Von Damm et al., 1985)がある。いずれにせよ、団塊・クラストへの直前の金属供給源は通常海水であり、火山活動・熱水活動からの直接の寄与は局部的である。海水から堆積物への重金属元素の収支を見てみると、団塊・クラストの成長速度は堆積物の堆積速度に比べ桁違いに小さいことから、マンガン酸化物の海洋における重金属のsinkとしての役割は相対的には極めて小さい(白井, 未公表)。海水から海底への重金属のフラックスのごく一部がマンガン酸化物として固定されているにすぎない。

さて海水中に含まれる重金属は一般に0.1 ppbのオーダー又はそれ以下であり、Mnでは平均0.02 ppb (Chester, 1989)である。その海水中での化学形態はあまりよくわかっていないが、二価イオンの溶存態または酸化物の両形態を取りうると考えられている。海水中の全Mn濃度は沿岸域で高く、また外洋では表層水で高い。陸域から供給された溶存Mnは沿岸域で海水から除去され酸化物として沿岸堆積物中に一時的に沈殿し、引き続き還元的な堆積物表層から再び底層水に放出される、というサイクルを繰り返しながら外洋の表層水中に水平的に移動していく(Hedge et al., 1987)。表層水中のMnは



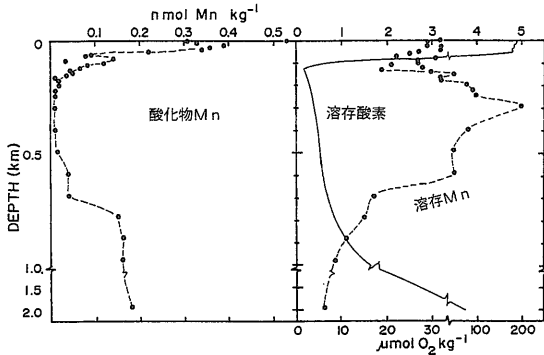
第8図 海洋におけるMnの循環と収支(Bender et al., 1977). このモデルではMnの起源の大半は河川から供給される大陸地殻の風化物質である。



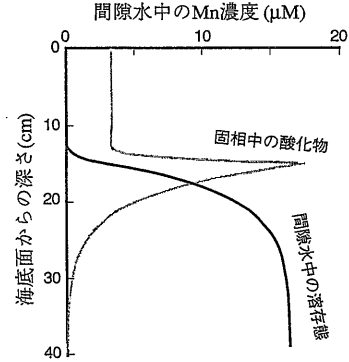
第9図 海底マンガン鉱床の形成過程模式図。

Fe酸化物と共に糞粒や鉱物粒子に伴って効率的に除去され、沈降粒子として海底に達する。平均滞留時間は他の重金属と比べて明らかに短い。

第9図に示すように、Mnが酸化物として団塊・クラストに固定されるまでの経路において、化学的な溶解・再沈殿によって分化・濃集現象が起こり得る二つのステージがある。一つは外洋の水深1000m前後に存在する酸素極小層(oxygen minimum zone)の弱還元的な条件下においてFe, Mn酸化物が溶存態に変化する場合で、その水深近傍では溶存Mn濃度の極大がしばしば観察される(第10図: Johnson et al., 1992)。中部太平洋などの海山の水深800-2000mの露岩域にマンガンクラストが発達する大きな原因とされている(Halbach et al., 1982)。他の一つの分化過程は深海堆積物の表層であり、有機物の分解によって引き起こされる弱還元的な間隙水中でMnの溶解・再沈殿が起き、buseriteを主成



第10図 北東太平洋の溶存酸素と溶存マンガンの垂直プロファイル (Johnson et al, 1992). 水深200 m から1000 m の間に顕著な酸素極小層が認められる。



第11図 マンガンの移動・再沈殿を引き起こす海底堆積物表層における溶存Mn(黒色)と酸化物Mn(灰色)のプロファイル (Burdige, 1993).

分とするマンガン団塊が成長する環境である(第11図)。このプロセスを経ない酸化物粒子は海水中で獲得した組成のまま、団塊・クラストまたは堆積物中にマイクロジュールとして固定される。

第2表にまとめたように団塊・クラストの形成には二つの主要プロセスがある。一つはMnがFeとの分離をせずに直接海水から供給された酸化物が沈積する作用で、これを海水起源(hydrogenetic)と呼んでいる。他方は、弱還元的环境下の表層堆積物におけるMnの溶解・再沈殿による二次的な濃集作用であり、堆積物の初期続成過程の一部ととらえて、続成起源(diagenetic)と呼ばれる。各々のプロセスにおいて特有の化学組成を持つ鉱物(各々 vernadite, buserite)が沈殿し、それぞれの鉱物はさらに特有の微細成長組織を持つ。広大な海洋において、数千万年に及ぶ成長期間の中で、基本的には二種の鉱物種のみが生成していることは注目すべきことである。

さて、一般的な海水起源及び続成起源のマンガン団塊・クラストのほかに、熱水活動に伴って形成される特異な化学・鉱物組成・組織をもつマンガン酸化物(主に todorokite 系鉱物)が、最近報告されるようになった。大西洋中央海嶺系のTAG地域 (Scott et al., 1976)や東太平洋海膨(Corliss et al., 1978)のほか、島弧系の背弧リフト(Moorby et al., 1984)・海底火山(Usui et al., 1989)からも次々と発見されている。また過去の熱水活動の記録として表層堆積物、深海掘削コア、団塊の核などからも認められる(Usui, 1992; Usui et al., 1993)。しかしこれ

ら酸化物は熱水活動域の近傍に限って分布すること、熱水プルーム中の溶存マンガンは速やかに堆積物として除去されること(Klinkhammer et al., 1985; Campbell et al., 1988)などから、通常の団塊・クラストの形成への直接の寄与は小さいと考えられている。

4.4 成長過程

深海底のマンガン団塊・クラストの成長は一般に極めて遅く、その成長速度は微化石(Cowen et al., 1993), Be¹⁰ (Ku, 1979; Segl et al., 1984), Sr^{87/86} (Ingram et al., 1990), Th²³⁰ (Mangini et al., 1990)放射年代等によって求められ、平均して百万年に数mm~数cmである。マンガン団塊の成長速度が直下の深海堆積物の堆積速度(千年に数mm程度)に比べ桁違いに遅いことは、団塊が成長する過程では堆積物に埋没することなく常に堆積物表面に保持されていたことを意味する。この現象は、例えば第四紀堆積物表面に横たわる団塊の核に中新世~白亜紀の化石や堆積岩の礫が存在する事実(Usui et al., 1993)などから明白である。しかし団塊を埋没させずに海底面に保持するメカニズム(uplifting force)については明確な解答は得られていない。浮力、底層流、粒度などによる物理的説明は難しいため、底棲動物の活動に原因が求められている(von Stackelberg, 1984; McCave, 1988)が確証はない。米国MANOP計画における底棲動物の活動モニター(一年弱)でも生物活動と団塊の動きとの関係を示す明確な証拠は得られていない(Gardner et al., 1984)。

いずれにせよ、団塊・クラストは数百万年をかけて海底面近傍において成長するが、その間には物理

的な動きがあったに違いない。団塊の切断面を顕微鏡などで観察すると、成長過程での亀裂の発達、古期団塊の破片化などの記録が内部構造として観察される。またしばしば認められる年輪状の縞模様は一見、同心円状に見えるが、必ずしも全体を連続して取り巻いているわけではない。複数の薄層が半球状にしかも不連続に発達することがある。海水と堆積物の両接触面において異なる鉱物が成長することを考えれば、団塊が海底面で転動したことは明らかである(Usui et al., 1979)。また潜水調査によれば、海底面の変形、傾動、崩壊などが頻繁に起こる海山などでは、団塊が重力によって転動・滑落したり、すでに形成されたクラストが崩壊したことを示唆する産状が観察されている(Usui et al., 1994; 白井ほか, 1994a)。

4.5 その他の研究

陸上の地層やマンガン鉱床中に、現在の海底マンガン団塊・クラストの“化石”を探す試みは古くからある(Jenkyns, 1979)が、陸上の露頭として認められることは極めて稀である(Margolis et al., 1978; Cronan et al., 1991)。陸上と海洋のマンガン鉱床の対比の問題は、国際地質対比計画(IGCP)第318委員会“Genesis and Correlation of Marine Polymetallic Oxides”(海洋の多金属酸化物鉱床の成因と対比; 筆者訳)で取り上げられ、1989年から世界のマンガン鉱床研究者が取り組んでいる(日本代表者: 針谷 有北海道工大教授)。ちなみに1994年のIGCP-318国際シンポジウム(ドイツ)では11件が現世の海洋底の鉱床、14件が陸上鉱床に関するものであった。陸上鉱床の多くは中生代~原生代の浅海・湖沼成の鉱床であるのに対し、現世の海底で見られるマンガン鉱床はほぼ白亜紀以降の新しいものである。後者は、現在の海洋環境との対応がある程度可能なため、研究が独自に進む傾向にある。今後、より具体的な対比が望まれている。地球史における海洋環境の変遷史のなかでの意義、例えば海洋無酸素事変との関連(梶原, 1985; Ito, 1993)など、といった方向への展開も期待される。

海底におけるマンガン酸化物形成のプロセスと類似する現象が、陸上で観察される例としては、火山地域の温泉(Usui and Mita, 1995)、坑内湧出水(水上, 1993)、地下水(Takematsu, 1984)などに伴う現世沈殿物の研究が行われている。また無機合成実

験(Kuma, et al., 1994; Momoi et al., 1992)あるいは微生物媒介(Mita et al., 1994)によって沈殿条件を再現する研究も興味ある分野である。

5. 将来の研究課題

以上述べた従来の研究を踏まえて、今後推進すべきいくつかの課題を指摘してみたい。

5.1 詳しい記載の研究

従来の記載は全岩を対象にしたものが多い。上述したようにその構成物は多様な起源を持ち、構成粒子は時に顕微鏡サイズ以下である。主な構成元素、構成鉱物、微細組織が明らかにされているが、各元素の化学形態・分配などの詳しいデータに乏しい。特に重金属以外の濃度の低い(0.1%オーダー以下)元素、例えばSr, Ba, Ti, V, Mo, Zr, 稀土類元素の化学・鉱物形態は殆ど明らかになっていない。最新の微小部化学分析機器、選択抽出法等を用いた詳しい記載研究の余地が大きい。また鉱物・化学的記載に加えて、鉱物の粒子サイズ、イオン交換性、吸着能、空隙、硬度、力学的強度、電気的性質、磁氣的性質等の物理的・工学的特徴に関する詳しいデータは、特に我が国では少ない。これらの成果の蓄積は地球科学的な成因研究に不可欠だけでなく、採掘・選鉱・精練等の商業技術の開発にも活かされるであろう。

5.2 海洋における物質循環に関わる研究

団塊・クラストの形成は単に過去の地質現象ではなく、現在も引き続き起きている生きた現象である。マンガン酸化物の形成を、今の海洋における垂直的・水平的な物質の流れの一部として捉えた研究が必要である。元素の移動・濃集のプロセスを、動的な海水・海底環境及びその歴史の変遷を踏まえて、マンガン酸化物の形成を明らかにすることが重要である。例えばいくつかのモデル地域において、海水の物理的・化学的条件、溶存または粒子状の重金属の存在形態の垂直変化を明らかにし、金属類が海底に達するまでの挙動を定量的に把握できれば、団塊・クラストの量的・質的な地域変動の要因をより具体的に議論することができるだろう。また熱水活動域においてブルームとして放出される重金属元素の移動・沈殿プロセスの定量的把握も海洋における物質収支を考える上で重要である。これらの研究

の進展には主に海洋化学、堆積学分野を中心としたフィールドデータが不可欠であろう。

5.3 古海洋学的研究

団塊・クラストの数 cm の鉄マンガニ酸化物質層の中には現在から数百万年以上にわたる形成の歴史が刻まれている。従ってその内部に長いレンジの海洋環境の変遷やイベントの記録が何らかの形で記録されている可能性があることは以前から指摘されてきた(von Stackelberg, 1979; 西村, 1993)。またマンガニ酸化物質が沈殿すること自体が環境の指標ともなる(第4図)。団塊・クラスト内部の微細構造・組成変化等と海洋環境の変遷との対応関係が明らかになれば、海底堆積物から環境を復元するのと同様の手法で逆に、団塊・クラスト中の微細スケールの性状変化が過去の環境変化をひもとく鍵になるであろう。現在必要とされるもの、言い換えれば研究の飛躍の大きなネックとなっているものは精度の良い年代測定法である。適当な半減期を持つ放射性核種は Be^{10} (1600万年) しかないため、信頼性の評価が困難である。またその測定には大がかりな質量分析装置と時間が必要なためデータが少ない。特に国内で得られたデータは数えるほどである(Inoue et al., 1983)。クラストに記録された残留磁気の反転から年代目盛りを入れる試みもあった(Chan et al., 1985)が、判定が困難なため成功していない。

最近では、古生物学的方法、放射性及び安定同位体を併用するなどして、微細スケールでの信頼性の高い成長速度、年代を得る試みが米国・ドイツを中心に続けられている(Mangini et al., 1990など)。特にクラストは堆積物の続成作用の影響が小さいことから、海洋古環境のインディケータとして再認識されるようになった(Segl et al., 1984)。微細組織・組成・成長速度の変化と第四紀の海水準変動(Hein et al., 1992; Eisenhauer et al., 1992)、中新世の深層流の変化と組織・化学組成(Hartmann, et al., 1989; Banakar et al., 1993)、酸素極小層の発達と化学組成(Dickens and Owen, 1994)の間の関係が具体的に議論されるようになってきている。わが国で話題になっている篇稿学(大野, 1993)の研究対象ともなりうるものである。目指すところは、一つの団塊又はクラストの顕微鏡スケールの組織・組成の変化から過去数百万年の長いレンジの海水・海底環境の変遷を解読する事であり、「団塊・クラストの層序学」と

言うことができる。

全球的規模での議論が最終目標であるが、そのためには各海域における具体的な検討が必要である。我々日本の研究者にとって日本周辺海域は絶好のフィールドである。臼井ほか(1994b)がまとめた海洋鉄物質資源分布図によると、そこには極めて多様なマンガニ酸化物質が分布する。その起源は海水起源から熱水起源まで変化に富み、団塊・クラストの年代は白亜紀から第四紀にわたる。海洋性島弧を中心とした地質構造発達史の解明が進む中で海洋環境の変動との対応を議論するための基礎知識が集約しつつあり、今後重点的調査が期待される海域である。

5.4 現場測定を含む海底近傍の調査

現在団塊・クラストが成長している海底近傍では堆積作用に伴って様々な現象が起きている。小さいスケールで地形調査・地質調査および海底近傍の物理的、化学的条件の測定、生物相の観察等を行って、団塊・クラストと底層水、海底堆積物、基盤岩の諸性質及びそれらの相互作用を明らかにする必要がある。例えば、深海堆積物の表面では、有機物の分解、珪酸塩の溶解、重金属の再移動、間隙水の性質の変化などの初期続成作用に伴う現象が起き、さらには底棲動物による堆積物の攪乱や微生物の活動なども認められている。これらが団塊の形成にどんな役割を果たしているか、その実態は明らかではない。船上からの調査のほかに、深海調査船による調査および長期モニタリングなどが望まれるところである。これらの成果は、団塊・クラストの形成に関して総合的な解釈が可能となるのみならず、今後探査・採鉄を実施する際にも重要なデータとなるであろう。

6. おわりに

かつて米国が実施した DOMES, MANOP 計画などは、深海底マンガニ鉄床を取り巻く学際的総合調査であった。1980年代半ばまでに目覚ましい成果を残したが、最終段階に至らず中断した感がある。またクラストについても同様の研究が望まれるが、類似の調査は計画されていない。米国、ドイツなどで基礎研究は継続されているが、現在はむしろ、後発のインド、韓国、中国等の活動が目立っている。またインド、韓国では鉄床が登録された後、データ

は公開の方向に向かい、多数の科学論文等が発表されつつある。

現在、我が国が引き続き実施している金属鉱業事業団による探査事業は規模、装備、内容とも現在の諸外国の活動あるいは過去の米国等に優るとも劣らないものである。先進国による総合調査が中断された今こそ、我が国が団塊・クラストの現地調査・科学的研究の分野で主導的役割を果たしていく時期ではないだろうか。今後、調査・研究を進める上で認識すべきことは地球科学的調査と探査・開発のための調査は不可分であるという点である。両者が相補いあう総合的調査体制が望まれる。

以上、本論ではなるべく広い分野の研究をレビューしたつもりであるが、至らない点も数多いと思う。マンガン団塊・クラストが海洋資源として注目されて久しいが、広大な深海底に関する我々の知識は微々たるものである。今後さらに詳しい研究が必要であることを強調しておきたい。小論をきっかけに、海底マンガン鉱床に興味を抱いて頂けたら幸いである。また共に研究に加わって頂ける方がいればなおさら幸いである。なお、本稿は第7回地質調査所講演会「海洋に資源を求めて」(1994年11月)における筆者の講演に加筆したものである。使用した我々自身のデータは主に工業技術院特別研究による白嶺丸航海(1974-1989)の成果に基づいている。最後に原稿を読んで頂いた当所海洋地質部の中尾征三部長、飯笹幸吉氏に厚く感謝する。

参考文献

青木 斌(1990) : 図鑑「海底の鉱物資源」. 東海大学出版会, 123p.
 Archer, A. A. (1985): Proc. Indian Natn. Sci. Acad., **51**, 630-637.
 Arrhenius, G. and Tsai, A. G. (1981): Scripps Inst. Oceanogr. Reference Series, No. 81-28, 1-19.
 Banakar, V. K., Nair, R. R., Tarkian, M. and Haake, B. (1993): Mar. Geol., **110**, 393-402.
 Bender, M. L., Klinkhammer, G. P. and Spencer, D. W. (1977): Deep-Sea Research, **24**, 799-812.
 Broadus, J. M. (1987): Science, **235**, 853-860.
 Burdige, D. J. (1993): Earth-Sci. Rev., **35**, 249-284.
 Calvert, S. E., Price, N. B., Heath, G. R. and Moore, T. C. (1978): J. Mar. Res., **36**, 161-183.
 Campbell, A. C., Gieskes, J. M., Lupton, J. E. and Lonsdale, P. F. (1988): Geochim. Cosmochim. Acta, **52**, 345-357.
 Chan, L. S., Chu, C. L. and Ku, T. L. (1985): Geophys. J. R. astr. Soc., **80**, 715-723.
 Chester, R. (1989): Marine Geochemistry, Unwin Hyman, Lon-

don, 698p.
 Cochonat, P. et al. (1990): Mar. Geol., **103**, 373-380.
 Cowen, J. P., Decarlo, E. H. and McGee, D. L. (1993): Mar. Geol., **115**, 289-306.
 Corliss, J. B., Lyle, M., Dymond, J. and Crane, K. (1978): Earth Planet. Sci. Lett., **40**, 12-24.
 Cronan, D. S. (1980): Underwater Minerals. Academic Press, London, 362p.
 Cronan, D. S. et al. (1991): J. Geol. Soc. London, **148**, 655-668.
 Dickens, G. R. and Owen, R. M. (1994): Paleoceanography, **9**, 169-181.
 Eisenhauer, A., Göen, K., Pernicka, E. and Mangini, A. (1992): Earth Planet. Sci. Lett., **109**, 25-36.
 Furukawa, M., Tamaki, K., Mizuno, A. and Kimura, M. (1992): In Keating, B. H. & Bolton, B. R. (eds) Geology and offshore mineral resources of the central Pacific Basin, Springer-Verlag, N. Y., 55-67.
 Gardner, W. D., Sullivan, L. G. and Thorndike, E. M. (1984): Earth Planet. Sci. Lett., **70**, 95-109.
 Glasby, G. P. (1979): Marine Manganese Deposits. Elsevier Publ. Co., Amsterdam, 523p.
 Golden, D. C., Dixon, J. B. and Chen, C. C. (1986): Clays and Clay Minerals, **34**, 511-520.
 Halbach, P., Friedrich, G. and von Stackelberg, U. (1988): The Manganese Nodule Belt of the Pacific Ocean. Ferdin and Enke Verlag, Stuttgart, 254p.
 Halbach, P., Manheim, F. T. and Otten, P. (1982): -results of the Midpac '81. Erzmetall, **35**, 447-453.
 Hartmann, M. et al. (1989): Geol. Rund., **78**, 943-958.
 Hedge, D., Linkhammer, G. and Cullen, D. (1987): Geochim. Cosmochim. Acta, **51**, 1059-1070.
 Hein, J. R. et al. (1992): Paleoceanographic implications. Paleoceanography, **7**, 63-77.
 Hillman, T. C. and Gosling, B. B. (1985): Mining deep ocean manganese nodules. U. S. Bureau of Mines Information Circular 9015, 19p.
 堀部純男・大町北一郎・菅野昌義(1986):「海洋鉱物資源」読売科学選書, **6**. 読売新聞社226p.
 Ingram, B. L., Hein, J. R. and Farmer, G. L. (1990): Geochim. Cosmochim. Acta, **54**, 1709-1721.
 Inoue, T. et al. (1983): Geochem. Jour., **17**, 307-312.
 Ito, T. (1993): Geochemical Study of Marine Manganese Deposits. Ph. D. Thesis, University of Tsukuba, unpublished.
 Jenkyns, H. C. (1979): In G. P. Glasby (ed.) Marine Manganese Deposits. Elsevier, Amsterdam, 87-109.
 Johnson, K. S. et al. (1992): Science, **257**, 1242-1245.
 梶原良道(1985): 鉱床生成と地球環境. 地質ニュース, 第376号, 46-59.
 Kennet, J. P. and Watkins, N. D. (1975): Science, **188**, 1011-1013.
 Klinkhammer, G., Rona, P., Greaves, M. and Elderfield, H. (1985): Nature, **314**, 727-731.
 Ku, T. L. (1979): In: G. P. Glasby (ed.) Marine Manganese Deposits. Elsevier, New York, 249-267.
 Kuma, K. et al. (1994): Mineral. Mag., **58**, 425-447.
 Lonsdale, P. (1980): J. Sed. Petrol., **50**, 1033-1048.

- Mangini, A., Eisenhauer and Walter, P. (1990): The Relevance of Manganese in the Ocean for the Climatic Cycles in the Quaternary, Springer-Verlag, Berlin, 267-289.
- Margolis, S. V. et al. (1978): Chem. Geol., **21**, 185-198.
- McCave, I. N. (1988): J. Sediment. Petrol., **58**, 148-158.
- Mero, J. L. (1965): The Mineral Resources of the Sea. Elsevier Publ. Co., New York, 312p. 「海洋鉱物資源」日本鉱業会訳 (1972), 287p.
- Mita, N. et al. (1994): Geochem. Jour., **28**, 71-80.
- 水上正勝(1993): 青函トンネル坑内に析出するマンガニ堆積物の地球科学的研究. 資源地質, **43**, 227.
- Momoi, H., Nakamoto, M. and Kamata, K. (1992): Mining Geology, **42**, 155-163.
- Moon, D. S., Kim, K. H. and Kang, J. K. (1994): Jour. Korean Soc. Oceanogr., **29**, 248-257.
- Moorby, S. A., Cronan, D. S., and Glasby, G. P. (1984): Geochim. Cosmochim. Acta, **48**, 433-441.
- Morgan, C. L. et al. (1993): Marine Geores. & Geotech., **11**, 1-26.
- 中尾征三(1993): 「海洋鉱物資源—その科学技術から政治経済まで」. 日本海洋協会, 153p.
- 南部松夫編(1988): 特集「マンガニ団塊—新しい金属鉱物資源」, SUT Bulletin, 東京理科大学出版会, 46p.
- Nath, N. B., Balaram, V., Sudhakar, M. and Plüer, W. L. (1992): Mar. Chem., **38**, 185-208.
- National Geophysical Data Center (1992): NOAA & MMS Marine Minerals CD-ROM Data Set, NGDC, Denver.
- 西山 孝(1993): 「資源経済学のすすめ」, 中公新書1154, 中央公論社, 118p.
- 西村 昭(1993): マンガニ団塊・クラストに記録された海洋のイベント. 月刊地球. 号外 No. 8, 60-64.
- Nishimura, A. (1992): In Keating, B. H. & Bolton, B. R. (eds) Geology and offshore mineral resources of the central Pacific Basin, Springer-Verlag, N. Y., 179-203.
- 大町北一郎編(1987): 特集「海底鉱物資源—コバルトクラストを中心に」, 月刊海洋科学, 第19巻4号, 62p.
- 大野照文(1993): 「縞縞学」が地球のヒミツをとく. 最新・地球学, 朝日新聞社, 129-141.
- Piper, D. Z. et al. (1985): Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources-One sheet map.
- Rawson, M. D. and Ryan, W. B. (1978): Ocean Floor Sediment and Polymetallic Nodules, Lamont-Doherty Geological Observatory-One sheet map.
- Scott, M. R. et al. (1976): Geophys. Res. Lett., **1**, 355-358.
- Segl, A. et al. (1984): Nature, **309**, 540-543.
- 志賀美英(1994): 資源地質, **44**, 221-223.
- 志賀美英・納 篤(1992): 資源地質, **42**, 263-283.
- 資源エネルギー庁(1993): 資源エネルギー年鑑. 通産資料調査会, 943p.
- Siapno, W. D. (1986): Marine Mining, **5**, 457-465.
- Skorniyakova, N. S. and Murdmaa, I. O. (1992): Mar. Geol., **103**, 381-405.
- Skorniyakova, N. S., Murdmaa, I. O., Krasnov, S. G. and Uspenskaya, T. Yu. (1990), N. Z. Jour. Geol. Geophys., **33**, 419-437.
- Takematsu, N., and Sato, Y. and Okabe, S. (1984): Geochim. Cosmochim. Acta, **48**, 1099-1106.
- Tamaki, K. and Tanahashi, M. (1981): Geol. Surv. Japan. Cruise Rept., no. **15**, 77-99.
- Usui, A. (1979): Nature, **279**, 411-413.
- Usui, A. (1992): In B. Taylor et al. (eds.) Proc. ODP, Scientific Results, **126**, 113-123.
- 白井 朗他4名(1994a): 南西諸島海溝海側斜面のマンガニクラスト. 第11回しんかいシンポジウム予稿集, 81.
- Usui, A. and Ito, T. (1994): Mar. Geol., **119**, 111-136.
- Usui, A., Mellin, T. A., Nohara, M. and Yuasa, M. (1989): Mar. Geol., **86**, 41-56.
- Usui, A. and Mita, N. (1995): Clay & Clay Minerals, **43**, in press.
- Usui, A. and Moritani, A. (1992): In Keating, B. H. & Bolton, B. R. (eds) Geology and offshore mineral resources of the central Pacific Basin, Springer-Verlag, N. Y., 205-223.
- Usui, A., Nishimura, A. and Iizasa, K. (1994): Geotech., **11**, 263-291.
- Usui, A., Nishimura, A., Tanahashi, M. and Terashima, S. (1987): Mar. Geol., **74**, 237-275.
- Usui, A., Nishimura, A. and Mita, N. (1993): Mar. Geol., **114**, 133-153.
- 白井 朗・棚橋 学・飯笹幸吉(1994b): 日本周辺海域鉱物資源分布図(2枚組). 地質調査所特殊地質図シリーズ33.
- Valsangkar, A. B., Khadge, N. H. and Desa, W. L. (1992): Mar. Geol., **103**, 361-371.
- von Stackelberg, U. (1979): In J. L. Bischoff and D. Z. Piper (eds.) Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province, Plenum Press, N. Y., 559-586.
- von Stackelberg, U. (1984): Significance of benthic organisms for the growth and movement of manganese nodules, Equatorial North Pacific. Geo-Marine Lett., **4**, 37-42.
- Von Damm, K. L. et al. (1985): Geochim. Cosmochim. Acta, **49**, 2197-2220.
- von Stackelberg, U. and Marchig, V. (1987): In: U. von Stackelberg and H. Beiersdorf (eds.) Manganese Nodules and Sediments in the Equatorial North Pacific Ocean-SONNE Cruise SO25, 1982. Geol. Jahrbuch, D87, 123-227.
- USUI Akira (1995): Studies of marine manganese deposits: Review and perspectives.

〈受付: 1995年3月23日〉