

深海底鉱物資源の地質学的・鉱物学的特徴

Geological and Mineralogical Characteristics of Deep-sea Mineral Resources

白 井 朗*

Akira Usui

1. はじめに

1960年代初頭、将来の金属資源として海底のマンガング塊が注目されて以来、“海洋は資源の宝庫”という機運が高まり、主要先進国は競って世界の海洋底の科学調査と探査活動を始めた。海洋調査技術の進歩はプレートテクトニクスを生みだし、同時に海洋鉱物資源の概要も次第に明らかになった。その後1980年代半ばに入ると先進国の調査・探査活動は全体に縮小されていった。その大きな理由は、ベースメタルの価格の低迷・安定による海底資源の商業的価値の相対的低下、国連海洋法準備委員会のもとでのマンガング塊鉱区登録に加え、採取・回収に関する技術的課題、操業に伴う環境汚染の問題などである。

しかしながら海洋のマンガング塊に含まれる銅、ニッケルが、陸上鉱床の総埋蔵量に匹敵する（又はそれを上回る）膨大な量の資源であるとの認識は現在でも変わりはない¹⁾。いまでは海底鉱物資源は高校地学の教科書や少年漫画²⁾にまで登場するほど一般的な認識となっている。近年、マンガング塊のほかにも、コバルトや白金を含むマンガングラスト、貴金属を含む熱水起源の硫化物鉱床が発見されたことをきっかけに、様々な分野での調査、研究が続いている。1994年には国連海洋法条約が発効となり、現実の商業生産体制に一步近づくとする状況もある。21世紀に向けて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³⁾。現在も日本、ドイツのほか最近団塊鉱区が登録された中国、韓国、インドなどが自国鉱区及びその周辺の鉱床探査または科学研究を継続的に実施している。数年後には我が国ではマンガング塊探査システムの実海域実験が予定されている。また米国、ロシア、ドイツ、日本では採鉱に関わる環境影響実験・

調査が行われている。一方、発見の新しい熱水鉱床については、まだ科学的基礎調査の段階にあり、しばしば国際共同研究として東・南・西部太平洋、中部大西洋、インド洋において調査が実施されている。

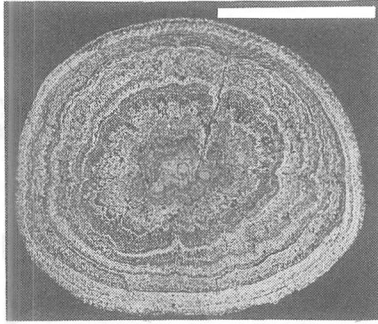
前後するが、本稿では海底鉱物資源を「深海底またはその近傍に多量に存在し金属含有量の高い堆積物・沈殿物であって、潜在的な商業的価値を持ち得るもの」と定義する。商業的に採取されている砂・砂利等の海底骨材資源、浅海底の様々な漂砂鉱床、及び炭化水素鉱床（石油、石炭、天然ガス）は扱わない。深海底の金属資源に限定して述べる。最も有望な将来資源とされているのは、マンガング塊、マンガングラスト、塊状硫化物鉱床の三つである（図-1）。その理由は広い分布と高い金属含有量にある。以下には、広域的・局地的な分布実態、その地質学的背景との関係、鉱物学的・地球化学的諸性質、形成過程などを中心に一般的な解説を加える。これらは海底の地球科学的研究の基礎であると共に、将来の鉱床探査、鉱量評価、採鉱技術開発、選鉱精練の際にも重要な知見となる。

なお本稿をまとめるにあたって使用したデータの大半は、地質調査所が1970年以来、中部・西部太平洋において実施してきた、工業技術院特別研究「深海底鉱物資源探査に関する基礎的研究」（1974-1978）、「深海底鉱物資源に関する地質学的研究」（1979-1983）、「海底熱水活動に伴う重金属資源の評価手法に関する基礎的研究」（1983-1989）の成果である。

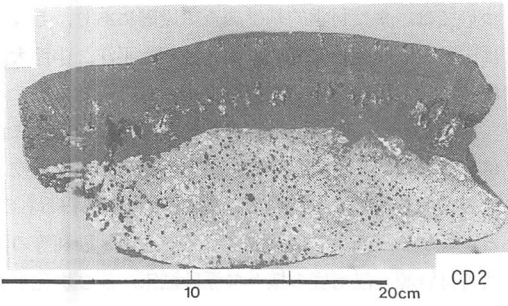
2. 発見の歴史

海底の堆積物・沈殿物のなかには重金属に富むものがあることは、19世紀の海洋研究の初期から知られていた。例えばマンガング塊やマンガングラストは英国チャレンジャー号研究航海の途中大西洋で発見され、既に詳しい学術的記載がなされている⁴⁾。以来、海底に横たわる奇妙な金属濃集物質として科学的研究の対象であった。これらが重金属資源として経済的関心が

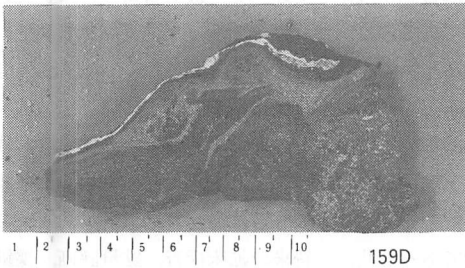
* 工業技術院 地質調査所 海洋地質部主任研究官
〒305 茨城県つくば市東1-1-3



(A) マンガン団塊の断面，ラベルの長さ1 cm



(B) マンガンクラストの切断面，基盤は磷酸塩岩



(C) 硫化物のチムニー

(地質調査所中村光一氏提供)

図-1 マンガン団塊，マンガンクラスト，熱水性硫化物の写真

持たれるようになったのはそれほど古いことではない。第二次世界大戦後、海洋研究が盛んになるにつれ、予想外に広い海域に多量に分布していることが明らかになったからである。最初に体系的に海洋鉱物資源の概念を提唱したのは米国のメロー⁵⁾であった。その後は金属の市場価格暴騰なども動機となって、先進国は自国鉱区獲得を目的として探査活動，基礎研究を続けてきた。参考までに地学関係の国際学術誌に掲載されたマンガン団塊に関する学術論文数の推移を図-2に示した。

一方、海底熱水鉱床の発見はもっと新しく10数年前のことである。1960年代にスウェーデンの海洋調査船が紅海の海底に濃厚塩水と重金属を含む堆積物を発見したのをきっかけに、1978年にはフランスの潜水調査船が東太平洋において重金属沈殿物を吹き上げる、300℃に及ぶ高温熱水の噴出孔と硫化物鉱床を発見した。以降、中央海嶺系に限らず、世界各地の活動地域の海底から続々と同様の現象が発見され続けている。日本周辺海域、例えば伊豆・小笠原海域、沖縄トラフで発見されたのは1980年代後半のことである。調査が進んでいる太平洋域の鉱物資源の広域スケールの分布を図-3に示す。

3. 海洋鉱物資源の諸性質

3.1 マンガン団塊 (manganese nodule)

マンガン団塊・クラストはマンガン及び鉄の酸化物を主成分とした化学堆積岩である。球状または塊状の形態を持つものを団塊と呼び、海底の岩盤を被覆するものをクラストと呼ぶ。酸化物層の成長速度は100万年に数mmから数cmという遅いものであるが、長い地質時代を経て厚さ10cmを超えるものも稀ではない。

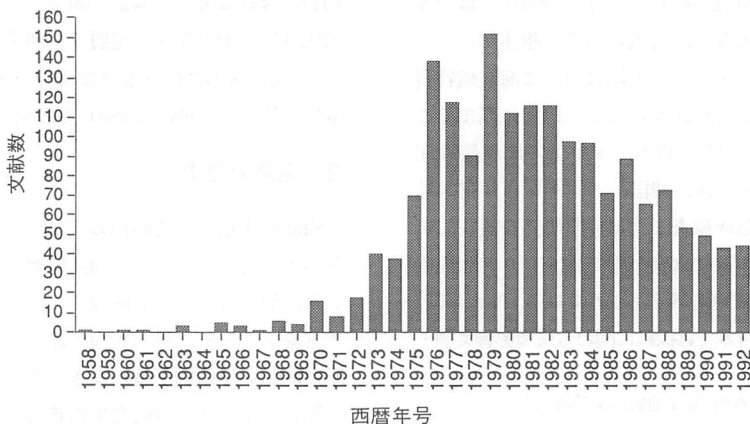


図-2 マンガン団塊に関する学術論文数の推移 (国際学術誌に限定)

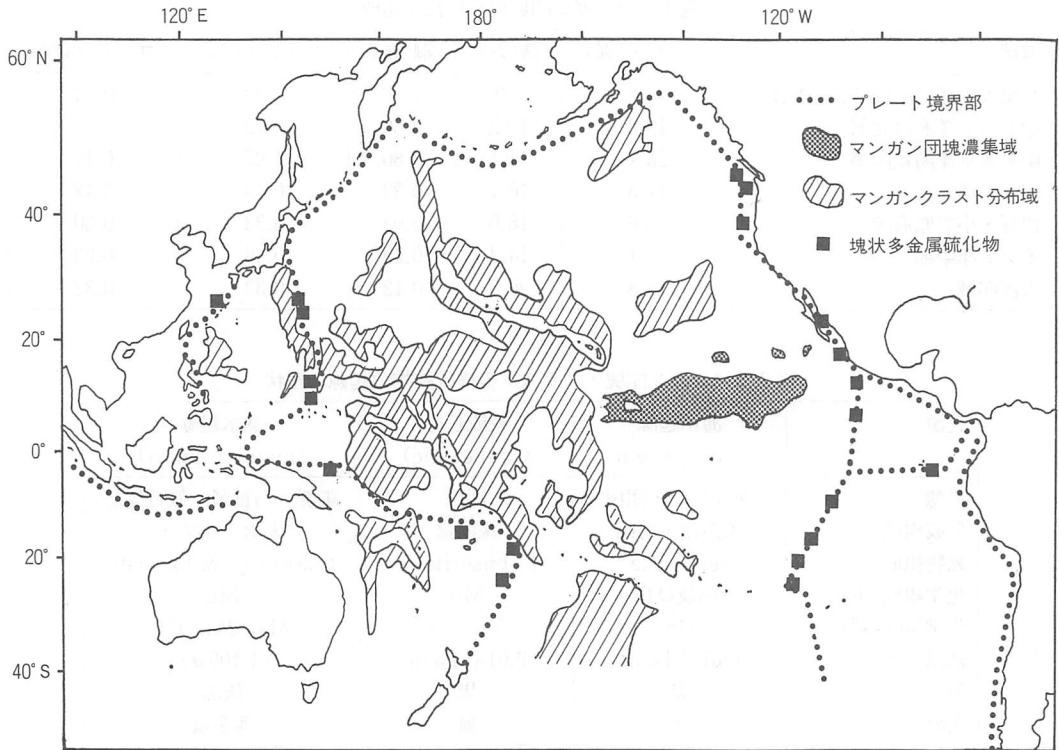


図-3 大太平洋における深海底鉱物資源の分布概要 (Rona²⁴⁾, Johnson and Clark²⁷⁾ に加筆)

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。黒色から茶褐色の表面は成長構造の違いを反映し、平滑から粗いものまで様々である。内部にも同等の成長構造が観察される。構成するマンガン鉱物は粒径 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 以下の低結晶質含水マンガン(又は鉄・マンガン)酸化物である。光学顕微鏡や低倍率の走査型電子顕微鏡では一般に鉱物粒子は観察できない。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、構成成分の変化によって様々なオーダーの縞状構造を示すことが多い。

世界の大洋における広域的スケールの濃集率・組成の分布概要(図-3)は1970年代までの世界各国の調査結果から明らかにされており⁶⁾、大縮尺の分布図⁷⁾や市販のデータベース⁸⁾なども公表されている。公表さ

れたデータや世界分布図に基づく、北東太平洋地域(Mn Nodule Beltと呼ばれる)、中央太平洋海盆北部、南太平洋タヒチ島西方の深海盆、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の濃集域が確認されている。さらに詳細なスケールの調査は鉱量評価を目的として、各国の登録鉱区内において実施されているが、非公開データとなっているため詳細は不明である。一般に高濃集率地域では濃集率(1m^2 当たりの団塊湿重量)が 10kg を超える。高濃集地域の中でも 1km 又はそれ以下のスケールの変動はかなり一般的に認められることも明らかになっている。その他の海域、例えば高緯度地域、インド洋⁹⁾、太西洋などではあまり調査が進んでいない。太平洋においては、数百km規模の大鉱床の大半は既に発見されたと考えて良いであろう。しかし団塊の高濃集地域と高品位地域とは必ずしも一致せず、共に高い地域は北東赤道太平洋と中部インド洋の一部でしか発見されていない。先行投資者の鉱区はすべてこの海域に設定されている。

マンガン団塊は別名多金属団塊(polymetallic-

表1 マンガン団塊の平均化学組成

海域	マンガン(%)	鉄(%)	銅(%)	ニッケル(%)	コバルト(%)
北東太平洋Mn-nodule Belt	25.4	6.9	1.02	1.28	0.24
中央太平洋海盆北部	19.8	10.2	0.60	0.70	0.25
中央太平洋海盆南部	23.7	11.1	0.80	1.07	0.18
南太平洋海盆部	17.3	16.1	0.22	0.43	0.42
伊豆・小笠原海域	16.6	18.0	0.08	0.33	0.30
インド洋中部	15.1	14.7	0.29	0.48	0.23
大西洋域	15.8	20.8	0.12	0.33	0.32

表2 マンガン団塊・クラストの構成鉱物の起源、産状

起源	海水起源 (hydrogenetic)	続成起源 (diagenetic)	熱水起源 (hydrothermal)
形態	クラスト・団塊	団塊	細脈、均質層、盤層など
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	0.01-0.1 μm	0.01-0.1 μm	0.1-100 μm
色	黒	黒	灰黒
光沢	無	無	亜金属

nodule) とも称されるように、多種の金属から成ることが特徴の一つである(表1)。マンガンと鉄の酸化物を主成分とし、平均0.1%を超える元素は20近く(Mn, Fe, Cu, Ni, Co, Zn, Si, Al, Ca, Mg, Na, K, Ti, P, Baなど)ある。高品位団塊と言われるものはニッケルと銅の合計が3%を超える。金属含有量は濃集率と同様、広域的、局地的にも大きく変化し、さらには団塊の長い成長期間に応じて、個体内部でも大きな組成変化が認められることも珍しくない。従来の詳しい化学的、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説明されている^{10) 11)}。

主要な鉄・マンガン鉱物はvernadite, buserite, todorokiteの3種である。各鉱物は均質な化学組成を持つ構成単位として、また生成条件、微細成長構造とも対応するという意味で重要である。団塊・クラストの一般的な構成鉱物は前二者である。表2に示すように、vernaditeは鉄とマンガンをほぼ同量含む低結晶質鉱物でありしばしばCoに富む。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。Buseriteは室内実験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。構造分類の中では層状マンガン酸塩鉱物(phyllomanganate)に属し、10Åの間面距離を安定化する交換性層間イオン(Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, 2Na⁺)を一定量(Mnに対して1/6)保持する。理想化学式はRO・6MnO₂・nH₂O

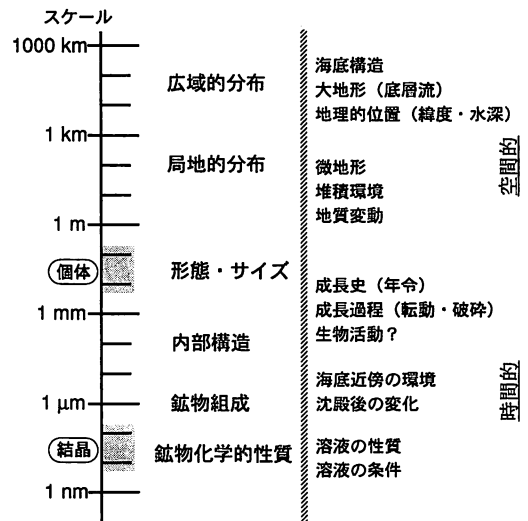


図4 様々なスケールのマンガン団塊の組成変動

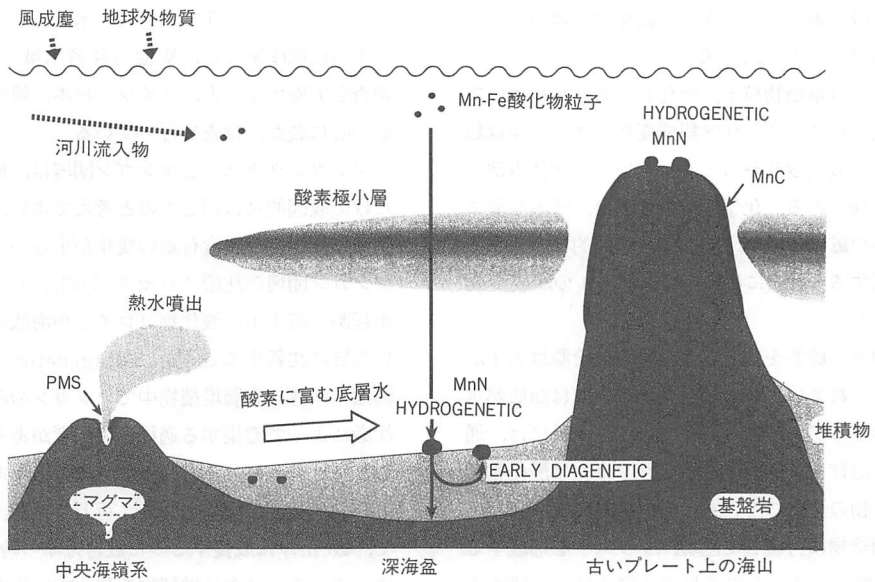
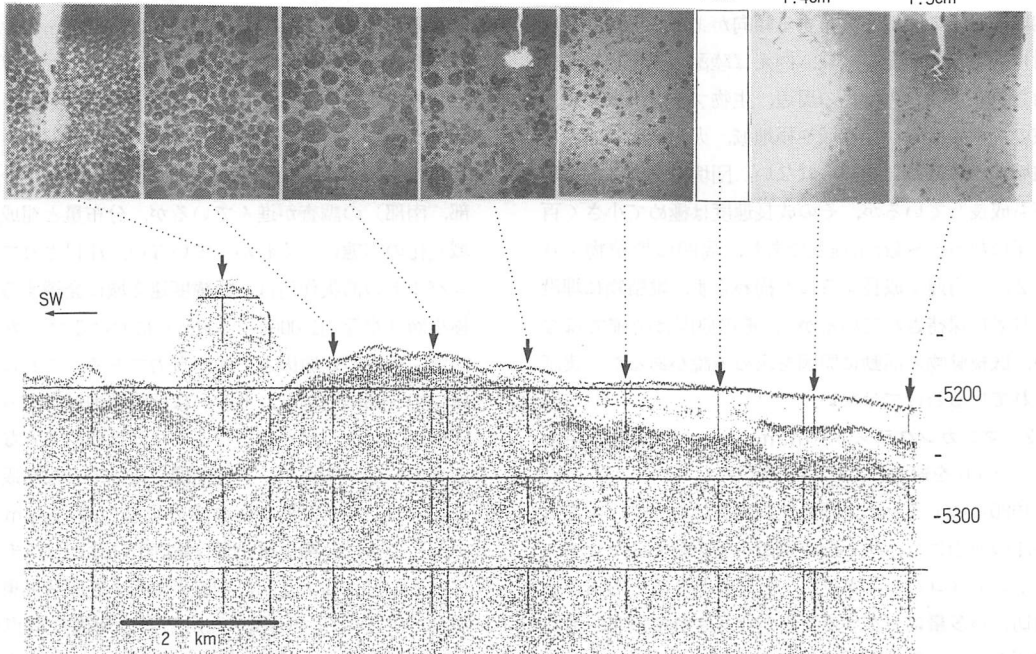


図-5 深海底資源の生成過程の簡略モデル

FG641	FG642	FG643	FG644	FG645	FG646	FG647	FG648
30.3kg/m ²	— kg/m ²	14.2kg/m ²	11.3kg/m ²	2.2kg/m ²	3.0kg/m ²	0.6kg/m ²	0.5kg/m ²
85%	50%	40%	30%	10%	—%	5%	5%
2.7cm	3 cm	1.8cm	1.6cm	1 cm	1 cm	1.4cm	1.5cm



上から測定番号, 団塊濃集率, 海底面積占有率, 団塊平均粒径, 海底写真(上下幅約1m), 3.5kHz地層探査機の記録
右は水深(m)

図-6 マンガン団塊の産状の局地変化の例(南太平洋)

(R は前出; $n = 2 \sim 3$) である。マンガン団塊に最高 $2 \sim 3\%$ (銅+ニッケル) が濃集する理由は busserite の陽イオン交換能である^{12) 13) 14)}。

以上の鉱物は堆積物粒子、微化石、岩石等によって任意に希釈されている。化学組成変化のスケールは数 1,000km の広域的变化からミクロン以下の個体内部の変化まで多様である。化学組成の変動は、成因を異にするこれらの鉱物形成が、時間的・空間的に変化することに起因する。図-4には様々なスケールの組成変動の例を挙げた。

次に成因論の概要を記す。重金属の供給源は大半が陸源物質とされているが、物質収支の上では海底熱水活動からの寄与があると言われている。一般には、通常の海水に溶存する低濃度の鉄とマンガンは酸化粒子として生物の遺骸などと共に海底に向かって沈降し、海底面の固結物に付着して団塊、クラストを形成する(図-5)。団塊・クラストの成長する環境は、堆積物の供給量が小さく、且つ酸素を含んだ海水が定常的に供給される深海底である。現在の海底では、この二条件が地質スケール(数百万年のオーダー)で長期間保持された環境、例えば深海盆や海山の高まりなどに限って分布する。結果として、新しい(現世から数百万年前まで)堆積層が薄い(厚さ数mから20、30m程度)地域に多量の団塊が分布する傾向がある(図-6)。反対に、堆積の活発な地域、例えば陸源の風化物質が供給される大陸や火山島の周辺、生物プランクトンの遺骸の堆積の激しい赤道域や極地域、火山活動の盛んな地域などには殆ど認められない。団塊やクラストは現在も成長しているが、その成長速度は極めて小さく百万年に数mm~数cm程度であり、周囲の堆積物よりも2、3桁遅く成長するにも拘わらず、堆積物に埋没されずに保持されているが¹⁵⁾、その原因は明確ではない。底棲動物の活動に原因を求める説があるが¹⁶⁾ 実証されているわけではない。

3.2 マンガンクラスト (manganese crust, cobalt-rich を冠することもある)

1980年にドイツと米国の共同調査において、中部太平洋の海山にコバルト含有量が1%を超えるマンガンクラスト(コバルトクラストと略されることもある不適切)が多量に分布することが発見されて以来、潜在資源として注目を浴びている¹⁷⁾。1978-1981年頃に、中央アフリカのコバルト産出国における内戦が原因となってその市場価格が4倍近く高騰したことが、クラストの科学調査・探査活動の大きな動機となった¹⁸⁾。

さらに数ppmオーダーの白金も含まれることも明らかになった。太平洋では特に、米国、フランス、南太平洋の島嶼国家などが排他的経済水域(EEZ)内で調査を実施する一方、ドイツ、日本、韓国などが公海を中心に調査、探査を行っている。

マンガンクラストとマンガン団塊は、形状が異なるだけで成因的には同じものと考えてよい。クラストは団塊に比べて金属含有量の変化が小さい。その理由はマンガン団塊の沈殿プロセスには hydrogenetic (海水起源: 海水中の酸化コロイドが海底の安定した固い物質に沈着する過程) と diagenetic (続成起源: 弱還元状態の表層堆積物中でマンガンのみが溶解・再沈殿によって濃集する過程) の両者があり得るのに対してクラストでは前者のみであることである。クラストの成長速度は団塊と同様、百万年に数mm程度なので、数cm厚に成長するのに数百万年の時間を要する。従って、その分布は堆積物を欠く古い岩石が海底に露出している地域に限られる。団塊と同様、大陸周辺や火山活動域には分布しない。古いプレート上の地形的高まり、具体的にはライン、マーシャル、マイクロネシア諸島などの太平洋の海山群、海山列に広く認められている。

中~南部太平洋のクラストは基盤の火山岩、磷酸塩岩などを被覆する平均数cm、最大厚さ10cm以上の酸化物層として発達する。化学組成は、鉄とマンガンの酸化物を主成分とし、コバルト、ニッケルを0.1%のオーダーで含有する(表3)。特にコバルトの平均含有量はしばしば0.6-1.0%に達する。太平洋(特に中部、南部)の調査が進んでいるが、分布量と組成の地域変化の実態はよくわかっていない。注目されているコバルトの濃集作用は、低緯度遠洋域に発達する酸素極小層(水深約1,000-2,500m)におけるマンガンの溶解、再沈殿が原因との説が有力である。これに従えば、中~高緯度地域、あるいは低緯度地域であっても深海底ではコバルトに富むクラストは期待できないことになるが、調査データは団塊に比べてまだ格段に少ない。コバルト以外の金属成分では白金(ppmオーダー)と共に、稀土類元素(総計0.1%以上)、チタンなども注目されよう。日本周辺にも小笠原諸島東方の海台、伊豆-マリアナ弧、九州南方の海嶺に散点的に認められるが、太平洋のクラストに比べて金属含有量は一般に低い¹⁹⁾。

研究動向としては、コバルト価格が安定、低迷し始めた1980年代末頃から、マンガン団塊にやや遅れて、

表3 マンガンクラストの平均化学組成. Hein²⁰⁾ から抜粋.

海域	マンガン(%)	鉄(%)	コバルト(%)	ニッケル(%)	チタン(%)
ハワイ-ミッドウェイ海域	24.0	16.0	0.91	0.45	1.1
ライン諸島	27.0	16.0	1.10	0.51	1.1
ギルバート諸島	29.0	18.0	0.99	0.63	1.2
マーシャル諸島	21.0	13.0	0.74	0.45	0.9
マリアナ諸島	12.0	16.0	0.09	0.13	-
仏領ポリネシア	23.0	12.0	1.20	0.60	1.0
九州・パラオ海嶺域	13.0	13.0	0.13	0.34	-
小笠原海台周辺海域	21.0	13.0	0.41	0.55	0.7

調査の規模・ベースが減少しつつある。中部・南部太平洋以外での詳細な調査は殆ど行われていないため、地域的な産状変化は太平洋の一部を除くとよくわかっていないのが現状である。事実、南極大陸の斜面、日本周辺の海溝斜面などからも稀に報告がある。今後他の地域でも新たに発見される可能性は大きく、地域を広げた、より詳細スケールの調査研究が望まれる。

クラストの採鉱技術の開発も緒についたばかりであるが、採掘法や精練法はマンガン団塊のそれを一部活用できると言われる。しかし海底での集鉱技術、環境影響評価については、団塊のそれよりも困難な未解決の課題が残されていると思われる。開発に有利な点は分布水深が団塊に比べてほぼ半分程度であることである。

3.3 海底熱水鉱床 (submarine hydrothermal deposit)

第三に、海底の重金属資源として最近注目を集めているものは海底熱水鉱床である。海底熱水鉱床の顔つきは陸上の同種の塊状硫化物鉱床（例えば黒鉱鉱床など）と同じく多様であり、金属硫化物の他、硫酸塩

(重晶石、石膏など)、珪酸塩(シリカ、粘土鉱物など)、炭酸塩鉱物、酸化物(鉄、マンガン)などが報告されている。一般的には、高温熱水の噴出によってもたらされる多金属塊状硫化物 (polymetallic massive sulfide ; PMS) に限定して使われることが多い。1978-1979年のフランス、米国の潜水調査船による、高温熱水を噴出する煙突(チムニー)の発見は劇的であったが、その後、世界の活動域で次々と発見されるようになった。周辺に沈殿する硫化物は銅、鉄、亜鉛、鉛などを主成分とし貴金属などの有用物質を副成分として含んでいる(表4)。チムニーから噴出する熱水、生成鉱物、一連の生物群などは地質学、地球化学、鉱床学、生物学分野における第一級の研究対象として、現在活発に研究が続けられている。

しかしながら、各々の熱水噴出現象は大洋全体としては極めて局地的な現象であり、しかもその活動期間も短いといわれ、また調査には潜水船または特殊な調査設備を装備した調査船に頼らざるを得ないため、その地域的分布はまだ充分明らかになっていない。さらに海底下にも活動停止したチムニーやその残骸が発見

表4 熱水性硫化物の平均化学組成. Koski²⁰⁾ を改変.

海域	Cu %	Zu %	Pb %	Fe %	Ag ppm	Au ppm	Co ppm	Ni ppm	Pt ppm
中央海嶺系									
ガラパゴス海嶺	4.5	4.0	0.04	32.6	46	0.34	86	270	<50
東太平洋海膨(21° N)	0.8	32.3	0.32	19.2	159	0.08	100	3	20
東太平洋海膨(21° N)	7.9	10.8	0.07	23.9	62	0.31	1100	70	-
ファンデフカ海膨(中軸)	0.2	11.3	0.75	19.6	436	0.30	20	20	<50
ファンデフカ海膨(南部)	0.9	24.3	0.18	9.9	207	2.50	20	90	-
島弧系									
沖繩トラフ伊是名海穴	4.7	26.4	15.30	5.5	1645	4.90	4	4	-
明神礁カルデラ	2.1	36.6	6.08	2.5	260	1.62	22	22	-
水曜海山	12.6	20.8	0.84	15.7	203	28.90	50	50	-

され、深海掘削 (ODP) コアからも重金属に富んだ堆積物が発見されている。

現在までに報告のある太平洋域の海底熱水鉱床 (PMS) の分布を図-3に示した。海底熱水鉱床は海底地殻に浸透した海水がマグマなどの熱源によって高温になり、岩石から重金属を溶脱し、割れ目などを通じて海底に噴出する際、硫化物などとして沈殿が形成されたものである。噴出熱水の温度は400℃を超える場合もある。

ロナ²⁰⁾は、金属に富む熱水鉱床が形成される条件として、(1)高温のマグマなどの熱源と高い地温勾配、(2)熱交換と、熱水循環に適した地下の割れ目、(3)定常的に熱源と通路を供給する地質条件、の三つを挙げている。現在の海底でこの条件を満たす地域は火山活動、地震活動が活発なプレート境界域である。東太平洋海膨、大西洋中央海嶺、インド洋中央海嶺などの中央海嶺系の中軸谷、トンガ・ケルマデック弧、北フィジー海盆、伊豆・マリアナ弧、南西諸島弧などの島弧・海溝系の海底活火山や背弧リフトのほか、ハワイなどホットスポット海底火山、紅海やカリフォルニア湾など大陸地殻に生じた海底拡大系などにおいて、続々と生きた海底熱水鉱床が発見されつつある。今後もさらに多くの海域で発見が続くことが予想される。しかし、海底熱水活動、熱水鉱床の調査は依然として科学的基礎調査の段階にあり、資源として評価に足る調査結果は充分蓄積されていないのが現状である。

海底の多金属塊状硫化物鉱床の鉱石鉱物、化学組成は多様であり(表4)、地質背景との関連が指摘されている。例えば金属の起源となる地下の岩石の違い、海底拡大のステージや速度、堆積物の有無などが鉱床のサイズ、組成を決めているとの考えがある。

1960年代に最初に発見された紅海の重金属泥は一つの典型であり、スケールの大きさ、金、銀の高含有量、比較的採取が容易な産状などの理由から、試験採掘まで実施された。次に注目されるのはチムニー群で特徴づけられる中央海嶺系塊状硫化物であり、主に鉄・銅・亜鉛の硫化物から成る。これらは一般に規模が小さく、また海底で分解しやすいため大鉱床として保存されにくいと言われる。別のタイプとして、カリフォルニア湾グエイマス海盆などには堆積物を貫いて噴出する熱水がもたらす鉱床がある。高温熱水でありながら沈殿物は硫酸塩、珪酸塩に富んでいる。他のタイプは、最近相次いで発見されている、島弧系の海底カルデラ²¹⁾や背弧海盆の硫化物である。例えば沖縄トラフの硫化

物は中央海嶺系に伴うものに比べて明らかに鉛、金、銀に富む特徴があることが明らかにされた。特に沖縄トラフ伊是名海穴の硫化物鉱床は陸上の“黒鉱”との成因の類似のほか、規模、貴金属含有量の面で本格的な海底鉱床として有望視されている^{22) 23)}。今後も類似の鉱床が世界各地で発見されるかもしれない。

とはいえ調査が進んでいる中央海嶺系においてさえ、総延長55,000kmのうち系統的調査が実施されたのは1%に満たない²⁴⁾。今後、調査を実施すべき地域は膨大であるといえる。我が国では1984年頃工業技術院地質調査所などによって日本南方域で海底熱水鉱床の研究が始まり、その後、金属鉱業事業団などによって東～南太平洋での探査が実施されている。しかしながら、海底熱水鉱床の調査は、学術研究および商業的探査の両面において緒についたばかりと言ってよいだろう。

4. 終わりに

近年、人類による資源・エネルギーの消費によって引き起こされる地球環境への負荷がより現実的な問題として指摘されるようになり、また金属資源の需要の伸びは以前の予想を下回っている。その流れのなかでは、資源・エネルギーの有限性、原材料の安定供給といった問題は相対的に重要性が低下したかに見える。しかしながら資源の枯渇は次世代の人類にとって許されない問題であり、資源供給は、依然として不可欠、重要な課題であることに変わりはない。将来に向けて、人類は資源の対象を地表及びその近傍から、海洋、地下深部、極地、地球外へと、そのフロンティアを広げざるを得ないであろう。

本稿では次世代の資源目録に加えるべき、マンガン団塊、マンガングラスト、海底熱水鉱床の地球科学的特性を概説した。海洋鉱物資源は、存在量が莫大であるにもかかわらず人類が生存できない海水で隔てられている。この障壁を克服し、また環境に過大な負荷を与えない採取技術が開発されるのは遠い未来ではないかもしれない。そのためには、海洋地質学、海洋化学、海洋物理、海洋生物等の分野の基礎的研究を通じて、開発の事前に海底近傍の実態を充分理解しておくことが不可欠であろう²⁵⁾。

謝辞

最後に、執筆の機会を与您いただいたエネルギー・資源学会関係者に厚く感謝する。また貴重なコメントを頂いた地質調査所海洋地質部、飯笹幸吉博士および中村光一博士に御礼申し上げる。なお、本稿の一部は

「エネルギー・資源ハンドブック」²⁸⁾の解説に加筆したものである。

参考文献

- 1) Archer, A.A. ; Metal Resources in Manganese (or Polymetallic) Nodules. Proc. Indian Natn. Sci. Acad., Vol. 51 (1985), 630-637.
- 2) 岡崎二郎 ; 白の回想, ビッグコミック・オリジナル, 第21巻第21号(1994), 263-286.
- 3) Broadus, J.M. ; Seabed Materials, Science, 235 (1987), 853-860.
- 4) Murray, D.J. and Renard, A.F. ; Deep-sea Deposits, Rep. Sci. Results Explor. Voyage Challenger (1891), pp. 525.
- 5) Mero, J.L. ; The Mineral Resources of the Sea, Elsevier Publ. Co., New York (1993), pp. 312.
- 6) Cronan, D.S. ; Underwater Minerals, Academic Press, London (1980), pp. 362.
- 7) Piper, D.Z. et al. ; Manganese Nodules, Sea Floor Sediment and Sedimentation Rates of the Circum-Pacific Region, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources (1985), One sheet map.
- 8) 米国海洋大気局地球物理データセンター ; Marine Minerals Database, CD-ROM (1992).
- 9) Roonwal, G.S. ; The Indian Ocean : Exploitable Mineral and Petroleum Resources, Springer-Verlag, Berlin (1986), pp. 198.
- 10) Usui, A., Nishimura, A., Tanahashi, M. and Terashima ; Local Variability of Manganese Nodule Facies on Small Abyssal Hills of the Central Pacific Basin, Marine Geology Vol. 74 (1987), 237-275.
- 11) Halbach, P., Friedrich, G. and von Stackelberg, U. ; The Manganese Nodule Belt of the Pacific Ocean, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1988), pp. 254.
- 12) Usui, A. ; Nickel and Copper Accumulation As Essential Elements of Deep-sea Manganese Nodules, Nature Vol. 279 (1985), 411-413.
- 13) Arrhenius, G. and Tsai, A.G. ; Structure, Phase Transformation and Prebiotic Catalysis in Marine Manganate Mineral., Scripps Inst. Oceanogr. Reference Series, No. 81-28 (1985), 1-19.
- 14) Golden, D.C., Dixon, J.B. and Chen, C.C. ; Ion exchange, Thermal Transformations, and Oxidizing Properties of Birnessite, Clays and Clay Minerals, Vol. 34 (1986), 511-520.
- 15) Usui, A., Nishimura, A. and Mita, N. ; Composition and Growth History of Surficial and Buried Manganese Nodules in the Penrhyn Basin, Southwestern Pacific, Marine Geology, Vol. 114 (1993), 133-153.
- 16) von Stackelberg, U. ; Significance of Benthic Organisms for the Growth and Movement of Manganese Nodules, Equatorial North Pacific, Geo-Marine Lett. Vol. 4 (1985), 37-42.
- 17) Clark, A.L. and Johnson, C.J., Co-rich Manganese Crust Potential, Minerals Management Service, U.S. Dept. Interior, No. 85-0006 (1985), pp. 35.
- 18) Manheim, F., Marine Cobalt Resources, Science, VOL. 232, (1986), 600-608.
- 19) 臼井朗・飯俣幸吉・棚橋学 ; 北西太平洋海域鉱物資源分布図, 地質調査所特殊地質図 No. 33 (1994) 多色刷2枚組.
- 20) ロナ, P.A. ; 海底の熱水鉱床, 日経サイエンス (1986) 87-97.
- 21) Iizasa K., Yuasa M., and Yokota S. ; Mineralogy and Geochemistry Of Volcanogenic Sulfides From the Myojinsho Submarine Caldera, the Shichito-Iwojima Ridge, Izu-Ogasawara Arc, Northwestern Pacific," Marine Geology, Vol 108 (1992), 39-58.
- 22) Halbach, P., Nakamura, K. et al ; Probable Modern Analogue of Kuroko-type Massive Sulphide Deposits in the Okinawa Trough Back-arc Basin, Nature, VOL. 338 (1989), 496-499.
- 23) 中村光一・丸茂克美・青木正博 ; 沖縄トラフ伊是名海穴海底熱水鉱床地帯におけるブラックスモーカーと二酸化炭素に富む流体湧出変質帯の発見, 海洋科学技術センター研究報告 No. 6 (1994), 33-50.
- 24) Rona, P.A. and Scott, S.D. ; A Special Issue on Sea-Floor Hydrothermal Mineralization : New Perspectives Economic Geology Vol. 88 (1993), 1935-1975.
- 25) 臼井朗 ; 海底マンガング鉱床の研究-その現状と展望, 地質ニュース, 493号(1995), 30-41.
- 26) 臼井朗・古宇田亮一 ; 未来資源, エネルギー・資源ハンドブック, オーム社, 第11部3編4章5節(1996), 印刷中.
- 27) Johnson, C.J. and Clark, A.L. ; Pacific Ocean Minerals : The Next Twenty Years, In : Pacific Mineral Resources : Physical, Economic, and Legal Issues, East-West Center, Honolulu (1986), 21-39.
- 28) Hein, J.R., Morgenstein, L.A., Clague, D.A., and Koski, R.A. ; Cobalt-rich ferromanganese crusts from the Exclusive Economic Zone of the United States and Nodules from the Oceanic Pacific, In : L Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, Vol. 6 (1987), 753-771.
- 29) Koski, R.A. ; Polymetallic Sulfides in the Pacific Ocean, In : Proc. 5th Circum-Pacific Energy and Minerals Resources Conference : Marine Minerals Workshop, Honolulu, 1990 (in press).