

海底熱水活動に伴う重金属資源の評価手法に関する研究 —昭和59年度研究航海（GH84-2 及びGH84-4）—

中尾 征三・湯浅 真人・野原 昌人・石原 丈実・宮崎 光旗・村上文敏
Seizo NAKAO Makoto YUASA Masato NOHARA Takemi ISHIHARA Teruki MIYAZAKI Fumitoshi MURAKAMI

西村 昭・岡村 行信・臼井 朗・山崎 俊嗣（海洋地質部）
Akira NISHIMURA Yukinobu OKAMURA Akira USUI Toshitsugu YAMAZAKI

渡辺 和明（技術部）・木下 泰正（海洋地質部）
Kazuaki WATANABE Yasumasa KINOSHITA

はじめに

1960年代の半ばに 紅海の凹地（ディープ）で発見された熱水性重金属泥は 学術的にも経済的にも 文字どおり熱い注目を浴び 最初の発見から15年を経過しないうちに 実際の開発対象になろうとしている。その中で 経済的に最も有望とされるアトランティスⅡ世ディープでは60km²の範囲内で 鉱量1億トン（亜鉛250万トン 銅50万トン 銀9,000トン等）が見込まれている。

一方 紅海と同様に海底拡大の軸部に相当する東太平洋海膨の各所でも 1970年代の末から 塊状硫化物鉱床の発見が相次いでなされてきた。マンガン団塊の場合と比較して 塊状硫化物鉱床は ①より浅い(2,500m程度の)海底に産する ②熱水活動が続く限り再生される可能性が高い ③陸地に近い海域に産するので 当該国が排他的に開発できる場合が多い等の利点が考えられたため 各界の関心は一挙に高まってきた。

紅海や東太平洋海膨は いずれも海底拡大の軸部に相当するが それらと類似した地球科学的条件を備えていると思われる縁海の拡大軸 及び海底火山の近傍にも熱起源の沈殿物（鉄・マンガン酸化物が主体）が発見されたり 水あるいは 塊状硫化物鉱床の存在を示唆する兆候が観測されたりしている。

地質調査所では 昭和49～53年度に工業技術院特別研究「日本周辺大陸棚海底地質総合研究」をまた その後昭和54年～58年度に同「日本周辺大陸棚精密地質に関する研究」を実施して 我が国周辺海域の地質の概要を把握するとともに 伊豆・小笠原海域における熱水性重金属資源賦存の可能性に関する概略的な資料を得た。同海域南方のマリアナ海域は 海底熱水活動を伴う背弧海盆の一例として 世界的に注目されているが 伊豆・小笠原海域では熱水性重金属資源を対象とする系統的な調査は実施されていない。そこで われわれは 伊豆・小笠原海域を対象として重金属資源の広域的な存在状況を調査するとともに 精密調査に必要な技術を確立し

て 海底重金属資源探査手法の体系化を図る研究を開始することにした。

この研究の対象となる海域は われわれが過去10年余にわたって実施してきたマンガン団塊の研究のフィールドである中央太平洋海盆等に比較して 水深こそ小さいが 逆に地形・地質は圧倒的により複雑である。このような海域では 伝統的な海底地質調査の技法を駆使するのみならず 部分的には開発途上にある最新の技法を導入することが不可欠である。

本年度は 主に伊豆・小笠原海域の北部を対象として 地質調査船「白嶺丸」による80日（40日×2回）の研究航海を実施した。その結果の概略をここに報告する。なお 調査海域の位置・地形の概略等を第1図に示した。

I 海底地形

12kHz 精密音響測深機を使用して 海底地形の断面調査を実施した。第2図に代表的な地形断面を示す。

この海域は 大局的には南北に伸びる3つの海嶺系すなわち 東に位置するものから順に 小笠原海嶺 七島一硫黄島海嶺（従来地質調査所クルーズレポート等では七島海嶺と略称している）及び西七島海嶺（地質調査所クルーズレポート等では伊豆海嶺と呼ばれている）からなる。小笠原海嶺の東には 伊豆・小笠原海溝が並走し また 西七島海嶺の西側には四国海盆がひろがっている。従来の地形・地質に関するデータから 小笠原海嶺は島弧系の外弧に また 七島一硫黄島海嶺は内弧であると同時に火山フロントに相当する考えられている。しかし最も西側の西七島海嶺については その性格が判明していない。

八丈島から西之島に至る七島一硫黄島海嶺の西側には凹地が断続してみられ 玉木他（1981）は これらが背弧拡大を行っている可能性の強い海盆であることを指摘した。今回の地形観測によって これらの凹地の形状等が明らかになった。これらの凹地は 北から八丈

第1表 各カルデラの直径および外輪山の比高

カルデラ注)	長 径	短 径	外輪山の比高
1	12.0km	6.8km	430m
2	6.8km	5.2km	1,010m
3	9.6km	8.2km	820m

注) カルデラの番号は本文のカルデラの番号と一致する。

凹地 スミス凹地 鳥島凹地及び西之島凹地と呼ばれている(玉木他1981)。いずれの凹地においても水深は北から南へと深くなる。また各凹地全体の水深も八丈凹地-1,000~1,500m スミス凹地-2,000~2,200m

鳥島凹地-2,300~2,900m さらに西之島凹地-3,400~3,800mのように南に位置するものほど大きい。さらに凹地の幅も南のものほど広い。4つの凹地のうち北側の3つ すなわち八丈凹地 スミス凹地及び鳥島凹地はほぼ東西に伸びる凹地内の小規模な高まりによってそれぞれさらに2つの凹地に分けられる。

今回の調査で火山島列(火山フロント)沿いの海域で3つのカルデラ地形が発見された。北から 1.青ヶ島カルデラ 2.明神礁の北西方約25kmのカルデラ及び 3.スミス島カルデラの3つである。第1表に各カルデラの直径とカルデラ底と外輪山との比高を示す。七島-硫黄島海嶺では火山島及び海山の配列がほぼ南北であるが西七島海嶺ではいくつかの海山列がNE-SW方向の雁行状に配列され各雁行山脈の間には四国海盆側に開いた谷が存在する。

II 重力異常

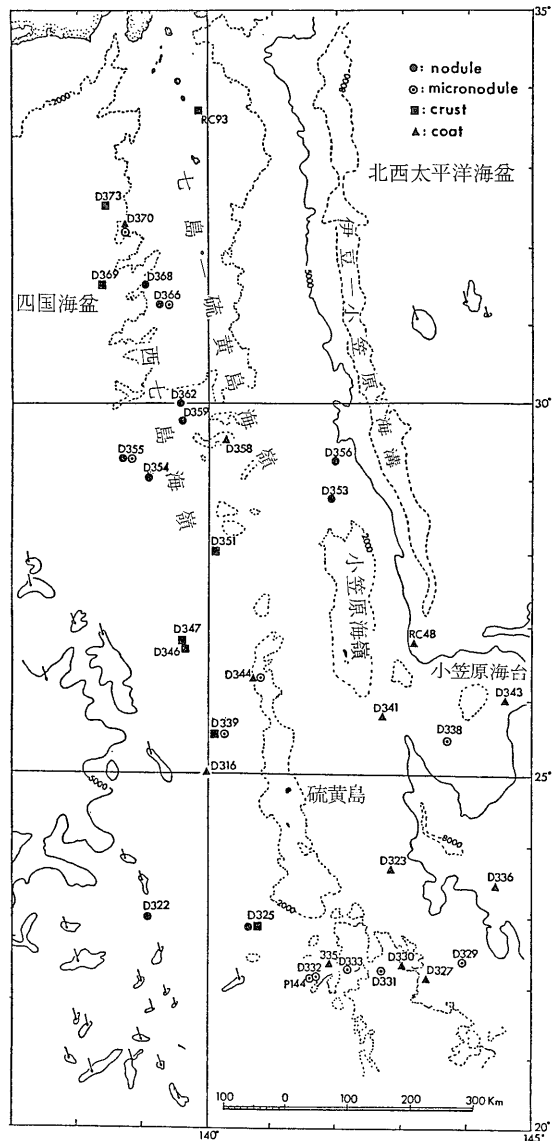
調査海域を北部と南部にわけてフリーエア重力異常を第3図(左,右)に示す。背弧凹地の中央沿いにフリーエア低異常の中心が点在する(32°15'N付近 31°10'N付近 30°50'N付近 30°05'N付近 29°35'N付近 29°20'N付近等)。これらがたとえばマグマ溜りのような地下構造を反映しているのかあるいは近傍の地形的高まりとの間での相対的な低異常かについてはさらに詳細な検討を加える必要がある。

調査海域の北西部をENE方向に伸びる地形的高まりに対応してフリーエア高異常が存在する。

多数の海山に伴うフリーエアの高異常からそれぞれの海山の密度が計算できるはずであり現在その解析方法を検討している。

III 地磁気異常

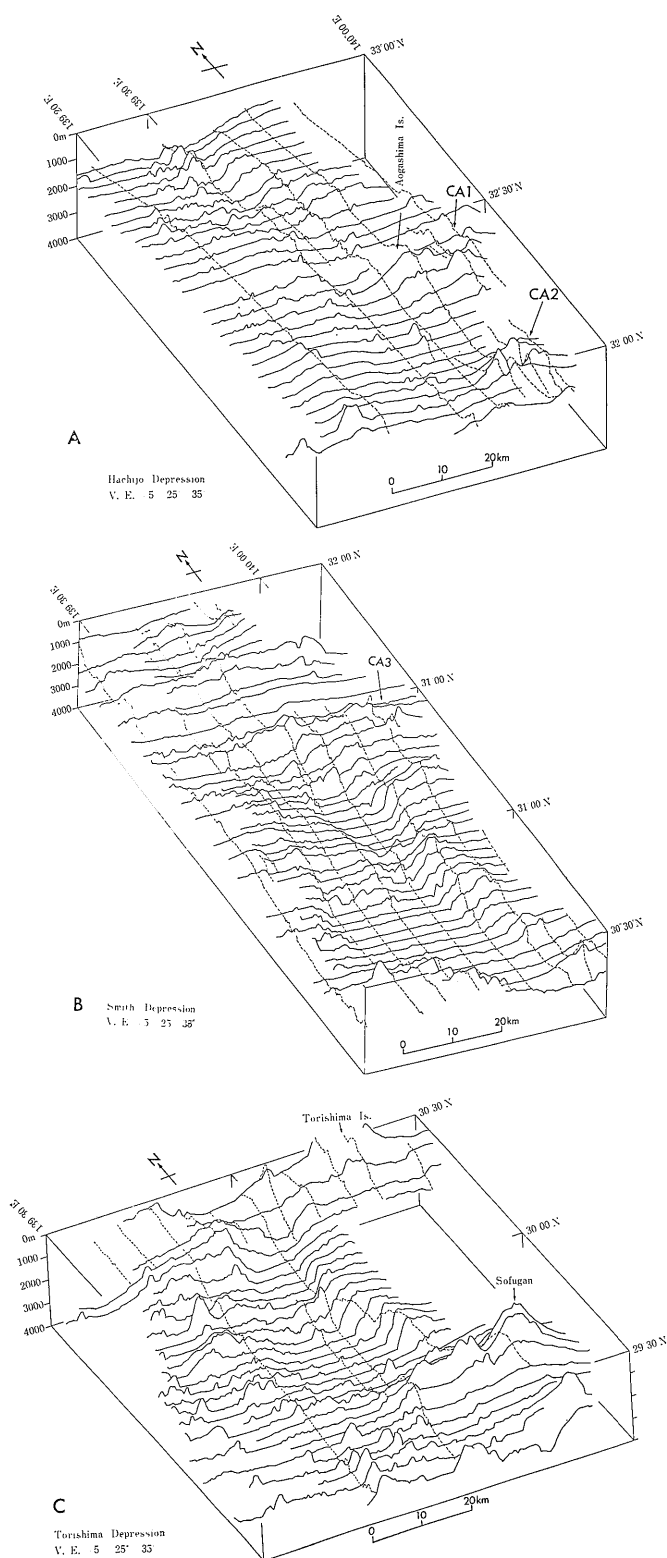
調査海域の地磁気異常の様子を北部と南部にわけて第



第1図 調査海域の位置・地形の概略。

図中の番号は従来の調査でマンガン団塊等が採取された地点を示す。

4図(左,右)に示す。最北部の32°40'N~33°Nには500nTを越すN-SないしNNW-SSE方向で少しづつずれる細い3列の正異常帯が認められる。これは背弧凹地内の最も新しい玄武岩地殻の強い磁化によるものではないと思われる。これより南の背弧凹地内には明瞭な線状異常は認められず異常の走向もNEあるいはENEが卓越する。南部で明瞭な線状異常が認められないのは単に水深の増大に伴う地磁気の減衰によるものかもしれない。この問題は海底近傍での測定を行えば解決されるであろう。南西部ではNNE-SSW方向に2列の谷地形が発達するが28°40'N以南では



第2図 八丈島から孺婦岩までの代表的海底地形断面。
 A：八丈凹地の海底地形断面。 CA1 CA2はカルデラを示す。
 B：スミス凹地の海底地形断面。 CA3はカルデラを示す。
 C：鳥島凹地の海底地形断面。
 海底地形断面の縦・横比は5：1である。
 南南西の方向から35度の角度で見おろした図である。

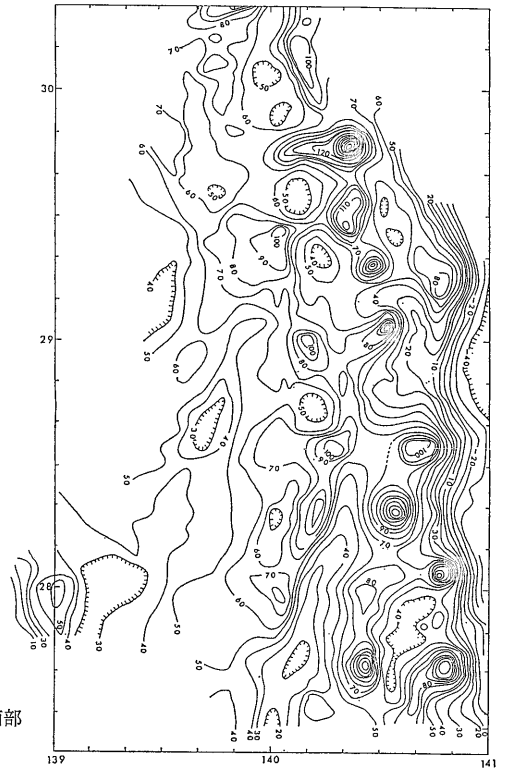
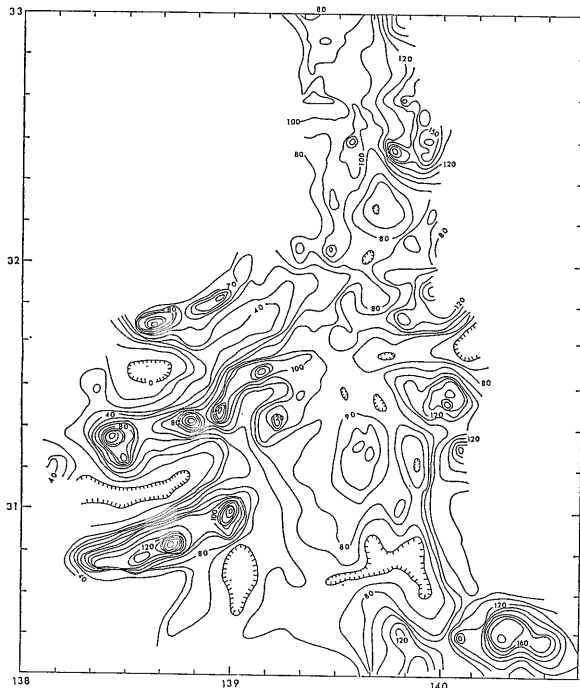
その中間に地形の伸びにほぼ直交する E-W あるいは WNW-ESE 方向の線状磁気異常が認められる。 その振幅は大きくないが(400-500nT) この部分の海底が NNE-SSW 方向に拡大した時に形成された海洋地殻の線状異常かもしれない。

海山に伴ってみられる磁気異常は 通常 正帯磁している時に得られる異常のパターン (南側に正 北側に負) に近いが 28°40'N 140°40'E 付近の海山では 東北東側に負 西南西側に正の異常がみられる。

IV 海底熱流量

地質調査所では 従来 中部太平洋で 8 m 長ピストンコアにサーミスタを装着して 海底熱流量を測定していた。 しかし 当海域では 一般に堆積物の発達が貧弱で かつ粗粒なものが優勢であるため 2 m 長のグラビティコアによる測定を試みた。 その結果 (1)水深2,000 m 以深では 海底表層 1 ~ 2 m での温度勾配を測定することによって 現在必要とされる精度の熱流量の計算が可能であり 底層水温の変動等に起因する誤差は少ないこと (2)粗粒堆積物とくにスコリア層等に貫入した時に発生する大きな摩擦熱の影響を除去する補正方法はほぼ確立されているが 最適な方法を確立するためには なお若干の検討が必要であることなどが明らかになった。

現場での熱流量測定は 44点 (2 m 長グラビティコア 30点 4 m 長ピストンコア 14点) に 及び 38点で有効なデータを取得した。 以下に地形・地質上でまとめられる小区域毎に熱流量の特徴を列挙する。



第3図 調査海域のフリーエア重力異常図 (単位: mgal). (左)北部(右)南部

鳥島凹地 (8点) 200mW/m^2 (5 HFU) という高い熱流量が見られる反面 $20\sim 30\text{mW/m}^2$ の点もある。またいくつかの地点では 非直線の温度勾配を示している。これらの点から判断して 熱水鉱床生成の基本的条件のひとつである熱水循環系が存在することは ほぼ確実である。

火山フロント付近 (6点) 普通ないし高い熱流量が測定され 本年度の調査海域中の最高値 280mW/m^2 (7 HFU) が礫岩の南西で観測された。

西之島北方の凹地 (4点) データが少ないが $40\sim 50\text{mW/m}^2$ と分散し 鳥島凹地とよく似ている。

火山フロント西側の雁行状に発達する谷 (18点) 西之島凹地のすぐ西の谷で 100mW/m^2 程度である他は全体に低い。とくに $29^{\circ}00'N139^{\circ}50'E$ 付近から南南西に伸びる大規模な谷では $0\sim 25\text{mW/m}^2$ (7点) 以下という異常に低い熱流量が観測された。

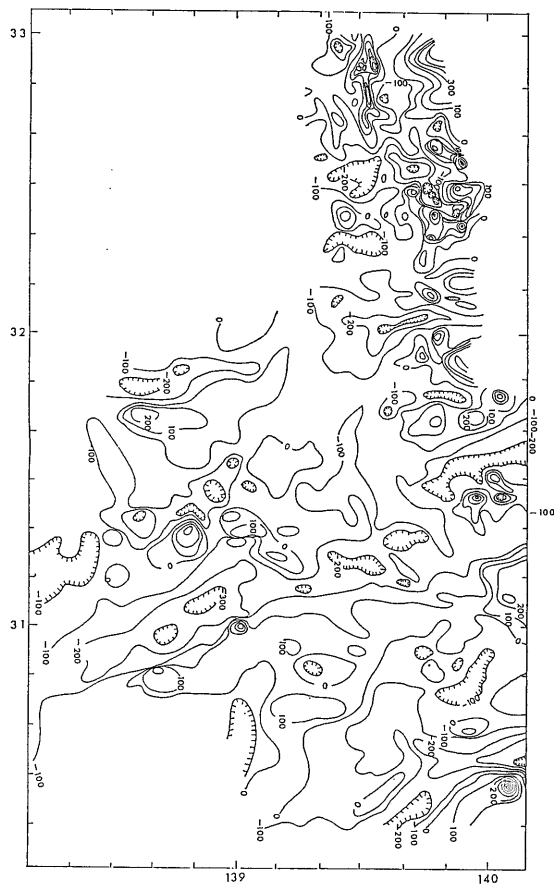
小笠原舟状海盆 (1点) 小笠原舟状海盆は火山フロントの東側 (外側) に位置するが 予想に反し高い熱流量 (180mW/m^2) が観測された。海溝付近での低熱流量

域と火山フロント付近での高熱流量域との間の熱流量分布を求めることは 島弧-海溝系の熱流量に関する重要な課題であるので 貴重なデータと考えられる。

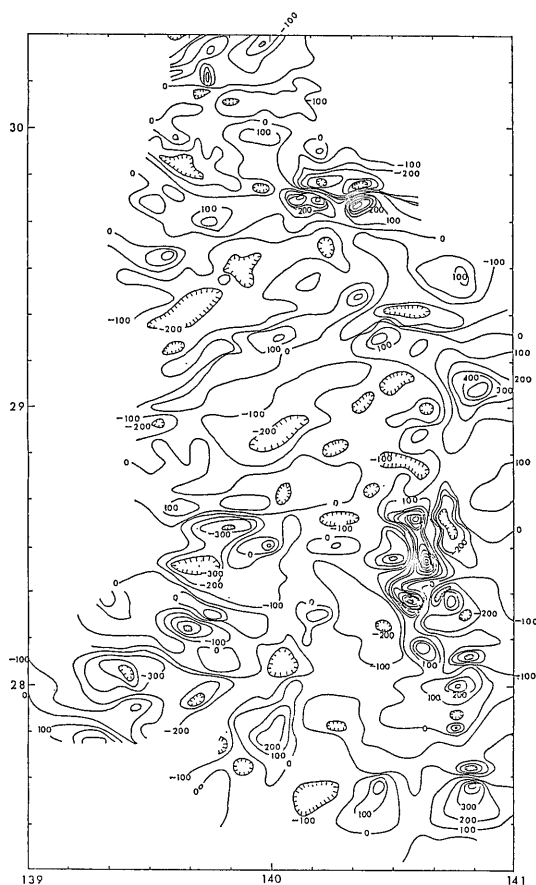
V 地質構造探査

エアガンサイスマックプロファイラを使用して 八丈島南方から西之島北方までの地質構造探査を実施した。同時に 3.5kHz サブボトムプロファイラによる表層の構造探査を行った。探査測線は 七島-硫黄島海嶺域では $2\sim 3$ マイル間隔 また 西七島海嶺域では 4 マイル間隔の短冊状とした。七島-硫黄島海嶺上の音響的層序は 上位からユニット I ユニット II 及びユニット III の3つに区分される。ユニット I は 七島-硫黄島海嶺の東側斜面で良く発達し あまり変形を受けていない。ユニット II は 大半が東西方向の小規模な褶曲構造を示すが これらの褶曲構造は断層によって分断されている。ユニット III は 音響的基盤であり 非成層または不連続的な成層状である。以下に いくつかの重要な地形单元ごとの地質構造の特徴を述べる。

スミス凹地 スミス凹地は 南北2つの堆積盆からなる。両堆積盆は 起伏に富む東西性の高まりによって境



第4図 調査海域の地磁気異常図(単位:nT)。(左)北部



(右)南部

されている。堆積層の層厚は 北側の堆積盆で最大0.5秒程度 南側では1秒に達する。南側の堆積盆ではユニットIIを切るいくつかの断層が観察され その一部は最表層をも切っている(第5図及び第6図)。これはスミス凹地における構造運動が現在も活発であることを示している。

鳥島凹地 スミス凹地と同様に2つの堆積盆に分けられる。北側の堆積盆に比較して南側の堆積盆の方が幅が広く 堆積層も厚い。鳥島凹地における堆積層の厚さは最大0.6秒程度であり 地層の傾斜は東傾斜が卓越する(第7図)。凹地の東側の壁は 連続した急傾斜の断層崖によって形成されている。この断層崖も孀婦岩の北側で途切れ 凹地の形も不明瞭になる。

西之島凹地 西之島凹地の西端は 急傾斜の断層崖からなり その頂上から麓までの落差は1,000mにも達する(第8図)。この断層崖の傾斜は北へ行くほど緩くな

1985年3月号

る。凹地内の堆積層は南へ行くほど厚くなり 最大1秒以上に達する。この断層崖は 孀婦岩構造線(湯淺1983)の一部に相当する。

カルデラ 今回の調査で 火山島列(火山フロント)沿いの海域で3つのカルデラ地形(海底地形の項参照)が発見された。それらのエアガンパイロファルを第9図に示す。青ヶ島カルデラでは 最大0.5秒程度の層厚を持つ堆積層がみられる。明神礁北西方のカルデラでは堆積層が薄く また カルデラ底に中央火口丘がみられる。スミス島カルデラには 0.3秒程度の厚さの堆積層がみられる。カルデラ内の堆積層の厚さは カルデラの直径が大きい程厚いようにみえる。

VI 海底試料採取

通常海底地質調査と同じく 地形の高まりや斜面において ドレッジにより構成岩石を採取し また 凹地

や平坦地形あるいは比較的緩傾斜の斜面において ロックコアラ (2m長) やピストンコアラ (4m長) により堆積物・堆積岩を採取した。さらに 海山上のマンガンノジュール クラストの分布域では 海底写真を撮影するため 深海カメラ付スミスマッキンタイヤ・グラブ採泥器を使用した他 新しく現地性岩石を採取するために製作した採岩器 (第10図) を試験的に使用した。

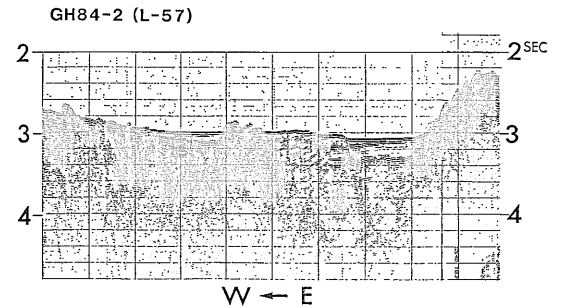
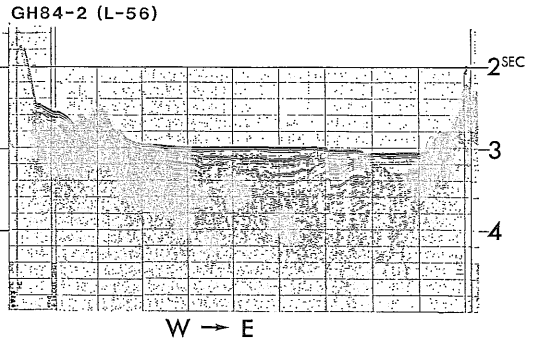
採泥点数を第2表に示した。GH84-4 航海ではほとんど全ての柱状採泥地点で コアバレルに温度センサーを装着して熱流量を測定した。

採岩器の試験使用では GH84-2 航海においては3回の使用で いずれも作動したが試料は採取されず プレードに取付けた鋳鉄製の刃が破損した。この航海後刃の幅を広げ また 単発の深海カメラを装着できるように改造した。GH84-4 航海では3回使用し 2回は成功したが 新鮮な露岩が撮影された地点では試料は採取されなかった。

1. 堆 積 物

調査海域の背弧凹地では 堆積物が存在する場合でも粗粒の火山灰層のため 柱状試料の採取は困難で採取長が1m未満のことも多かった。採取した試料は 船上で1mごとに切断した後 半割りにして断面の写真撮影 肉眼記載 スミアスライド作製 同顕微鏡観察 スライス試料作製 同軟エックス線写真撮影を行った。

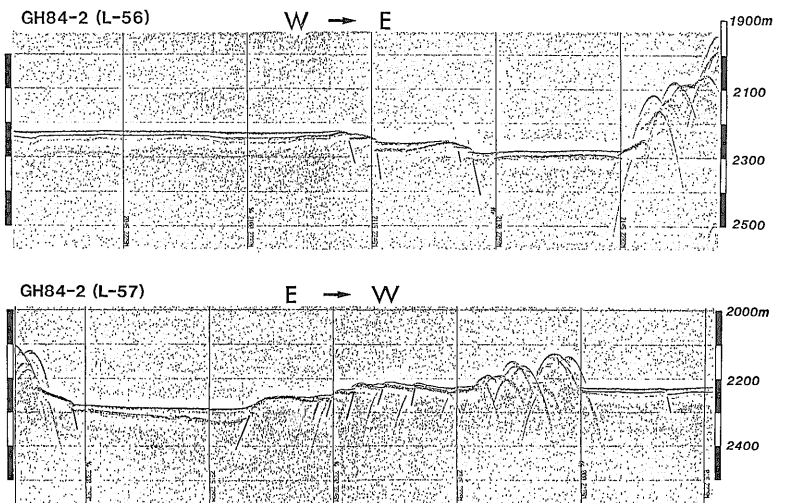
火山起源の堆積物が多く 黒色スコリア層 白色～ゴマシオ状軽石層 灰色の細粒火山灰層がよくみられる。これらは 採取地点近くの七島-硫黄島海嶺での火山活動に由来すると思われ 柱状試料中での分布状態は 最近の火山活動の様子を示す。砂粒径以上のスコリア

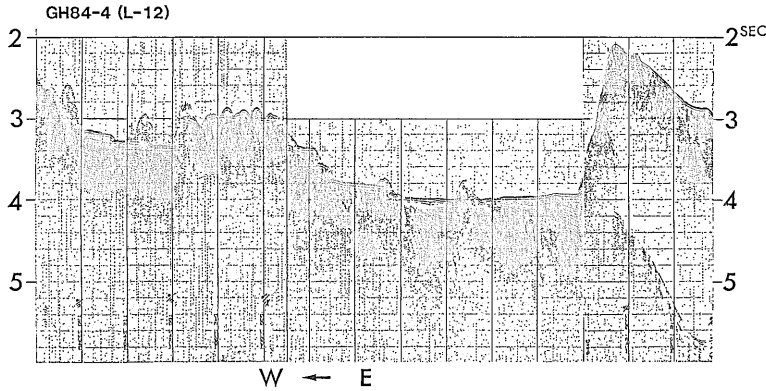


第5図 スミス凹地南側堆積盆におけるエアガン音波探査記録断面。

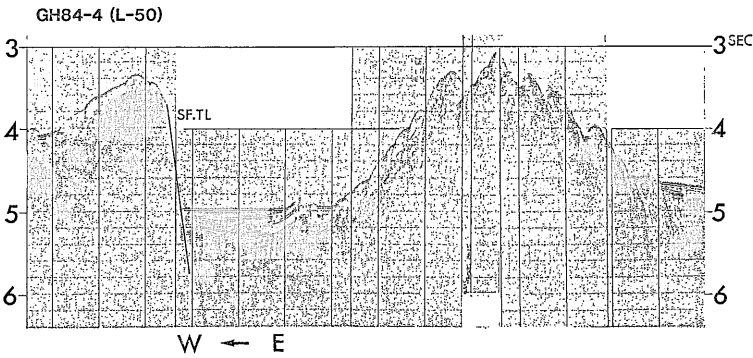
軽石層の目立つものの分布をみると 地域的にかたよりのある。軽石層が集中して分布するのは 八丈島南西方である。スコリア層は 青ヶ島南西方 鳥島-嬬婦岩西方 西之島北西方である。火山列より東側では 採泥点がほとんどないが 同様に分布していると予想される。スミス島付近 西之島-嬬婦岩の中間付近には 目立つ粗粒の火山灰層は少ない。

第6図 スミス凹地南側堆積盆における 3.5kHz 表層探査記録断面。表層堆積層は断層によって切られている。その位置を実線で示す。





第7図
鳥島凹地におけるエアガン音波探査記録断面。



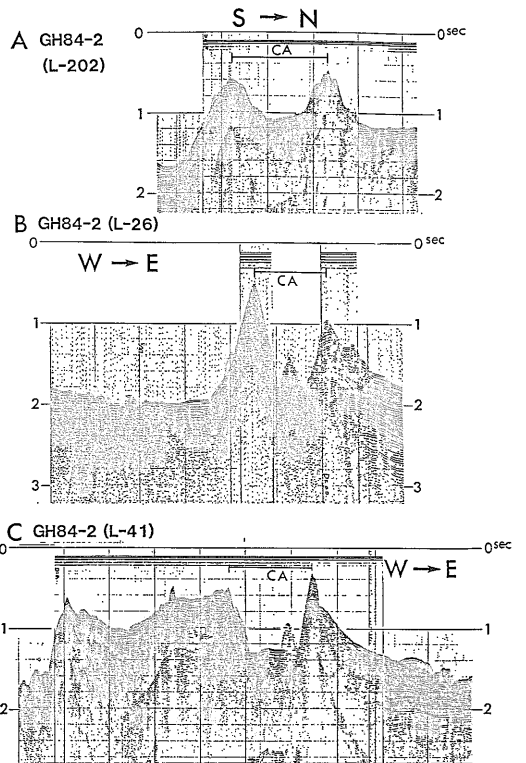
第8図
西之島凹地におけるエアガン音波探査記録断面。SF.TLで示される太線は壱婦岩構造線の位置を示す。

第9図
カルデラを横切るエアガン音波探査記録断面。各断面においてCAで示す範囲がカルデラの部分を示す。A：青ヶ島カルデラ B：明神礁北西方のカルデラ C：スミス島カルデラ

火山起源以外の堆積物の構成物は生物殻である。採泥点が CCD (方解石補償深度) より浅いので全体に石灰質で 石灰質ナノ化石 浮遊性有孔虫が多いが 放散虫 珪藻 海綿骨針も普遍的にみられる。水深の比較的大きい凹地や平坦地では 石灰質ナノプランクトンが目立って多いが 海山頂部のコア中には 浮遊性有孔虫が多い。火山灰層でない通常の堆積物の色は オリーブ灰色～灰色で 海底面付近に茶褐色の酸化帯がある。海山頂部で採取された RC347及び348はナノ有孔虫軟泥からなっていて 海底表層とコア中のいくつかの層準にマンガン団塊を産する。予察的検討では コア中にいくつかのハイエイタス(堆積間隙)があり 上部鮮新統～下部更新統を欠いている。従来 日本近海産のマンガン団塊で 堆積物との関係が判明しているものは少ないので 埋没したものも含めて 今後の良い研究材料となろう。

2. 岩石

主としてドレッジにより採取された岩石のほとんどは火山岩及び同起源の堆積岩であり 火山岩中の捕獲岩及び礫岩中の礫として 珪長質深成岩が得られた。現在までのところ 顕微鏡観察をすませただけであるが 火



第2表 海底試料採取点数一覧

	GH84-2 航海	GH84-4 航海
観測点数	131 (St 4124-4254)	79 (St 4622-4700)
ドレッジ	51 (D 062-652)	31 (D 659-689)
ロックコア	57 (RC 292-348)	31 (RC 349-379)
ピストンコア	2 (P 415 & 416)	14 (P 439-452)
採岩器	3 (RS 1-3)	3 (RS 4-6)
スミスグラブ採泥器	18 (G 2309-2326)	—
熱量測定	—	44 (H 108-151)

山岩の苦鉄質斑晶鉱物組合せについて 次のような地域性の存在が明らかになった。

七島一硫黄島海嶺 伊豆・小笠原弧の火山フロントであるこの海嶺の北部には シソ輝石+普通輝石の斑晶鉱物組合せをもつ安山岩・玄武岩が集中的に分布する。しかし 孺婦岩と西之島との間に位置する D679 (28°35'N付近の海山) 測点以南の海山で採取された岩石は通常 普通輝石+かんらん石の組合せをもつ玄武岩でシソ輝石を含む例は少ない。

また 新たに認められた明神礁北西方のカルデラ およびスミス島カルデラの中央火口丘にあたる高まりから普通角閃石を含む普通輝石シソ輝石デイサイト およびシソ輝石デイサイトがそれぞれ採取された。

西七島海嶺 この海域の火山岩(安山岩・玄武岩)の斑晶鉱物組合せは 普通輝石+かんらん石の場合が多く シソ輝石+普通輝石の組合せはまれである。また 2測点で角閃石デイサイトが採取された。このデイサイト中には 黒雲母を含むものもある。さらに 西七島海嶺西端の2測点(D628及びD633 31°00'~31°30'N)から得られた堆積岩(砂岩 シルト岩)中には 碎屑粒子として 角閃石及び黒雲母が含まれている。角閃石は 七島一硫黄島海嶺では捕獲結晶あるいは捕獲岩中の鉱物としてのみ産する。

背弧凹地 青ヶ島南西の凹地で3点 スミス凹地で1点及び鳥島凹地の2点で採取された岩石(玄武岩)は いずれもかんらん石を斑晶として含むことが特徴である。普通輝石も斑晶としてしばしばみられるが シソ輝石の出現は少ない。

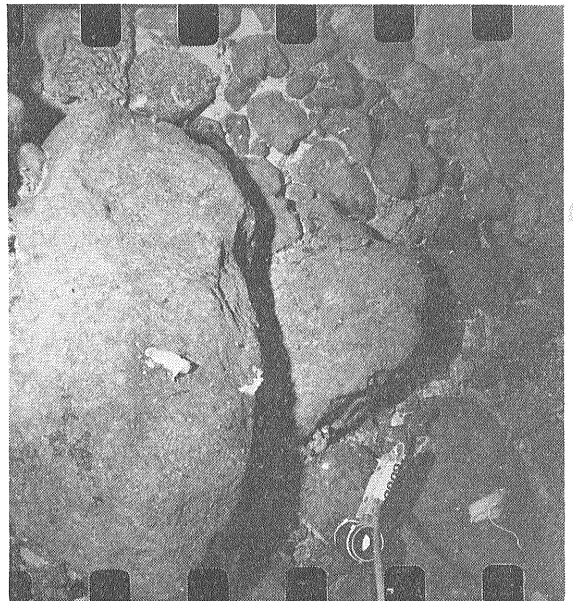
3. マンガン酸化物

マンガン団塊 西七島海嶺の海山頂(29°15'N38°40'E)付近の数点でスミスマッキンタイヤ・グラブ及び大口径ロックコアラにより 直径 2-3cm のマンガン団塊が採取された。

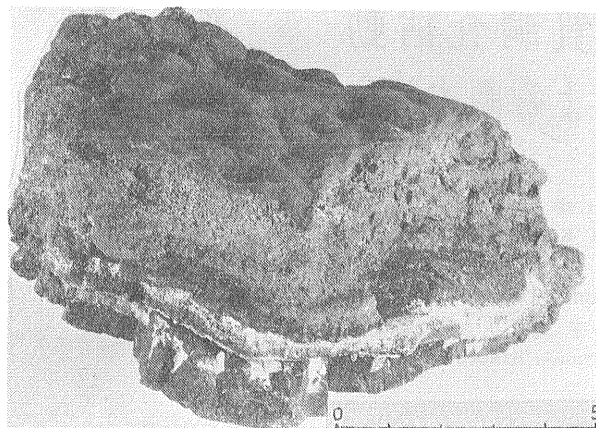
マンガン団塊の最大賦存率は15kg/m² 最大被覆率は



第10図 現地性岩石を採取するために製作された採岩器。



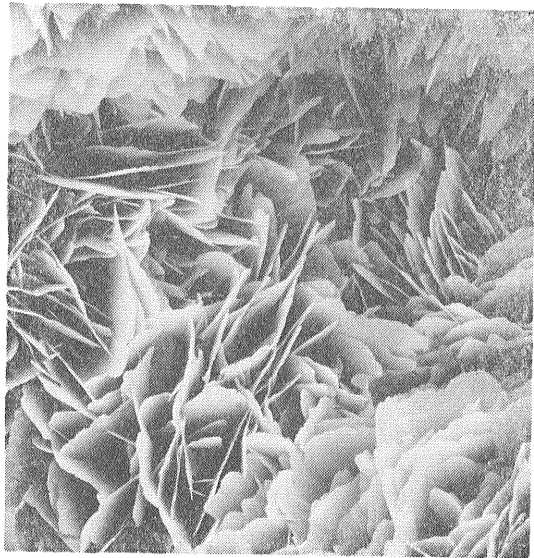
第11図 西七島海嶺でマンガン・クラストが採取された D634 地点付近の海底写真。



第12図 D634 地点で採取されたマンガン・クラスト。(スケールバー: 5 cm)

60%である。核が大きく しばしば円礫を含む特徴がある。肉眼観察では鉄含有量の高い深海底 s 型に対応するものと思われる。表層堆積物は 第四紀の有孔虫軟泥である。近傍のロックコア (RC 347 コア長約 1 m) には表層の他に 5つの深度で 直径 1-2cm の埋没団塊が また 最下部に厚さ 4 cm 以上のクラストが採取された。

岩石被覆及びクラスト ドレッジにより岩石試料を採取した41地点のうち 27地点でマンガン酸化物の被覆(単独で塊状にならない薄いもの)あるいはクラストが認め



第13図 D634地点のマンガン・クラスト中の todorokite 結晶(走査電顕写真)。写真の短辺(高さ)が 120 μ m。

られた。調査海域全体では 西側で厚い傾向がありクラストは西七島海嶺でのみ採取された。西七島海嶺の2つの海山(31°30'N138°21'E 及び 31°23'N138°48'E) 第11図)から採取されたクラストのうち とくに後者のもの(D634 及びD637)は 産状(鉱染状 塊状 繊維状等)含有鉱物(結晶度の高い todorokite goethite pyrolusite nontronite)及び化学組成(マンガン酸化物中の副成分の遷移元素—Cu Ni Co等—が極めて少ない)の特徴が 大洋中央海嶺(MOR)などの熱水性マンガン酸化物や陸上の浅熱水性マンガン鉱床と酷似するので 熱水起源のものと判断して差支えないであろう。ただし クラスト最表層に海水から直接沈殿すると考えられている δ -MnO₂ の被覆がかなり厚く発達するので その熱水活動が 現在続行している可能性は小さいものと思われる。第12図に D634 で採取されたクラストの外観を また 第13図に同サンプルに含まれる結晶度の良い todorokite の走査電顕写真を示す。

おわりに

今年度は この研究の初年度にあたり ほぼ伝統的な海底地質調査法によって 研究対象海域の北部の広域的な調査を実施した。七島—硫黄島海嶺(火山フロント沿い)海域で新たに発見された3つのカルデラのうちの1つで軽石質堆積物表面に鉄酸化物の薄層が沈積していることや 西七島海嶺に属する海山の一部に熱水性の特徴をもつマンガン酸化物の分布することが明らかになった。今後 室内で得られるデータによって 熱水活動の時代や性格 あるいはその背景となっている地質構造発達史を解明して行くとともに 今後2年間の広域的な調査によって 研究対象海域全域における熱水活動の存在状況を明らかにする予定である。

引用文献

- 玉木賢策・井上英二・湯浅真人・棚橋学・本座栄一(1981)
小笠原弧の第四紀背弧拡大活動の可能性について。
月刊地球, vol. 3, p. 421-431.
湯浅真人(1983) 伊豆・小笠原弧の地学現象にみられる南北
対立。月刊地球, vol. 5, 459-463.