

中央太平洋海盆北部・中部のマンガン団塊
—「深海底鉱物資源探査に関する基礎的研究*」の成果—

臼井 朗** 水野篤行*** 盛谷智之** 中尾征三**

USUI, A., MIZUNO, A., MORITANI, T. and NAKAO, S. (1987) Manganese nodules in the northern and central parts of the Central Pacific Basin—Results of the “Basic Study on Exploration of Deep Sea Mineral Resources”—*Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 38 (10), p. 539-585.

Abstract: Morphological, geochemical, mineralogical characteristics and growth history of manganese nodules of the Central Pacific Basin are summarized in relation to the sedimentary history, based on the five year program, “Basic Study on Exploration of Deep Sea Mineral Resources (FY 1974-1978)” conducted by the Geological Survey of Japan.

Manganese nodules of this area are classifiable principally into the two types, “s” (smooth) and “r” (rough), according to surface structure. The smooth structure is composed of monotonous layers of hydrogenous δ - MnO_2 , containing high Fe, Co, Pb and low Mn, Cu, Ni, Zn, while the rough structure is composed of growth cusps of diagenetic 10 \AA manganate, containing high Mn, Cu, Ni, Zn and low Fe, Co, Pb. Metal contents, inter-element relations, and their relationships to nodule types are consistently interpreted by the mode of development of the two ferromanganese mineral components.

Both types are abundant in case the mean sedimentation rate is low enough, but are barren in areas of high sedimentation rates, i.e., in the vicinity of the Equatorial high-productivity zone and topographic highs above CCD (carbonate compensation depth). Regional distribution of the type-s makes up a high-abundance zone within the pelagic/zeolitic clay area in the northern Central Pacific Basin, as a broad ENE-trended belt of variable width (100-300 km) extending more than 1000 km. The type-s nodules from this zone are generally large in size, great in abundance, high in sea-floor coverage, and have two-layered internal structure. In contrast, the type-r nodules are irregularly distributed in the siliceous surface sediment area of the southern deep-sea basins with variable abundance. Their occurrence are vice versa, and the nodules have a marked concentric internal structure.

Based on a comparative study of nodule internal structure, mineralogy, and radiochemical dating with substrata stratigraphy, it is inferred that internal older nodules of the type-s initiated their growth at the late Miocene age or earlier, forming the vast belt zone during the low-sedimentation condition under the strengthened Antarctic Bottom Water. The younger outermost layers of the type-s nodules and the entire parts of the type-r seem to have been formed during the Quaternary age. Difference of redox conditions in the surface sediments may have controlled the areal variation of nodule mineralogy, resulting in these different nodule types.

* 工業技術院特別研究 (昭和 49-53 年度)

** 海洋地質部

*** 元海洋地質部 (当時上記特別研究のグループ長)
現在山口大学理学部地質学鉱物科学教室

In the aspect of metal reserves, the nodule deposits of this area are worth noting that the type-s shows abundant continuous distribution and moderate enrichment of cobalt though the type-r is less important because of its low abundance and very local distribution.

1. ま え が き

深海底マンガン団塊は銅, ニッケル, コバルトなどの資源として注目され, 1970年頃からその開発に向けての大規模な研究・探査や採掘技術の研究開発が特に太平洋について主要先進国により行われてきた. なかでもハワイ南東方の海域は高品位団塊濃集域 (Manganese Nodules Belt あるいは Clarion-Clipperton Zone, 以下 CCZ と略す) として知られ, 特に米国・西ドイツ・フランスにより大規模な科学調査が行われ, その成果が詳細なデータと共に多数公表されてきた.

しかしながら, 広大な太平洋全体としては, マンガン団塊の諸性質の広域的・局地的変化の様子やその地質環境との関連性は必ずしも明らかにはなっていない. 例えばハワイ南西方の海盆域は“West Basin”とも呼ばれ CCZ と並ぶもう一つの団塊濃集域として期待されてきた (HORN *et al.*, 1972; CRONAN, 1972) もの, 精密な調査データはほとんどないのが現状である. 地質調査所では, 昭和 49-54 年度の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」に際して, West Basin の大部分にあたる中央太平洋海盆北部・中部 (東西 2000 km, 南北 900 km) を研究海域として設定し, 5 回の航海を実施した (第 1 表, 第 1 図, 第 2 図). 各航海では地質学的・地球物理学的総合調査を行い, その全海域についてマンガン団塊の分布・諸性状, 地質・地球物理学的諸性質との関連性の概要を明らかにした.

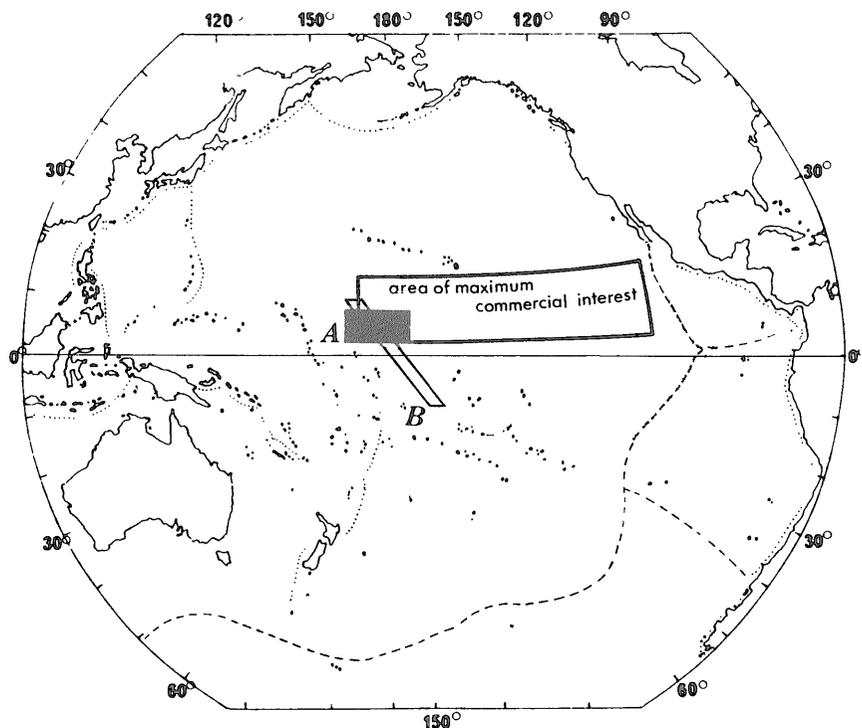
その成果は各航海毎のクルーズレポート (第 1 表) や全海域のマンガン団塊分布図など (石原, 1982; 臼井ほか, 1983) として公表されてきた. また, 全域にわたるマンガン団塊の量的分布の資料は国際的な環太平洋地域地質図計画 (Circum-Pacific Map Project) の鉱物資源図 (Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, 1984) 及びマンガン団塊・堆積物・堆積速度分布図 (同, 1985) に組入れられ, これらは全太平洋底における団塊分布の, よりの確な理解に対して貢献してきた. また上記諸調査を通じて 3.5 kHz SBP (Sub-bottom Profiler) 記録の透明層の発達状況とマンガン団塊の量的分布との間に一定の関連性が見出されたことは, 団塊形成と堆積史との間の関連性を示す好例であるとともに, 団塊の濃集域探査に有効であると評価されている (CRONAN, 1980).

本稿ではこのような分布概要の把握を踏まえて, 団塊そのものについて鉱物学的, 地球化学的性質, 内部構造などを明らかにし, また西ドイツとの共同研究による東太平洋の CCZ の団塊の諸性状との比較考察を含めて, 本海域全体のマンガン団塊分布・産状・諸性質の全体像, 形成過程と地質環境との関連性などの諸問題を総括的に述べる. 従来本海域に関して公表されているマンガン団塊及びその地質環境に関する広域的な地球科学的知識は, 団塊の成因解明の上でも, 同時に探査指針としても充分とは言い難い現状である. このようなことから, 本稿が今後の団塊成因論及び探査のうえでの一つの基礎資料と

第 1 表 中央太平洋海盆における白嶺丸調査航海 (昭和 49-53 年度)

Table 1 Survey program in the northern Central Pacific Basin, F. Y. 1974 through F. Y. 1978, by the R/V Hakurei-Marui.

F. Y. year	Survey area	Survey date	Cruise	Chief scientist	GSJ Cruise Report
F. Y. 1974	5° -10° N, 165° -170° W	August 14 to October 17, 1974 (65 days)	GH 74-5	A. MIZUNO	No. 4 (1975)
F. Y. 1975	5° -10° N, 170° -175° W	January 10 to March 9, 1976 (60 days)	GH 76-1	A. MIZUNO	No. 8 (1977)
F. Y. 1976	5° -10° N, 175° W-180°	January 12 to March 12, 1977 (60 days)	GH 77-1	T. MORITANI	No. 12 (1979)
F. Y. 1977	5° -13° N, 175° E-180°	January 7 to March 7, 1978 (60 days)	GH 78-1	T. MORITANI	No. 17 (1981)
F. Y. 1978	10° -13° N, 165° E-180°	January 13 to March 13, 1979 (60 days)	GH 79-1	A. MIZUNO	No. 15 (1981)



第1図 調査海域位置図 Aは本報告対象地域(昭和49-53年度), Bは第二次5ヶ年計画調査海域。原図はCRONAN(1980)及びPIPER *et al.*(1979)による。破線は中央海嶺系, 点線は島弧海溝系各々のプレート境界を示す

Fig. 1 Location map of survey areas. A: survey area of this five-year program, B: survey area of the program phase II (1979-1983). Base map modified from CRONAN (1980) and PIPER *et al.* (1979). Dotted lines and dashed lines indicate the plate boundaries of the island arc-trench systems and the mid-oceanic ridges, respectively.

して活用されれば幸いである。

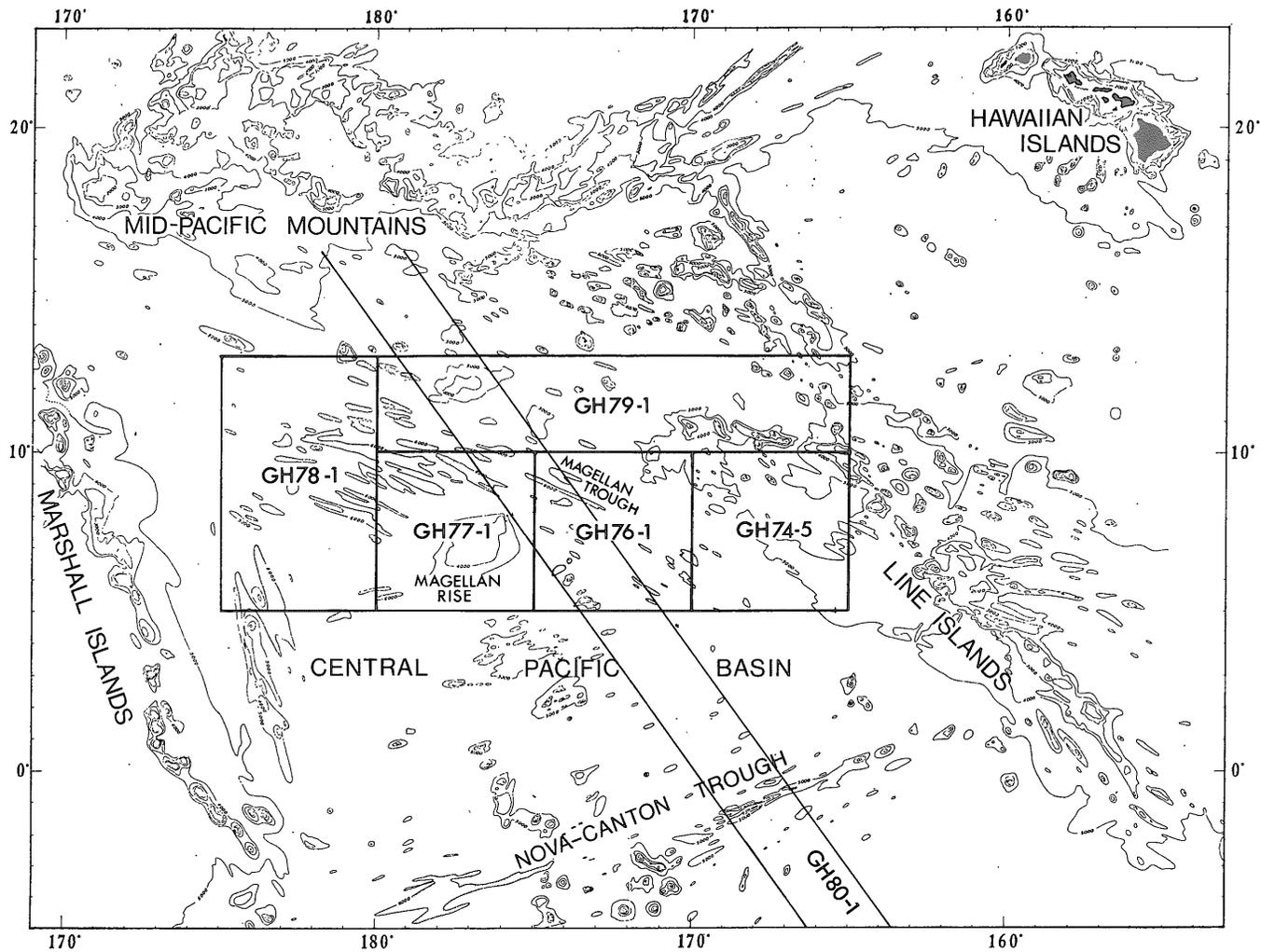
なお、本特別研究終了後、引続き“第2次5ヶ年計画”として『深海底鉱物資源に関する地質学的研究』(昭和54-58年度)が、南北太平洋の延長4000 kmにわたるウェーク・タヒチトランセクトにおいて実施された(第1図; 盛谷, 1983; 水野ほか, 1984)。以下の考察に当たってはその成果の一部を引用した。

2. 研究の方法

本海域においては従来のデータがほとんどなかったため、各航海ではまず調査海域の概査を行った。すなわち経緯度1度(約110 km)間隔の格子点での採泥を基本とし、各点で最低1回のワイヤラインによる採泥(ピストンコア、ボックスコア、オケアングラブなど)と単発カメラ・採泥管付フリーフォールグラブによる団塊採取を近傍の2点以上で実施した。そのほか概査の結果に基づいて、団塊の高濃集が予想された一部の海域では

0.5度(約55 km)またはそれ以下の間隔でのフリーフォールグラブの多点投入、深海カメラまたはテレビによる曳航調査などを行った。海底面上のマンガン団塊の産状・分布はボックスコア、オケアングラブ、フリーフォールグラブ、単発・連続深海カメラなどにより観察した。特にGH 78-1航海以降に使用したダブルスピード型ボックスコア(単発カメラ付き)は船上での扱いが容易でかつ不攪乱堆積物試料が得られるため団塊の産状観察に最適の採泥器であった。フリーフォールグラブは迅速かつ効率的な団塊採取ならびに分布・産状観察に適していた。

船上に揚収された団塊試料については産状、外觀、物理的諸性質の観察・測定を行った。全測点を通じて濃集率(abundance: 単位面積当たりの団塊湿重量; kg/m²)、海底被覆率(coverage: 海底写真などによる団塊の海底面占有率; %)、堆積物上での産状、形態記載、粒径毎の個数と重量、内部構造などに関する船上データ



第2図 調査海域詳細位置図 (GH番号は航海番号. 原図は WINTERER *et al.*, 1973 b による.)

Fig. 2 Detailed location map of survey areas. GH-numbers are research cruise numbers.

を取得した。航海後は化学分析、鉍物分析、内部構造、成長速度などの解析・分析を行った。これらのながれの概要を第3図に、調査・分析の実績を第2表に示す。これらの諸データは数値またはコードとしてマイクロコンピュータに収録されている。

これらの団塊のデータと並行して各測点における堆積物の化学、鉍物学、層序学的検討を加え、また測点を結ぶ測線に沿っては、3.5 kHz SBP 記録、エアガンによる反射法音波探査記録、地磁気・重力データを得た。マンガン団塊に関する諸考察に当たってはこれらのデータを総括的に活用した。

3. 調査海域の地形・地質及びマンガン団塊分布の概要

調査海域は中央太平洋海盆 (Central Pacific Basin) の中-北部、5°N-13°N、175°E-165°W の長方形の範囲である (第2図)。海域北側は中部太平洋海山群 (Mid-Pacific Mountains)、東側はライン諸島海嶺 (Line Islands Chain)、西側はマーシャル諸島 (Marshall Islands) によって概ね境されており、南側では深海盆が同海域の南方へ広く続いている。調査海域の中南部にはマゼラン海膨、そのすぐ北側に西北西-東南東方向のマゼラントラフが走り、深海盆における同様の方向の全体的地形配列と共にこれらが海域の大地形を形づくっている。深海盆の水深は5000-5500 m 程度であり、比高数10 m-数100 m の深海丘を多数伴って大小の起伏に富んでいる。また比高1000 m を越える海山、小海膨が孤立的に点在するほか、ライン諸島海嶺の支脈である Cross Trend Chain の一部が小海嶺として北東部に西北西-東南東に走っている (ONODERA and MIZUNO, 1981)。その他海山などの地形的高まりの基部に近い深海盆では、随所に著しく平坦な地形によって特徴づけられる深海平原 (abyssal plain) が小規模に発達している (付図 A-1 他)。

海底下の基盤は白亜期前期の玄武岩であり、形成時には南半球にあったが、その後のプレートの動きに伴い北西方向に移動し現在の位置を占めるに至っている (WINTERER *et al.*, 1973 a, 1973 b; van ANDEL *et al.*, 1975)。その上位に横たわる堆積層は、本調査の反射法音波探査によると、全域を通じて下位からユニットII、ユニットIに区分され、これらはそれぞれ、本海域内及び周辺における深海掘削データ (Sites 165, 166, 170; WINTERER *et al.*, 1973 b) に次のように対応している (TAMAKI, 1977; MORITANI and MURAKAMI, 1979; TAMAKI and TANAHASHI, 1981)。

ユニット I (主に透明層) — 始新世中期-第四紀の遠洋性堆積物 (遠洋性粘土、放散虫軟泥、石灰質軟泥など) 一部に漸新世後期-始新世中期のタービダイトを含む (層厚: 240 m-20 m)。

ユニット II (不透明層) — 白亜紀後期-始新世中期のチャート、石灰岩、放散虫軟泥、火山性タービダイト、火山性粘土岩、砂岩など、一部では最下部に玄武岩溶岩 (層厚: 190 m-110 m)。

両ユニットのうち、ユニット I は音波探査記録上ではしばしば反射面を伴う透明層によって特徴づけられるが、調査海域を通じて厚さ・相の水平的変化を示している。その音響的性質から A, B, C の3タイプに分けられる (TAMAKI, 1977)。タイプ A は全層透明層からなり、地域的に最も広い分布を示すが厚さの変化は約 300 m-20 m と著しい。全般的には海丘・海山上で薄いが、一方では地形と無関係の変化傾向も随所で認められる。タイプ B は透明層のなかに反射面を比較的疎な間隔で伴うものであり、最上部には薄く透明層を従えることが多い。タイプ C はタービダイトから構成される非常に密な反射面を伴うものであり、最上部には厚さが様々の透明層が発達することが多い。密な反射面が発達する部分は下位のユニット II に対してアバットし、タイプ C の分布域の大部分は深海平原の発達域に一致している。3.5 kHz SBP による透明層は、上述の反射法音波探査記録上の透明層にはほぼ一致する。すなわち、タイプ A ではその大部分、タイプ B, C では最上部の透明層に相当することが多い。

表層堆積物はユニット I の最上部を構成する典型的な遠洋性堆積物である。海山などの地形的高まり上には有孔虫軟泥などの石灰質堆積物が分布する。一方深海盆地については、遠洋性粘土 (一部で沸石質) と珪質粘土 (一部で珪質軟泥) が不規則に入り組んだ分布を示すが、全体的には前者は調査海域の中-北部に広く、後者は中南部に広く分布する傾向を示す。東部の深海平原には石灰質-珪質粘土が比較的広く分布する。

柱状採泥による堆積物コアに関する微化石の研究結果によると海底面及びその直下の堆積物には一般に第四紀の微化石が含まれている。またユニット I が薄いところでは、いくつかのコアのなかに第三紀後期から第四紀の堆積間隙が見出されている (NISHIMURA, 1981; MIZUNO, 1981; 水野・盛谷, 1981; NISHIMURA, 1984)。音響層序のユニット I の各タイプの透明層は遠洋性粘土、珪質粘土/軟泥からなり、またタイプ C の密な反射面の部分は石灰質タービダイトからなることが明らかにされている。

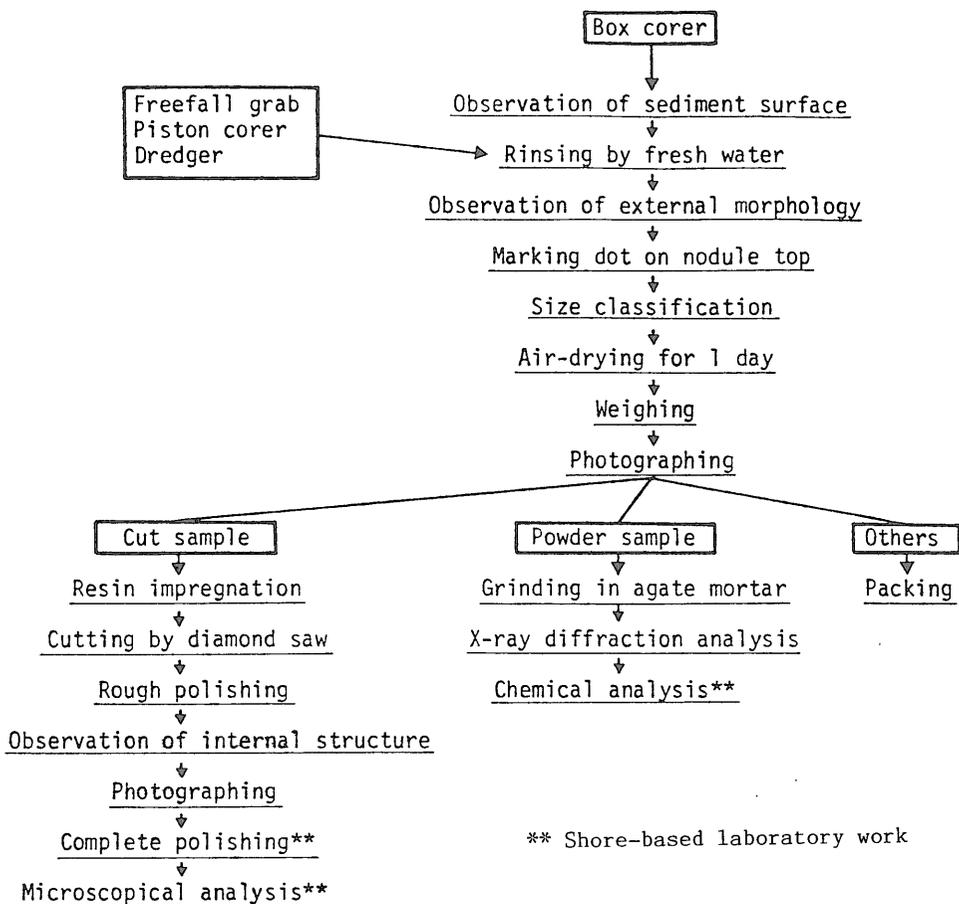
第2表 船上調査及び室内分析の実績

Table 2 Results of ship-board operations and shore-based analyses.

Cruise	Number of stations	Number of available operations						Number of analysis		
		B/G	P	D	FG	FGC	C	Chemistry	Mineralogy	Growth rate
GH 74-5	36	15	—	9	—	—	2	7	—	—
GH 76-1	31	30	6	2	67	—	2	69	27	—
GH 77-1	39	31	5	2	85	75	2	118	—	—
GH 78-1	39	36	—	2	71	64	2	57	55	—
GH 79-1	45	42	5	1	170	122	—	63	48	10
GH 80-1*	17	5	5	1	43	40	—	41	26	—
total	207	159	21	17	436	301	8	355	156	10

*Supplementary data for stations within 5°N-15°N region of the GH 80-1 cruise.

B/G : box core (40×40 cm) or Okean-70 grab (70×70 cm), P : piston core, D : dredge, FG : free-fall grab, FGC : 16 mm one-shot camera with FG, C : 35 mm deep-sea camera.



第3図 本研究におけるマンガン団塊の船上処理及び室内分析の手順

Fig. 3 Procedure of ship-board study and shore-based analysis.

マンガン団塊は調査海域を通じて、一般に 5000-6000 m の深海盆の堆積物上に半埋没の産状を示して、すなわち、堆積物・底層水の境界面に存在する。その濃集率の分布は付図 A-1 に見られるようにかなりの地域的変動を示す。団塊の非分布域も少なからずあり、これは音響層序の上でのユニット I のタイプ C、層厚の大きいタイプ A の分布域、及び著しい地形的高まりにほぼ相当する。このほかには、団塊濃集率分布と海底地形との間には顕著な対応関係は認められない。また団塊の濃集率分布と堆積物との間にも全体としては顕著な対応関係は認められない。海山上には随所にマンガクラストが分布している。以下本報告では、深海盆底のマンガン団塊を扱う。

4. マンガン団塊の諸性質

4.1 形態的分類

海洋底のマンガン団塊が形態的に変化に富むことはチャレンジャー報告 (MURRAY and RENARD, 1891) によってはじめて明らかにされた。その後、系統的な形態分類法が MEYER (1973) によって提案され、MEYLAN (1974), HALBACH *et al.* (1975) らも太平洋の団塊について独自の分類を行った。これらの分類法はいずれも表面構造 (粗; rough または平滑: smooth), 粒径, 形状を基準としている (第3表)。形状は団塊の内部構造をある程度反映しているが、単に核の形状に支配されることも多く、必ずしも団塊の形成過程と関連のない場合もある。一方表面構造については、最近の鉱物学的・化学的研究によって微細成長構造の特徴と鉱物種との間

第3表 マンガン団塊の形態分類法

Table 3 Morphological classification of manganese nodules.

A. Field classification criteria of MORITANI <i>et al.</i> (1977)	
Sr	=s-m(S,E)r
SPr	=s-m(S,E,P)r
SER	=m-1(S,E)r
Db	=m-1(D,D-E)b
Ss/SPs	=s-m(P,S,E)s
DPs	=s-m(D,P,E)s
ISs	=1(S,F)s
V	=s-1(B,F)r,s
B. Field classification criteria of MEYLAN (1974)	
Example : s-m(D)s	
1. Primary morphology	
(S)	=spheroidal
(E)	=ellipsoidal
(D)	=discoidal (or tabular-discoidal)
(P)	= "poly" (coalespheroidal or botryoidal)
(B)	=biological (tooth, vertebra or bone)
(T)	=tabular
(F)	=faceted (polygonal due to angular nucleus or fracturing)
2. Nodule size	
(prefix)	
s	= 3 cm
m	= 3-6 cm
l	= 6 cm
	(maximum diameter)
3. Surface texture	
(suffix)	
s	=smooth (smooth or microgranular)
r	=rough (granular or microbotryoidal)
b	=bortyoidal

第4表 マンガン団塊の濃集率頻度分布 (全有効採泥点)

Table 4 Frequency distribution of nodule abundance (all cruises).

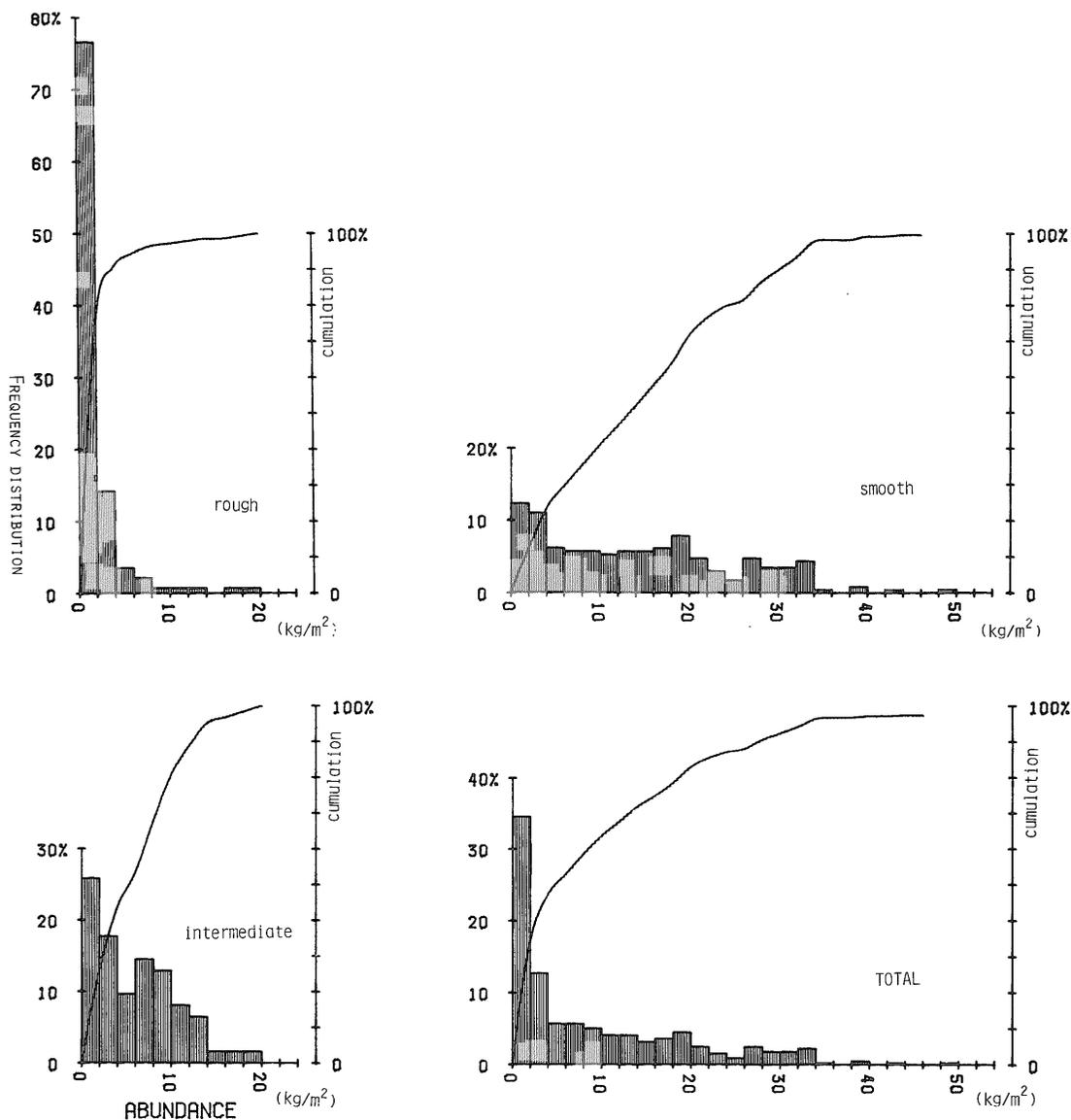
abundance (kg/m ²)	nodule type			total
	s	intermediate	r	
< 1	21*(9.2)	13 (20.9)	89 (63.1)	123 (28.6)
< 5	59 (26.0)	30 (48.4)	131 (92.9)	220 (51.2)
5-10	34 (15.0)	20 (32.3)	6 (4.3)	60 (14.0)
10-15	31 (13.7)	10 (16.1)	2 (1.4)	43 (10.0)
15-20	39 (17.2)	2 (3.2)	2 (1.4)	43 (10.0)
20-25	20 (8.8)	0	0	20 (4.7)
25-30	21 (9.3)	0	0	21 (4.9)
30-35	19 (8.4)	0	0	19 (4.4)
35-40	2 (0.9)	0	0	2 (0.5)
40-45	1 (0.4)	0	0	1 (0.2)
>45	1 (0.4)	0	0	1 (0.2)
total	227 (100%)	62 (100%)	141 (100%)	430 (100%)
median	13.0 kg/m ²	5.5 kg/m ²	0.6 kg/m ²	4.3 kg/m ²

* expressed as numbers of sampling stations.

の対応関係が明らかになり、さらにその関係は海底付近での団塊の形成条件の違いを反映している (臼井ほか, 1978; HALBACH and OZKARA, 1979; USUI, 1979 a, 1983). 従って団塊の表面構造は記載の上でもっとも重要な形態的特徴といえる。

本海域の調査では GH 76-1 航海以降, MEYLAN (1974) の分類法 (第 3 表 B) を簡略化し, 形状と表面

構造を基準とした MORITANI *et al.* (1977) による分類法 (第 3 表 A) を用いた結果, 本海域のほとんどの試料を簡便に分類できた. 既に報告されているように (MORITANI *et al.*, 1977, 1979 a), 基本的には表面微細構造によって r 型 (粗) または s 型 (平滑) のいずれかの形態のタイプに分類される. r 型は長さ数 100 μ m 程度の小突起が全表面に発達した団塊であり, s 型



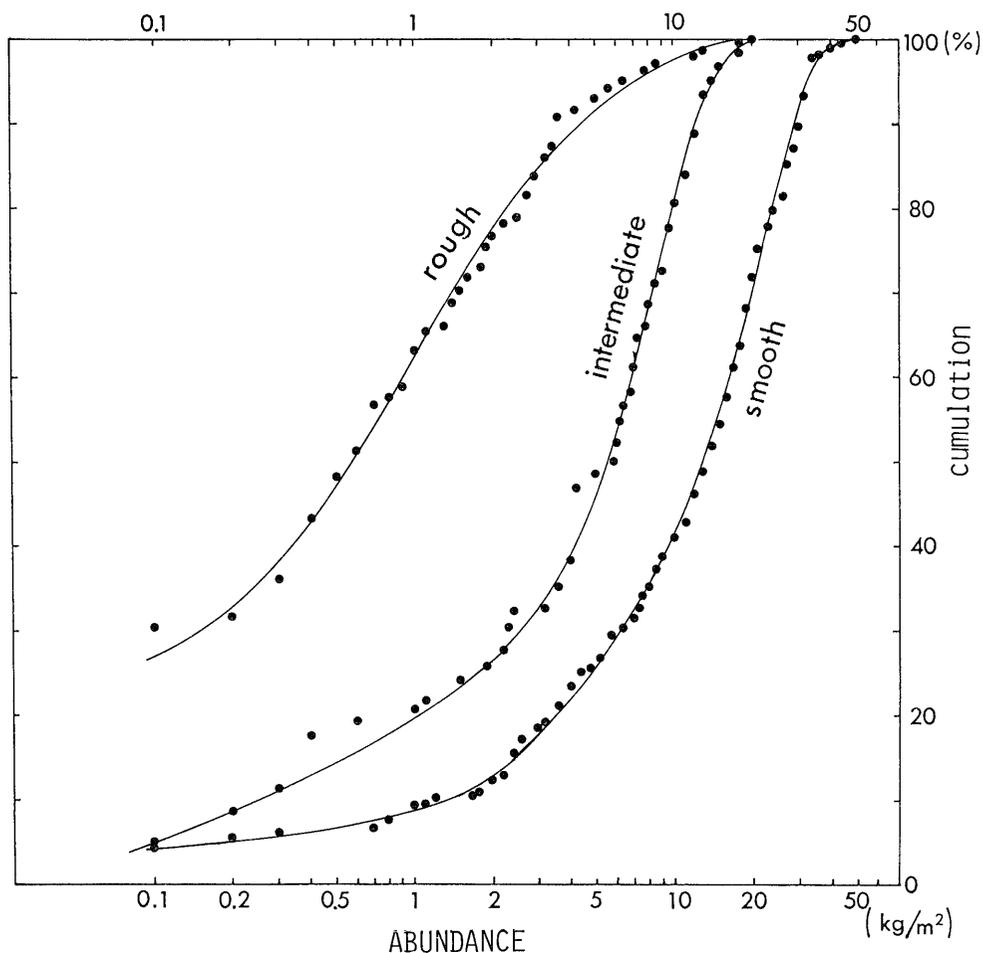
第 4 図 団塊の濃集率の頻度分布及び積算曲線 (頻度は全サンプリング回数を 100% とした)

Fig. 4 Frequency distribution and cumulative curves of nodule abundance. Frequency is calculated according to numbers of samplings.

の表面は若干の起伏はあるが突起の発達はない。両型を通じて多くの場合、表面の特徴が全岩の性質を反映する。しかし、まれには s 型団塊の周囲に若干の粗い薄層が発達するなど、外観的には中間的表面構造をもつものがあるので、このような場合、本稿では s 型 (type s) と r 型 (type r) との中間型 (intermediate type) の区分を便宜的に用いた。以下の各節でふれるが、中間型は、分布域、化学組成、鉱物組成、粒径、濃集率、海底被覆率において中間の特徴を示している。産出頻度については採泥点総数 559 点のうち s 型 275 点 (総数 100% として 49%), r 型 156 点 (27%), 無団塊 (13%) に対して中間型は 56 点 (10%) と少ない傾向がある。

4.2 形態的タイプの広域的分布

さきに団塊の濃集率分布には著しい地域的変動があることを示したが、濃集率の変化はそれぞれの地域の団塊タイプと強く相関している。濃集率が 20 kg/m^2 を超える顕著な高濃集地域はライン諸島寄りの海域北東部、マゼラントラフ北東部、マーシャル諸島に近い南西部にあり、これらの団塊は s 型に限られている (付図 A-1)。濃集率 10 kg/m^2 以上の s 型団塊分布域は幅 100-300 km, 延長 1000 km 以上の広がりを持ち東北東-西南西方向に延びる連続した帯状地域をなす。この分布帯は、局地的には分枝部が地形走向に調和する関係が見られるが、大局的には本海域の海底地形の一般的配列方向とは一致せず、むしろ斜交するように見える。これらの濃集



第5図 団塊タイプ別の濃集率積算曲線 (濃集率は対数目盛)

Fig. 5 Cumulative curves of nodule abundance on a log scale.

帯以外には 10 kg/m² を超える地域はほとんどないが、局地的に狭い範囲に高濃集率の団塊が点在している。この局地的濃集域は孤立した地形的高まりと一致することが多く、タイプはやはり s 型である。

r 型団塊は上記の s 型高濃集地域の南東側の海盆地に広く分布し、その分布域はさらに南東方の赤道付近まで連続している(USUI, 1983)。全般的に濃集率は低く(5 kg/m² 以下)、r 型分布域と無団塊地域が入り組んでいる。海域北西側にも局地的に r 型団塊が認められるがやはり濃集率は低く分布は狭いようである。中間型団塊は主に s 型と r 型の分布域の境界付近に分布しており、その広がりには両型に比べて小さい。

団塊の形態及び濃集率が非常に狭い範囲内で変化する例は海山周辺などの地形・地質が複雑な海域で報告されているが(ANDREWS and FRIEDRICH, 1979; MORITANI *et al.*, 1977; MIZUNO, 1981; USUI *et al.*, 1987)、本地域における両団塊タイプの広域的分布にはおおまかな境界が認められ、局地的変化を考慮しても意味のあるものと判断できる。

4.3 海底面での産状及び堆積物との関係

一般にマンガン団塊が堆積物表面に濃集していることはよく知られている。もっとも団塊が海底下の堆積物に深く埋没して産することもまた珍しいことではなく、本調査で得られた 7 m 長のピストンコア 21 本のうち 3 本

第5表 海底写真によるマンガン団塊の海底被覆率

Table 5 Sea floor coverage of nodules revealed by sea-bed photographs.

coverage (%)	nodule type			total
	s	intermediate	r	
< 9	6* (4.4)	7 (22.6)	59 (78.7)	72 (29.8)
10-19	4 (2.9)	4 (12.9)	10 (13.3)	18 (7.4)
20-29	5 (3.7)	6 (19.4)	1 (1.3)	12 (5.0)
30-39	6 (4.4)	6 (19.4)	3 (4.0)	15 (6.2)
40-49	11 (8.1)	2 (6.5)	0	13 (5.4)
50-59	19 (14.0)	1 (3.2)	0	20 (8.3)
60-69	20 (14.7)	1 (3.2)	2 (2.7)	23 (9.5)
70-79	44 (32.7)	2 (6.5)	0	46 (19.0)
80-89	19 (14.0)	1 (3.2)	0	20 (8.3)
> 90	2 (1.5)	1 (3.2)	0	3 (1.2)
total	136 (100%)	31 (100%)	75 (100%)	242 (100%)
median	68%	27%	5%	43%

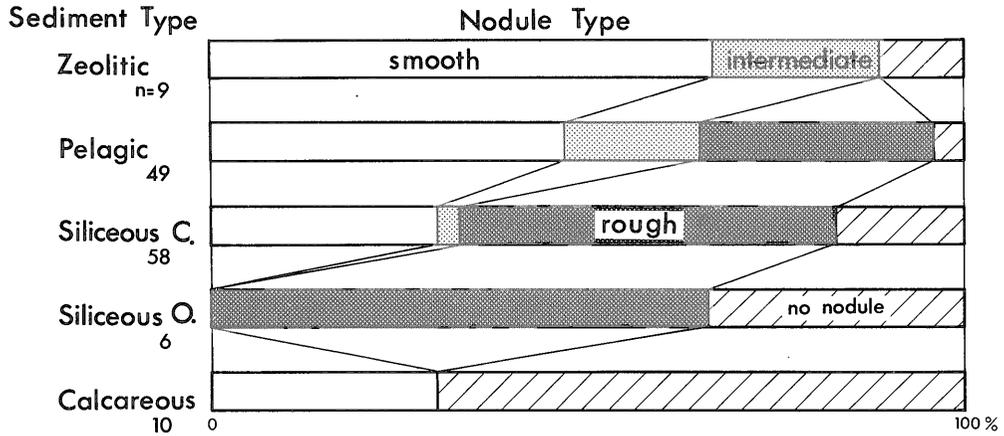
* expressed as numbers of sampling stations.

第6表 マンガン団塊の粒径分布(個数)

Table 6 Size distribution of manganese nodules (number of samples).

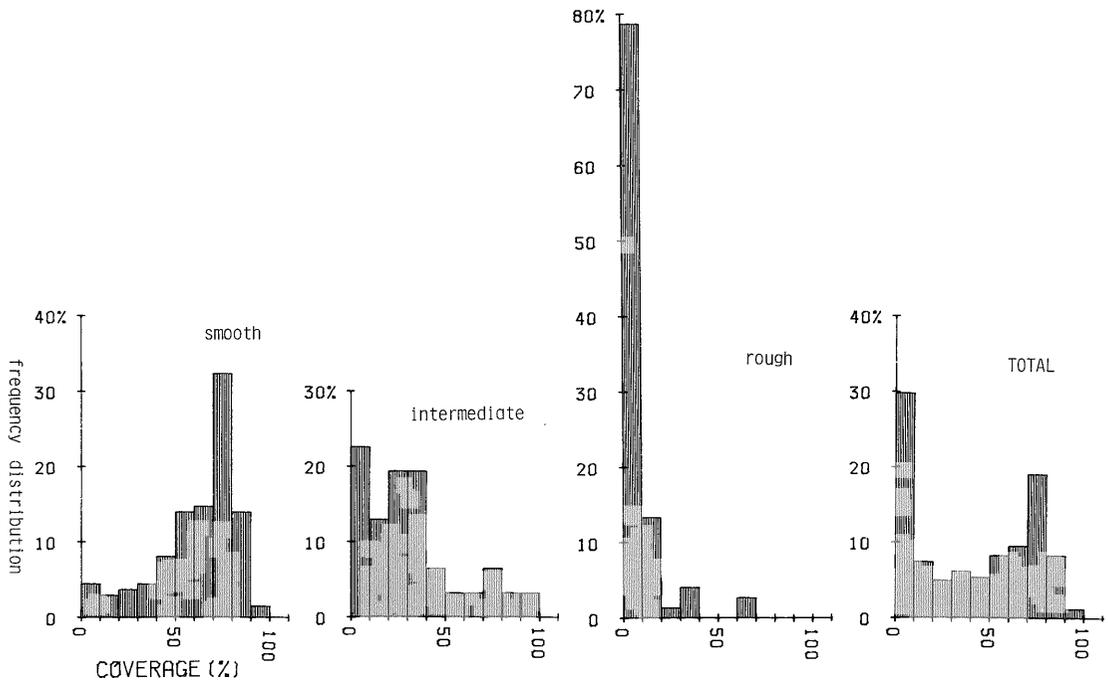
size (long axis in cm)	nodule type			total
	s	intermediate	r	
> 8	106* (0.3)	25 (0.4)	26 (0.4)	157 (0.3)
6-8	647 (2.1)	48 (0.7)	25 (0.4)	720 (1.6)
4-6	4495 (14.3)	498 (7.3)	187 (2.7)	5180 (11.4)
2-4	16445 (52.2)	2773 (40.6)	1782 (25.8)	21000 (46.4)
1-2	8650 (27.4)	2478 (36.3)	2865 (41.5)	13993 (30.9)
< 1	1167 (3.7)	1002 (14.7)	2022 (29.3)	4191 (9.3)
total	31510	6824	6907	45241
mode	2-4 cm	2-4 cm	1-2 cm	2-4 cm
median	2.7 cm	2.0 cm	1.5 cm	2.4 cm
number of samplers	227	62	141	430

* expressed as number of nodules.



第6図 団塊タイプと表層堆積物タイプとの関係 (nはデータ数)

Fig. 6 Relationship between occurrence of nodule types and surface sediment type.
n : number of data.



第7図 団塊の海底被覆率の頻度分布 (頻度は全サンプリング回数を100%とした)

Fig. 7 Frequency distribution of sea floor coverage of nodules on the basis of sea-bed photographs.

において数 m の深度に団塊が産する。深海掘削のコアからでは海底下 200-300 m のジュラ紀堆積物に伴って産する例もある (GLASBY, 1978) が, 本海域の海底面近くでは一般例と同様, 圧倒的に最表層に濃集していることに疑いはない。オケアングラブ・ボックスコアラ (貫入長約 30 cm) による 159 点の採泥のうち 92 点でマンガン団塊が採集されたが, 海底下 30 cm までに埋没して産するものはわずか 3 点であった。

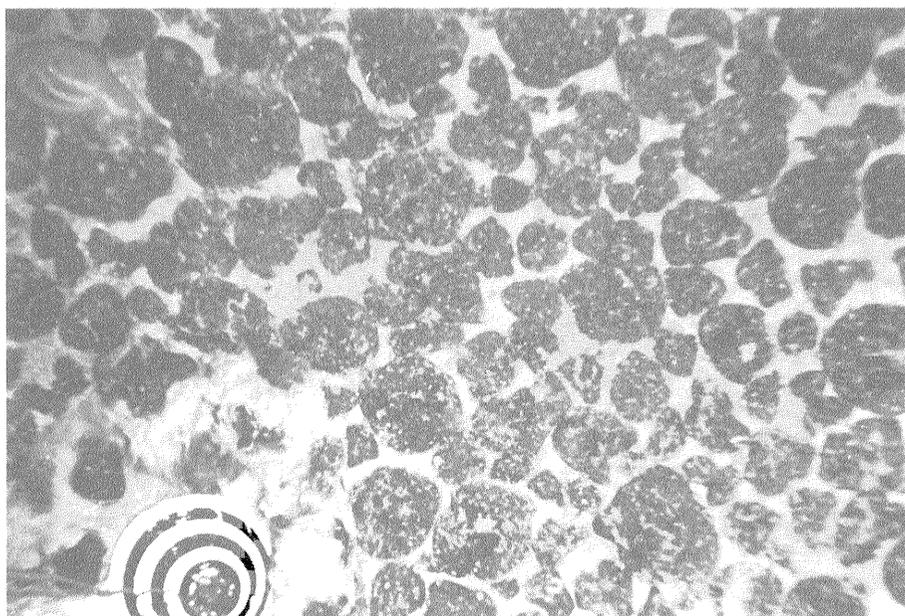
これらの堆積物最表層には s 型・r 型・中間型が認められるが, 濃集率は団塊のタイプによって異なることが明らかにされた。濃集率は一般に r 型団塊で低く, s 型で高い。r 型の産する採泥点のうち, 4 kg/m² を超えるものは 10% 以下であるのに対し, s 型では 75% を超える。s 型では 10 kg/m² を超えるものが約 60% で最大値は 40 kg/m² に達する。中間型では 4 kg/m² を超えるものが約 50% で, s 型と r 型の中間的性格を示す (第 4 表, 第 4, 5 図)。

深海カメラ, ボックスコアラなどによる海底面の産状観察の結果によれば, 埋没状態, 海底被覆率, 随伴堆積物も, 団塊タイプに対応して異なっている (第 5 表, 第 6, 7 図, 付図 A-4)。s 型は例外なく海底に露出しており, 少なくとも上半部は直接底層水と接触している。粒径の

大きいものや不規則な形状を持つものでは下部の堆積物との接触面が部分的に粗い表面構造を持つ場合が稀にある。一般には海底面では比較的粒度の揃った団塊の単一層として存在する (第 8 図)。被覆率は 40-80% が優勢で, 最大 90% に達する。伴う堆積物は深海粘土, 沸石質粘土が多い。一方, r 型は海底面から数 cm 以内の未固結堆積物中に埋没する傾向にあるので, カメラでは十分に確認できないことが多い (第 9 図)。r 型の場合でも濃集率が高い (約 5 kg/m² 以上) 場合は, 団塊がカメラで確認されることがあるが, この場合でも団塊上部を薄く堆積物が覆っていることが多い。r 型団塊の被覆率は s 型とは対照的であり, 濃集率の多少にかかわらず 10% 以内が圧倒的に多い (第 7, 9 図)。r 型団塊に伴う表層堆積物は一般に珪質粘土または珪質軟泥であり, 表層堆積物の含水比は非常に高い (300-400%; TSURUSAKI and HANDA, 1981)。第 10 図には団塊高濃集域 (ほぼ s 型分布域と一致), 低濃集域 (ほぼ r 型分布域と一致), 及び上述の表層堆積物タイプとの関連性が示されている。

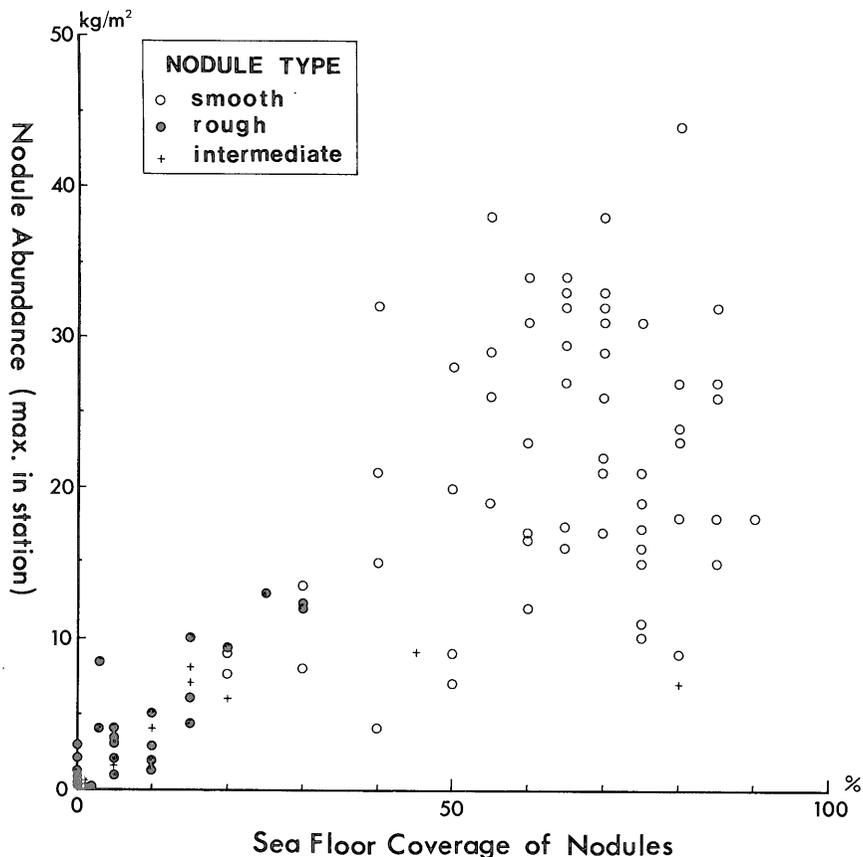
4.4 形状, 核, 粒径など

本海域の団塊の形状は球状, 扁平状, 不規則塊状及びそれらが連結した形状など変化に富む。球状, 扁平状の



第 8 図 フリーフォールグラブに装着した海底カメラによる s 型団塊の産状 (左下は着底スイッチ用おもり, 径 10 cm. 左上は底棲動物)

Fig. 8 Sea-beds occurrences of s-type nodules as revealed by one-shot deep-sea cameras. Size of the marker in the lower left corner is ca. 10 cm in diameter. Benthic animal is observed in the upper left corner.



第9図 濃集率と海底被覆率の関係 (団塊の形状、粒径分布、埋没状態、採泥器の作動状況などによって変化するため直線関係は得られない)

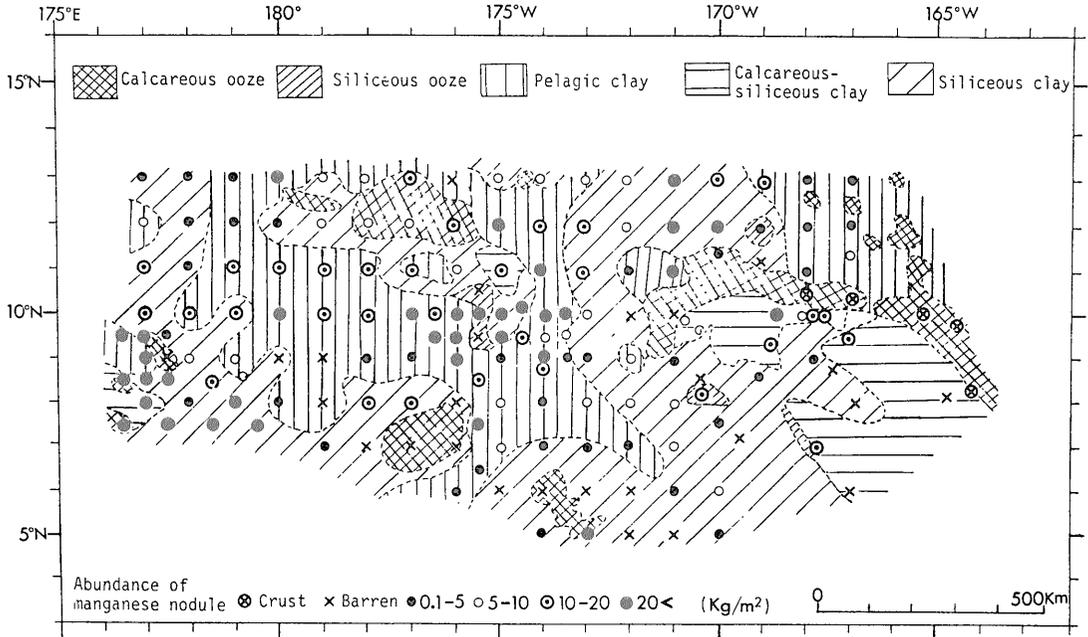
Fig. 9 Relationship between nodule abundance and seafloor coverage. Plots are dispersed because of differences in nodule shape, size, and rarely wrong operation of samplers.

団塊はCCZの団塊と共通しているが、CCZに特有のいわゆる“ハンバーガー状”(扁平楕円体で表面が粗いもの)団塊は本地域では見られない(Usui and Mita, 1987)。逆に不規則塊状のs型団塊が本地域で特有である。後述する内部構造の観察により、この形状は古期の団塊が放射状の割れ目を伴って破片化した結果であることが判明した。r型団塊は一般に球状ないしその連結した形状をもつ。第11図に典型的なs型、r型団塊の外観を示す。

団塊は核を持つことが多く、一般に核の形状によって形状が規制される。ただし古期団塊破片の周囲にさらに酸化物層が発達した二重構造を持つ団塊では岩石の核がない場合もある。核の多くは沸石質(主に灰十字沸石、ときに斜アチロル石)又は粘土質(主にスメクタイト)

の不規則形状の岩片である。ほかにチャート、玄武岩、化石(サメの歯、鯨の耳石など)なども認められる。s型では不規則で大きい岩片の場合が多く、r型では一般に小さい。核を構成する物質は一般に表層堆積物とは異なる。また酸化物層の層間や亀裂内部には鉱物粒子、微化石、宇宙塵など様々な起源の物質が取り込まれている。

団塊の粒径は最大40cm以上(長径)から1mm以下のマイクロジュールまで広い分布を示すが、全体的には2-4cmが個数及び重量で卓越する(第6表、第12、13図)。粒径頻度分布の特徴も他の性質と同様、団塊タイプによって異なっている。s型団塊では2-4cmが圧倒的に多く全個数の50%を超え、1cm以下は5%未満である。同一のサンプラーの団塊では比較的粒度が揃っている。全s型団塊での粒径中央値は2.7cmであ

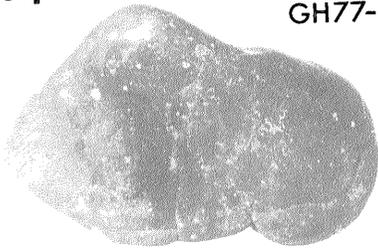


第10図 団塊濃集率と表層堆積物分布図 (MIZUNO. *et al.*, 1980)

Fig. 10 Distribution of nodule abundance and lithologic types of surface sediments.

Type S

GH77-1-G383

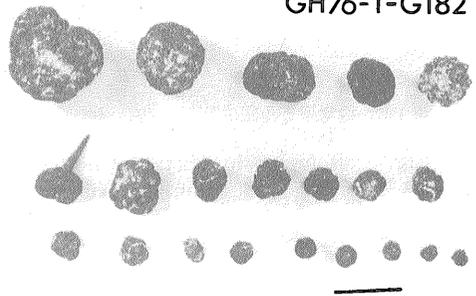


GH76-1-G171'



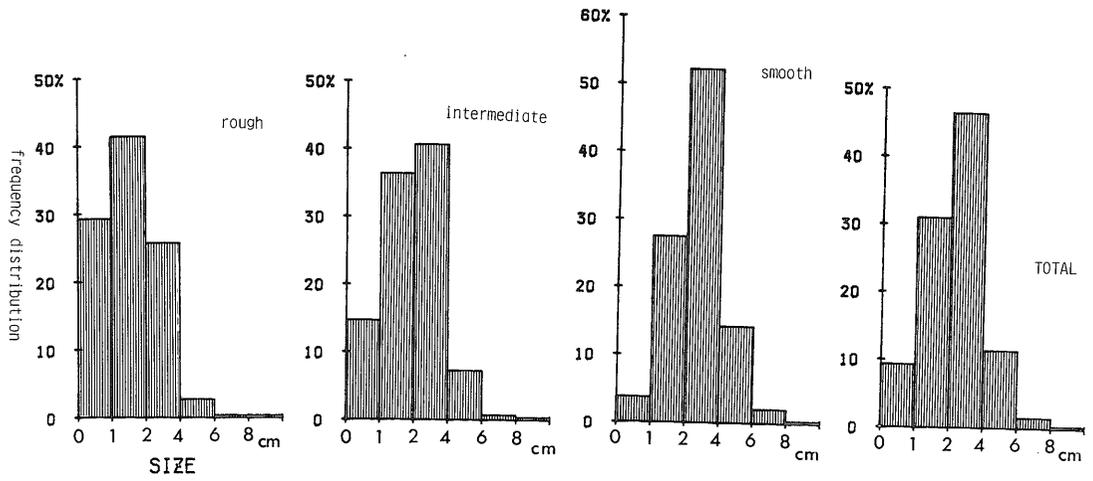
Type r

GH76-1-G182

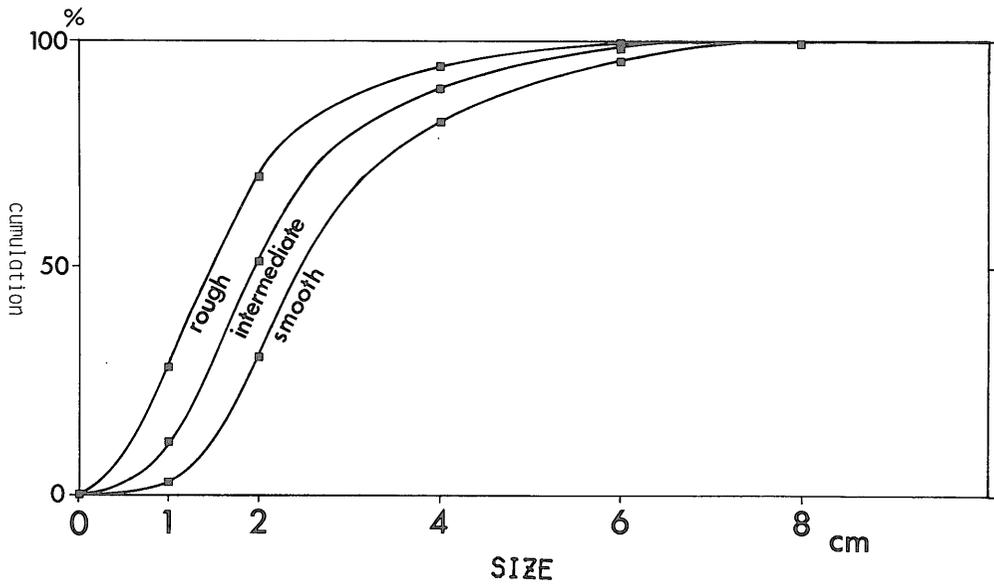


第11図 団塊の典型的表面構造と形状 (スケールは1cm)

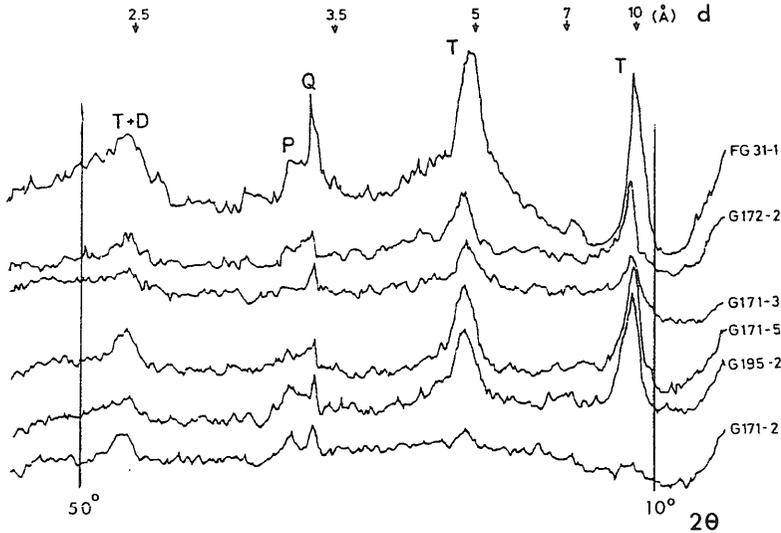
Fig. 11 Typical surface structure and shape of nodules of types s and r. Scale bar: 1 cm.



第12図 粒径分布（全団塊試料の長径に基づいて個数百分率で示す）
 Fig. 12 Frequency distribution of nodule long axis based on number percent.



第13図 団塊タイプ別粒径分布積算曲線
 Fig. 13 Cumulative curves of frequency distribution of nodule size.



第14図 粉末X線回折像(Cu K α) 上から5試料は10Å manganate (T)に富む試料, 最下段は δ -MnO $_2$ (D)に富む試料. Qは石英, Pは斜長石又は灰十字沸石の最強ピークを示す

Fig. 14 Typical X-ray powder diffraction patterns of manganese nodules (Cu K α radiation). 10 Å manganate (T) dominates in the upper five samples and δ -MnO $_2$ (D) in the last sample. "Q" indicates the strongest peak of quartz, and "P" plagioclase and/or phillipsite.

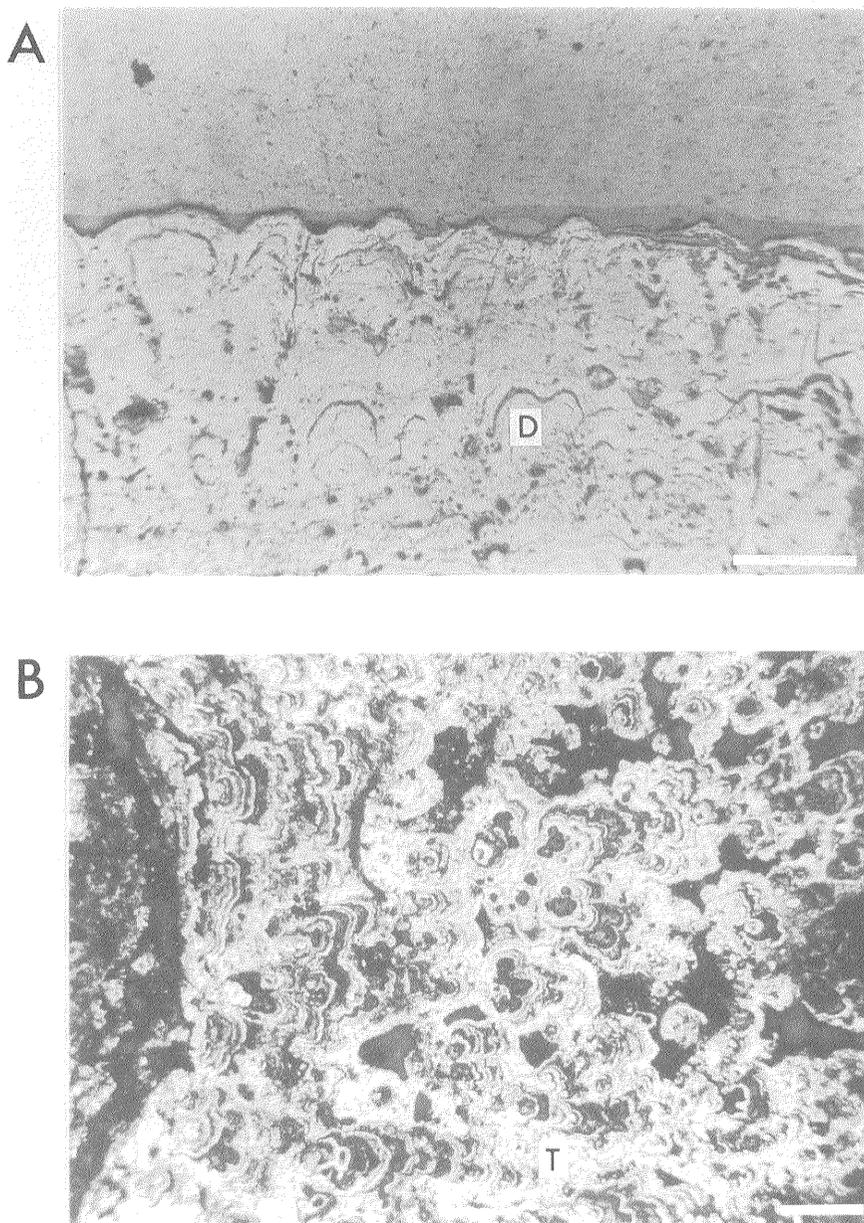
る。大型団塊分布域とs型の高濃集域とは良く一致する(付図A-5)。r型団塊では1-2cmが最頻値であり、2cm以下の団塊が70%を超える。中央値は1.5cmでs型に比べ小さいことが特徴である。同一サンプラー中に3-4cmから数mm以下の各サイズの球状団塊が産することがしばしばあり、マイクロジュールに漸移するように見える。マイクロジュールに関する鉱物分析、化学分析の結果(FRIEDRICH, 1976; HISHIDA and UCHIO, 1981; UCHIO and HISHIDA, 1981; UCHIO, 1982)はr型団塊のそれと類似しており、両者の成因的共通性を示唆している。

マンガン団塊の比重は濃集率・金属含有量算定の上で重要な値である。GH 76-1及びGH 77-1航海で湿比重を測定した結果(MORITANI *et al.*, 1977, 1979b)では、ほとんどの試料が1.9-2.1の間に集中し、団塊タイプによる有意な差は認められない。

4.5 鉱物組成及び微細構造

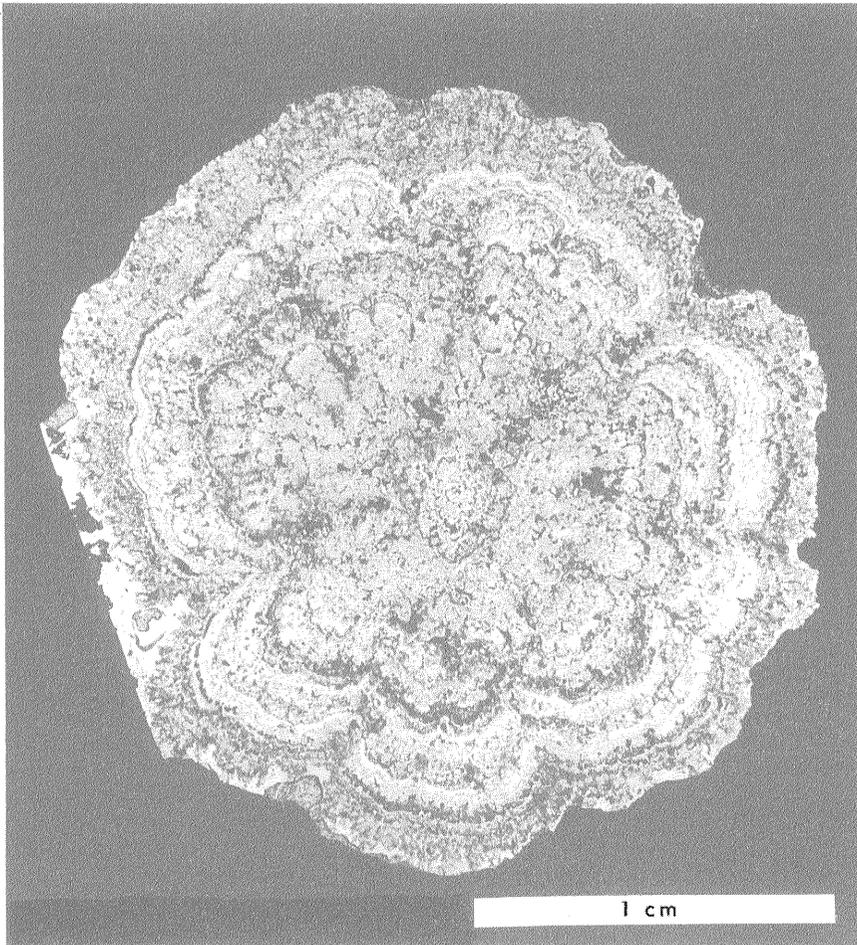
海底に産するマンガン鉱物の同定には様々な困難な問題があり、鉱物名についても統一の見解がないのが現状である(BURNS and BURNS, 1977)。その理由は鉱物粒子が極めて小さいこと、加熱や脱水によって変化する

場合があること、結晶性が低いことなどである。しかし基本的にはBUSER and GRÜTTER (1956)が最初に記載した10Å manganate (10Å manganite, todorokite, busseriteとも呼ばれる)、7Å manganate (7Å manganite, birnessiteとも呼ばれる)、 δ -MnO $_2$ (vernaditeとも呼ばれる)の3種に限られる。ただし、7Å manganate系鉱物は熱水起源のマンガン酸化物(LONSDALE *et al.*, 1980)や堆積物中のマイクロジュール(GLOVER, 1977)などの特殊な産状を示す場合が多く、典型的な深海産マンガン団塊からの報告はほとんどない。本海域のマンガン団塊からは7Å manganate系マンガン鉱物は全く認められなかった。X線回折パターン(第14図)上では10Å, 5Å近傍のピークが10Å manganate(本稿ではArrhenius, 1979に従ってこの名称を採用する)に特有であり、2.4Å及び1.4Å近傍のピークは δ -MnO $_2$ (以下 δ -MnO $_2$ は2.4Å, 1.4Åの回折線2本型のものを目指す)と10Å manganateの両者に共通する。従ってX線回折法のみによって団塊中の δ -MnO $_2$ の有無を知ることは困難な場合があるが、反射顕微鏡観察を併用することによって上述の2鉱物の確実な同定ができる。



第 15 図 反射顕微鏡写真 (A 図は s 型団塊の上部表面, B 図は r 型団塊の内部から表面の一部で右方向が表面. 写真中の T, D は各々 10 \AA manganate, $\delta\text{-MnO}_2$ を示す. スケールは $20 \mu\text{m}$)

Fig. 15 Micrographs of nodule mineral components under reflecting microscope. A : upper surface of a s-type nodule, B : surface and interior of a r-type nodule (nodule surface is in the right side). T and D indicate 10 \AA manganate and $\delta\text{-MnO}_2$ phases, respectively. Scale bar : $20 \mu\text{m}$.



第16図 r型団塊の内部構造の一例 (同心円構造は 10\AA manganeseの微細成長組織の発達によるもの)
Fig. 16 Typical cross section of a r-type nodule composed of 10\AA manganese layers.
Photographed under reflecting light.

この2鉱物についての粉末X線回折分析, 顕微鏡観察, X線マイクロプローブ分析などの結果により, 両者は鉱物化学的に顕著な差異があるだけでなく, 生成環境の違いを反映して各々特有の微細構造を形成することがわかってきた(臼井ほか, 1978; Usui, 1979 a). $\delta\text{-MnO}_2$ は鉄及びマンガン酸化物のコロイドとして直接沈殿した鉱物であり, 第15図Aに示すように若干の起伏を伴った成層構造を呈し, s型団塊の特徴である平滑表面構造を形成する. 一方 10\AA manganeseは生物起源の有機物を含有する表層堆積物の初期続成作用の過程で間隙水から再沈殿した鉱物と考えられており(Usui, 1979 a, HALBACH and ÖZKARA, 1979), 第15

図Bに示すように1mm以下の多数の突起からなる樹枝様の構造を呈し, r型団塊の特徴である粗い表面構造を形成する. 産状においては, 団塊表面を特徴づける平滑(s), 粗(r)の表面構造はそれぞれ団塊と海水の境界面, 団塊と堆積物の境界面に発達する. この, 鉱物と微細構造との対応関係は表面に限らず, 団塊内部にも同様にあてはまり, さらに本海域全体の団塊に共通して認められ, 例外はほとんどない.

4.6 内部構造

上述したように2鉱物は, 反射顕微鏡下で光学的性質に基づいて識別される. また団塊の内部には成長過程での表面構造(鉱物組成)の変遷が記録されているのでそ

第7表 世界各地のマンガン団塊の平均化学組成と本海域団塊との比較

Table 7 Comparison of average chemical compositions of manganese nodules in the world oceans.

	NE Pacific Manganese Nodule Belt	Pacific Nodules	World Ocean Nodules	This study*			
	HEIN (1977)	CRONAN (1980)	CRONAN (1980)	mean	s. d.	max.	min.
Mn	26.6	19.8	16.0	19.77	3.98	32.18	7.33
Fe	6.4	12.0	15.6	10.15	3.07	16.94	3.30
Cu	1.05	0.39	0.26	0.60	0.33	1.80	0.11
Ni	1.25	0.63	0.48	0.70	0.28	1.72	0.25
Co	0.24	0.34	0.28	0.25	0.08	0.54	0.09
Pb	0.050	0.085	0.090	0.058	0.022	0.124	0.010
Zn	0.13	0.068	0.078	0.081	0.038	0.260	0.067
Cu+Ni+Zn	2.43	1.09	0.82	1.39	0.64	3.67	0.41
Cu+Ni+Co	2.54	1.36	1.02	1.56	0.56	3.61	0.50
Mn/Fe	4.18	1.65	1.03	2.30	1.37	9.68	0.69
(Cu+Ni+Zn)/Mn	0.091	0.055	0.051	0.068	0.020	0.120	0.032
Cu/Ni	0.84	0.62	0.54	0.81	0.15	1.33	0.38
Pb/Fe	0.0078	0.0074	0.0058	0.0056	0.0011	0.0110	0.0012
Co/Fe	0.038	0.028	0.018	0.025	0.005	0.052	0.008
H ₂ O±	—	—	—	21.2	2.8	26.9	11.8

* based on 344 analysis for air-dried samples.

の成長史を読み取ることが可能である。事実、いくつかの団塊の内部には各成長段階を反映した明らかな鉱物相の違いが認められる場合がある。鉱物の形成後団塊内部で若干の再沈殿が生じるという報告もあるが (BURNS and BURNS, 1978), 本海域の試料では団塊内部で著しい元素移動を示す組織は見られないので、全般的には団塊の核から表面に向かって団塊の層序を考えてよいと思われる。例えば大部分の r 型団塊は核から表面まで粗い構造つまり 10 Å manganate の小突起構造からなり、全成長期間を通じて 10 Å manganate が生成する環境にあったことを示している。切断面には単純な同心円構造が肉眼的に認められる (第 16 図に一例)。また s 型団塊では内部にも同等な平滑な構造つまり δ -MnO₂ の成層構造が普通に認められるが、s 型には本海域を通じて明瞭な二つの成長ステージがみられることが一つの特徴となっている。すなわち、内部には δ -MnO₂ のみから成る古期団塊及びその破片が含まれ、その周囲は 2-5 mm 厚の層によって包まれる。周囲の外層は主に δ -MnO₂ から成るが、時に 10 Å manganate の薄層が挟在したり、団塊表面の一部を被覆することもある。古期団塊には著しい亀裂の発達が見られ破片化が進んでいる。この二重構造は団塊成長過程の不整合を示し、いわば団塊成長における“ハイアタス”といえる。全海域を通じて認められた s 型の二重内部構造の共通性は、古期団塊がより新しいステージの外層形成以前に海底環

境の変化を受け、広い範囲でほぼ同時期に破片化したことを示唆する。

4.7 化学組成

マンガン団塊の化学組成については、各航海毎に分析法、結果とも既に公表されている (FUJINUKI *et al.*, 1977; MORITANI *et al.*, 1979 b; NAKAO *et al.*, 1981; MOCHIZUKI *et al.*, 1981; 寺島, 1978)。分析は風乾試料をベースとして、Mn, Fe, Cu, Ni, Co, Pb, Zn (以上原子吸光分析法)、H₂O± (ペンフィールド管による加熱減量) について行われた。一般には 110°C 乾燥試料をベースとした分析値として報告されているので、他の分析値と比較する際には注意を要する。

世界的に見てマンガン団塊の化学組成は産地、産状、形態などの変化に伴って大きく変動することが特徴である。この変動には海域による特徴、形態との関係、表面構造との関係、団塊内部での顕微鏡スケールの変化などがあり、いずれも同程度の大きな変動幅を持つ。しかし一つの採取地点から得られたサンプル間では、個々の試料内部に大きな変動があっても全岩としては共通の形成史をもつため、個体間の化学組成は類似する傾向がある。SOREM *et al.* (1979) は東太平洋産団塊の Ni, Cu の測点間変動係数 (σ/x) は 10% 程度と報告している。

本海域のマンガン団塊の化学組成もまた地域的に大きく変動することが特徴である (付図 A-2, 3)。例えば Mn/Fe 比では最大 9.7, 最小 0.7 と大きく変化し、全

第8表 マンガン団塊のタイプ別化学組成

Table 8 Chemical composition of three types of manganese nodules of this study.

type s (n=219)

	mean	s. d.	v. c.	max.	min.
Mn	17.97	2.38	0.13	22.95	7.33
Fe	12.00	1.90	0.16	16.94	6.40
Cu	0.41	0.14	0.34	1.17	0.11
Ni	0.54	0.13	0.23	1.04	0.25
Co	0.29	0.07	0.24	0.54	0.09
Pb	0.069	0.017	0.25	0.124	0.010
Zn	0.062	0.014	0.23	0.133	0.027
Cu+Ni+Zn	1.00	0.26	0.26	2.31	0.41
Cu+Ni+Co	1.23	0.24	0.20	2.40	0.50
Mn/Fe	1.53	0.30	0.20	2.89	0.69
(Cu+Ni+Zn)/Mn	0.056	0.013	0.22	0.103	0.032
Cu/Ni	0.74	0.11	0.15	1.20	0.38
Pb/Fe	0.0057	0.0009	0.16	0.0105	0.0012
Co/Fe	0.024	0.004	0.16	0.036	0.008
H ₂ O±	22.2	2.7	0.12	26.9	11.8

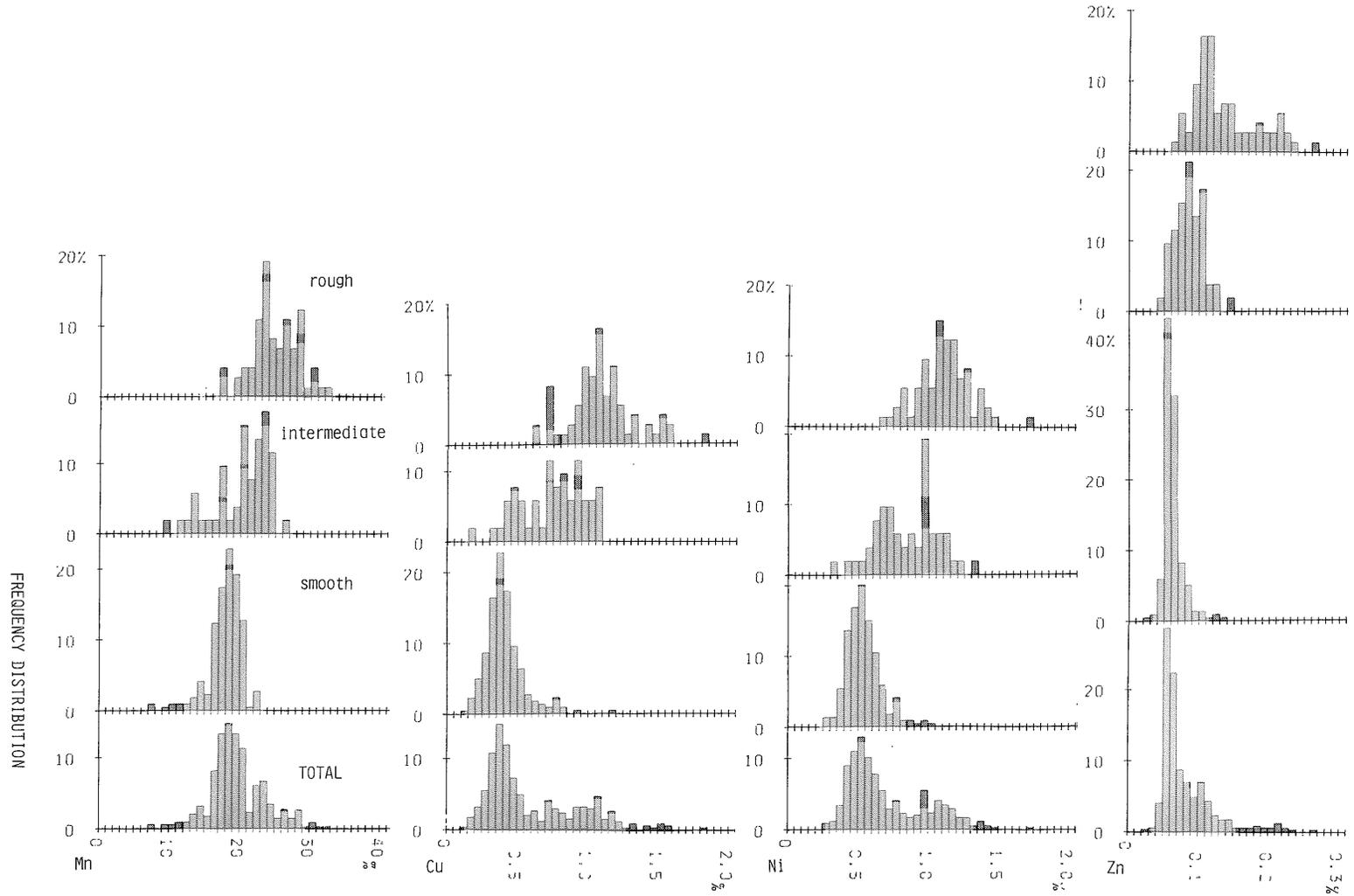
intermediate (n=52)

	mean	s. d.	v. c.	max.	min.
Mn	20.36	3.93	0.19	26.88	9.25
Fe	8.16	1.64	0.20	13.34	5.29
Cu	0.74	0.22	0.29	1.08	0.19
Ni	0.84	0.21	0.25	1.30	0.34
Co	0.21	0.05	0.24	0.34	0.09
Pb	0.046	0.015	0.33	0.100	0.012
Zn	0.086	0.021	0.24	0.144	0.048
Cu+Ni+Zn	1.67	0.44	0.26	2.51	0.58
Cu+Ni+Co	1.79	0.43	0.24	2.57	0.84
Mn/Fe	2.60	0.79	0.30	4.58	0.99
(Cu+Ni+Zn)/Mn	0.082	0.013	0.15	0.106	0.042
Cu/Ni	0.88	0.11	0.12	1.10	0.56
Pb/Fe	0.0057	0.0014	0.25	0.0110	0.0013
Co/Fe	0.026	0.005	0.19	0.036	0.010
H ₂ O±	20.2	2.0	0.10	23.8	14.5

type r (n=73)

	mean	s. d.	v. c.	max.	min.
Mn	24.76	3.47	0.14	32.18	14.47
Fe	6.02	1.26	0.21	9.59	3.30
Cu	1.09	0.24	0.22	1.80	0.61
Ni	1.10	0.19	0.17	1.72	0.69
Co	0.17	0.03	0.17	0.23	0.09
Pb	0.032	0.011	0.33	0.057	0.013
Zn	0.135	0.045	0.33	0.260	0.067
Cu+Ni+Zn	2.32	0.43	0.18	3.67	1.37
Cu+Ni+Co	2.36	0.40	0.17	3.61	1.49
Mn/Fe	4.38	1.42	0.32	9.68	1.55
(Cu+Ni+Zn)/Mn	0.094	0.011	0.11	0.120	0.069
Cu/Ni	0.98	0.10	0.10	1.33	0.78
Pb/Fe	0.0053	0.0014	0.26	0.0084	0.0028
Co/Fe	0.028	0.006	0.21	0.051	0.016
H ₂ O±	18.6	1.5	0.08	22.7	13.6

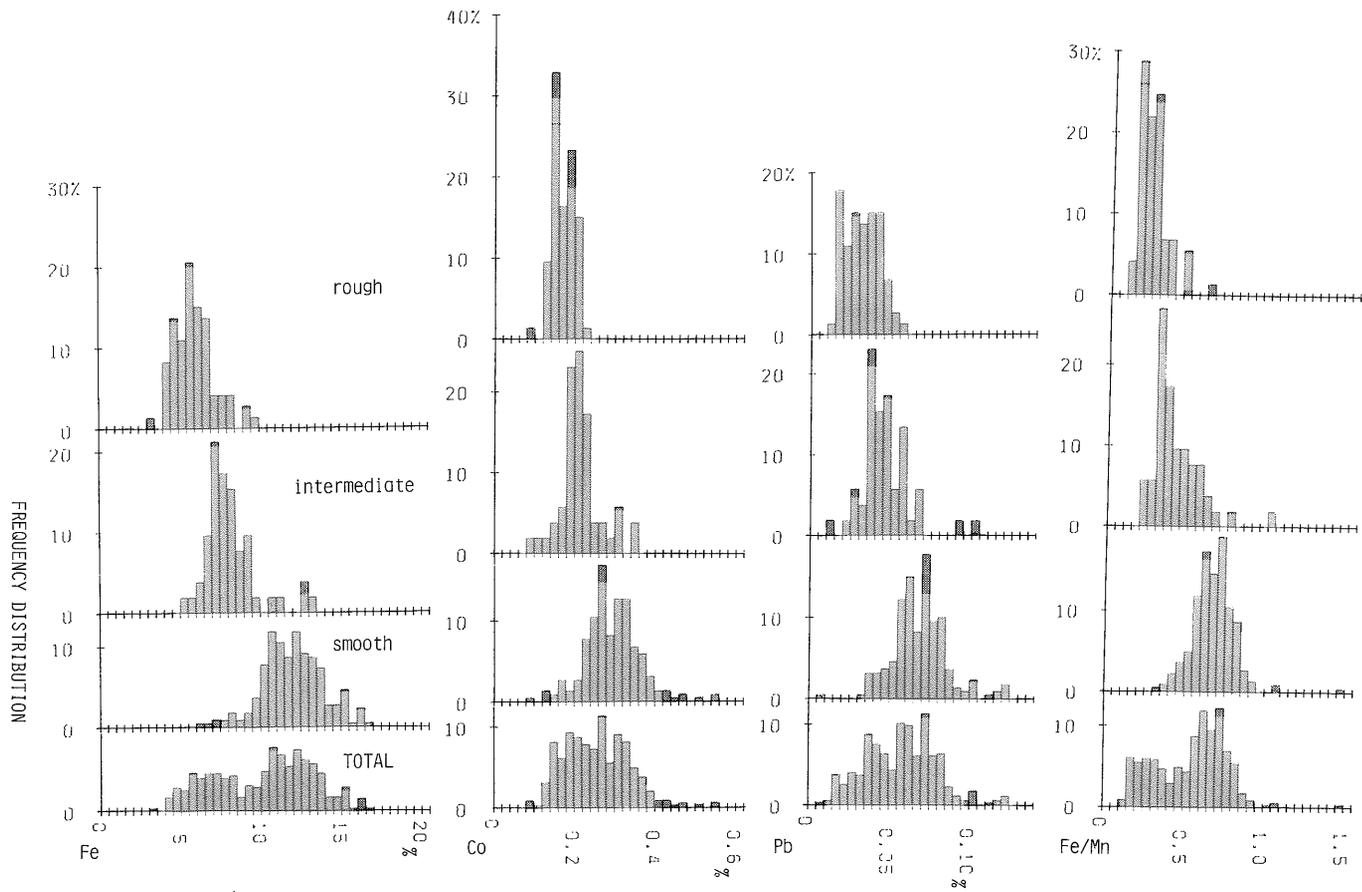
All analyses made on air-dried samples. n : number of analysis, s. d. : standard deviation, v. c. : variation coefficient.



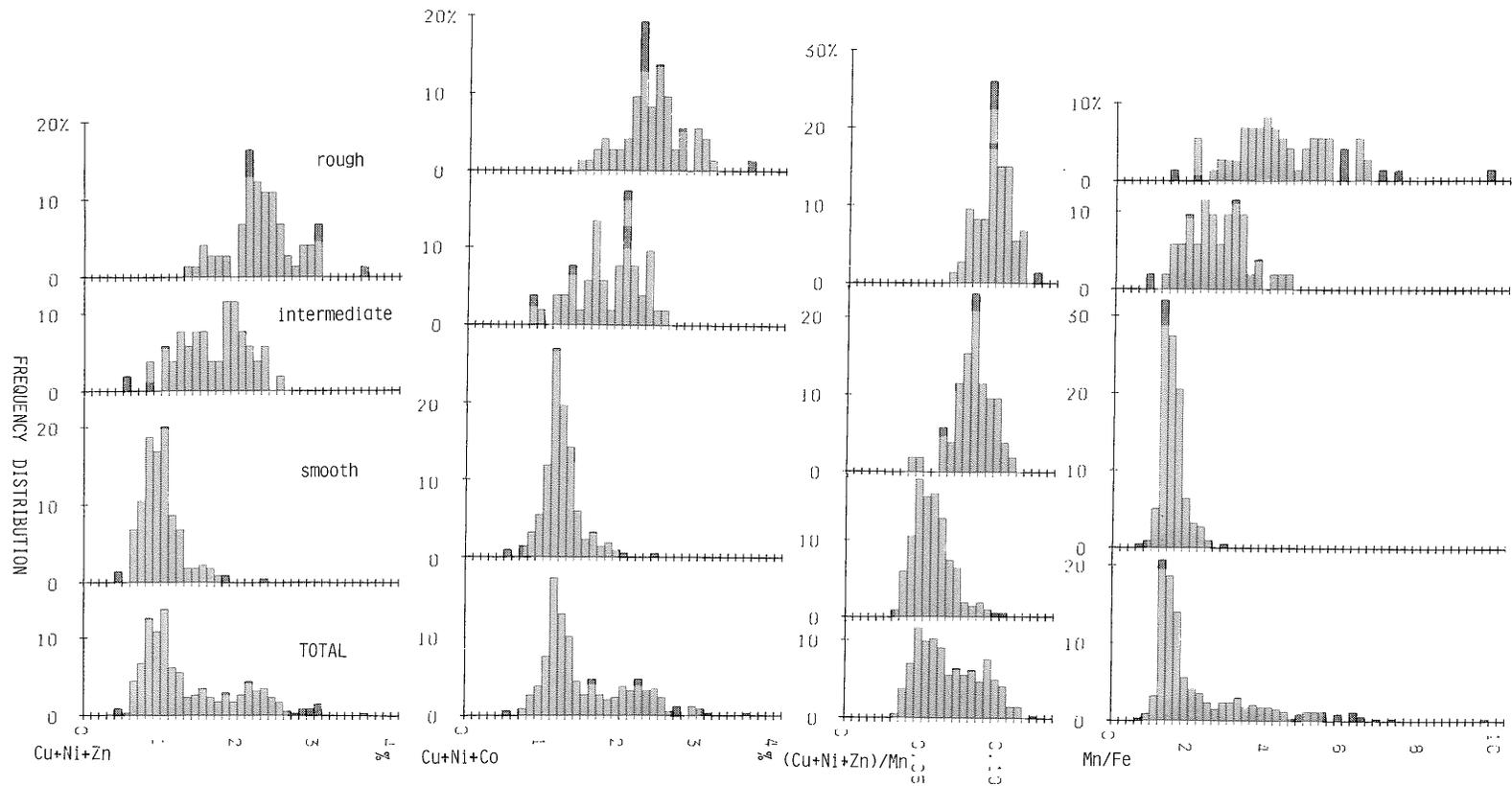
中央太平洋海盆北部・中部のマンガン団塊 (白井 ほか)

第 17 図 マンガン団塊の化学組成の頻度分布 (分析個数は第 8 表参照)

Fig. 17 Frequency distribution of element concentrations and their ratios. Number of analysis see in Table 8.

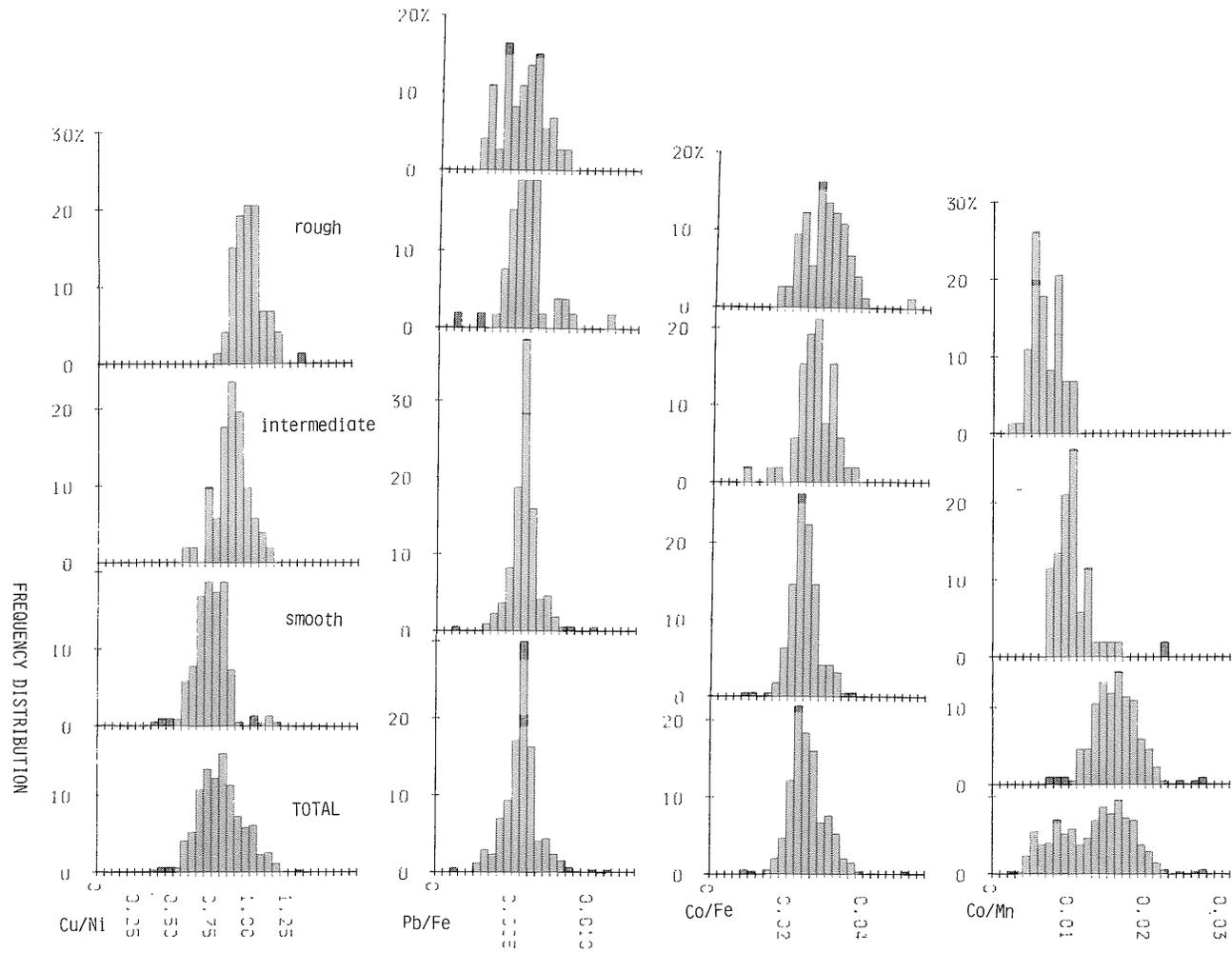


第17図 つづき
Fig. 17 continued



中央太平洋海盆北部・中部のマンガン団塊 (白井 ほか)

第17図 つづき
Fig. 17 continued



第17図 つづき
Fig. 17 continued

海洋の様々な地域の団塊の変動 (FRAZER and FISK, 1981) をカバーしている。本海域のマンガン団塊の平均化学組成 (試料数 344, 第 7 表) は, 全海洋 (CRONAN, 1980) 及び CCZ の団塊の平均値 (HEIN, 1977) との中間的性格を有している (USUI and MITA, in press)。一方, 団塊の測点毎の平均化学組成には有意な広域的变化が存在し, さらにこの広域変化と団塊の形態的タイプの分布域との間には明瞭な関係が認められる (第 8 表)。r 型は Mn, Cu, Ni, Zn が相対的に高く, Fe, Co が低い。Mn/Fe 比は 1.6-9.7 (平均 4.38), Cu + Ni + Zn は 1.4-3.8% (平均 2.3%) の範囲にある。s 型は反対に Mn, Cu, Ni, Zn が低く, Fe, Co が高い。Mn/Fe 比は 0.7-2.9 (平均 1.53), Cu + Ni + Zn は 0.4-

2.3% (平均 1.0%) の範囲にある。また r 型の分布域内に局地的に分布する s 型, 及びその逆の場合にも上述のタイプと化学組成との対応関係は成立っている。s 型と r 型の分布域の境界では団塊の表面構造と全岩の化学組成が対応しない場合も稀にあるが, 内部構造を考慮することにより説明できる。 (USUI and MOCHIZUKI, 1982)。第 17 図は化学組成上の特徴を示したヒストグラムである。団塊タイプによる差違が明瞭に読み取れる。Fe, Cu, Ni, Zn, Mn/Fe 比などでは s 型と r 型の組成の特徴を反映して全体の含有量の頻度分布はバイモダルの傾向を示している。例えば Mn/Fe 比では 2.0, Ni では 0.8% を境として両タイプがよく分離される。中間型は s 型と r 型の中間的組成を示す。

第 9 表 マンガン団塊の構成鉱物の諸性質

Table 9 Characteristics of nodule constituents*.

Characteristics	10-Å manganate phase	δ-MnO ₂ phase
Optical properties (reflecting microscope)		
colour	light grey	dark grey
reflectivity	high	low
anisotropism	strong	none
hardness (VHN)**	high (52-112, mean 82)	low (10-24, mean 17)
internal reflection	none	none
Occurrence	deep-sea manganese nodules (chiefly bottom surface)	deep-sea manganese nodules (chiefly top surface)
	shallow-water manganese nodules	crust or coating of rocks from topographic highs
Texture (reflecting microscope)	conformable thin layer	stratification (sometimes columnar)
	dendritic (cauliflower-like cusps)	
	network	
	crack filling	
	cementing of clastics	
	massive aggregate	
Chemistry (microprobe analysis)	rich in Mn	rich in Mn, Fe and Si
	Mn: 30-50 wt%	Mn: 10-30 wt%
	Fe: 0-2	Fe: 11-18
	Ni: 1-3	Ni: 0-0.8
	Cu: 1-2	Cu: 0-0.8
	Co: 0-0.4	Co: 0.3-0.6
	Si: 0-1	Si: 1-8
Mineralogy	monomineralic (10-Å manganite)	mixture of some minerals—two-line form δ-MnO ₂ , amorphous iron hydroxide, and minute detrital minerals, such as quartz, plagioclase, zeolite and clay minerals

* From USUI (1979 b)

** VHN, Vicker's hardness number.

s型とr型の対照的な化学組成及び団塊の形態的特徴と化学組成の対応関係は、団塊を構成する鉱物の諸性質によって総括的に説明される(臼井ほか, 1978; USUI, 1979 a). 前節で述べたように本海域の団塊から認められた鉱物は $\delta\text{-MnO}_2$ と10Å manganateであり、各々両タイプに対応する7Å manganate系鉱物は認められない。10Å manganateはFeをほとんど含まず(第9表)、Cu, Ni, Znなどを結晶格子中に取り込んだマンガン酸塩鉱物であり、各々の金属含有量の総和は原子比で一定値(約1/6)に近い(USUI, 1979 b). 一方 $\delta\text{-MnO}_2$ はFeとMnをほぼ同量含んだ低結晶質含水酸化物である。Cu, Ni, Znの含有量は10Å manganateに比べて1桁近く低い。団塊の全岩化学組成の特徴は両鉱物が様々な割合で含有されることによって変化するとして説明される。この2鉱物自身にも若干の組成変動があるが、その変動は全岩の化学組成の特徴に影響を及ぼすほど大きくない。

第18図は形態分類した団塊の金属含有量の間の関係を三角図にプロットしたものである。副成分のCu, Ni, Co, Zn, Pbは主成分のMn, Feの含有量に密接に関係していることがわかる。BONATTI *et al.* (1972)はMn, FeとCu+Ni+Coの関係で団塊の分類をしているが、元素別にプロットした図(第18図A-C, E, F)から考えればCu+Ni又はCu+Ni+Znを1成分とするほうが妥当である。第18図Dでは若干のバラツキはあるもののCu+Ni+Zn, Mn, Feの間に強い直線関係が認められる。その直線の一端の成分は10Å manganateの理想組成としてMn-(Cu+Ni+Zn)辺上にプロットされるであろうし、他端は $\delta\text{-MnO}_2$ の理想組成としてMn-Fe辺上に外挿される。

Cu+Ni+ZnがMnとFe量により決定されることは次の2つの仮定をおけば導くことができる。

- 1) Cu, Ni, Znは10Å manganateのみに濃集し、その総和のMnに対する比は一定である。
[X = kM_T]
- 2) Feは $\delta\text{-MnO}_2$ のみに含まれFe/Mn比は一定である。[M_D = lF_D]

ここでM_T, M_D, M₀(=M_T+M_D)は10Å manganateに含まれるMn量、 $\delta\text{-MnO}_2$ に含まれるMn量、全Mn量であり、F_D, F₀(=F_D)は $\delta\text{-MnO}_2$ に含まれるFe量、全Fe量である。Xは全Cu+Ni+Zn量、k, lは定数である。

次にXは次式で表わせる。

$$\begin{aligned} X &= kM_T = k(M_0 - M_D) \\ &= k(M_0 - lF_D) = k(M_0 - lF_0) \end{aligned}$$

$$\therefore X = kM_0 - k l F_0$$

Xは全Mn量と全Fe量の一次結合で表わされ、第18図の三角図プロットの結果と良く一致する。実際の分析値(334個)が次の式に従うものと仮定し、金属含有量間の関係及び鉱物含有量との関係を求めてみると、

$$X = aX_{Mn} + bX_{Fe} + c$$

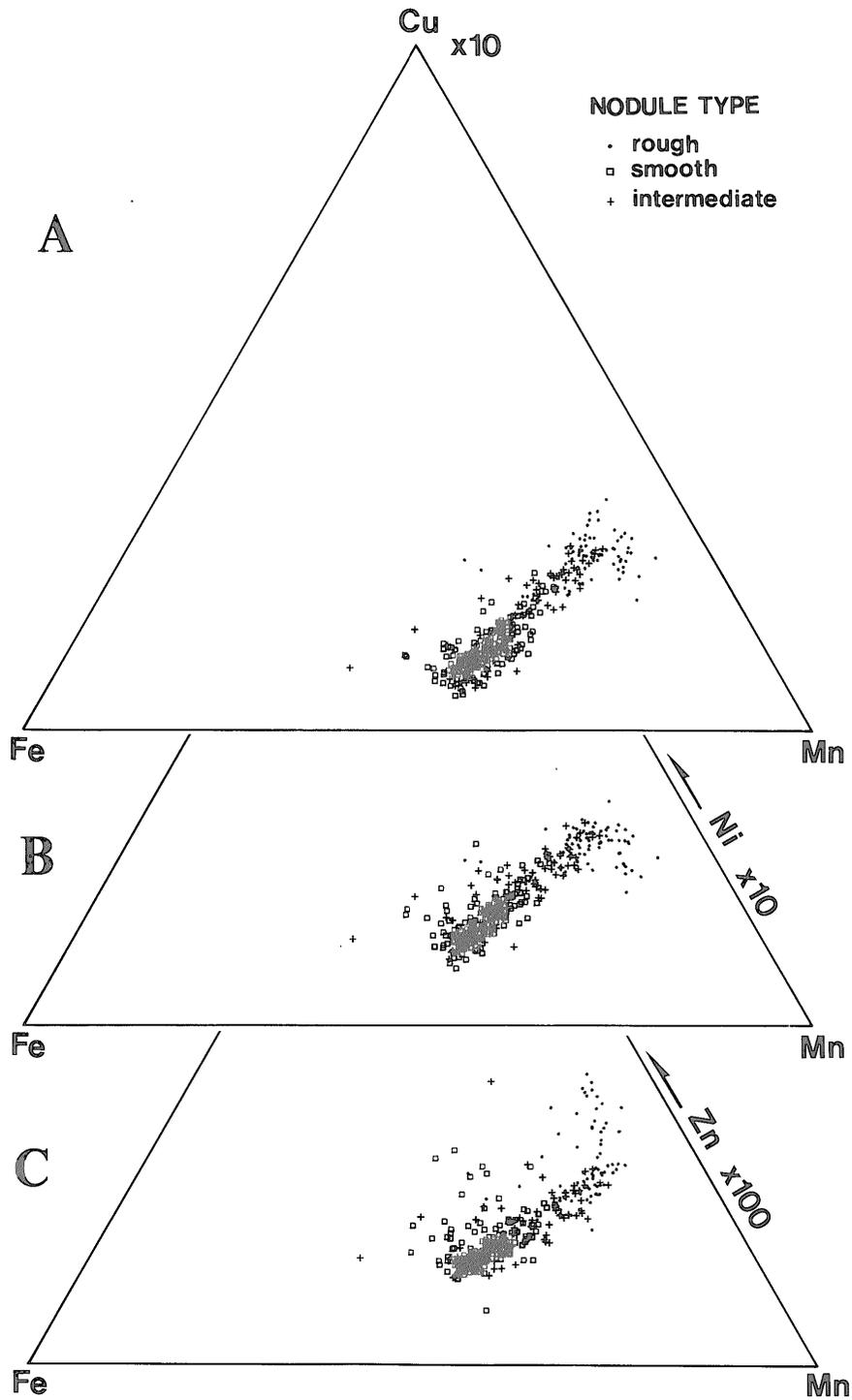
(ここでX, X_{Mn}, X_{Fe}はCu+Ni+Zn, Mn, Feの重量%, a, b, cは最小二乗法による回帰係数である) その結果はa=+0.0835, b=-0.116, c=+0.913となり、重相関係数は0.89である。重回帰の結果では定数項cが残っているが、これは $\delta\text{-MnO}_2$ 中にもCu, Niなどが若干含有され得ることを無視したためであろう。

また上述二つの仮定が成立するならば金属含有量の間の相関関係などが良く説明できる。MnとFeの逆相関(第19図A)は $\delta\text{-MnO}_2$ と10Å manganateの量比が変動するためであり、s型とr型が異なった領域にプロットされることと一致する。しかし核や碎屑物の影響が大きい場合には、相関係数はあまり高くはない。Mn, Mn/FeとCu, Ni, Znの強い相関(第19図BとC)は10Å manganate量の変動に従ってCu, Ni, Znが変動するためである。但し10Å manganateを含まない場合でも $\delta\text{-MnO}_2$ にはMnが主成分として含まれているため回帰直線はO点近くを通らない。Mn/Fe比は団塊の化学組成を特徴づける上でしばしば用いられる。HALBACH *et al.* (1981)はCu+NiとMn/Fe比の関係は双曲線で近似されることを報告した(第20図)。上述の仮定に基づいてFe/Mn比について考察すると、

$$\frac{[Fe]}{[Mn]} = \frac{F_0}{M_0} = \frac{F_D}{M_T + M_D} = \frac{M_D}{l(M_T + M_D)}$$

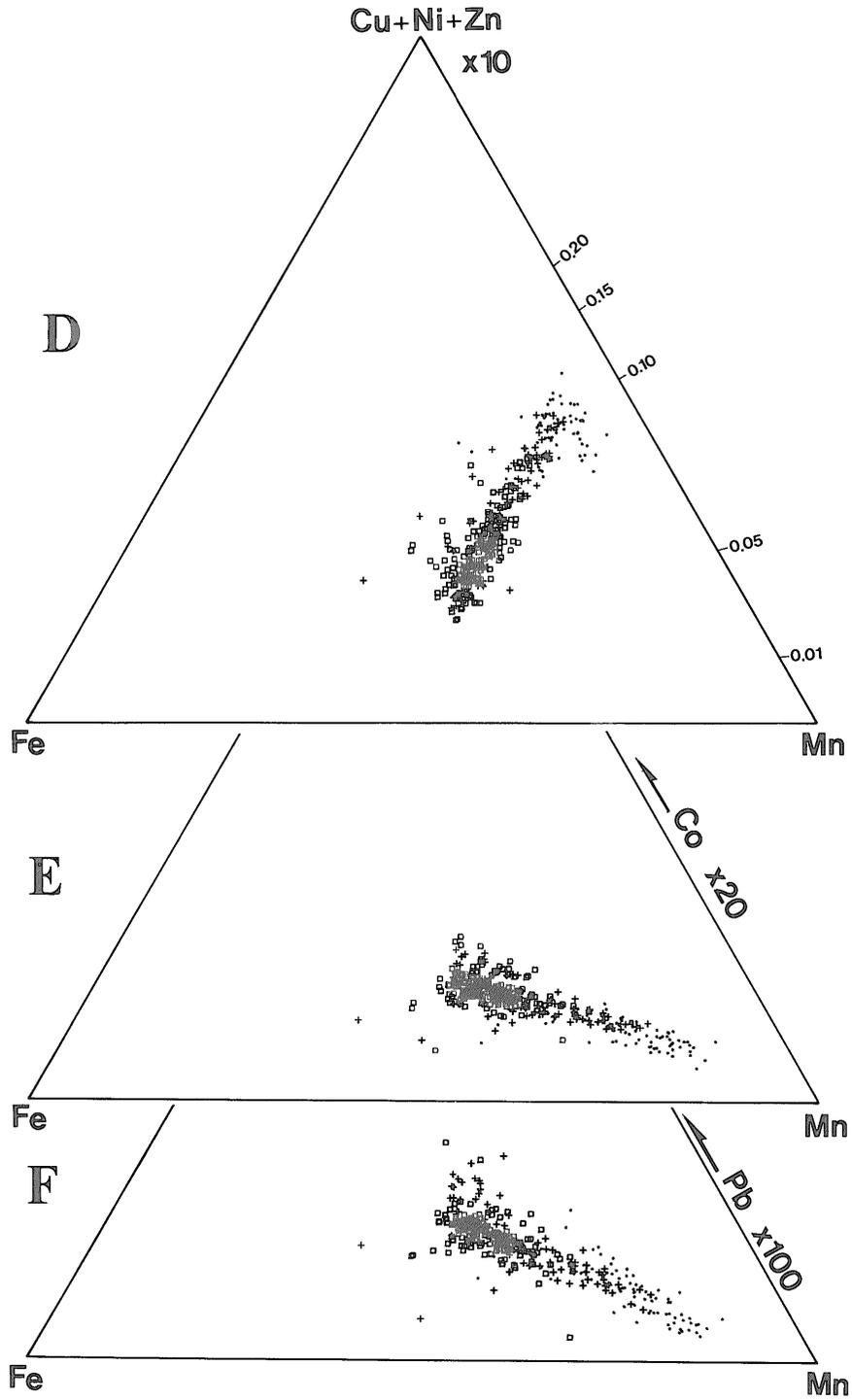
となりFe/Mn比は $\delta\text{-MnO}_2$ の相対量を示していると解釈できる。 $\delta\text{-MnO}_2$ の相対量はマンガン鉱物以外の影響が小さいと考えれば、Fe/Mn比とCu+Niとは負の直線関係を持つ(第19図C)。従ってその逆数Mn/Fe比とCu+Niとは直線ではなく双曲線で近似されることが導かれる。

金属含有量の相関関係を団塊タイプ別にまとめて示したものが第10表及び第21図である。両タイプを含めた場合、Mn-Cu-Ni-Zn間の相互、及びFe-Co-Pb間の相互の正相関、及び両グループの間の負相関が非常に顕著である。この関係は上述の2鉱物の性質によってよく説明される。各タイプ毎の相関関係も全タイプの場合と似た傾向を持つが、タイプ別とすると鉱物の相対量変動が小さくなるため、全体的に相関係数は小さくなる。

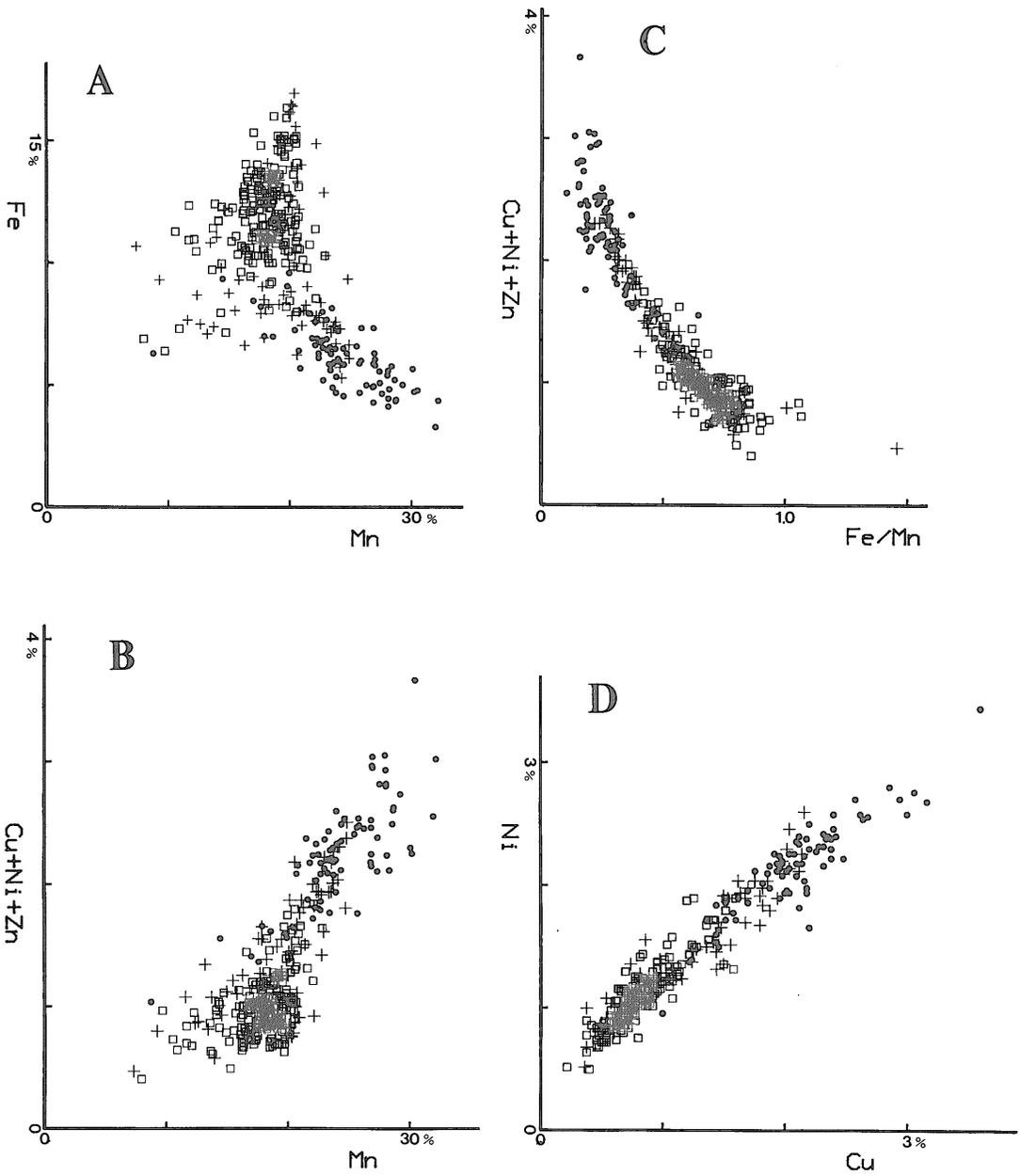


第 18 図 Fe, Mn と副成分の関係 (三成分の和に対する各成分の比に基づいてプロット。D 図右辺の数値は $(Cu + Ni + Zn)/Mn$ 比)

Fig. 18 Ratios of Mn/Fe/(minor elements) plotted on ternary diagrams. Numbers in the right edge on Figure 18 D shows ratios $(Cu + Ni + Zn)/Mn$.



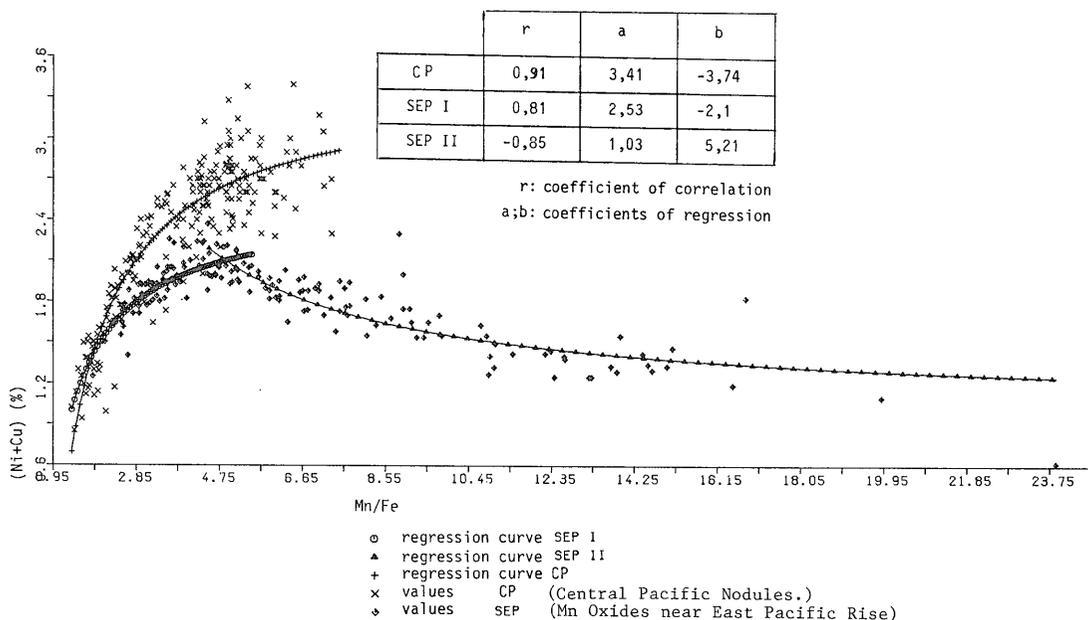
第18図 つづき
Fig. 18 continued



第19図 金属含有量及び比の間の相関プロット (団塊タイプを示すシンボルは第18図と共通)

Fig. 19 Correlation plots of element concentrations and their ratios. Symbols are common to Figure 18.

(Mn/Fe)/(Ni+Cu)-correlation in ferromanganese nodules (CP and SEP)



第20図 Mn/Fe比に対するCu+Niの双曲線近似 (HALBACH *et al.*, 1981に基づく。図中のSEP団塊の一部は東太平洋海膨周辺の熱水活動の影響を受けた団塊であり、典型的な深海底団塊ではない)

Fig. 20 Hyperbolic regressions of Cu + Ni grade versus the ratio Mn/Fe (HALBACH *et al.* (1981)). Manganese oxides signed SEP were collected near the hydrothermal field of the East Pacific Rise, which are not classified as normal deep-sea nodules.

特に Co の相関関係はまちまちで、Mn-Co は s 型では正 (+0.54), 中間型では正 (+0.45), r 型では負 (-0.43) となっている。Co は δ -MnO₂ に多く濃集していることは確実だが、鉱物中の Co の化学形態の問題については、Co の価数が環境によって変化する、鉱物中の結晶学的位置が異なる (BURNS, 1976; 臼井ほか, 1978) などの可能性があり、今後の課題として残されている。

5. 団塊の形成過程・形成環境

本海域の団塊の形成過程に関して直接の年代データ(放射化学, 化石などによる)は非常に少ないため、団塊形成史についての詳しい議論は難しいが、上述の団塊の諸性質と音響層序・表層堆積物との間にいくつかの関連性があり、それらは形成環境・形成過程に関する示唆を与えている。

第3項に示したように、反射法音波探査による堆積層の音響層序において、始新世中期-第四紀のユニット I はその音響的性質からタイプ A, B, C に分類され、3

タイプ全てを通じて音響透明層が認められる。諸測線において同時に得られた 3.5 kHz SBP 記録にあらわれる音響透明層はタイプ A においては厚いところを除いてはほぼユニット I 全体を代表し、タイプ B, C においてはユニット I の最上部に存在する透明層を代表していることが多い。団塊はタイプ A, B に伴い、タイプ C には殆ど見られない。タイプ A, B の透明層発達状況との間にはある程度の関連性がある。3.5 kHz SBP による透明層とマンガン団塊の濃集率との関係を示した第22図に認められるように、団塊濃集率の高い地域は透明層の層厚が約 40 m 以下である。また、s 型団塊は層厚 40 m 以下の地域に限り分布している。r 型団塊は様々な厚さに伴い、濃集率は s 型団塊に比べて一般に小さいが、層厚が 40 m を越える地域及び層を欠く地域では濃集率は極端に低くなる顕著な傾向がある。いずれのタイプでも、透明層層厚が 40 m を越えるところではマンガン団塊の高濃集は全く期待できない。またユニット I の地域内においても、マンガン団塊の濃集率・タイプはユニット I の層厚にある程度相関することが明らかであ

第10表 マンガン団塊金属含有量間の相関係数

Table 10 Inter-element correlations of manganese nodules.

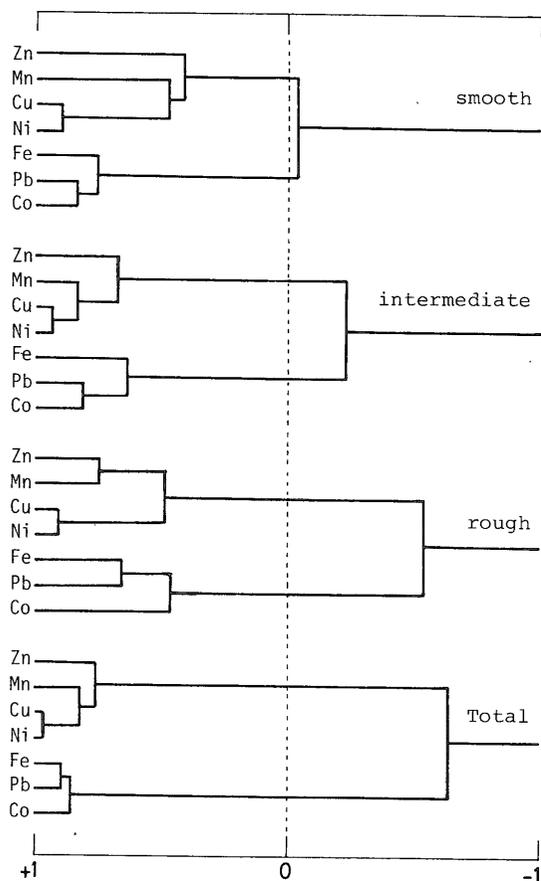
		Mn	Cu	Ni	Zn	Fe	Co	Pb
Total (344)	Mn	1						
	Cu	+0.822	1					
	Ni	+0.816	+0.972	1				
	Zn	+0.782	+0.773	+0.757	1			
	Fe	-0.555	-0.839	-0.842	-0.731	1		
	Co	-0.251	-0.669	-0.642	-0.516	+0.843	1	
	Pb	-0.397	-0.726	-0.709	-0.645	+0.878	+0.892	1
Type s (219)	Mn	1						
	Cu	+0.457	1					
	Ni	+0.478	+0.895	1				
	Zn	+0.367	+0.454	+0.458	1			
	Fe	+0.281	-0.514	-0.534	-0.213	1		
	Co	+0.535	-0.346	-0.265	+0.006	+0.737	1	
	Pb	+0.384	-0.432	-0.404	-0.134	+0.774	+0.830	1
Intermediate (52)	Mn	1						
	Cu	+0.825	1					
	Ni	+0.839	+0.941	1				
	Zn	+0.595	+0.706	+0.759	1			
	Fe	-0.199	-0.613	-0.584	-0.569	1		
	Co	+0.448	-0.044	+0.015	-0.038	+0.662	1	
	Pb	+0.238	-0.189	-0.166	-0.129	+0.621	+0.808	1
Type r (73)	Mn	1						
	Cu	+0.725	1					
	Ni	+0.641	+0.909	1				
	Zn	+0.754	+0.313	+0.242	1			
	Fe	-0.772	-0.499	-0.525	-0.712	1		
	Co	-0.433	-0.564	-0.557	-0.343	+0.419	1	
	Pb	-0.741	-0.438	-0.325	-0.802	+0.658	+0.502	1

る。この関連性は従来一般的に指摘されているように団塊の成長には小さい堆積速度が必要条件であることを示している (CRONAN, 1980) が、この関係はあくまで概括的、第一近似的なものにしかすぎない。なぜならば透明層は堆積物の音響的性質の反映であり“地質学的実体”を反映していないからである。またこのことは、“堆積速度”が適用できる地質時代はいつか？、マンガン団塊の成長はいつ始まったのか？、という問題を含んでいる。次にこれらの問題を検討する。

ユニット I の最表層の堆積物の多くは第四紀に形成されているものであるが、時に古第三紀にまで遡る微化石を多数 (最大 70%) 含む例があり、堆積物のリワーク

を示している (NISHIMURA, 1981)。柱状採泥を含んだ詳細な調査を実施した地域 (GH 79-1, GH 80-5) の小海域においてはそれぞれ中新世から鮮新世後期にかけての約 2 千万年間、中新世後期から鮮新世初期にかけての 4-5 百万年間、無堆積ないし削剝による堆積間隙がコアのなかに存在することが明確にされ、それらはその間の南極底層流の活発な流入に起因するものと推定されている。このような堆積間隙は音波探査記録上での確認はきわめて困難であるが、当時の活発な南極底層流に起因するものならばその影響は同時期の堆積間隙として広範囲に存在することが予想される。

GH 79-1 精査海域 (10°N, 167°40' W 付近) におい



第21図 相関係数に基づく金属含有量間のクラスター分析 (成分を結合したあとの係数は単純平均)

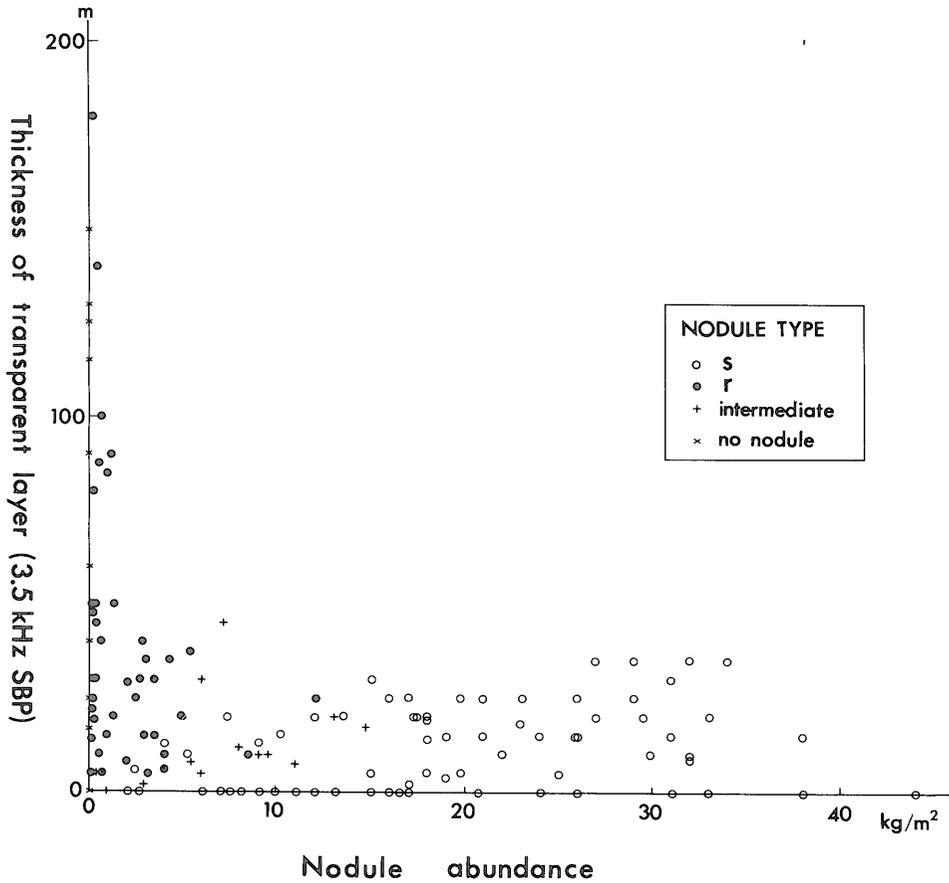
Fig. 21 Dendrograms drawn from the results of cluster analysis for metal concentrations in manganese nodules, based on correlation coefficients. New correlations between groups or elements are calculated by simple averaging.

ては、マンガン団塊のタイプ、濃集率、Ni, Cu 含有率と 3.5 kHz SBP 記録の最上部透明層との間に関連性が認められる(第23図)。最上部透明層は、下位の石灰質タービダイトを含む一連の始新世中期-中新世初期の堆積層の上に堆積間隙をもって横たわり、更新世最後期-現在(約200万年間)の遠洋性粘土からなる(層厚は2-30 m)。海底面を現在と仮定した得られた透明層の平均堆積速度との関係で述べれば、s型団塊(濃集率7-18 kg/m²)は堆積速度2 mm/10⁸年以下、r型団塊(tr-7

kg/m²)は堆積速度2-5 mm/10⁸年のところに分布し、堆積速度5 mm/10⁸年以上のところでは団塊は存在しない。Ni, Cu 含有率は団塊の濃集率と逆相関する。団塊成長速度データ(PIPER and GIBSON, 1981)によると2.2-5.0 mm/10⁶年(r型で平均4.47 mm/10⁶年、s型で平均3.35 mm/10⁶年)である。単純計算をすれば、直径2 cm以内の団塊の成長は約200万年を要したことになる。事実、r型は全て2 cm以内であり、堆積間隙以降に成長したと考えて矛盾しない。一方s型は上述のように古期団塊を有する二重構造によって特徴づけられる。その外層部の厚さもまた過去200万年の間の成長を仮定することができる。

本海域近傍の団塊年代測定結果(Be¹⁰法)によると古期団塊の成長は鮮新世後期以前に始まったことを示している(井上昭夫, 未公表)。サメの歯の大型化石は団塊の核として広く産し、487点の団塊試料中70点から得られている。サメの歯化石は7種が認められ、そのうちの2種 *Carcharodon megalodon*, *Isurus benedeni* は絶滅種であり、両者のレンジは中新世(または漸新世)である(久家・臼井, 1982)。このことからサメの歯を核に持つ団塊の形成史は中新世(または漸新世)以降となる。この2種の化石はs型に伴い、r型には伴わない。古期団塊の成長開始時期のデータはないが、このことから、本海域周辺ではr型団塊は鮮新世後期以降の堆積間隙以後のもっとも若い時代の堆積作用に関連して生成したこと、s型団塊については、内部の古期団塊は堆積間隙時(中新世後期)またはそれ以前に成長し、遅くとも堆積間隙時には破片化が起き、外層部はr型団塊と共に若い時代に成長したことが推論される。水野ら(MIZUNO *et al.*, 1980; MIZUNO, 1980; 水野・盛谷, 1981)は、上記精査海域におけるr型・s型(特に外層部)の生成を、過去約200万年間の南極底層流の地域的強弱によって支配される堆積速度の相違と関連させて議論している。以上の考察では、団塊が成長する過程では降りつもる堆積物によって埋没されることなく上方へ移動する作用を仮定している。団塊直下の表層堆積物の多くは現在に近いものであることから、団塊が成長する過程において、例えば底棲動物の活動など(PIPER and FOWLER, 1981など)によって、堆積物表面にとどまり続けながら成長したのであろう。

この海域で認められた堆積間隙と団塊分布との関係に類似するものはCCZの西端部においても報告されている(von STACKELBERG, 1982)。すなわち、この海域の堆積物には海底下数mに中新世前期-鮮新世後期の南極底層流に起因する堆積間隙が広く存在し、マンガン団



第 22 図 濃集率と最上部音響透明層の層厚との関係

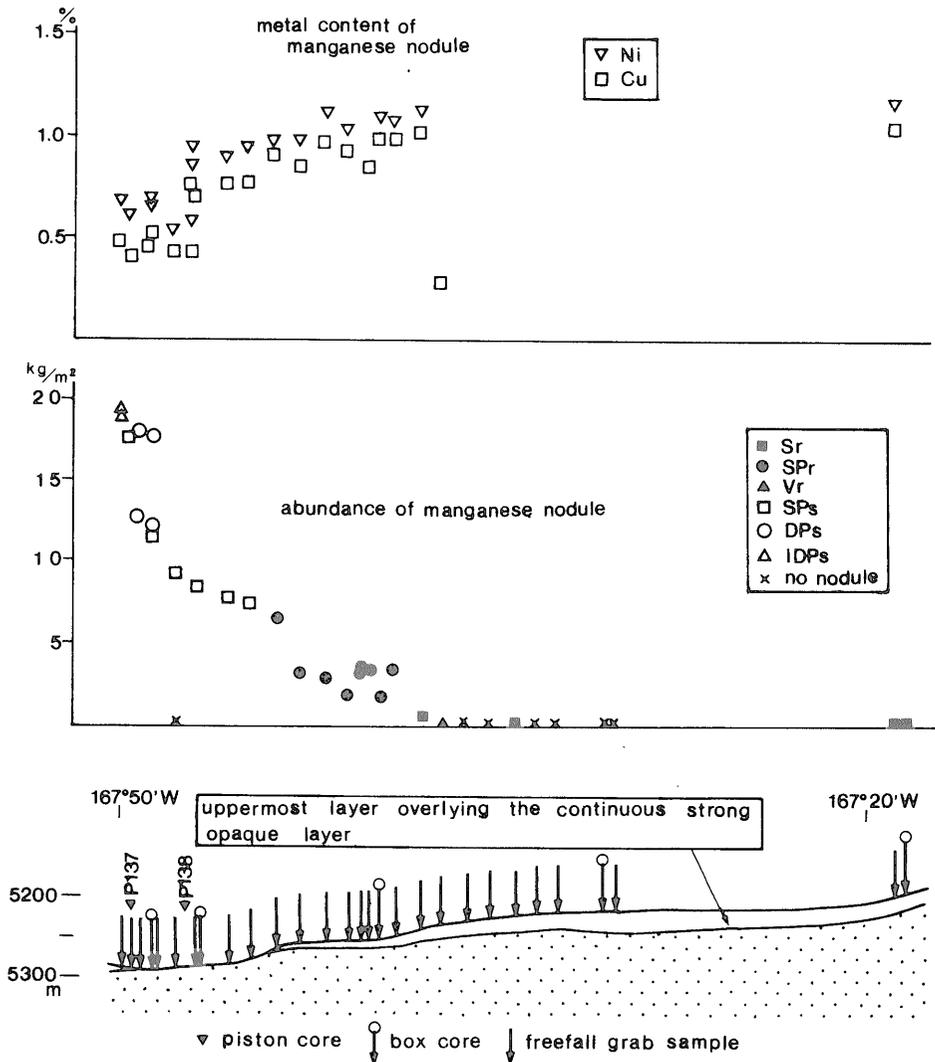
Fig. 22 Relationship between nodule abundance and thickness of the uppermost transparent layer on seismic records.

塊は海底面と堆積間隙近くの二つの位置から発見されている。前者の団塊は顕著な二重構造を示し、後者は古い団塊のまま成長を停止している。

以上のことから、データはまだ少ないが、本海域の団塊は新第三紀から現在にかけて太平洋全体にわたるような広範囲の堆積環境の変化に強く支配されて形成されたと考えて間違いないであろう。即ち、古期団塊が中新世末から鮮新世にかけておそらく広範囲に発達したのち、堆積間隙時に破片化し、鮮新世後期ないし最後期以降現在にかけて、r 型団塊あるいは二重構造の s 型団塊の外層部が形成されたと推察される。現在に近い新しい時期においては、地域によって団塊タイプが異なることについては、最表層堆積物タイプとの顕著な対応関係 (r 型で珪質堆積物, s 型で遠洋性粘土; Usui, 1983) によ

って解釈できる。これは r 型団塊を構成する 10 \AA manganate は珪質堆積物の初期続成作用に伴い有機物の分解による弱還元環境下で Mn などの金属が溶解再沈殿して生成するとのモデル (HALBACH *et al.*, 1981; USUI, 1979 a; MARCHIG and GUNDLACH, 1981) に従えば、最表層の堆積物の酸化還元環境が局地的に異なることが原因と考えられる。

以上のように団塊の形成過程、メカニズムに関して、本海域での研究によって団塊の成長と堆積史との密接な関連が指摘され、また団塊そのものの化学的・鉱物学的諸性質の概要は明らかにされた。しかし団塊タイプと堆積速度の関係が上述とは逆の傾向を示す (NISHIMURA, 1984; USUI and NAKAO, 1984) など、他の要因を考慮する必要がある場合もある (西村, 1983) ので、今後



第23図 精査海域 GH 79-1 における堆積層と団塊濃集率, Cu・Ni含有率の関係 (MIZUNO, 1981)

Fig. 23 Variability of nodule abundance, chemistry and acoustic records in the detailed survey area of the GH 79-1.

さらに精密かつ総合的な調査を続けることが望まれる。

6. 金属資源量

本海域のマンガン団塊中の有用金属資源量の評価には様々な不確定要素があるため、評価は難しい。現実の採鉱に際しては団塊の金属含有量、濃集率のほかに、海底地形、団塊の物性などの要素も必要となるが、ここで

は金属資源量の一つの指標として、海底単位面積当たりの団塊中有用金属総量(各測点における団塊濃集率と Cu + Ni 平均含有量の積)を用いて、CCZ の団塊と比較してみる。一測点内の個体間のバラツキは±10%程度で (SOREM *et al.*, 1979) 広域的变化に比べると無視できる。その値は CCZ では普通 100-600 g/m² 程度であり、そのなかの採鉱対象地域では平均 300 g/m² を超え

ている (FEWKS *et al.*, 1978). 第11表にはその一例として DOMES site C と本海域を比較した. 本海域では, 10 g/m^2 以下から 270 g/m^2 まで大きく変動している. 最高値は CCZ における平均値を上回っているが, 海域全体では明らかに下回る. 本海域の特徴は s 型で高い金属総量を示すことであり (第24図), 低品位・高濃集率地域といえる. これに対して CCZ の団塊の多くは r 型に相当する高品位高濃集型である (SOREM *et al.*, 1979). 金属総量と同じならば当然含有率の高いほうが採鉱において有利となるが, この点でも本海域の団塊は鉱床としての評価は低くなる. 濃集率と品位の関係を示した第25図に見られるように s 型団塊は一般に可採品位に達していない. この図からは r 型及び中間型のごく一部が品位・濃集率ともに有望である. しかしこれらの有望地点のうちで隣接した測点はマゼラントラフ北部の数点だけである.

以上の考察から, 本海域にはニッケル・銅に関する限り CCZ に匹敵する品位・濃集率を持つ団塊分布域は局地的に分布するのみでありその広がりにはあまり期待できない. 採鉱の初期の段階では高品位団塊が対象となるだろう (ARCHER, 1979) から, 本海域の団塊は少なくとも初期の段階の採鉱対象地域として設定することは難しいと思われる. しかし本海域の s 型団塊は分布範囲が非常に広くかつかなり連続性があるらしいこと, 団塊濃集率が高いこと (中央値 13 kg/m^2 以上), さらに Co 含有率の平均は団塊ベルト地域に比べ明らかに高い (0.36%) ことを考慮すると, s 型団塊の高濃集率帯は第二世代での採鉱には有望かもしれない.

7. 総括及び結論

本海域の海盆底に分布するマンガン団塊の特徴は産状, 形態 (特に表面構造), 化学組成, 鉱物組成などに顕著な差違のある2タイプ (s 型, r 型) に分類できることであり, s 型団塊の分布域が広いことである. s 型・r 型両タイプの特徴的の表面構造は成因の異なる2つの構成鉱物, すなわち海水から直接沈殿する ($\delta\text{-MnO}_2$ 平滑表面), 初期続成作用の過程で再沈殿する 10 \AA manganate (粗表面) に対応する.

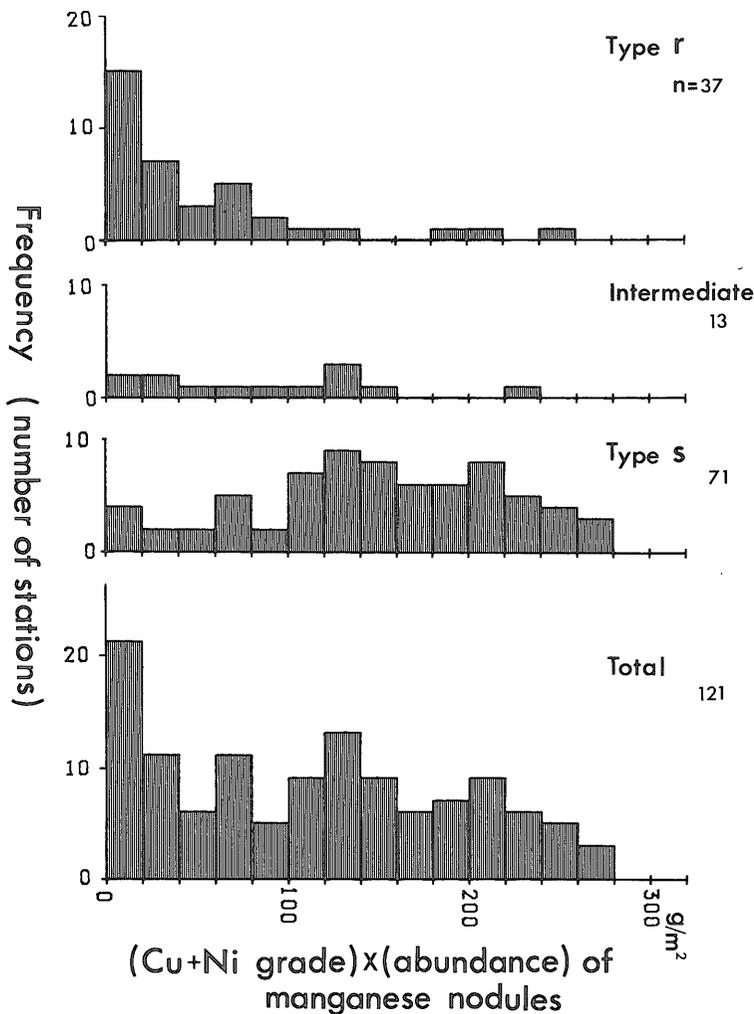
団塊タイプの分布には一部の局地的変化はあるものの, 全体として対照的な広域分布が認められる. s 型団塊は本海域の中央部にほぼ東北東・西南西の方向性を持って幅 $100\text{--}300 \text{ km}$, 延長 1000 km 以上にわたる遠洋性粘土地域に帯状の高品位帯を形成する. 濃集率は $10\text{--}30 \text{ kg/m}^2$, 海底被覆率は $60\text{--}80\%$ に集中し地域的変動は比較的小さい. 海底表層では明らかに海水中に露出する産状を示し団塊表面は堆積物に覆われていない. 粒径は大きく (中央値 2.7 cm), 形状は不規則塊状が一般的である. 内部には破片化した古期団塊が含まれ, 全周囲を外層 ($2\text{--}5 \text{ mm}$ 厚) がとりまくという二つの成長ステージが全域の s 型団塊に特徴的である. 鉄・マンガン鉱物の組成をみると, 古期団塊は例外なく $\delta\text{-MnO}_2$ から成り, 周囲の外層は $\delta\text{-MnO}_2$, 10 \AA manganate, 又は両者から成っている. 全岩化学組成は $\delta\text{-MnO}_2$ の特徴を反映して Fe, Mn がほぼ同量で, Cu, Ni, Zn が低く, Co, Pb が高い. 一方 r 型団塊は本海域の南東部の珪質堆積物地域及び北西部の深海盆地域に分布

第11表 単位面積当り金属資源量

Table 11 Metal resources per unit area.

		(abundance) \times (Cu+Ni grade)				number of stations
		g/m^2				
		mean	s. d.	max.	min.	
Central Pacific Basin (this area)	Total	113	79	273	1	121
	Type s	149	69	273	1	71
	Intermediate	91	66	225	2	13
	Type r	51	60	241	2	37
Northeast Pacific Manganese Nodules Belt (DOMES site C)*	Area 1	192	—	—	—	3
	Area 2	330	—	—	—	3
	Area 3	185	—	—	—	2
	Area 4	146	—	—	—	5
	Area 5	179	—	—	—	3

*PIPER *et al.* (1979)

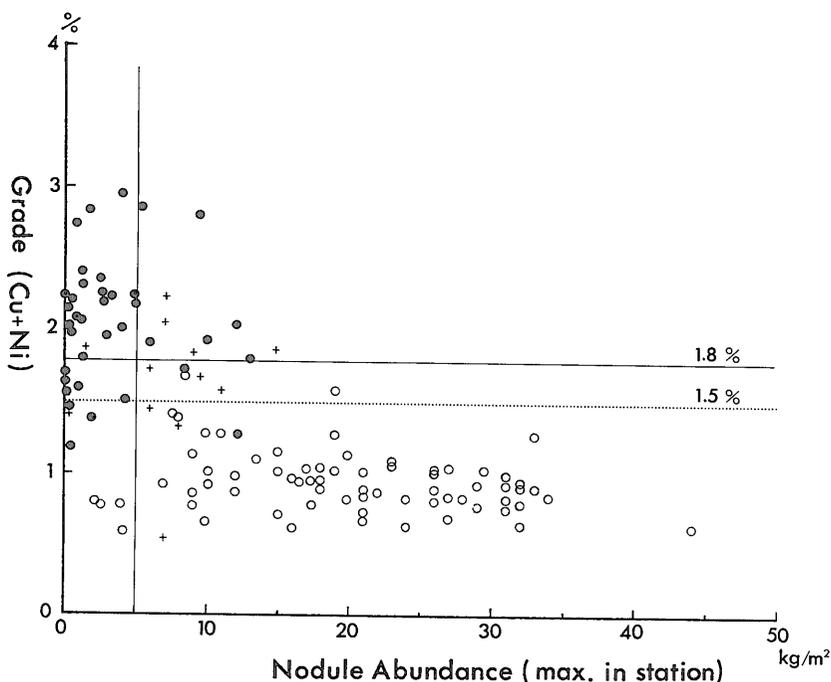


第24図 金属資源量(各測点での平均濃集率と平均品位との積)の頻度分布 (nは測点数)
 Fig. 24 Frequency distribution of metal reserves (product of average concentration and average grade). n: number of stations.

する。濃集率は一般に 5 kg/m^2 以下でありその地域的変動は大きい。その他の性質も s 型団塊とは対照的で、形状は球形に近いものが多く核は小さい。粒径は小さく(中央値 1.5 cm)、 1 mm 以下のマイクロジュールまで漸移する場合もある。最表層数 cm の高含水率の未固結珪質粘土-珪質軟泥中に埋没していることが多いため海底カメラには撮影されないことが多い。r 型団塊の内部は単純な同心球状の対称構造を呈し、含まれる鉄・マンガン鉱物は 10 \AA manganate に限られている。これらの事実は r 型団塊が最表層堆積物(主に第四紀珪

質堆積物)中で初期続成作用の産物であるとの考えを支持している。化学組成は 10 \AA manganate の組成を反映して、Fe に乏しく、Mn, Ni, Cu, Zn に富む。両タイプの他に表面構造が中間的な団塊が両分布域の境界付近に産し、化学組成・濃集率ともに中間的性質を示す。内部構造からみると s 型団塊表面に薄く 10 \AA manganate の小突起の発達したものや、 10 \AA manganate と $\delta\text{-MnO}_2$ が互層するものなど変化に富んだ内部構造をもつ。

マンガン団塊の全岩化学組成及び金属含有量間の相関



第 25 図 濃集率と金属品位 (銅+ニッケル) の関係 MENARD and FRAZER (1978) に従って可採濃集率 (5 kg/m²), 可採品位 (1.8% Cu + Ni; 110°C 乾燥ベース) を加筆した。但し本試料の品位は風乾ベースのため, 補正した可採品位は 1.5% Cu + Ni となる。

Fig. 25 Relationship between nodule abundance and grade (Cu + Ni). Mining cut-off grade and concentration are cited from MENARD and FRAZER (1976). All concentrations are based on 110°C dried samples.

関係は二つの鉱物の含有量変化によって説明されることがわかり、団塊を形成する基本単位として鉱物の重要性が指摘された。団塊の濃集率と銅・ニッケル品位の間には両団塊タイプの諸性質の差が反映され一定の関係が認められる。すなわち、s 型は高濃集率・低品位で r 型は低濃集率・高品位である。CCZ の団塊における濃集率と銅・ニッケル品位の逆相関の報告 (MENARD and FRAZER, 1978) とも一致する。

本地域のマンガン団塊諸性質と堆積構造・柱状試料の性質とを比較した結果、以下のような団塊形成史を推定することができる。二重構造を持つ s 型は中新世後期またはそれ以前に南極底層流の影響下で酸化的環境のもと、無堆積又は堆積速度が小さい条件下で広域的に発達し、概ね第四紀以降に外層を形成した。r 型は s 型の外層形成とほぼ同時期に珪質堆積物の穏やかな堆積と続成作用の過程で形成されたと考えられる。両タイプとも堆積速度が小さいことが成長促進の条件となっている。その結果として、音波探査記録と団塊濃集率との間には明瞭

な関係が認められる。つまり本海域を通じて広く分布する最上部音響的透明層 (ユニット I : 第四紀-始新世後期) が薄い (ほぼ 40 m 以下) か欠如した地域において団塊の濃集率は高くなっている。しかしながら、団塊のタイプは必ずしも堆積層の厚さのみに支配されるわけではなく、狭小精査海域内ではタイプと層厚との関係が逆になるケースも見られるが概査を中心とした本研究からは明確な結論を導くことはできない。

最後に本海域のマンガン団塊を資源的観点からみると、銅・ニッケルに関しては低品位・高濃集率の鉱床といえる。CCZ に匹敵する高品位団塊の高濃集率分布域は局地的にしか存在せず、その広がりはいずれも期待できない。海域北部にほぼ東西に延びる s 型団塊の高濃集率帯については、コバルトの含有率が比較的高い点、平均濃集率が CCZ のそれを上回る点で注目される。

深海底のマンガン団塊の研究は基礎調査の段階から探査・採鉱技術の開発に移行してきた感があるが、広域的・局地的な諸性状の地域変化を規制する地質学的・海洋

学的要因, 形成史と海洋環境の変遷の対比などに関して, 数多くの課題が残されている. 今後さらに詳しい海域調査・研究を続けることが望まれる.

謝辞 本稿を発表するに当たり, 研究の基礎データとなった地質調査所各クルーズレポートの執筆に関与された当時の深海底鉱物資源研究グループ各氏, 調査航海において協力された公害資源研究所研究グループ各氏, 白嶺丸乗組員各氏, また分析データの処理プログラムについて助言をくださった当所鉱床部佐藤岱生氏に深甚の謝意を表す.

References

- ANDREWS, J.E. and FRIEDRICH, H.W. (1979) Distribution patterns of manganese nodule deposits in the Northeast Equatorial Pacific. *Marine Mining*, vol. 2, p. 1-44.
- ARCHER, A.A. (1979) Resources and potential reserves of nickel and copper in manganese nodules. In: *Manganese Nodules: Dimensions and Perspectives*. Redel Co. Dordrecht, Netherlands., p. 71-81.
- ARRHENIUS, G., CHEUNG, K., CRANE, S., FISK, M., FRAZER, J., KORKISCH, J., MELLIN, T., NAKAO, S., TSAI, A., and WOLF, G. (1979) Counterions in marine manganates. In: *La Genèse des Nodules de Manganèse*, Colloq. Intl. C.N.R.S. Rept., no. 289, p. 333-356.
- BONATTI, E., HONNOREZ, J., JOENSUU, O. and RYDELL, H. (1972) Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. In: D.R. HORN (ed.) *Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor*. N.S.F., Washington D.C., p. 149-166.
- BURNS, R.G. (1976) The uptake of cobalt into ferromanganese nodules, soils, and synthetic manganese (IV) oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, vol. 40, p. 95-102.
- and BURNS, V.M. (1977) Mineralogy of Manganese Nodules. In: G.P. GLASBY (ed.) *Marine Manganese Deposits*. Elsevier Pub. Co. Ltd., p. 185-248.
- BURNS, R.G. and BURNS, V.M. (1978) Post-depositional metal enrichment processes inside manganese nodules from the North Equatorial Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 39, p. 341-348.
- BUSER, W. and GRÜTTER, A. (1956) Über die Natur der Manganknollen. *Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, vol. 36, p. 49-62.
- CRONAN, D.S. (1972) Regional geochemistry of ferromanganese nodules in the world ocean. In: D.R. HORN, M. DELACH and B. HORN (eds.) *Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor*, p. 19-30.
- (1980) *Under Water Minerals*. Academic Press, London., p. 1-362.
- FEWKS, R.H., MCFARLAND, W.D., REINHART, W.R. and SOREM, R.K. (1980) *Evaluation of Metal Resources at and near Proposed Deep Sea Mine Sites*. Report for Bureau of Mines, US Dept. Interior. pp. 242.
- FRAZER, J.L. and FISK, M.B. (1981) Geological factors related to characteristics of sea-floor manganese nodule deposits. *Deep-Sea Res.*, vol. 28 A, no. 12, p. 1533-1551.
- FRIEDRICH, G.H. (1976) Manganese micronodules in deep-sea sediments and their relation to manganese nodule fields. In: *Marine Geological Investigations in the Southwest Pacific and Adjacent Areas*. CCOP/SOPAC Tech. Bull., no. 2, p. 39-53.
- FUJINUKI, T., MOCHIZUKI, T. and MORITANI, T. (1977) Chemical composition of manganese nodules. In: A. MIZUNO and T. MORITANI (eds.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 8, p. 162-171.
- GLASBY, G.P. (1978) Deep-sea manganese nodules in the stratigraphic records: evidence from DSDP cores. *Mar.*

- Geol.*, vol. 28, p. 51-64.
- GLOVER, E.D. (1977) Characterization of marine birnessite. *Am. Mineral.*, vol. 62, p. 278-285.
- HALBACH, P. and ÖZKARA, M. (1979) Morphological and geochemical classification of deep sea ferromanganese nodules and its genetical interpretation. In: *La Genèse des Nodules de Manganèse*, Centre National de la Recherche Scientifique Rept. no. 289, p. 77-88.
- , HEIBISH, U. and SCHERHAG, C. (1981) Geochemical variations of ferromanganese nodules and crusts from different provinces of the Pacific ocean and their genetic control. *Chem. Geol.*, vol. 34, p. 3-17.
- , ÖZKARA, M. and HENCE, J. (1975) The influence of metal content of the physical and mineralogical properties of pelagic manganese nodules. *Mineral. Deposita*, vol. 10, p. 397-411.
- HISHIDA, H. and UCHIO, T. (1981) Sedimentological and geochemical studies of manganese micronodules and the associated sediments in some piston cores in the North Pacific Ocean. *J. Fac. Egr., Univ. Tokyo*, (B) vol. 36, no. 2, p. 463-522.
- HEIN, P. (1977) Geochemie des nodules de pacifique nord-est etude statistique. *Sci. Tech. Rept. C.N.E.X.O.*, no. 35, p. 1-74.
- HORN, D.R., HORN, B.M. and DELACH, M.N. (1972) Distribution of ferromanganese deposits in the world ocean. In: D.R. HORN (ed.) *Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor*. N.S.F., Washington D.C., p. 9-17.
- ISHIHARA, T. (1982) *Free Air Gravity Anomaly Map of the Central Pacific*. Geol. Surv. Japan. Marine Geol. Map Series, no. 19.
- 久家直之・臼井 朗 (1982) マンガンノジュールともなう板鰐類化石. 日本地質学会第 89 年学術大会講演要旨, p. 337.
- LONSDALE, P., BURNS, V.M. and FISK, M. (1980) Nodules of hydrothermal birnessite in the caldera of a young seamount. *J. Geol.*, vol. 88, p. 611-618.
- MARCHIG, V. and GUNDLACH, H. (1981) Separation of iron from manganese and growth of manganese nodules as a consequence of diagenetic aging of radiolarians. *Mar. Geol.*, vol. 40, p. M 35-M 45.
- MENARD, H.W. and FRAZER, J.Z. (1978) Manganese nodules on the sea floor: inverse correlation between grade and abundance. *Science*, vol. 199, p. 969-971.
- MEYER, K. (1973) Surface sediments and manganese nodule facies, encountered on R.V. Valdivia Cruise 1971/1973. In: *The Origin and Distribution of Manganese Nodules in the Pacific and Prospects for Exploration*. H.I.G., Honolulu, p. 125-130.
- MEYLAN, M.A. (1974) Field description and classification of manganese nodules. In: *Ferromanganese Deposits of the Ocean Floor*. H.I.G. Rept., no. 74-9, p. 158-168.
- MIZUNO, A. (1981) Regional and local variabilities of manganese nodules in the Central Pacific Basin. In: A. MIZUNO (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 15, p. 281-296.
- , MIYAZAKI, T., NISHIMURA, A., TAMAKI, K. and TANAHASHI, M. (1980) Central Pacific manganese nodules, and their relation to sedimentary history. In: Proc. 12th Ann. *Offshore Tech. Conf.*, Houston, vol. 3, p. 331-340.
- 水野篤行・盛谷智之 (1981) 深海底マンガン団塊と堆積間隙. 海洋科学, vol. 3, no. 2, p. 122-128.
- ほか 22 名 (1984) 深海底鉱物資源に関する地質学的研究. 昭和 59 年度工業技術院特別研究報告書, p. 223-235.
- MOCHIZUKI, T., TERASHIMA, S., MIZUNO, A. and

- NAKAO, S. (1981) Metal contents of manganese nodules from the GH 79-1 area. In: A. MIZUNO (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 8, p. 136-158.
- 盛谷智之 (1983) マンガン団塊/人類に残された最後の鉱物資源の宝庫. 日本の科学と技術, 日本科学技術振興財団, vol. 24, no. 224, p. 36-47.
- MORITANI, T. and MURAKAMI, F. (1979) Relation between manganese nodule abundance and acoustic stratigraphy in the GH 77-1 area. In: T. MORITANI (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 12, p. 218-221.
- , MARUYAMA, S., MATSUMOTO, K., OGITSU, T. and MORIWAKI, H. (1977) Description, classification, and distribution of manganese nodules. In: A. MIZUNO and T. MORITANI (eds.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 8, p. 136-158.
- , ———, NOHARA, M., KINOSHITA, Y., KOIZUMI, T. and ITO, T. (1979 a) Description, types, and distribution of manganese nodules. In: T. MORITANI (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 12, p. 163-205.
- , MOCHIZUKI, T., TERASHIMA, S. and MARUYAMA, S. (1979 b) Metal contents of manganese nodules from the GH 77-1 area. In: T. MORITANI (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.* no. 12, p. 206-217.
- MURRAY, J.W. and RENARD, A.F. (1891) Deep-sea deposits. In: Rept. Sci. Results Explor. Voyage Challenger, pp. 525.
- NAKAO, S., MOCHIZUKI, T., TERASHIMA, S., YUASA, M. and MORITANI, T. (1981) Metal contents of manganese nodules from the GH 78-1 area. In: T. MORITANI (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 17, p. 226-236.
- 西村 昭 (1983) 中部太平洋マンガンノジュール分布域の堆積物. 海洋科学, vol. 15, no. 7, p. 421-425.
- NISHIMURA, A. (1984) Deep-sea sediments in the GH 80-5 area in the northern vicinity of the Magellan Trough. In: S. NAKAO and A. MIZUNO (eds.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.* no. 20, p. 67-89.
- (1981) Deep-sea sediments in the GH 79-1 area: their geological properties. In: A. MIZUNO (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 15, p. 110-142.
- NISHIMURA, K., MORITANI, T. and NAKAO, S. (1981) Continuous seismic reflection profiling survey in the GH 78-1 area. In: T. MORITANI (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 17, p. 57-74.
- ONODERA, K. and MIZUNO, A. (1981) Bathymetry of the GH 79-1 area. In: A. MIZUNO (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 15, p. 45-56.
- PIPER, D.Z. and FOWLER, B. (1980) New constraint on the maintenance of Mn nodules on the sediment surface. *Nature*, vol. 286, p. 880-883.
- and GIBSON, C.N. (1981) Nodule growth rates in the GH 79-1 area. In: A. MIZUNO (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 15, p. 229-235.
- , LEONG, K. and CANNON, W.F. (1979) Manganese nodule and surface sediment compositions: DOMES Sites A, B, and C. In: J.L. BISCHOFF and D.Z. PIPER (eds.) *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province*, Plenum Press, N.Y., p. 437-473.
- SOREM, R.K., REINHART, R.H., FEWKS, R.H. and MCFARLAND W.D. (1979) Occurrence and character of manganese nodules in DOMES Sites A, B, and C, East Equatorial Pacific Ocean. In: J.L. BISCHOFF and D.Z. PIPER (eds.) *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province*. Plenum Pub. Co., p. 475-527.
- TAMAKI, K. (1977) Study on substrate strati-

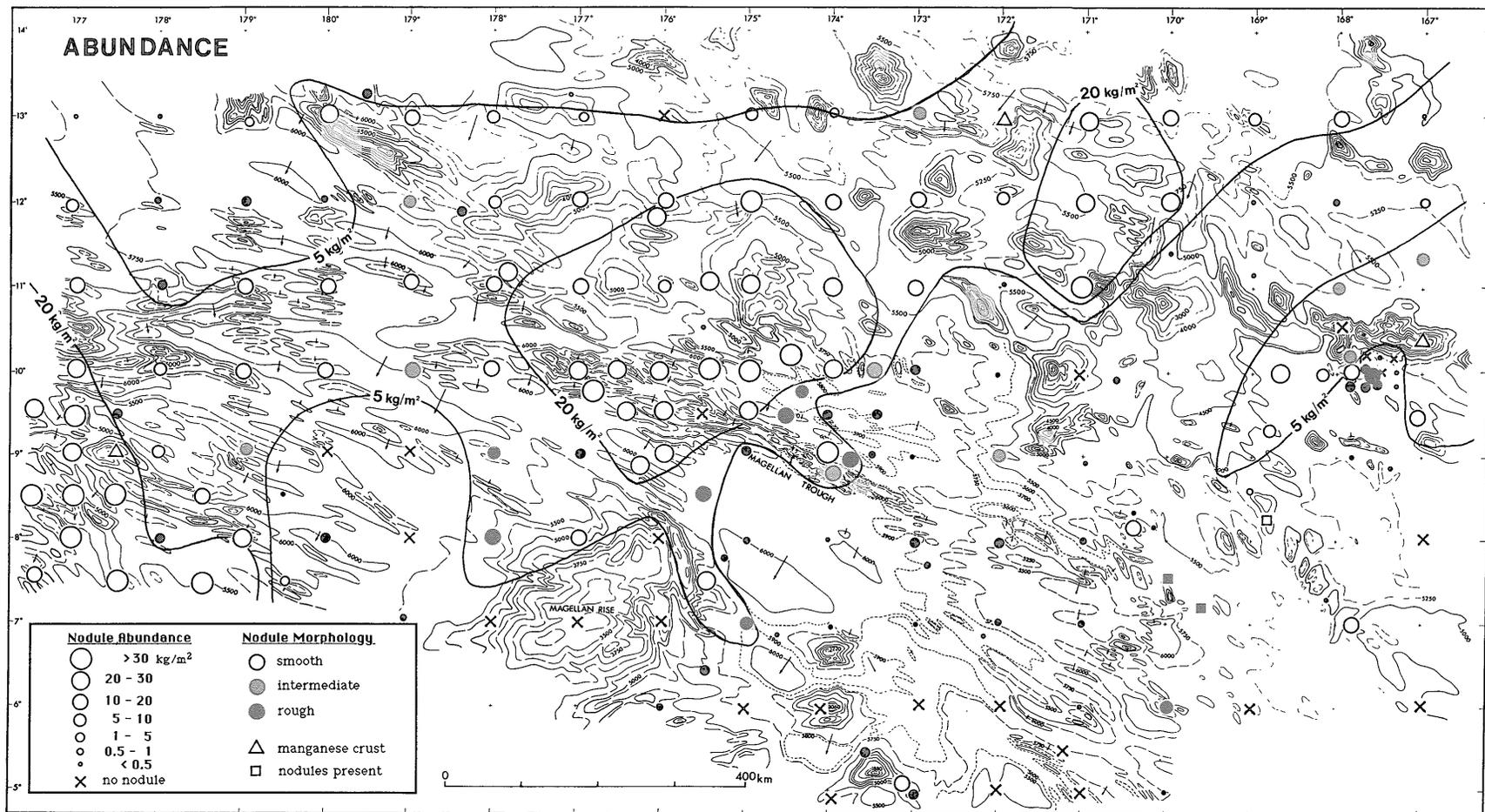
- graphy and structure by continuous seismic reflection profiling survey. *In*: A. MIZUNO and T. MORITANI (eds.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 8, p. 51-62.
- TAMAKI, K. and TANAHASHI, M. (1981) Seismic reflection surveys in the northeastern margin of the Central Pacific Basin. *In*: A. MIZUNO (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 15, p. 77-99.
- 寺島 滋 (1978) 原子吸光法によるマンガンノジュール中の Mn, Fe, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, Si, Al, Ca, Mg, Na, K, Ti, Sr の定量. *地調月報*, vol. 29 p. 25-36.
- TSURUSAKI, K. and HANADA, K. (1981) Geotechnical properties of deep sea sediments from the western part of Central Pacific Basin (GH 78-1 area). *In*: T. MORITANI (ed.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 17, p. 103-115.
- UCHIO, T. and HISHIDA, H. (1981) Manganese Micronodules and their associated surface sediments in the Northern Part of Central Pacific Basin (GH 79-1 Cruise). *J. Fac. Egr., Univ. Tokyo*, (B) vol. 36, no. 1, p. 249-281.
- (1982) Manganese micronodules and their associated surface sediments in the GH 80-1 area of the Central Pacific Basin. *J. Fac. Egr., Univ. Tokyo*, (B) vol. 36, no. 3, p. 617-645.
- USUI, A. (1979 a) Minerals, metal contents, and mechanism of formation of manganese nodules from the Central Pacific Basin (GH 76-1 and GH 77-1 areas). *In*: BISCHOFF, J.L. and PIPER, D.Z. (eds.) *Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Provinces*. Plenum Pub. Co., p. 651-679.
- (1979 b) Nickel and copper accumulation as essential elements in 10 Å manganite of deep-sea manganese nodules. *Nature*, vol. 279, p. 411-413.
- (1983) Regional variation of manganese nodule facies on the Wake-Tahiti Transect: morphological, chemical and mineralogical study. *Mar. Geol.*, vol. 54, p. 27-51.
- USUI, A. and MITA, N. (1987) Comparison of manganese nodules from the northeastern Equatorial Pacific (Cruise SO-25) to nodules from the Central Pacific Basin, *Geol. Jahr Buch*, in press.
- and MOCHIZUKI, T. (1982) Regional variation of manganese nodule chemistry from Wake to Tahiti, GH 80-1 cruise. *In*: A. MIZUNO and T. MORITANI (eds.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.*, no. 18, p. 338-354.
- and NAKAO, S. (1984) Local variability of manganese nodule deposits in the GH 80-5 area. *In*: S. NAKAO and A. MIZUNO (eds.) *Geol. Surv. Japan Cruise Rept.* no. 20, p. 106-164.
- , ——— and MORITANI, T. (1983) *Manganese nodules distribution in the Central Pacific Ocean*. *Geol. Surv. Japan Marine Geol. Map Ser.*, no. 21.
- , NISHIMURA, A., TANAHASHI, M. and TERASHIMA, S. (1987) Local variability of manganese nodule facies on small abyssal hills of the Central Pacific Basin. *Mar. Geol.*, vol. 74, p. 237-275.
- 臼井 朗・武内寿久禰・正路徹也 (1978) 深海底マンガン団塊の鉱物学的研究およびマンガン酸化物の合成—成因および地球化学に関連して—。 *鉱山地質*, vol. 28 p. 405-420.
- WINTERER, E.L., EWING, J.I., DOUGLAS, R.G., LAMCET, Y., MOBERLY, R.M., MOORE, T.C.Jr., ROTH, P.H. and SCHLANGER, S.O. (1973 a) Site report 165. *In*: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, U.S. Government Printing office vol. 17, p. 47-102.
- , ———, ———, ———, ———, ———, ——— and ——— (1973 b) *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, U.S. Government Printing Office, vol. 17, 930 p.

van ANDEL, Tj.H., HEATH, G.R. and MOORE,
Jr.T.C. (1975) Cenozoic history and
paleoceanography of the central
equatorial Pacific Ocean. *Geol. Soc.
Amer. Mem.*, no. 143, p. 1-134.

von STACKELBERG, U. (1982) Influence of

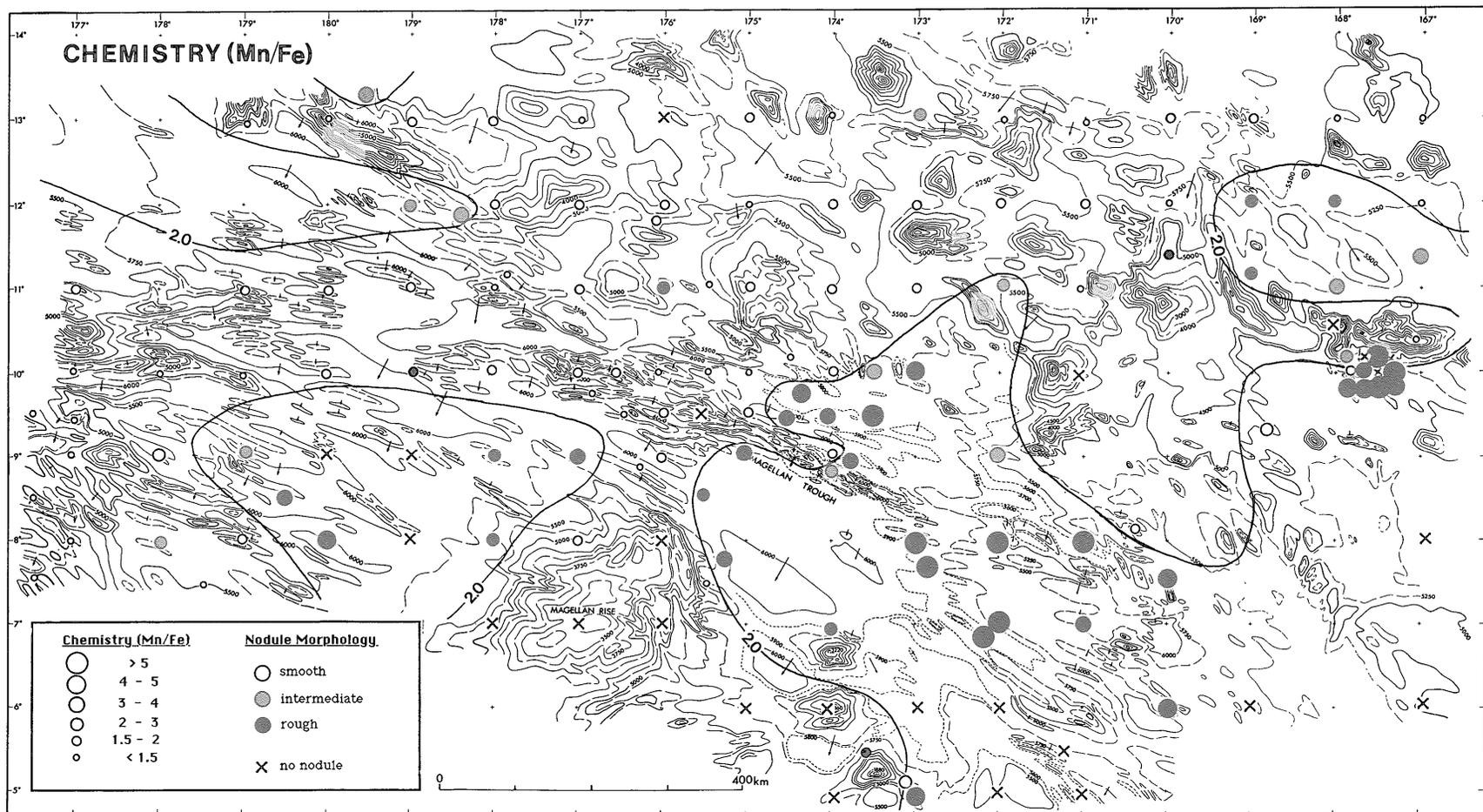
hiatuses and volcanic ash rain on the
origin of manganese nodules of the
Equatorial North Pacific (Valdivia
cruises VA-13/2 and 18). *Marine
Mining*, vol. 3, no. 3/4, p. 297-313.

(受付: 1987年3月19日; 受理: 1987年7月17日)



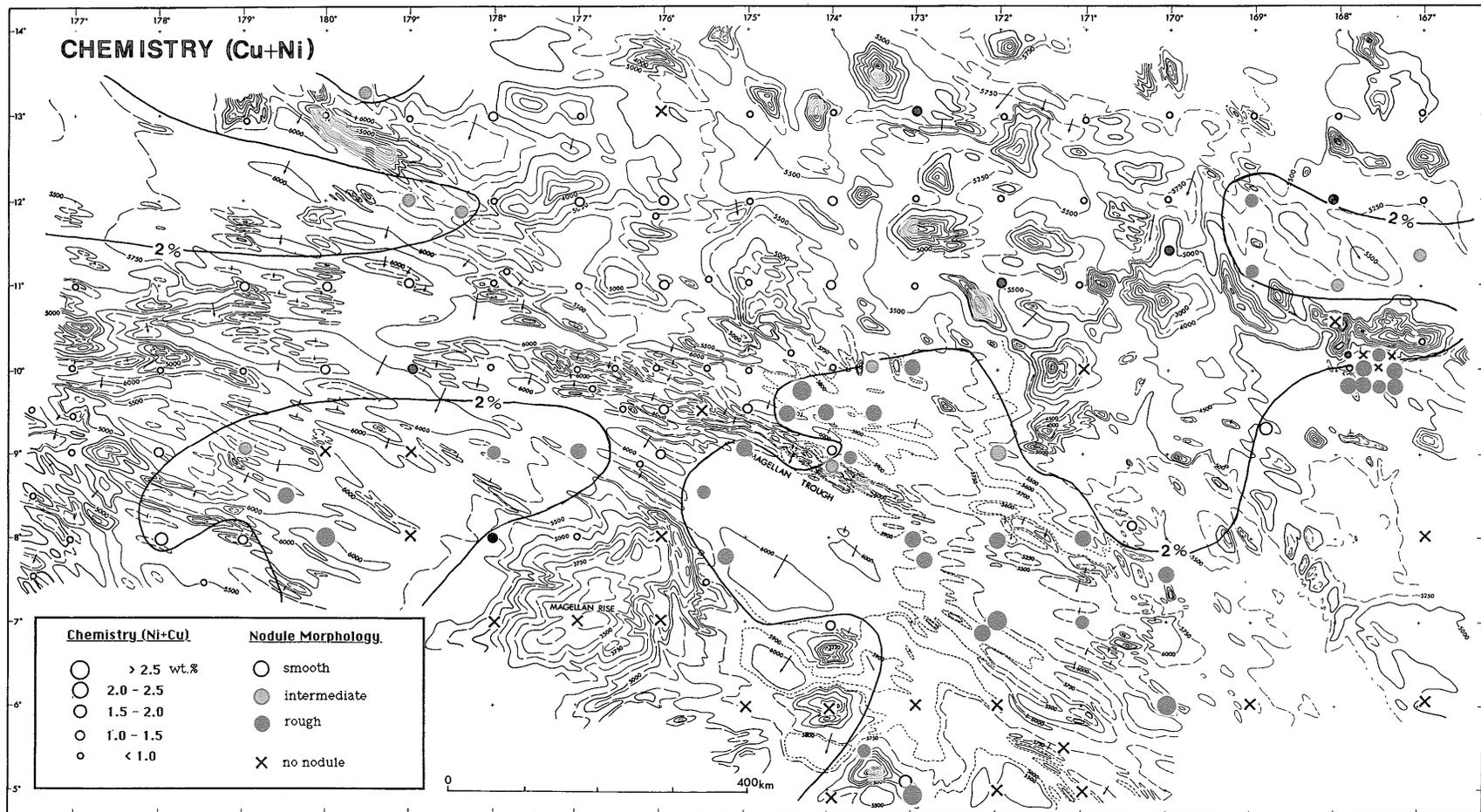
付図 A-1 マンガン団塊濃集率の広域的变化 (各定点での数回の採泥のうち最大の濃集率に基づく。以下の5枚の図の地形原図は ONODERA and MIZUNO (1981) による。)

Appendix A-1 Regional variation of nodule abundance. The nodule abundance on the map is represented as the maximum within each station. Base topographic map of following five figures is taken from ONODERA and MIZUNO (1981).



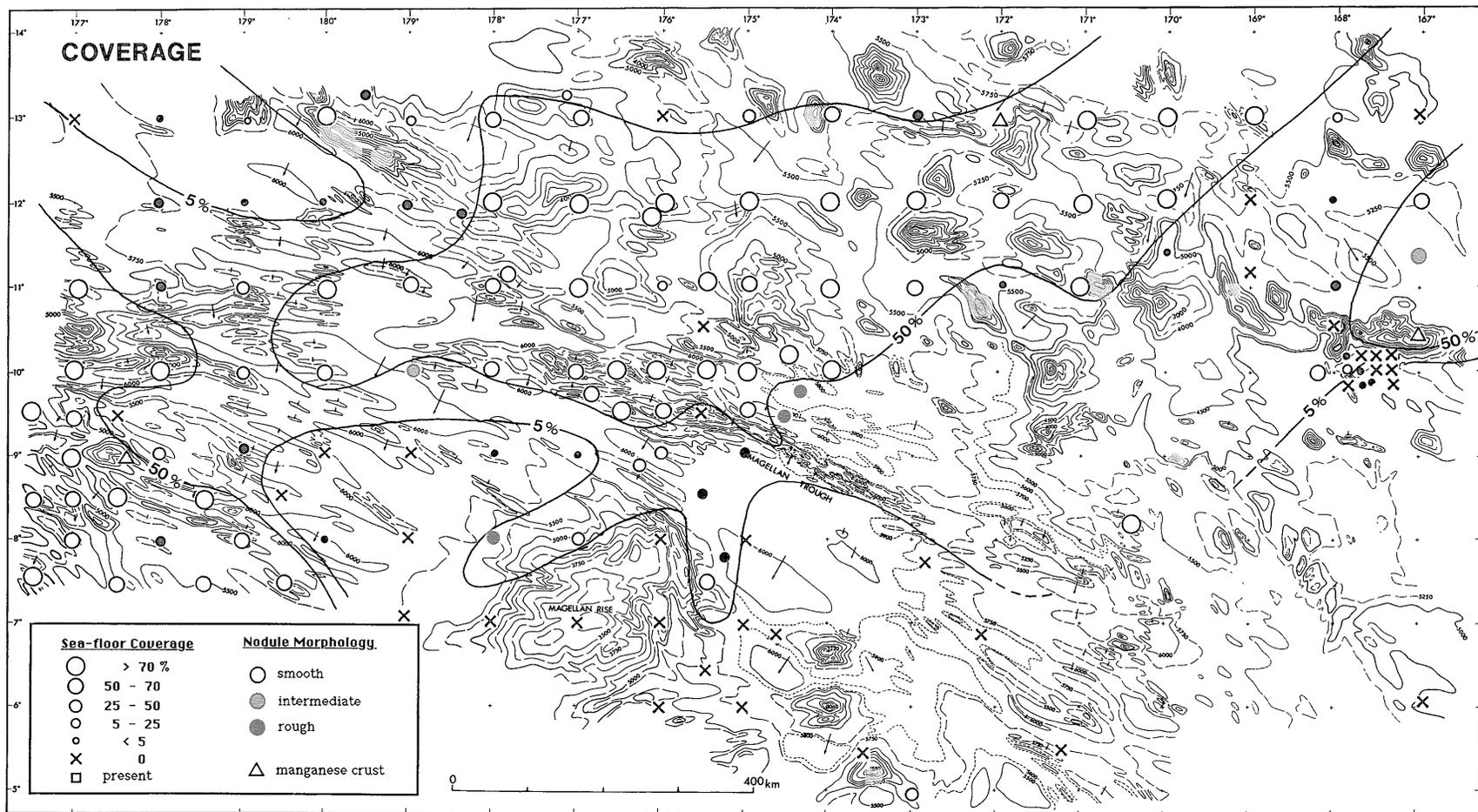
付図 A-2 マンガン団塊の化学組成 (Mn/Fe 比) の広域的变化 (各定点での Mn, Fe 各含有量の比に基づく。)

Appendix A-2 Regional variation of nodule chemistry (Mn/Fe). The ratio Mn/Fe is calculated from the arithmetic averages of metal contents within each station.



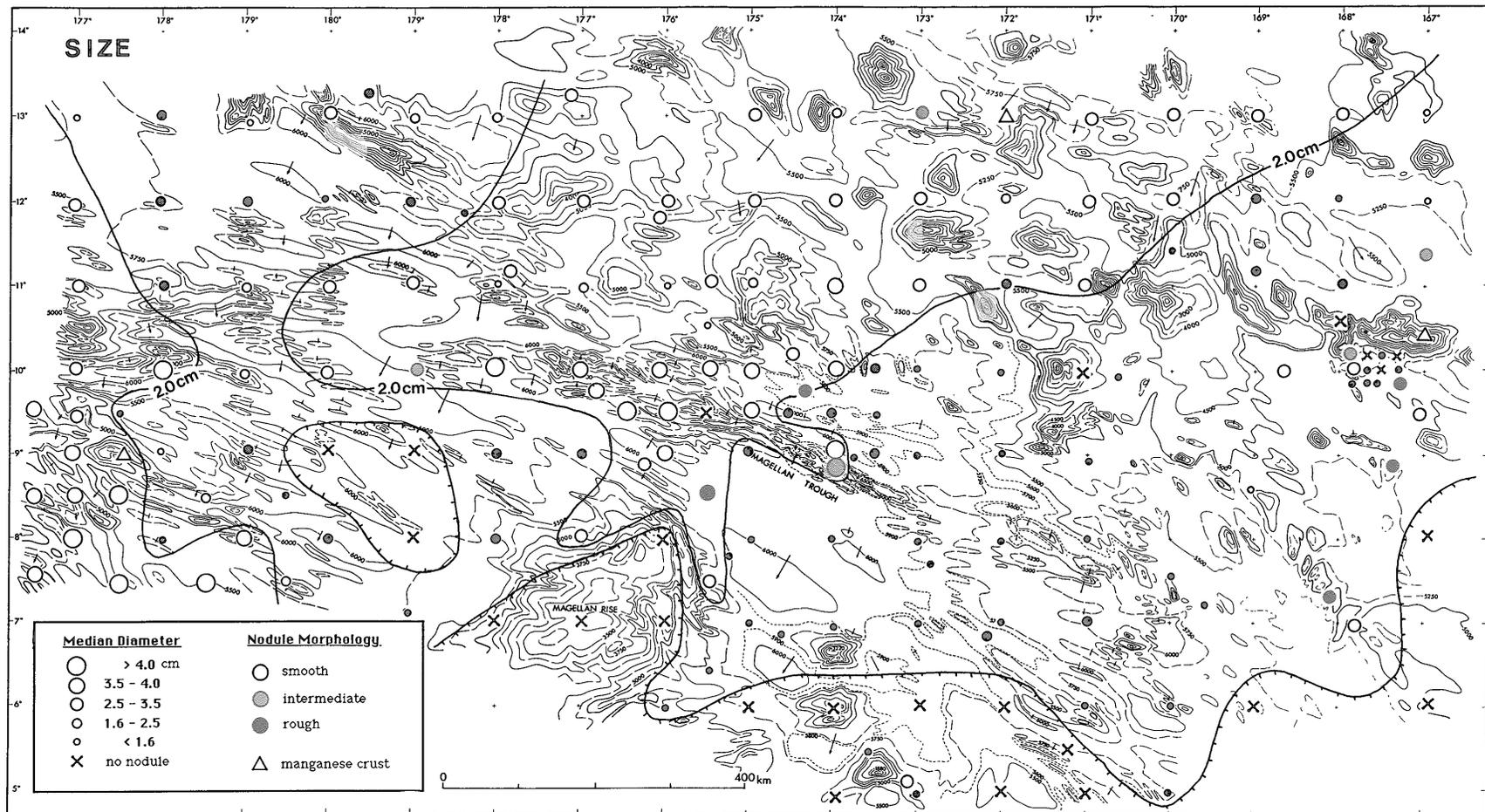
付図 A-3 マンガン団塊の化学組成 (Cu + Ni) の広域的变化 (各定点での Cu, Ni 含有量の和に基づく.)

Appendix A-3 Regional variation of nodule chemistry (Cu + Ni). The sum of Cu + Ni is represented as the average within each station.



付図 A-4 マンガン団塊の海底被覆率の広域的变化 (各定点において A-1 で用いた最大濃集率に対応する海底写真における被覆率を用いた。)

Appendix A-4 Regional variation of sea floor coverage of nodules. The coverage ratio corresponds to the maximum abundance within each station used in A-1.



付図 A-5 マンガン団塊の中央粒径値の広域的变化(各定点において A-1 で用いた最大濃集率に対応する試料の長径の頻度分布から算定した。)

Appendix A-5 Regional variation of nodule size. The size is calculated as median value of long axis from the frequency distribution of the maximum nodule abundance within each station used in A-1.